

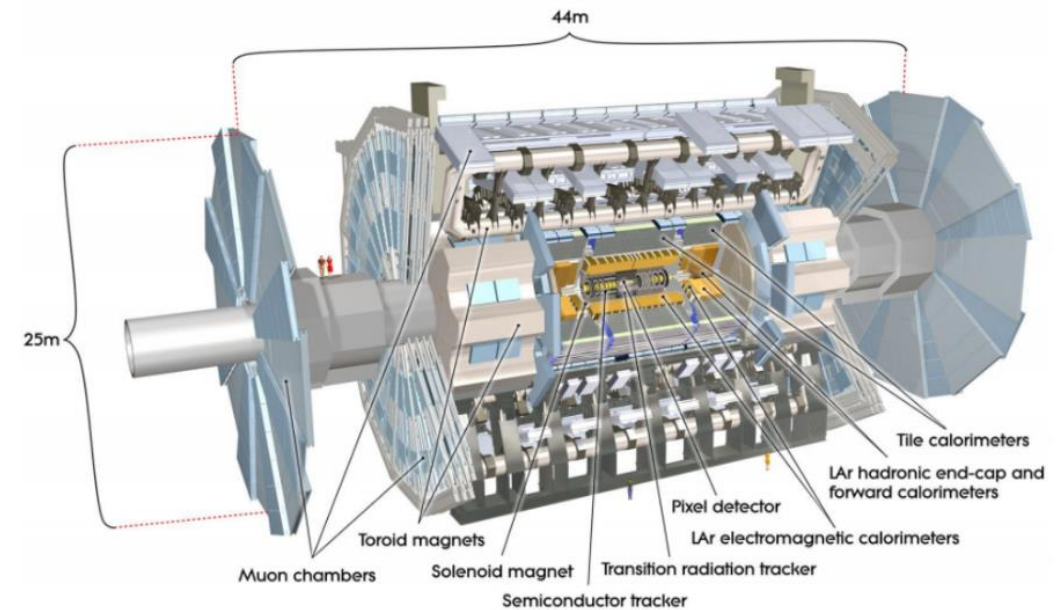
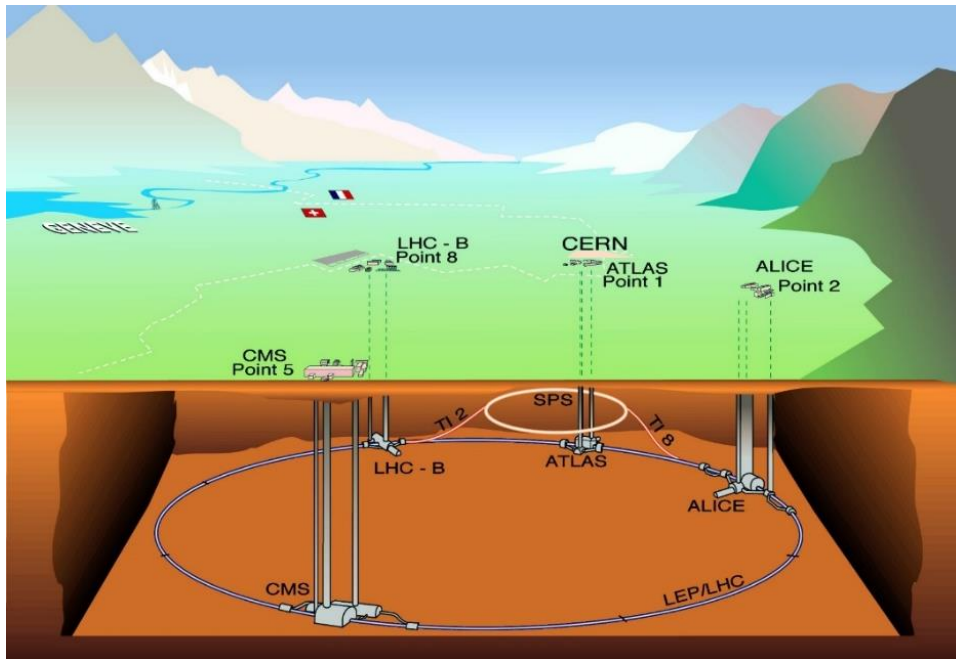
HL-LHC ATLAS 実験用シリコン ストリップセンサーの試験量産中の 品質保証に関する測定

筑波大学 理工学群物理学類 4年

石井達也

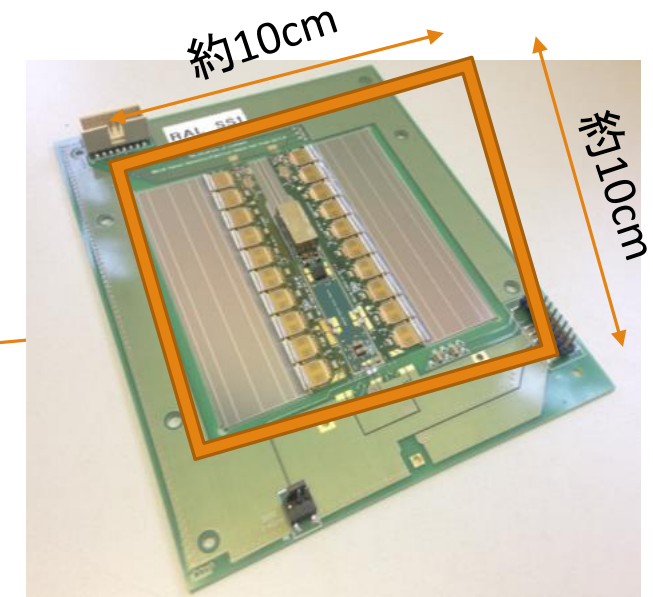
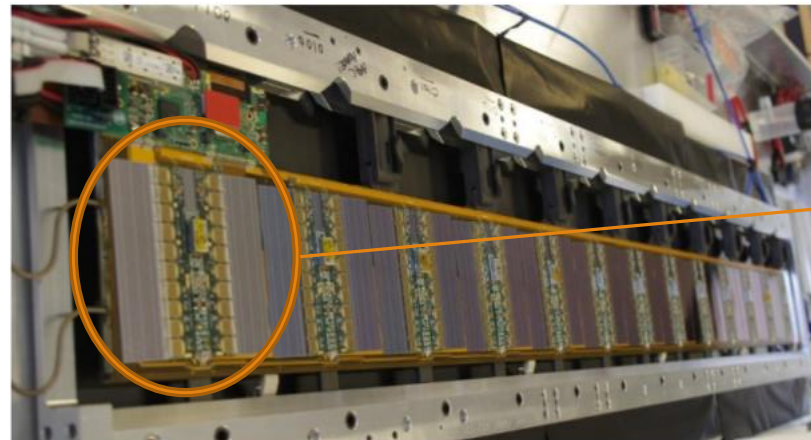
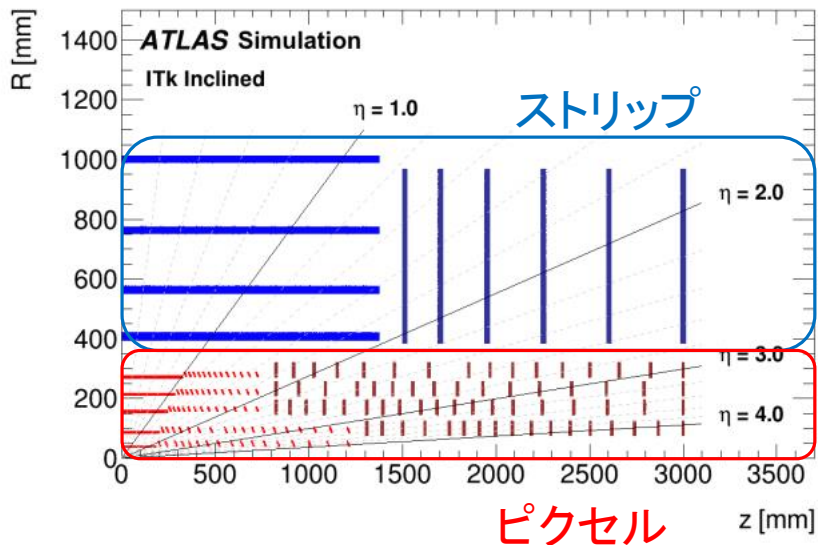
LHC-ATLAS実験

