

# 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

2017年1月30日 修士論文発表会  
素粒子実験研究室  
博士課程前期2年 村井峻亮

# 目次

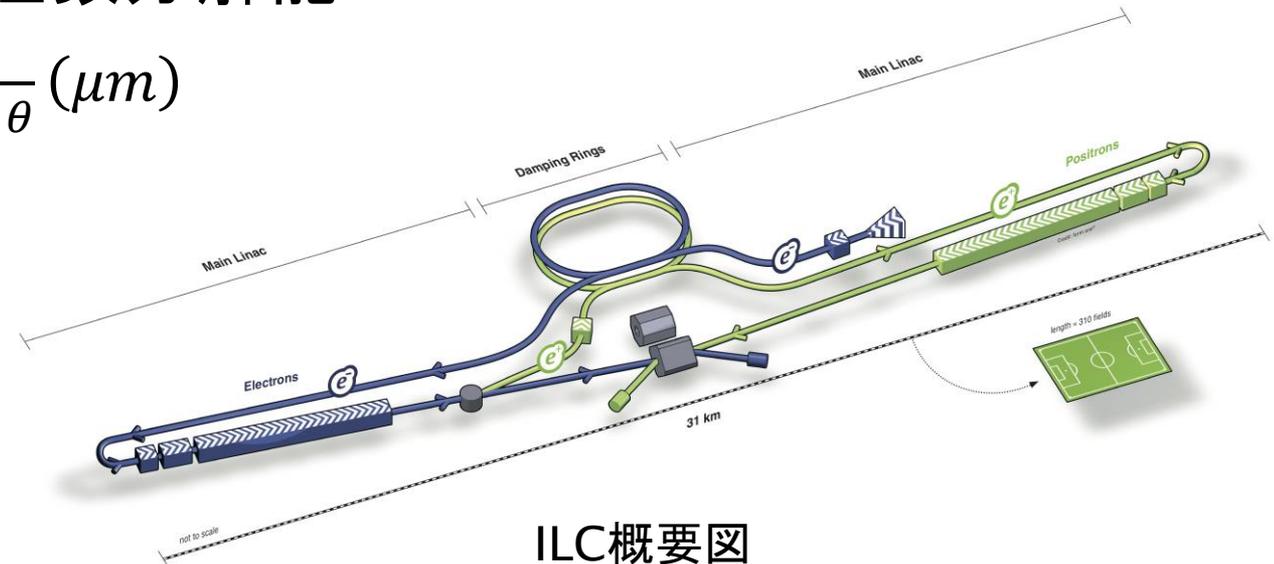
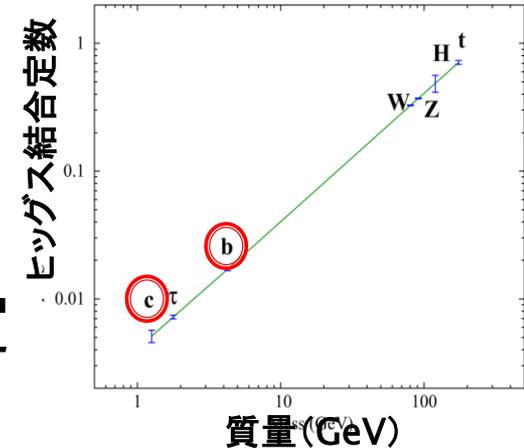
- ▶ 導入
  - 国際リニアコライダー実験
  - 崩壊点検出器FPCCD
- ▶ 放射線ダメージ
- ▶ 中性子照射試験
  - 試作CCDの性能測定
  - CTIの改善
- ▶ まとめ

# 導入

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

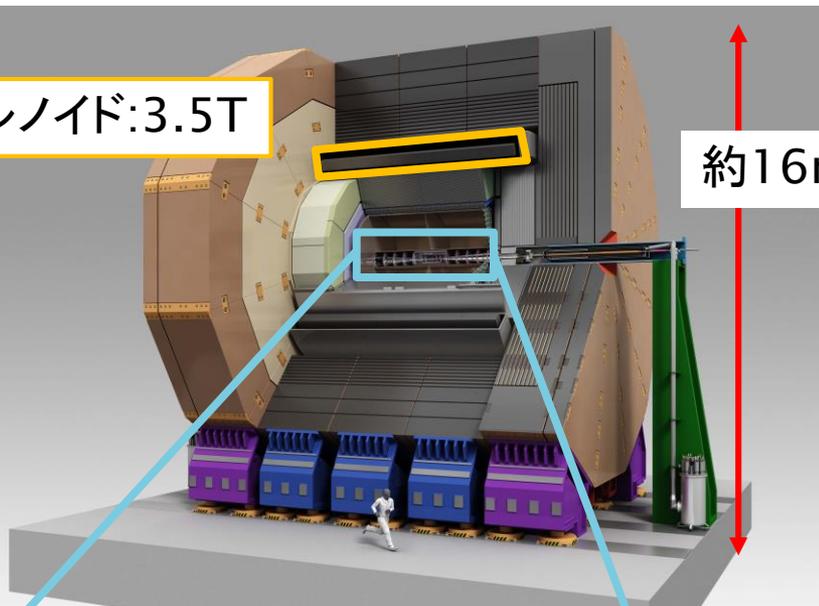
質量と結合定数の関係



# ILD検出器と崩壊点検出器

ソレノイド:3.5T

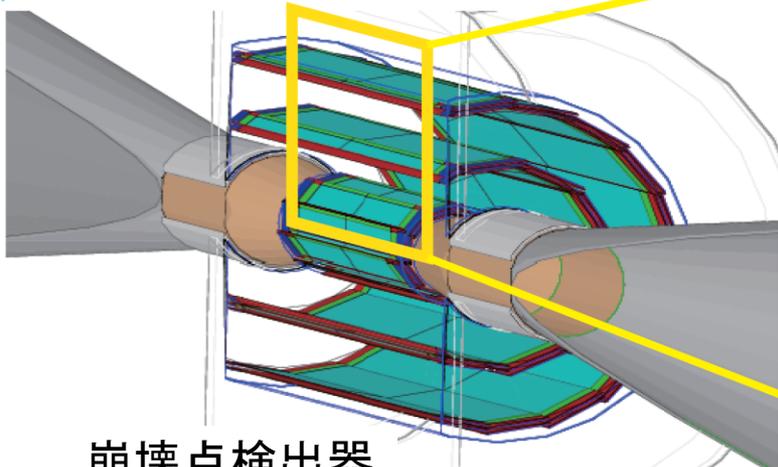
約16m



ILD概要図

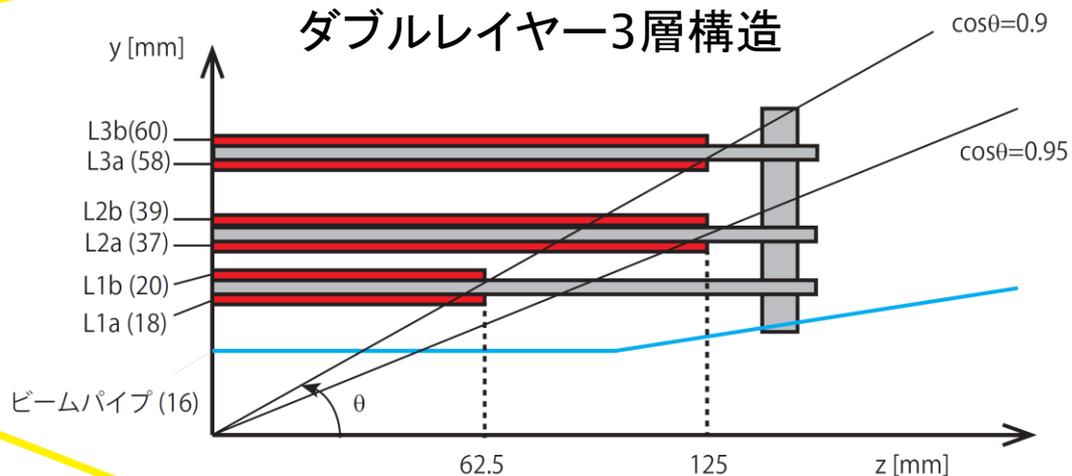
## ▶ 崩壊点検出器への要求

- 位置分解能 $3\mu\text{m}$ 以下
- 1層あたりの物質質量 $0.15X_0$ 以下
- 最内層の半径 $1.6\text{cm}$
- ピクセル占有率が数%以下



崩壊点検出器

## ダブルレイヤー3層構造

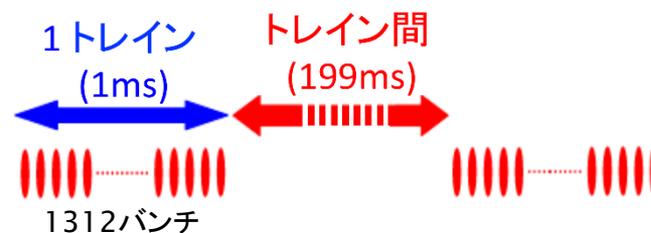


# ILCにおける崩壊点検出器

- ▶ 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!

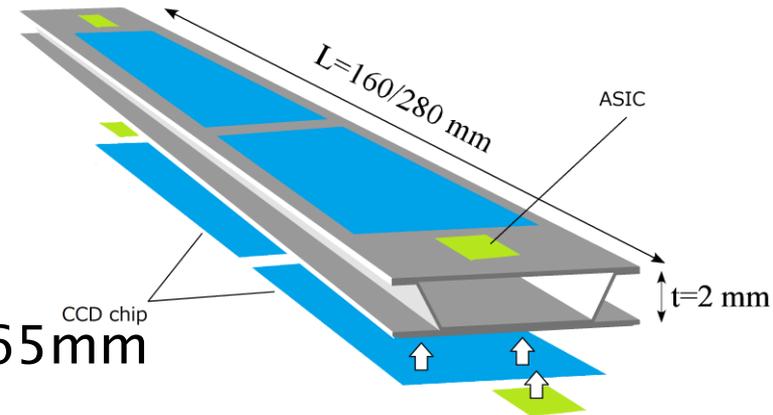
# FPCCD崩壊点検出器

## ▶ Fine Pixel CCD

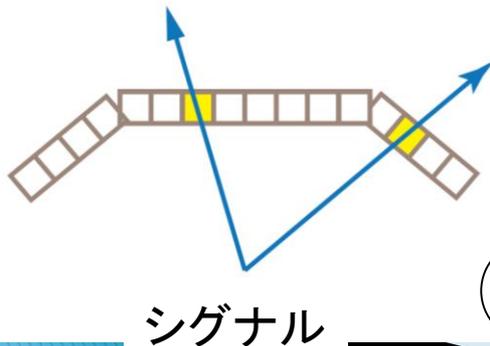
- ピクセルサイズ:  $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$
- 有感領域の厚み:  $15\mu\text{m}$
- ピクセル数:  $13000(\text{H}) \times 125(\text{V})/\text{ch}$
- センサーサイズ(最内層):  $10.24\text{mm} \times 65\text{mm}$
- $-40^\circ\text{C}$ で使用される

## ▶ 特徴

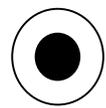
- 高い空間分解能
- 全空乏 → 電荷の拡散が抑えられる
- 電磁波によるノイズ(EMIノイズ)を受けない(トレイン間読出し)
- ヒット分布からバックグラウンド除去できる



