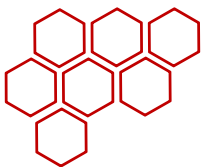
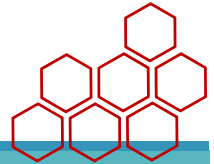


HL-LHC ATLAS実験用 シリコンストリップセンサーの 放射線耐性評価

CiRfSE workshop
数理物質科学研究科 素粒子実験
岩渕周平



OutLine

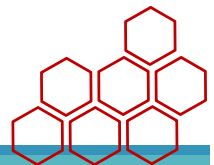
HL-LHCでのATLAS検出器

- HL-LHCでのSCTで用いるp型のセンサー

p型センサーの放射線損傷とその評価

- 表面損傷
- バルク部損傷

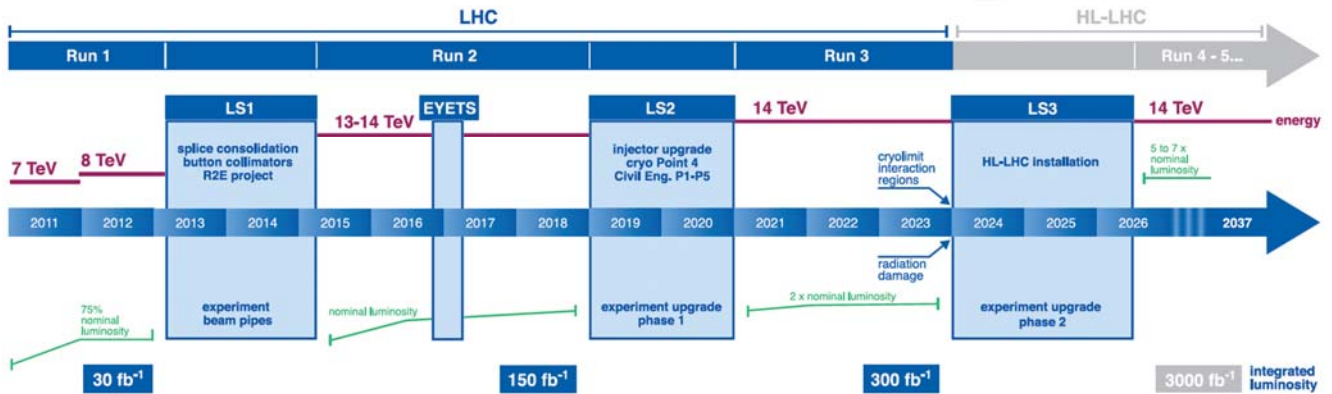
p型センサーの長期アニーリング特性





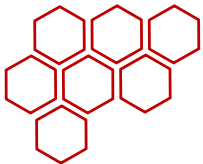
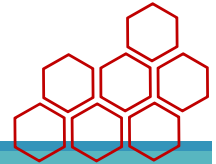
ATLAS検出器Upgrade

LHC / HL-LHC Plan



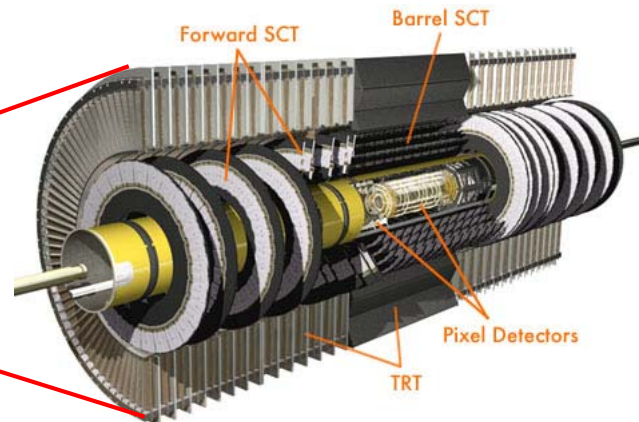
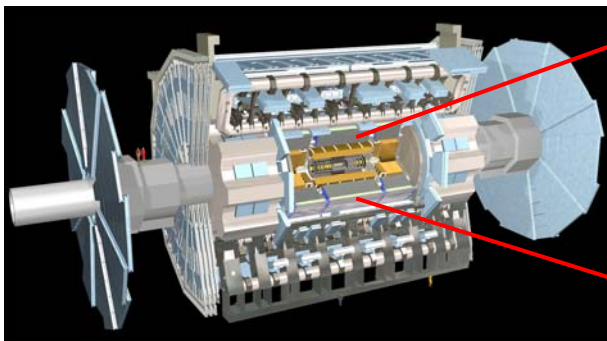
HL-LHCへのUpGradeにあたり、統計量はRun1の約100倍へ
それに伴い、シリコンセンサーの受ける放射線損傷が増大
内部飛跡検出器のSCTでの最大損傷は、

電離性 ⇒ 表面損傷 Barrel: 216kGy, EndCap: 288kGy
非電離性 (NIEL) ⇒ バルク部損傷 Barrel: 5.3×10^{14} , EndCap: 8.1×10^{14} neqcm⁻²

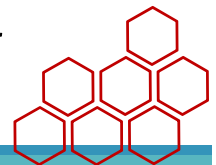


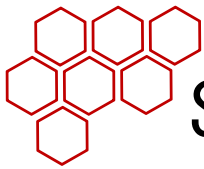
内部飛跡検出器

ATLAS検出器内の最内層 (50mm~500mm)
ビームパイプに最も近い場所にマウント

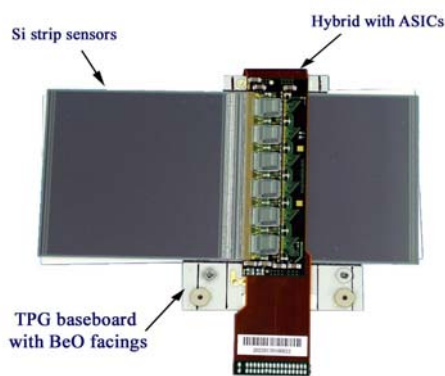


HL-LHCではセンサーの受ける放射線損傷が増加
→ 内部飛跡検出器は全てPixel, SCTからなるシリコン検出器に置き換え

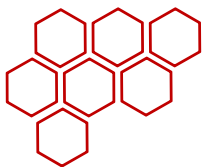
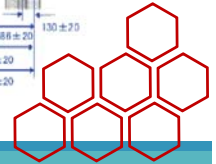
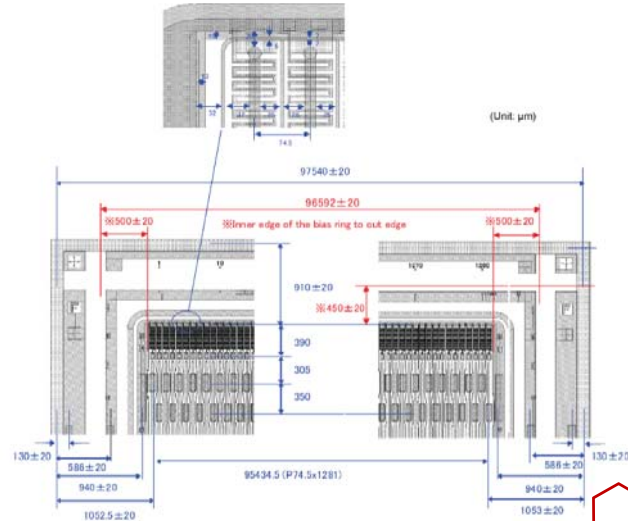