- ✓ LHCは、スイスジュネーブ近郊にあるCERNの大型衝突加速器
- ✓ ATLAS検出器は、LHCに設置されている円筒型の検出器
- ✓ 一番内側に内部飛跡検出器があります
- ✓ 2027年にLHCから高輝度LHC(HL-LHC)にアップグレードをする際に、内部飛跡検出器はITk(Inner Tracker)に置き換えられる



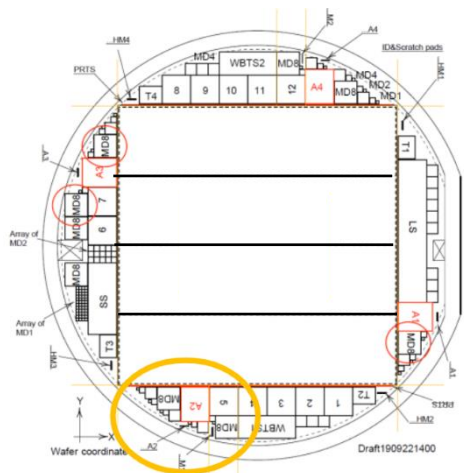
ITk ストリップ検出器

- ✓ ITkストリップ検出器は、約2万枚のシリコンセンサーからなる
- ✓ ストリップ検出器はHL-LHC10年で放射線を最大 1.2×10^{15} 1-MeV n_{eq}/cm^2 浴びる
- ✓ 量産 {
 - 品質管理 (全センサーの傷やたわみを測定)
 - 品質保証 (約40枚から1枚サンプリング、放射線をあて要求を満たすかチェック)→要求を満たさないサンプルは再照射等を検討する

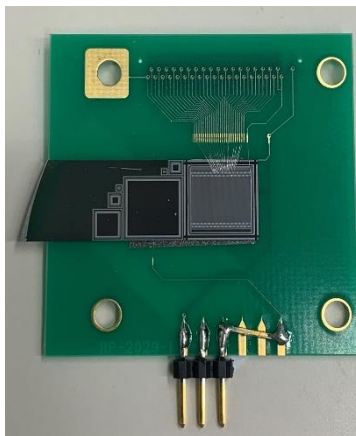


センサーの品質保証(QA)

- ✓放射線を浴びることで、暗電流が増え、電荷収集量が減り、全空乏化電圧が高くなると予想
- ✓測定する項目は、全7項目
- ✓陽子を当てることによって、MiniセンサーとMD8でバルク部損傷を、テスト装置で表面損傷を確認する
- ✓本量産では、6ヶ月に24枚のペースで約3年間品質保証を行う



miniセンサー



電荷収集量

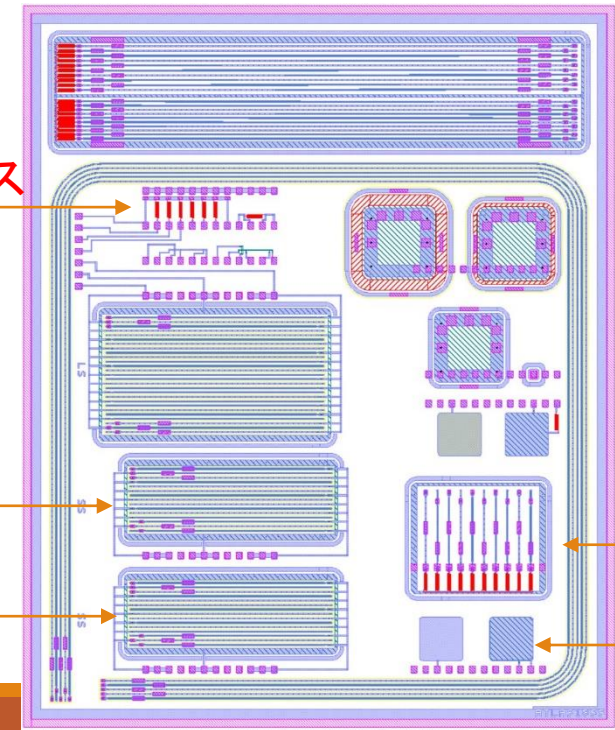
MD8+右の
テスト構造

テストチップ



バイアス
抵抗

ストリップ
間容量
ストリップ
間抵抗



PTP作動
電圧

接合容量
漏れ電流

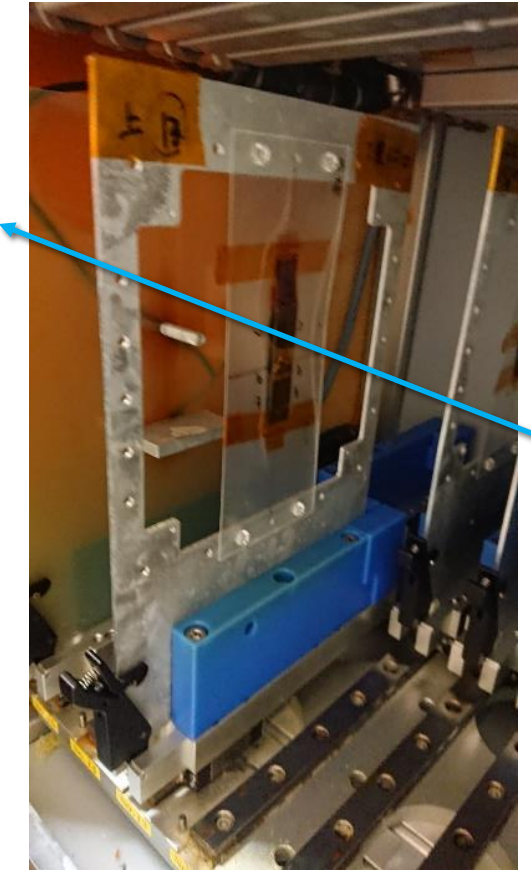
陽子照射

- ✓ 東北大学のサイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(CYRIC)にて、最大 $1.6 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ の陽子を照射した
- ✓ CYRICでは、70MeVの陽子を約1~2時間照射した
- ✓ 試験量産では、すべてのセンサーの5%を作り、センサーの特性を調べ、品質保証する

