

# HL-LHCへ向けた ピクセル検出器のビームテスト解析

筑波大学 修士2年 佐藤和之

1

2017Jan CiRFSE Workshop

2017/1/24

2

## 目次

- ▶ LHCとATLAS検出器、HL-LHC
- ▶ ピクセル検出器の構造と開発
- ▶ 50um x 50um pixel sensor
- ▶ まとめ

2017Jan CiRFSE Workshop

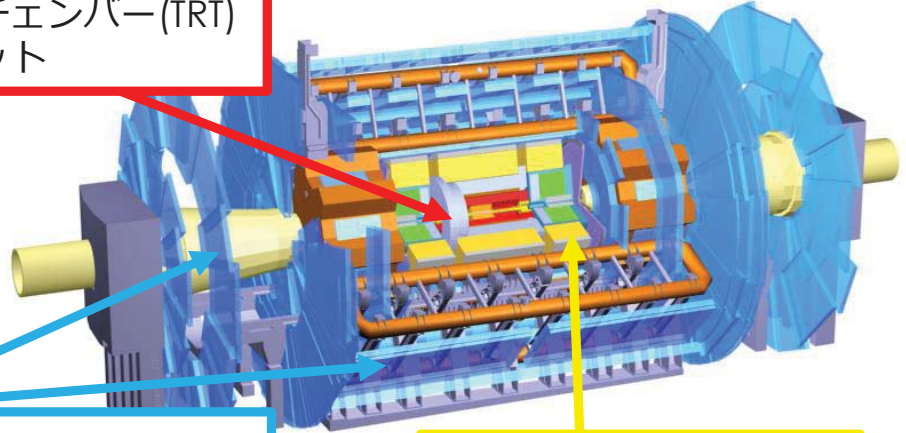
2017/1/24

# A Toroidal LHC Apparatus(ATLAS)

## 内部飛跡検出器

- **ピクセル検出器(Pixel)**
- シリコンストリップ検出器(SCT)
- ストローチューブチェンバー(TRT)
- ソレノイドマグネット

HL-LHC(2025~)のインストールを目指し開発中！！



## ミュー粒子検出器

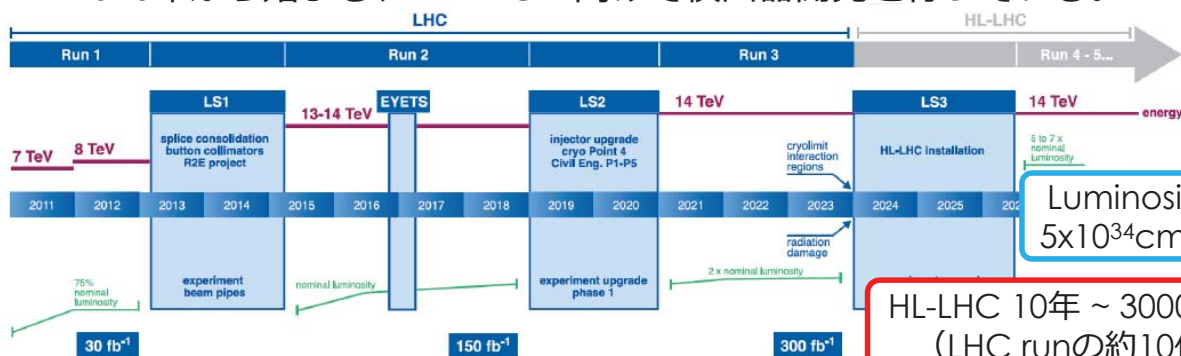
- トリガーチェンバー(TGC, RPC)
- ドリフトチューブチェンバー(MDT)
- トロイドマグネット

## カロリメータ

- 電磁カロリメータ
- ハドロンカロリメータ

# High Luminosity LHC

2026年から始まる、HL-LHCへ向けて検出器開発を行っている。



Luminosity ~  $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

HL-LHC 10年 ~ 3000fb<sup>-1</sup>  
(LHC runの約10倍)

LHC->HL-LHCで放射線量増大  
 $(5 \times 10^{14} \text{ 1MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2)$   
 $\rightarrow 1.7 \times 10^{15} \text{ 1MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2)$   
 $\rightarrow$  **高放射線耐性**を持つ検出器が必要