SCT (Semi Conductor-Tracker)



SCTにはストリップセンサーが用いられる。
2枚のストリップがステレオ角を成すように配置し、
二次元情報を得る



放射線損傷とその評価方法

・放射線損傷

内部飛跡検出器のSCTでの最大損傷は、

電離性 ⇒ 表面損傷 Barrel: 216kGy, EndCap: 288kGy

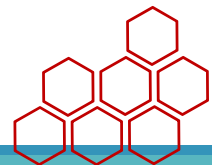
非電離性 ⇒ バルク部損傷 Barrel: 5.3E14, EndCap: 8.1E14 neqcm⁻²

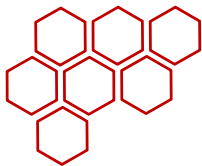
電離性の損傷を想定してγ線、非電離性を想定して陽子線を照射した。

・評価方法

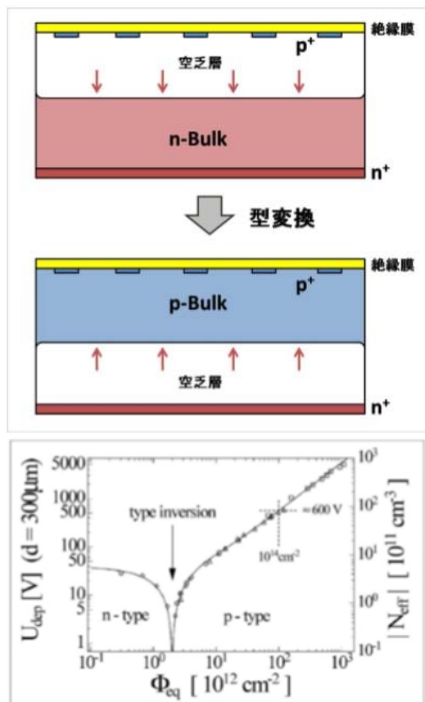
・表面測定 センサー表面にインプラントされたストリップ間の抵抗や静電容量、暗電流などを測定

・電荷収集効率測定 β線源やレーザーを用い、センサーの空乏層で生成された電荷の収集量を測定

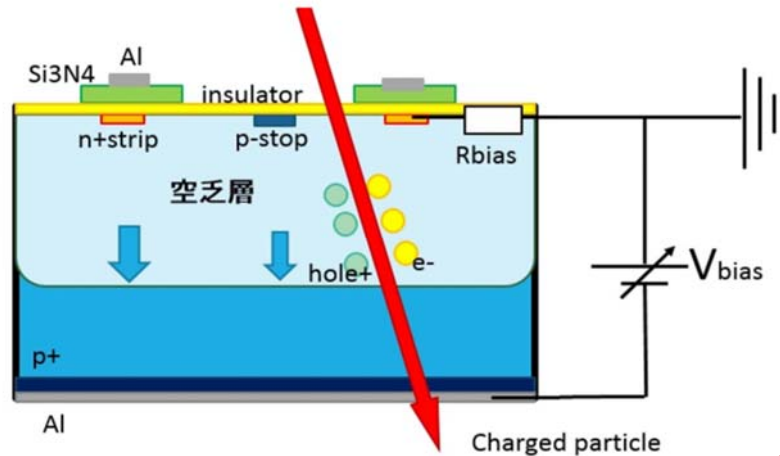




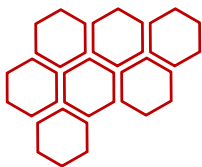
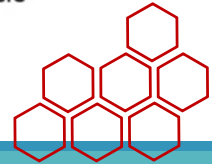
P-Bulk Sensor for ITk



- ・従来のn型:放射線により型反転を起こすと全空乏化しないと信号分離ができない
- ・p型でのセンサー:部分空乏化でも信号分離可
収集される信号が電子



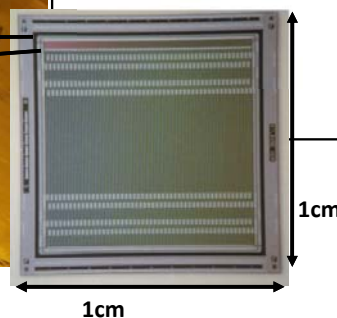
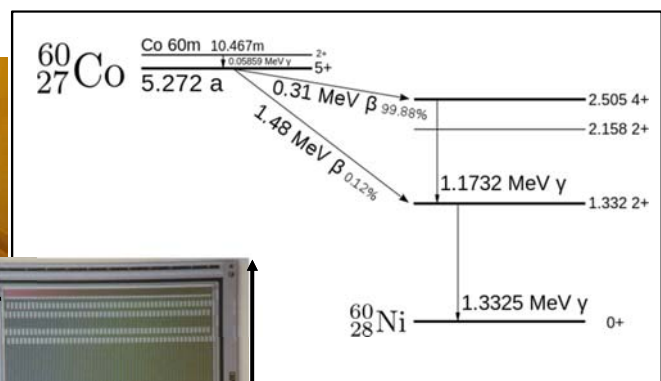
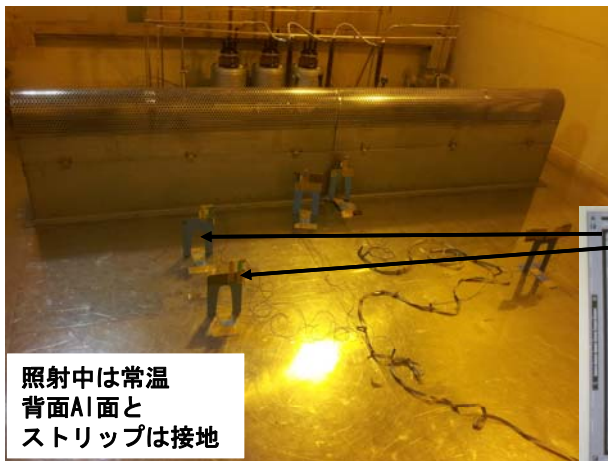
マイクロ放電の起きにくいkV耐圧設計
P-stopによる反転層の対策→高い電気的分離
高抵抗pバルクシリコン



