

# 陽子線照射によるATLAS実験アップグレードに向けたp型シリコンピクセルセンサーおよびストリップセンサーの開発

総合研究大学院大学(高工研) 三井真吾

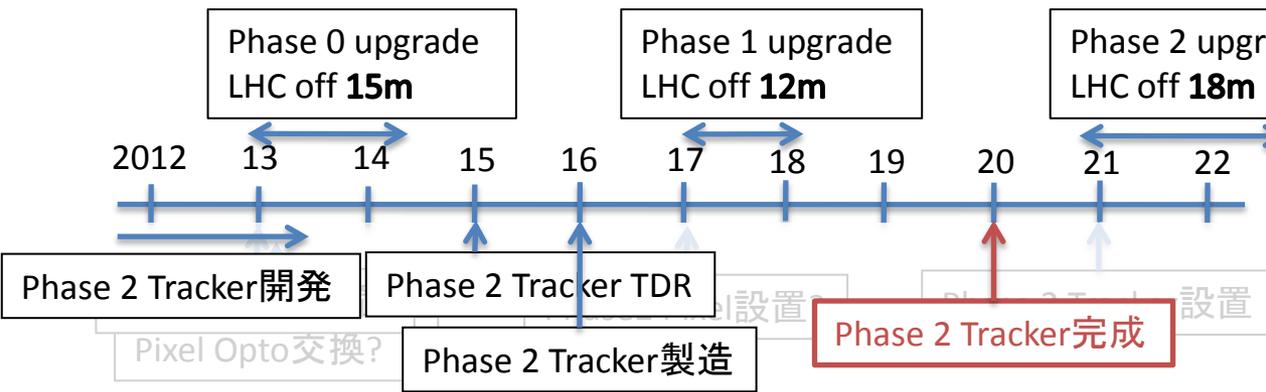
海野義信, 池上陽一, 寺田進, 田窪洋介, 近藤敬比古,  
原和彦<sup>A</sup>, 永井康一<sup>A</sup>, 陣内修<sup>B</sup>, 花垣和則<sup>C</sup>, 中野逸夫<sup>D</sup>,  
高嶋隆一<sup>E</sup>, 寄田浩平<sup>F</sup>, 木村直樹<sup>F</sup>, 東城順次<sup>G</sup>

総研大/高工研, 筑波大<sup>A</sup>, 東工大<sup>B</sup>, 阪大<sup>C</sup>,  
岡山大<sup>D</sup>, 京都教育大<sup>E</sup>, 早大理工<sup>F</sup>, 九州大<sup>G</sup>

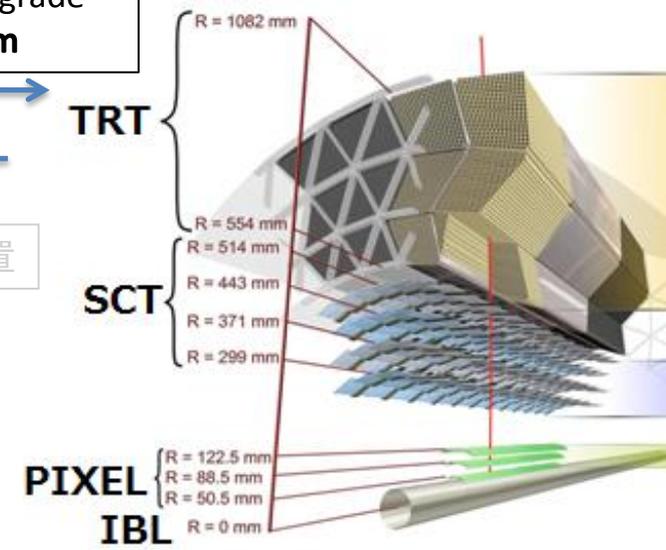
# 概要

- ATLASアップグレード
- n-in-pシリコンセンサー
- 陽子線照射試験
- 静電容量測定、全空乏化電圧の評価
- Multi guard ringの電圧耐性、Hot spot撮影
- P-stop電位測定
- 結論・考察

# ATLASアップグレード



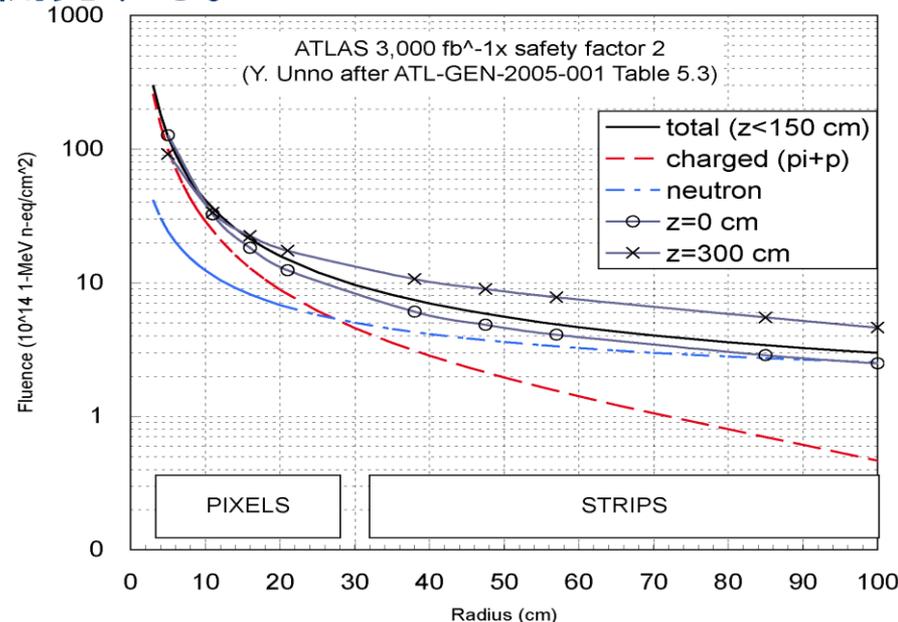
## ATLAS内部飛跡検出器



Phase 2(HL-LHC)では、内部飛跡検出器を全てシリコンセンサーにアップグレードする。  
⇒高放射線耐性を持つシリコンセンサーを開発する。

HL-LHCで見込まれる放射線量  
(1 MeVの中性子の個数に換算)

- IBL  
— R = 3.3cm :  $\sim 2 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- PIXEL  
— R = 10 cm :  $\sim 4 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- SCT  
— R = 30 cm :  $\sim 1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$



# n-in-pシリコンセンサー

現行SCT(p-in-n)シリコンセンサー

- ⇒放射線によりバルク内のp型不純物が増加すると、バルクがp型に型反転する。
- ⇒全空乏化しないと、信号が読み出せない。
- ⇒放射線損傷により全空乏化電圧が上昇し、システム耐圧である500 Vを超えた時がセンサーの寿命。

