

# SLHC用プラナー型ピクセル 検出器の性能評価

東京工業大学 永井遼

陣内修, 岸田拓也, 寄林侑正(東工大)

池上陽一, 海野義信, 近藤敬比古, 寺田進, 東城順治(高工研)

木村直樹, 寄田浩平(早大), 永井康一, 原和彦(筑波大)

高嶋隆一(京都教育大), 中野逸夫(岡山大), 花垣和則(阪大)

他アトラスSCTグループ

# 目次

## 本研究の目的

ATLAS内部飛跡検出器のアップグレードに合わせて、新たなプラナー型ピクセル検出器を開発する。

- ATLAS内部飛跡検出器アップグレード
- プラナー型ピクセル検出器の製作
  - n-in-p型ピクセル検出器
- 新しいセンサーの性能評価測定
- まとめ

# ATLAS実験 アップグレード

- CERN SLHC(Super-LHC)計画に対するアップグレード
  - 現行LHCの輝度を10倍にする計画(2020~)
    - 検出器の放射線損傷増大(粒子密度  $\sim 10^{16} n_{eq}/cm^2$ )  
...現在のATLAS内部飛跡検出器では耐性が足りない
  - 今後LHCで観測されるであろう新現象の改良測定
    - Higgs粒子の(湯川、自己)結合定数
    - SUSY粒子の質量、崩壊分岐比

ATLAS実験ではSLHC計画に際し、  
内部飛跡検出器をすべて入れ替える予定

- 最内層ピクセル検出器(IBL)の追加(2016~)
  - 現行最内層(B-layer)の(2020年までの)放射線劣化に備える
  - バーテックスタギング性能の向上
  - SLHC計画の前に行う
    - ピクセル検出器アップグレード当面の目標

# ATLAS実験 内部飛跡検出器

## ● 内側からPixel, SCT, TRT

### ● Pixel : シリコンピクセル検出器

- ビームラインから5cm--14cm(最内層)
- 高粒子密度下での位置測定
- 分解能  $\Delta R\phi = 12 \mu\text{m}$ ,  $\Delta z = 70 \mu\text{m}$

### ● SCT : シリコンストリップ検出器

- 4層(2面/層)による飛跡測定
- **日本グループが開発・製作・設置・維持・運転を担当**

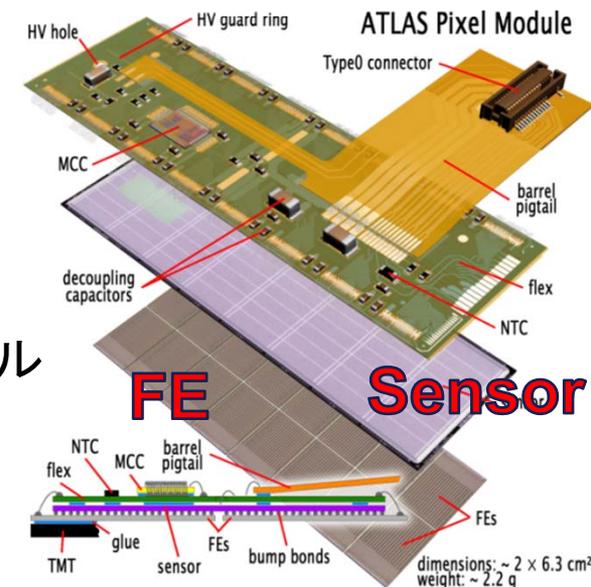
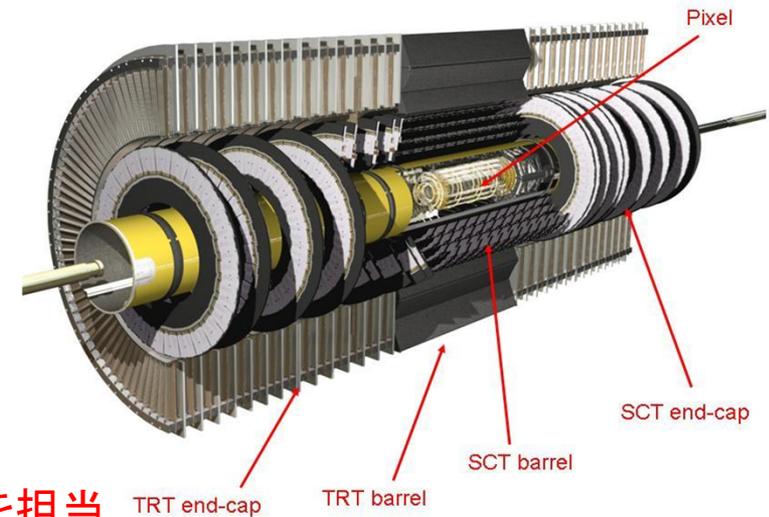
### ● TRT : ストロー型ガス検出器