パイルアップ事象の増加に伴い、粒子占有率の低下・正確なvertexの再構成が必要

$\rightarrow$ 現在のピクセルサイズ(50um x 400um)より小さくして、**高位置分解能**なピクセル検出器が必要

# ピクセル検出器

## n<sup>+</sup>-in-p型半導体検出器

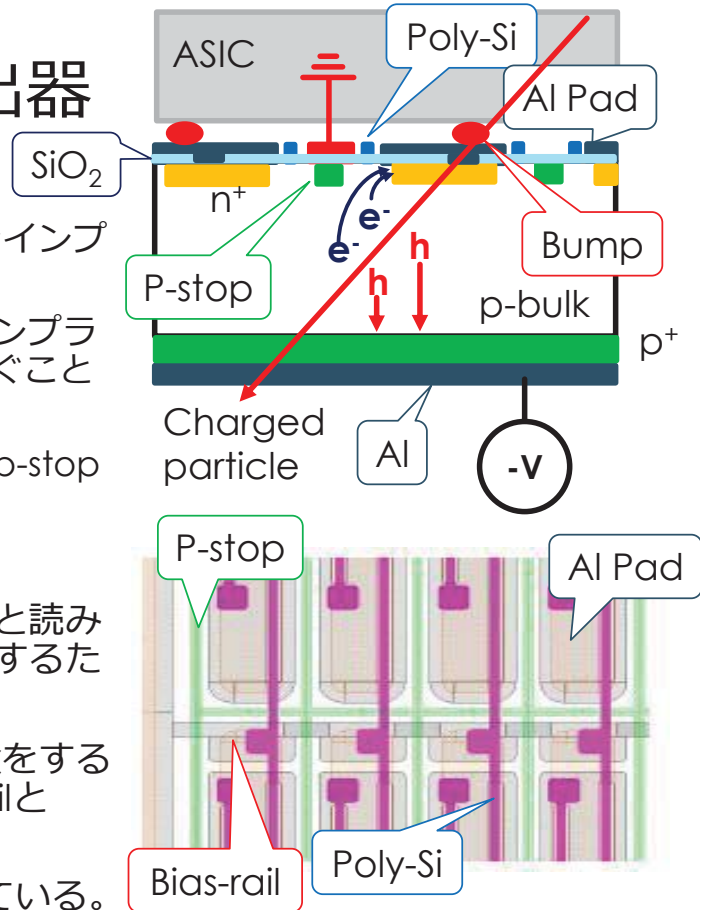
- 高抵抗p型バルクにn型不純物をインプラントし、p-n接合を作る。
- 裏面に逆バイアスをかけて、インプラントしたn型半導体をASICに繋ぐことにより、空乏層を広げる。
- 電極の分離をよくするために、p-stopを埋め込む。

## ピクセル検出器

- 2次元的な配置の各ピクセルと読み出し回路は金属バンプで接合するために**Bump-bonding**を行う。
- ASICに繋ぐ前にセンサー試験をするために、各ピクセルはBias-railとPoly-Si抵抗で接続する。

→この接続方法の最適化を行っている。

2017Jan CiRfSE Workshop

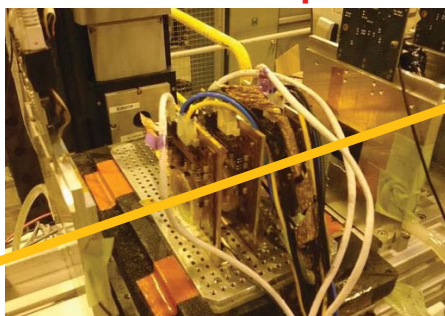


2017/1/24

# テストビーム

- 高位置分解能の検出器を用いてピクセル構造の検証を行い、検出器の検出効率や位置分解能を調べる
- CERN : 125GeV pion 位置分解能~5um

## Testbeam Setup



**Detector Under Test (DUT)**  
性能評価するピクセル検出器

**Trigger Logic Unit (TLU)**

シンチレータからトリガー信号を受け取り、DUT、テレスコープへ発行

**テレスコープ**

トラッキング用高位置分解能ピクセル検出器  
Pixel size ~ 18um

粒子ビーム

2017Jan CiRfSE Workshop

2017/1/24

7

## 50um x 50um sensor

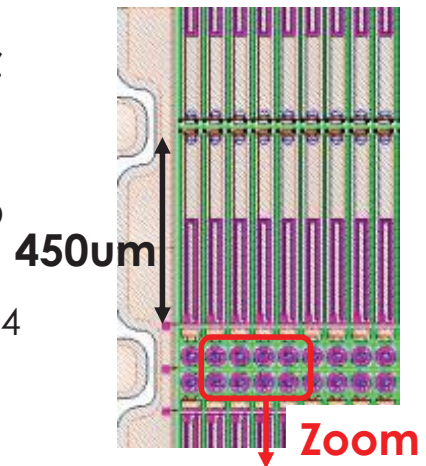
- ▶ 現在、主に開発が行われている検出器はピクセルサイズ 50um x 250um

→φ方向、z方向両方の位置分解能向上を考え、ピクセルサイズを「50um x 50um」にした検出器の開発も進行中

→どのようなバイアス構造が良いのかを既存のFEI4読み出し回路で評価

→ $3 \times 10^{15}$  1-MeV  $n_{eq}/cm^2$ の検出器について解析

### Structure



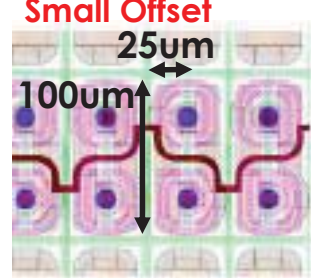
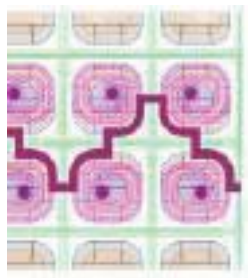
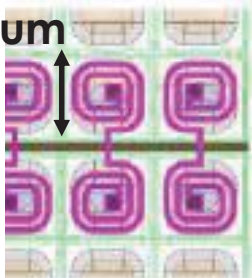
Type1 No Offset

Type2 Small Offset

Type5 No Bias

Type6 25um x 100um Small Offset

50um

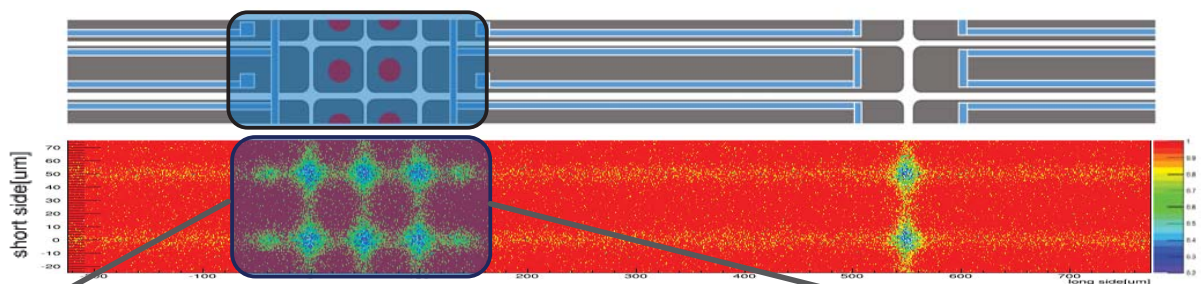


2017Jan CiRfSE Workshop

2017/1/24

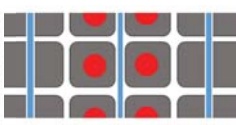
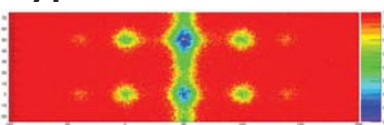
8

