

ATLAS検出器アップグレードに向けた シリコンマイクロストリップセンサーの 放射線影響の評価

萩原睦人

筑波大, 阪大理^A, 高工研^B, 東工大^C

原和彦, 荒井泰貴^A, 臼井純哉, 海野義信^B, 池上陽一^B,
中村浩二^B, 花垣和則^A, 陣内修^C, 本橋和貴^C,
他アトラス日本シリコングループ

発表の流れ

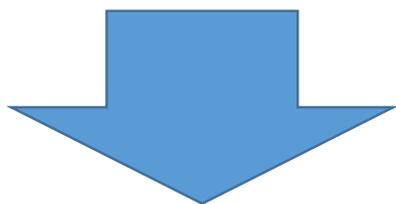


- HL-LHC
- マイクロストリップセンサー
- バイアス抵抗の測定
- ストリップ間抵抗の測定
- ストリップ間静電容量の測定
- まとめ

HL-LHC

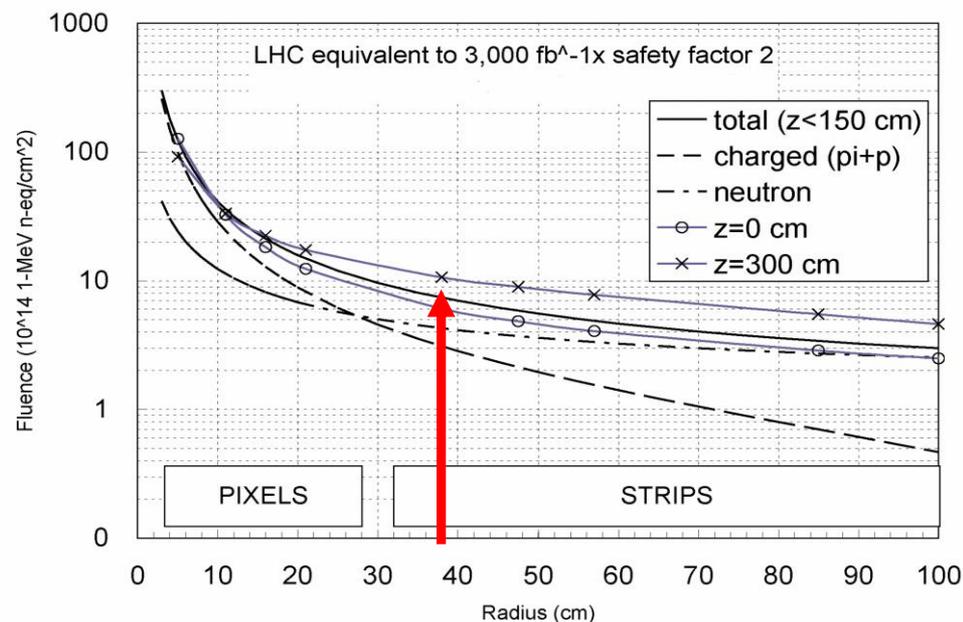


- HL-LHC(2023年～)ではATLAS検出器の内部飛跡検出器は全て半導体検出器に置き換える
- HL-LHCの環境下ではマイクロストリップ検出器の最内層では 1×10^{15} 1MeV n_{eq}/cm^2 の放射線が予想される



放射線耐性に優れた検出器の開発

1cm × 1cmのサンプルを用いて放射線に対する基本特性の測定を行う
(70MeVの陽子ビームによる照射)