途中の経過を見る

試験量産サンプル数

	$5.1 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$	$1.6 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$
テストチップ	11 枚	9 枚
Miniセンサー		23 枚



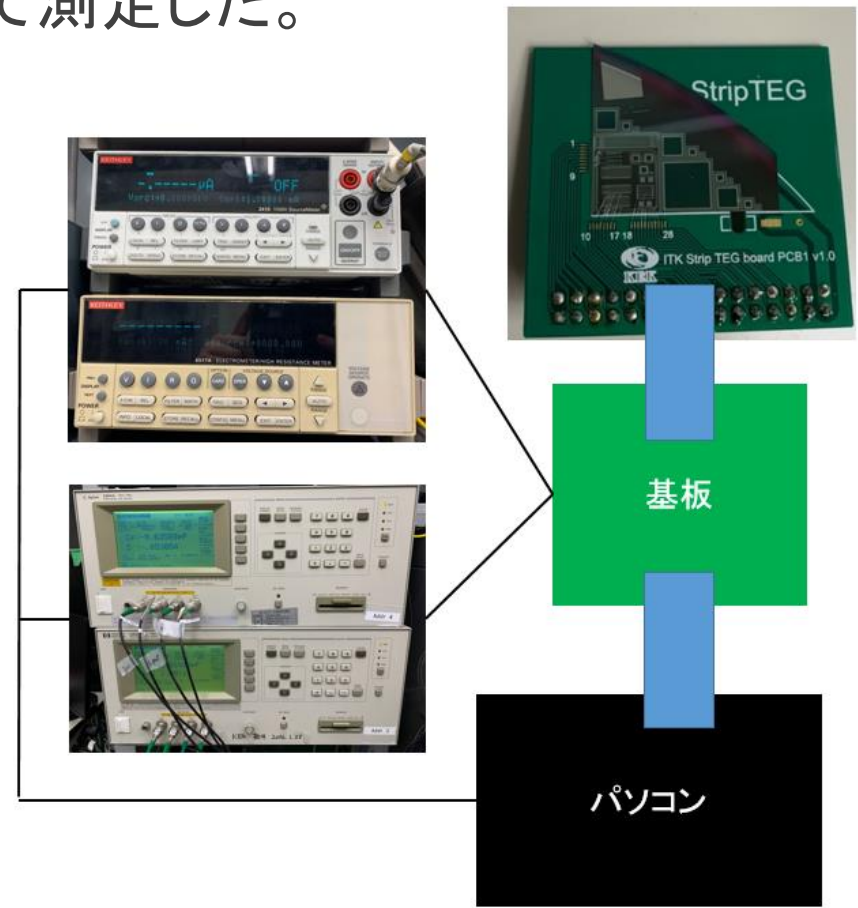
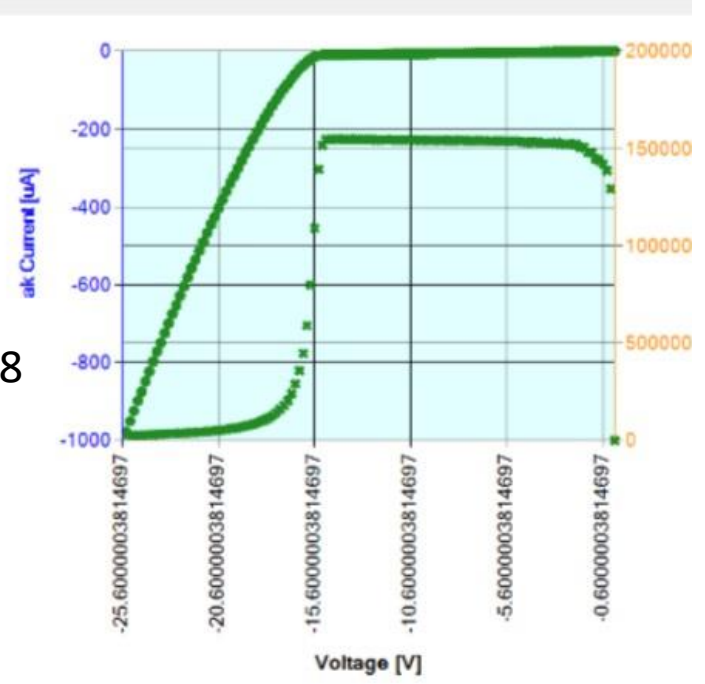
陽子

品質保証の測定システム

- ✓リレースイッチを用いることで、電源やLCRメーターの入出力を自動制御可能なシステムを用いて行った。
- ✓測定する際は、恒温槽にいれて温度、湿度を保ち、遮光して測定した。

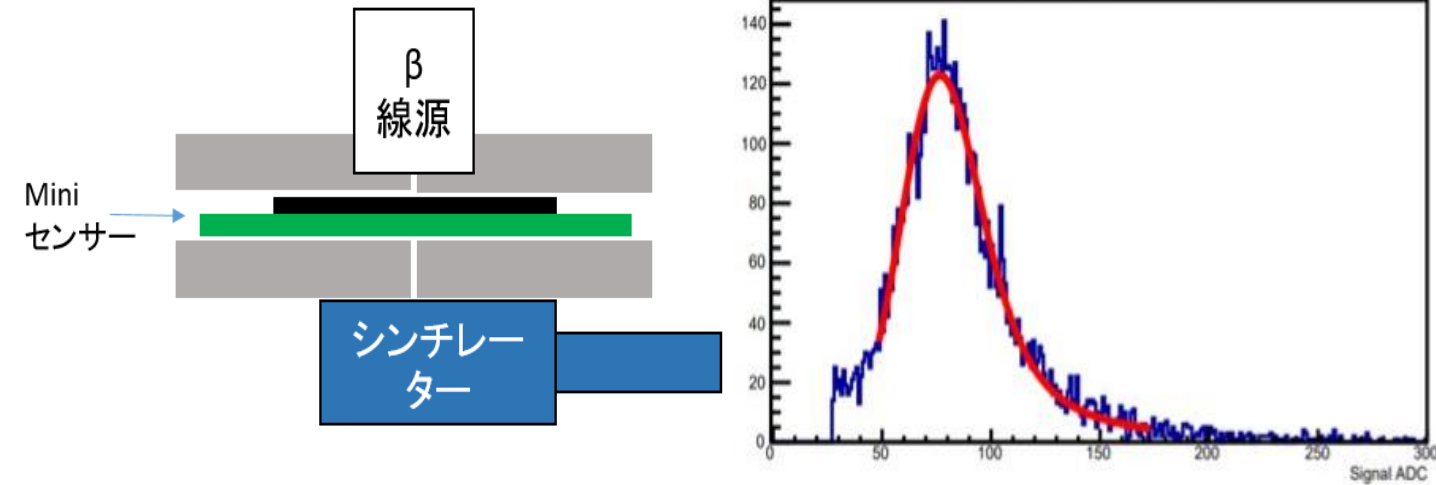
ソフトウェア制御画面のスクリーンショット。各機能ボタンにラベルが付けられています。

