



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

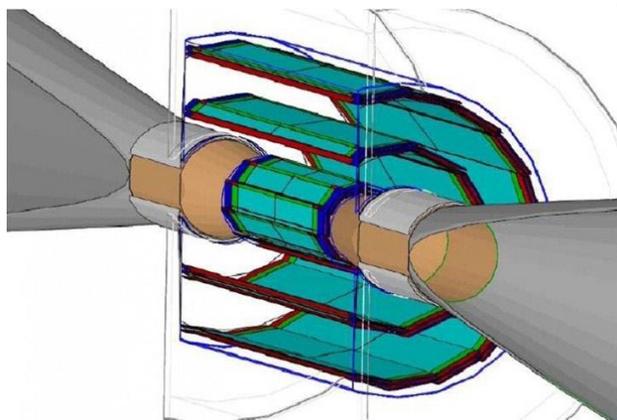
2016年7月26日 ILC夏の合宿
東北大学修士2年 村井峻亮

石川明正、宮本彰也^A、杉本康博^A、Constantino Calancha^A、
佐藤比佐夫^B、池田博一^C、山本均

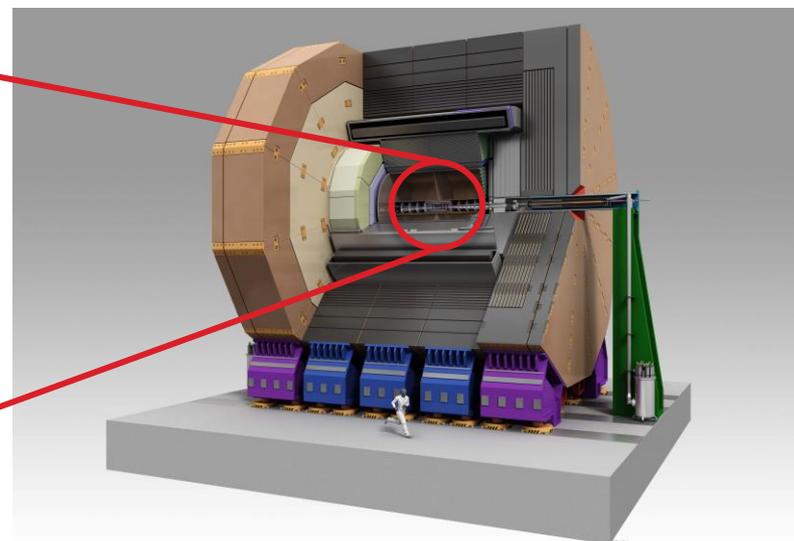
東北大理、高工研^A、信州大理^B、JAXA^C

ILCにおける崩壊点検出器

- ▶ ILCの崩壊点検出器の主な目的はb,cクォークの識別
 - b-jetが3つ、c-jetが2つ崩壊点を持っている。崩壊点を観測し、その数をb,cの識別に利用する
 - b,cの寿命が ~ 1 psと非常に短いため、数 μ mの精度の衝突径数分解能が必要とされる



崩壊点検出器



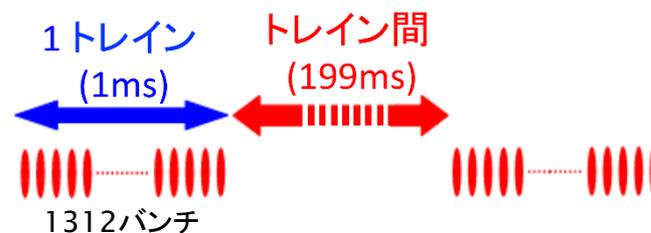
ILDイメージ図

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

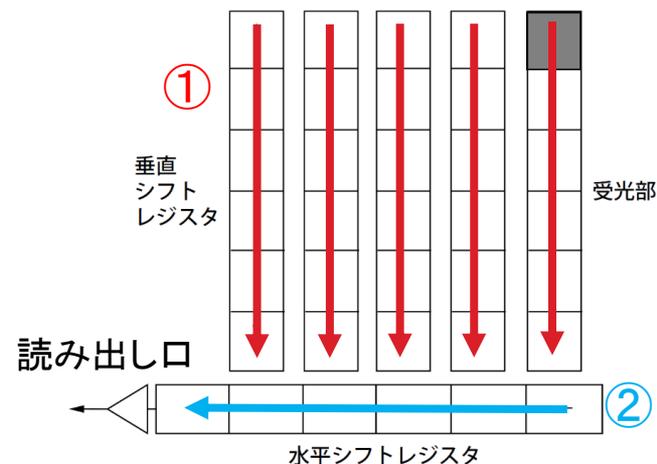
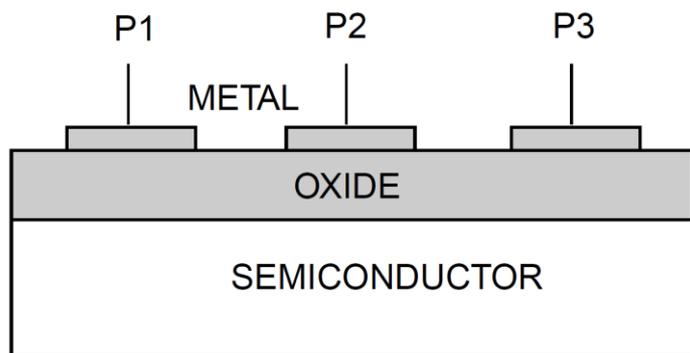