サンプルのデザイン

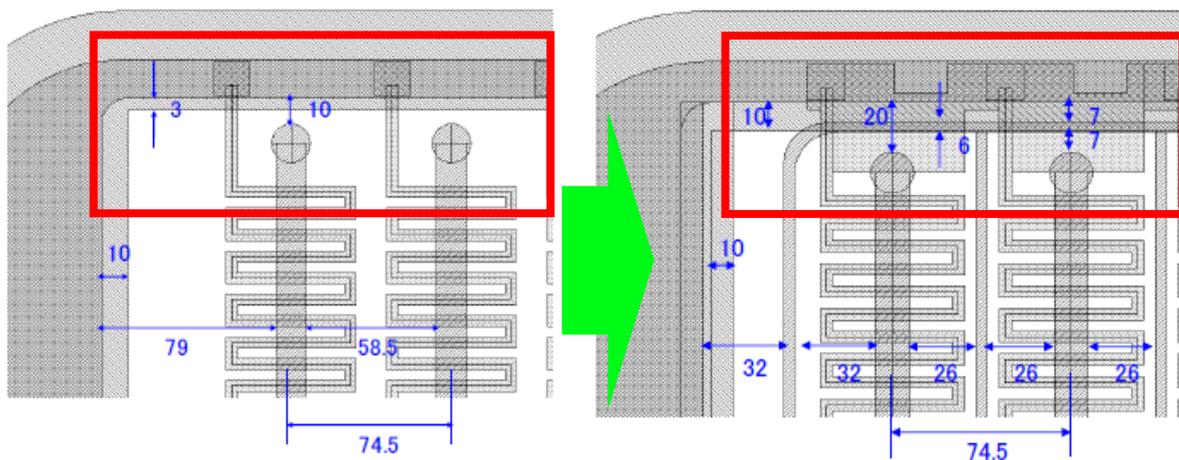


- 新設計のATLAS12M

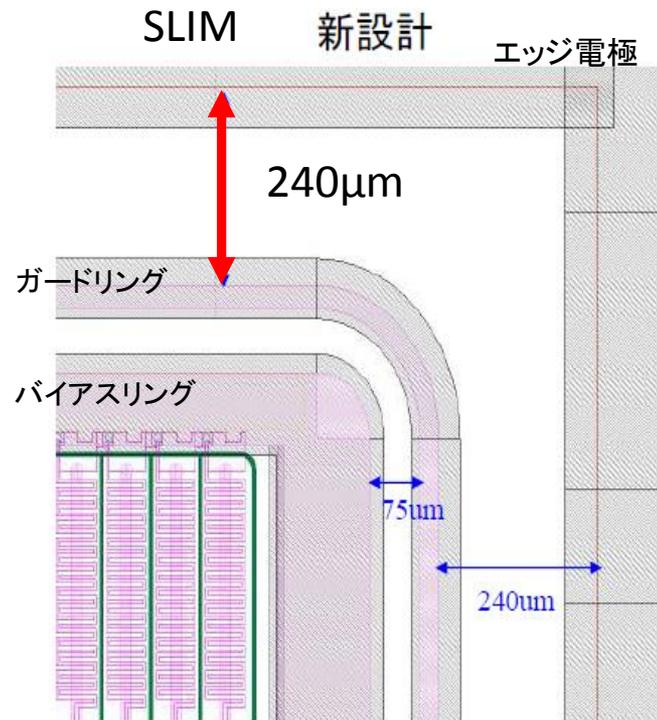
エッジまでの距離450 μm →240 μm

エッジまでの距離を短くすることにより物質量を2%減らすことができる。また、モジュールを付き合わせるデザインでは不感領域を1%小さくできる。

Punch Through Protection(PTP)を補助するためにゲートを導入した。



新設計のATLAS12Mにおいて放射線耐性があることを検定する。



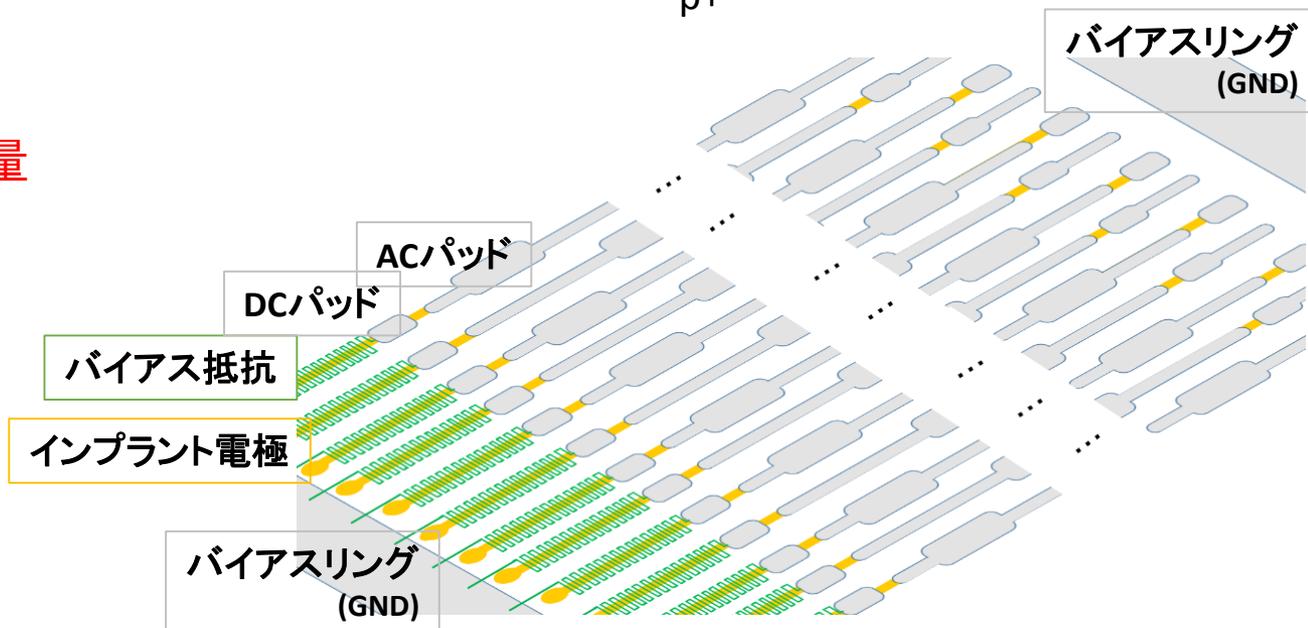
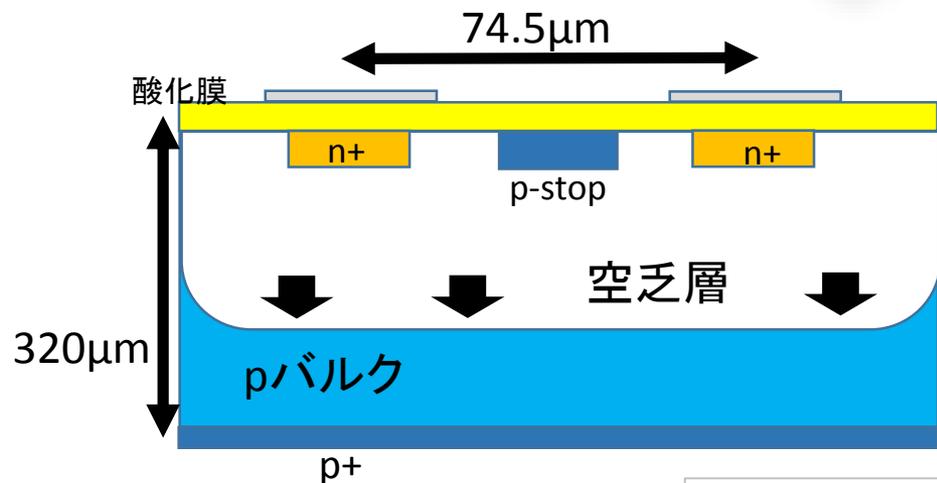
参考(図): 浜松ホトニクス

マイクロストリップセンサー



測定項目

- バルク損傷
 - バルク部の暗電流、マイクロ放電
 - 静電容量の測定による全空乏化電圧
- 表面損傷
 - Punch Through Protection(PTP)
 - バイアス抵抗
 - ストリップ間抵抗
 - ストリップ間静電容量



バイアス抵抗の測定



- ストリップと接地されているバイアスリングはバイアス抵抗(R_{bias})によって接続されている
 - ストリップ間の接続を防ぐために抵抗値を $1.5 \pm 0.5 M\Omega$ として製造されている
- ⇒放射線照射後もこの抵抗値の範囲内であることを要求