- 73層の連続飛跡測定

## ● 現行ピクセル検出器

- $50\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ , 厚さ $250\mu\text{m}$ のピクセルサイズ
- 16個のフロントエンドチップ(FEチップ)で1モジュール
- 検出器面積  $2.3\text{m}^2$

バンブボンドによるハイブリット型ピクセル



# 使用したフロントエンドチップ

- ATLAS実験ピクセル検出器  
標準フロントエンドチップ(FE-I3)

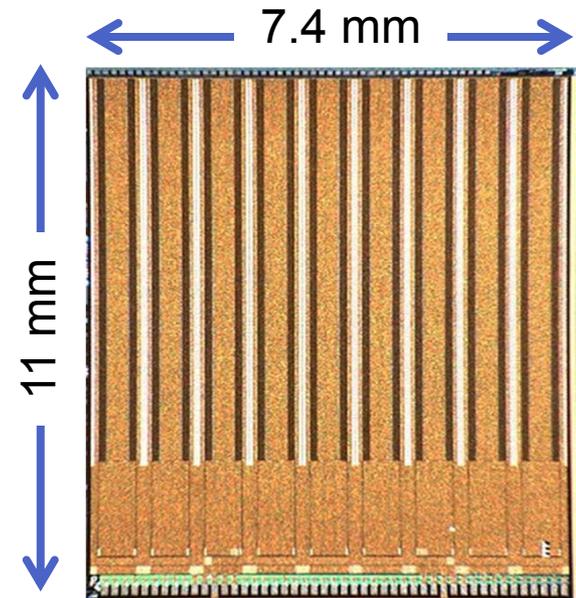
- $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ のピクセル基板  
を $18 \times 160$ 個搭載

- 読み出し速度

- Hitの記録...25ns毎
- Level 1 triggerが来るまでの $3.2\mu\text{s}$ の間、観測された信号を保持  
⇒読み出し

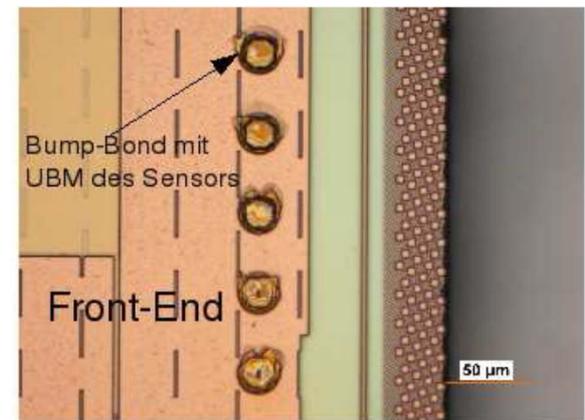
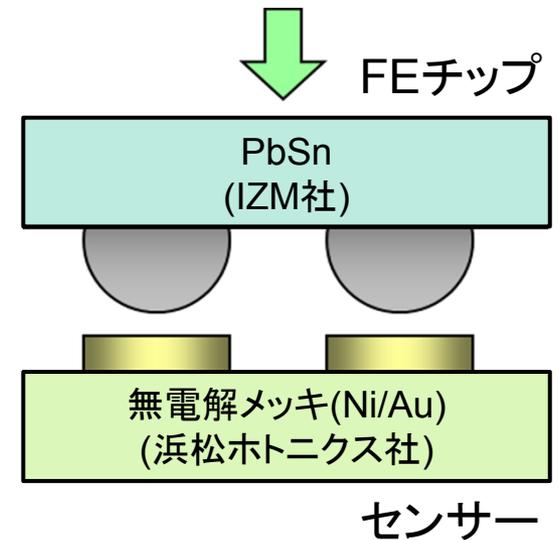
- シリコンセンサーからの信号の読み出し