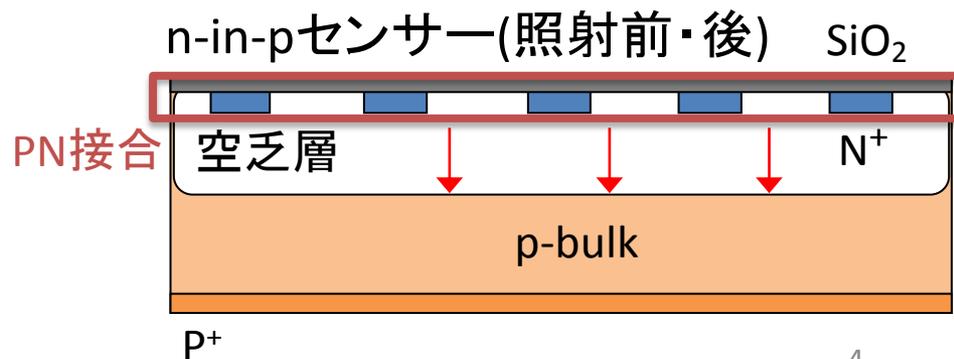
型反転せず、部分空乏化でも読み出せるn-in-pセンサーを開発している。

n-in-pセンサーの放射線損傷による特性変化を理解することは大変重要である。

- ・全空乏化電圧や空乏層の広がりの変化を理解する。
- ・高電圧に耐え得るedgeの構造として、Multi guard ringの電圧耐性を調べる。

n-in-pセンサーは、バルク表面に電子が蓄積し電極間の分離が悪化するため、電極分離構造(P-stop)が必要となる。

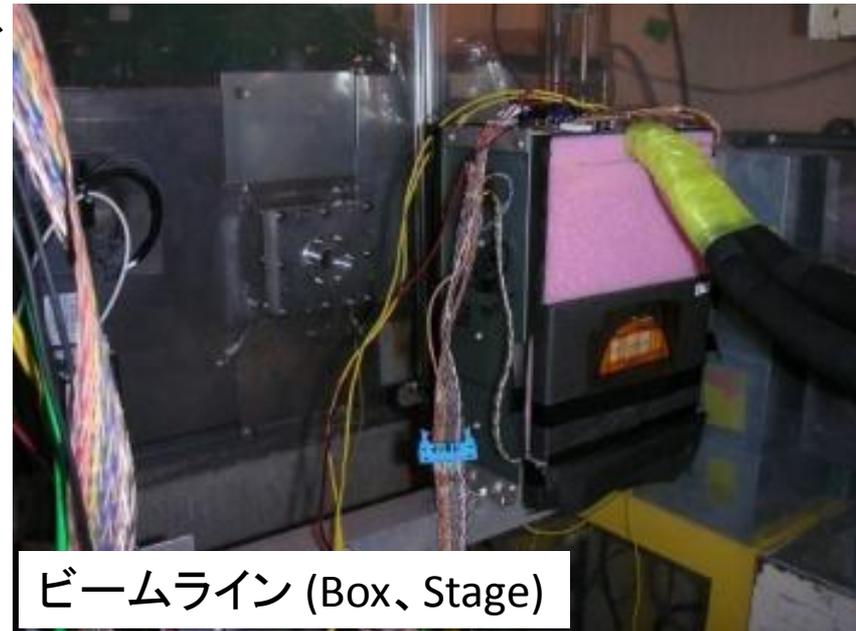
- ・必要なP-stopの幅、放射線損傷によるP-stop電位の変化を調べる。



# 陽子線照射試験 東北大CYRIC

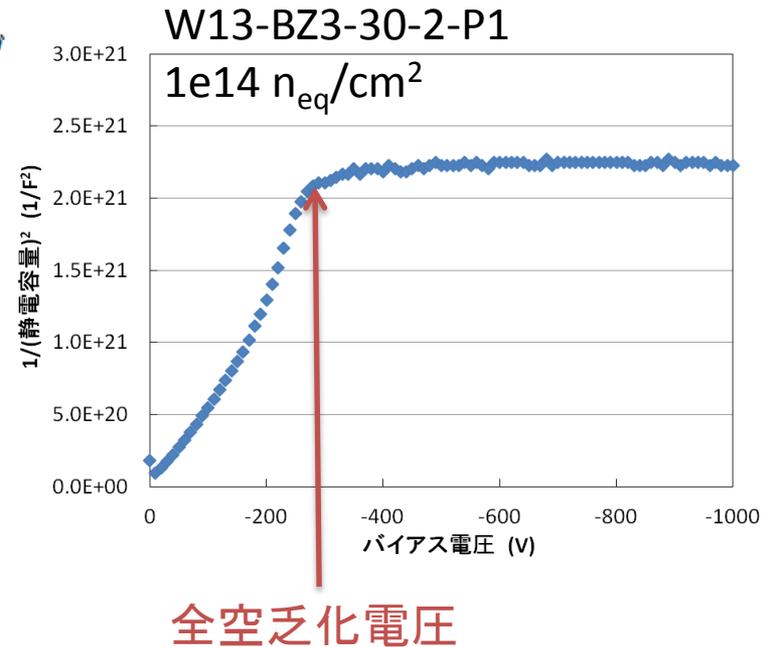
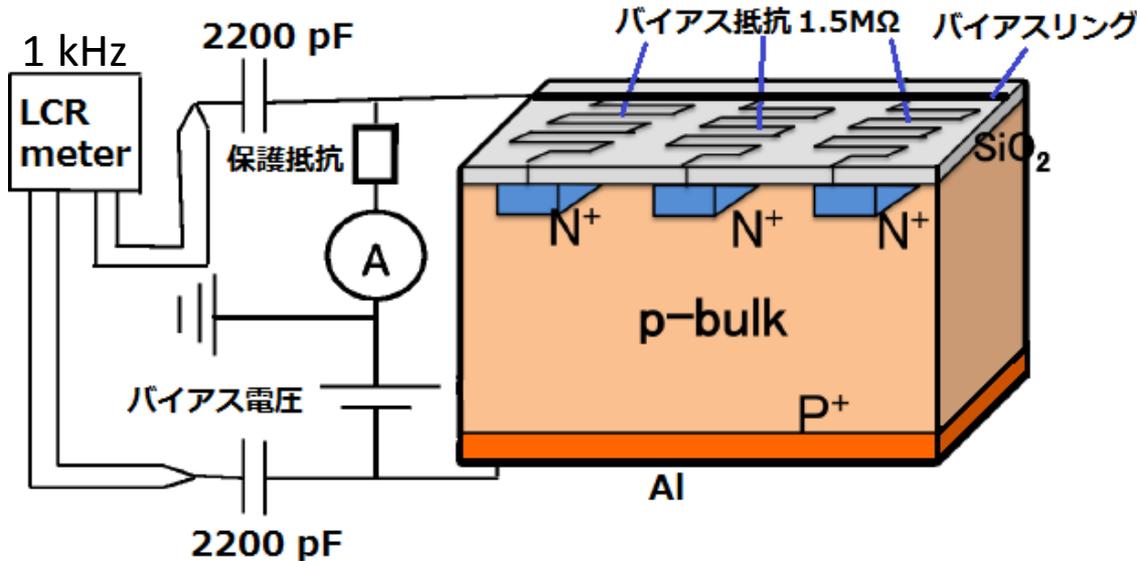
- エネルギー: 70 MeV
- 照射量
  - 1st : 5.7e12、1.1e13、1.2e14、1.2e15、1.1e16  $n_{eq}/cm^2$
  - 2nd : 1.1e14、1.2e15、5.7e15、1.2e16  $n_{eq}/cm^2$
- 照射サンプル: 浜松ホトニクス社製
  - Multi Guard ring 4x4mmダイオード
  - P-stop 1x1cmSTRIPセンサー
  - PTP 1x1cmSTRIPセンサー
  - Slim Edge 4x4mmダイオード
  - PIXEL 1x1cmPIXELセンサー

照射ボード



ビームライン (Box、Stage)

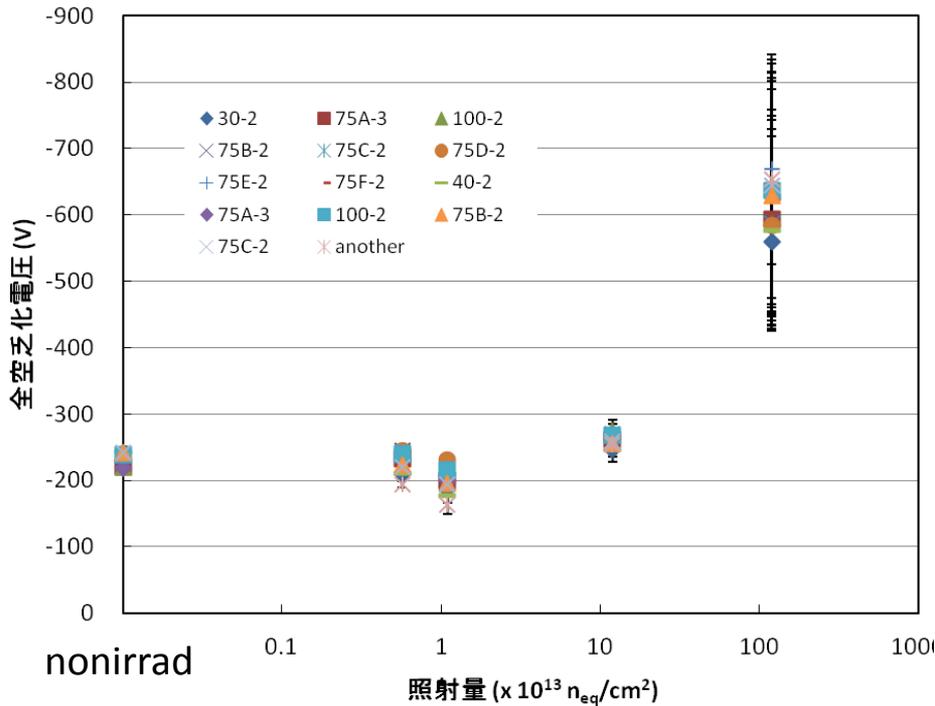
# 静電容量測定



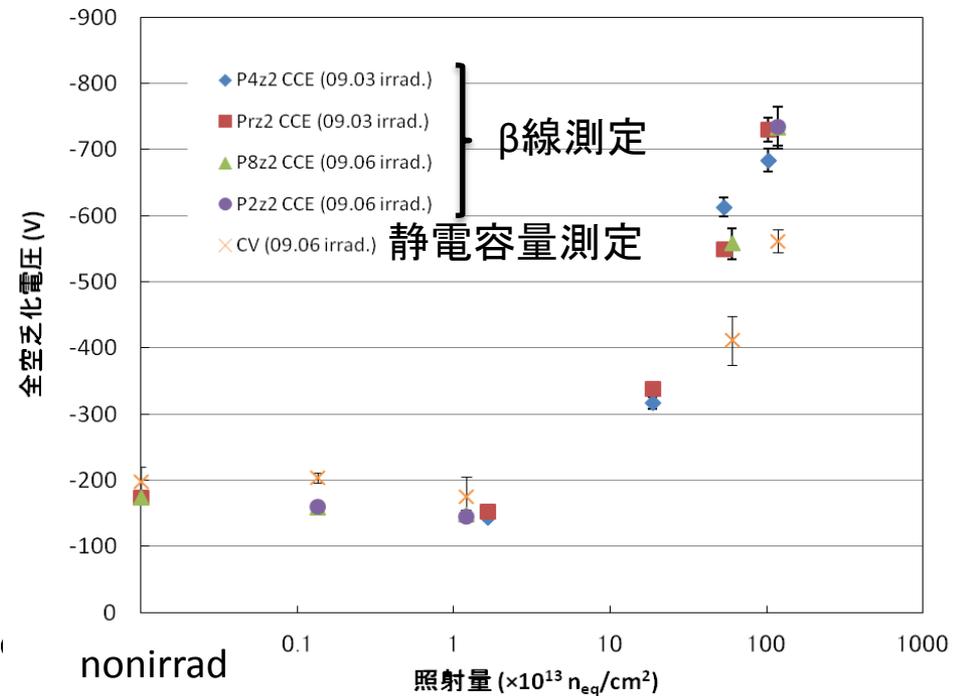
- バイアス電圧(0~-1000 V)を印加して、センサーの静電容量を測定する。
- $1/(\text{静電容量})^2$ がバイアス電圧に比例し、全空乏化後に一定になることから全空乏化電圧を評価する。
- 測定温度: 非照射: +20°C、照射後: -20°C
- アニーリング: 60°C65分相当

