

# 国際リニアコライダーにおける 崩壊点検出器FPCCDの基本性能 および放射線耐性の研究

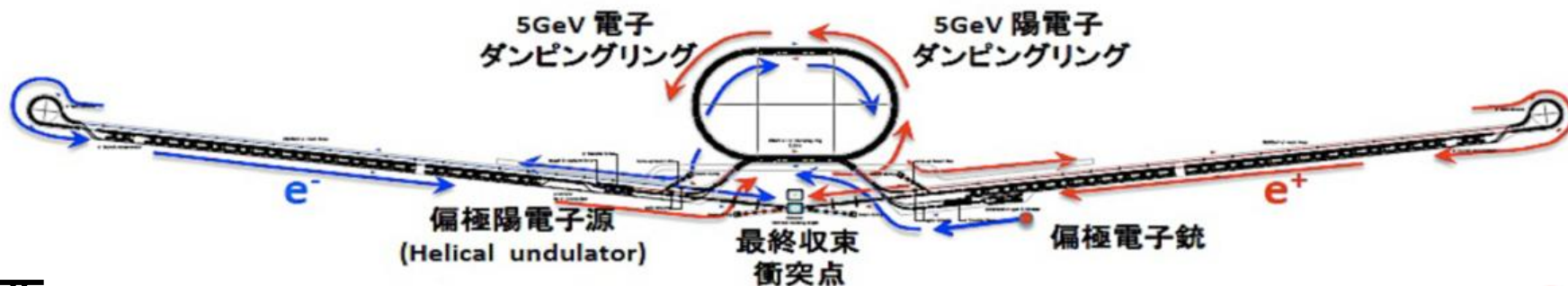
素粒子実験研究室

B3SM2010 伊藤 周平

# 国際リニアコライダー

---

# 加速器

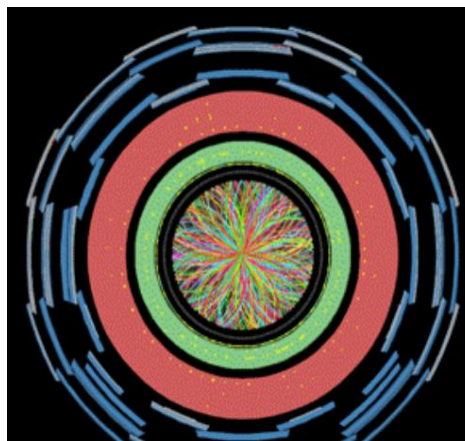


## 概要

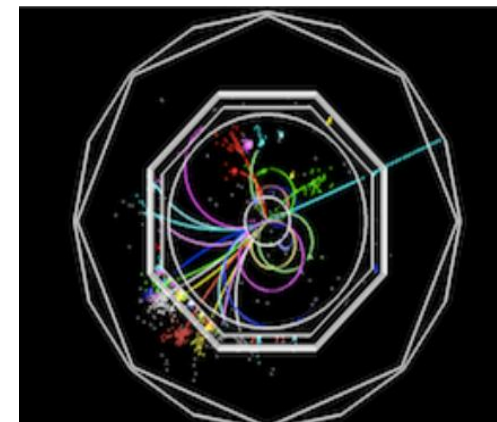
- 電子陽電子衝突型線形加速器
- 全長約31km (アップグレード後 約50km)
- 重心系エネルギー250GeV~500GeV (アップグレード後 1TeV)

## 目的

- ヒッグス粒子の精密測定
- トップ・クォークの精密測定
- 新物理の探索

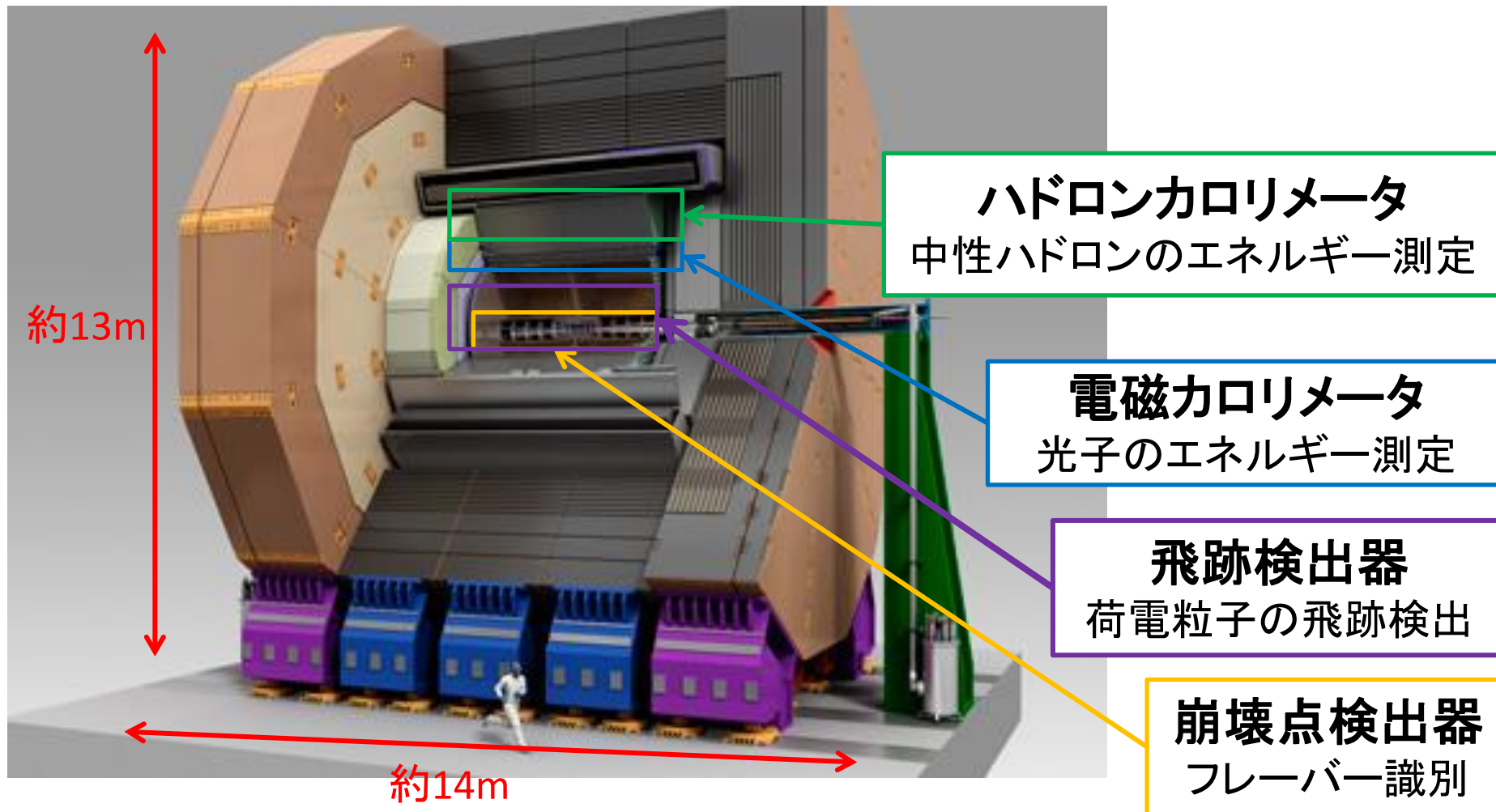


LHC



ILC シミュレーション

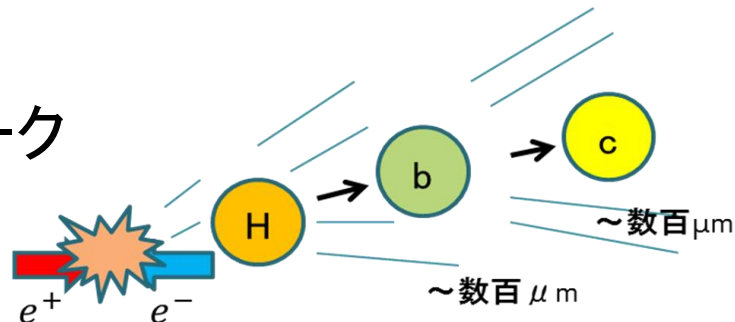
# ILD検出器



# 崩壊点検出器

## 目的

- ヒッグス粒子精密測定のために、bクォーク  
cクォークを精度よく識別



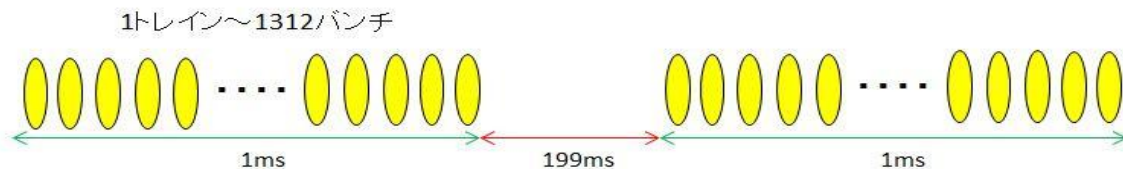
## 崩壊点検出器への要求

- ピクセル占有率(反応ピクセル数/総ピクセル数)を数%以下に抑える

## 読み出し方式

- ビームトレイン中数回に分けてシグナルを読み出す

→ CMOS, DEPFET



- トレイン間隔である

199msの間にシグナルをすべて読み出す

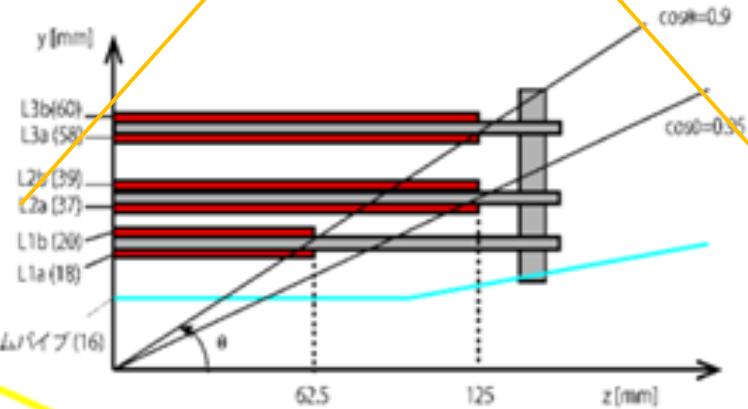
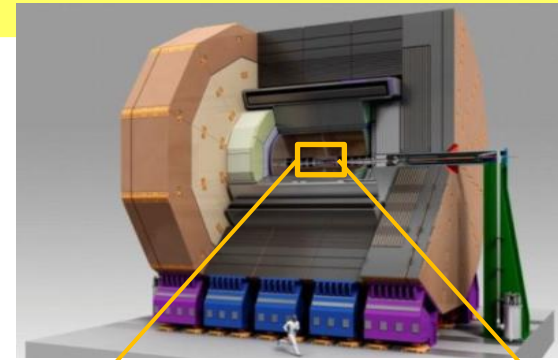
ILCビーム構造

