

# 高い時間分解能と位置分解能を持つ半導体検出器 AC-LGADの放射線耐性向上に関する研究

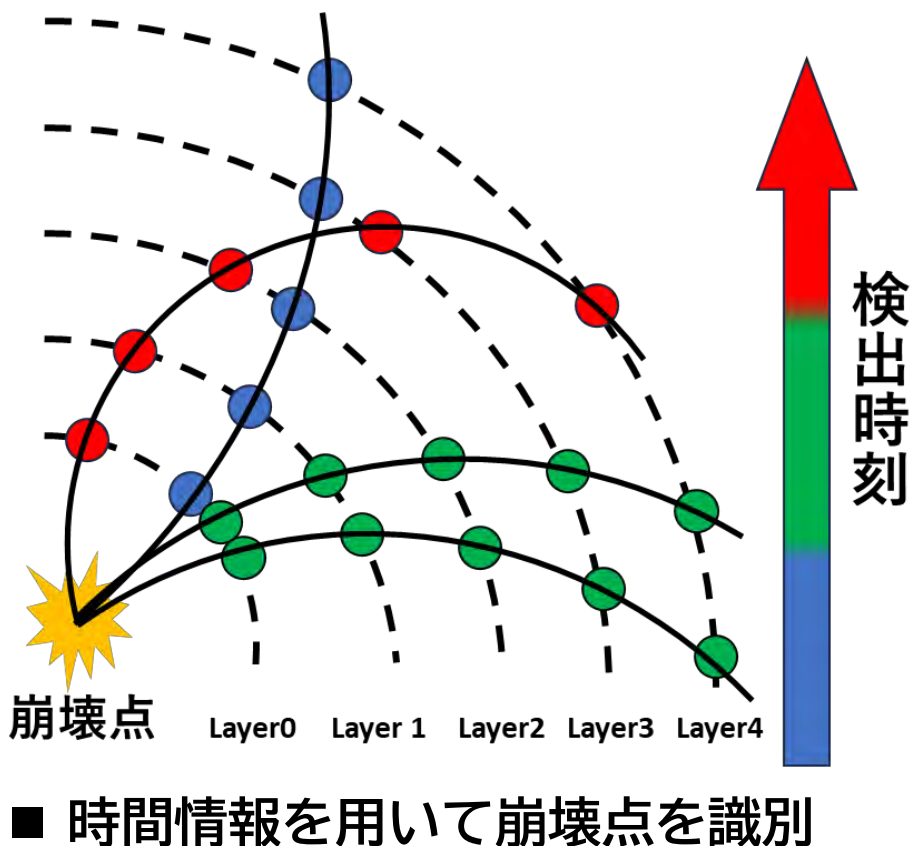
筑波大, 高エネルギー加速器研究機構<sup>A</sup>, Leibniz University Hannover<sup>B</sup>

村山 由亞, 中村 浩二<sup>A</sup>, 堀越 一生, 佐藤 構二, 今村 友香<sup>B</sup>, 北 彩友海



# 加速器実験の高輝度化

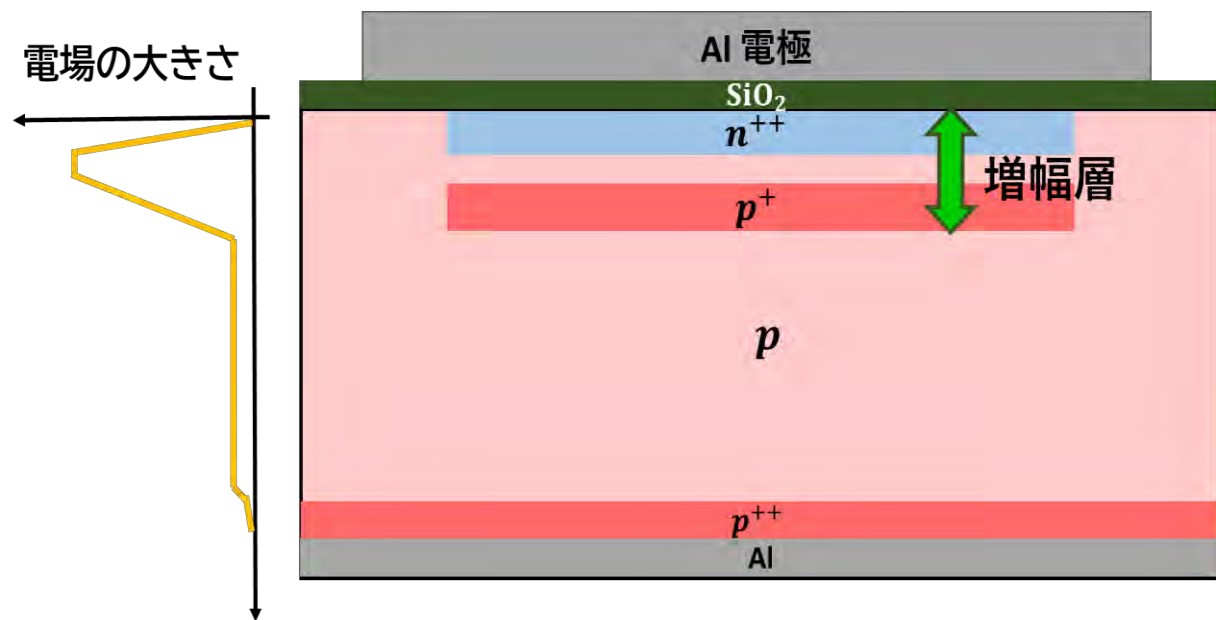
- 新粒子の探索や高統計データの取得のために、加速器の高輝度化が必要  
⇒飛跡再構成のために、パイルアップイベントの除去が重要