Fine Pixel CCD
= FPCCD

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

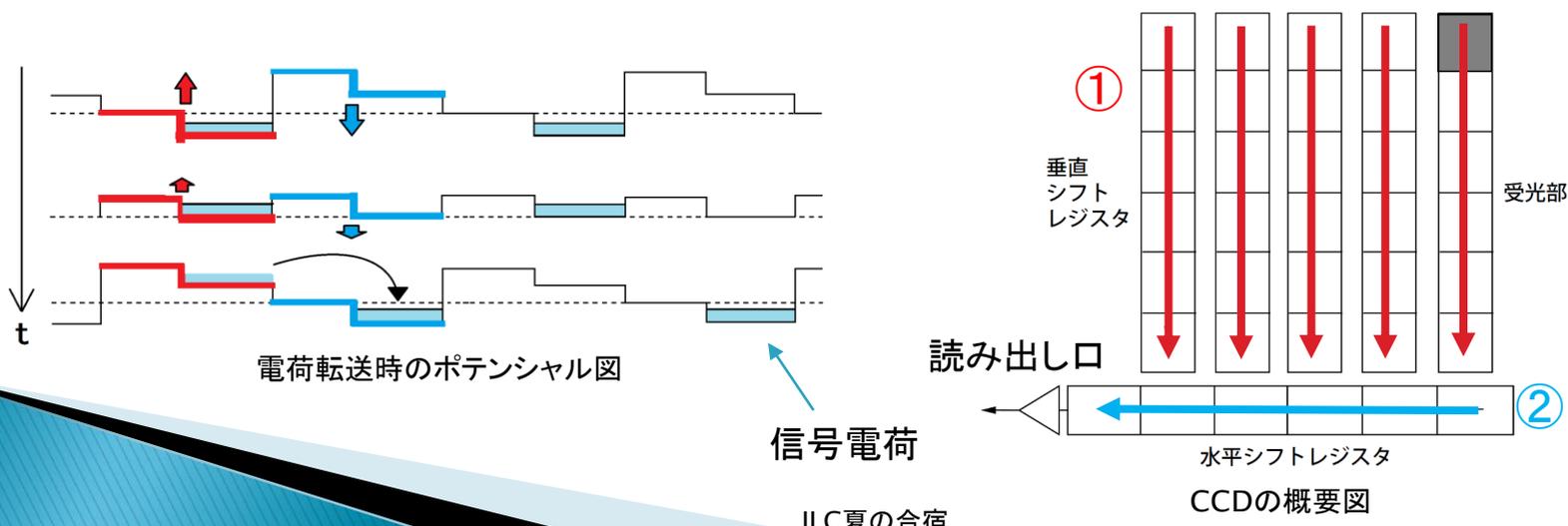
- ▶ FPCCDとはFine Pixel CCDの略でピクセルサイズが非常に小さなCCDのこと
- ▶ そもそもCCDとは？
 - 一般的にビデオカメラ、デジタルカメラなどに使用されているイメージセンサー
 - 半導体のピクセル検出器でMOS素子が並んでできている
 - CCDはcharge coupled device(電荷結合素子)の略で、本質的には電荷転送装置
 - 1つの読み出し口に対してピクセルが複数つながっていて、電荷をピクセル内をバケツリレーのように転送させることにより信号を読み出す



MOS素子

FPCCDとは

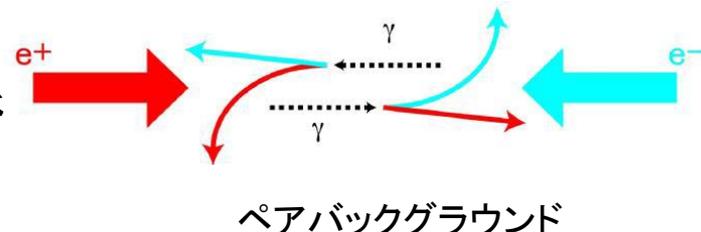
- ▶ FPCCDとはFine Pixel CCDの略でピクセルサイズが非常に小さなCCDのこと
- ▶ そもそもCCDとは？
 - 一般的にビデオカメラ、デジタルカメラなどに使用されているイメージセンサー
 - 半導体のピクセル検出器でMOS素子が並んでできている
 - CCDはcharge coupled device(電荷結合素子)の略で、本質的には電荷転送装置
 - 1つの読み出し口に対してピクセルが複数つながっていて、電荷をピクセル内をバケツリレーのように転送させることにより信号を読み出す