FPCCD(Fine Pixel CCD : 高精細なCCD検出器)

# FPCCD崩壊点検出器

## 概要

- ： 高精細なCCD検出器
- 裏表にセンサーを装着した  
2重層 x 3層 構造
- 最内層は衝突点から16mm地点に
- ピクセルサイズ :  $5 \mu\text{m}$  角  
(CMOS DEPFET  $\sim 25 \mu\text{m}$  角)
- 有感領域厚さ :  $15 \mu\text{m}$
- 総ピクセル数 : 約 $10^{10}$ ピクセル
- 総チャンネル数 : 6080チャンネル



## 長所

- 位置分解能がよい( $\sim 1 \mu\text{m}$  ほど)
- シグナル読み出しのときの電氣的  
ノイズの影響すくない

## 短所

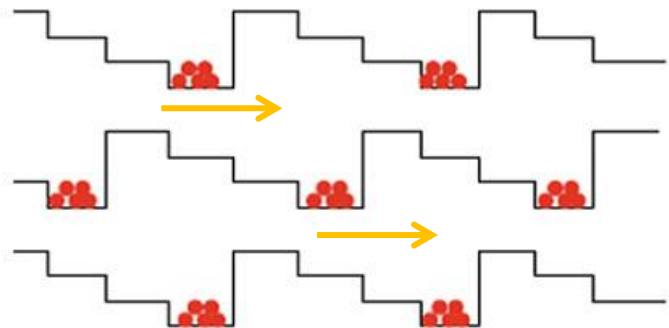
- 信号読み出し速度が遅い
- 放射ダメージに弱い

中性子ダメージテスト実施

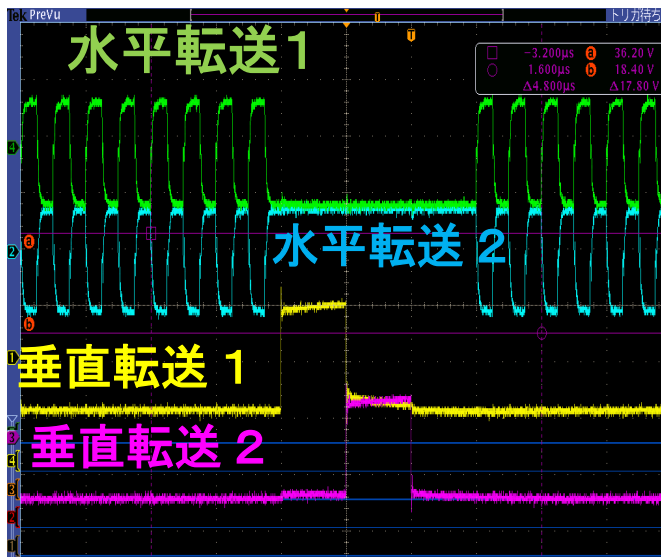
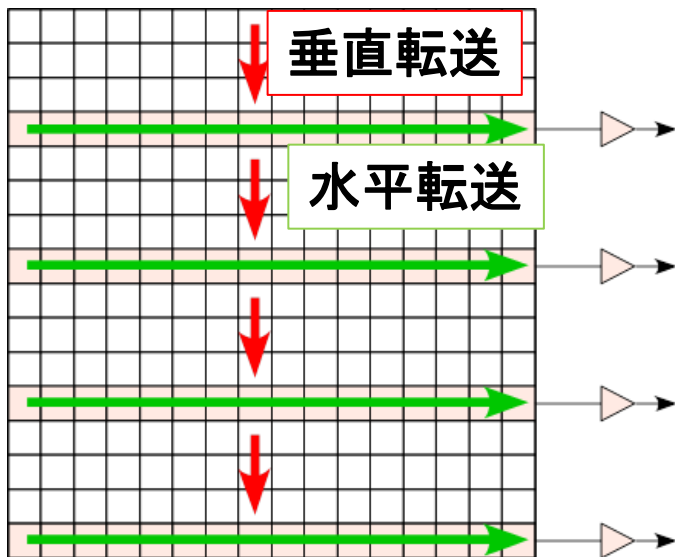
# FPCCD原理

## 原理(電荷収集方法)

- CCDは電極電圧を変化させることで電荷をバケツリレーのようにとなりのピクセルへ次々と転送していく



CCD転送様子(断面)



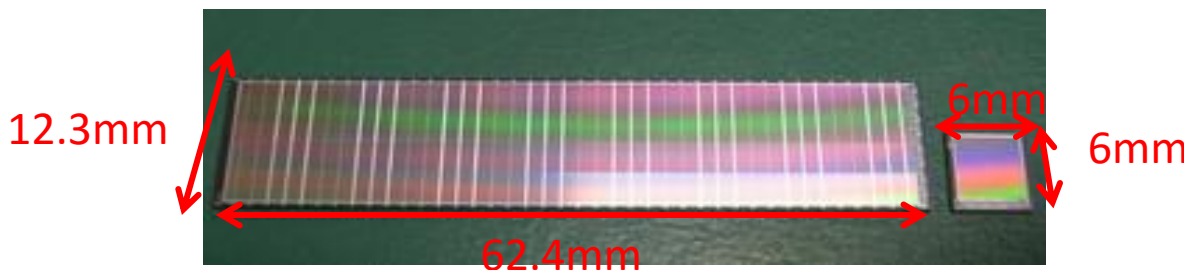
## 各種転送パルス

水平転送パルス、垂直転送パルス、が交互に印加されることで転送

# 開発状況

## センサー

- ピクセル $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 、有感領域 $15\mu\text{m}$ を目標としている。
- 現在まで $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ ピクセルサイズ試作器が完成

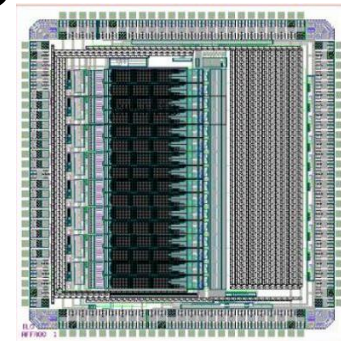


大型試作器と小型試作器

## 読み出し回路要求性能

- : 読み出し速度  $> 10\text{Mpixel/s}$  (クロックパルス $100\text{MHz}$ )  
→ 全てのピクセルをトレイン間隔で読み出すため
- : 読み出し回路ノイズ  $< 30$  電子
- : 電力消費量  $< 6\text{mW/ch}$

読み出し速度 :  $12\text{Mpixel/s}$   
ノイズ :  $6\text{electrons}$   
電力消費量 :  $5.8\text{mW/ch}$