# 全空乏化電圧の評価

全空乏化電圧の評価



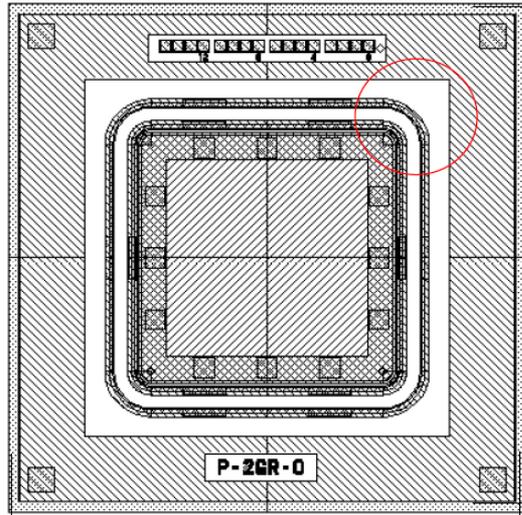
以前の測定



(HSTD8 2011.12.05-08 S. Mitsui)

1e15 n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>において-600 Vとなり、今までの結果と一致している。

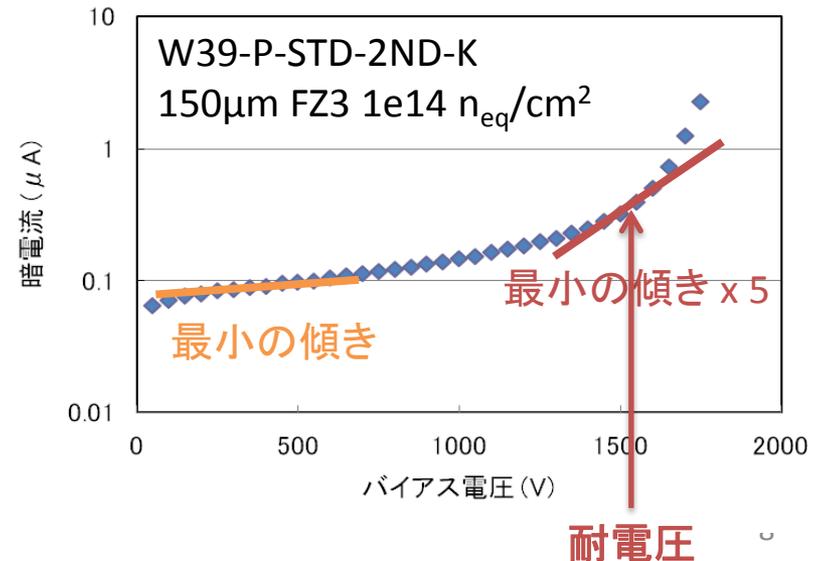
# Multi guard ringの電圧耐性



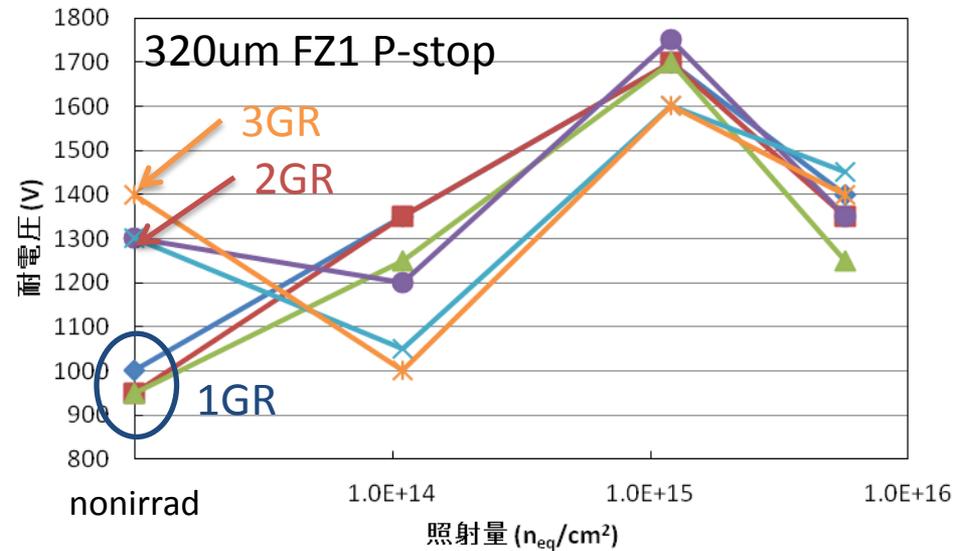
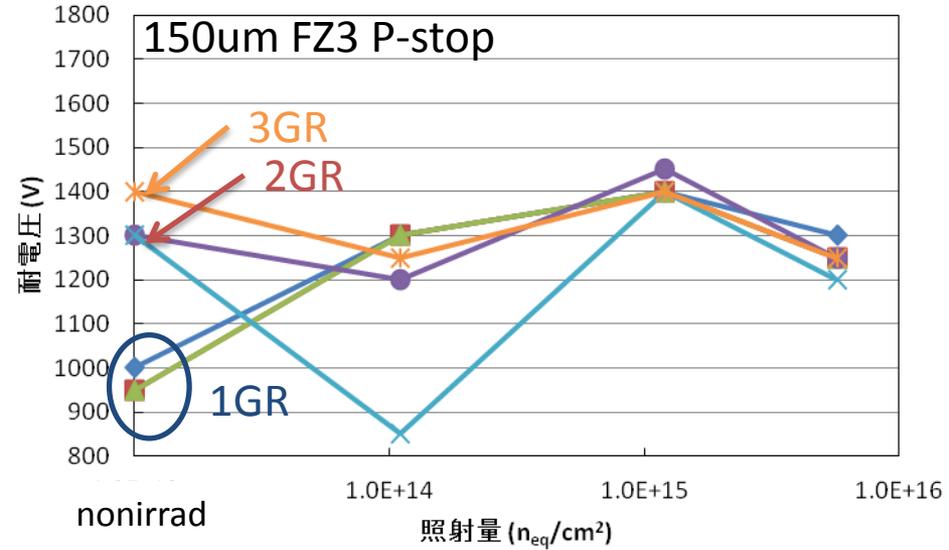
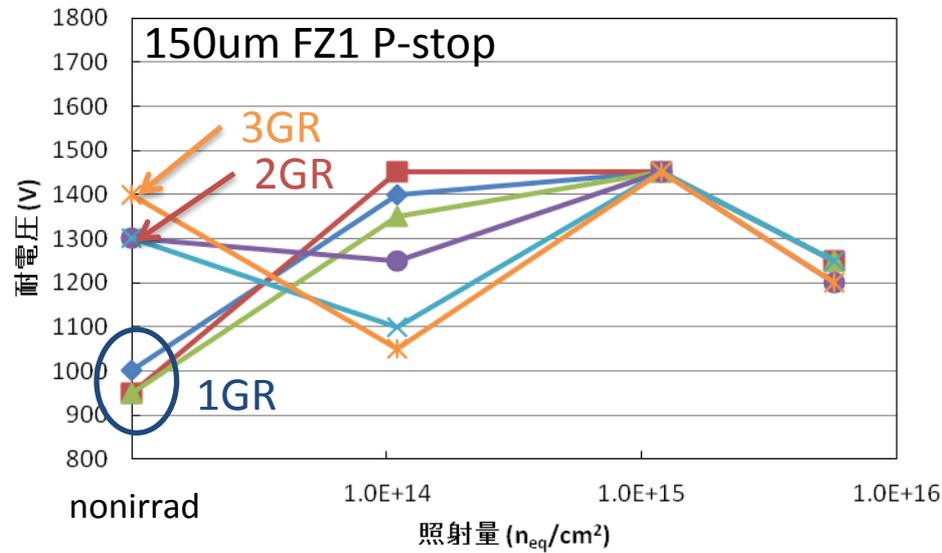
ガードリング数、幅と耐電圧の関係を調べる。

## サンプル

- 150/320  $\mu\text{m}$ 厚
- FZ1/FZ3 (裏面P+の厚さが異なる。)
- p-edge/n-edge
- 照射量:  $1.1e14, 1.2e15, 5.7e15 n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- アニーリング:  $60^\circ\text{C}$ 65分相当
- 測定温度: 非照射:  $+20^\circ\text{C}$ 、照射後:  $-20^\circ\text{C}$