放射線ダメージ

▶ 崩壊点検出器に照射される主な放射線

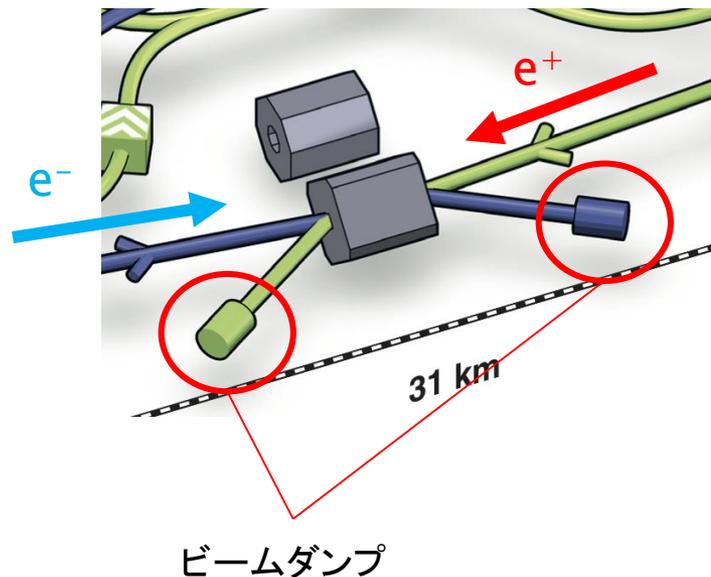
- ペアバックグラウンドからの電子陽電子
- ビームダンプからの中性子



▶ 放射線によるCCDへの主な影響

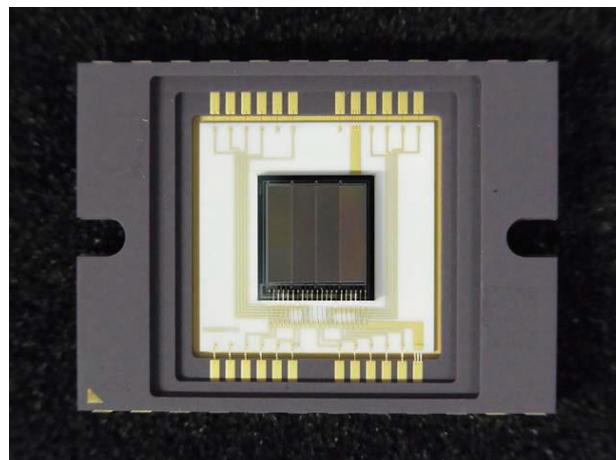
- ダークカレントの増加
- ホットピクセルの増加
- 電荷転送効率の悪化
- フラットバンド電圧のシフト
- スプリアスチャージの発生

→ 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)で分けられるとすると、重心系エネルギー250GeV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



ダークカレントとホットピクセル

▶ ダークカレントとは

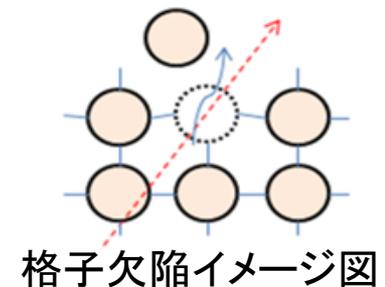
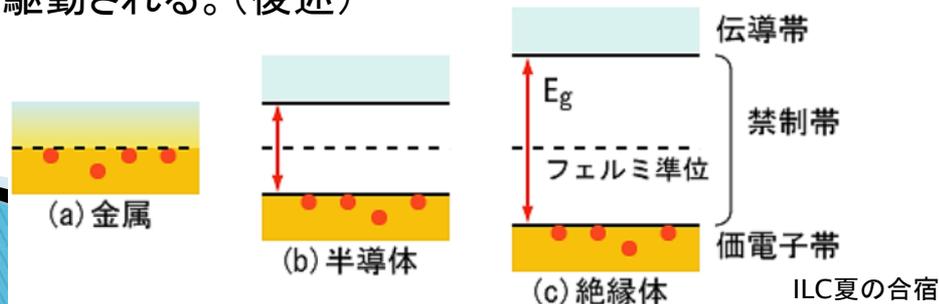
- CCDは粒子が落とした電荷を信号として読み出しているが、粒子による電子がない時でも熱励起による電子が信号として読み出される。これをダークカレントと呼ぶ。
- ダークカレントはSi-SiO₂の境界の格子欠陥で発生するものが支配的
- 格子欠陥があると禁制帯にエネルギー準位できる。そのため熱運動により電子が伝導体に励起され、信号として読み出される。

▶ 放射線による影響

- 粒子が原子核とクーロン散乱し、結晶格子の位置からずれる。これが格子欠陥となり、ダークカレントが増加する。
- 中性子や陽子などの重い粒子の場合にはダークカレントがピクセルごとで不均一に増加する。その中で他のピクセルよりも特に大きなダークカレントを持つピクセルを、ホットピクセルと呼ぶ。

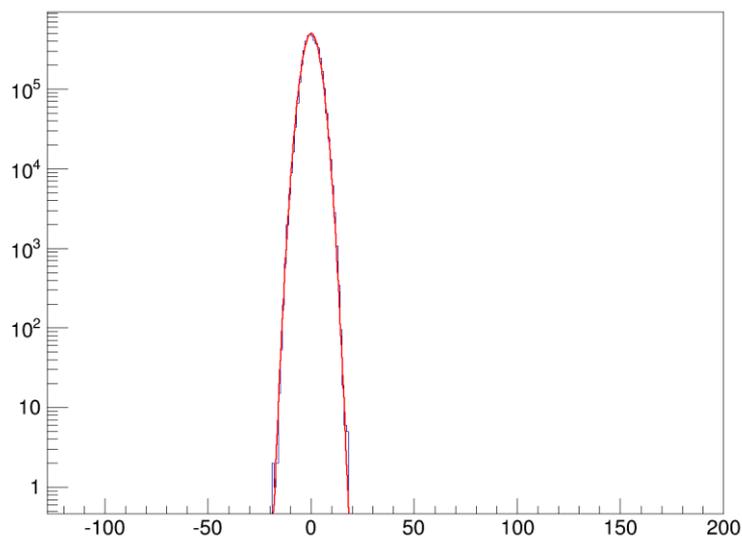
▶ 対策

- 温度を下げることで十分に小さくできる。(ILCでは-40°C)
- さらにダークカレントを小さくするためにMPPモードとよばれる方法で駆動される。(後述)