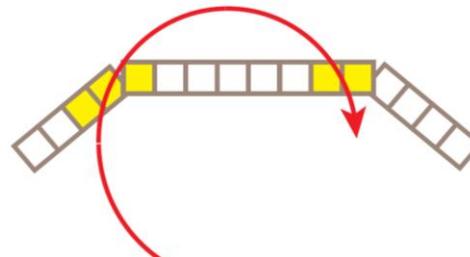
FPCCDラダー



シグナル



$B_z$

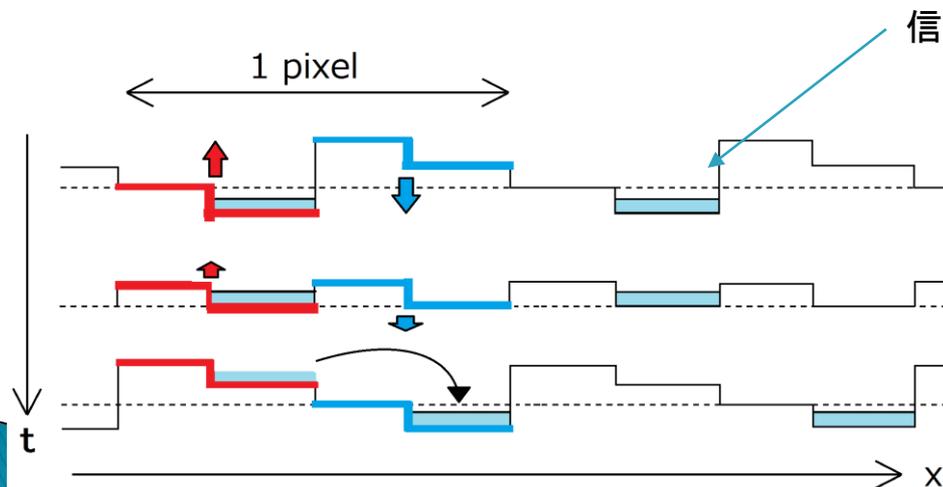


ペアバックグラウンド

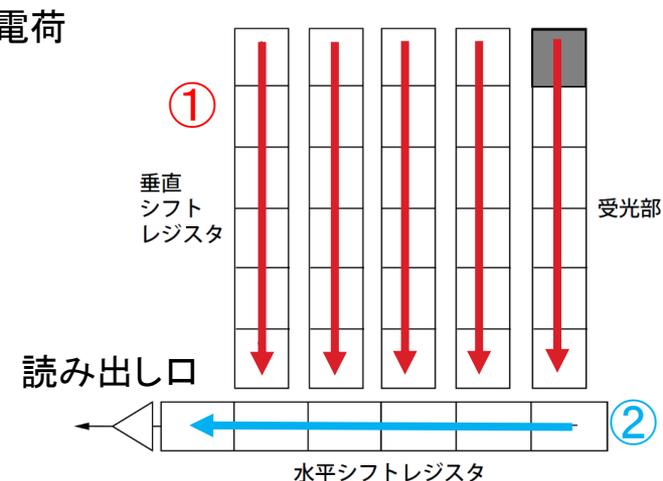
# CCDセンサー

## ▶ CCD (charge coupled device)

- 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(シリコン)のピクセル検出器でMOS素子が並んでできている
- 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



電荷転送時のポテンシャル図

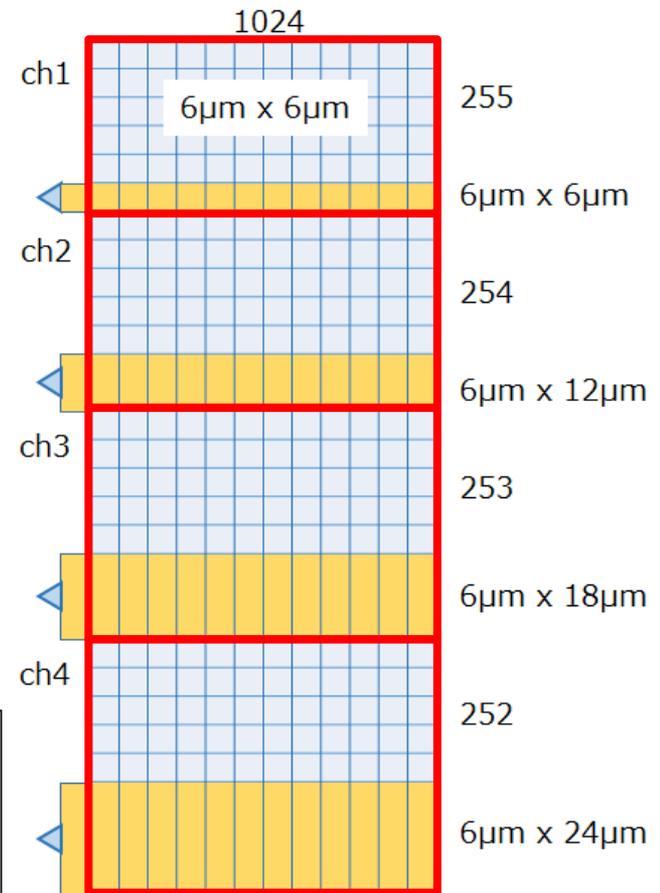
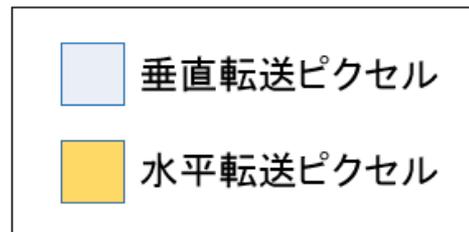
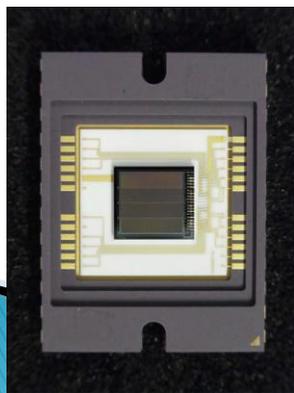


CCDの概要図

# 試作FPCCD

## ▶ 試作FPCCD

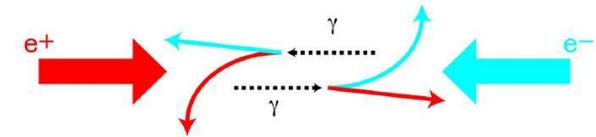
- 垂直転送ピクセルサイズ:  $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$
- 水平転送ピクセルサイズ:
  - $6\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ ,  $6\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$ ,  $6\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$
  - Ch1は製造上の不具合により使用不可
- ピクセル数:  $1024(\text{H}) \times 255(\text{V}) / \text{ch}$
- 浜松ホトニクス製
- 型番: CPK1-14-CP502-07



試作CCDイメージ図

# 放射線ダメージ

# 放射線ダメージ



ペアバックグラウンド

## ▶ ILCでの放射線 (1312bunch, $0.5 \times 10^7$ sec, $E_{CM} = 500\text{GeV}$ )

- ペアバックグラウンド:  $2.07 \times 10^{11}$  e /  $\text{cm}^2$  / year
- ビームダンプからの中性子:  $9.25 \times 10^8$  1MeVn<sub>eq</sub> /  $\text{cm}^2$  / year

## ▶ 放射線によるCCDへの主な影響

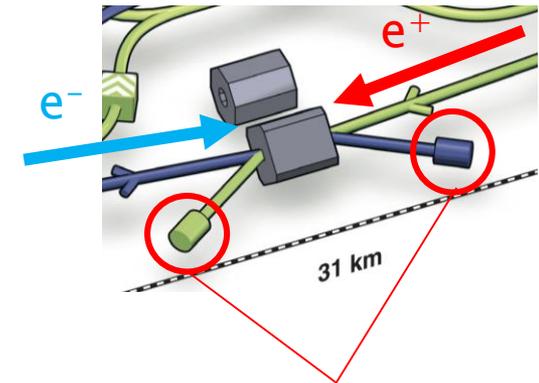
- バルクダメージ – シリコン原子が動くことによる格子欠陥
  - Non-ionizing energy loss(NIEL): 放射線の物質内での損失エネルギーのうち、バルクダメージに使用されたエネルギー
- サーフフェイスダメージ – 放射線による酸化膜周辺での電離

## ▶ NIEL仮定

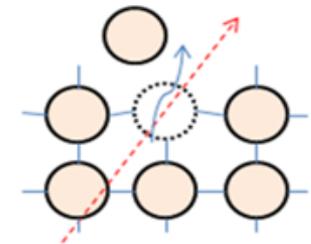
- 半導体のバルクダメージはNIELに比例すると仮定
- 30MeV電子のNIELダメージは1MeV中性子の1/16
  - $2.07 \times 10^{11}$  e /  $\text{cm}^2$  / year →  $1.29 \times 10^{10}$  1MeVn<sub>eq</sub> /  $\text{cm}^2$  / year

## ▶ 必要な放射線耐性

- 3年間の使用と安全係数3
- →  $1.24 \times 10^{11}$  1MeVn<sub>eq</sub> /  $\text{cm}^2$



ビームダンプ



格子欠陥イメージ図

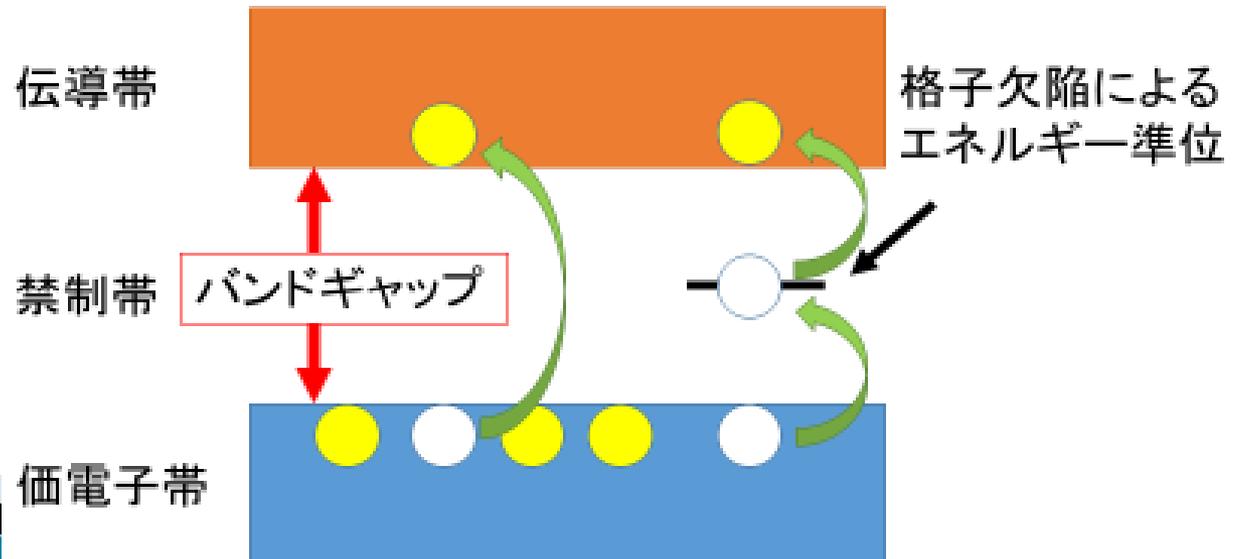
# ダークカレントとホットピクセル

Dark current: 熱励起により信号として読み出される電荷

Hot pixel: 他のピクセルと比べて特に大きなdark currentを持つピクセル

## ▶ 放射線による影響

- 格子欠陥の増加
  - 格子欠陥があると禁制帯にエネルギー準位でき、熱運動により伝導体に励起される確率が増加する。
  - → dark currentの増加
- Defect clusterの発生
  - 中性子や陽子などの重い粒子がシリコン原子に衝突すると多重衝突を起こし、複数の原子の移動による格子欠陥(defect cluster)が発生する。Dark currentが不均一に増加する
  - → hot pixelの発生