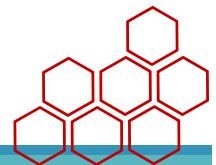
放射線耐性評価

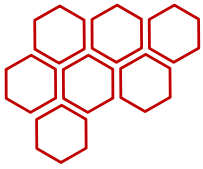
- ・高崎量子応用研究所の⁶⁰Coを用いてサンプルにγ線を照射
- ・1kGy~200kGyを照射した

▼食品照射棟の照射室



照射中は常温
背面Al面と
ストリップは接地





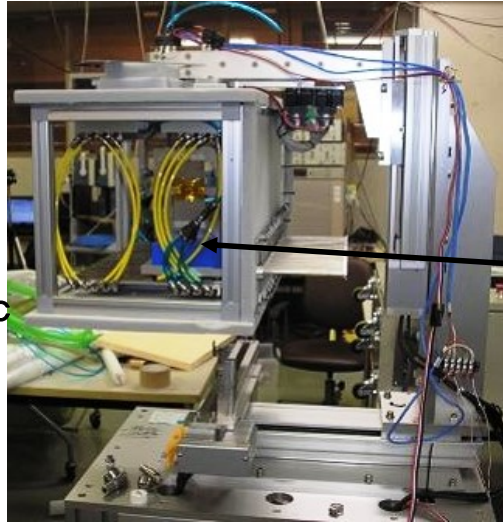
放射線耐性評価

- ・ 東北大学CYRICの70MeV陽子線ビームを用いてサンプルに陽子線を照射



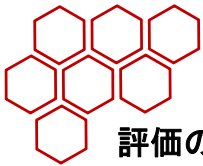
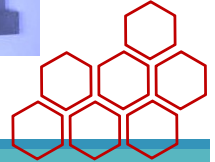
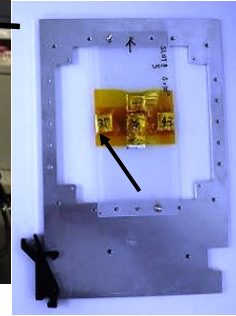
液体窒素により氷点下 $\sim -15^{\circ}\text{C}$ を保ちながら照射。
冷却しないとアニーリングが進んでしまう（後述）

照射量は
 $1.0\text{E}14 \sim 1.2\text{E}15 \text{neqcm}^{-2}$



◀測定には可動ステージを用いた。

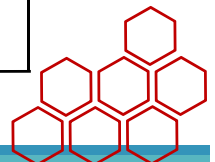
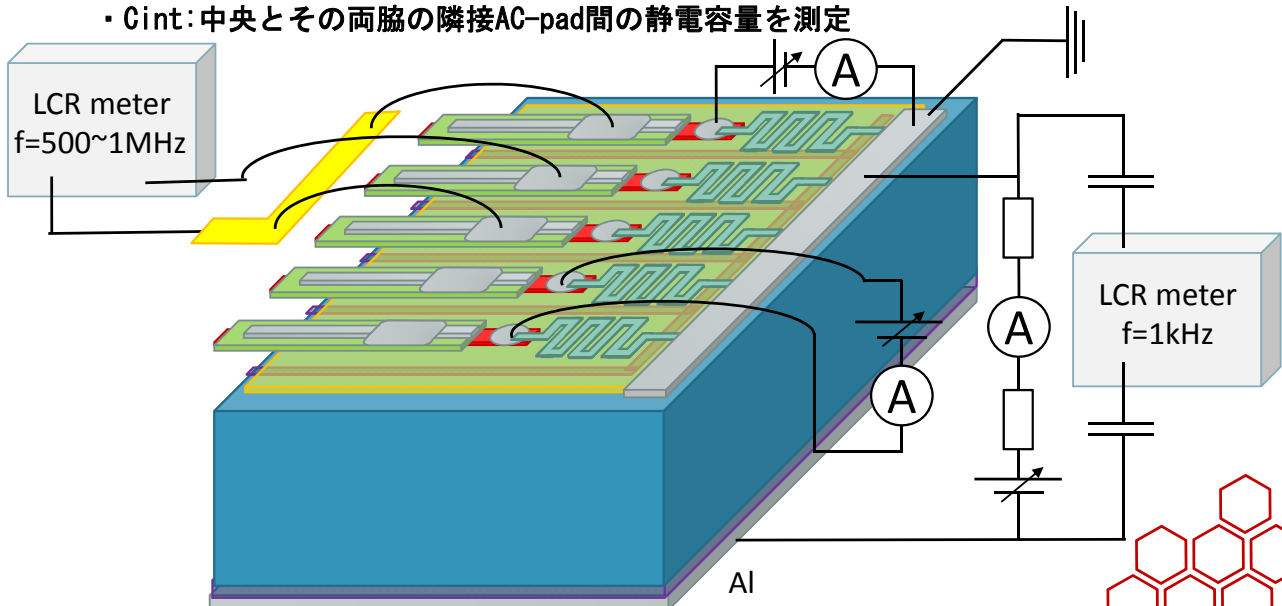
▼サンプルをマウントしたスロット

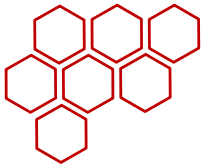


表面損傷測定

評価のため次の項目について測定する。

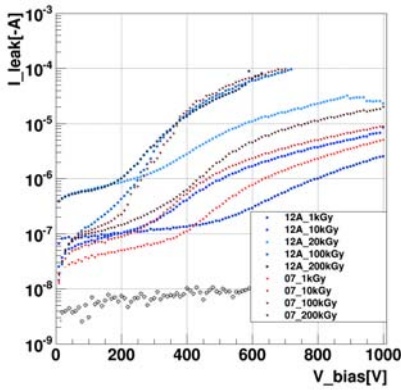
- ・ I-V: 暗電流のバイアス電圧依存性（表面状態の変化）
- ・ C-V: バルク部静電容量のバイアス電圧依存性（全空乏化電圧見積り）
- ・ Rint: 隣接DCパッド間の抵抗を測定。（RbiasとRintの並列）
- ・ Rbias: DC-pad - BiasRing間に電圧を印加、電流値から抵抗を評価
- ・ Cint: 中央とその両脇の隣接AC-pad間の静電容量を測定