## ピクセル内検出効率分布

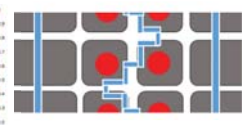
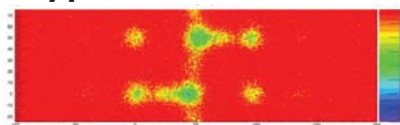


Proton Irrad  $3 \times 10^{15}$  1MeV  $n_{eq}/cm^2$

Type1 1000V



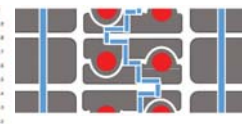
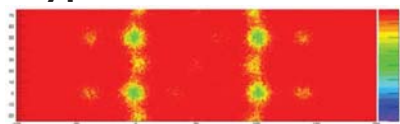
Type2 1000V



Type5 1000V



Type6 1000V



2017Jan CiRfSE Workshop

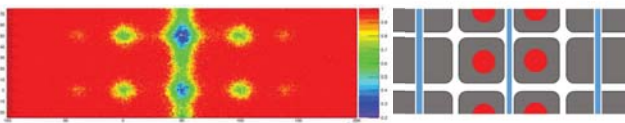
2017/1/24

# ピクセル内検出効率分布

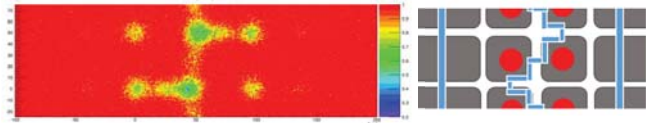
- **Type1** : ピクセル境界に bias-rail が重なり大幅に検出効率低下
- **Type2** : bias-rail がピクセル境界と重なる領域が小さいため検出効率低下が小さい
- **Type5** : バイアス構造がないためピクセル角による検出効率低下のみ確認  
→ Charge sharingの効果により閾値を超えなかった
- **Type6** : バイアスレールがピクセル境界に出る領域が非常に小さいためバイアスレールによる検出効率低下が小さい。

Proton Irrad  $3 \times 10^{15}$  1MeV  $n_{eq}/cm^2$

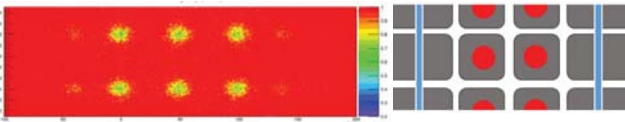
Type1 1000V



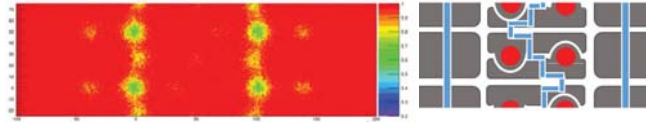
Type2 1000V



Type5 1000V



Type6 1000V



2017Jan CiRfSE Workshop

2017/1/24

# 検出効率低下の評価

バイアスレールやピクセル角での検出効率低下を評価するために、検出効率損失  $\epsilon_{loss}$  を定義した。

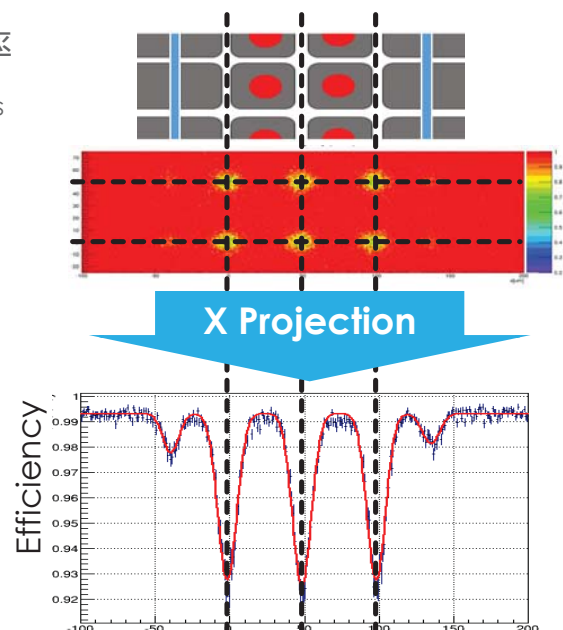
1. 射影したピクセル内検出効率マップを  
5Gaussian + constant Fit