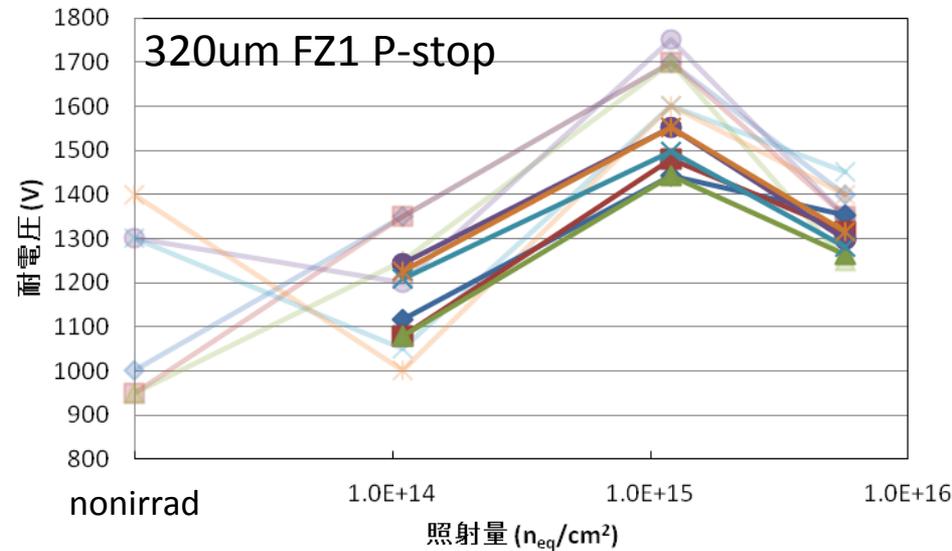
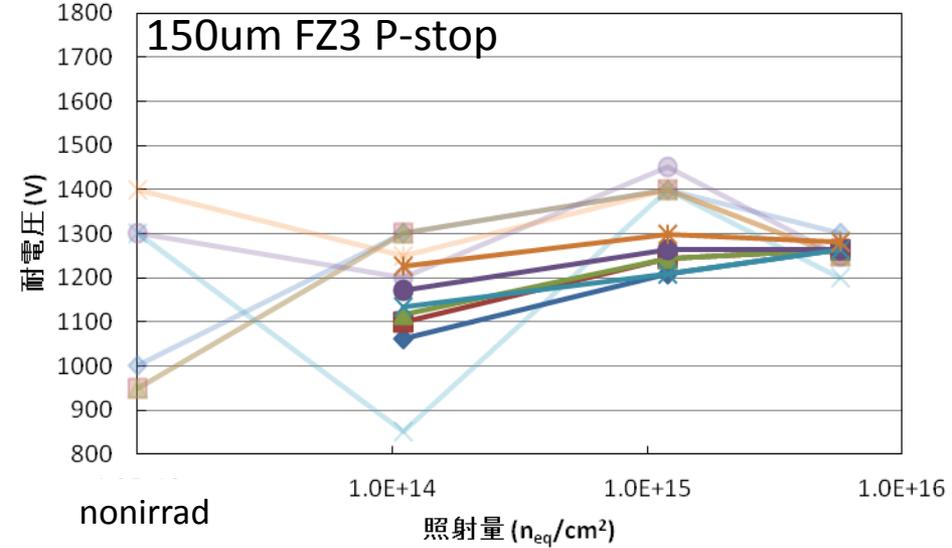
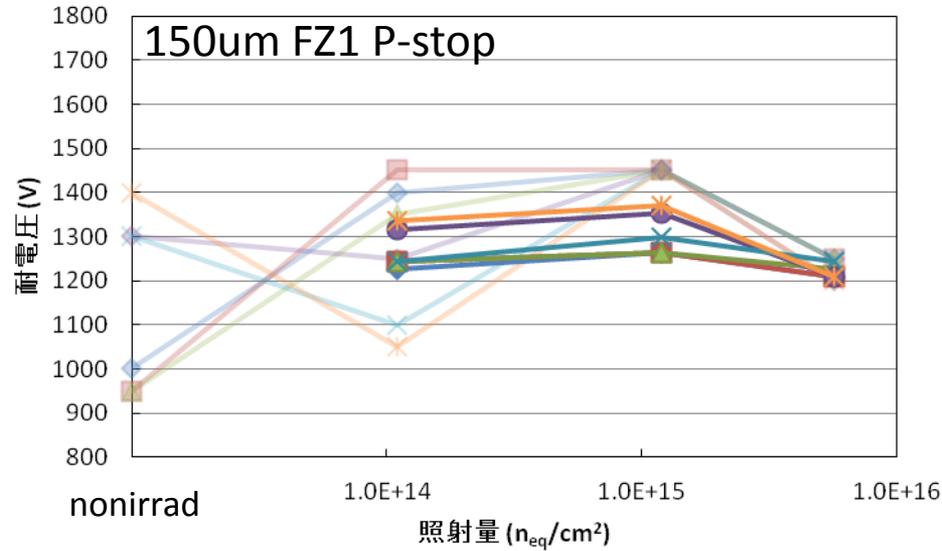
# Multi guard ringの電圧耐性 p-edge



- ◆ 1GR-N    ■ 1GR-M    ▲ 1GR-W
- 2GR-M    × 2GR-W    \* 3GR-W

Multi guard数が多い方が、未照射で良い電圧耐性を示す。

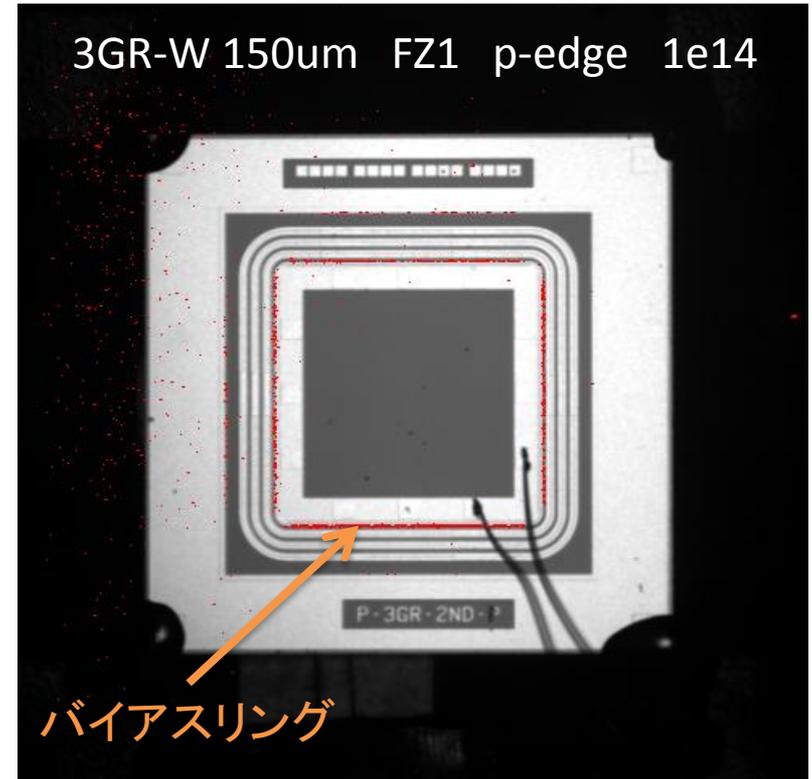
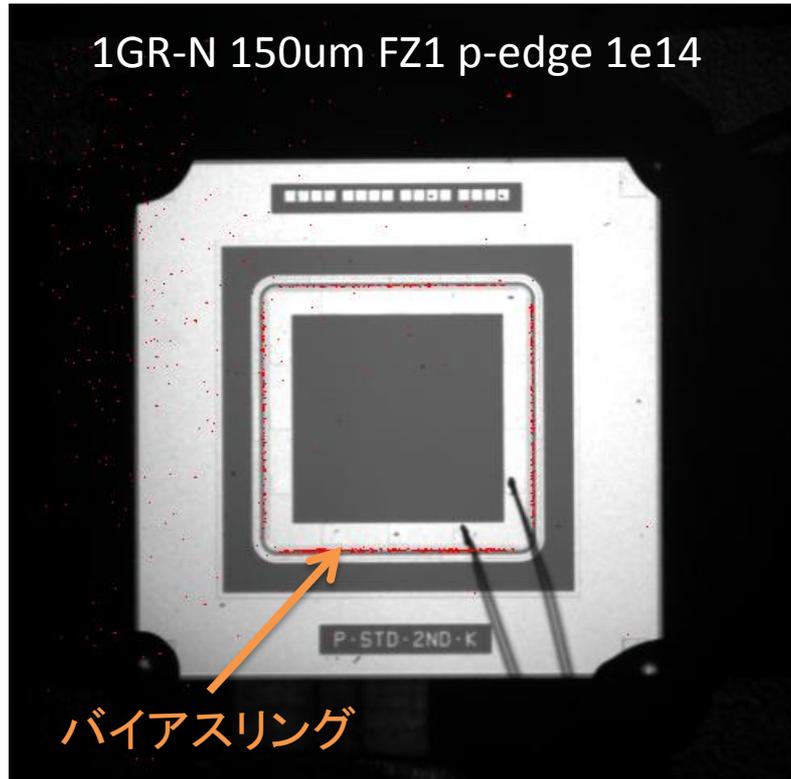
# Multi guard ringの電圧耐性 n-edge