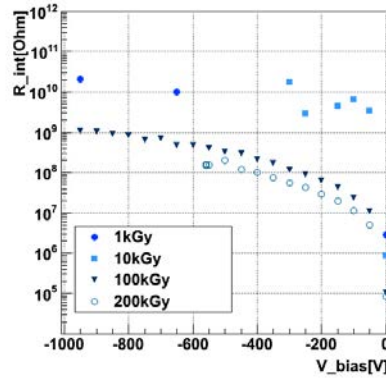


表面測定結果

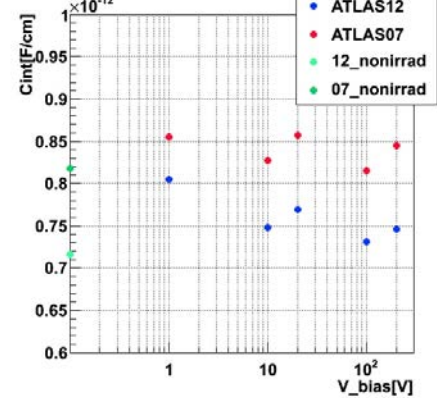
IV_20deg



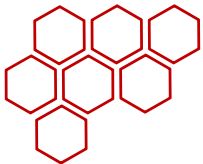
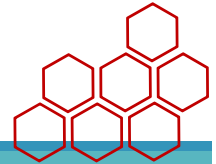
Rint_ATLAS12_Rint-V_253K_



Cint_irrad(VFD)

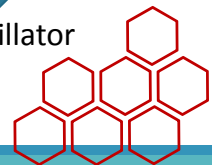
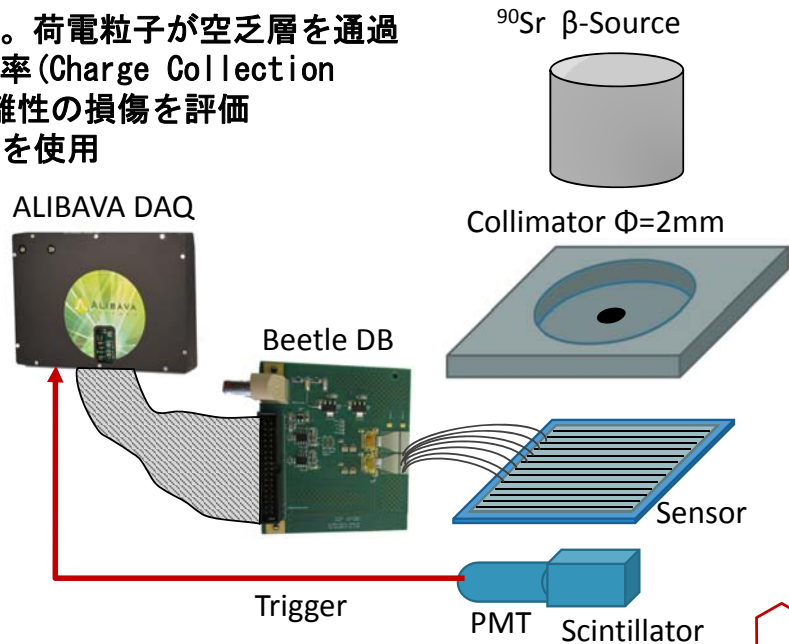
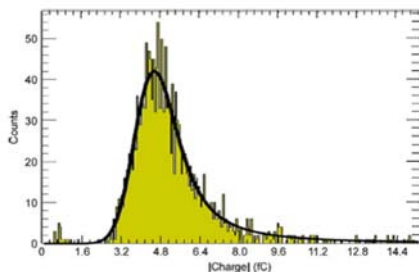


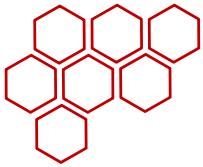
- ・ I-V: γ 線照射により暗電流が増加した。
 - ・ Rint: 照射によりストリップ間抵抗は悪化した。
 - ・ Cint: 全空乏化後 (200V~400V<最高運転電圧500V) のストリップ間静電容量はあまり変化しなかった
- いずれも十分にATLASの要求を満たしている。



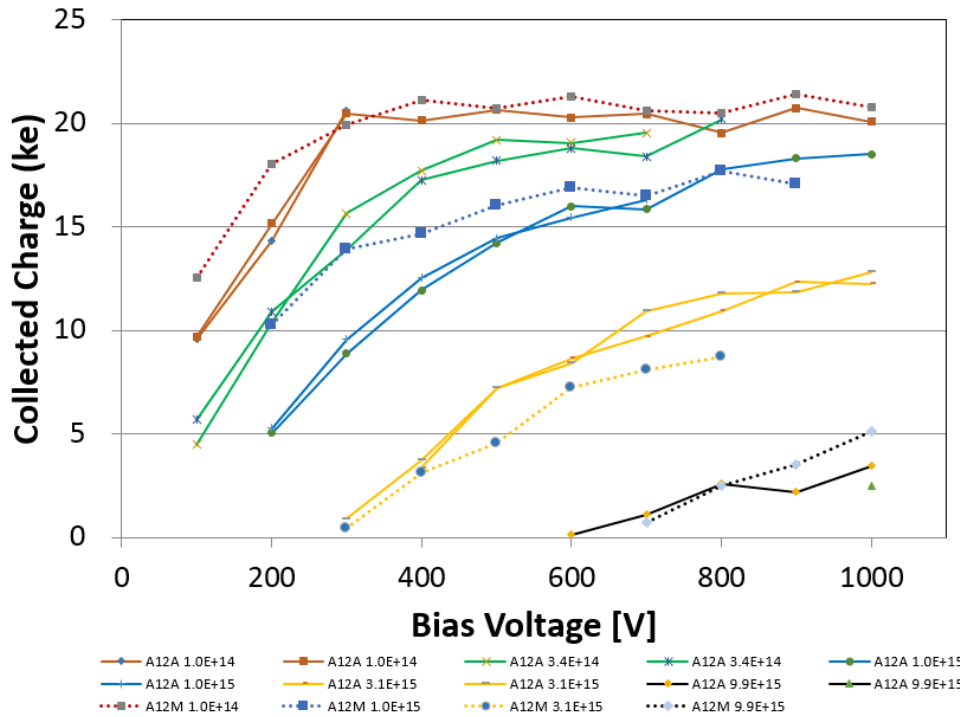
電荷収集効率 (CCE) 測定

擬似粒子として β 線を用いる。荷電粒子が空乏層を通過した際に収集される電荷の効率 (Charge Collection Efficiency) を測定し、非電離性の損傷を評価
LHCb向けCCE用のDAQシステムを使用