2.  $(\int_{0um}^{100um} \text{Fit. func } dx) / 100um$

= **Efficiency Loss per Pixel  $\epsilon_{loss}$**

→  $\epsilon_{loss}$  をピクセルの構造ごとに比較し、  
どのような構造が最適なのか検証

Ex. Type5 1000V

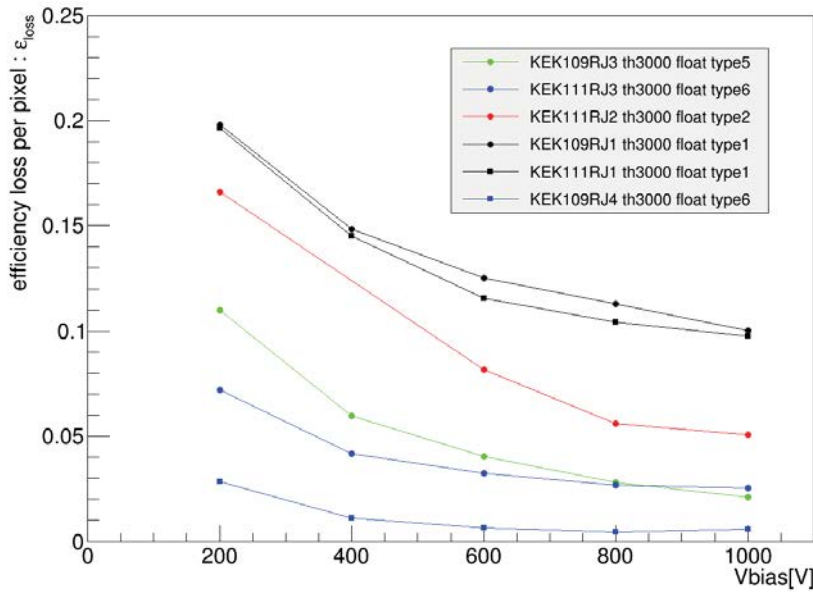


2017Jan CiRfSE Workshop

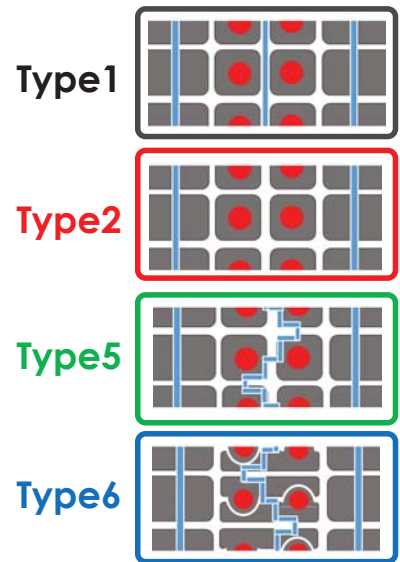
2017/1/24

# 検出効率損失 $\epsilon_{loss}$ vs HV

- ▶ HVを大きくすることにより検出効率損失減少 -> 1000Vではどのセンサーでも検出効率**98%**以上（目標達成）
- ▶ 50um x 50um : **type1(no offset)** > **type2(Small offset)** > **type5(no bias)**