- ストリップ間容量
- バイアス抵抗
- 接合容量
- PTP作動電圧
- MD8
- STOP

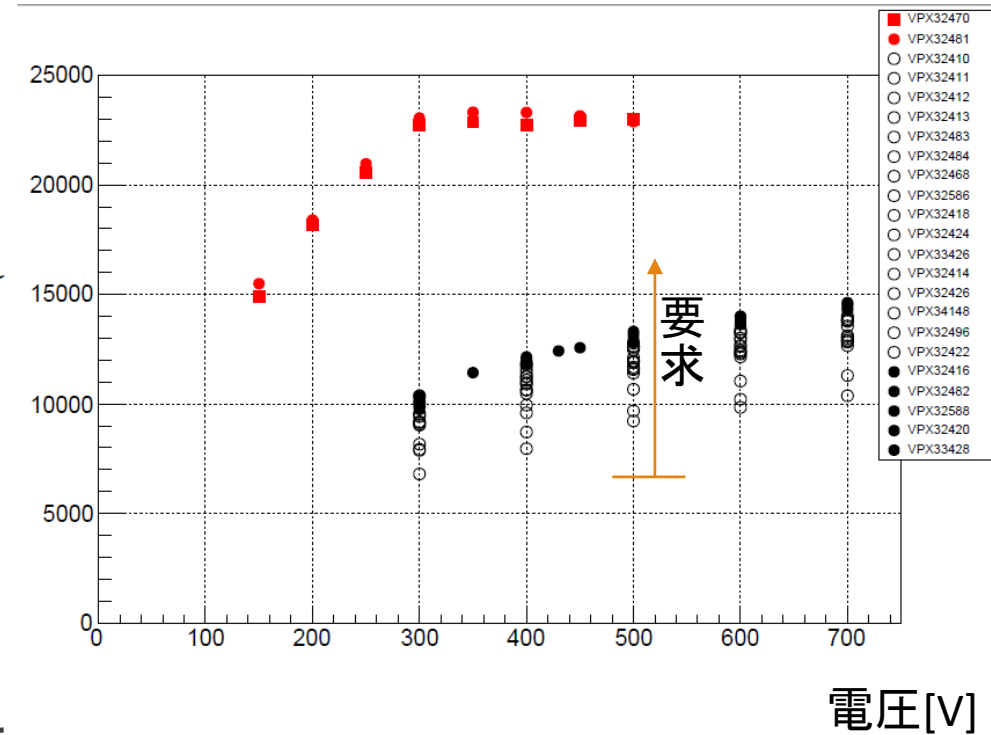


電荷収集量

- ✓ β 線を入射した際の電荷収集量を測定する
- ✓ ADC分布を、Gauss分布とLandau分布をたたみこんだ関数でフィット
- ✓ 未照射サンプルの完全空乏化後のLandauピークを、23000eとする
- ✓ 照射をすると、電荷収集量は減ると考えられる