- 増幅、ON-OFFデジタル化、  
Time-over-Thresholdによるパルスハイト測定を行う



# 浜松ホトニクス (HPK) 製作ピクセル検出器

- HPKでn-in-p型ピクセル検出器を製作
  - 今回初めてバンプボンディングを行う
- バンプボンディング
  - センサーとFEチップの接合
    - FE側とセンサー側それぞれに金属のバンプを用意  
⇒ バンプが繋がるように接着
    - バンプボンディングはピクセルのような微細な構造の接続に適している
  - センサー側: 無電解UBM (Ni/Au)
  - FE-I3側: PbSn
  - FE-I3は現在ATLAS実験で使用されているものを使用

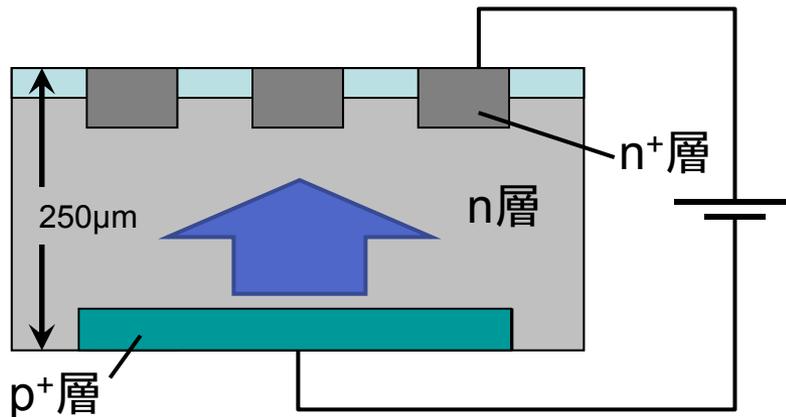


↑ バンプボンディング例 (Bonn大学)