- ◆ 1GR-N
- 1GR-M
- ▲ 1GR-W
- 2GR-M
- × 2GR-W
- ✱ 3GR-W

照射後は、相対的にp-edgeの方が耐電圧が良い。

# Hot spot撮影



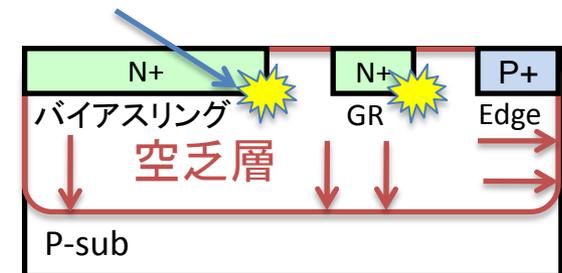
## Hot spot撮影

マイクロ放電が発生している場所を特定する。

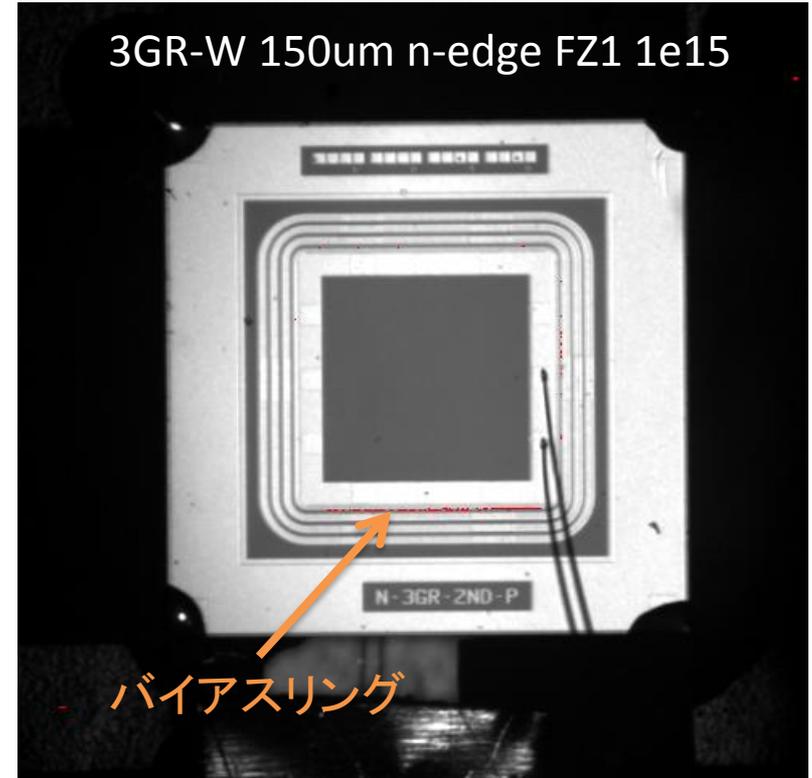
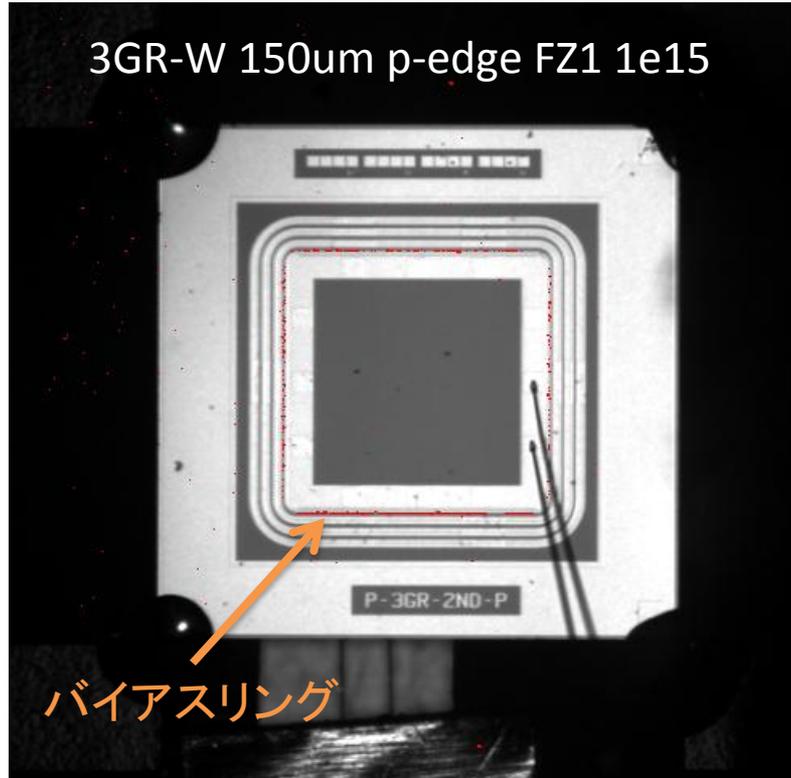
## マイクロ放電

局所的な高電界により電子雪崩が起き、暗電流が急激に増加する。

## マイクロ放電



# Hot spot撮影



Guard ringの数や幅、照射量に関係なく、全てバイアスリングでマイクロ放電が起きている。

# P-stop 電位測定

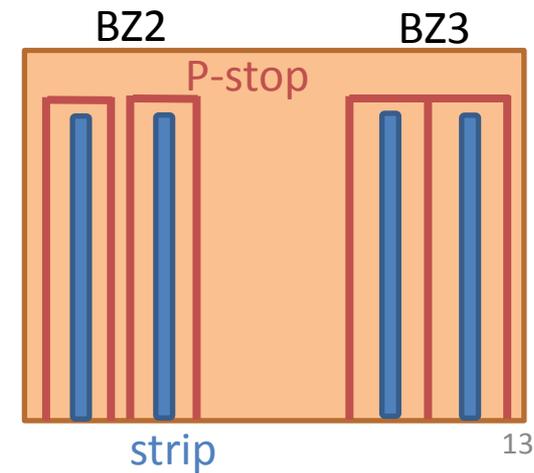
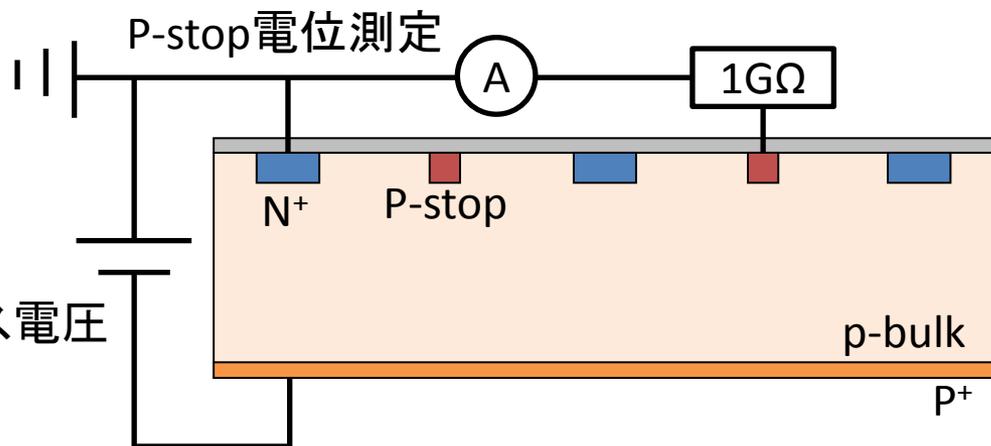
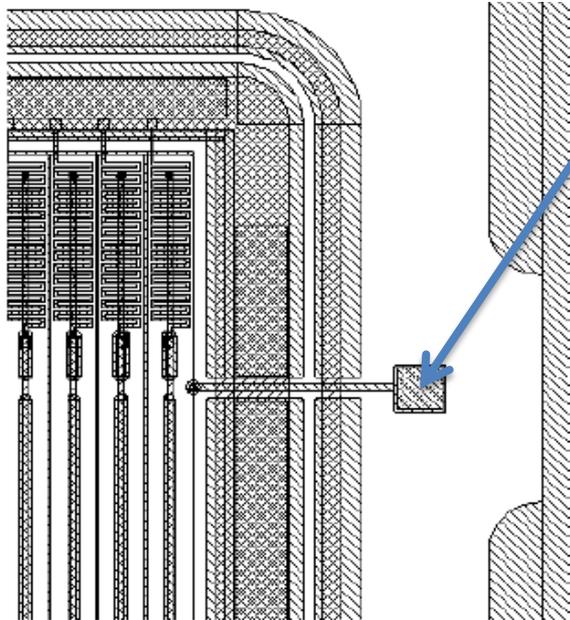
P-stopからパッドを引き出し、P-stop電位のバイアス電圧依存性を評価する。

## サンプル

- 150/320  $\mu\text{m}$ 厚、FZ1/FZ3
- 照射量:  $5.7\text{e}12$ 、 $1.1\text{e}13$ 、 $1.2\text{e}14$ 、 $1.2\text{e}15$   $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- アニーリング:  $60^\circ\text{C}$ 65分相当
- 測定温度: 非照射:  $+20^\circ\text{C}$ 、照射後:  $-20^\circ\text{C}$