2017Jan CiRfSE Workshop



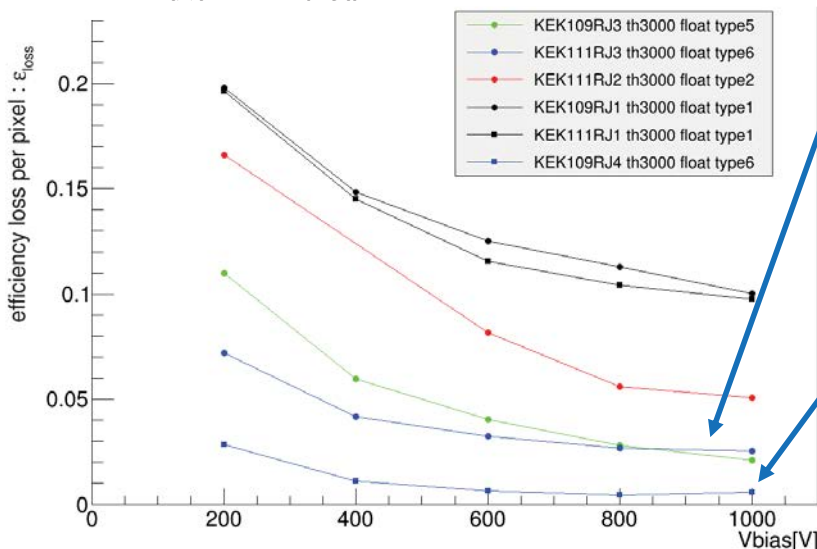
2017/1/24

# 検出効率損失 $\epsilon_{loss}$ vs HV

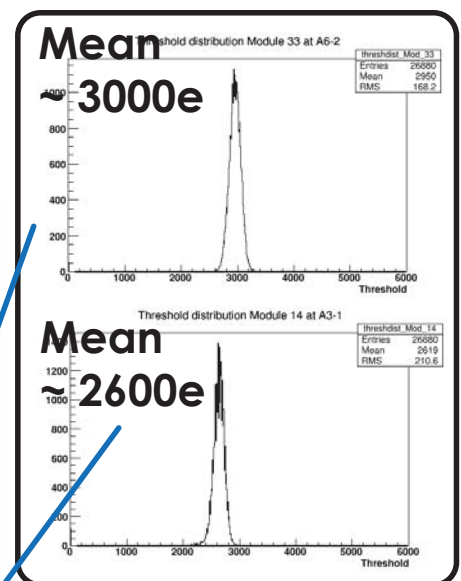
- ▶ **Type6** : 同じ構造のセンサーでも検出効率損失に大きな違い

→ KEK109RJ4 < KEK111RJ3

→ データ取得時の閾値の違い



2017Jan CiRfSE Workshop



2017/1/24

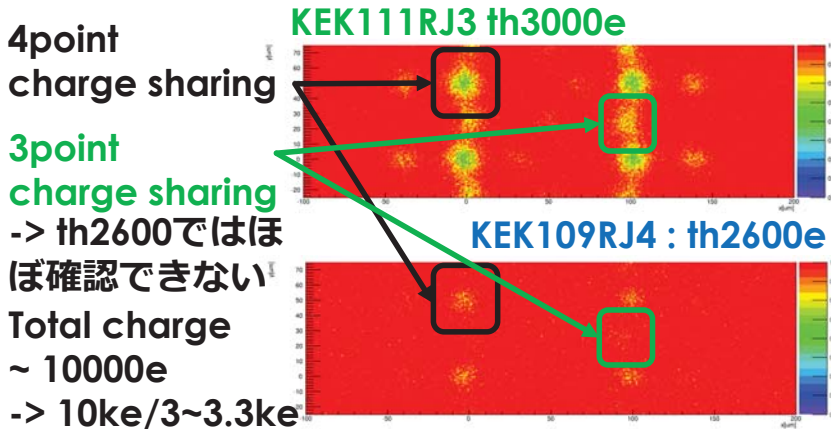
# 検出効率損失 $\epsilon_{\text{loss}}$ vs HV

- ▶ **Type6** : 同じ構造のセンサーでも検出効率損失に大きな違い

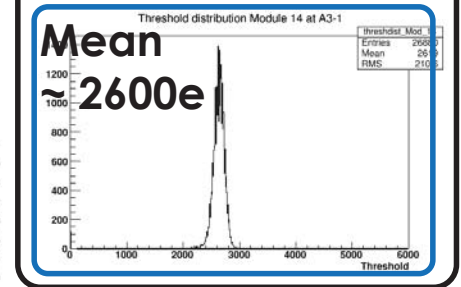
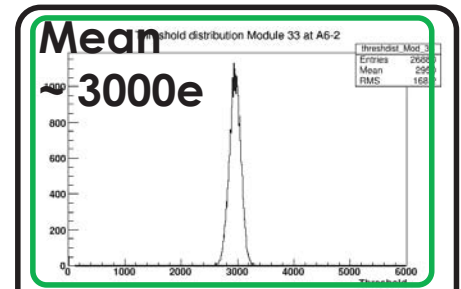
→ ピクセル境界での検出効率低下に大幅な違い

→ 閾値が下がることによりCharge sharingしたときにも閾値を超えるイベントが増えた

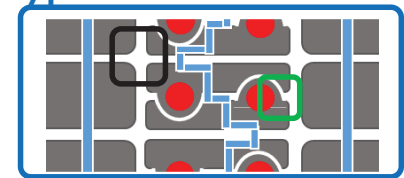
ピクセル内検出効率分布 type6 HV=1000V



2017Jan CiRFSE Workshop



Type6



2017/1/24

## まとめ

- ▶ 現在、HL-LHC(2026年~)の内部検出器へのインストールへ向けてピクセル検出器の開発を行っている。
  - ▶ 現在開発を行っている50um x 250um の検出器よりも $\phi$ 方向、z方向の位置分解能が良くなるようにピクセルサイズが“50um x 50um”の検出器を開発中
    - まだ読み出し回路ができていないため50um x 250umの読み出し回路を用いて、50um x 50umのバイアス構造の検証
- 陽子線照射 ( $\sim 3.0E+15 n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ ) の検出器についてビームテスト解析を行った。
- 50um x 250umピクセル検出器と同様にバイアスレールとピクセル境界が重なる領域で検出効率低下
  - 検出効率 : type1(no offset) > type2(small offset) > type5(no bias)
  - どのセンサーでも目標値98%は達成しているが、**type2**が最も良い構造
  - 閾値が下がることで検出効率損失は小さくなる
  - ピクセル角における検出効率の低下はピクセルの構造によるものではなくCharge sharingにより閾値を超えないため

## Back up

## Large Hadron Collider(LHC)



スイスとフランスの国境に位置している  
周長 27km  
地下 約100m  
陽子-陽子衝突型加速器  
2010年~2012年 最大8TeV  
現在、最大13TeVで稼働





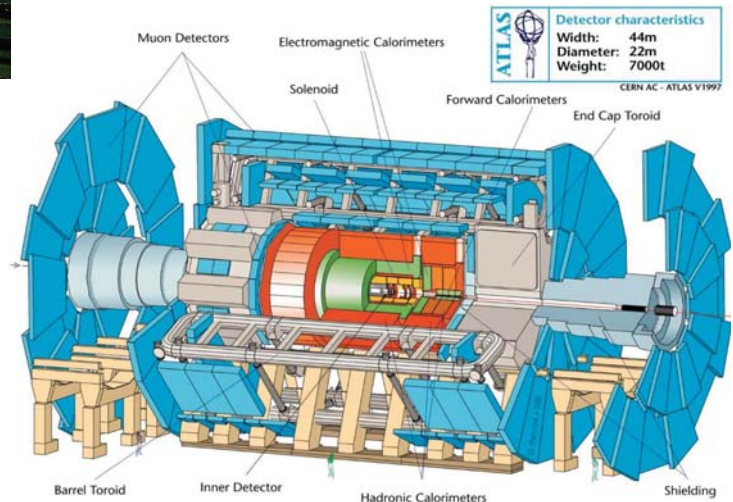
# A Toroidal LHC Apparatus(ATLAS)



全長 44m、高さ 25m、  
重さ 7000tの汎用粒子検出器。

## 目的

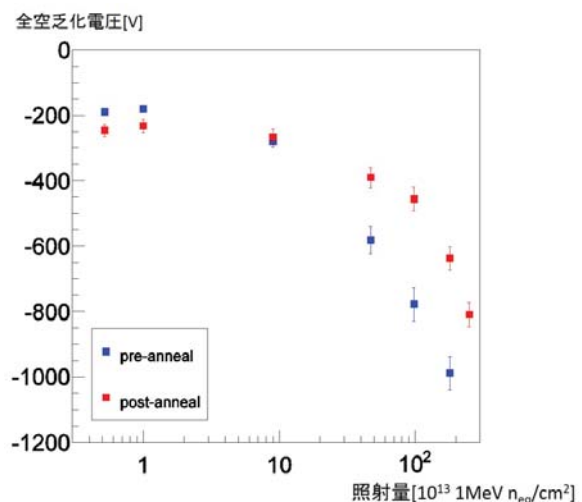
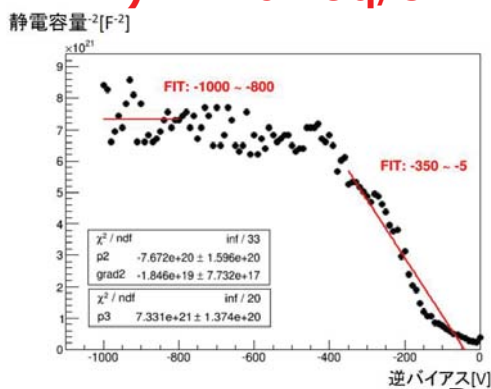
- ▶ Higgs粒子の精密測定
- ▶ 超対称性粒子の探索
- ▶ 余剰次元の探索
- ▶ 新しい物理