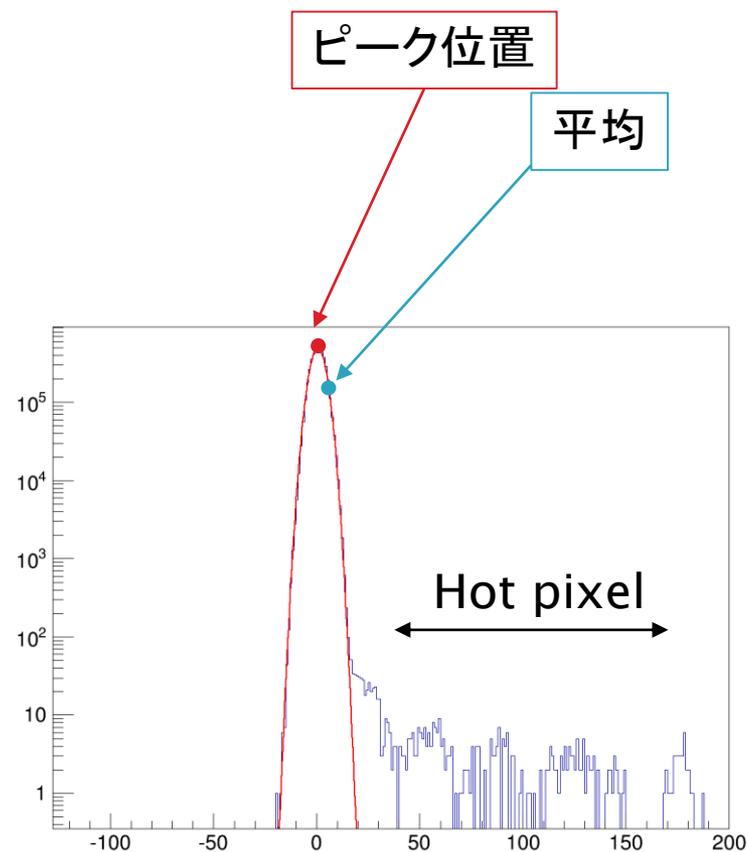


Dark current

- ▶ 蓄積時間: 5, 10, 30, 60sec
 - Dark chargeは蓄積時間に比例するため、一次関数でフィットし比例係数をDark currentとする。
- ▶ 温度: -30°C , -40°C
- ▶ Hot pixelの影響
 - ピーク位置: ガウシアンのみを考慮
 - 平均: Hot pixelの影響も含む



照射前 蓄積時間5sec@ -40°C

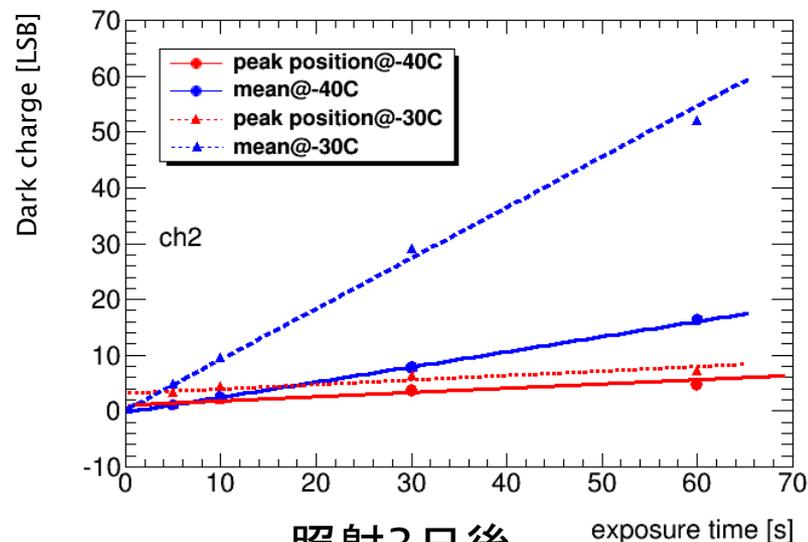
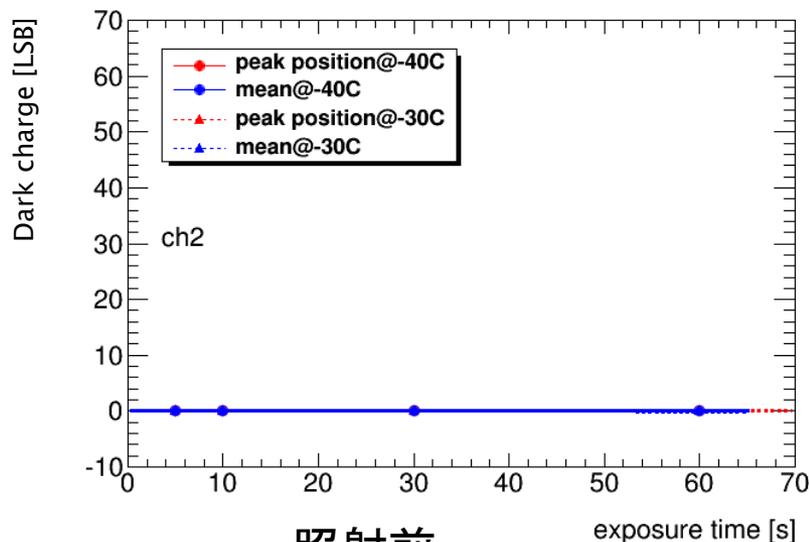


照射後 蓄積時間5sec@ -40°C

Dark currentと200msでのdark charge

- ▶ Dark current(傾きに対応)
 - 照射前: -30°C 以下でほぼ0
 - 照射後: -40°C で0.27[LSB]と増加がみられるが、pedestalの幅よりも小さい ($\sigma=3.42$ [LSB])
- ▶ 蓄積時間200msでのDark charge
 - Dark currentの値を1/5にスケールすることで計算

200msでの dark charge	-30°C [LSB (= 14e)]	-40°C [LSB (= 14e)]
平均	$(1.8 \pm 0.001) \times 10^{-1}$	$(5.4 \pm 0.005) \times 10^{-2}$
ピーク位置	$(1.6 \pm 0.003) \times 10^{-2}$	$(1.5 \pm 0.002) \times 10^{-2}$