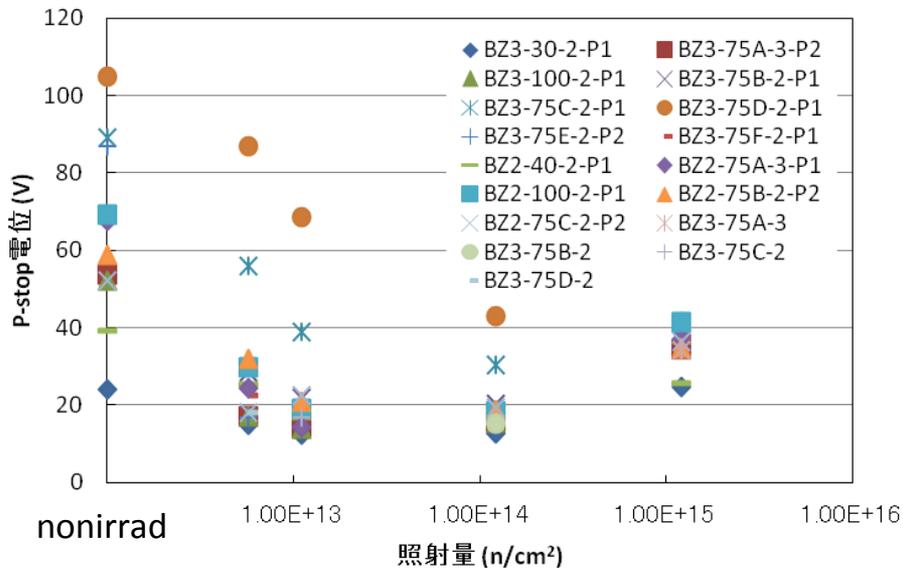
## P-stop電位測定

- バイアス電圧( $0\sim-1000$  V)を印加した時のP-stop電位を測定する。

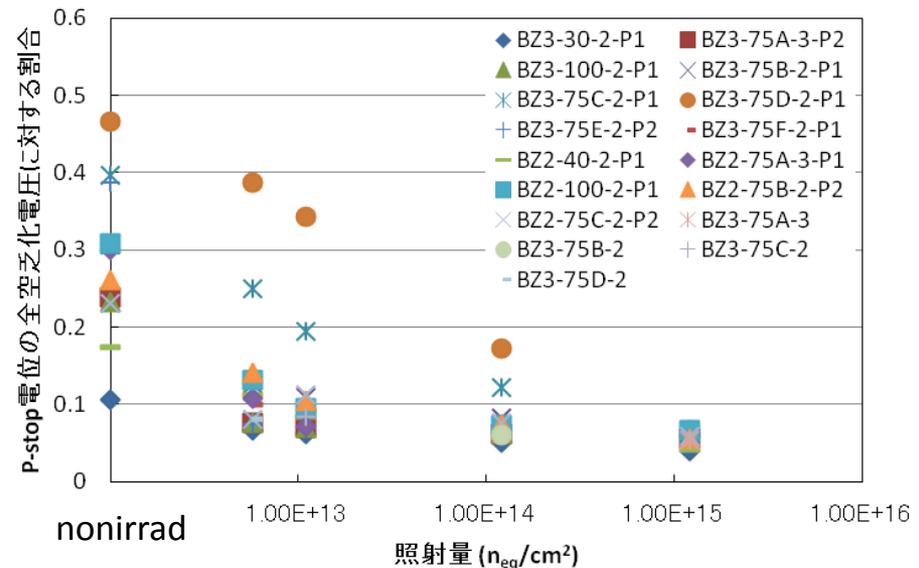


# P-stop電位の評価

## 全空乏化電圧でのP-stop電位



## P-stop電位の全空乏化電圧に対する割合



照射量が増えるとP-stop電位が表面電位に近づく。  
 P-stop電位の全空乏化電圧に対する割合は一定にならない。

# 結論・考察

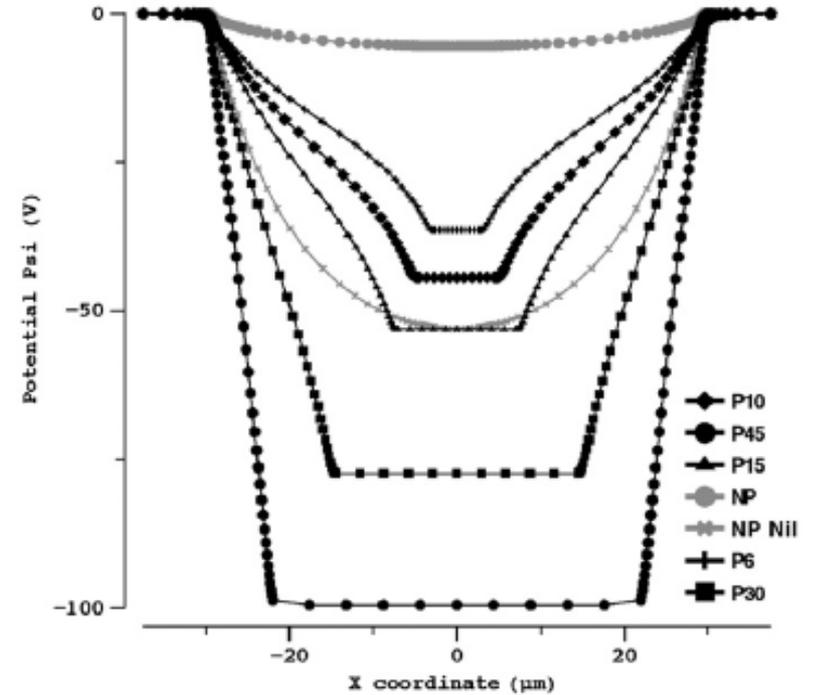
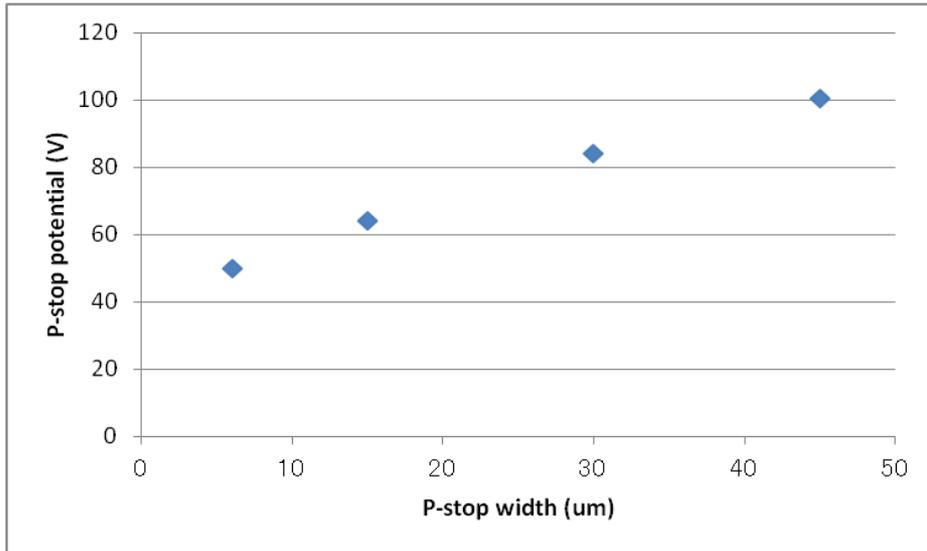
研究の目的: ATLASアップグレードに向けた、p型シリコンセンサーの放射量損傷による特性変化を理解する。

- 全空乏化電圧
  - 全空乏化電圧の変化から、陽子線照射によるセンサーの損傷はバルク部の損傷として理解できる。
- Multi guard ring
  - 照射後に耐電圧がGuard ringの数、幅に依存せず、全てバイアスリングでマイクロ放電が起きていることから、バルク表面にP+が蓄積されていると考えられる。
  - p-edgeがn-edgeより耐電圧が良いのは、n-edgeにはPN接合があり内蔵電位により電場が増幅されマイクロ放電が起きやすくなるためである。
- P-stop電位
  - 照射量が増えるにつれてP-stop電位が表面電位に近づき、全空乏化電圧に対する割合が一定とならないことから、単純にバルクの抵抗だけでは理解出来ない。