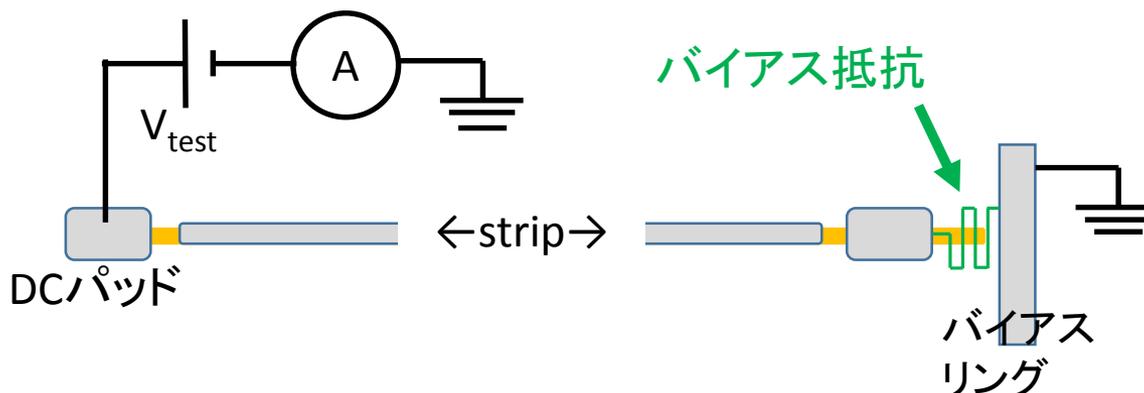
測定

- テスト電圧2V,5V
- 温度 -35°C

ストリップ電極の抵抗とバイアス抵抗の合成抵抗を測定した。

バイアス抵抗の計算式

$$R_{bias} = \frac{5V - 2V}{I_{5V} - I_{2V}}$$



バイアス抵抗



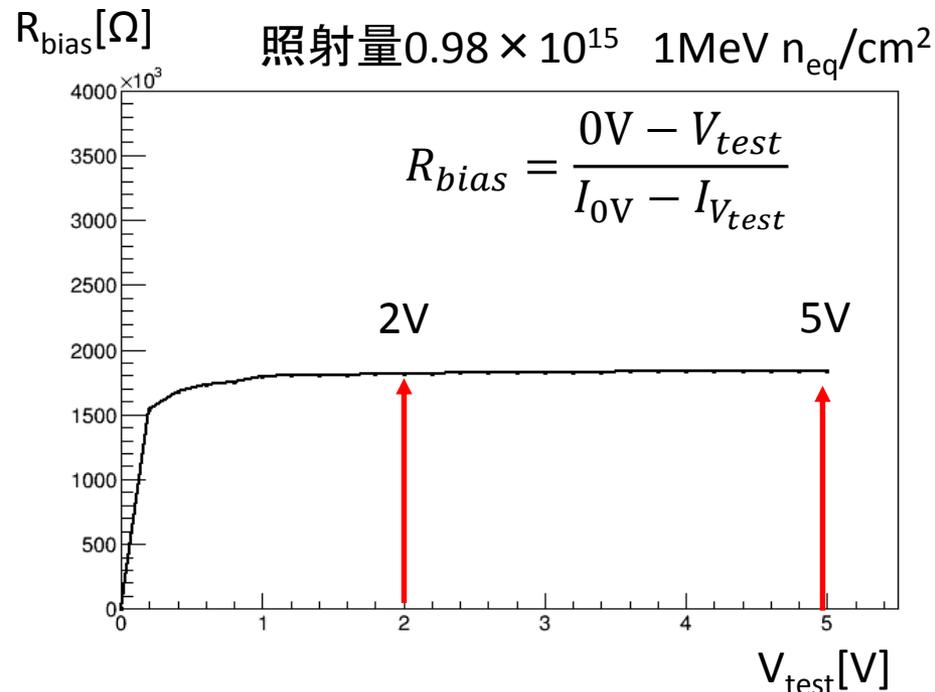
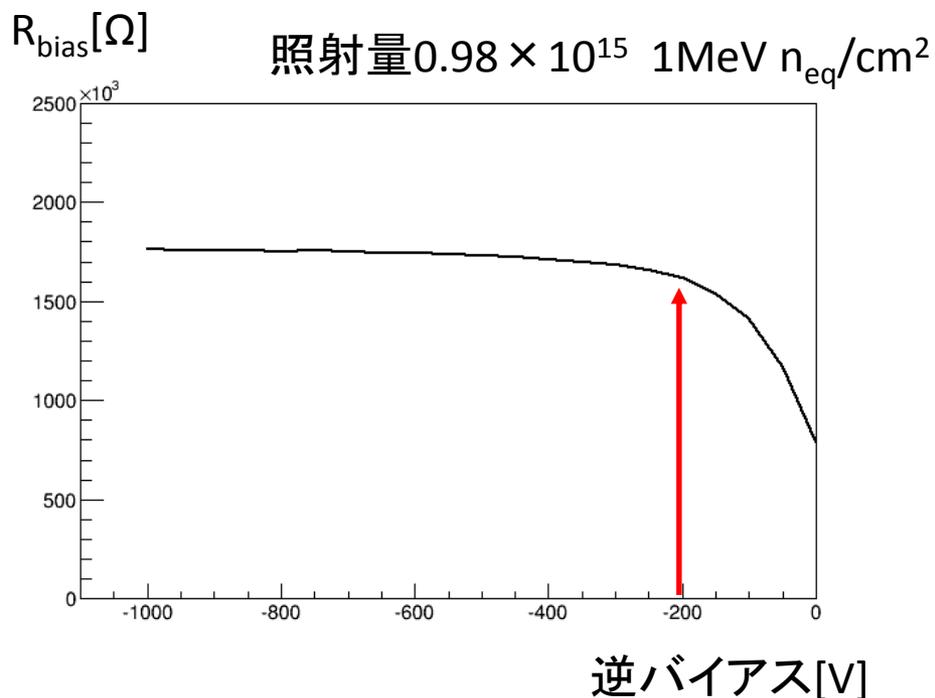
- 抵抗と逆バイアスとの関係

逆バイアスを印加すると抵抗値は一定に近づく。

-200Vを比較の基準にした。

- 抵抗とテスト電圧との関係

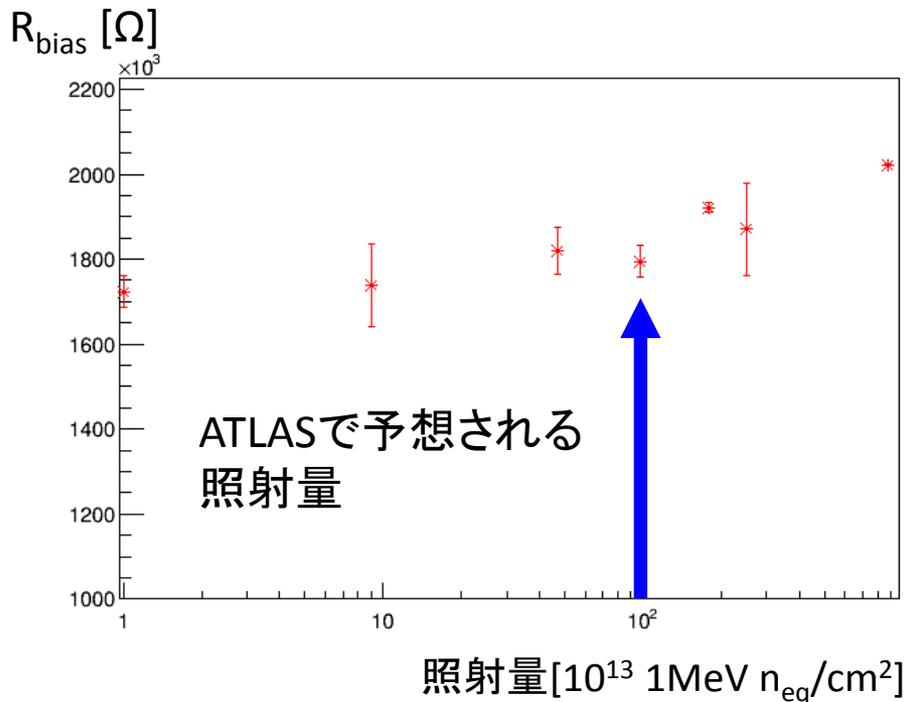
テスト電圧を印加すると抵抗値は一定に近づく。



バイアス抵抗

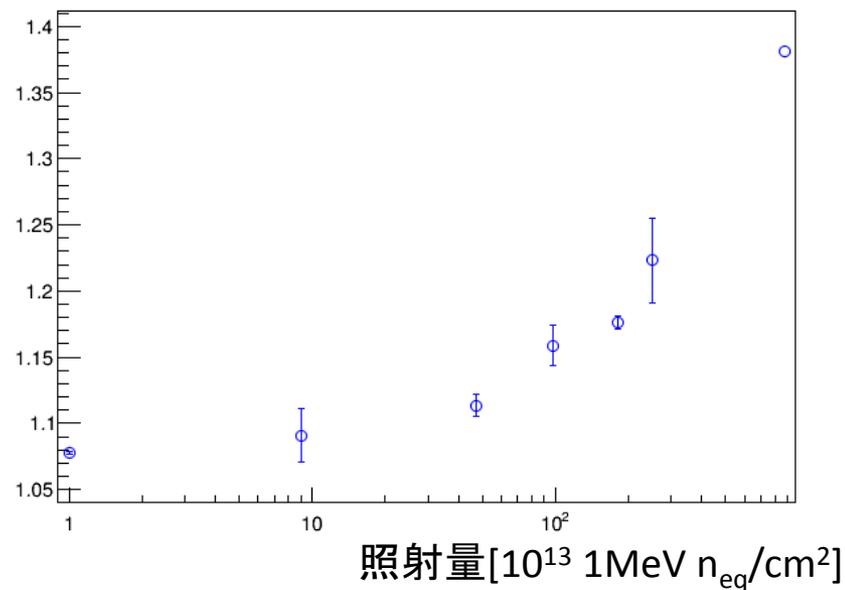


逆バイアス-200Vを印加したときの抵抗値を照射量ごとにプロット。



照射量の増加とともに抵抗値の増加が見られる。規格である $1.5 \pm 0.5 M\Omega$ の範囲内

$R_{bias}(-35^\circ C)/R_{bias}(-20^\circ C)$

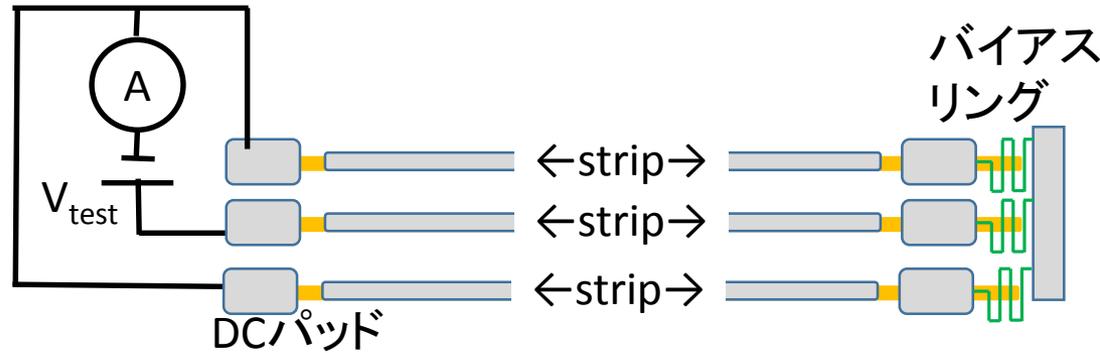


- ◆ 誤差棒はサンプルのばらつきを表している。誤差棒のついていない点は1サンプルのみの測定。



ストリップ間抵抗の測定

- 隣り合うストリップが電氣的に接続されないためにストリップ間抵抗 R_{int} は大きいことが望まれる($>10 \times R_{bias}$)