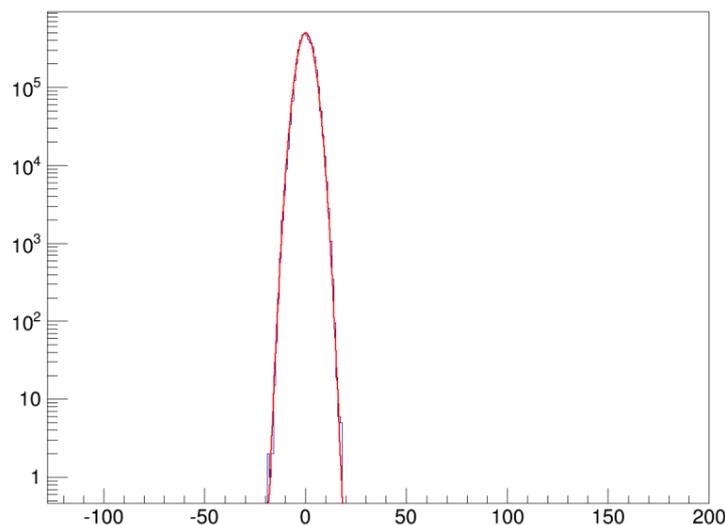


Hot pixel

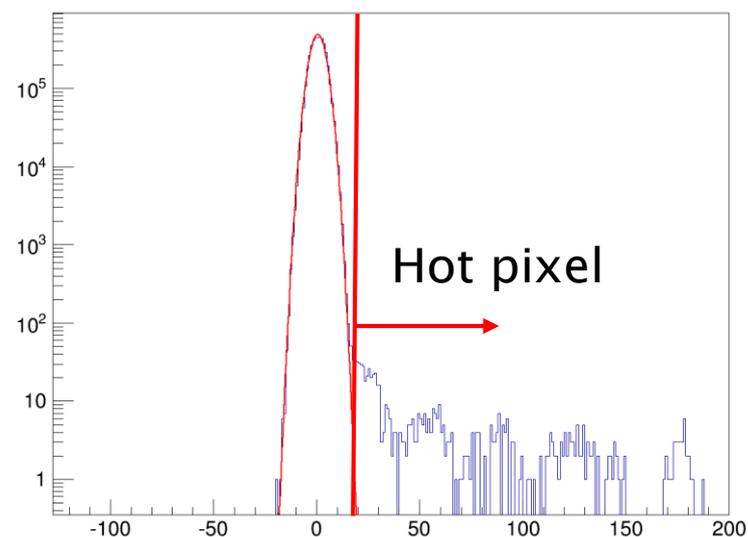
▶ Hot pixelの定義

- 通常のピクセルのdark chargeの値よりも大きな値を持つものをhot pixelと呼び、ここでは 5σ 以上のdark chargeを持つものをhot pixelとした。(1イベントごとにhot pixelかどうか判定する)

▶ 中性子照射後にhot pixelの増加が見られる



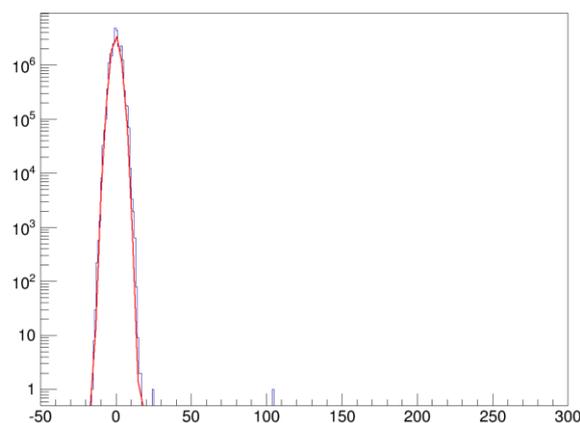
照射前 蓄積時間5sec@-40°C



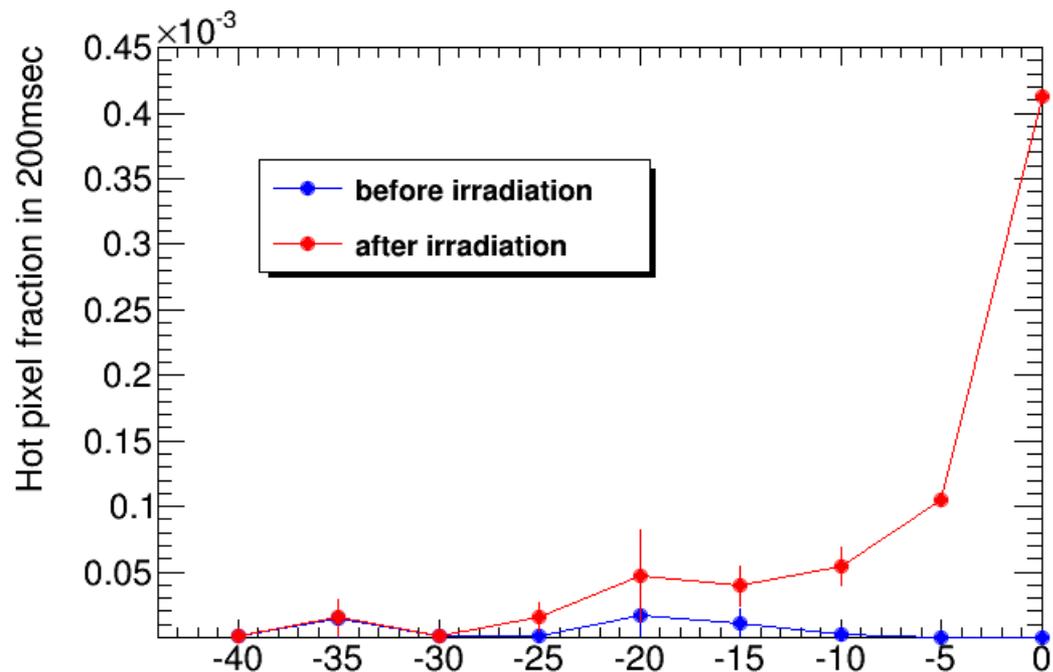
照射後 蓄積時間5sec@-40°C

Hot pixel fraction (温度依存性)