電子数

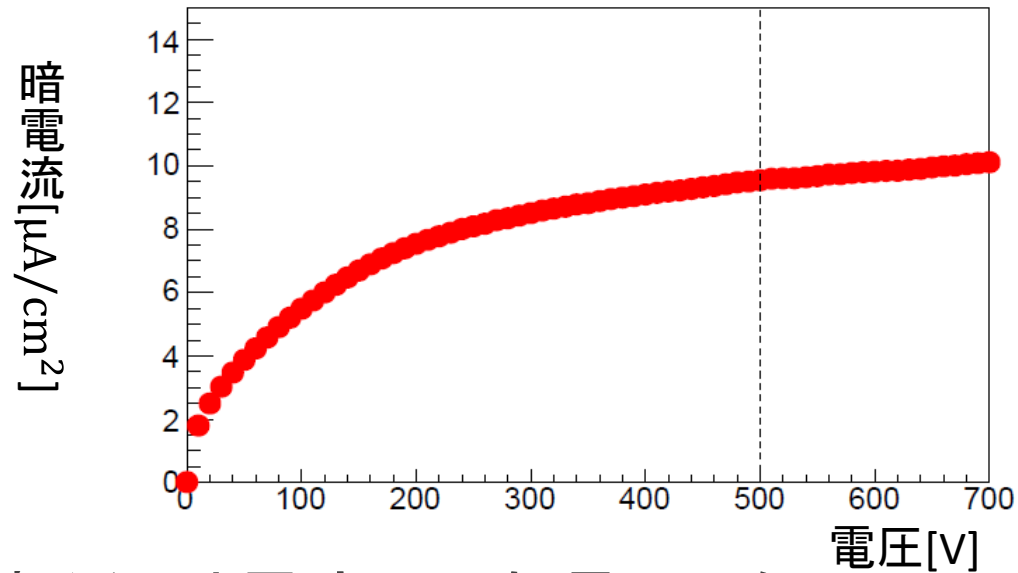


➤ 予想通り電荷収集量は減ったが、要求をすべて満たす

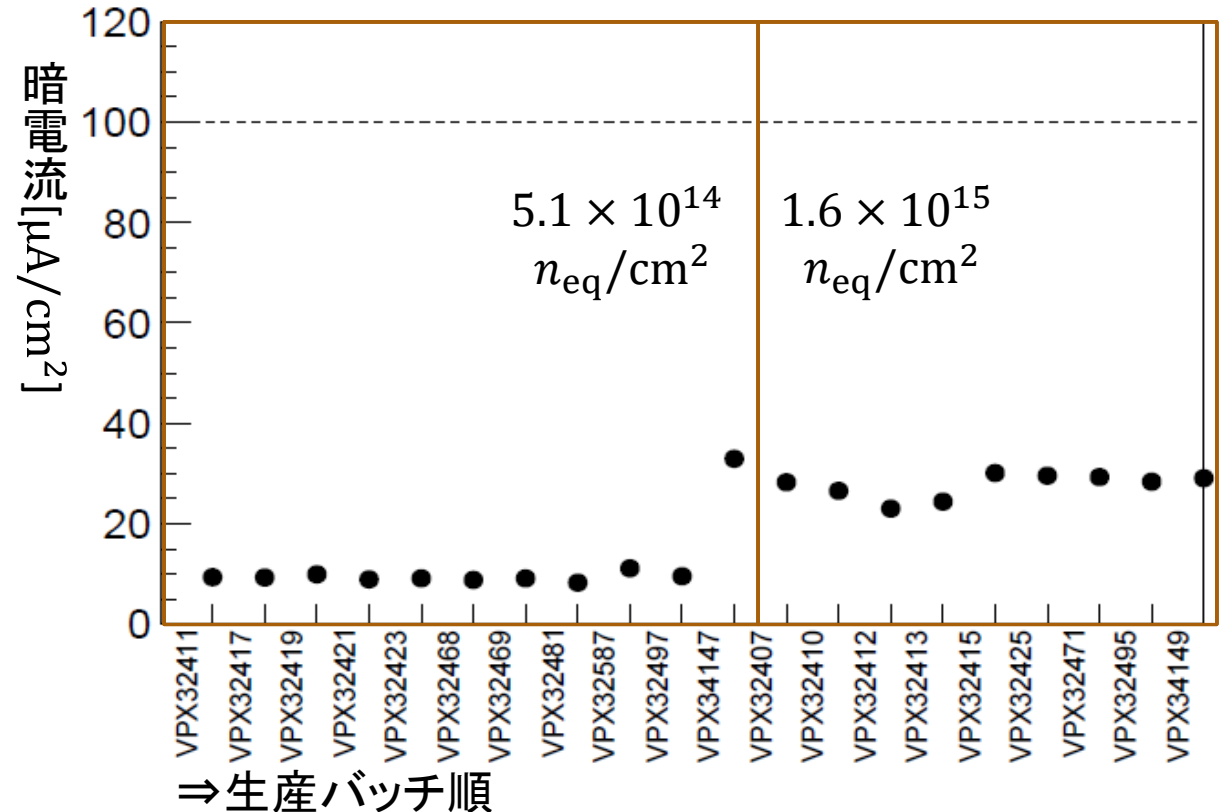
MD8のIV特性

- ✓ バルク部のIV特性として500Vの時の暗電流を測定 (-20°Cで測定)
- ✓ 未照射サンプルでは、6 nA/cm²

- ✓ 単位面積当たりの暗電流を測定



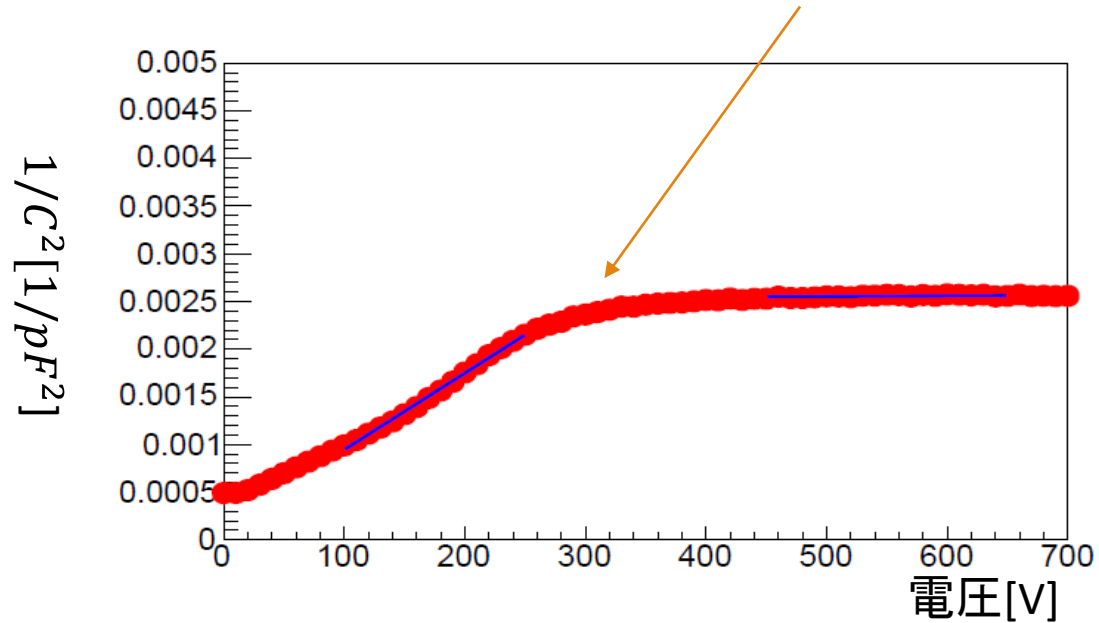
- 予想通り暗電流は照射量に比例して増加したが、要求はすべて満たす



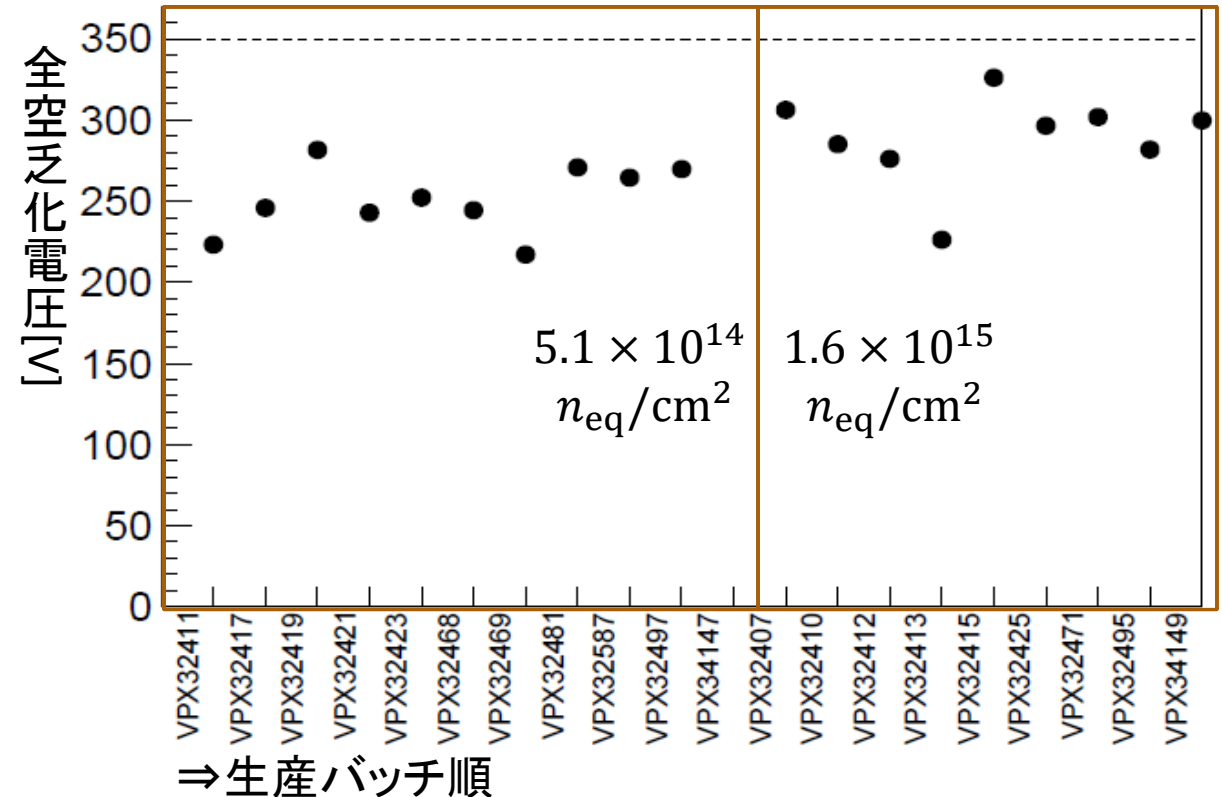
要求

MD8のCV特性

- ✓ バルク部のCV特性として全空乏化電圧を測定
 - ✓ 信号を読み取るには、ある程度の空乏化が必要
 - ✓ 未照射サンプルでは、250~300V
- ✓ $1/C^2$ のプラトーの開始する電圧を全空乏化電圧とした