# n-in-p型シリコン検出器

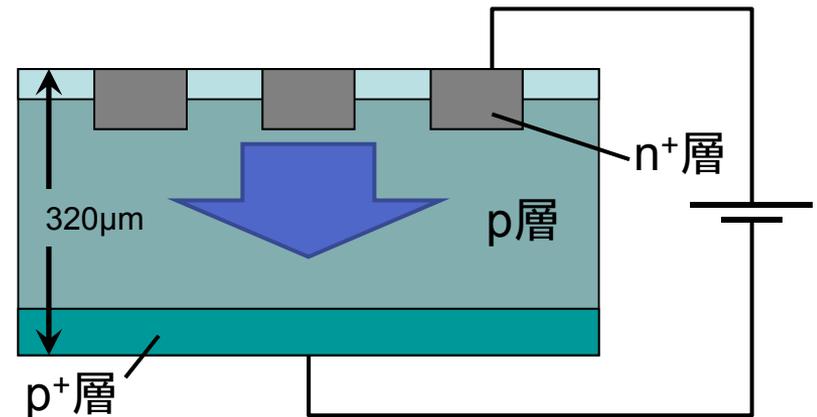
## 現行 n-in-n型

- 空乏化は読み出し逆面から  
→ 完全空乏化が必要  
→ 両面リソグラフィーが必要
- 放射線損傷後、型変換して  
n-in-pに変換



## 新規 n-in-p型

- 空乏化は読み出し面から  
→ 低バイアス電圧でも測定が可能  
→ 片側リソグラフィーでよい
- 型変換しない  
→ 安定した運転



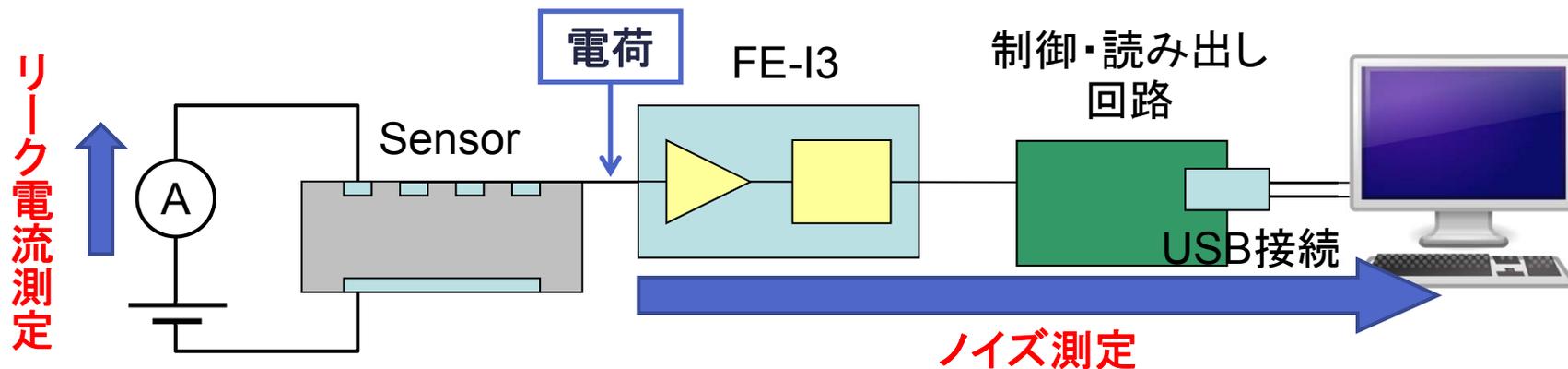
n-in-p型に変えるメリットが大きい

# 測定項目

- FEチップの回路検査
- バンプボンディング検査(ノイズ測定による)
- リーク電流測定
- 読み出し電極側の空乏化進行度測定

# 実験セットアップ

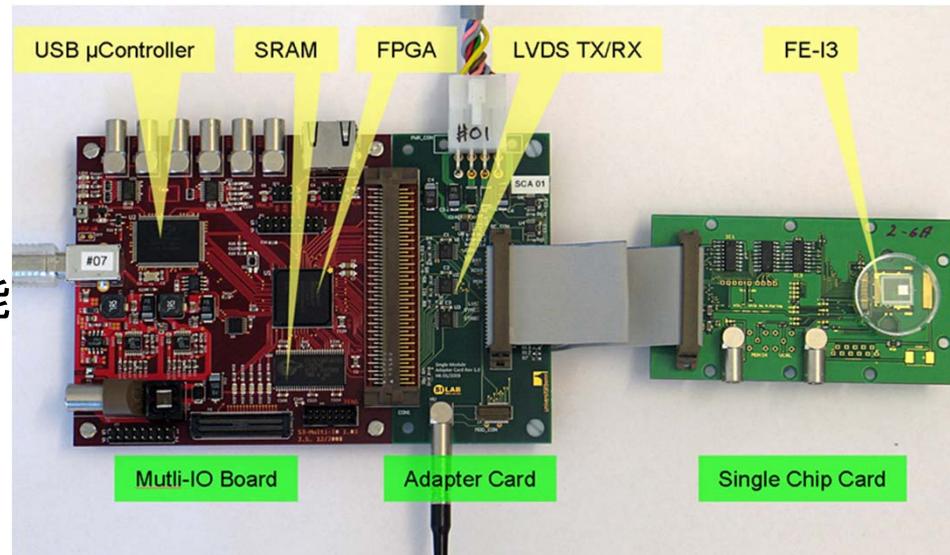
- ノイズ測定（個々のピクセルの全同時測定）
  - ATLASアップグレード開発で標準に使用されているUSBPixシステムを使用
  - FE-I3のアナログ回路手前に電荷を入射して、その反応を測定
- リーク電流測定
  - 読み出し回路を介さず、直接測定