# 電荷転送効率の悪化

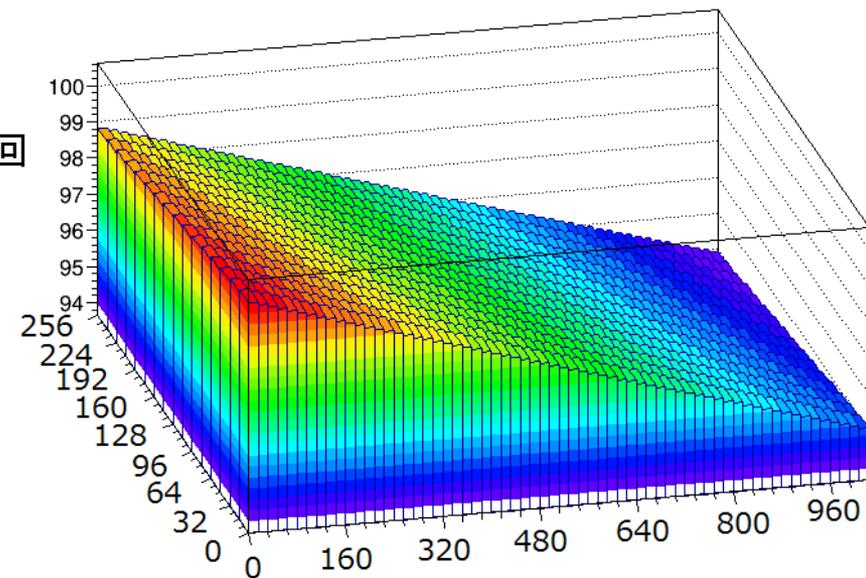
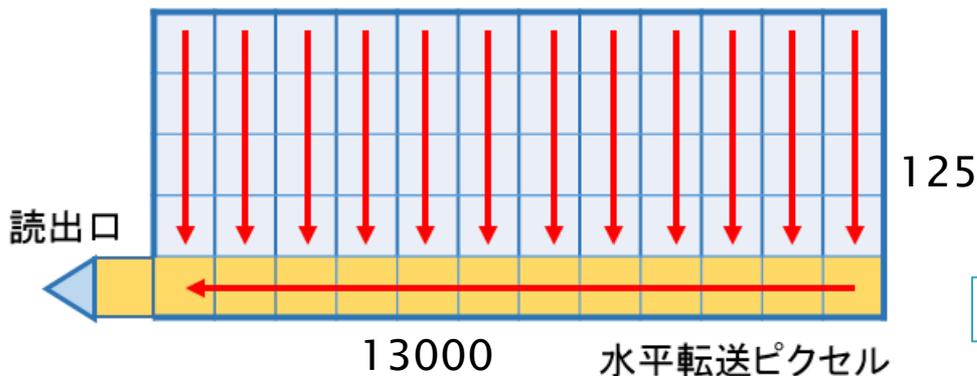
## ▶ Charge Transfer Inefficiency (電荷転送非効率)

- 格子欠陥により電荷損失が起こる
- 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。

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

実際のCCDでは水平転送13000回に対して垂直転送125回となっていて電荷転送に占める割合は水平転送が支配的

垂直転送ピクセル

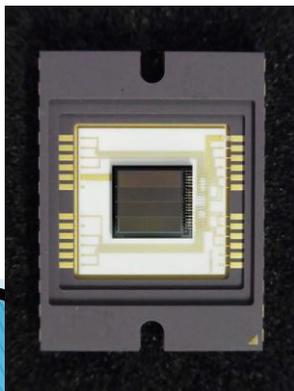


上式のプロット  
 $x, y$ 軸がピクセル位置  
 $z$ 軸が信号の大きさ

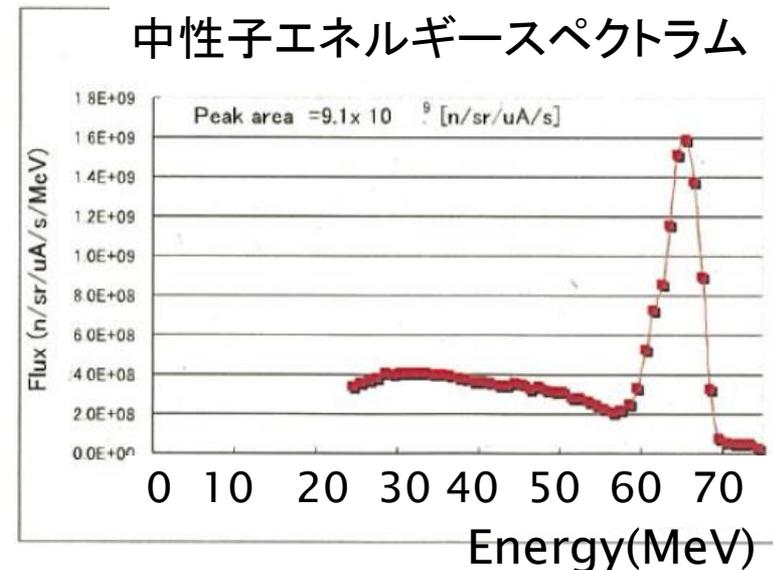
# 中性子照射試験

# 中性子照射試験

- ▶ 日付: 2014/10/15-17
- ▶ 場所: CYRIC@東北大学
- ▶ 65MeVの中性子ビーム
  - 70MeVの陽子ビームにより生成
  - $\text{Li} + \text{p} \rightarrow \text{Be} + \text{n}$
- ▶ Fluence:  $1.78 \times 10^{10} \text{ 1MeVn}_{eq}/\text{cm}^2$  (1.5h)
  - ILC19年分の中性子量
  - 必要な放射線耐性の1/7のNIELダメージ
- ▶ 小型試作FPCCDを使用

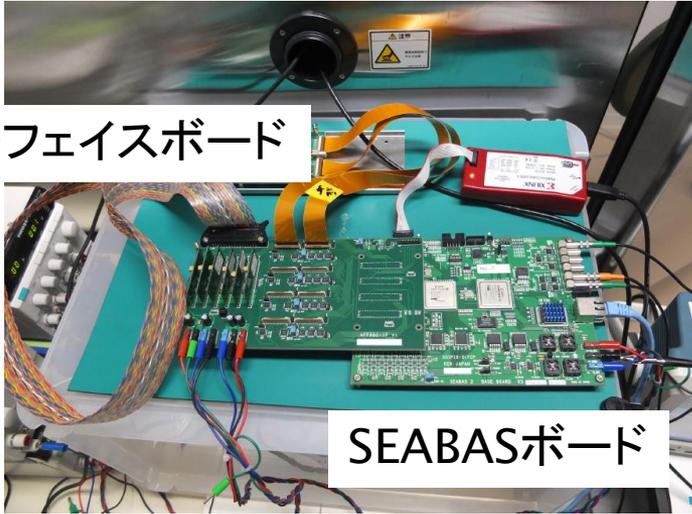


CYRIC Annual Report 2010-2011



# 測定環境

インターフェイスボード



SEABASボード

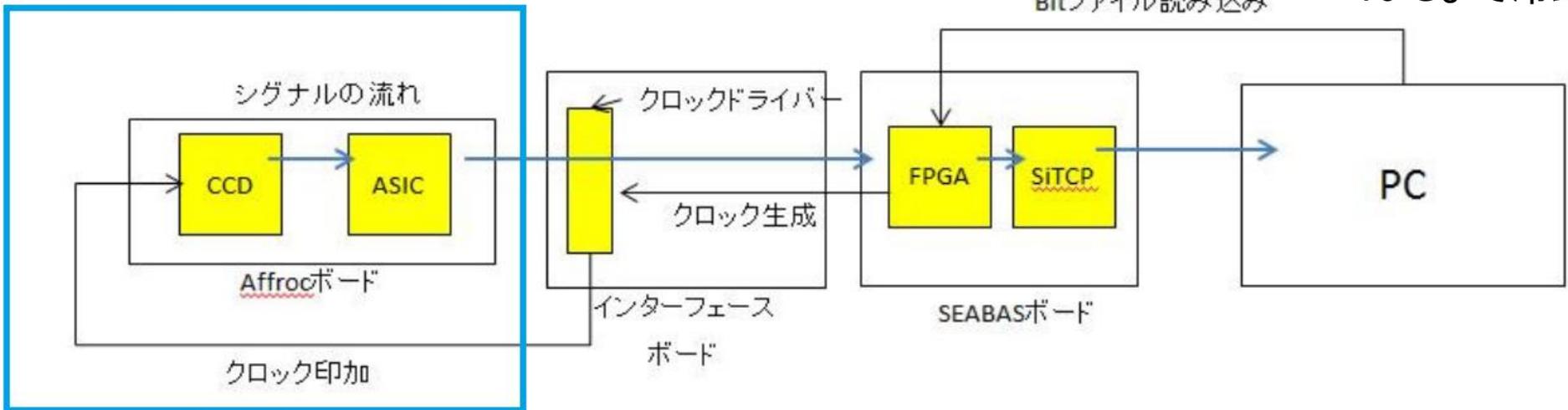


AFFROCボード



恒温槽

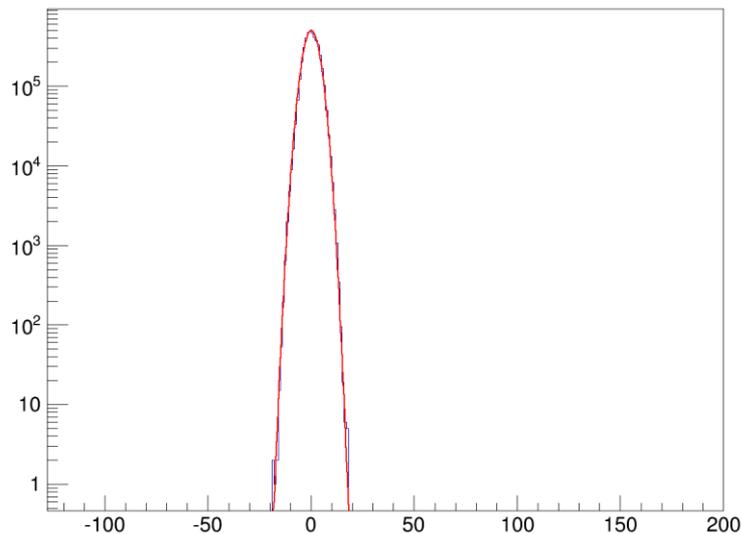
-40°Cまで冷却



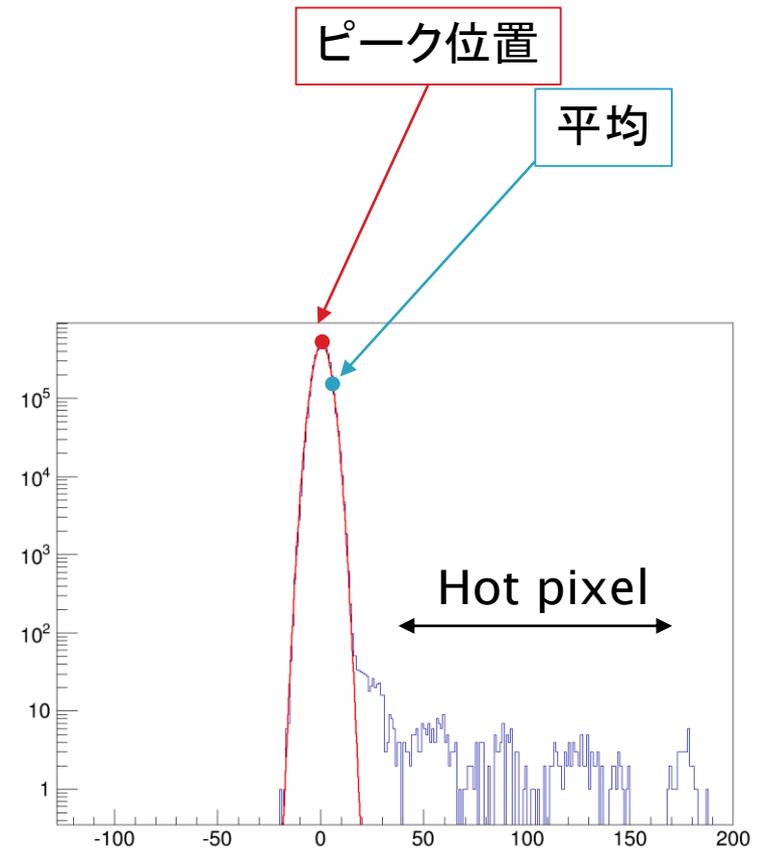
恒温槽

# Dark current測定

- ▶ 蓄積時間: 5, 10, 30, 60sec
- ▶ 温度:  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$
- ▶ 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@ $-40^{\circ}\text{C}$  [ADC]