- 位置情報だけでなく時間情報も用いることで、崩壊点を識別可能  
⇒パイルアップイベントの除去が可能
- 高い時間分解能の検出器は将来の加速器実験にとって非常に重要

# Low-Gain-Avalanche-Diode(LGAD)

## ■ LGADの構造



- **LGAD**(Low-Gain-Avalanche-Diode)検出器
  - 追加でp+層をドーピング⇒増幅層の形成
  - アバランシェ増幅により信号増幅
  - 時間分解能 =  $\frac{\text{信号の立ち上がり時間}}{\text{信号ノイズ比}} + \dots$
  - 信号増幅⇒高い時間分解能(~30ps)
  - 電極の細密化⇒高い位置分解能(~30um)

## ◆放射線耐性

- 高輝度LHC におけるITk Pixelへの放射線耐性の要求値(2000 fb<sup>-1</sup>)
  - $2.7 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  (Layer1 - flat barrel)

⇒LGADの放射線耐性の目標:  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

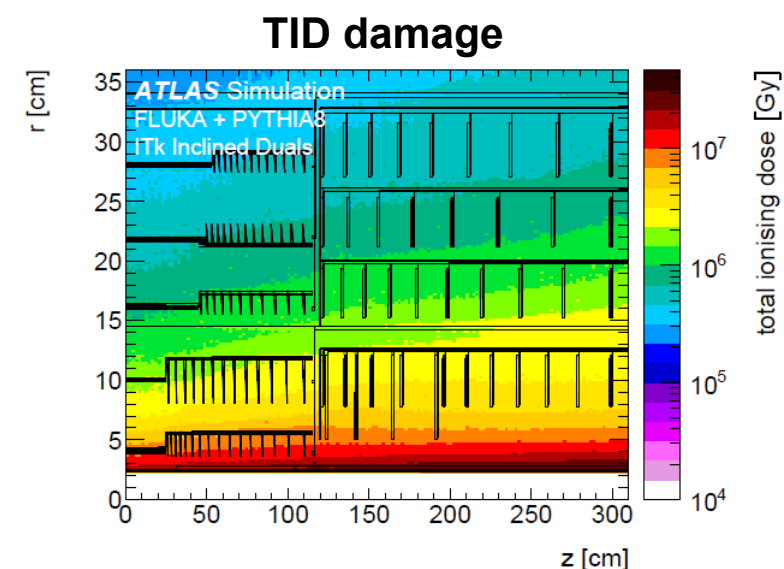
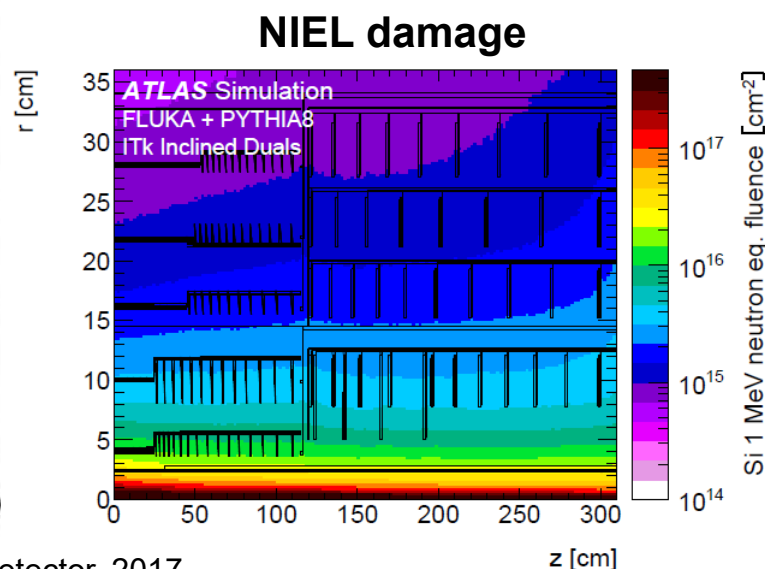
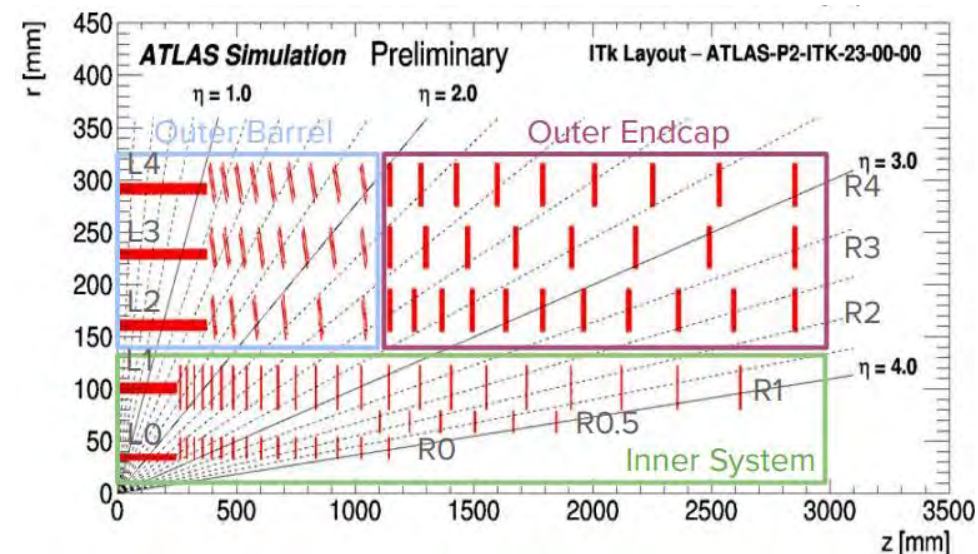
# 放射線耐性の目標