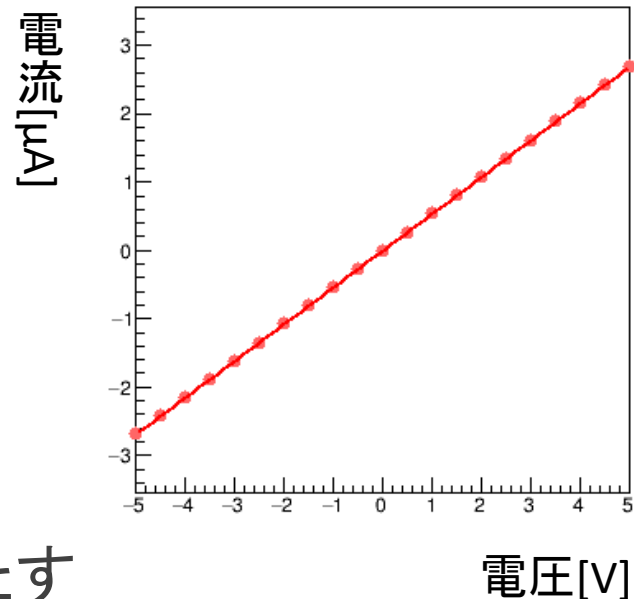
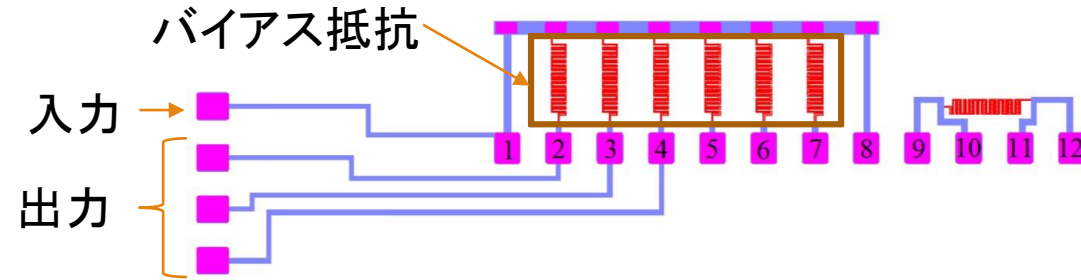


- 全空乏化電圧は変化がなく、
要求はすべて満たす

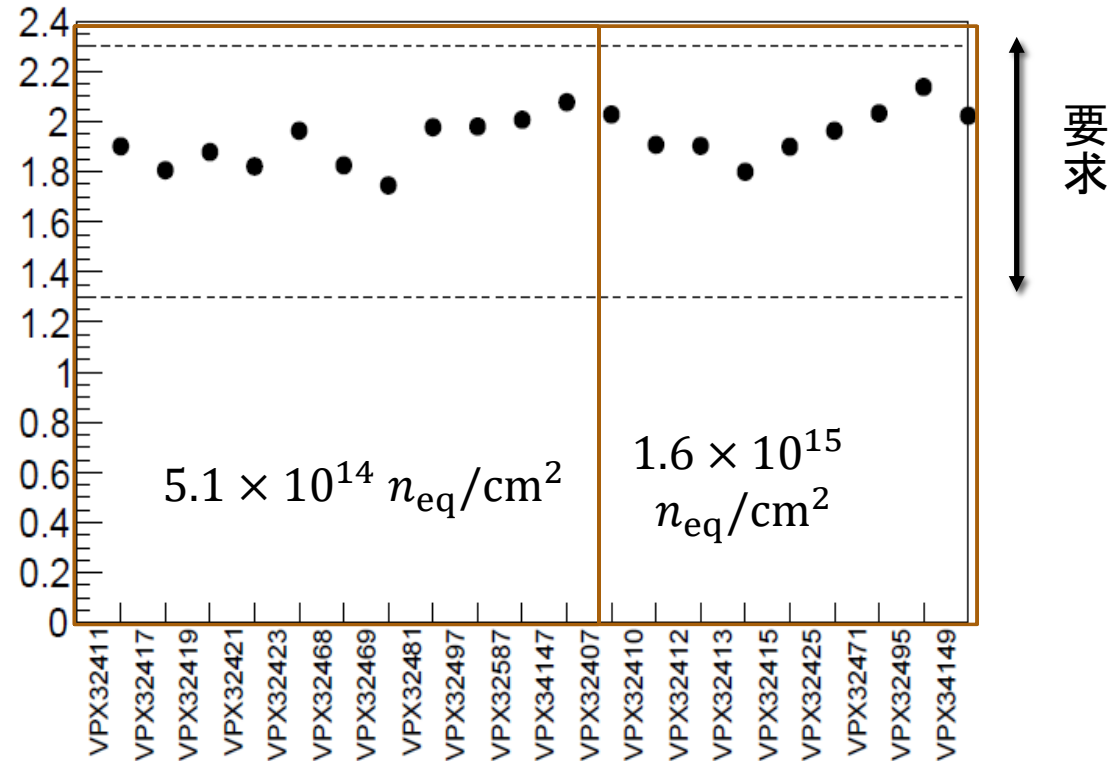


バイアス抵抗

- ✓ ポリシリコン抵抗を測定する(-20°Cで測定)
 - ✓ 未照射サンプルでは、1.84MΩ(2月に測定)
- ✓ $10^{15} n_{eq}/cm^2$ 程度の放射線では変化しないと予想
- ✓ IVプロットの傾きの逆数から、抵抗値を計算する
- ✓ 3点測定し、平均値をプロットした



バイアス抵抗値 [MΩ]



➤ 要求をすべて満たす

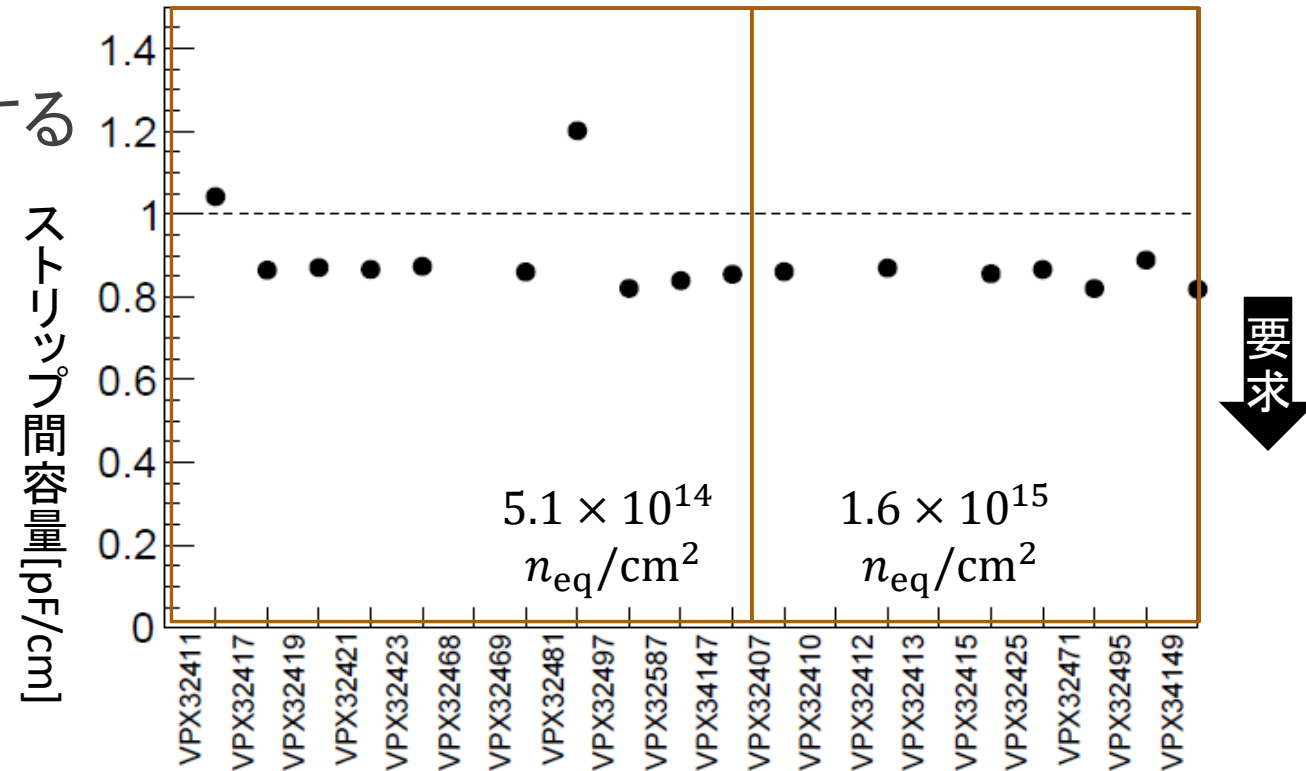
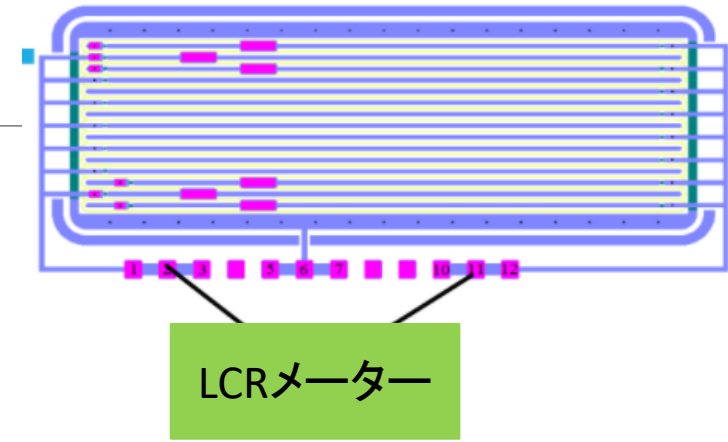
ストリップ間容量