今後、これらの現象を統一的に理解する必要がある。

Back up

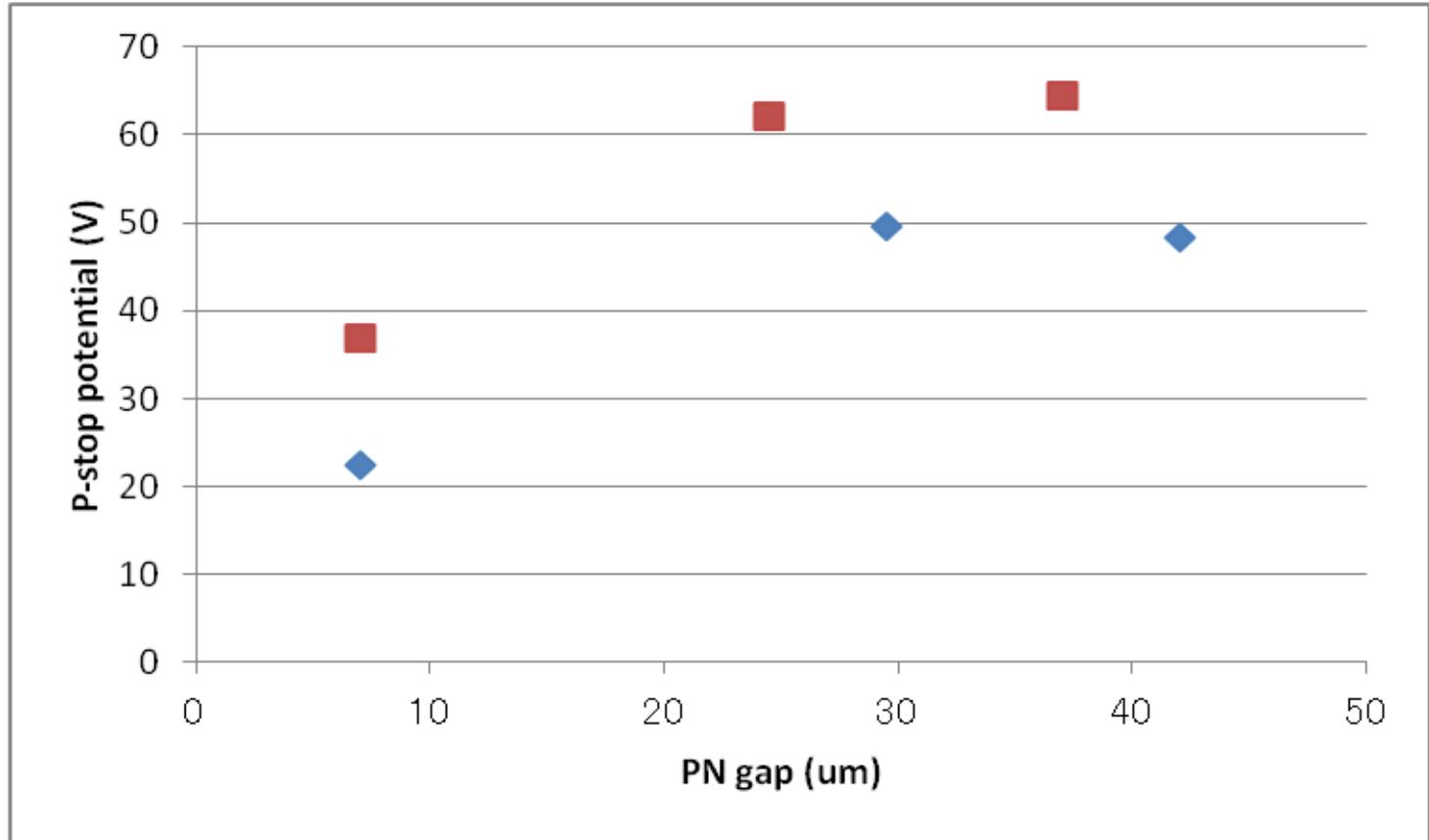
# P-stop電位 P-stop幅依存性 @200V



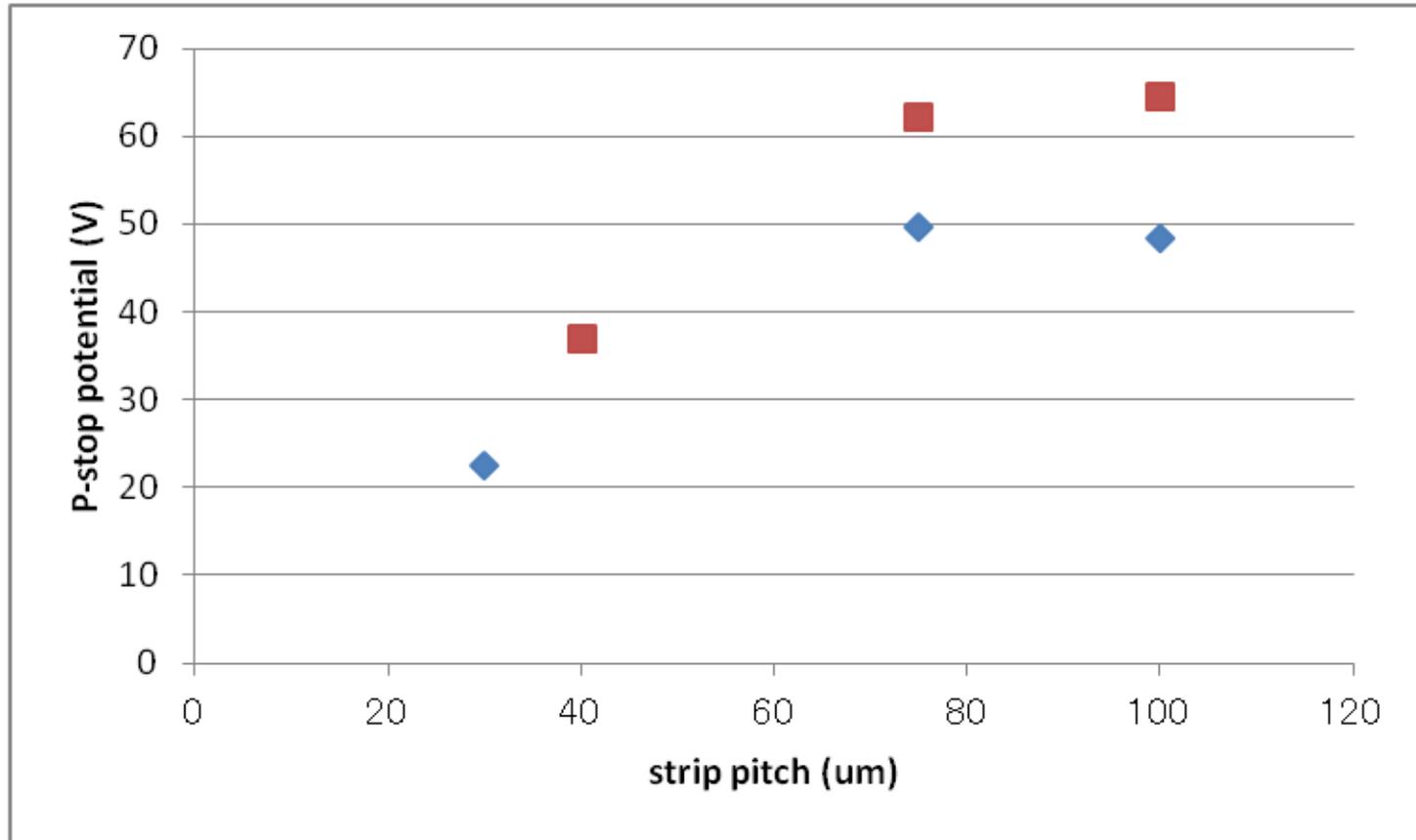
**Fig. 6.** Electric potential  $\Psi$  near the silicon surface between  $n^+$ -strips in common p-stop structures with p-stop widths of 6–45  $\mu\text{m}$  (P6–P45), together with references without p-stop and with interface trap charges of  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (NP) and nil (NP Nil).