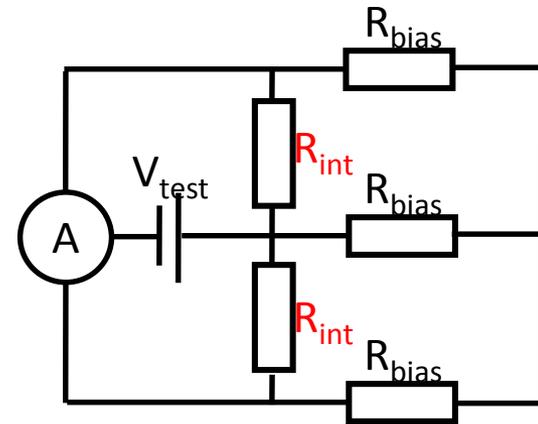
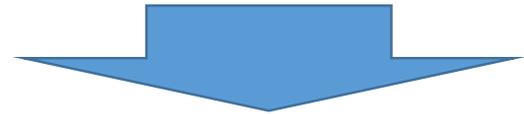
測定

- テスト電圧2V,5V
- 温度-35°C

バイアス抵抗は測定値を使用した。

ストリップ間抵抗の計算式

$$\frac{1}{R_{int}} = 2 \frac{I_{5V} - I_{2V}}{5V - 2V} - \frac{2}{\frac{3}{2} R_{bias}}$$



ストリップ間抵抗

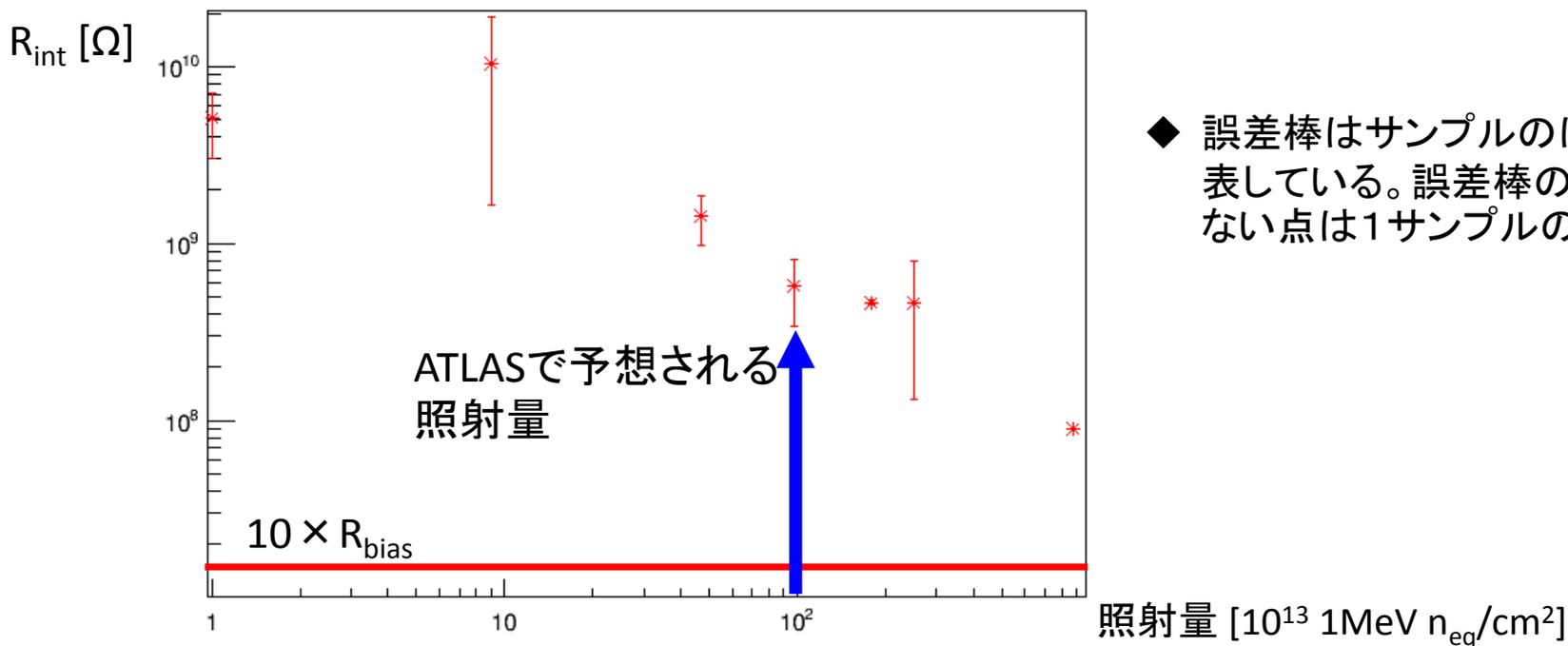


測定した電流値からストリップ間抵抗を求めた。

逆バイアス-200Vにおける抵抗値。

照射量が大きくなるにつれ抵抗値は小さくなる。

ATLASで予想される照射量以下ではバイアス抵抗の100倍以上の抵抗値を持っており、ストリップ間の分離がよくできている。



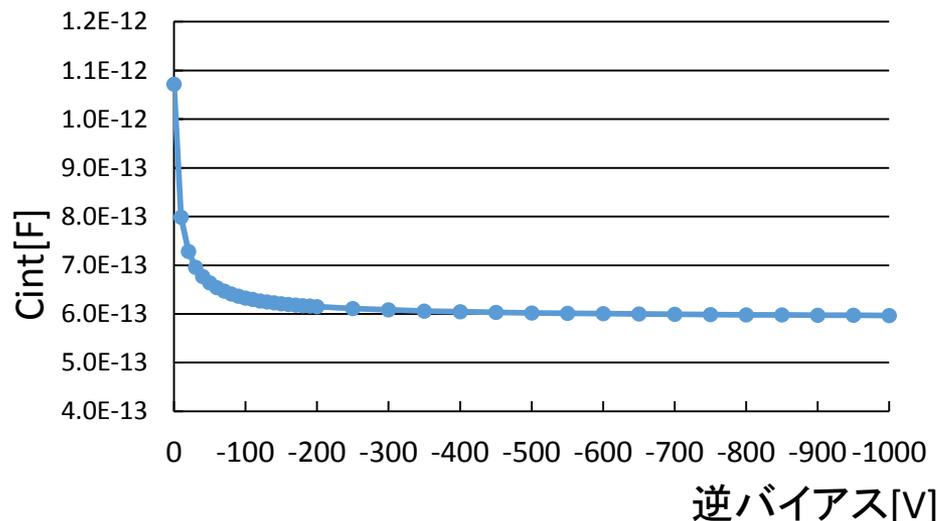
◆ 誤差棒はサンプルのばらつきを表している。誤差棒のついていない点は1サンプルのみの測定。