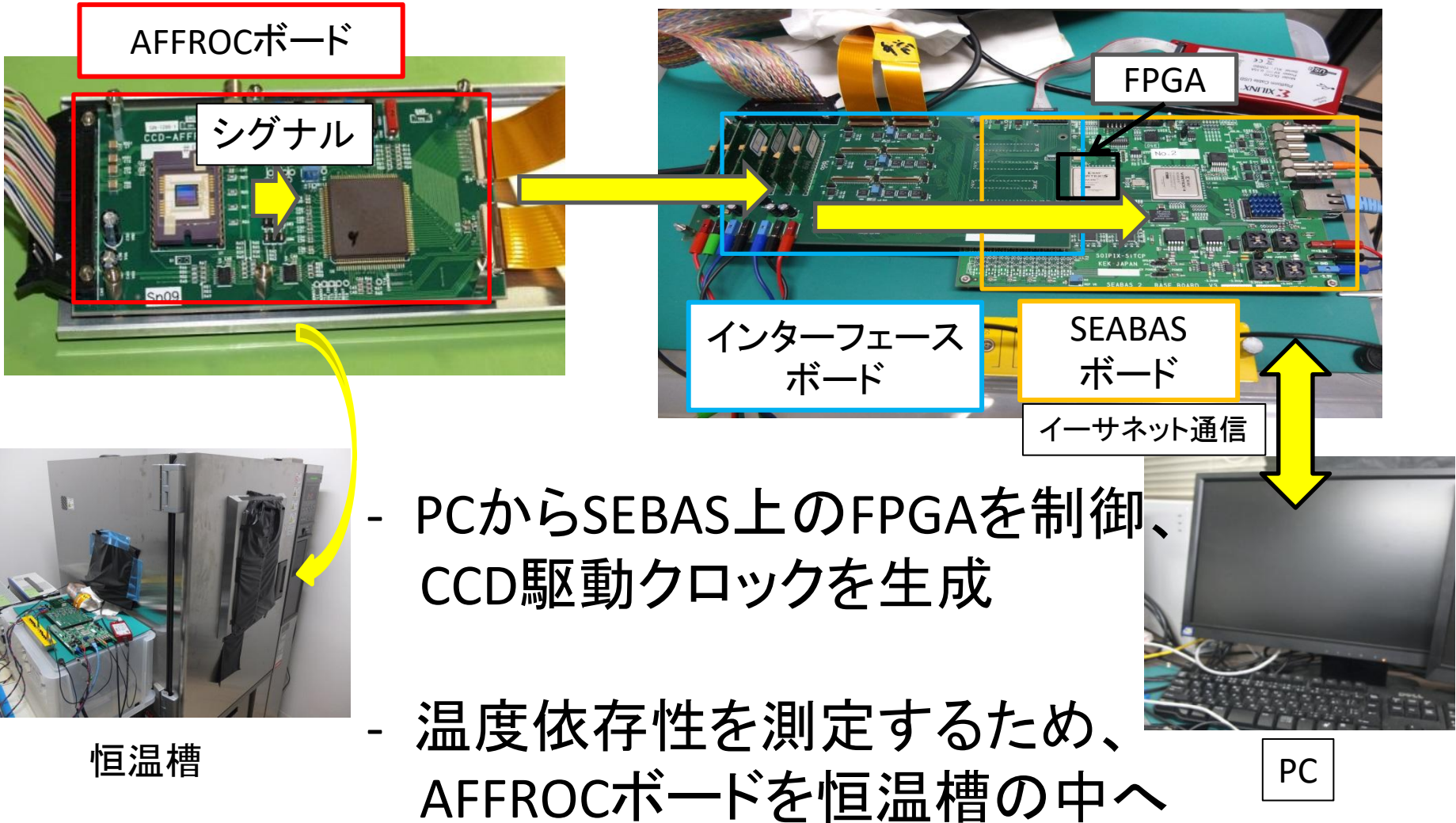
試作読み出し回路

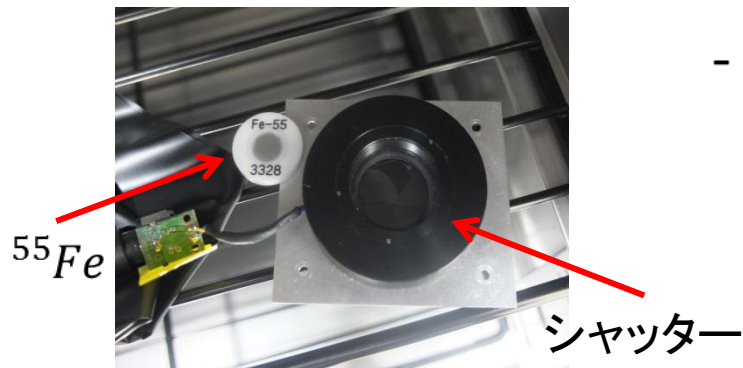


# FPCCD信号読み出しテスト

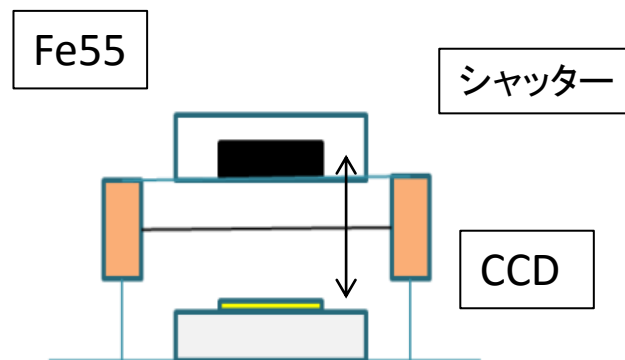
---

# 信号読み出し装置

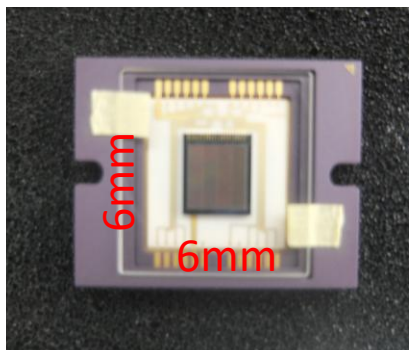




- CCDの性能を測定するために $^{55}\text{Fe}$ を用いる  
 → 5.9keVのX線を放出する

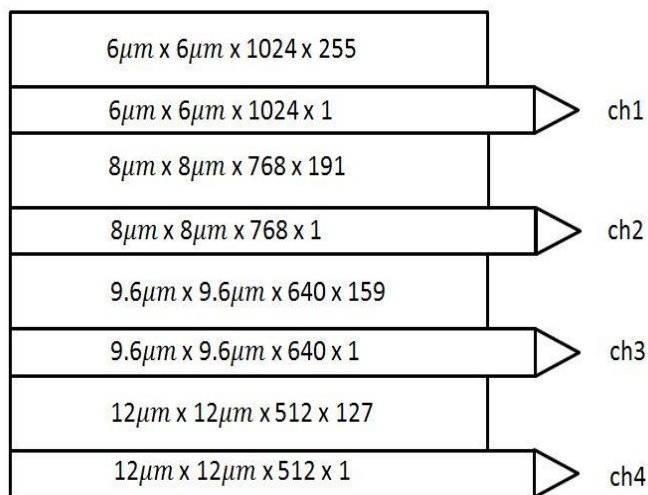


シャッターを開閉することで、X線の有無を調節する

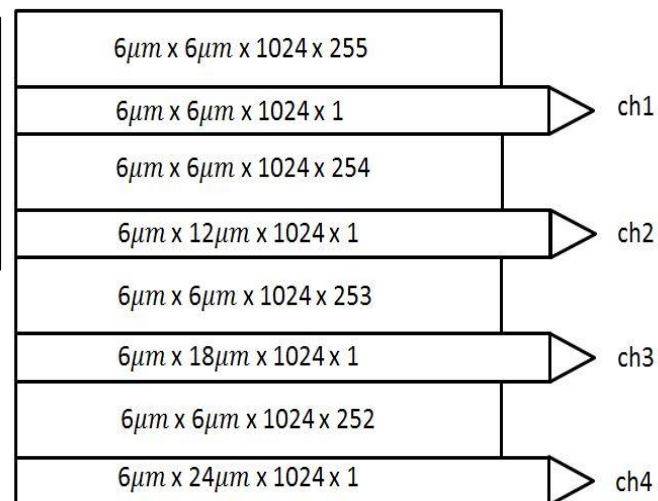


- 6mm x 6mm 小型試作器を使用  
有感領域の厚さ : 15 $\mu$ m  
チャンネル数 : 4
- 2種類のセンサーを使用

異なるピクセル  
サイズを持つ  
センサー



6 $\mu$ m角  
ピクセル  
サイズ  
センサー



まずは12 $\mu$ m角チャンネルにおいて  
読み出しテストをおこなった

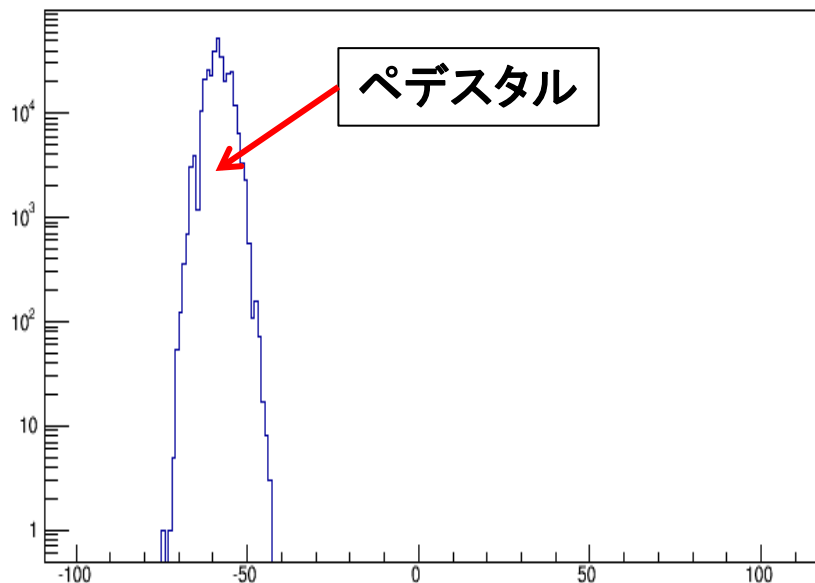
# 信号読み出し結果

---

# 信号読み出しテスト

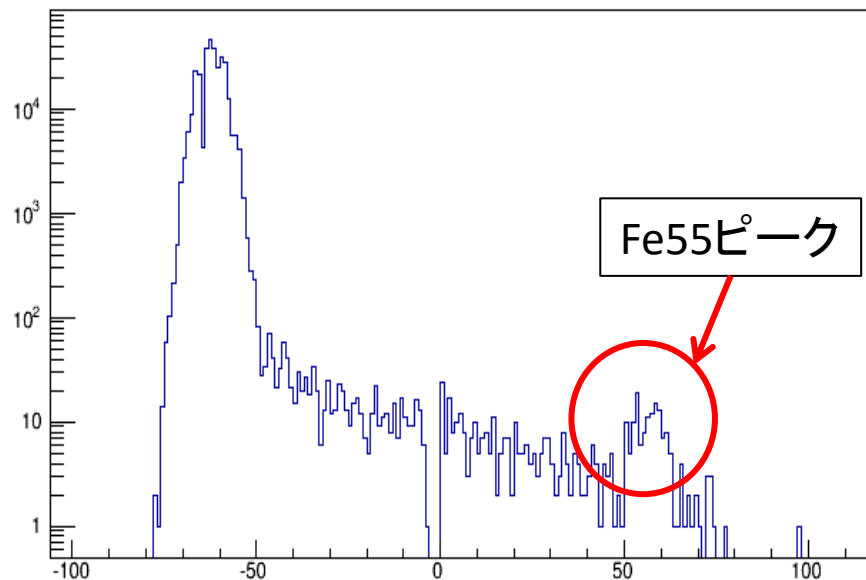
- まずCCD駆動パルス6MHzにおいて読み出しテストを実施

統計量



ADC値  
シャッター閉

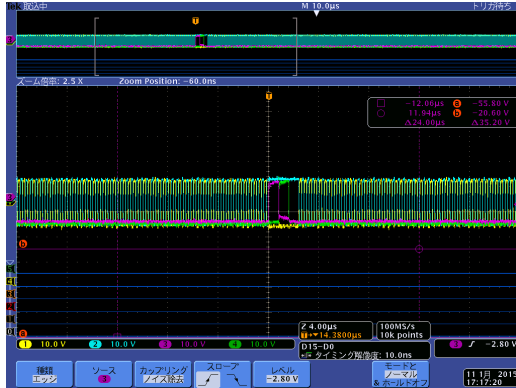
統計量



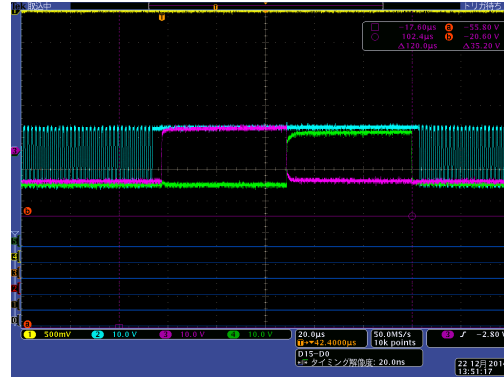
ADC値  
シャッター開

6MHz駆動パルスを用いて<sup>55</sup>FeのX線ピークを確認した

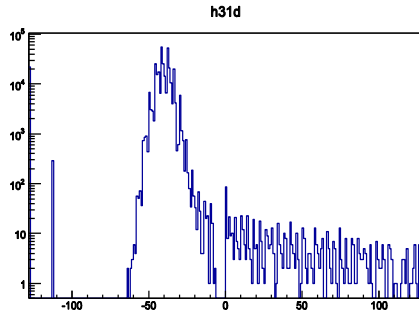