Y. Unno et al., Nucl. Instr. Meth. A636 (2011) S118–S124

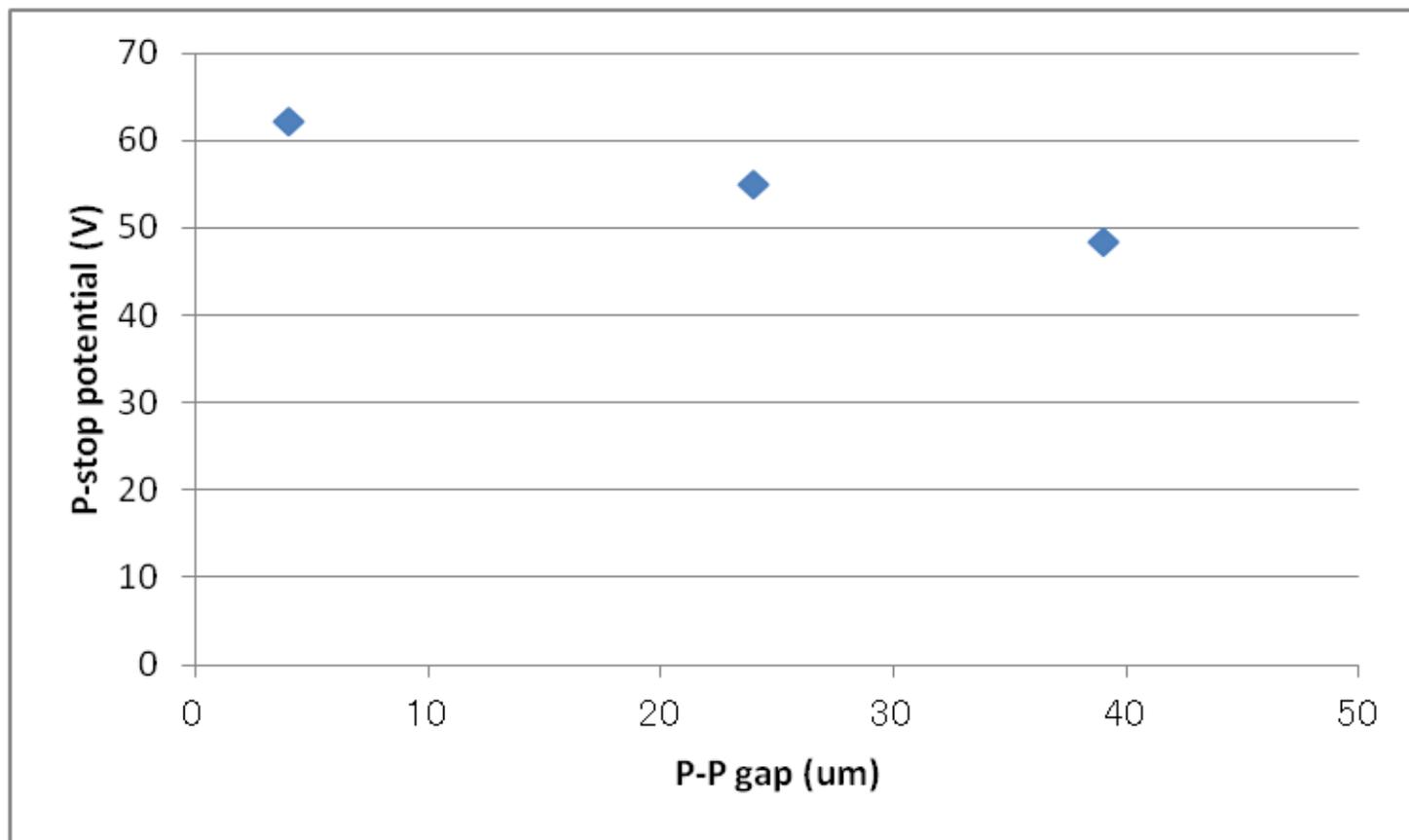
# P-stop電位 PN gap依存性 @200V



# P-stop電位 ストリップ幅依存性 @200V

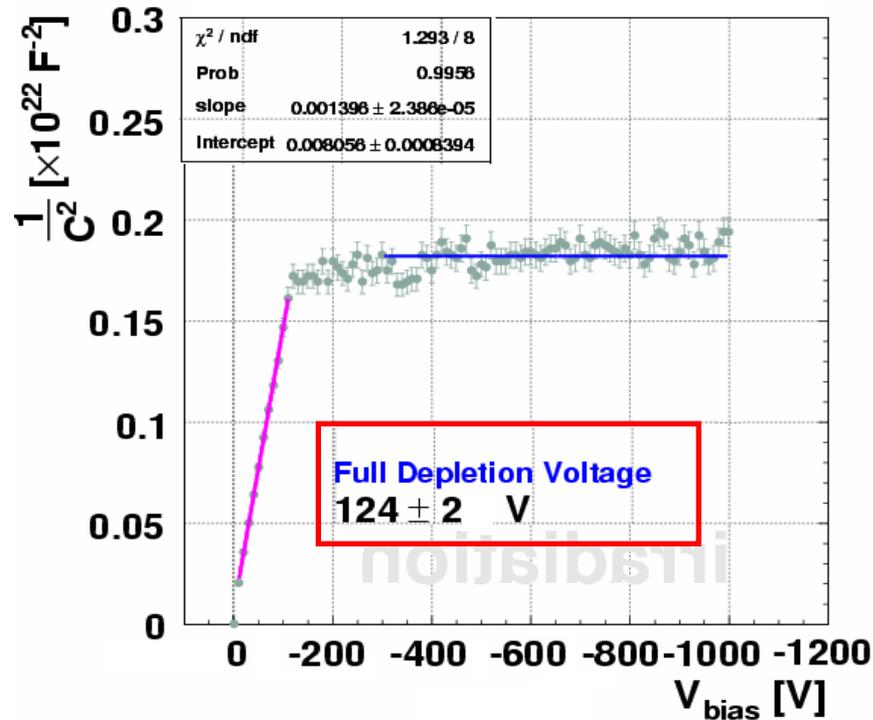


# P-stop電位 P-P gap依存性 @200V



# 全空乏化電圧の評価

## 静電容量測定



1/C<sup>2</sup>はバイアス電圧に比例し、全空乏化後は一定になる。

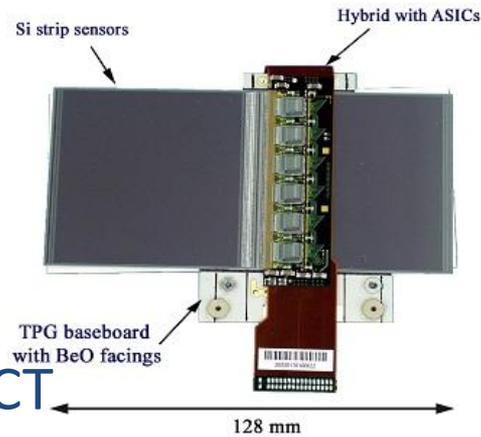
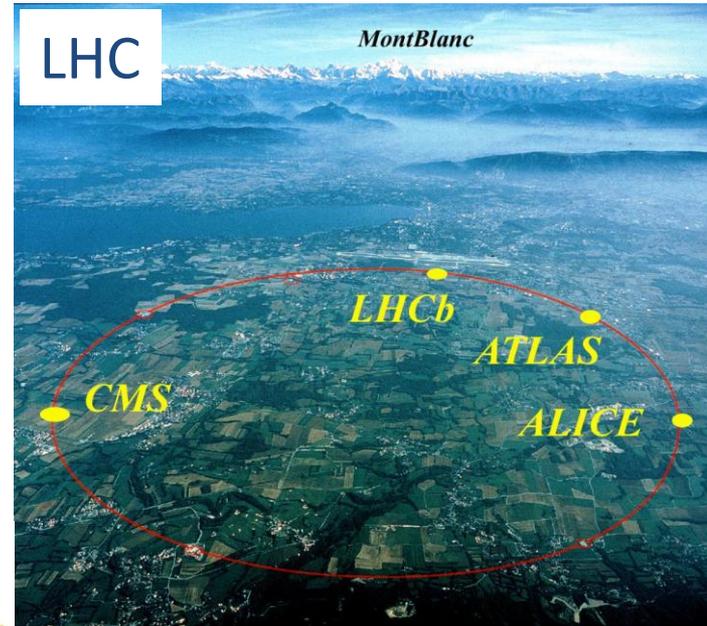
$$C_{\text{bulk}} = S \sqrt{\frac{e\epsilon}{2V} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}} \quad (C_{\text{bulk}} = \epsilon S / d) \quad d = \sqrt{\frac{2eV}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

(N<sub>A</sub>=アクセプタ密度 N<sub>D</sub>=ドナー密度 ε=シリコン誘電率 V=バイアス電圧 e=素電荷 d=空乏層の厚さ)

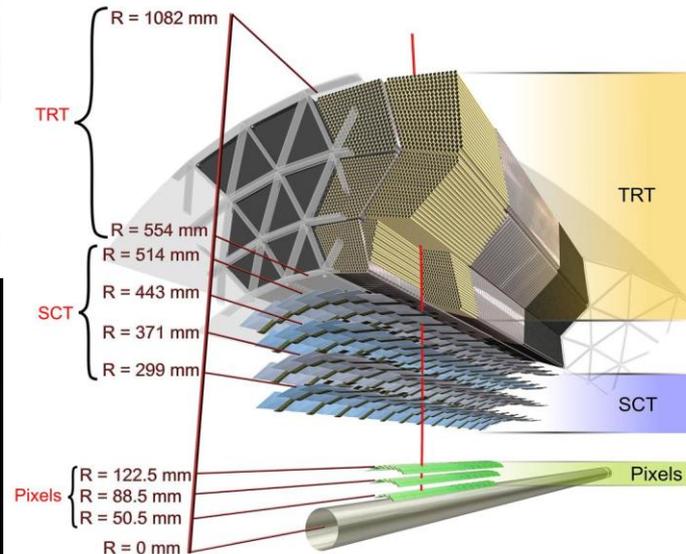
# LHCとATLAS

LHC(陽子-陽子衝突型加速器)

- 現在までのビーム輝度:  $3.3 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 
  - 目標値:  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 現在重心系エネルギー: 8 TeV
  - 2014年以降: 14 TeV

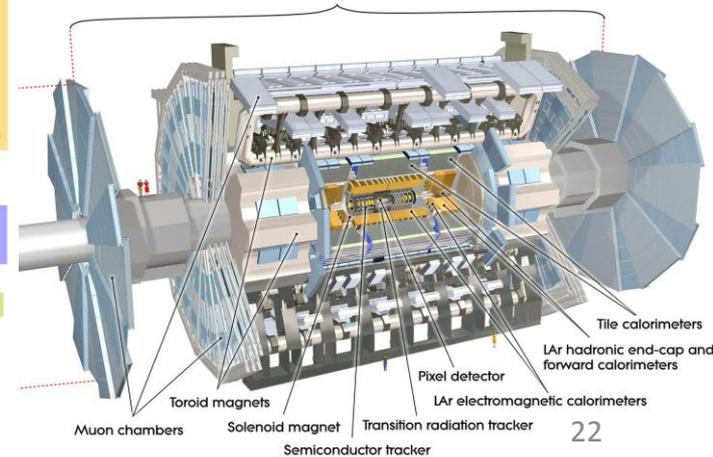


## 内部飛跡検出器



ATLAS

44m



PIXEL

# 静電容量測定 1e15