ストリップ間静電容量の測定

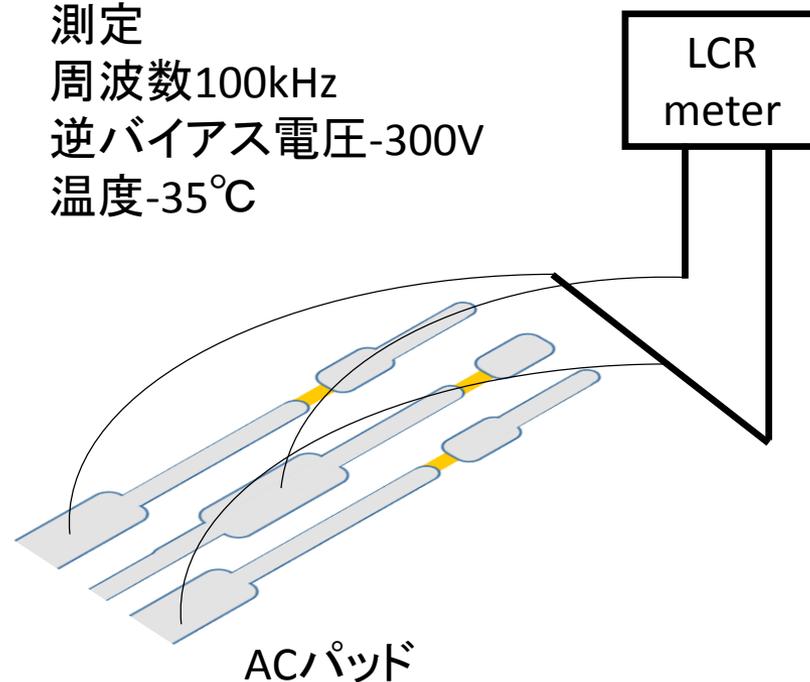


- 両隣のストリップとの静電容量を C_{int} として定義
- 信号雑音比を小さくするために、 C_{int} は小さいことが望ましい。バレル、74.5 μm 間隔に対して $<0.8\text{pF/cm}$ となるデザイン

⇒放射線照後に C_{int} の変化がないことを測定する



測定
周波数100kHz
逆バイアス電圧-300V
温度-35 $^{\circ}\text{C}$

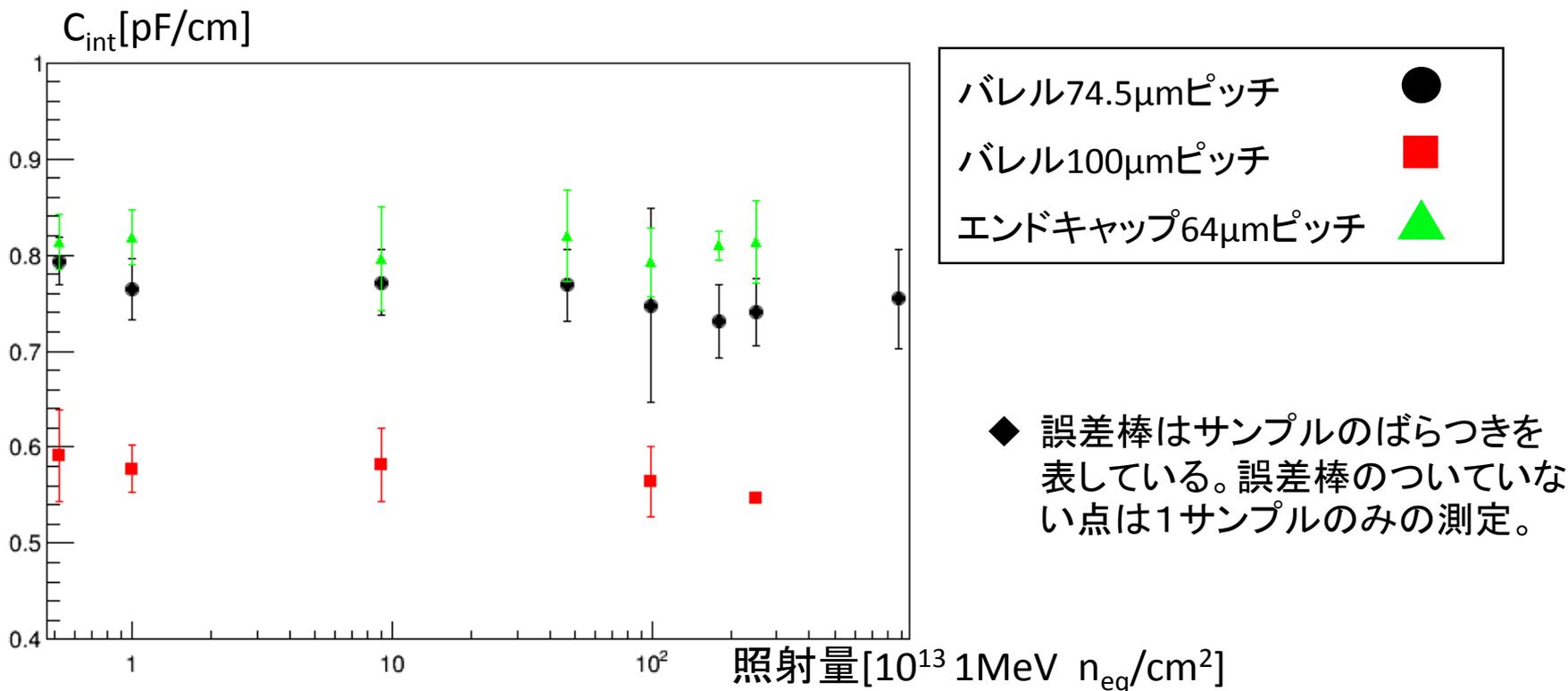


ストリップ間静電容量



ストリップ間の静電容量はバレルの74.5 μm ピッチのサンプルで
~0.8pF/cm、100 μm ピッチのサンプルで~0.6pF/cmとなった。

照射量に依らずに静電容量は一定となっている。



まとめ



ATLAS12Mに対して陽子70MeV・ 10^{16} 1MeV n_{eq}/cm^2 までの放射線耐性を評価した。

- 暗電流、マイクロ放電
- 全空乏化電圧
- PTP
- **バイアス抵抗**
 - 放射線照射後も要求される規格である $1.5 \pm 0.5 \text{M}\Omega$ の範囲内であった
- **ストリップ間抵抗**
 - 放射線照射後も $10 \times R_{bias}$ 以上の要求を満たしていた
- **ストリップ間静電容量**
 - 照射量に依らず一定の静電容量となっていた