- 高輝度LHC におけるITk Pixelへの放射線耐性の要求値( $2000 \text{ fb}^{-1}$ )

- $1.3 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  , 7.2 MGy (Layer0 - flat barrel)
- $2.7 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  , 1.5 MGy (Layer1 - flat barrel)

➤ 目標：LGADの放射線耐性：  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

⇒LGADの放射線耐性は重要な課題!!



➤ Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector, 2017

➤ ATLAS EXPERIMENT- PUBLIC RESULTS,RadiationSimulationPublicResults,<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/RadiationSimulationPublicResults>

# 半導体検出器の放射線損傷

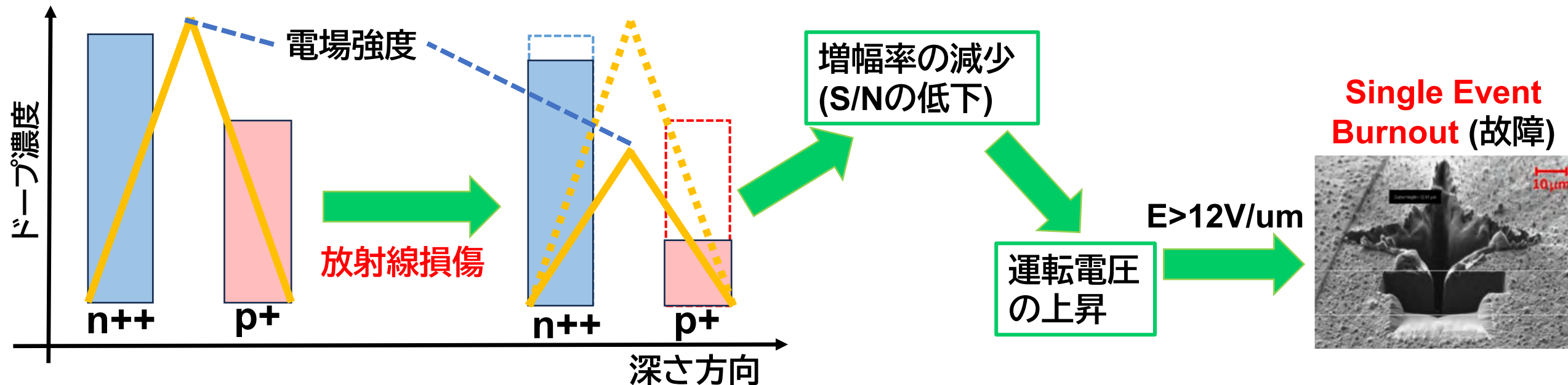
- 電離損傷: TID (Total Ionization Doze)
  - 電子正孔対が生成⇒移動度の小さい正孔が酸化膜に取り残される
  - 暗電流の増加、降伏電圧の上昇等に影響
  - 単位は Gy
- 非電離損傷: NIEL (Non-Ionizing Energy Loss ) 損傷
  - 格子欠損が不純物準位(欠陥準位)を生成  
⇒ 収集電荷量の低下や暗電流の増加
  - 損傷の度合い  $\propto$  エネルギー損失量 と仮定 (NIEL 仮説)
  - 単位は  $n_{eq}/\text{cm}^2$  (1 MeV 中性子換算)