照射後 蓄積時間5sec@ $-40^{\circ}\text{C}$  [ADC]

# Dark charge (200msec)

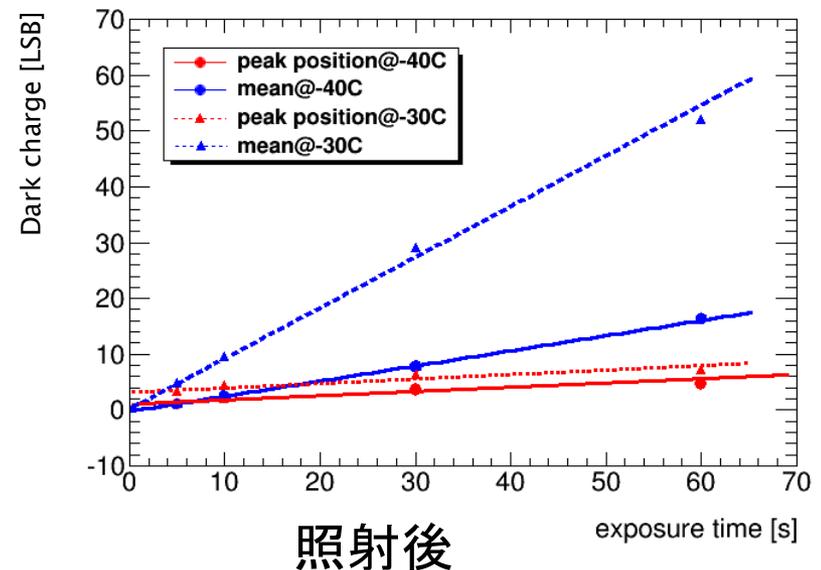
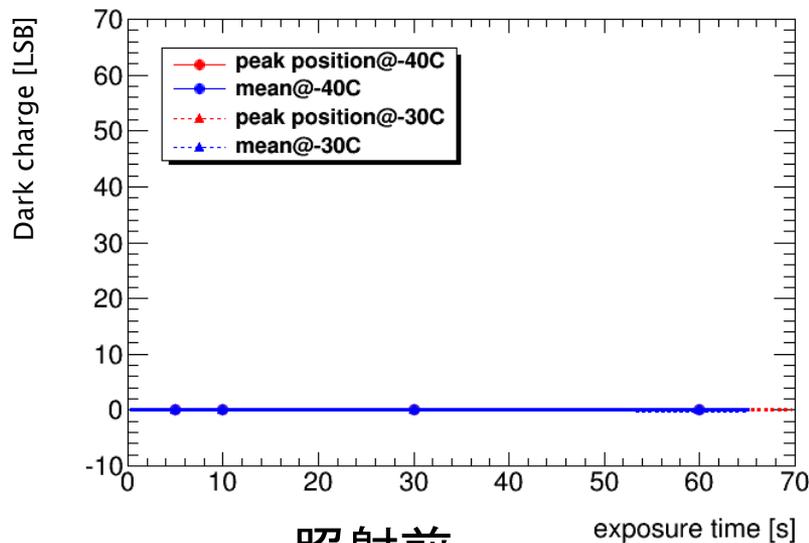
- ▶ Dark charge(200msec)
  - Dark current(傾き)をスケール
  - 20msecはトレイン間隔
- ▶ ノイズ
  - 200msでのdark chargeの幅に相当
  - 42電子

中性子照射後のdark charge (200msec)

	-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

(1 LSB=14電子)

→ノイズに比べ200msでのdark chargeは十分小さい



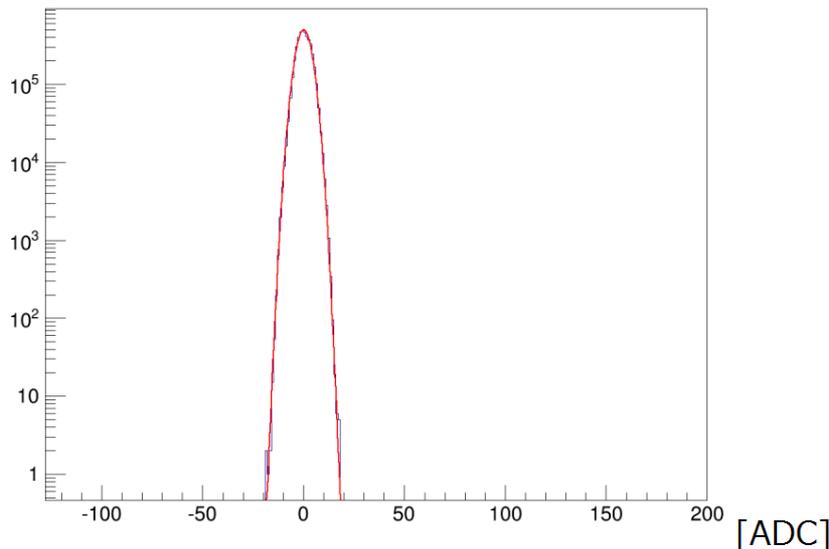
# Hot pixel

## ▶ Hot pixelの定義

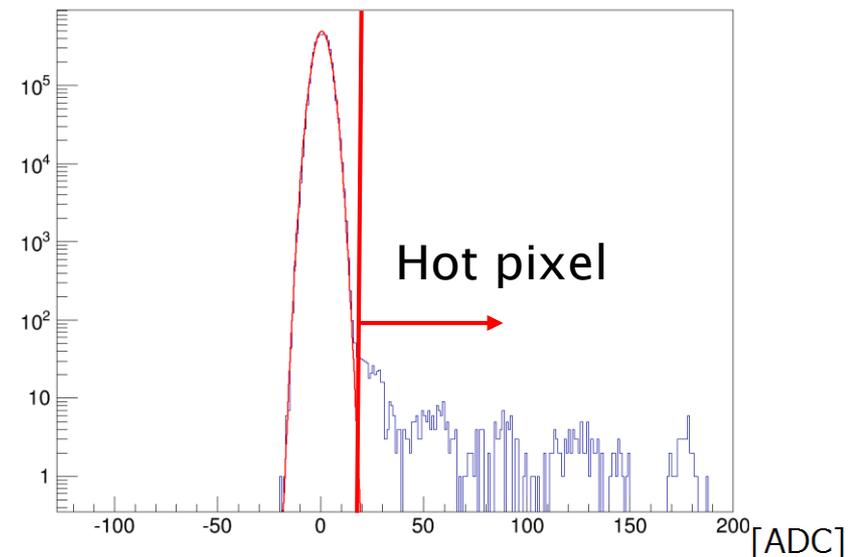
- 通常のピクセルのdark chargeの値よりも大きな値を持つものをhot pixelと呼び、ここでは $5\sigma$ 以上のdark chargeを持つものをhot pixelとした。(1イベントごとにhot pixelかどうか判定する)

## ▶ 中性子照射後にhot pixelの増加が見られる

- Hot pixelを数え、hot pixel fraction=(Hot pixelの数/全ピクセル数)を求める



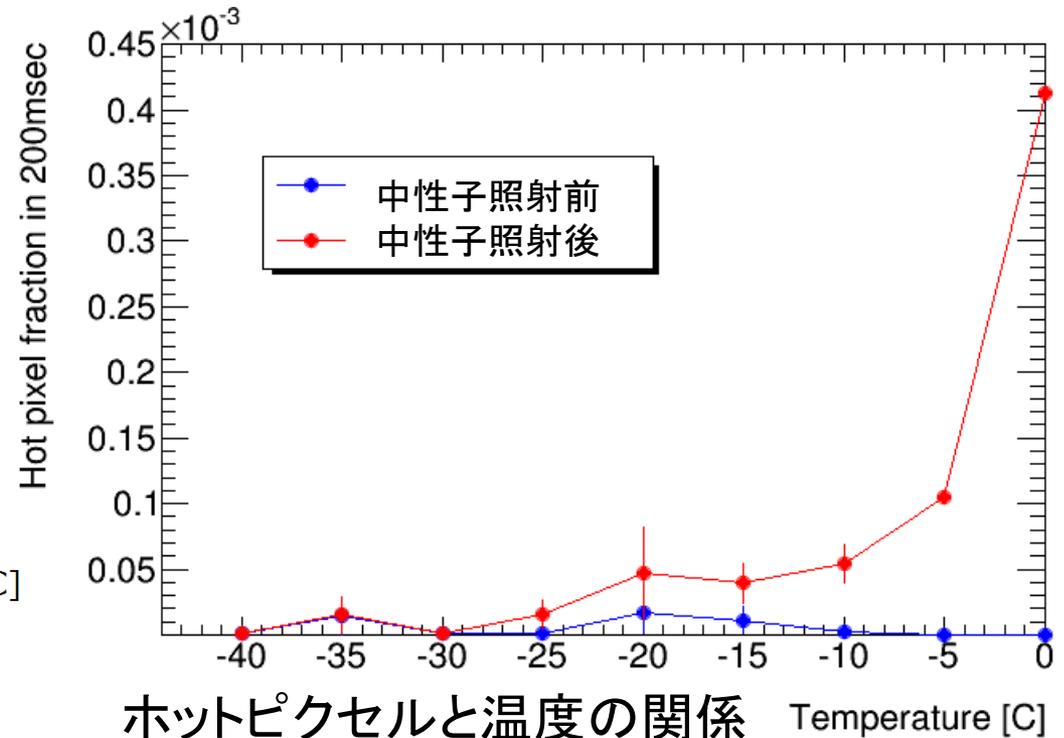
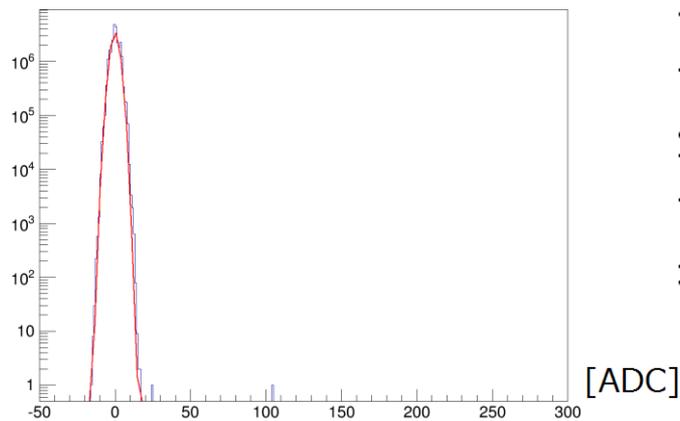
照射前 蓄積時間5sec@-40°C



照射後 蓄積時間5sec@-40°C

# Hot pixel fraction (温度依存性)

- ▶ 温度減少に伴いhot pixel fractionも減少する。
- ▶  $-40^{\circ}\text{C}$ まで冷却することでピクセル占有率数%に比べて十分に小さくできる
  - 中性子照射前:  $(7.49 \pm 1.91) \times 10^{-7} @ -40^{\circ}\text{C}$
  - 中性子照射後:  $(1.03 \pm 0.19) \times 10^{-6} @ -40^{\circ}\text{C}$