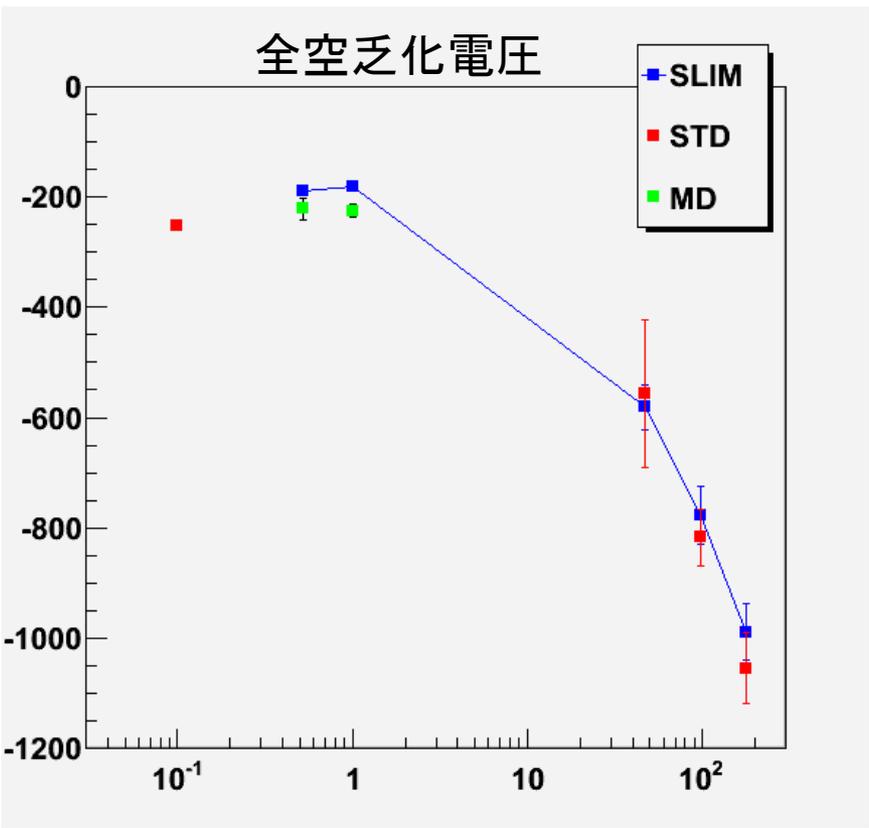
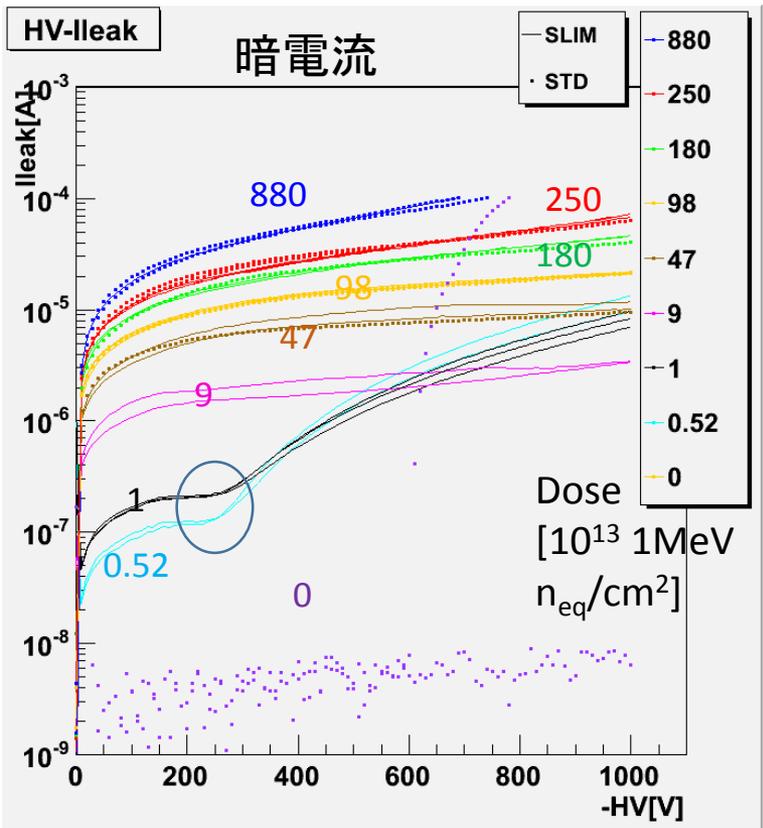
以上の測定項目においてすべてHL-LHCで予想される放射線量に対して要求を満たすことができるといった。





暗電流、全空乏化電圧

- 低い照射量ではマイクロ放電が見られた。
- 要求である $1\text{mA}/\text{cm}^2$ を満たしている(-600V)
- 運転電圧500Vに対し、低照射量では全空乏化できるが高照射量では部分空乏化での運転が必要となる



パンチスルー構造

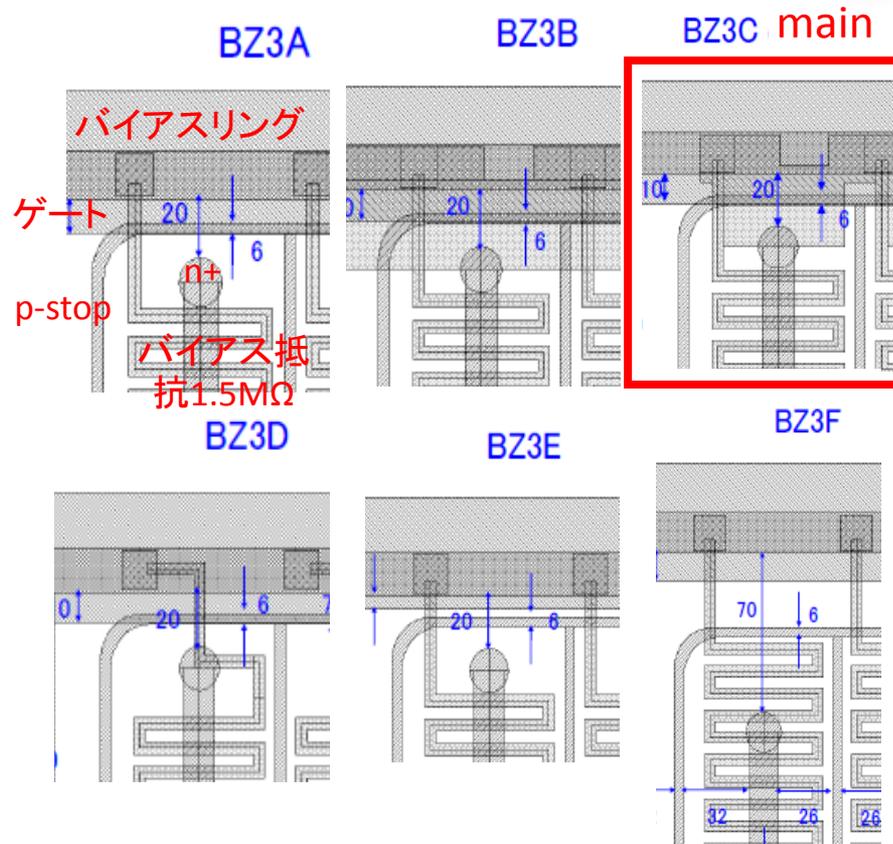
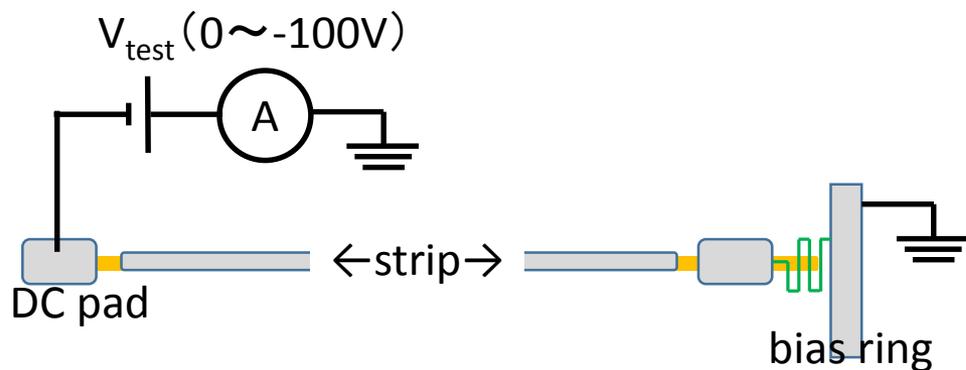