# 信号読み出しテスト



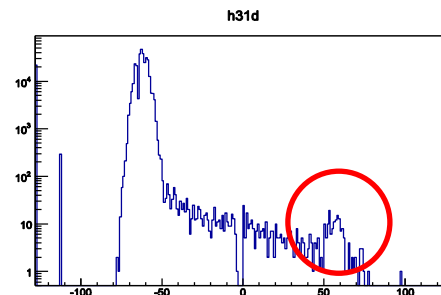
垂直転送4µms



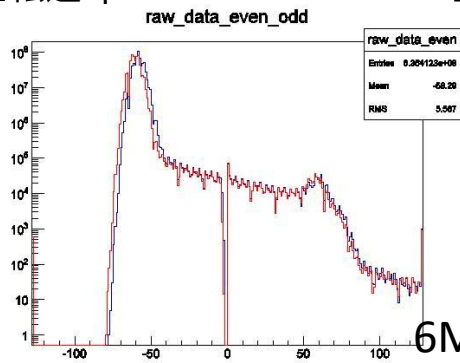
垂直転送255µms



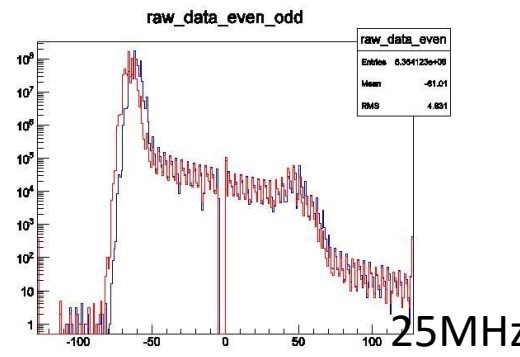
垂直転送4µms



垂直転送255µms



6MHz



25MHz

- 垂直転送をより十分に行うために、パルス幅を変更  
→ 垂直転送パルス4µmsから垂直転送パルス255µmsへ広げる

- 垂直転送パルス幅を広げたことでFe55のピークを確認

- 25MHzにおいてピークを確認したが6MHzと比べ上下に揺らぐ構造が見られる  
→ 現在追居中

# 測定項目

---

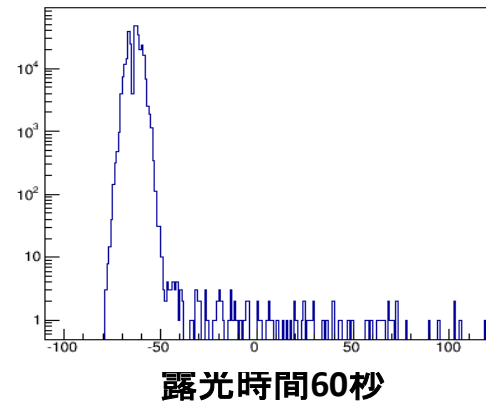
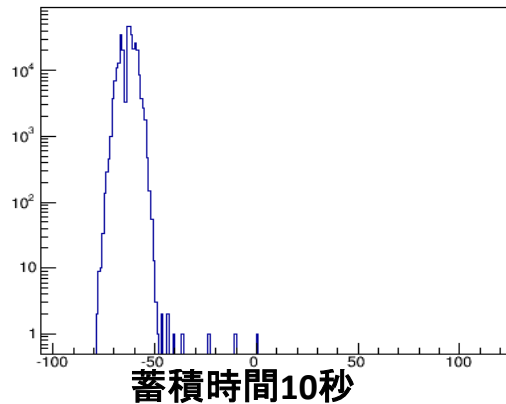


中性子照射試験前後で以下の項目を測定し、変化を測定

- ダークカレント  
中性子照射によって電子ノイズがどれだけ上昇するか
- ホットピクセル  
飛跡再構成に悪影響を与えるほど増加するか
- CTI(Charge transfer inefficiency)  
中性子照射によって、電荷信号転送効率がどれほど低下するか

# ダークカレント

- ダークカレントは蓄積時間の長さに比例して上昇
- 蓄積時間を変化させながらペDESTALピーク位置の変化測定



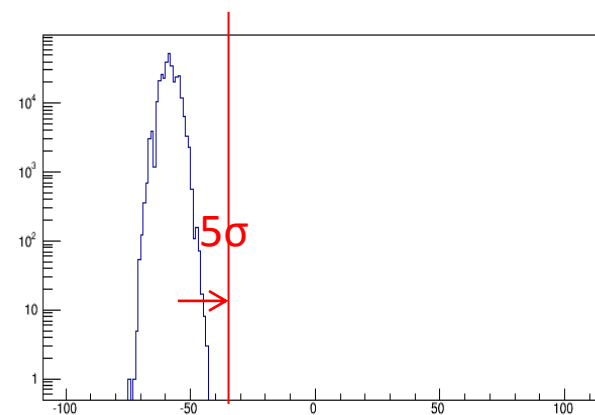
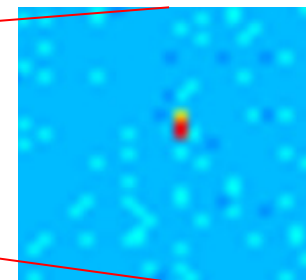
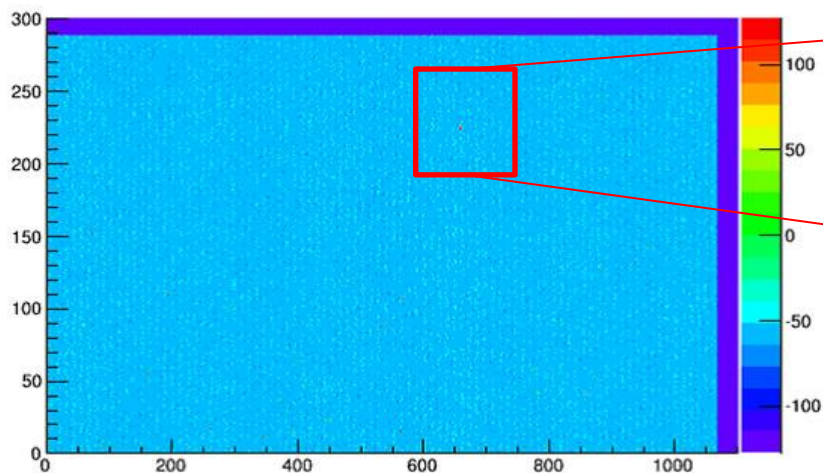
## 計算方法

- ペDESTALピーク位置をガウシアンでフィットする
- ペDESTALピーク位置と露光時間でグラフを作成、1次関数でフィット
- 1次関数の傾きが1秒あたりに放出されるダークカレントに相当する。