# USBPix 試験システム

## ATLAS標準ピクセル検出器試験システム“USBPix”

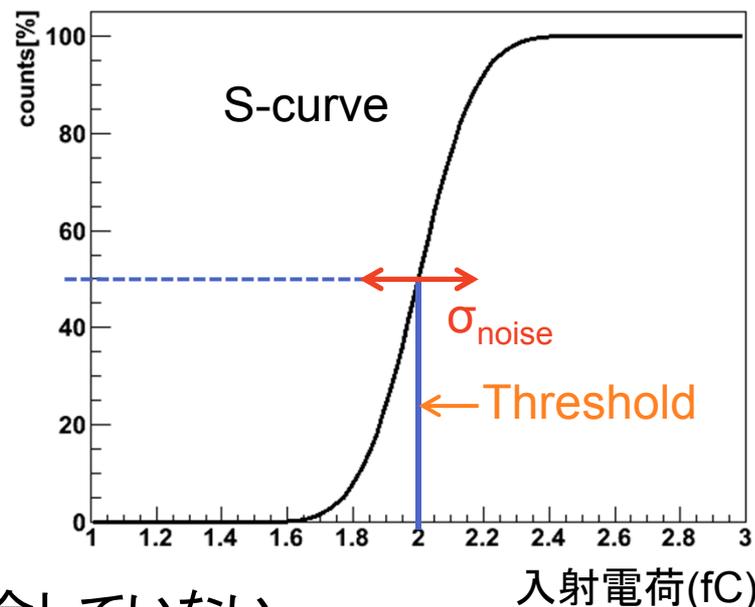
- USBによる制御・読み出し  
...試験セットアップの簡易性
- チップカードは取り替え可能
  - 最大16個のFEチップを同時測定可能
- 制御ソフトウェアにより、標準的な検査を行うことが出来る
  - Digital Test : FEチップoutputに疑似信号を200発入射。末端に戻ってくる量を測定。
  - Analog Test : FEチップ手前にThreshold越えの電荷を200発入射。末端に戻ってくる量を測定。
  - Charge injection Scan : FEチップ手前に電荷を小さいものから順に200発ずつ入射。S-curveを測定し、Thresholdを測定。
  - Source Scan : セルフトリガーによって線源による信号を観測。



# バンプボンディング評価方法

## Charge injection Scan(S-curve fit)を用いたノイズ測定

- Charge injection Scan : 電荷を小さいものから徐々に入射してS-curveを作成。Discriminatorの閾値を測定するスキャン。
- シリコンセンサーにバイアス電圧をかけると、両極に電荷が拘束される  
⇒ 電荷のノイズが減少する  
⇒ S-curveにおける $\sigma$ が減少する
- バイアス電圧によるノイズの変化をみることで、センサーからのノイズを読み出せているかがわかる  
⇒ バンプボンディング評価が可能
- ノイズ変化がないものはシリコンとFEが結合していない  
⇒ バンプボンディング不良がわかる