- ▶ 蓄積時間200msecの場合、 -40°C にすることでhot pixel fractionは中性子照射前後ともに十分に抑えられる。
 - 中性子照射前: $(7.49 \pm 1.91) \times 10^{-7} @ -40^{\circ}\text{C}$
 - 中性子照射後: $(1.03 \pm 0.19) \times 10^{-6} @ -40^{\circ}\text{C}$



照射後 蓄積時間200sec@ -40°C

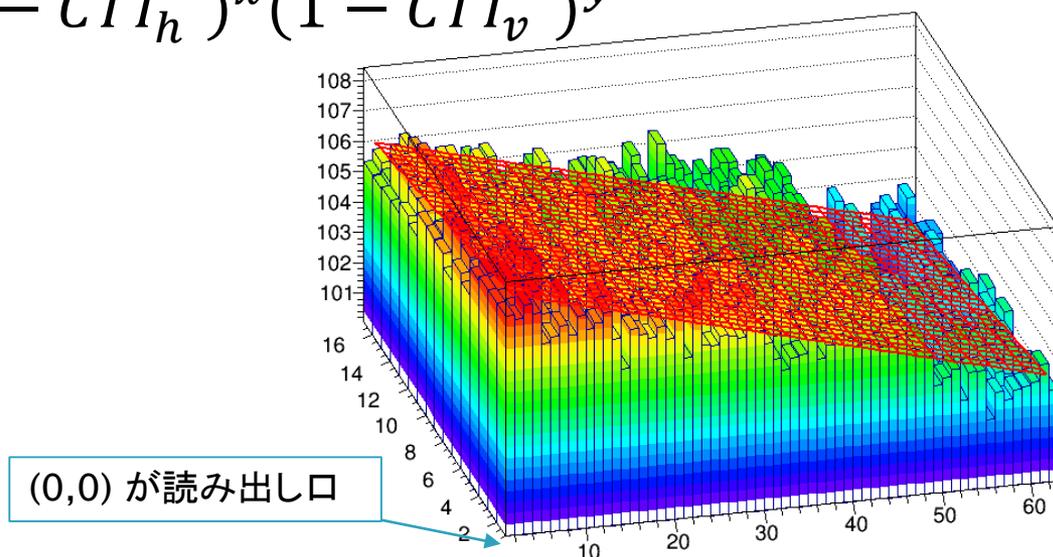
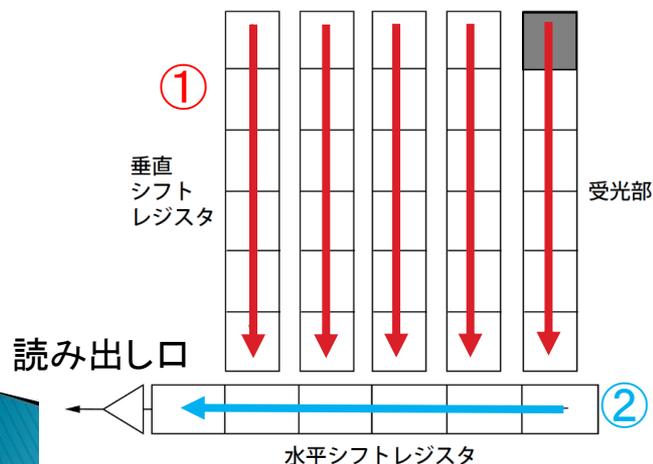


ホットピクセルと温度の関係 Temperature [C]

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。電荷損失の指標としてCTIを定義する。
- ▶ 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 とすると、水平方向に x 回、垂直方向に y 回転送後には下の式で示される $f(x,y)$ になる。

$$f(x, y) = Q(1 - CTI_h)^x (1 - CTI_v)^y$$



CTI

▶ 結果

- $CTI_h = (3.49 \pm 0.03) \times 10^{-5}$
- $CTI_v = (6.34 \pm 0.10) \times 10^{-5}$

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。

$$(1 - 3.49 \times 10^{-5})^{13000} \times (1 - 6.34 \times 10^{-5})^{128} = 0.63$$

- ▶ 最も遠いピクセルでも信号は63%残る。(最大36%の損失)
 - 検出効率、位置分解能には影響なし

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。
 - Dark current、hot pixelは中性子照射により増加したが、十分に小さい。
 - CTIについては、照射後は最大で信号電荷が36%損失する。検出効率、位置分解能には影響なし
 - フラットバンド電圧はほぼ変わらず