- ✓ 裏面から-500Vのバイアス電圧をかけて測定
 - ✓ 未照射サンプルでは、0.78pF/cm(10月に測定)

- ✓ 単位長さ当たりの静電容量を測定

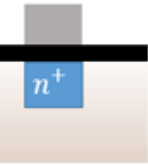
- ✓ 照射により、ストリップ間容量は少し増加する

- 要求を超えてしまうサンプルが2つ
 - 再照射実験を行う
- 他のサンプルは要求を満たす



接合容量及び漏れ電流

電極

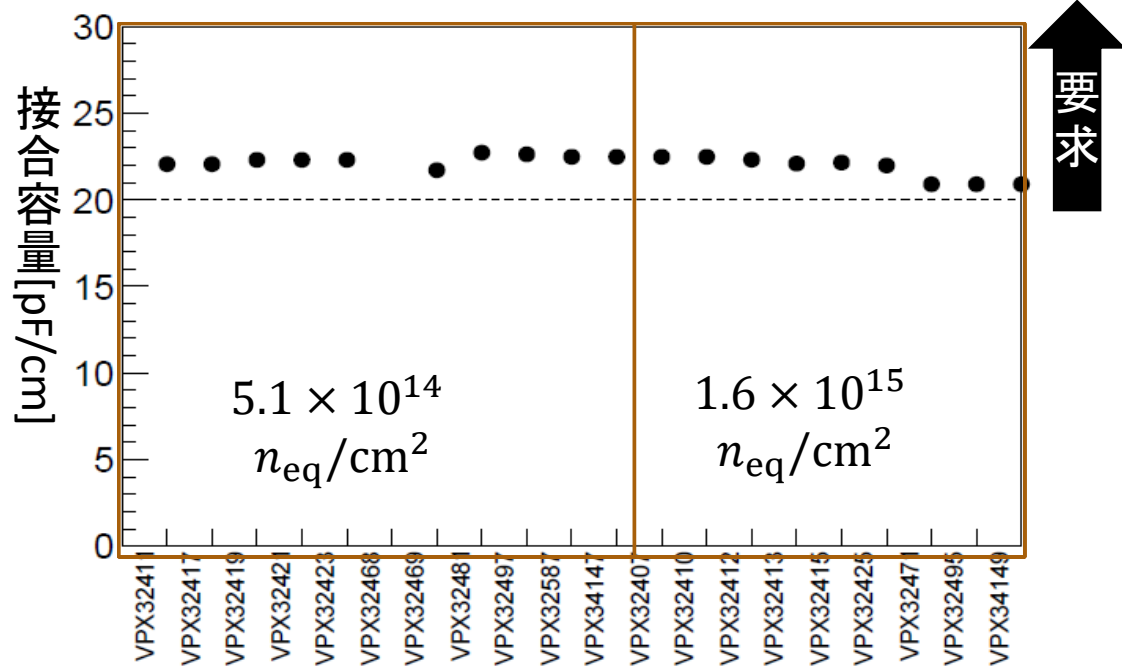


酸化膜

要求

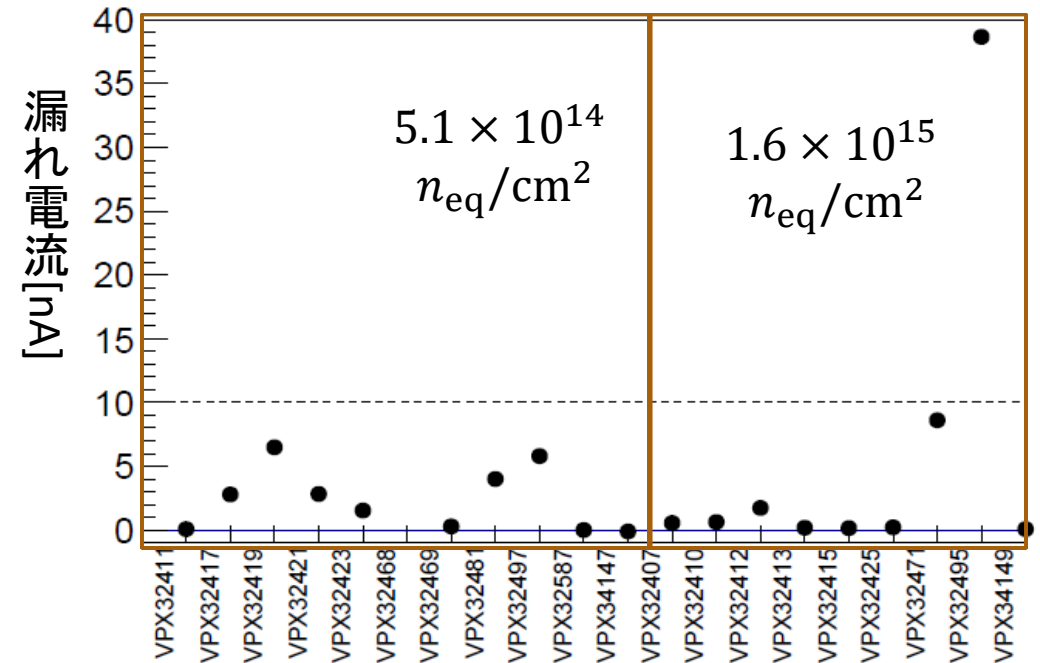
✓ 接合容量を測定する

✓ 未照射サンプルでは、23.2 pF/cm(10月に測定)