# ホットピクセル

## ホットピクセル

- X線を当てていないにも関わらず通常より高い信号をだすピクセル
- ピクセル占有率を高めてしまい、トラッキングに悪影響を与えてしまう



## 定義

- ダークカレントの中心値より $5\sigma$ 以上のパルス高をもつピクセルをホットピクセルとする

全ピクセルに対してのホットピクセルの割合を測定

# Charge Transfer Inefficiency(CTI)

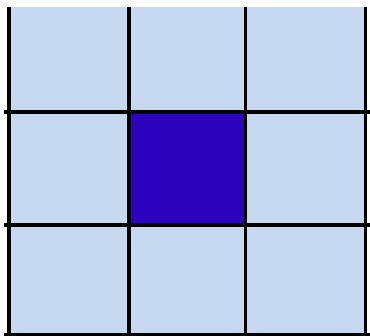
## Charge Transfer Inefficiency(CTI)

- とんりのピクセルに信号を転送するときの転送非効率
  - 読み出し口から遠いピクセルは転送回数が多くシグナルを多く損失してしまう

## 計算方法

1. シングルヒットイベントを選定する。
  - X線のエネルギー5.9keVのエネルギーが十分に落とされたピクセル

## シングルヒットイベント



- : 中央の周り8つのピクセルのADC値がダークカレントの平均値より $+5\sigma$ 以下
- : 中央のピクセルが十分大きなADC値を持つ

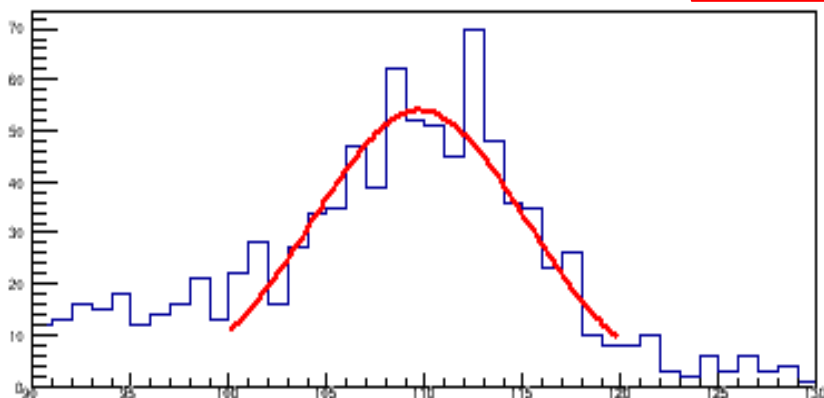
# Charge Transfer Inefficiency(CTI)

## 2. 1チャンネル

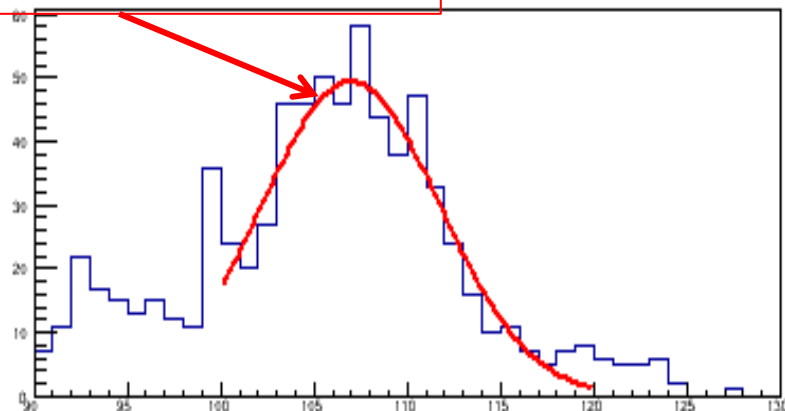
(12 $\mu\text{m}$  角CCDなら512 x 128、6 $\mu\text{m}$  角なら1024 x 256 ピクセル数)  
を、1領域16 x 16 ピクセルとした領域で分ける

## 3. 各領域においてシングルヒットイベントを 選定しガウシアンでフィット

ピーク位置が低方向へずれる



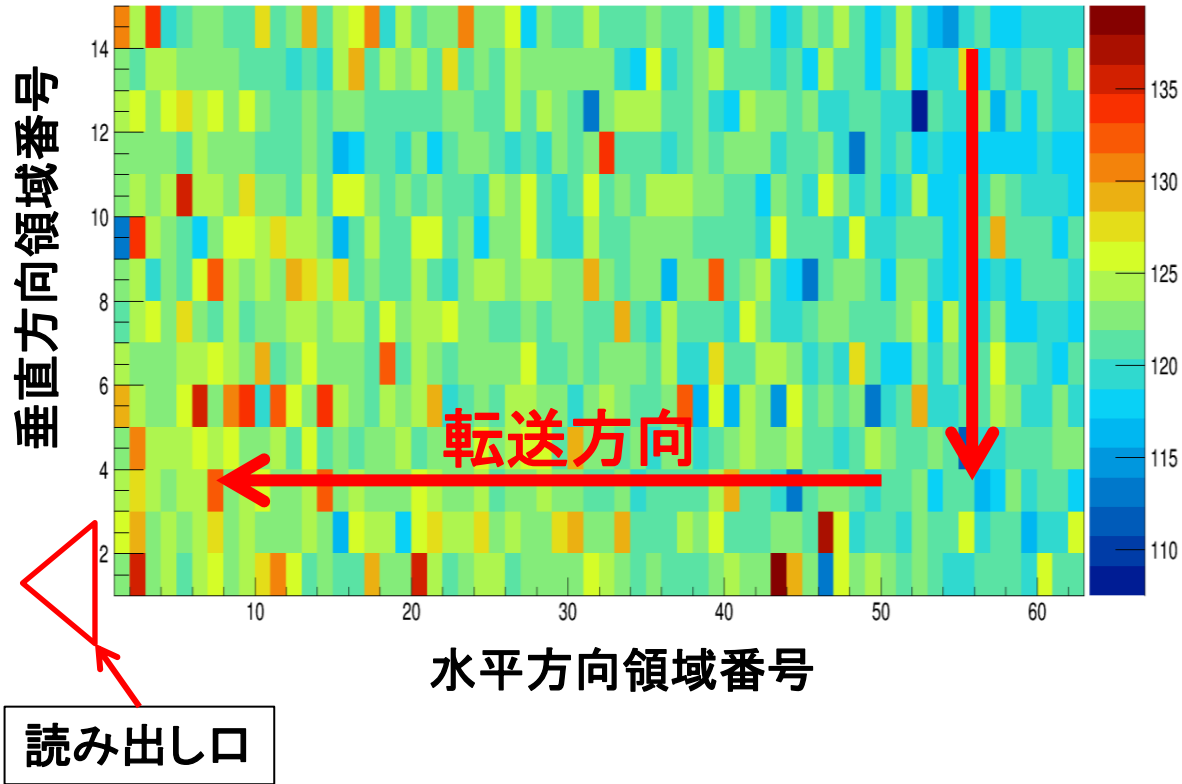
領域(1, 1)



領域(1, 63)