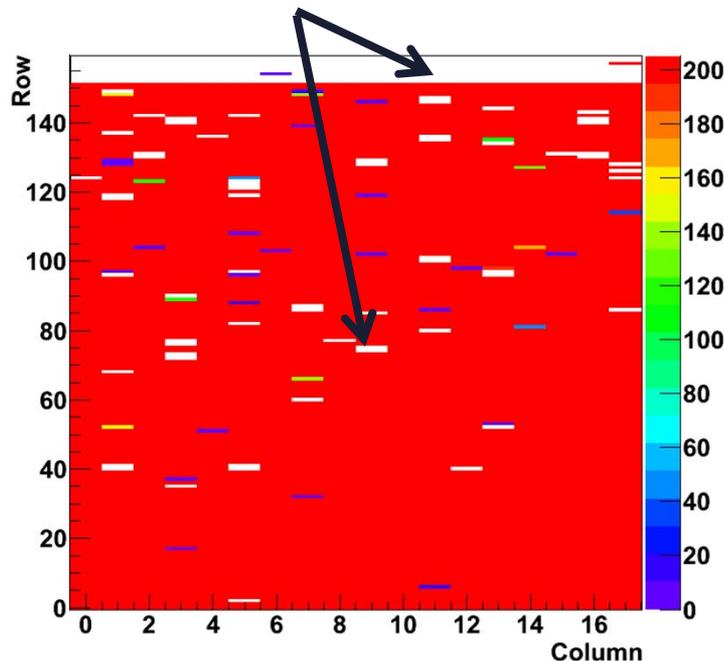


今回はバイアス電圧0Vと50Vのときを比較してノイズの変化を調べた

# センサー部接続評価

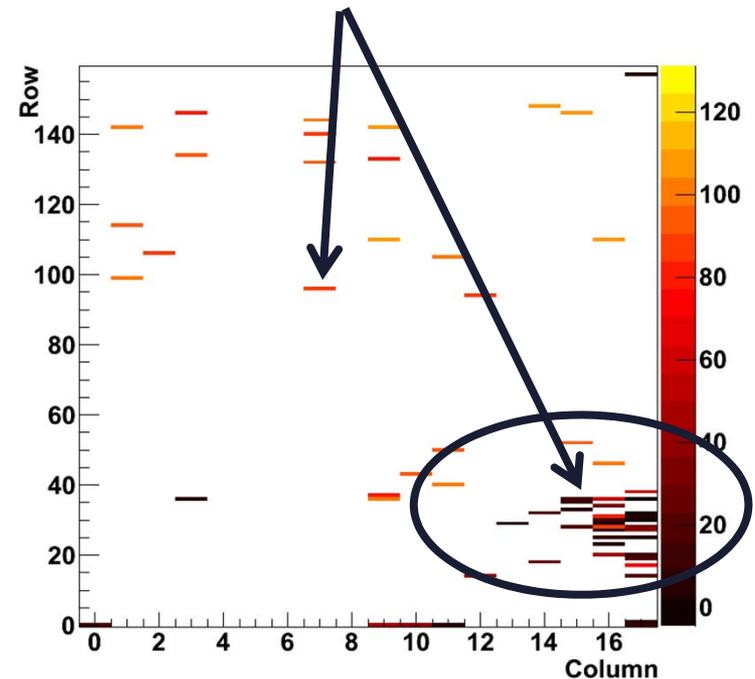
## 回路テスト

- Threshold越えの電荷(約3fC)を200発入射 端末に返る量を測定
- 白点は無反応点...220点観測  
⇒ **回路不良点と推定**



## バンプボンディング評価

- バイアス電圧0Vと50Vのノイズ差分
- 色付きの点はノイズ差分が著しく少ない点...63点観測  
⇒ **バンプボンディング不良点**



1ピクセルチップあたりのマップ図

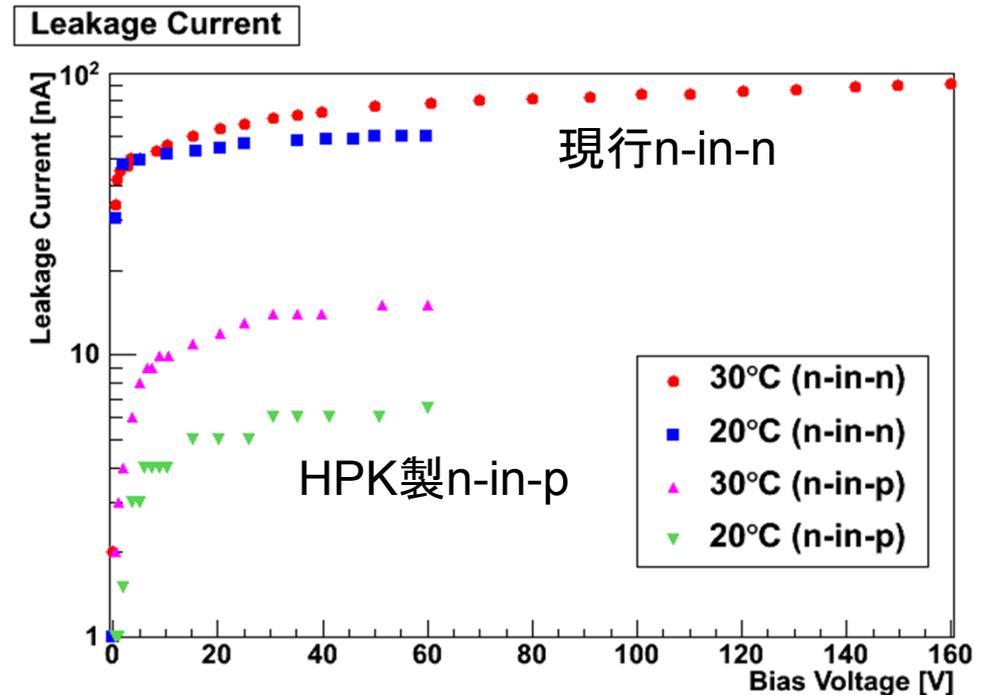