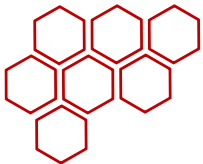
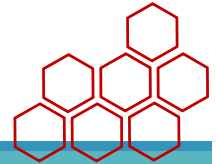


CCE照射量依存



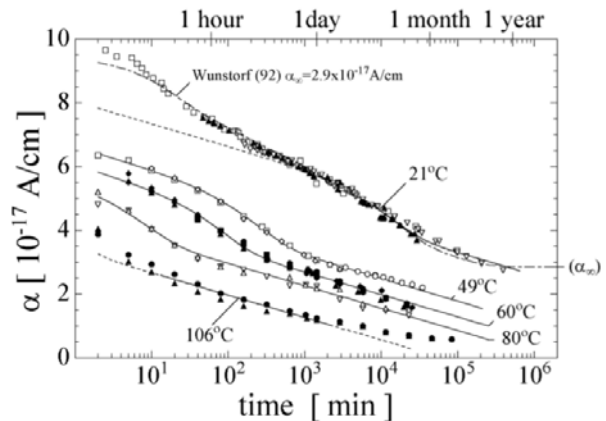
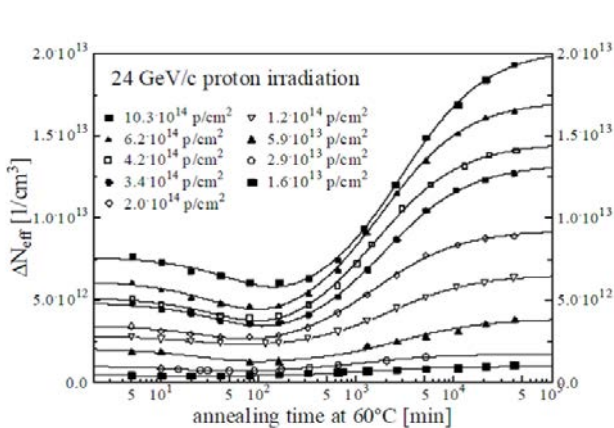
1. 0E14~E16neqcm⁻²
の照射量

照射量が増えるに
従ってCCEが悪化し
ている



有効不純物濃度

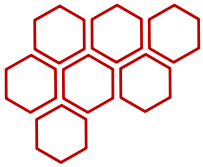
- シリコンセンサーの実効不純物濃度は放射線損傷によって変化する
- 放射線損傷による有効不純物濃度は温度・時間依存性があり、ある程度の温度・時間ではアニーリングによりセンサーの性能が回復し、その後再び逆アニーリングにより性能が悪化する。



- 一般的に、60°C80分のアニールを
実行後にセンサーの測定を行う

Figure 5.2: Current related damage rate α as function of cumulated annealing time at different temperatures. For each temperature at least one type inverted and one not type inverted sample has been used. The dashed-dotted line represents a simulation according to Eq. 5.3 with parameters as given in Tab. 5.1 and α_{∞} as displayed in the figure. The solid lines are fits according to Eq. 5.4. (Samples of type WE-7kΩcm and WE-25kΩcm; see Tab. 4.1)



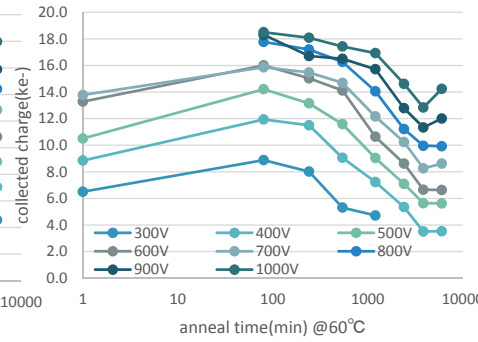
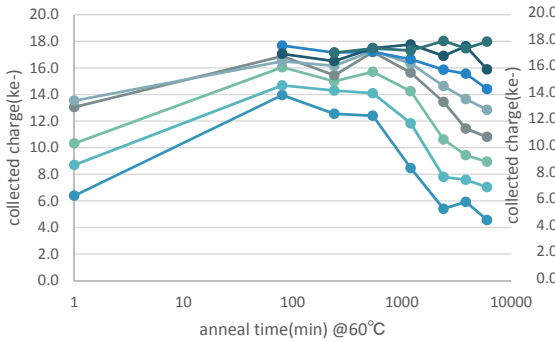


長期アニーリング特性

- 中性子照射サンプルや、n型との比較のため、陽子線照射を行った比抵抗の異なる2つのp型サンプルについて、60°C80分以降のCCEの振る舞いを測定

ATLAS12M(1E15)

ATLAS12A(1E15)

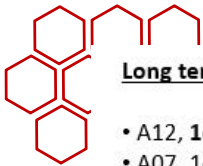
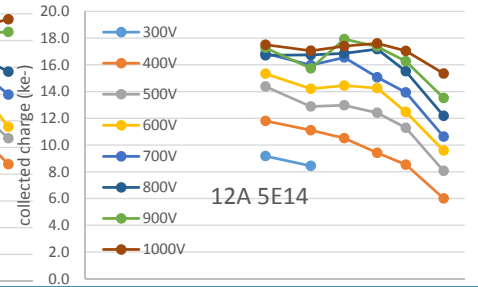
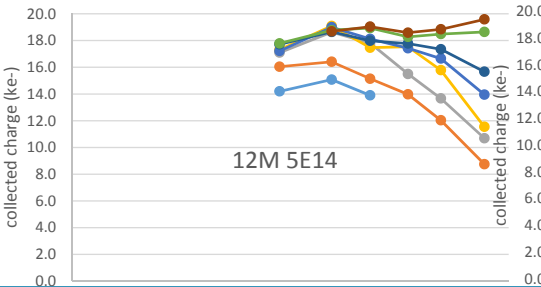
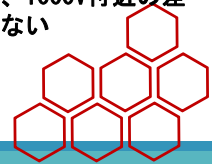


初期抵抗率の違いが長期アニーリングの様相を変える (bias<500Vを超える場合) (照射量依存は見られず、放射線由来の有効不純物濃度より初期低効率が支配的)