## ▶ 測定条件

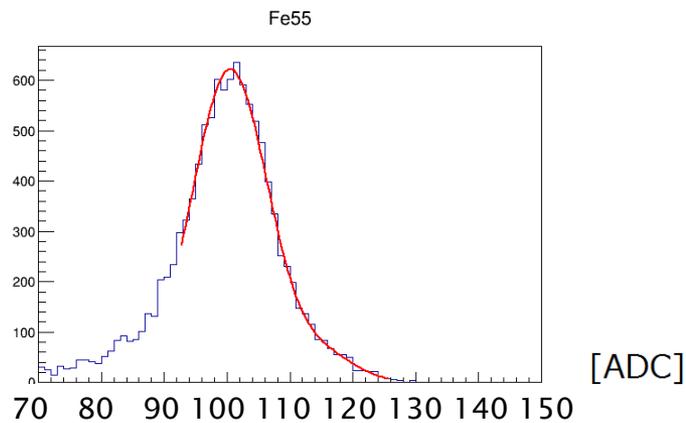
- 温度:  $-40^{\circ}\text{C}$
- クロック周波数: 6MHz
- 線源: Fe55
  - 5.9keVのX線を信号として用いる

## ▶ フィット関数

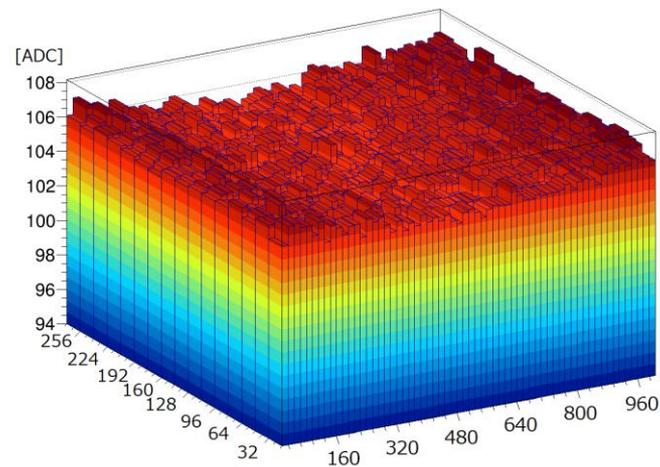
- $Q(x, y) = Q_0(1 - CTI_h)^x(1 - CTI_v)^y$

## ▶ 結果

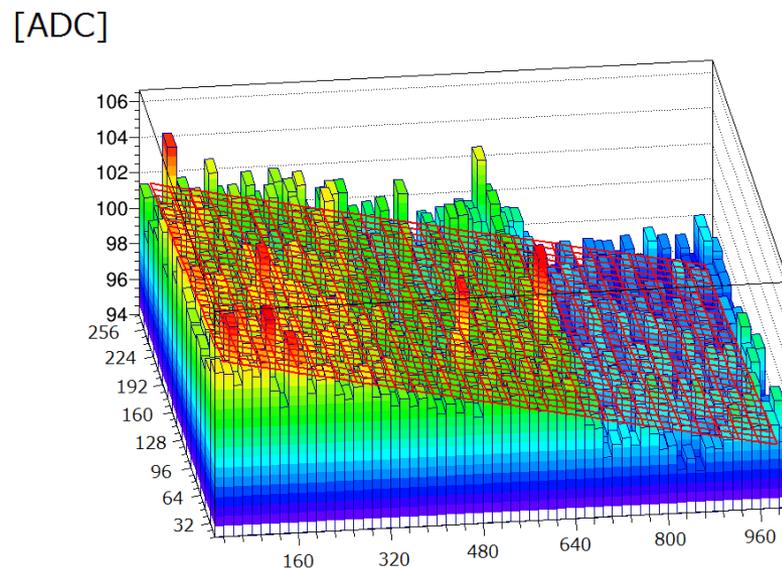
$$\left\{ \begin{array}{l} CTI_h = (5.93 \pm 0.05) \times 10^{-5} \\ CTI_v = (7.32 \pm 0.22) \times 10^{-5} \end{array} \right.$$



Fe55 ピーク



中性子照射前CCDのX線信号分布



中性子照射後CCDのX線信号分布

# 性能評価

- ▶ CYRICでの中性子照射量:  $1.78 \times 10^{10} \text{ 1MeVn}_{\text{eq}} / \text{cm}^2$
- ▶ 必要な放射線耐性:  $1.24 \times 10^{11} \text{ 1MeVn}_{\text{eq}} / \text{cm}^2$ 
  - 今回の実験の7倍に相当
- ▶ 性能評価
  - それぞれの測定結果を7倍悪化させ、要求性能と比較する。
  - Dark charge (200msec)
    - $0.76 \text{ 電子} \times 7 = 5.32 \text{ 電子}$
    - ノイズ42電子に比べ十分小さい
  - Hot pixel fraction
    - $(1.03 \times 10^{-6}) \times 7 = 7.21 \times 10^{-6}$
    - 数%のピクセル占有率と比べ十分小さい

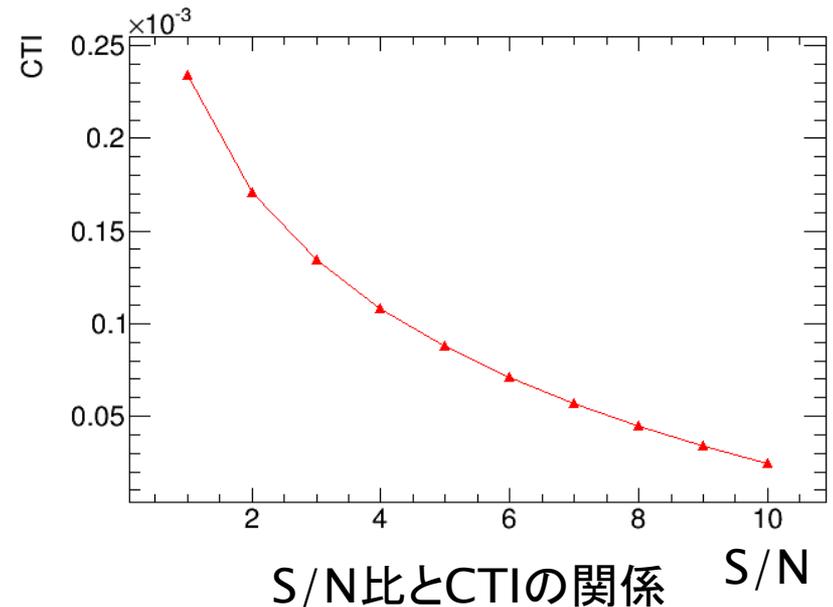
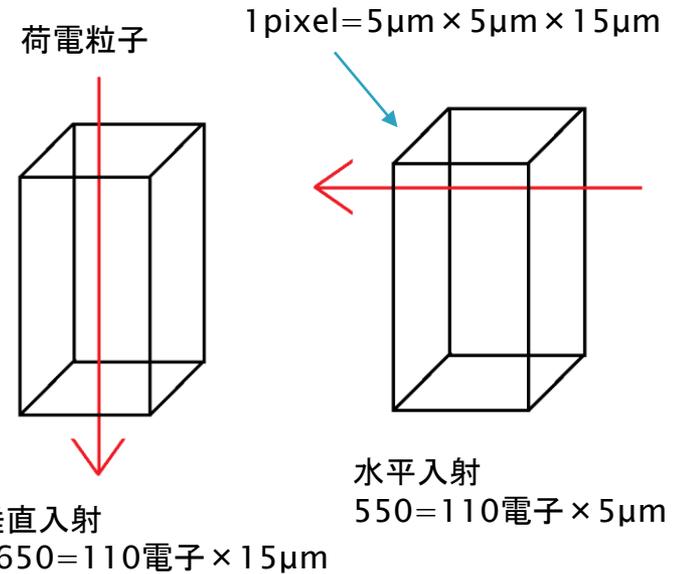
Dark chargeとhot pixelはILCで運用するにあたり問題とならない

# CTIへの要求

- ▶ CTIが大きいと信号電荷が小さくなる  
→S/N比に影響
- ▶ ノイズ: 42電子
  - Dark charge(200msec)の幅
- ▶ 最小信号: 550電子
  - MIPはシリコン内で110 電子/ $\mu\text{m}$  生成
  - MIPがピクセルへ水平入射すると5 $\mu\text{m}$ 通過

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

- 転送回数: 11000
- ▶ 性能評価
  - $(5.93 \times 10^{-5}) \times 7 = 41.5 \times 10^{-5}$
  - S/N=0.14
  - →CTIの改善が必要
    - S/N比10を目指す
    - $CTI < 2.45 \times 10^{-5}$



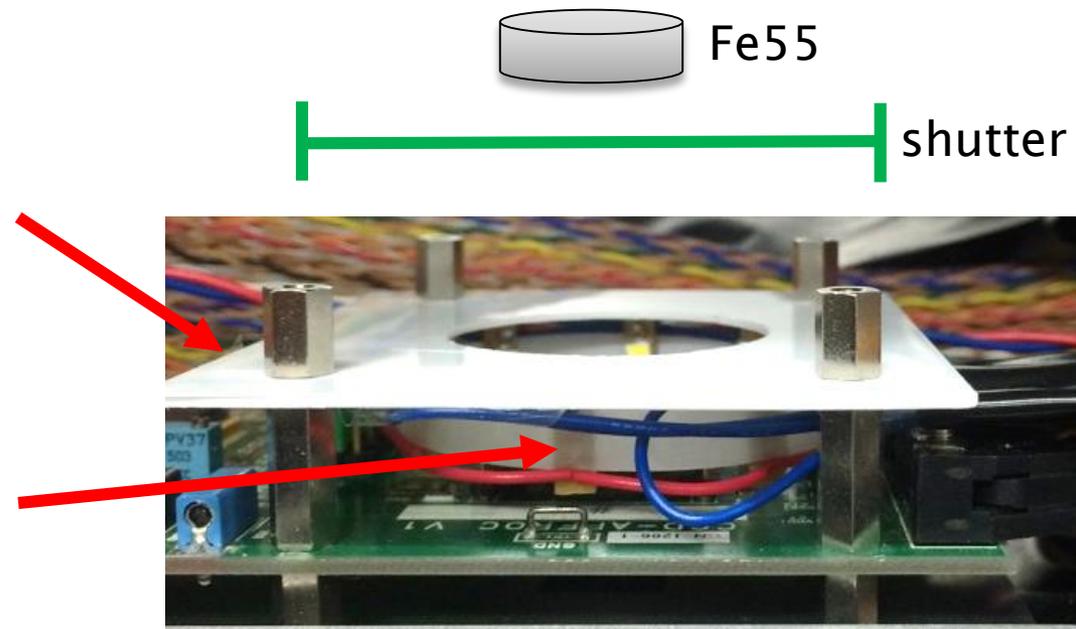
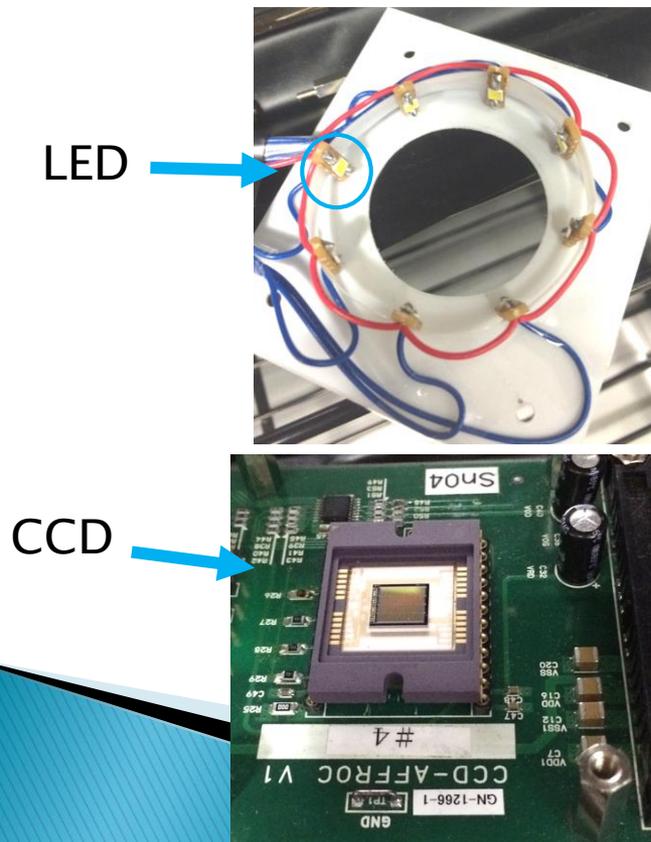
# CTI improvement