信号読み出し口(0, 0)から遠い領域ほど、転送回数が多いためシグナルを多く損失する

# Charge Transfer Inefficiency(CTI)



全領域を

$$f(x, y) = Aa^x b^y$$

でフィットする

$a$  : 水平方向転送効率

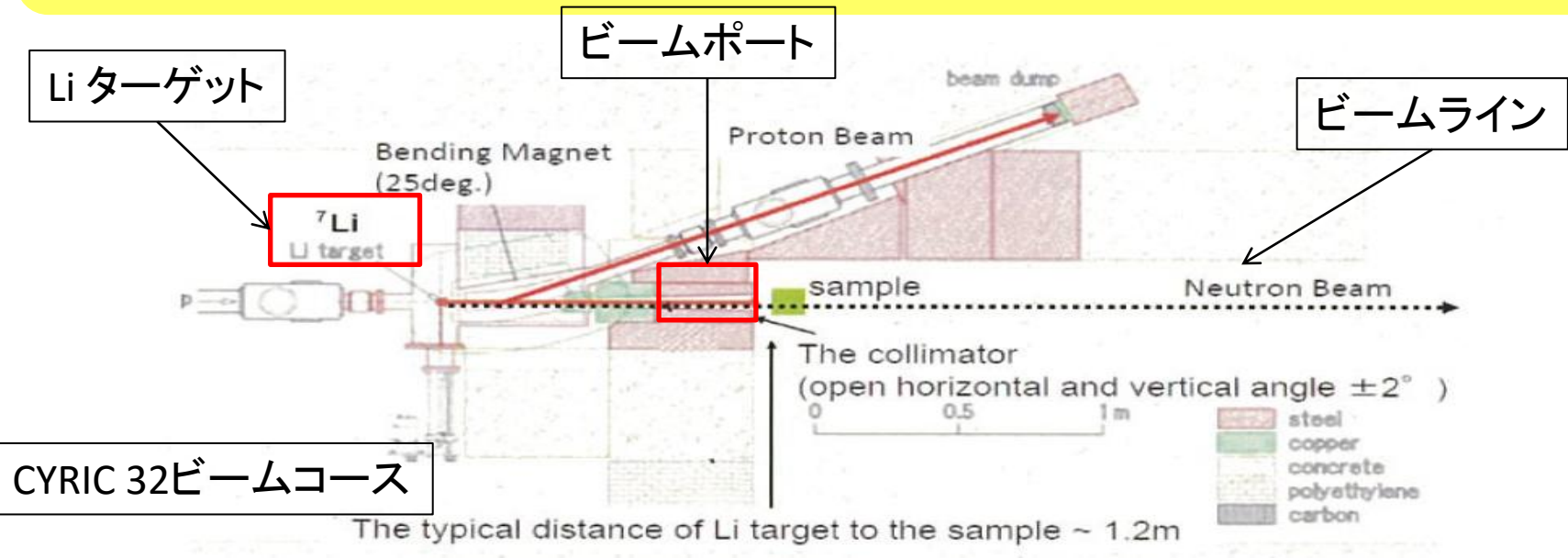
$b$  : 垂直方向転送効率

中性子照射試験前後において、どれほど転送効率が低下したかを比較する

# 中性子照射試験

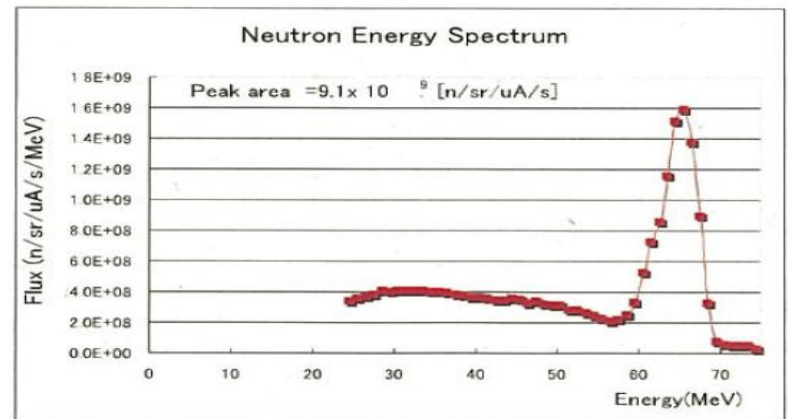
---

# 中性子照射試験



## 概要

- 東北大学CYRICにて試作FPCCD  
に対して中性子照射試験を実施
- 70MeVプロトンビームから約65MeV  
中性子ビームを生成可  
 $\text{Li} + \text{p} \rightarrow \text{Be} + \text{n}$



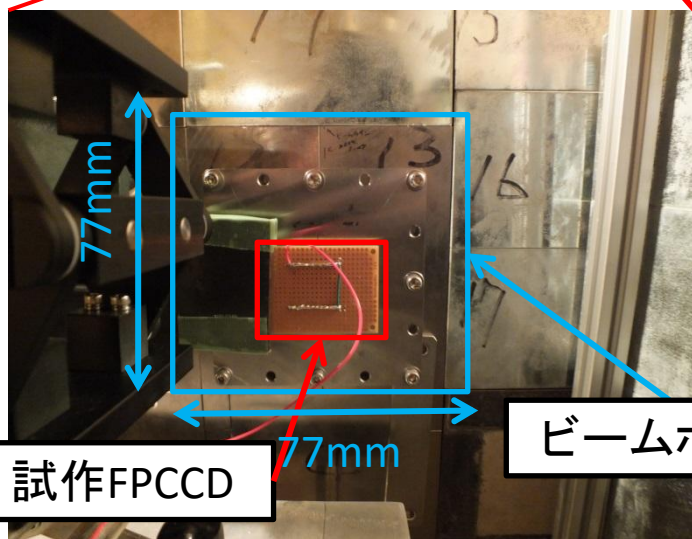
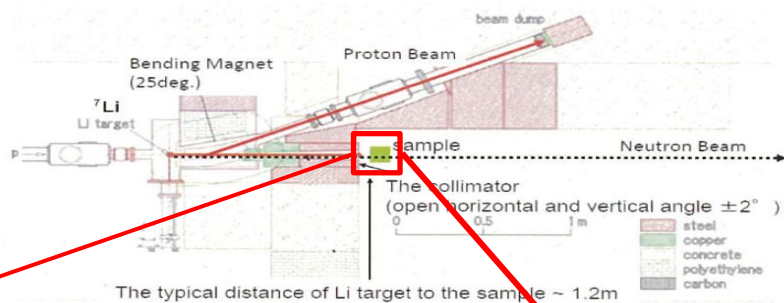
中性子エネルギースペクトラム [CYRIC 資料]



# 中性子照射

## 目的

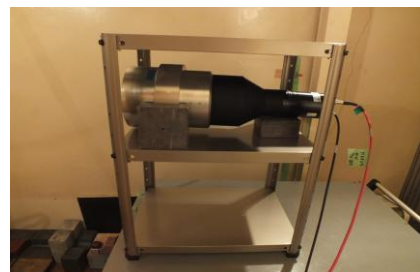
- 中性子照射前後においてFPCCDの性能がどのように変化するかを測定
- 異なるピクセルサイズを持つCCDと、6 $\mu$ m角CCDに対して中性子ビームを照射



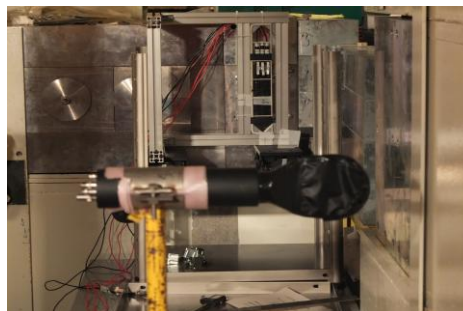
ビームポートの前に小型試作FPCCD  
を設置し中性子ビーム照射

# フラックス測定

- FPCCDに照射された中性子フラックスを測定



液体シンチレータ  
: 全フラックス測定



プラスチックシンチレータ  
: キャリブレーション



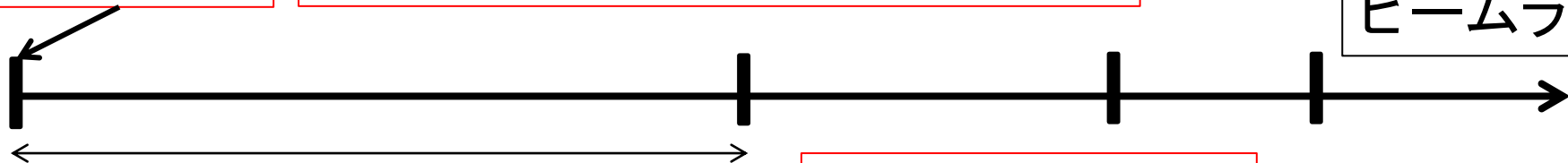
BPM(Beam Profile Monitor)  
プラスチックシンチレータ100mm x 10mm + PMT  
: 中性子フラックス形状を測定

プラスチックシンチレータ

Liターゲット

液体シンチレータ, FPCCD, BPM

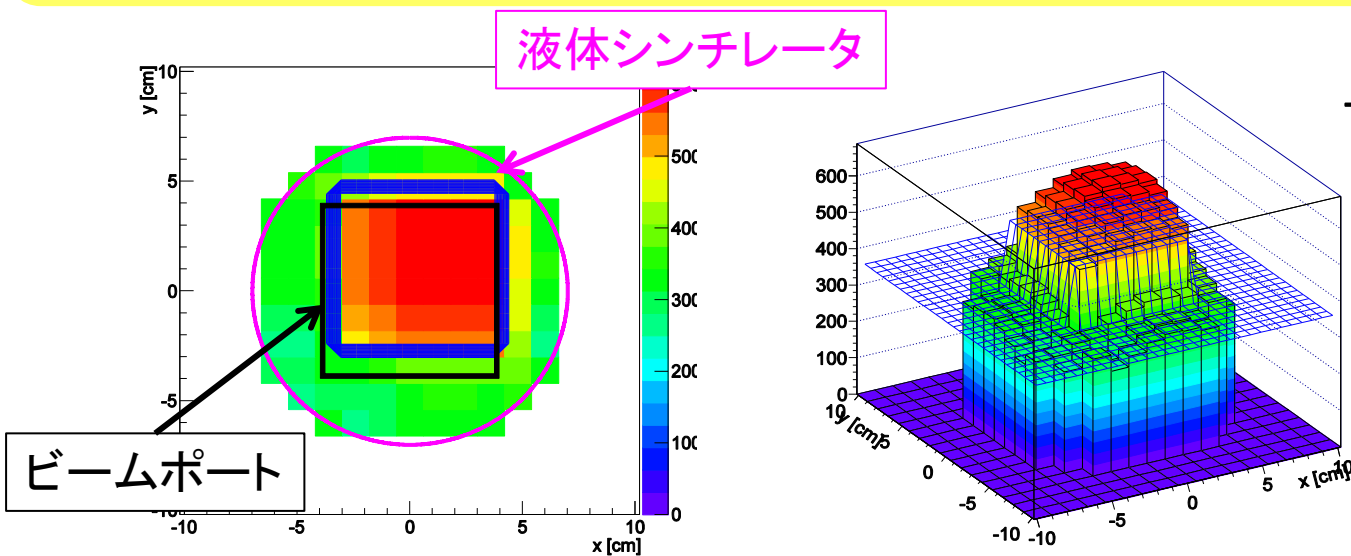
ビームライン



1.2m

液体シンチレータ

# フラックス測定結果



- 中性子ビームはビームポートからほぼ広がらずに放射される

使用FPCCD	陽子ビームカレント	照射時間	中性子フラックス
異なるピクセルサイズ	1 $\mu$ A	30分	1.02 x 10 <sup>9</sup>
6 $\mu$ m 角FPCCD	1 $\mu$ A	2時間	4.11 x 10 <sup>9</sup>