高照射量、高バイアスでは空乏化がストリップ側に集中化し、アバランシェを起こす

メリット：低温管理が不要ならばオペレーションが簡単

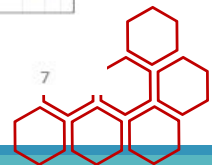
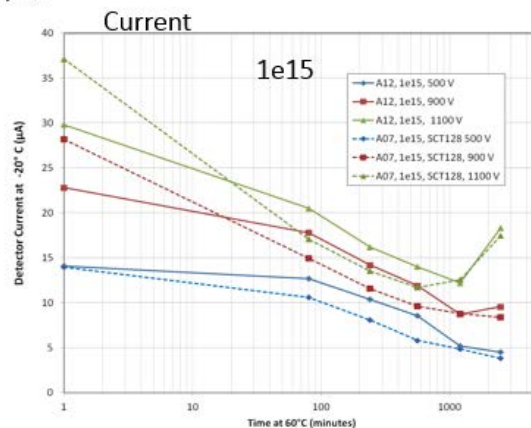
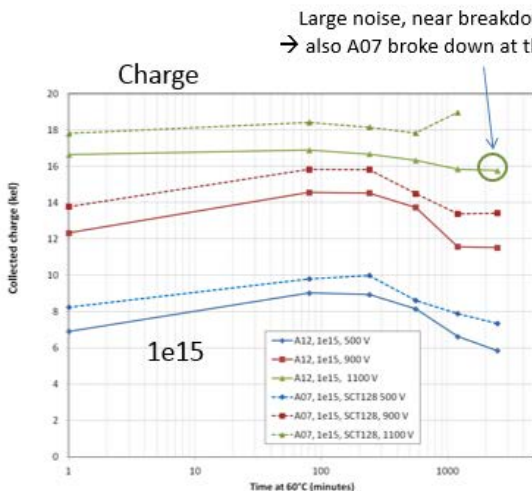
HL-LHCでの最高運転電圧は500Vなので、1000V付近の差は有用ではない

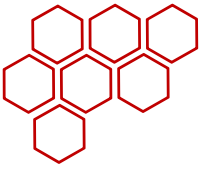


Long term annealing at 60°

- A12, 1e15 neutrons
- A07, 1e15 neutrons (dashed line) measured with SCT128 (old data: I. Mandic et al., NIMA 629 (2011) 101)

→ A12 and A07 annealing very similar at this fluence
→ charge multiplication starts at same bias, time point



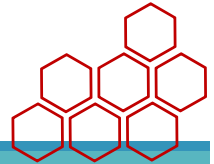


まとめ

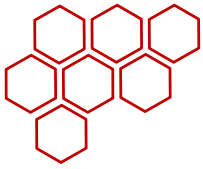
HL-LHC ATLAS ITk用にnストリップp型バルクセンサーを開発中

ATLAS12A, ATLAS12M, ATLAS07等のテストサンプルに対し、陽子照射・ γ 線照射を通じて放射線耐性を評価している

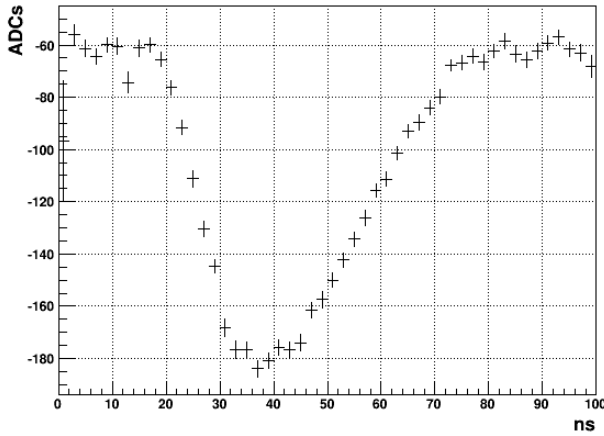
- CCEは安全係数2を入れた $1.6E15\text{neq}/\text{cm}^2$ 照射後も十分な性能
- さまざまな表面損傷の測定 (R_{int} , C_{int} , R_{bias} , ...) を γ 線照射に対して行った \Rightarrow ATLASの要求を満たす。
- 同様な陽子照射による測定(先行研究)でも、いずれもATLASの要求を満たす。
- 長期アニーリングの結果などHL-LHCでは従来の認識が変わる照射領域に突入している。



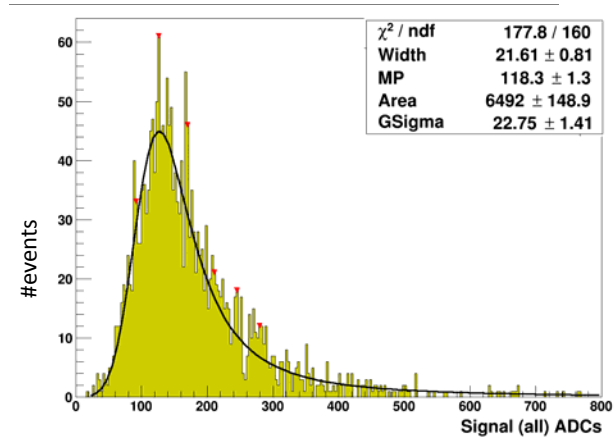
Backup



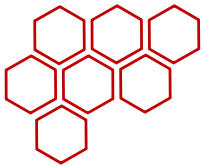
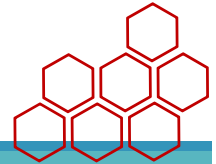
Signal from Alibava



Trigger Time wrt clock ~ signal shape
Peaking time similar to ATLAS (20ns)



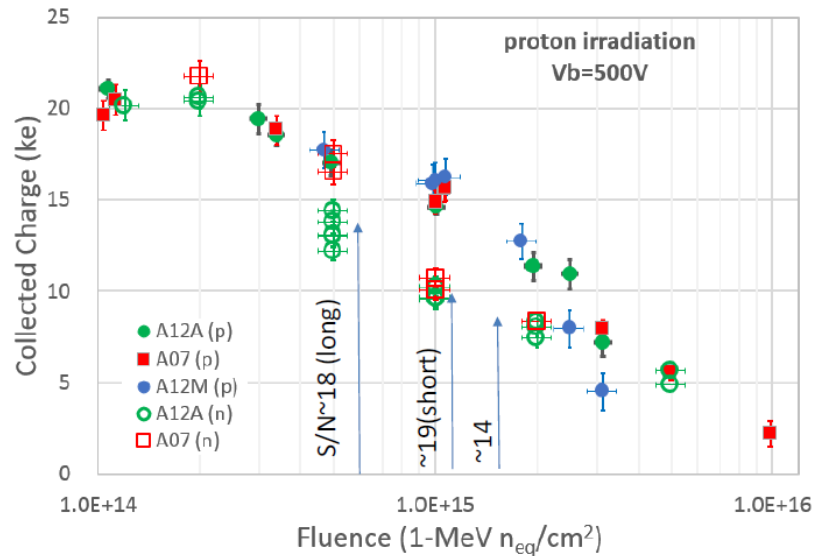
Cluster charge (ADC)