# Full depletion voltage

- ▶ 修士論文 (筑波大 萩原)
- 320um SCT CV測定

**Ex) 1E+15 neq/cm<sup>2</sup>**

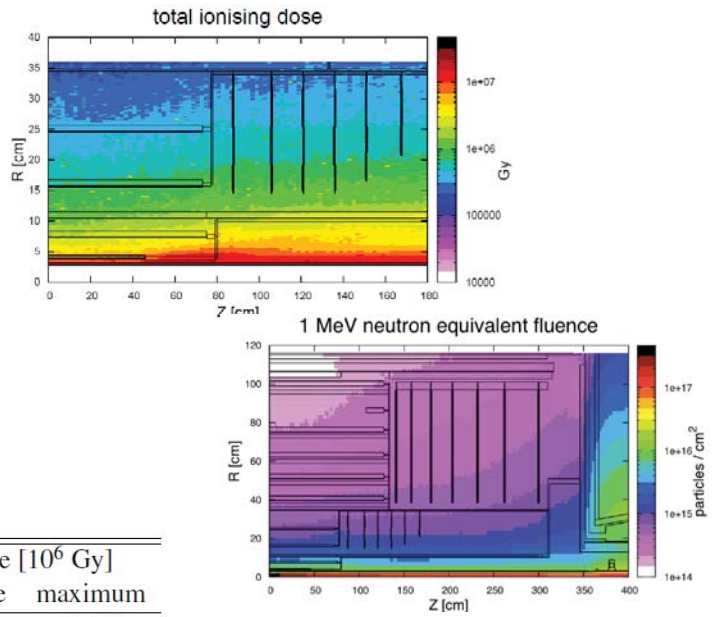


Pre-annealの値から3E+15 neq/cm<sup>2</sup>の  
全空乏化電圧は **1200V** ぐらいだと予想  
される

# HL-LHCにおける電離性放射線量

- 衝突点近傍では多量の放射線が放出される。

HL-LHC (Luminosity~3000fb<sup>-1</sup>)  
での線量マップ  
(ATL-UPGRADE-PUB-2014-003)



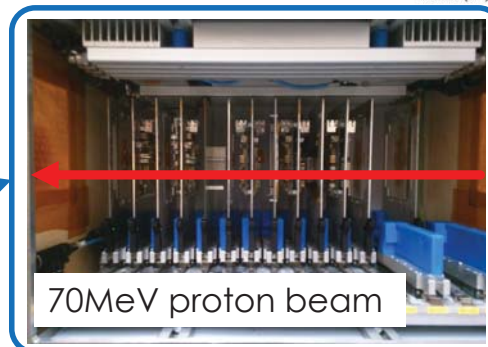
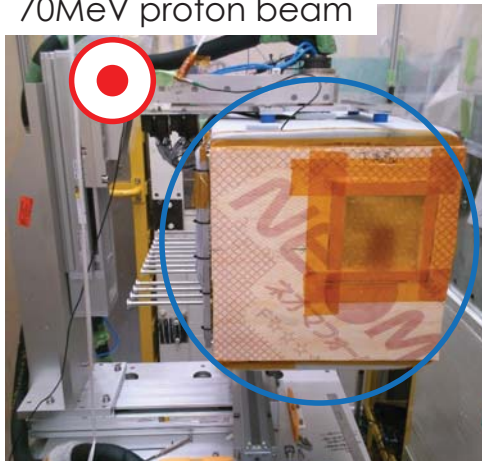
Barrel	R [cm]	$\Phi_{1\text{ MeV}} [10^{14} \text{ cm}^{-2}]$		Dose [ $10^6$ Gy]	
		average	maximum	average	maximum
layer 1	3.8	134.9	142.1	7.200	7.677
layer 2	7.3	47.7	54.0	2.625	3.205
layer 3	15.6	15.1	17.4	0.751	0.898
layer 4	24.6	8.2	9.1	0.377	0.414

現在、3層目、4層目へのインストールを考えている  
Max 1MGy(HL-LHC run)

# 照射試験

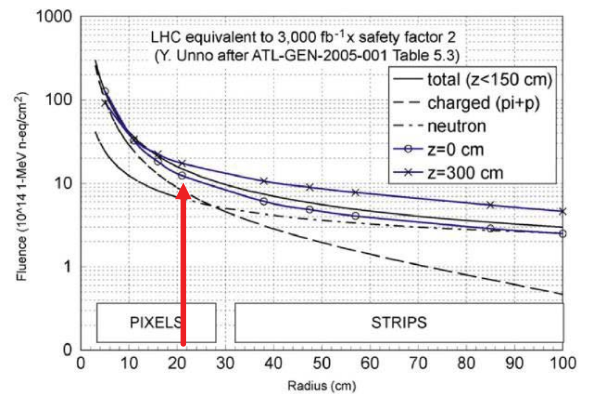
- HL-LHCでの放射線量を再現するために CYRIC@東北大学で陽子線照射試験を行う
- ピクセル検出器 ~  $3 \times 10^{15}$  1MeV neq/cm<sup>2</sup>  
→HL-LHC外側2層の要求値の約2倍
- 照射した検出器をビームテストで評価する