シミュレーションよりILCでの中性子フラックスは1.85 x 10<sup>9</sup>

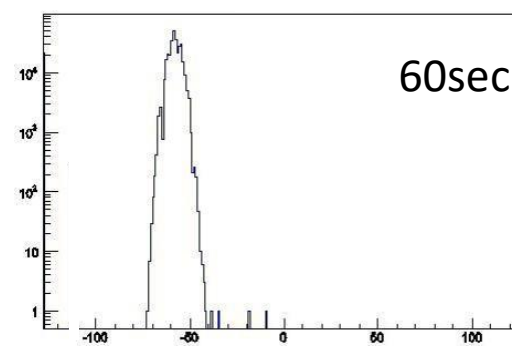
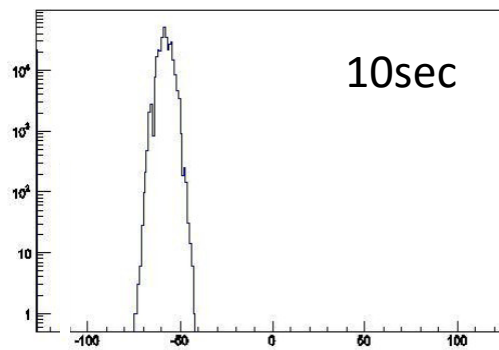
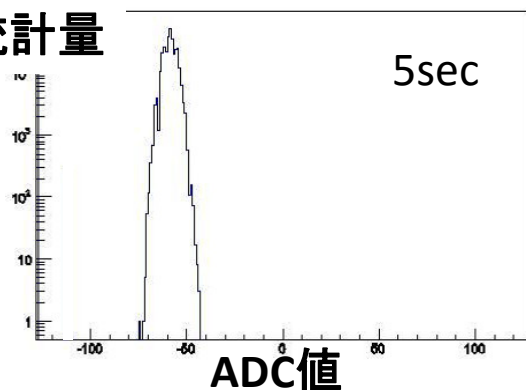
# 結果

---

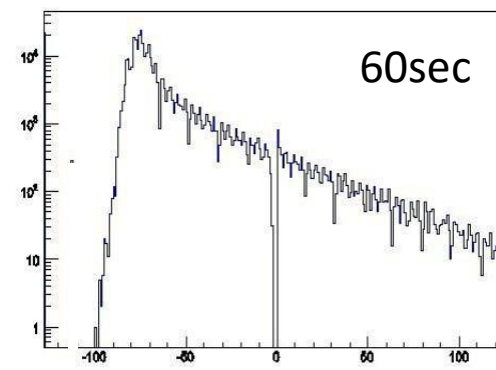
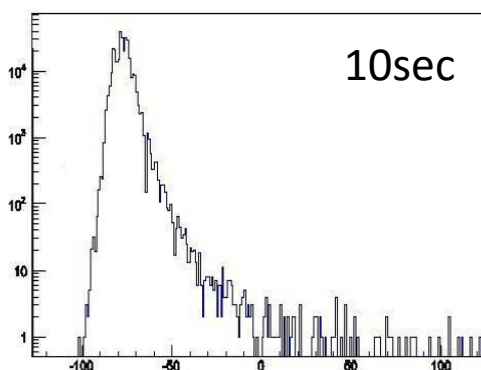
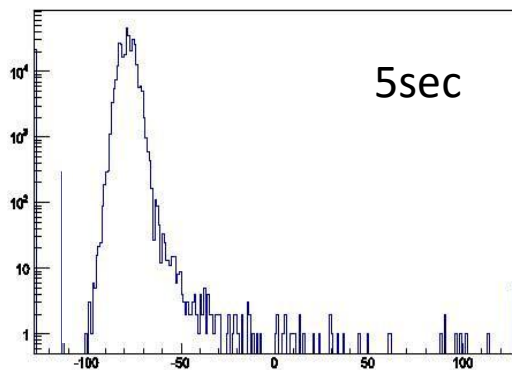
# ダークカレント

中性子照射前(垂直 $6\mu\text{m}$  角、水平 $6\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ )

統計量

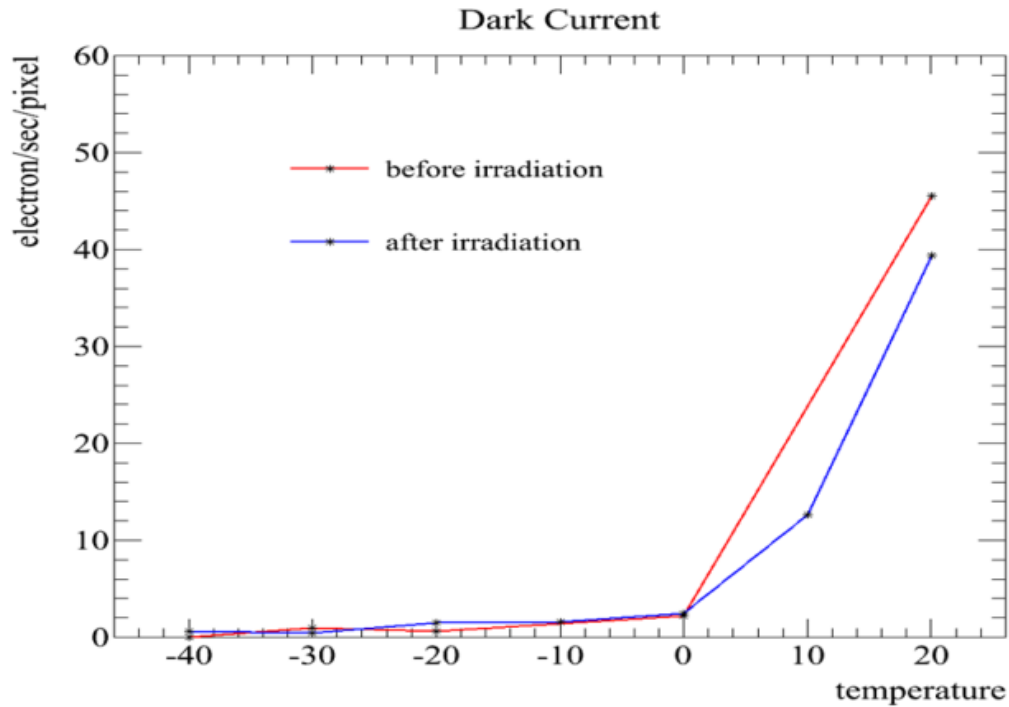


中性子照射後(2時間照射、 $6\mu\text{m}$  角、水平 $6\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ FPCCD)



- 照射後、ダークカレントは蓄積時間が増えるにつれて大きく増大

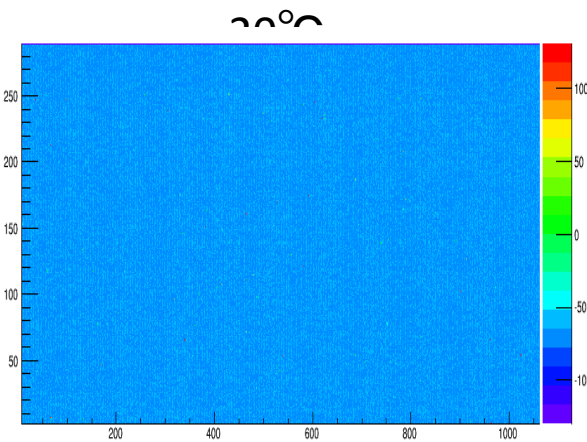
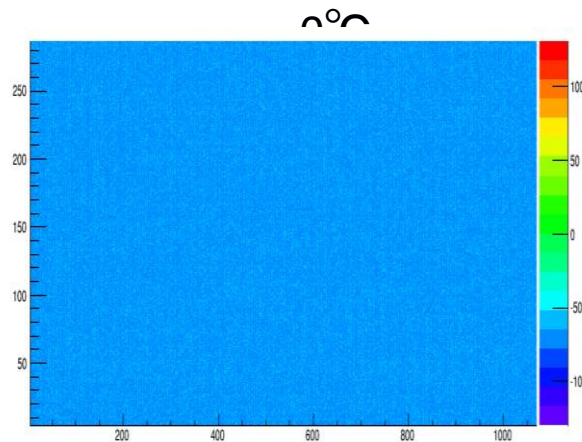
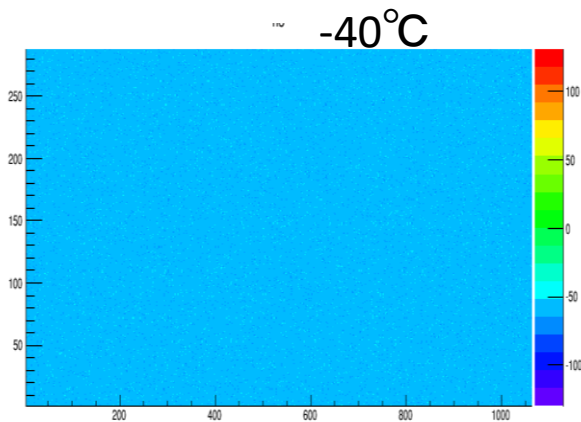
# ダークカレント