S/N at HL-LHC

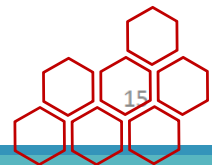
Barrel short (24mm)strips up to : $1.1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$
Barrel long (48mm) strips up to : $0.6 \times 10^{15} / \text{cm}^2$
Endcap (8-48mm) strips: max $1.6 \times 10^{15} / \text{cm}^2$

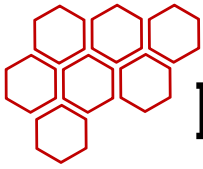
ENC noise ~550/720/650 ENC for barrel short/barrel long/EC innermost strips



At Vb=500V, strip detectors remain as precision tracker after HL-LHC fluence

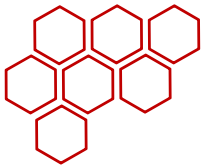
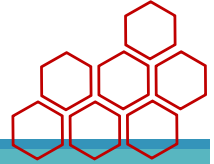
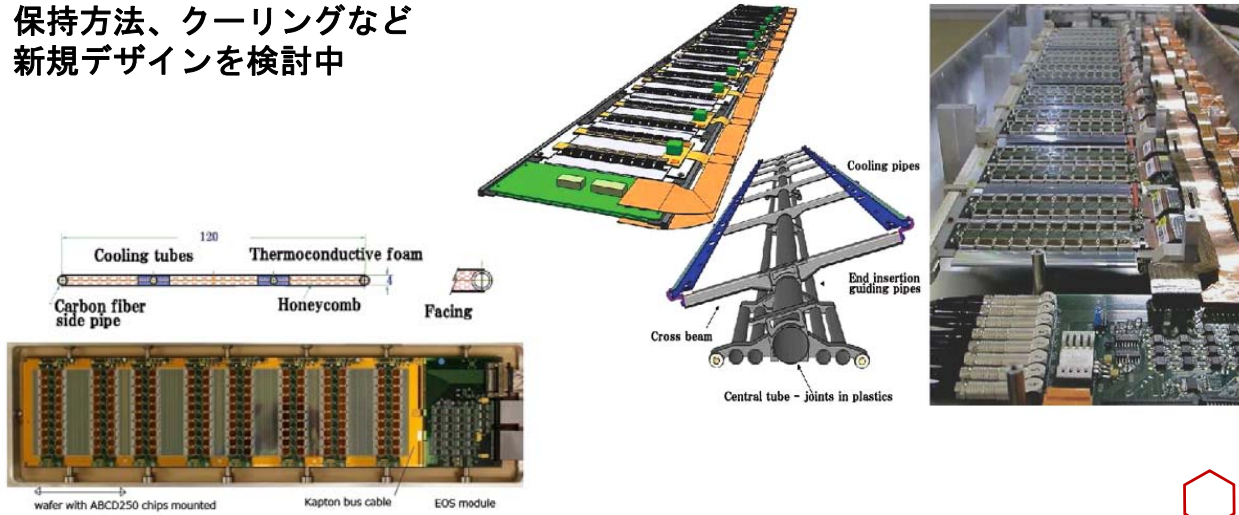
K. Hara, HSTD10, Xi'an China, 25-29 Sep 2015



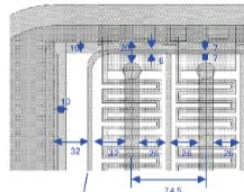


Inner Detector SCT Upgrade

- ・ HL-LHCから、内部飛跡検出器は全てPixel及びSCTのシリコン検出器に置き換わる。
- SCTのフレームも変更
- 保持方法、クーリングなど
- 新規デザインを検討中



n-in-p ATLAS12A

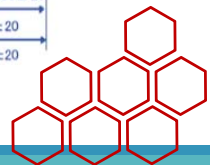
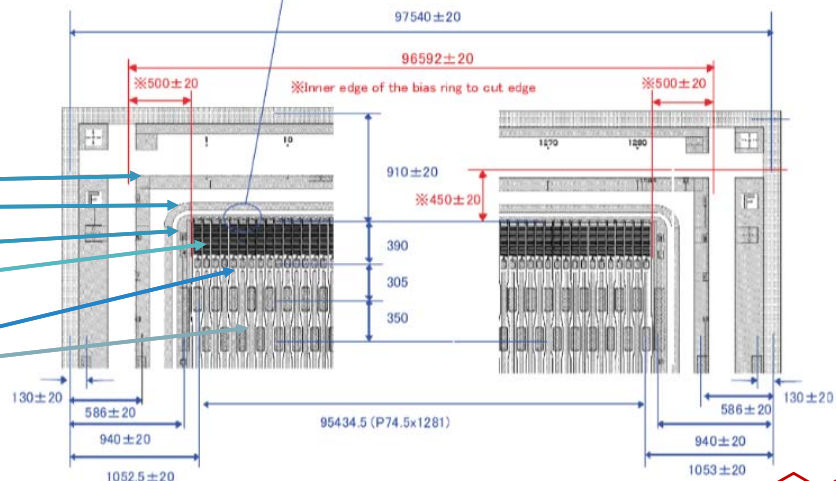


Punch-Through Protection
電極をバイアスリングに近づけ、

(Unit: μm)

SLIM cut:
STD cut:の選択が可能

Edge
Guard Ring
Bias Ring
BiasResist: Poly-Silicon
Resist ($5\text{M}\Omega$)
DC-Pad
AC-Pad