70MeV proton beam



サンプルの入れ替え時に被爆しないために、  
リモートコントロールできるようになっている

HL-LHCでの放射線量 (安全係数 = 2)



## γ線損傷

- シリコンセンサーはγ線により表面損傷を受ける。
- γ線が原子をイオン化・励起し、エネルギーを落とす。

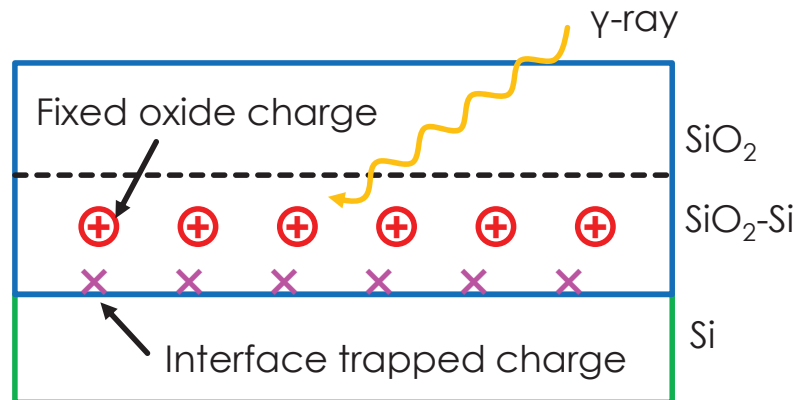
(イオン化損傷を受ける領域 :  $\text{SiO}_2$ 層、 $\text{SiO}_2$ -Si界面)

Fixed oxide charge : 正孔捕獲によるもの、正に帯電

Interface trapped charge : 界面付近に + or - に帯電。エネルギー準位を形成。

表面損傷により引き起こされる現象

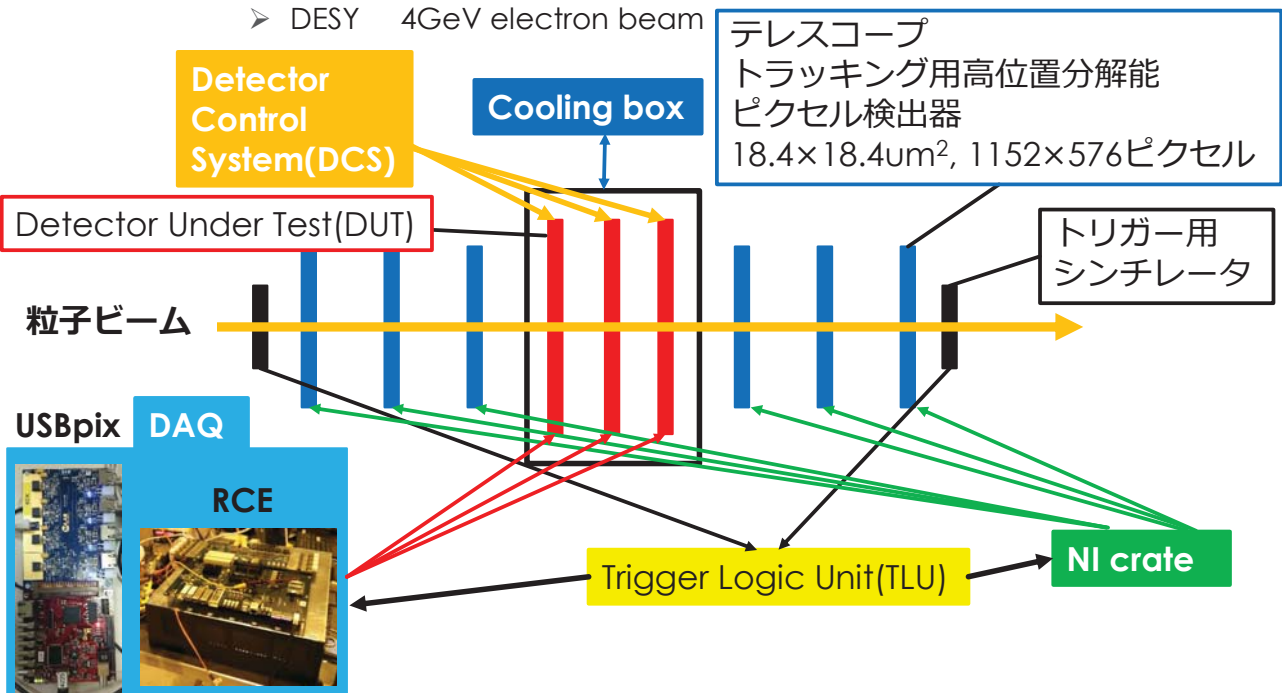
1. 暗電流の増加
2. 表面電場の上昇によるブレイクダウン電圧の変化
3. 空乏化しないDead layerの形成