今後

- ▶ ペアバックグラウンドにより性能(特にCTI)が悪化すると予想されるので、転送効率を上げる案が考えられている

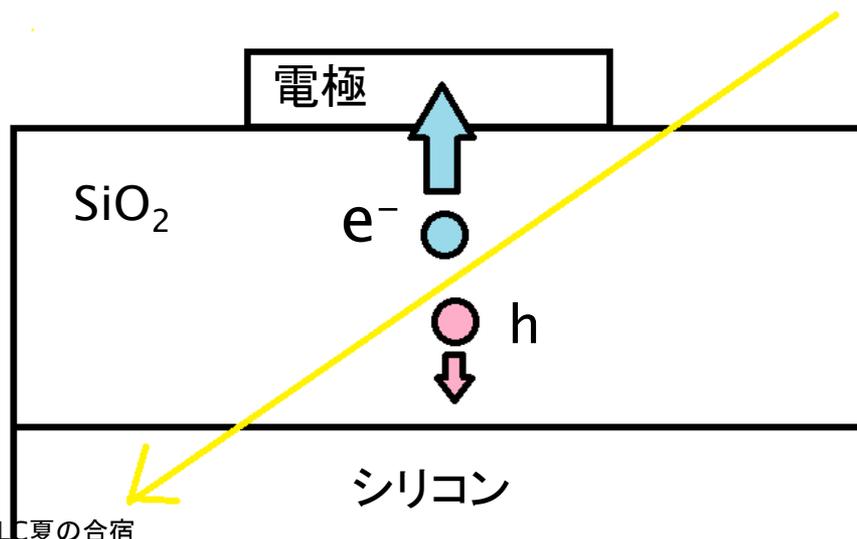
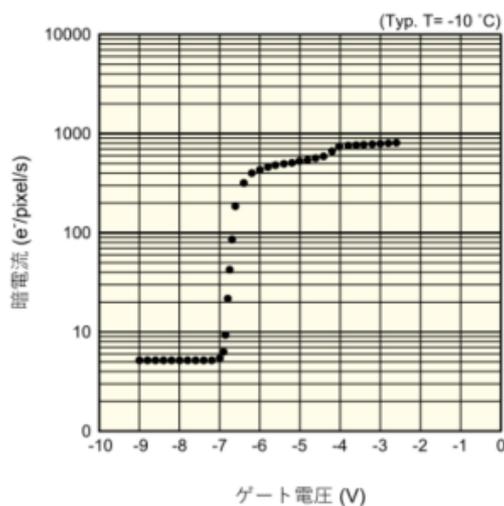
フラットバンド電圧シフト

▶ フラットバンド電圧シフトとは

- 放射線により SiO_2 で電子ホールペアが生成される。いくつかのペアは再結合するが残りは SiO_2 内の電場でドリフトする。電子は移動度が高いので陽電極へすぐに到達する。ホールの移動度は電子より数桁低く、 SiO_2 の格子欠陥にトラップされ溜まってしまう。これにより、基板に印加される実行電圧が正にシフトする。これをフラットバンド電圧シフトという。

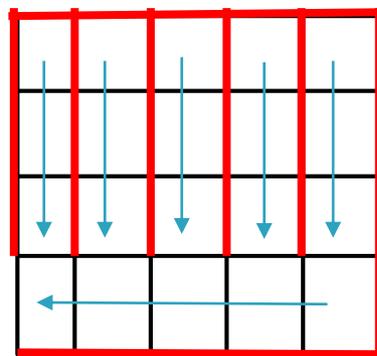
▶ 測定方法

- CCDにかける電圧を下げていくとある電圧を境に、MPPモードと呼ばれるダークカレントを小さくするモードになる。その閾値電圧の照射前後での変化がフラットバンド電圧シフトに相当する。

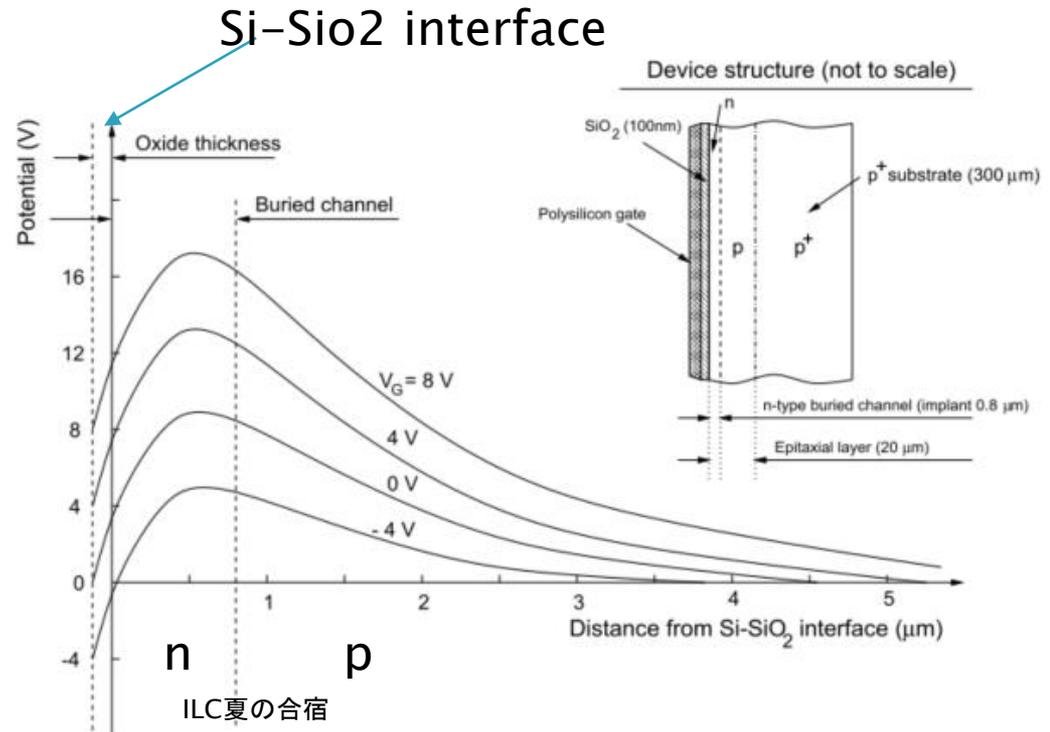


Multi Pinned Phase (MPP) mode

- ▶ CCDでの支配的なダークカレントのソースはSi-SiO₂境界にある格子欠陥で、基板からホールを境界へ供給することで抑えられる。
- ▶ MOS構造に負電圧をかけると境界の電位が負になり、p⁺チャンネルストップからホールが供給される。このホールがダークチャージと結合することで、ダークカレントが抑えられる。この状態をMPPモードという。