- 構造によるパンチスルー性能の放射線耐性

- PTP:酸化膜の耐圧である100V以下でPTPが機能するかを測定

6種類の構造に対してPTP電圧の測定を行った。

ストリップの最遠方にチャージが入った時を考慮し、バイアス抵抗と反対側のDCパッドから電圧を引印加した。

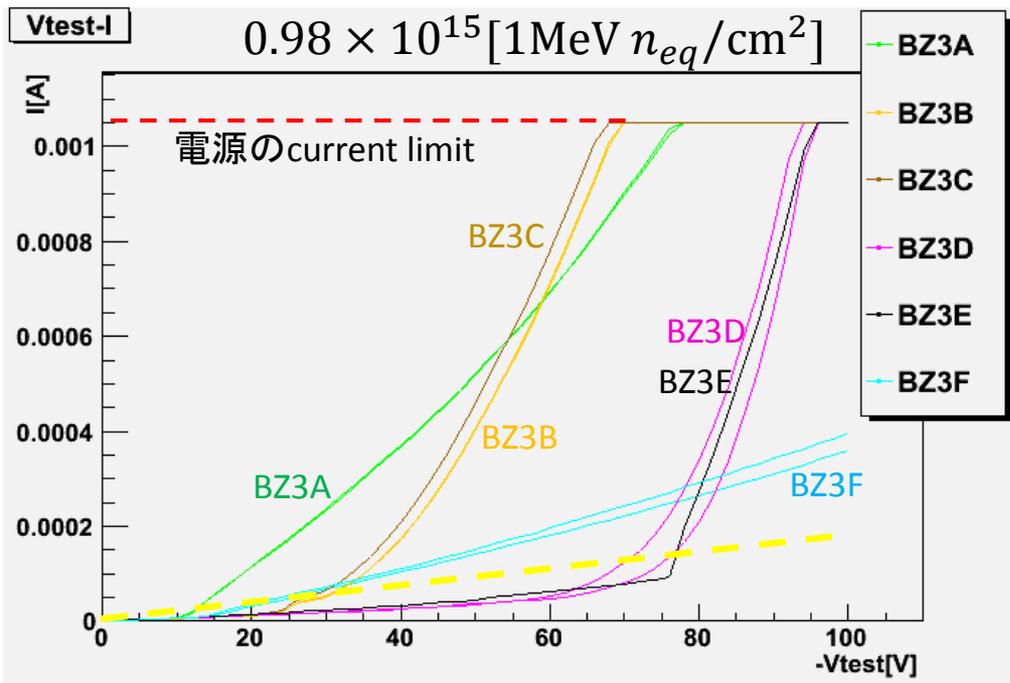
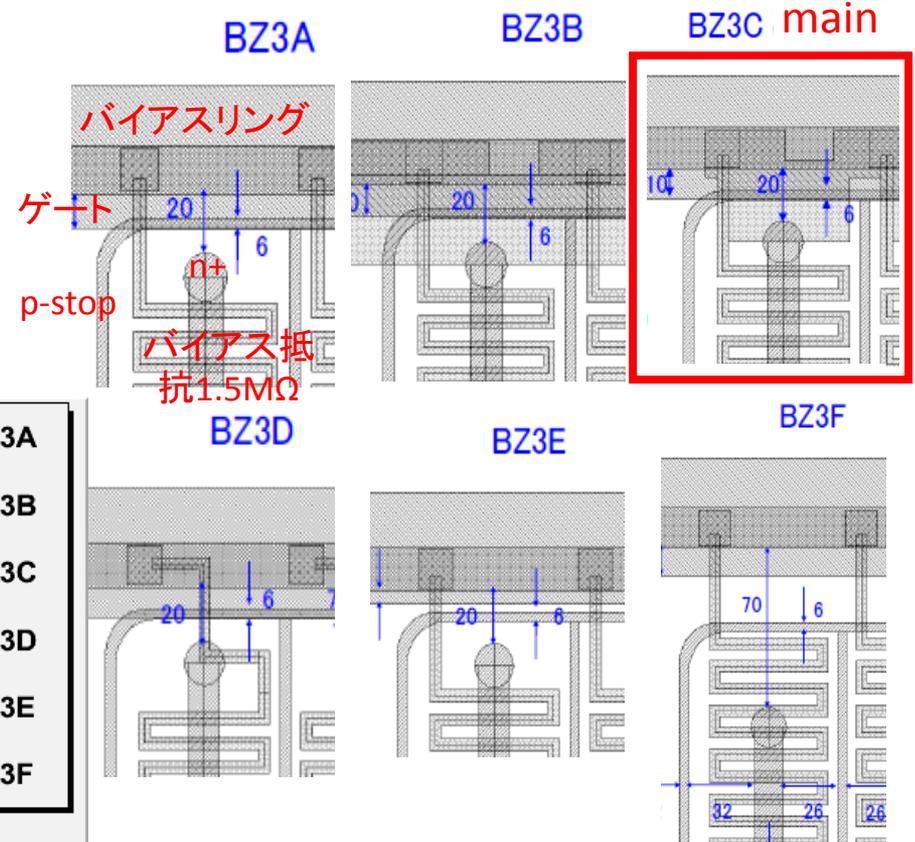


BZ3A～Eまではインプラント電極とバイアスリングの距離は20 μ m、BZ3Fは70 μ m
 バイアス抵抗1.5M Ω
 ストリップ抵抗20k Ω /cm、ストリップ長約8.1mm



Punch Through Protection (PTP)

- 構造によりI-Vの傾きに違いが見られた。
- 実効的な抵抗がバイアス抵抗(1.5MΩ)の1/2と同じになる電圧をパンチスルー電圧とした。(黄色の点線)