✓ 漏れ電流(100Vの時)を測定する

✓ 未照射サンプルでは、0.3nA(10月に測定)



➤ 要求をすべて満たす

➤ ブレイクダウンしたサンプルが1つ

→ 原因を追究する

➤ 他のサンプルは要求を満たす

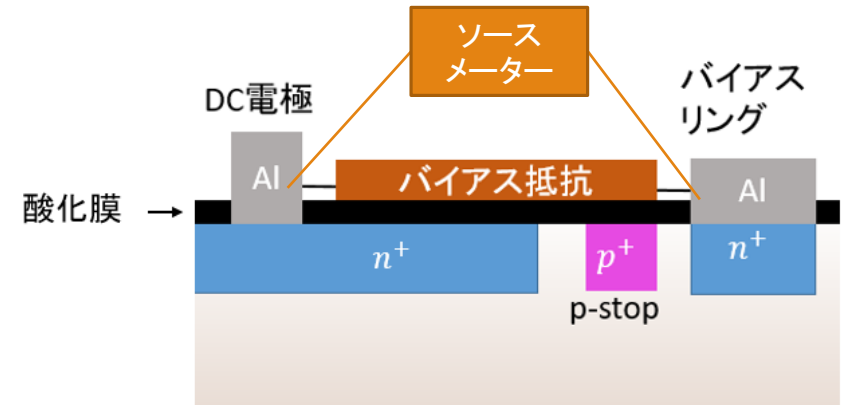
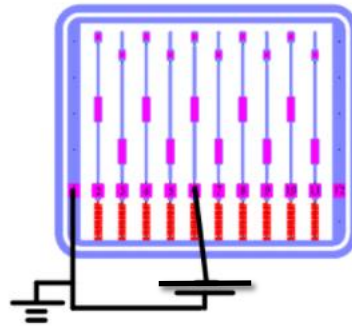
PTP作動電圧

✓ PTPとは、ストリップに急激に大電流が流れた時、バイアス抵抗を介さずにバイアスリングに電流を流す保護機構のことである。

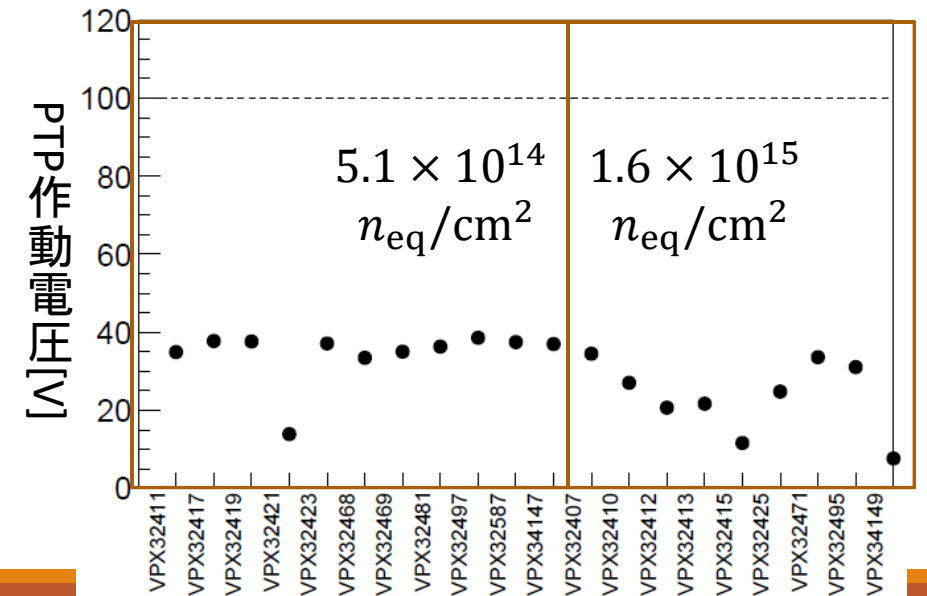
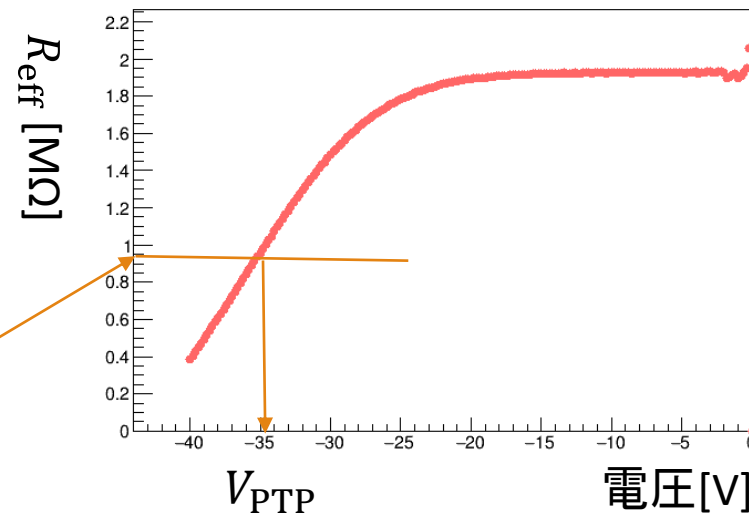
✓ 未照射サンプルでは、15.8V(10月に測定)

$$R_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{test}}}{I_{\text{test}}}$$

$$V_{\text{PTP}} = V(R_{\text{eff}} = R_{\text{bias}}/2)$$



➤ 概ね100Vを下回る $R_{\text{bias}}/2$



試験量産中の品質保証まとめ

✓測定時間

- 問題がないサンプルは、テストチップが3～4時間で、miniセンサーが2時間

✓本量産に向けた改善点

- 本量産ではセンサーへの印加電圧のインターロック
- ワイヤーボンド品質の目視行程の追加
→ワイヤーの問題で再測定を行う場合、1日かかることもある
- センサー保管時の防塵対策



まとめ

- ✓ HL-LHC計画で内部飛跡検出器はITkに入れ替えられる
 - ✓ ストリップ検出器は、センサー量産時に、品質管理、品質保証の2つの検査が行われる

- ✓ 試験量産されたセンサーの品質保証を行った。
 - ✓ 90%以上のセンサーが、品質基準を満たすことがわかった。
 - ✓ 満たしていないサンプルについても、再照射を検討し受け入れるかどうか判断する

- ✓ これらを踏まえ、2021年7月からの本量産での品質保証に臨む
 - ✓ 試験量産中の知見をもとに測定システムを改良し、よりスムーズな測定を目指す

Backup

照射量の決定

✓ $5.1 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$

- ITkで予想される最大TIDは660kGyである。
- 27MeVの陽子を $1.6 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ 照射すると、TIDが2MGyと、過剰な損傷を与えていることになる
- TIDによる損傷の影響を確認するため、660kGyに相当する分の陽子を照射している
- CYRICの70MeV陽子では、27MeV陽子よりTIDが小さくなるため、660kGyに相当しない

✓ $1.6 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$

- ITkで予想される最大NIEL