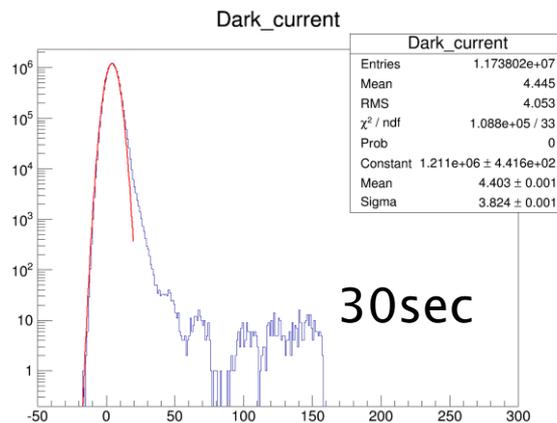
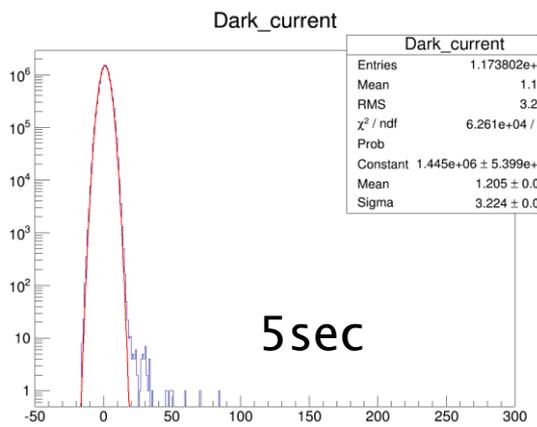


p⁺ channel stop

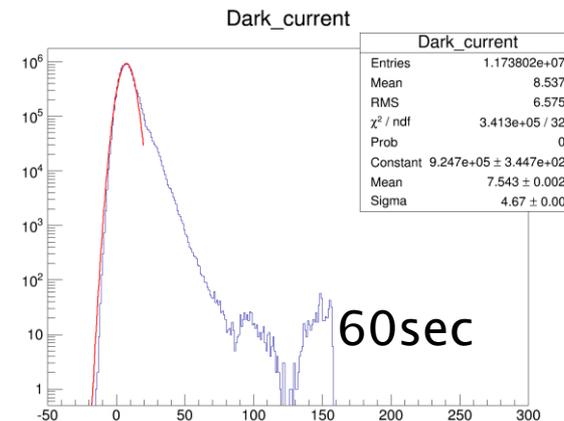
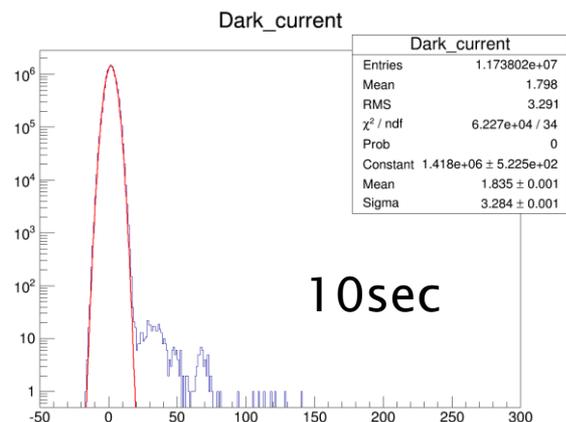
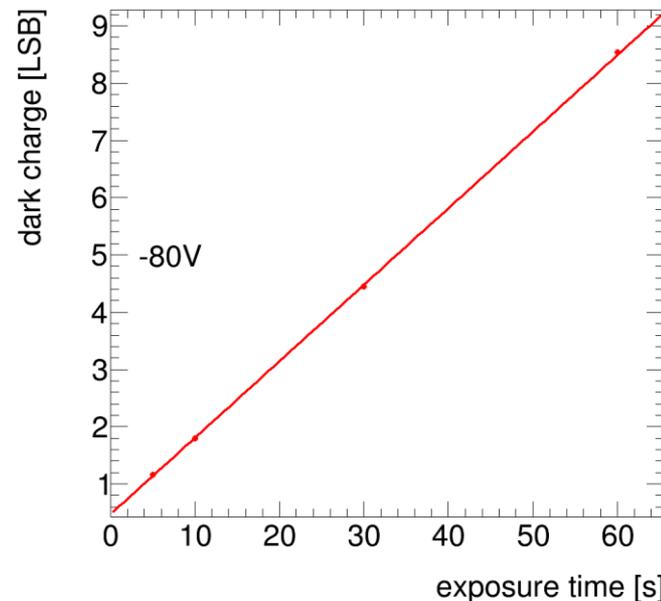


Dark charge vs exposure time

- ▶ ダークチャージの平均を5, 10, 30, 60秒で測定し、直線でフィットした。
 - 傾きをダークカレントとする。
- ▶ これを-5.0Vから-10.8Vまで0.2Vずつ測定した。



照射時間とダークチャージの大きさの関係



@-8.0V

Dark current vs CLK pulse voltage

- ▶ ダークカレントの大きさは中性子照射により増加しているが、ダークカレントが急激に増加するフラットバンド電圧の変化は照射前後でほぼ見られなかった。