まとめ

HL-LHC ATLAS ITk用にnストリップp型バルクセンサーを開発中

ATLAS12A, ATLAS12M等のテストサンプルに対し、陽子照射・ γ 線照射を通じて放射線耐性を評価している

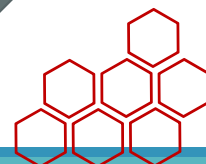
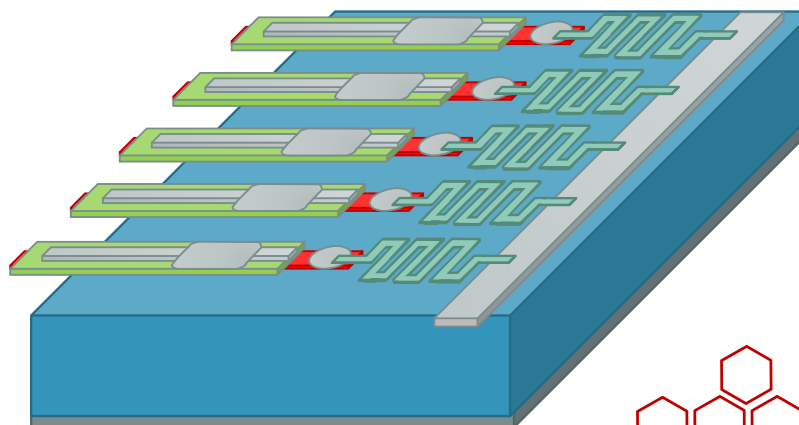
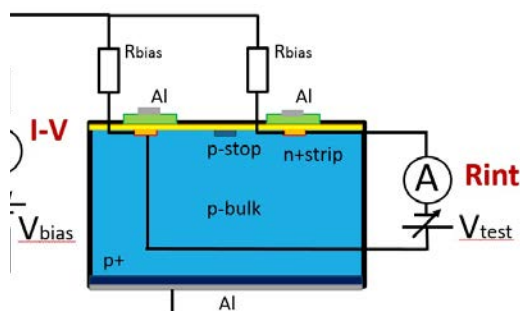
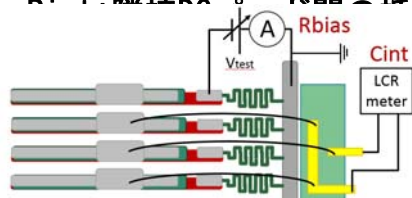
- CCEは安全係数2を入れた $1.6E15\text{neq}/\text{cm}^2$ 照射後も $S/N > 14$ を確保
- さまざまな表面損傷の測定 (R_{int} , C_{int} , R_{bias} , ...) を γ 線照射に対して行った \Rightarrow ATLASの要求を満たす。
- 同様な陽子照射による測定は萩原さんにより行われ、いずれもATLASの要求を満たす。
- 長期アニーリングの結果などHL-LHCでは従来の認識が変わる照射領域に突入している。

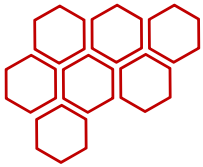


表面損傷測定

γ 線によって表面の酸化膜中の分子の共有結合が切れ、センサーの各性能が悪化する。それらの評価のため次の項目について測定する。

- I-V: 暗電流のバイアス電圧依存性 (表面状態の変化)
- C-V: バルク部静電容量のバイアス電圧依存性 (全空乏化電圧見積もり)
- R_{int} と C_{int} の測定。(RbiasとRintの並列)

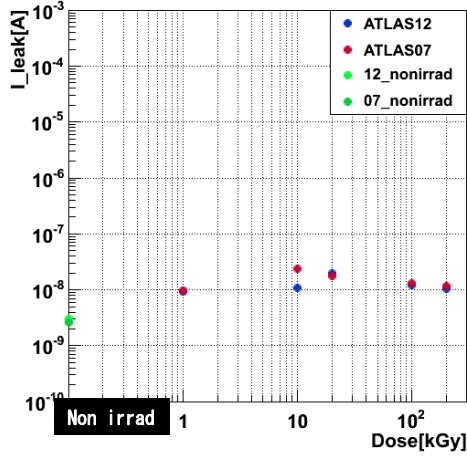




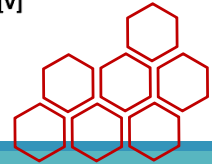
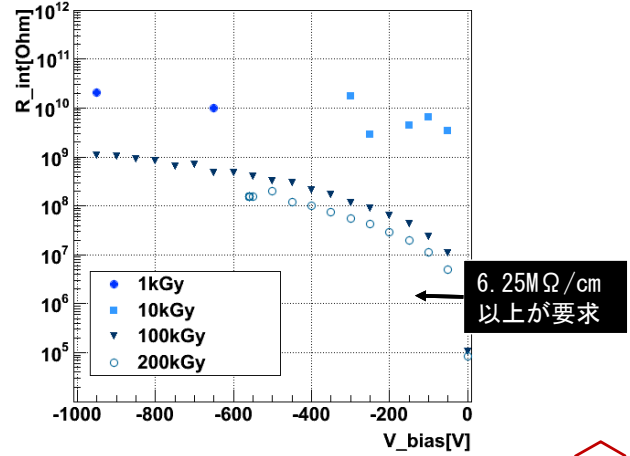
表面測定結果

- ・ I-V: 照射により暗電流が増加したが、1kGy以降は横ばい (@400V, -20°C)
- ・ Rint: インプラントされているポリシリコン抵抗と比べ充分大きい。

Leak(VFD)



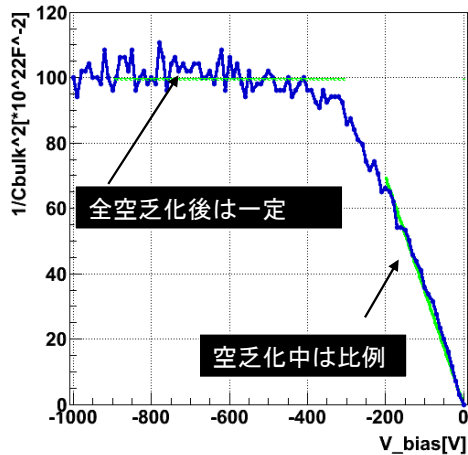
Rint_ATLAS12_Rint-V_253K_



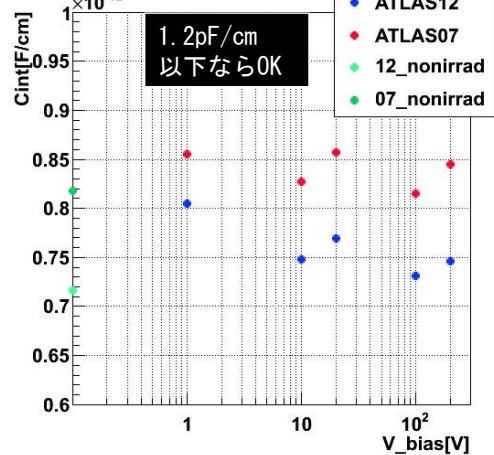
表面測定

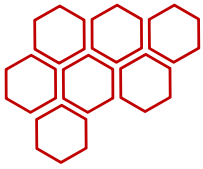
- ・ Cbulk: 全空乏化電圧はATLAS運転電圧500Vを下回り、充分空乏化できる。
- ・ Cint: 照射量依存は見られず、要求を満たす容量だった。

Cbulk_ATLAS12_10kGy_293K_



Cint_irrad(VFD)





表面損傷測定 (2)

- Rbias: DC-pad - BiasRing間に電圧を印加、電流値から抵抗を評価
- Cint: 中央とその両脇の隣接AC-pad間の静電容量を測定 ($f=500\sim 1\text{MHz}$)
※両測定ともバイアス電圧は印加した状態で測定