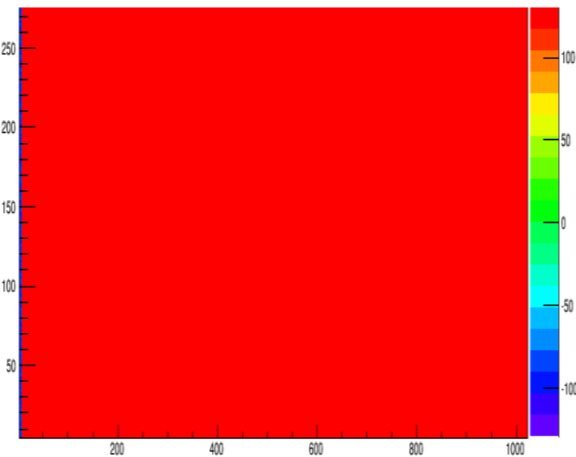
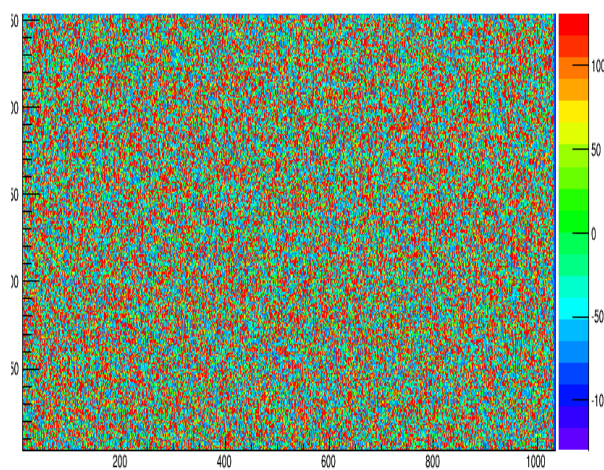
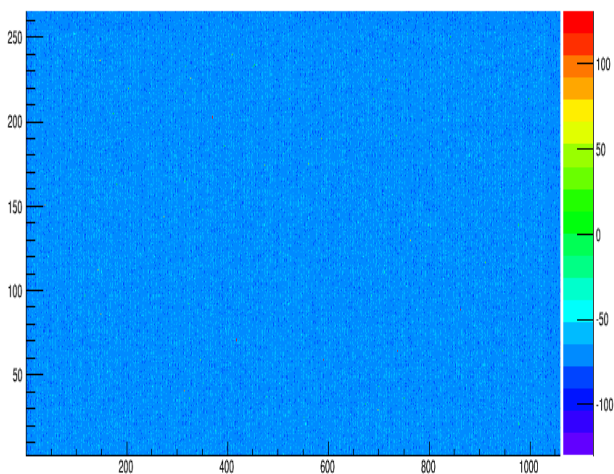
- ペDESTALのピーク位置は大きな変化は見られない

# ホットピクセル

中性子照射前

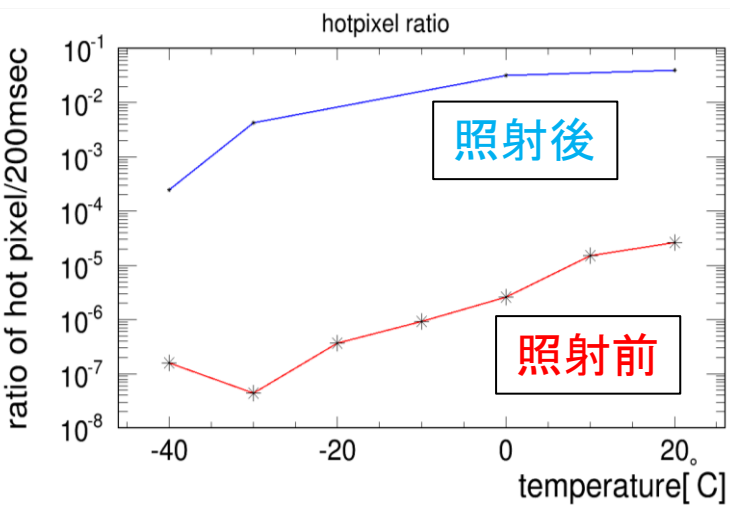
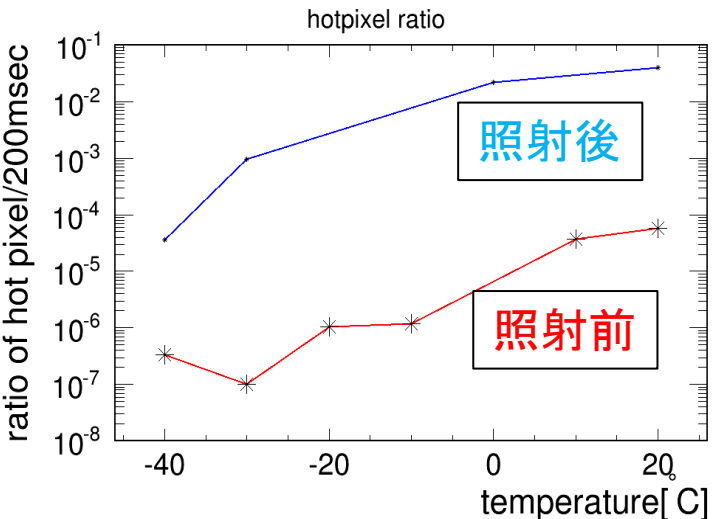


中性子照射後

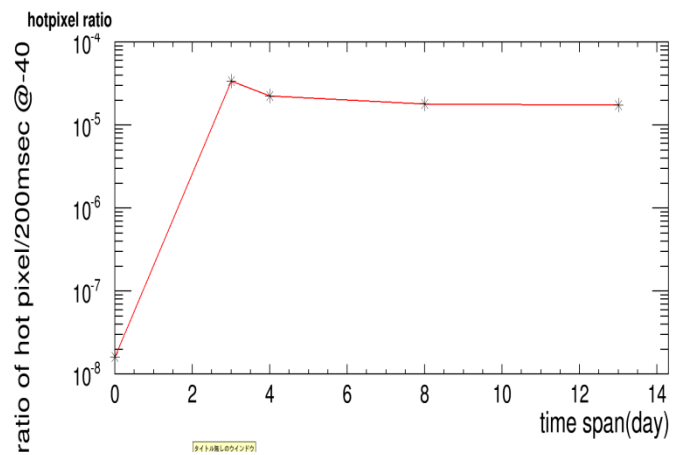
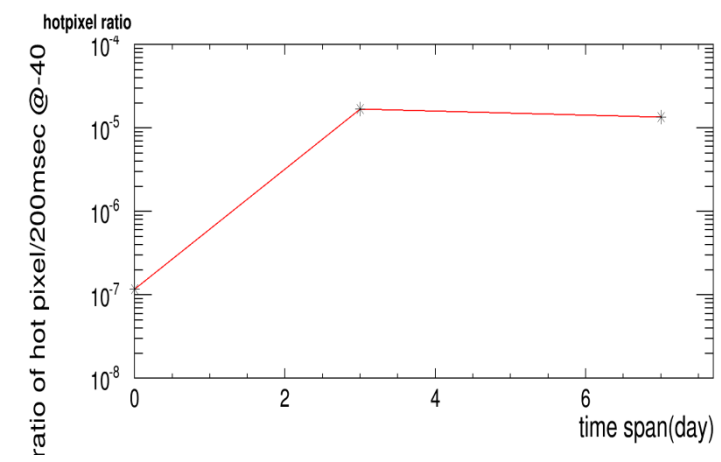


# ホットピクセル

## 6 $\mu$ m角CCD



クロックパルス  
6MHzと25MHzで  
ホットピクセル割合  
測定



- ホットピクセルの  
時間変化測定



# Charge Transfer Inefficiency (CTI)

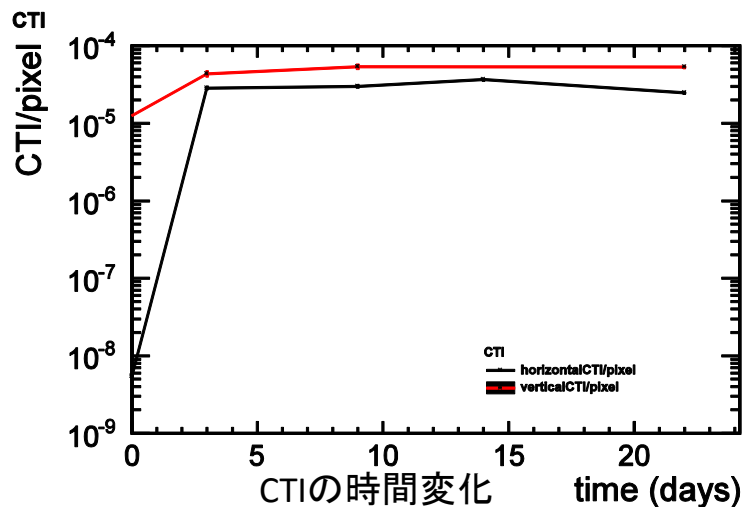
## 12 $\mu$ m角ピクセルサイズ

転送方向	中性子照射前	中性子照射後
水平方向	$(1.84 \pm 0.55) \times 10^{-6}$	$(6.39 \pm 0.63) \times 10^{-6}$
垂直方向	$(4.66 \pm 2.14) \times 10^{-6}$	$(2.83 \pm 0.25) \times 10^{-5}$

- 照射後CTIは上昇
- 垂直方向がより上昇している。
- 水平方向5400回、垂直方向128回転送

$$(1 - (6.39 \times 10^{-6}))^{5400} \times (1 - (2.83 \times 10^{-5}))^{128} = 0.96$$

## 垂直方向6 $\mu$ m角、水平方向6 $\mu$ m $\times$ 24 $\mu$ mピクセルサイズ



- 照射後、CTIは $10^{-5}$ のオーダーまで上昇
- CTIの時間変化を測定
- 6 $\mu$ m角ピクセルの場合、水平方向13000回垂直方向128回転送する

$$(1 - (2.85 \times 10^{-5}))^{13000} \times (1 - (4.34 \times 10^{-5}))^{128} = 0.69$$

- 読み出し口から最も遠いピクセルは信号が約69%まで低下する。

# まとめ

- 試作FPCCDの信号読み出し試験を行い垂直転送パルスを変更することでFe55の信号が読み出せることを確認した
- 試作FPCCDに対して中性子照射試験をおこない放射線耐性を評価した
- 見積もられた中性子フラックスはILC運転期間の約1.3年分
- ホットピクセル、ダークカレントは運転予定である $-40^{\circ}\text{C}$ 下、読み出し時間199ms では大きな問題とはならないと考えられる
- $6\mu\text{m}$ 角FPCCDでは最も遠いピクセルで信号が約69%まで低下する

# BACK UP

---

- 6MHzのクロックにおいて照射後、