# 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
    - 電氣的にピクセルに直接注入
      - ピクセル全体に均一に流すことは難しい
    - Dark currentを利用
      - クロックパルス電圧を変更することでdark currentの量を調節可能
  - 本実験では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

- ▶ 8個のLEDが等間隔でCCDの周りに設置される。
- ▶ LEDは並列に接続され等電圧を加えられる。
- ▶ 中央の穴の上にFe55線源が設置される。

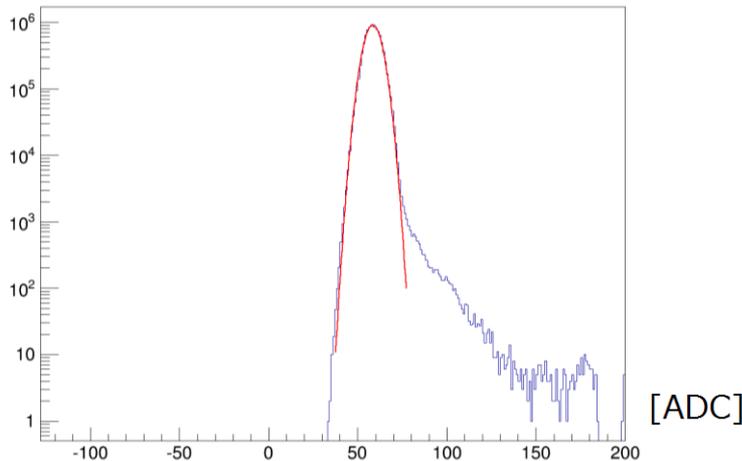


# Result

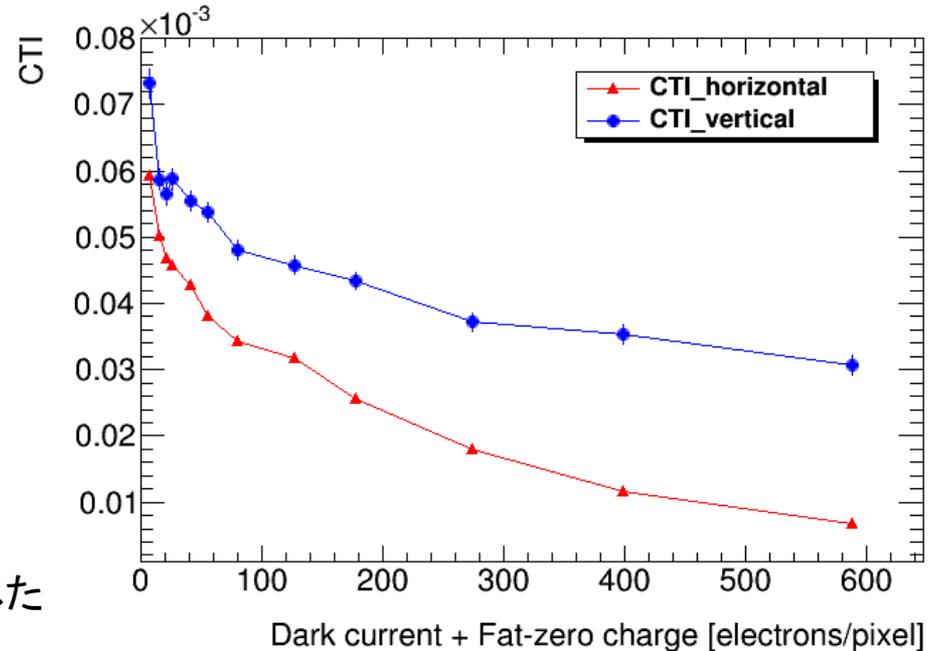
	Fat zero charge無し	600電子/pixel 注入
$CTI_h$	$(5.93 \pm 0.05) \times 10^{-5}$	$(0.68 \pm 0.04) \times 10^{-5}$
$CTI_v$	$(7.32 \pm 0.22) \times 10^{-5}$	$(3.07 \pm 0.15) \times 10^{-5}$

## ▶ $CTI_h$ は9倍、 $CTI_v$ は2倍の改善

- 水平転送回数は垂直転送回数に比べ非常に多いため、 $CTI_h$ は電荷損失において支配的でありほぼ9倍の改善が見込まれる



600電子注入時のdark charge  
Fat zero chargeによりペDESTALが移動した

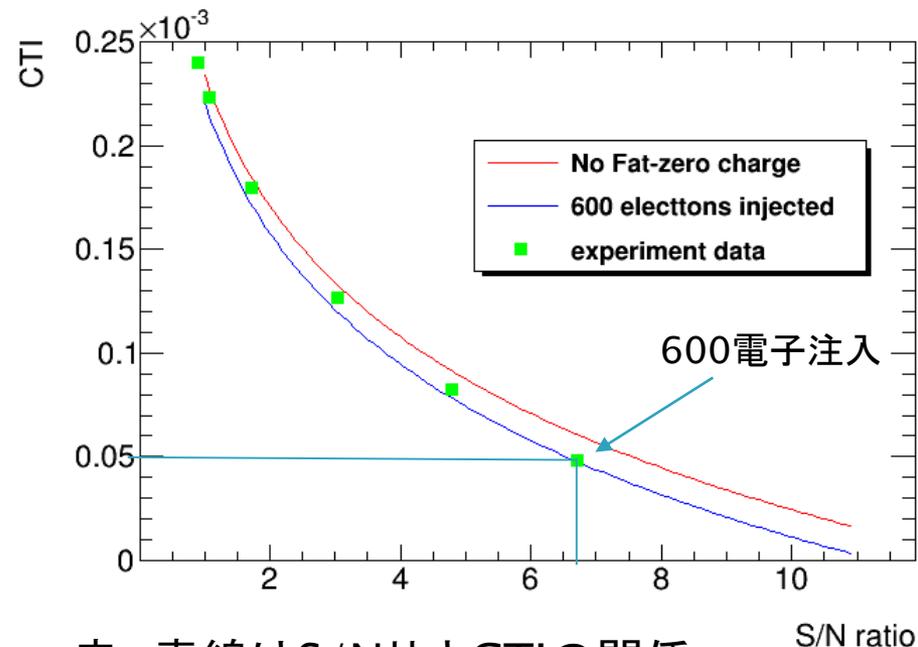


# CTIとS/N比

- ▶ Fat zero chargeによるショットノイズ
  - ノイズが増加し、CTIへの要求が厳しくなる
- ▶ 測定結果との比較
  - CYRICでの照射量の7倍の耐性が  
必要なため、CTIを7倍してS/N比を  
計算
  - 600電子注入時S/N比6.7
  - → 目標とするS/N比10には届かない
  - 更なる改善方法を考える

※さらに電荷を注入するとS/N比は改善すると  
予想されるが、現在の読出し回路の仕様により  
これ以上電荷を増加できない

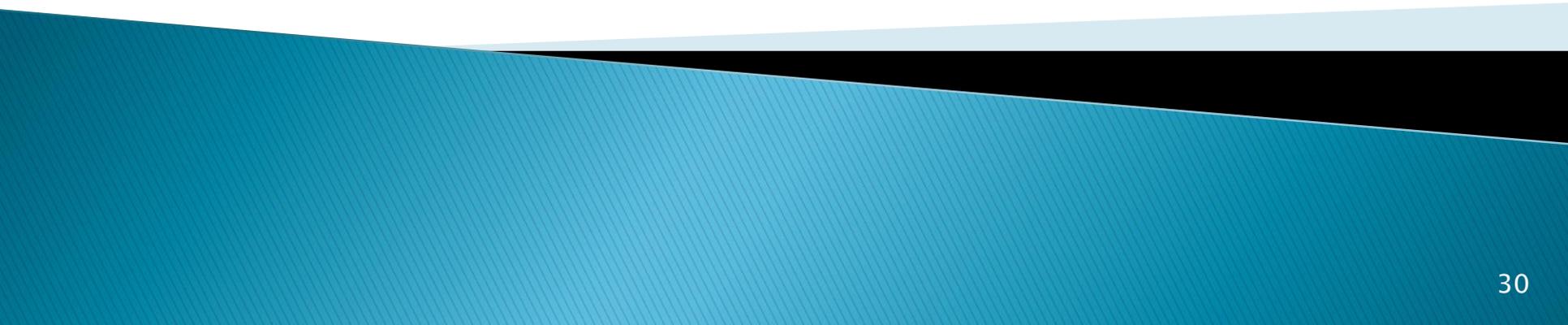
$$S/N = \frac{(1 - CTI)^{11000} \times 550}{\sqrt{42^2 + N_{Fatzero}}}$$



赤、青線はS/N比とCTIの関係  
緑点はFat-zero chargeを注入し測定し  
たCTIを7倍悪化させたもの

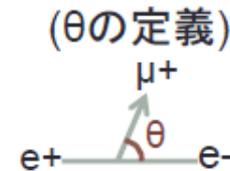
# まとめ

- ▶ ILC実験の崩壊点検出器の候補としてFPCCDを開発している。
- ▶ 試作FPCCDへ中性子照射試験を行い、中性子耐性を評価した。
  - Dark charge: 0.76電子へ増加したが雑音より十分小さい
  - Hot pixel fraction:  $(1.03 \pm 0.19) \times 10^{-6}$ へ増加したが、ピクセル占有率への影響は十分小さい
  - CTI: S/N比0.14となり要求性能を満たさない
- ▶ CTIの改善
  - LEDを用いたFat Zero charge injectionで、 $CTI_h$ は9倍、 $CTI_v$ は2倍の改善を達成した。
- ▶ Dark chargeとhot pixelについてはILCに使用できる十分な耐性を持っているが、CTIは改善が必要になることがわかった。



# 衝突径数分解能

- ▶  $\sigma \leq a \oplus \frac{b}{p\beta \sin^{3/2} \theta} (\mu m)$
- a: 検出器の分解能
  - b: クーロン多重散乱