# リーク電流測定

## リーク電流のバイアス電圧依存性を測定

HPK製n-in-pは現時点で高電圧がかかるエッジの保護をしていない。放電を防ぐため、低電圧(60V以下)での試験を行った

結果は n-in-n , n-in-p それぞれについて、  
温度 20°C, 30°C  
での試験を示している。

新たにHPKで製作されたn-in-pセンサーは現行のn-in-nセンサーに比べ、リーク電流が少ない。(1桁違う)



今回のHPK製検出器は製造品質が高いことを示している

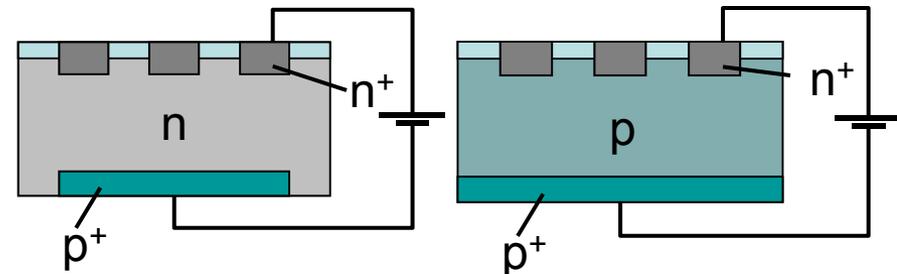
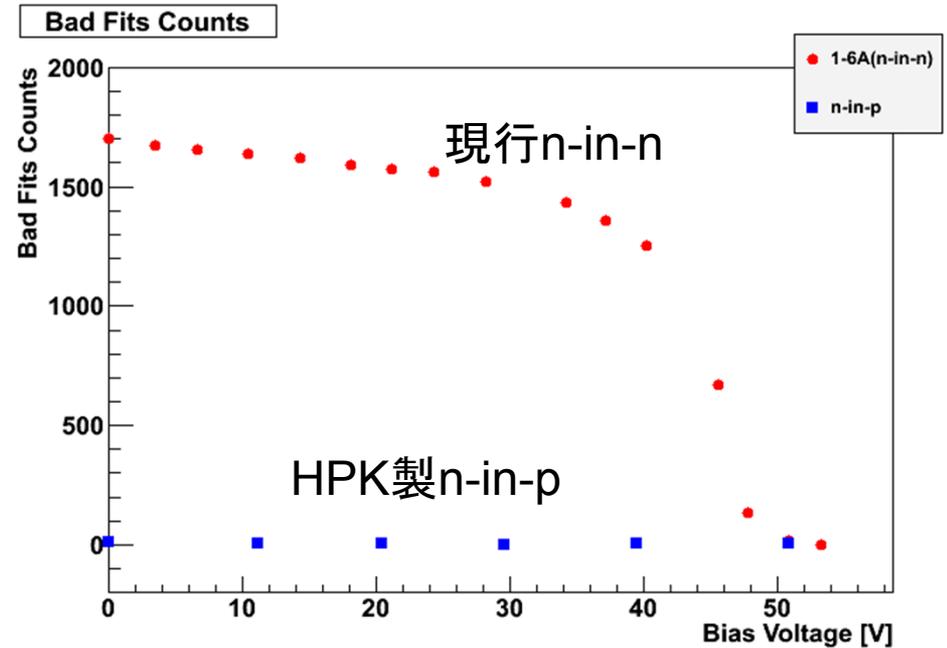
# 読み出し電極側の空乏化進行度