## ビームテスト

- 粒子ビームを用いて、検出器の検出効率、位置分解能を調べる

- CERN 125GeV pion beam
- DESY 4GeV electron beam



# ビームテスト解析

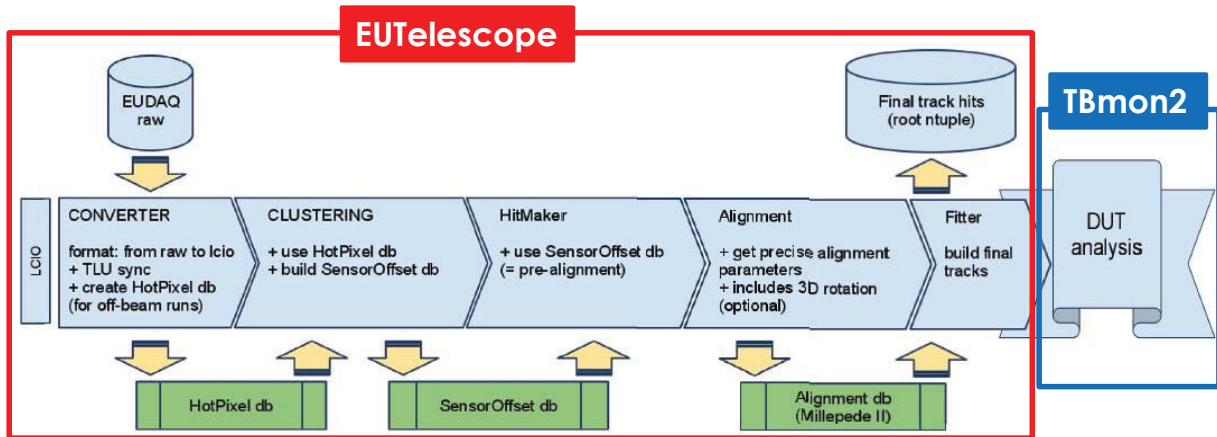
- ▶ ビームテスト解析には2つのソフトウェアを用いる

- EUTelescope

rawデータを変換し、テレスコープの位置情報を用いて、clustering、rotation、alignment、trackingなどを行う。その後、通過した粒子の飛跡情報を入力する

- TBmon2

EUTelescopeで出力された飛跡情報を用いて検出効率や収集電荷の解析を行う



2017 Jan CiRfSE Workshop

2017/1/24

# Bump bonding

\* Bump bondingとは

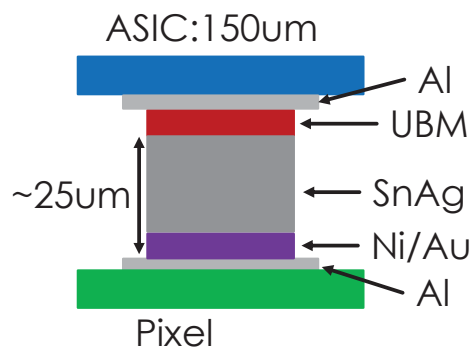
ピクセル検出器の2次元的に配置された各ピクセルから読み出すためにASICとチップをはんだバンプで繋げる手法。

はんだとチップ電極であるAlを繋げるために

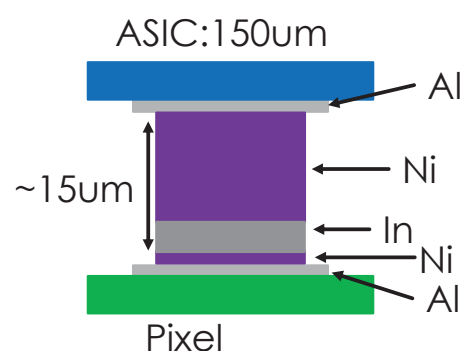
「Al(ASIC)-UBM-Bump-UBM-Al(chip)」のような層構造をしている。

UBM(Under Bump Metal) : Al電極にバンプを形成するために介在させる金属層

Main解 : SnAg Bump-bonding



Back up解 : Ni/In Bump-bonding



2017 Jan CiRfSE Workshop

2017/1/24

# 検出効率損失 $\epsilon_{\text{loss}}$ vs HV

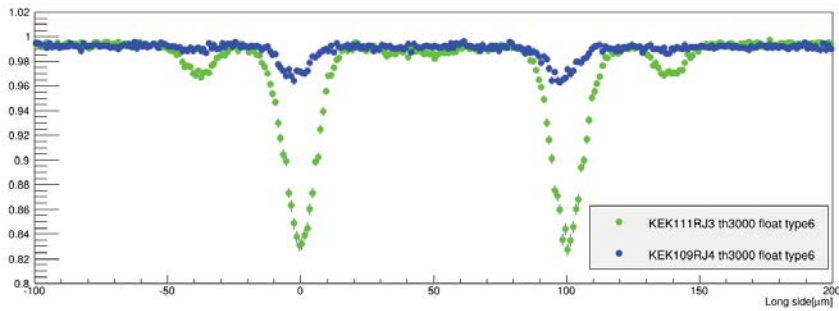
- ▶ **Type6** : 同じ構造のセンサーでも検出効率損失に大きな違い

→ ピクセル境界での検出効率低下に大幅な違い

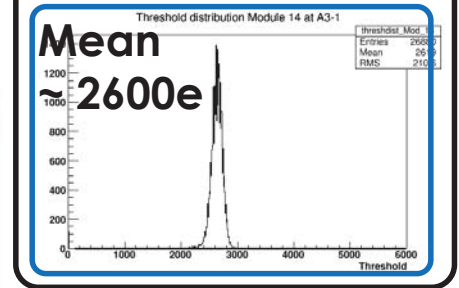
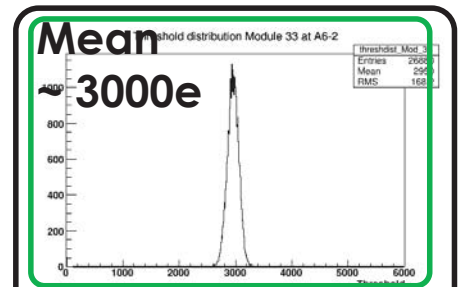
→ 閾値が下がることによりCharge sharingしたときにも閾値を超えるイベントが増えた

ピクセル内検出効率射影分布 type6 HV=1000V

KEK109RJ4 : th2600e, KEK111RJ3 th3000e



2017 Jan CiRfSE Workshop



Type6

2017/1/24