実験	a( $\mu m$ )	b( $\mu m$ GeV/c)
LEP	25	70
LHC	12	70
ILC	5	10

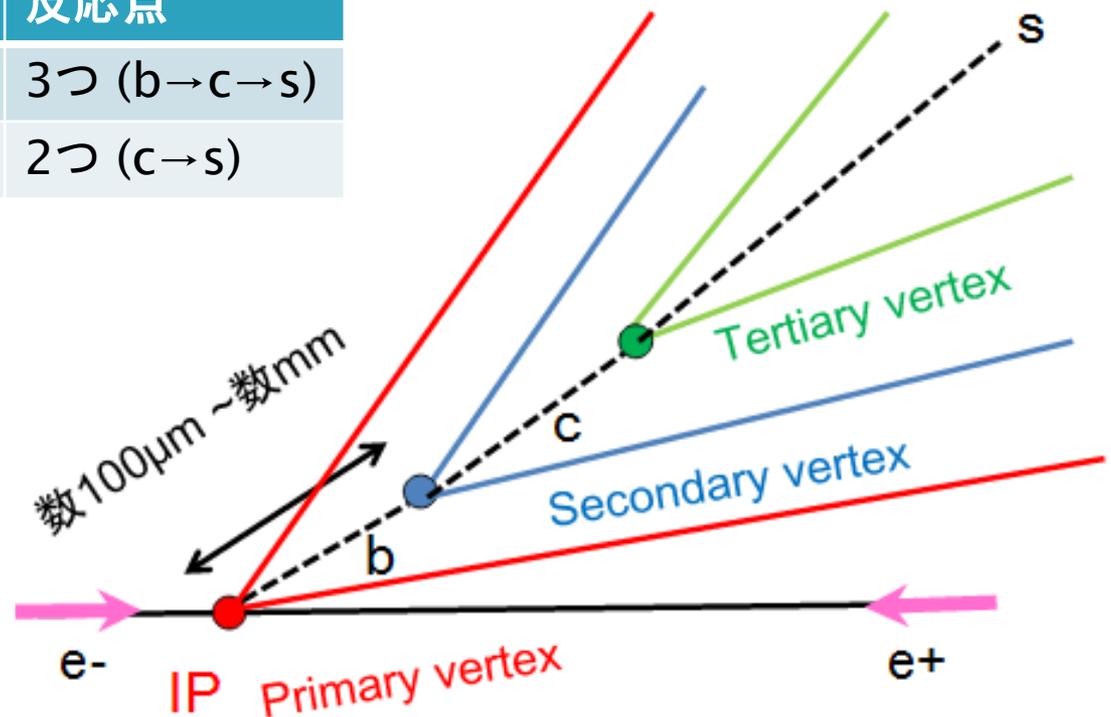
各実験の崩壊点分解能のパラメータ

# フレーバータグ

- ▶ b, cハドロンは数ps程度の短い寿命のため、衝突点から少し飛んで崩壊

	寿命	反応点
bハドロン	1.5ps	3つ (b→c→s)
cハドロン	0.4ps	2つ (c→s)

→数 $\mu\text{m}$ の精度の崩壊点検出



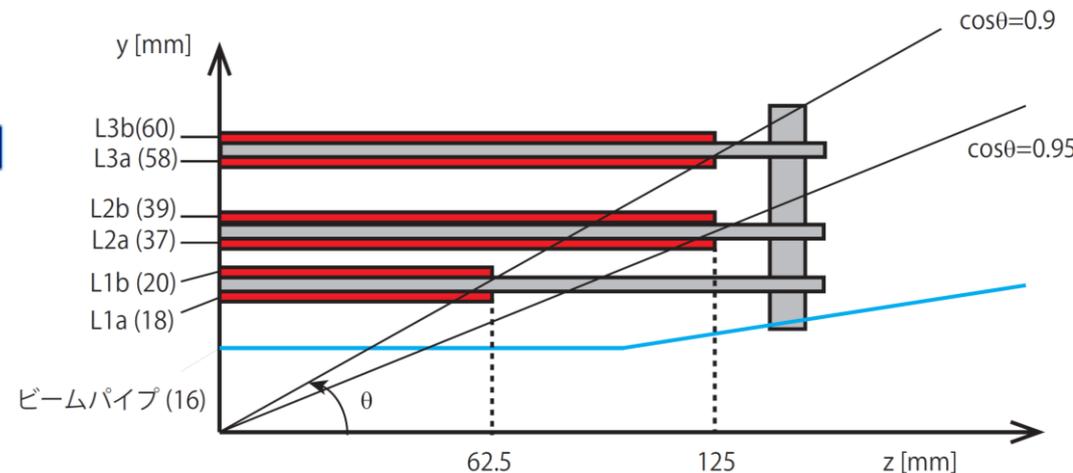
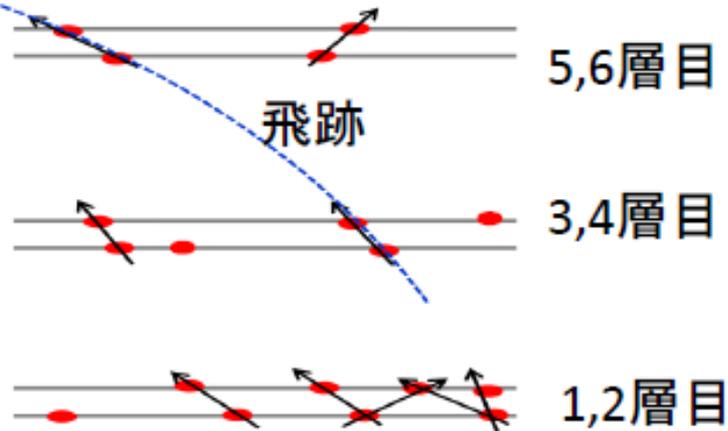
# ILCのための崩壊点検出器候補

	ピクセルサイズ	読出し
MIMOSA(CMOS)	16 $\mu$ m	トレイン中
DEPFET	20 $\mu$ m	トレイン中
FPCCD	5 $\mu$ m	トレイン間
SOFIST	20 $\mu$ m	トレイン間

# ダブルレイヤー構造

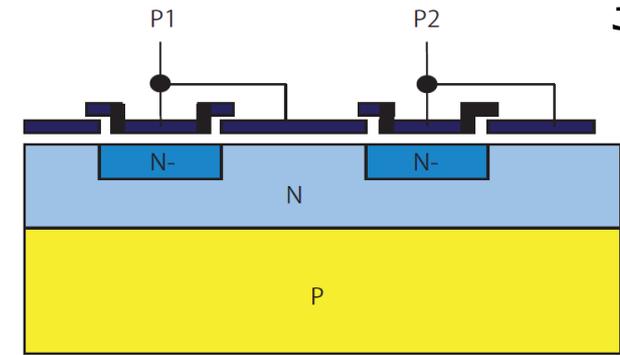
- ▶ 粒子の入射方向によるバックグラウンド除去が可能

## ダブルレイヤー構造でのヒット

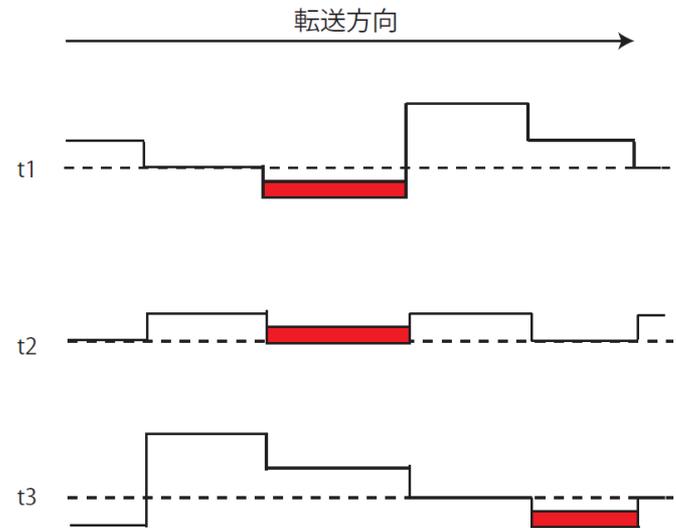


# 電荷転送

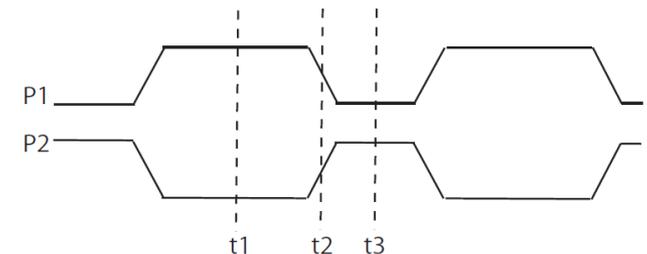
- ▶ t1: P1がハイレベル、P2がローレベルとなりP1下に電荷が蓄積
- ▶ t2: P1, P2のレベルが同時に切り替わる
- ▶ t3: P1がローレベル、P2がハイレベルとなり、電荷はP2下に転送される。
- ▶ 以上を繰り返す



(1) 2相 CCD の構造



(2) ポテンシャル図

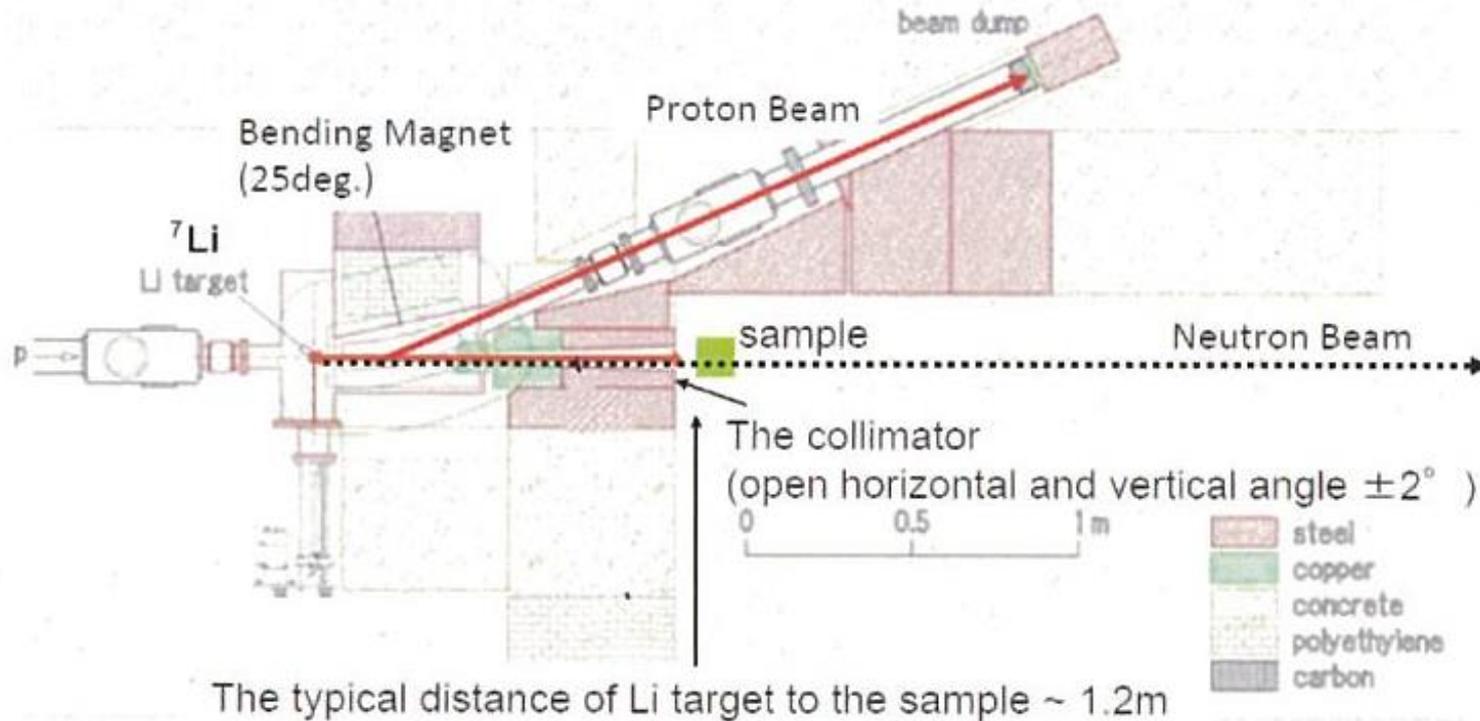


(3) タイミング図

# ペアバックグラウンド量推定

- ▶ Pair backgrounds
  - $6.32 / \text{hits} / \text{cm}^2 / \text{BX}$  at  $E_{\text{CM}} = 500 \text{ GeV}$
- ▶ Expected hits/year assuming  $0.5 \times 10^7$  sec operation
  - $6.32 \times 1312 \text{ (BX/train)} \times 5 \text{ (train/sec)} \times 0.5 \times 10^7 \text{ (sec)} =$   
 $2.07 \times 10^{11} \text{ e} / \text{cm}^2 / \text{year}$