## Bad fits数 ( S-curve測定でフィットができなかったピクセル) の変化

n-in-nは50V付近で急速に減少  
n-in-pは0Vからほとんど変化しない

- n-in-nでは空乏化が裏面(p<sup>+</sup>面)から起こるため、読み出し側はなかなか空乏化しない  
⇒ センサー部のキャパシタンスの変化が著しい  
⇒ ノイズの変化が著しい
- n-in-pでは読み出し電極側から空乏化が進む  
⇒ センサー部のキャパシタンスの変化はほとんどない

n-in-pではバイアス電圧が低電圧下でも動作できることが確認された



# まとめ

- ATLASアップグレードに向けて、新たなプラナー型n-in-pピクセル検出器を浜松ホトニクス社で製作した
- さらに、FE-13チップとバンプボンディングしたフリップチップモジュールを日本で初めて製作した
- n-in-p型センサーの回路試験、バンプボンディング評価を行い、**97.6%** (2597個/2660個) のピクセルが正常に動作していることを確認した
- 現行のn-in-n型と今回のn-in-p型を比較し、空乏化の過程の違いを観測することができた

## — 今後 —

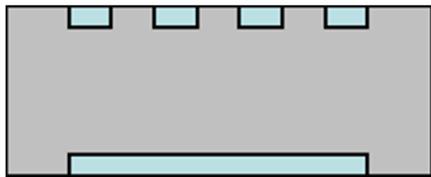
- CERN プロトンシンクロトロン(PS)でのビームテストによって検出器の特性を検査

# Backup slides

# シリコン検出器の構造選択に重要な点

## ピクセルセンサーの構造

- センサー上に多数のピクセルを配置するため、ピクセル間の漏電がないことが望ましい。
- n型表面は製造時の特性により導通している
- n+ピクセル電極間にpを挟む(p-stop, p-spray)ことで解決。  
⇒ 片側リソグラフィー
- 同様に、裏面にp-n側ジャンクションをつくるため、こちら側にも加工が必要  
⇒ 両面リソグラフィー



- 製造コストを下げるにはなるべくリソグラフィーが少ないほうがよい

## n型半導体の型変換

- n型半導体は放射線損傷によってp型不純物密度が高まり、ついにはp型に変換する。
- したがって、バルク部分にn型を使用すると、放射線損傷によってはp型に変わってしまう。
- ただし、表面放射線損傷によって表面はn型のまま  
⇒ n+ピクセル電極間にpが必要

裏面にp-nジャンクションがある間は全空乏化が必要  
バイアス電圧を上げる必要有