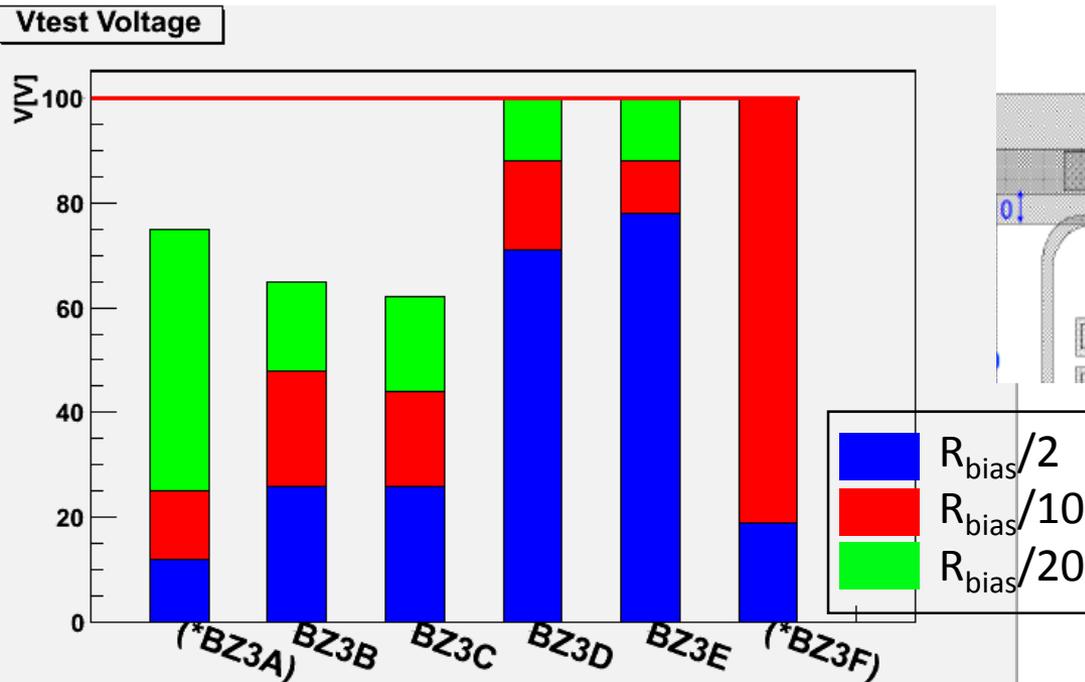
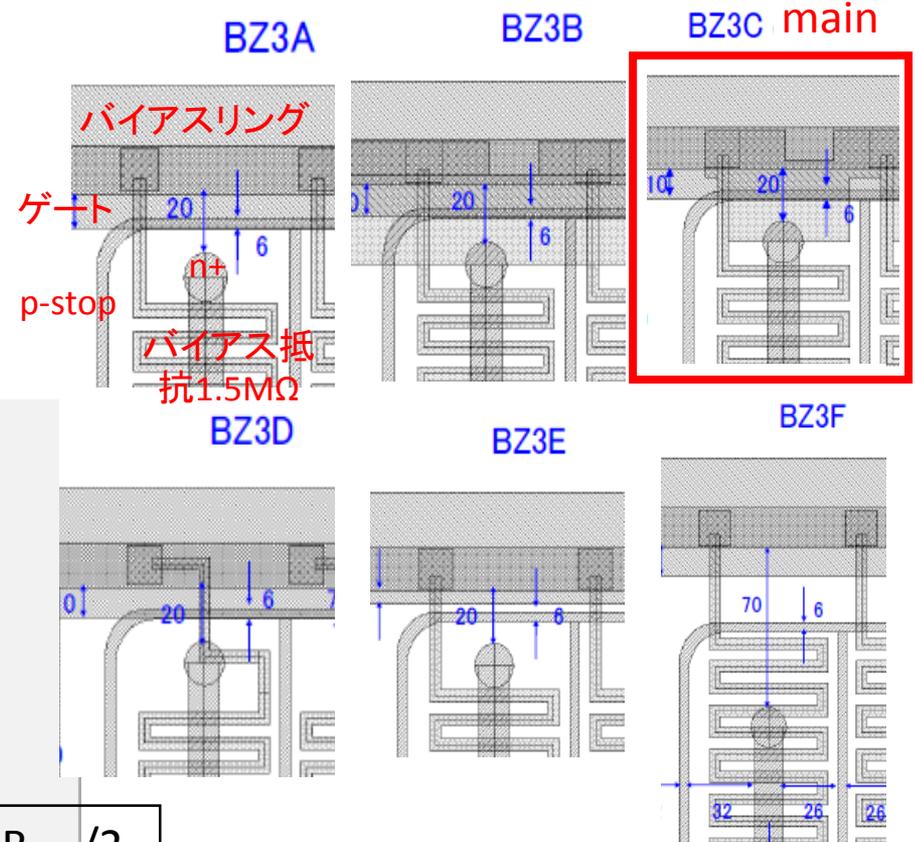




Punch Through Protection (PTP)

• 構造による違い

全ての構造において100V(酸化膜の耐圧)
以下でPTPが機能している(青色)



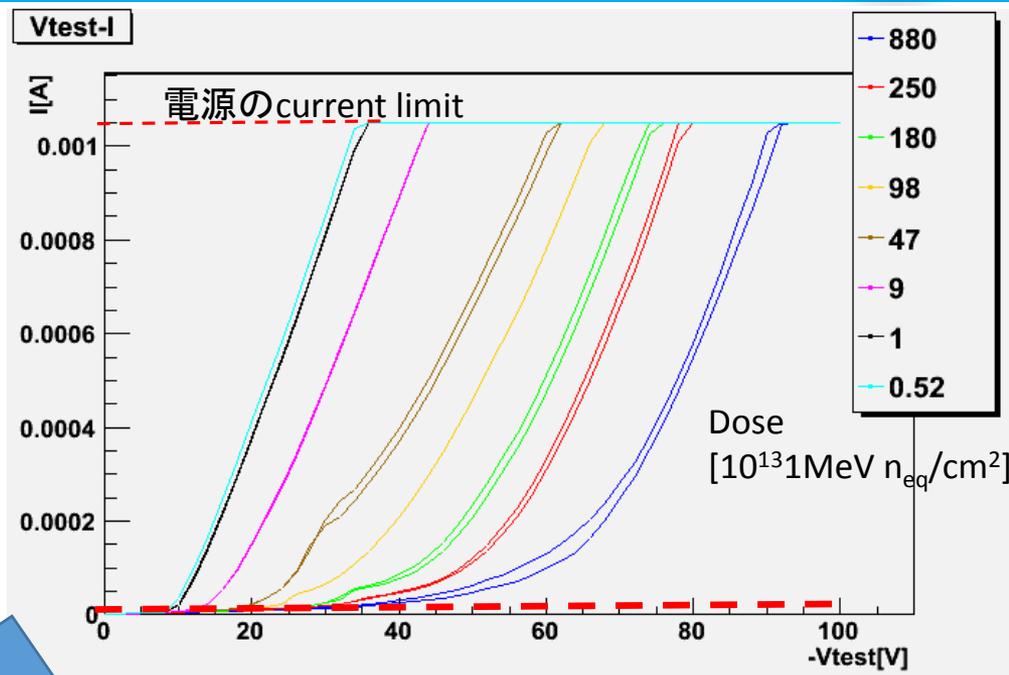
* :他の構造のサンプルに比べ、
IVでの傾きが小さい

Punch Through Protection (PTP)

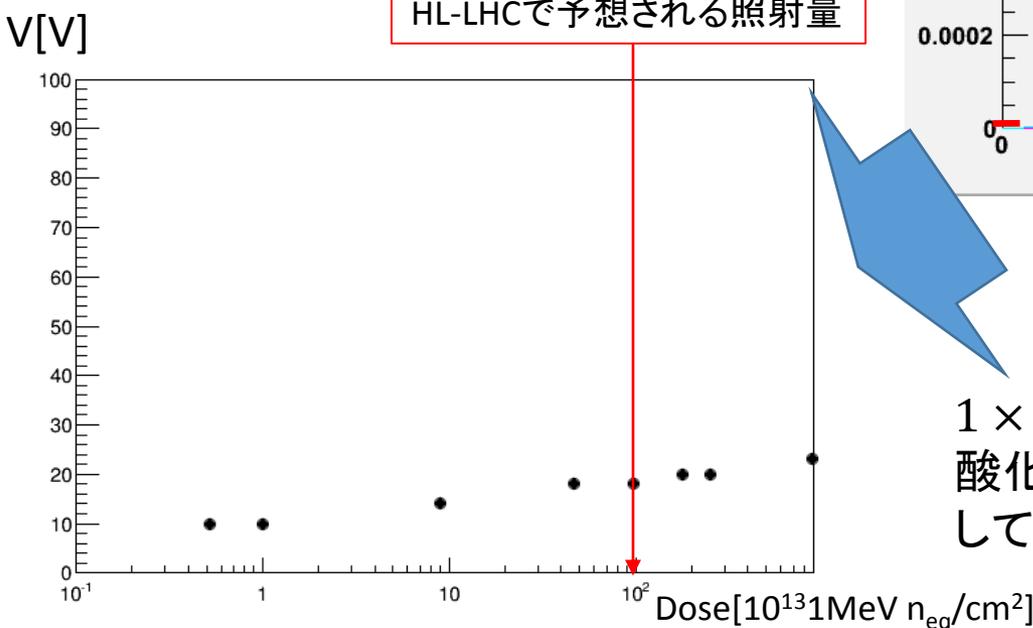


放射線への耐性

放射線照射量の増加にともないパンチスルーの起こる電圧の上昇がみられる。しかし、ゲートの効果により、切れの良さは照射量により劣化しない。



HL-LHCで予想される照射量



1×10^{16} 1MeV n_{eq}/cm^2 までの照射量は全て酸化膜の耐圧である100VまでにPTPが機能している