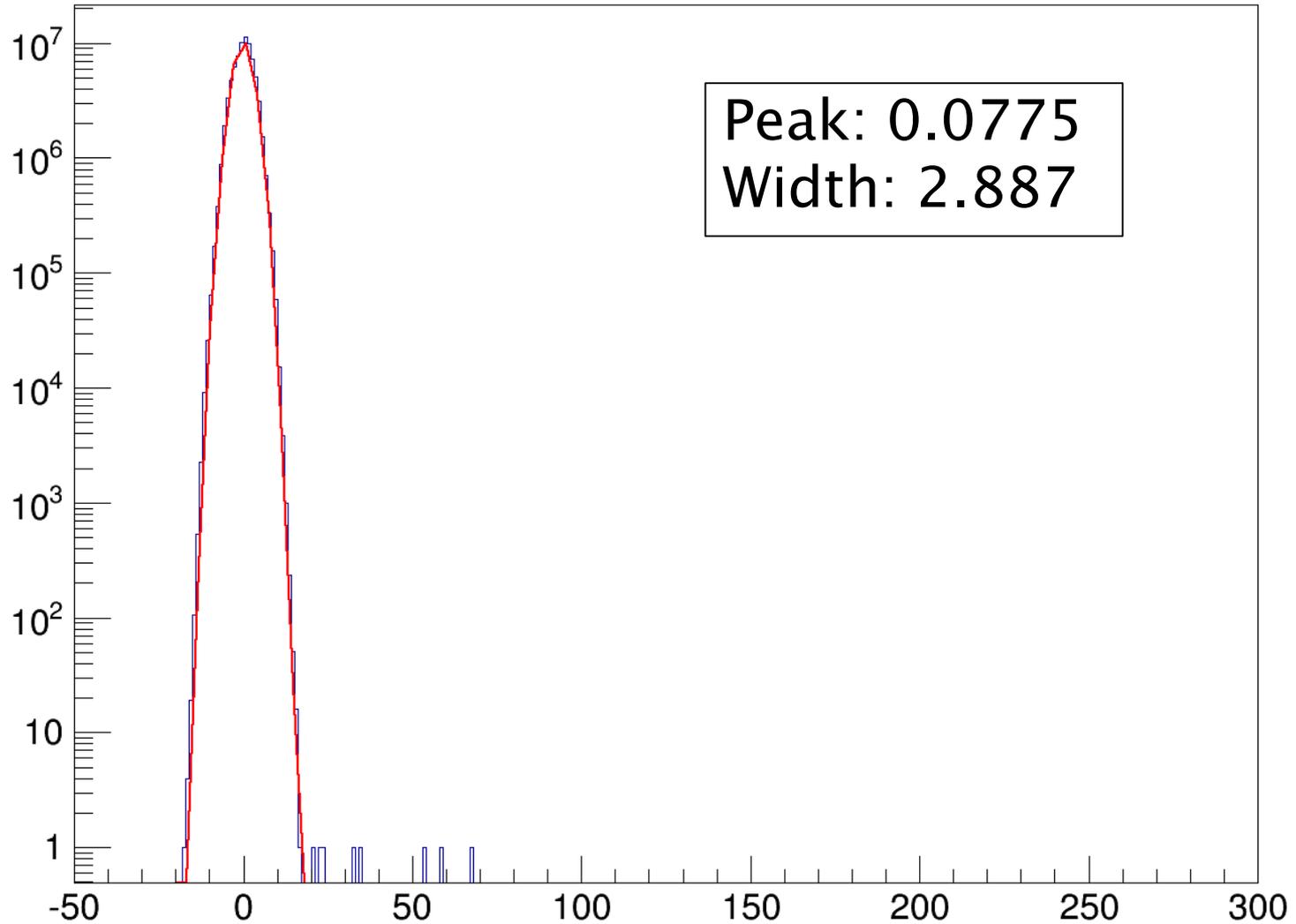
# CYRICビームライン



# ダークカレントと温度

- ▶ バンドギャップの幅は温度に依存
  - バンドギャップの幅が広くなると熱励起の確率が減りダークカレントが減少
- ▶ Varshniによる以下の式で表される
- ▶ 
$$E(T) = E(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$
  - シリコンの場合
    - $E_0 = 5.4125\text{eV}$
    - $\alpha = 7.021 \times 10^{-4}$
    - $\beta = 1108$

# Dark charge 200msec

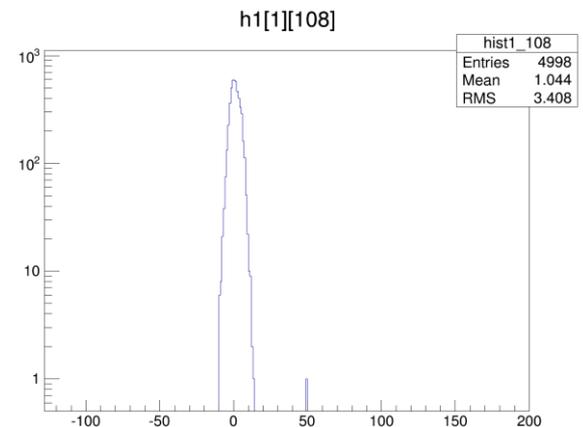
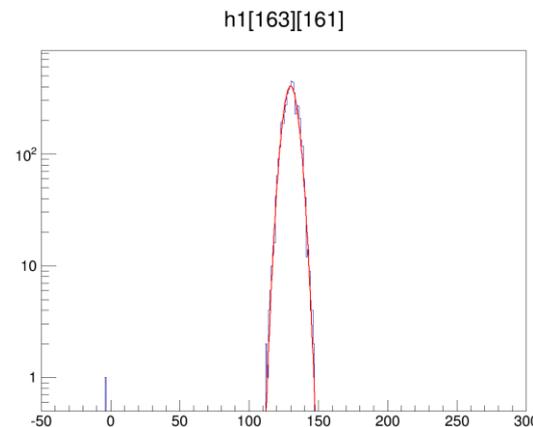
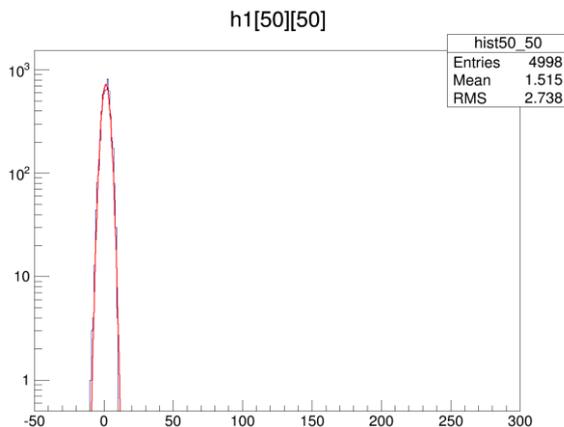


# Hot pixel

## ▶ 2種類のホットピクセル

- ① 常に大きなダークカレントを持つホットピクセル
- ② 大抵通常のピクセルと同じ程度のダークカレントを持つが、たまに大きなダークカレントが発生しホットピクセルとなるもの

1ピクセルのダークカレントのADC分布



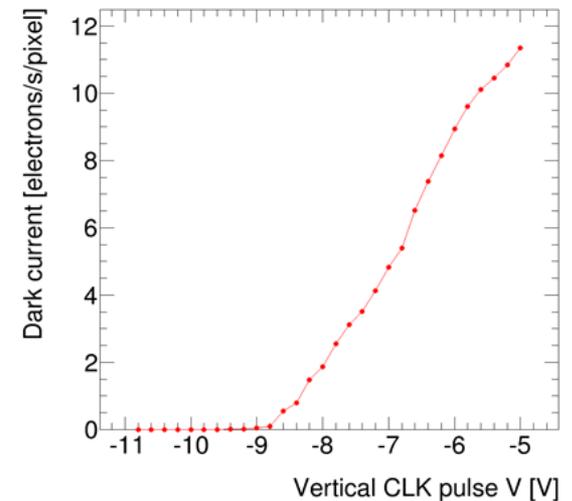
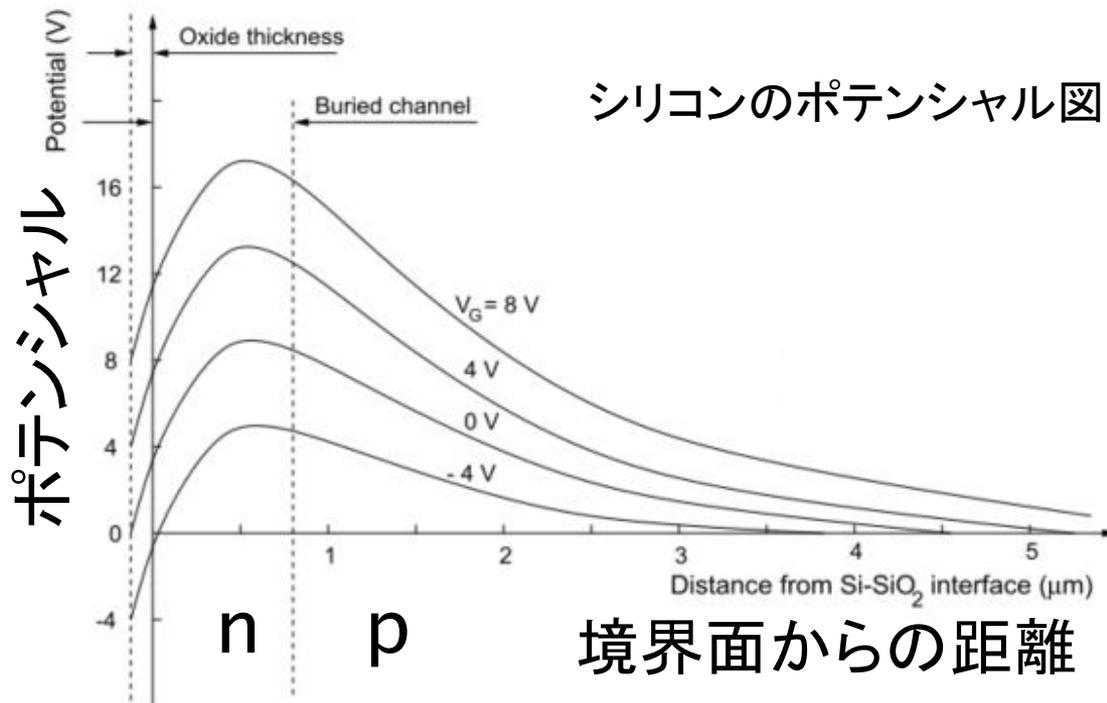
通常のピクセル  
0付近にピークを持つ

①のホットピクセル  
ピーク位置が通常ピクセル  
よりも大きい

②のホットピクセル  
0付近にピークを持つが  
まれにホットピクセルとなる

# MPP(Multi Pinned Phase)モード

- ▶ ダークカレントの主な原因はSi-SiO<sub>2</sub>境界に存在する格子欠陥
- ▶ 境界面にホールを供給することで発生した暗電荷と再結合し、ダークカレントが抑えられる。
  - 負電圧を電極に加えることで境界面のポテンシャルが負になる
  - → 周囲からホールが境界面へ供給される



# 改善案

- ▶ Fat-zero chargeの効果は水平転送ピクセルサイズに依存

水平転送ピクセル	Fat zero charge無し	600電子/ $(6\mu\text{m})^2$	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

- ▶ 水平転送ピクセルを小さくすることでFat-zero chargeによるCTIの改善がより効果的になる

# 改善案

## ▶ ノッチチャンネル

- シリコンに添加物を入れることでポテンシャルの高い場所が作られ、ノッチチャンネルと呼ばれる。
- 転送される電荷はノッチチャンネルを通るため、通過する格子欠陥の数が減り転送効率が改善される。

## ▶ アニールング

- シリコンの格子欠陥が高温下で回復
- 100°Cで168時間のアニールング後、CTIが2-3倍改善した

E. Martin, et al. IEEE Trans, Nucl. Sci. vol. 58, No.3, 2011

## ▶ ノイズの低下

- CTIへの要求を緩くする