# アクセプター/ドナーリムーバル

- 放射線損傷⇒増幅層として働くp+層中のアクセプターが減少
- アクセプター・ドナー量と照射量の関係は以下で表される

$$N_A(\phi) = N_A(0)e^{-C_A\phi}, N_D(\phi) = N_D(0)e^{-C_D\phi}$$

$N_A, N_D$ : アクセプター, ドナー量、 $\phi$ : 照射量、 $C_A, C_D$ : 不純物濃度減少係数

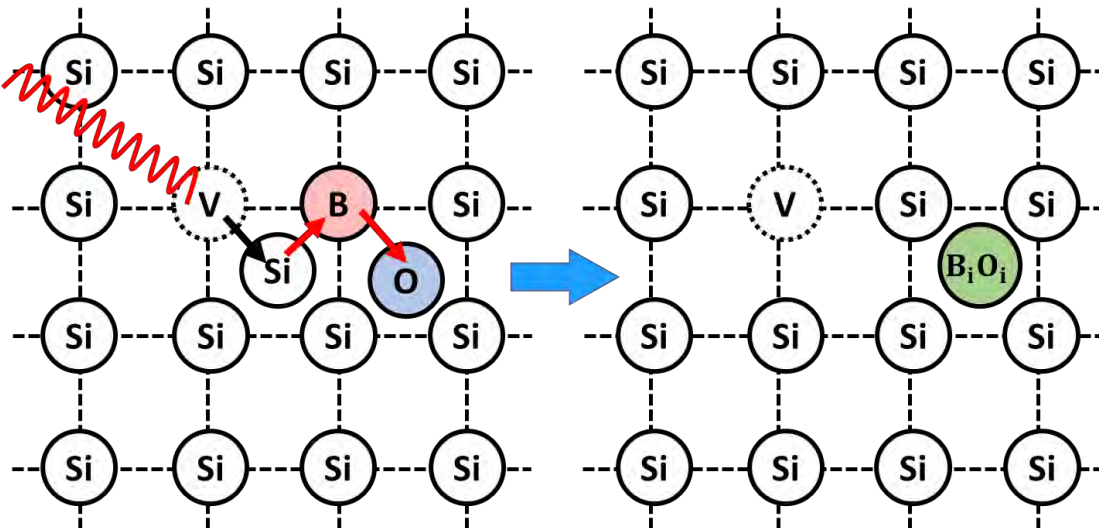




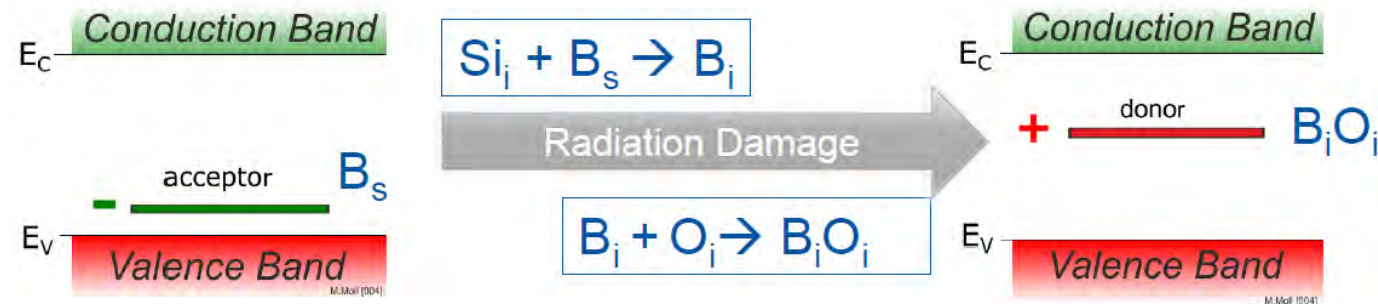
# アクセプターリムーバルのメカニズム

- p型Siセンサー :  $N_A = O(10^{12}) \text{ cm}^{-3}$  の測定結果によると、
  1. 放射線損傷で格子間Si ( $\text{Si}_i$ )と空孔(V)が生成
  2.  $\text{Si}_i + \text{B}_s \rightarrow \text{B}_i$  (ホウ素の不活性化)
  3.  $\text{B}_i \text{O}_i$ によるドナー準位の形成 ( $\text{B}_i + \text{O}_i \rightarrow \text{B}_i \text{O}_i$ )

## ■ 欠陥準位形成の過程



## ■ アクセプターリムーバルの機構



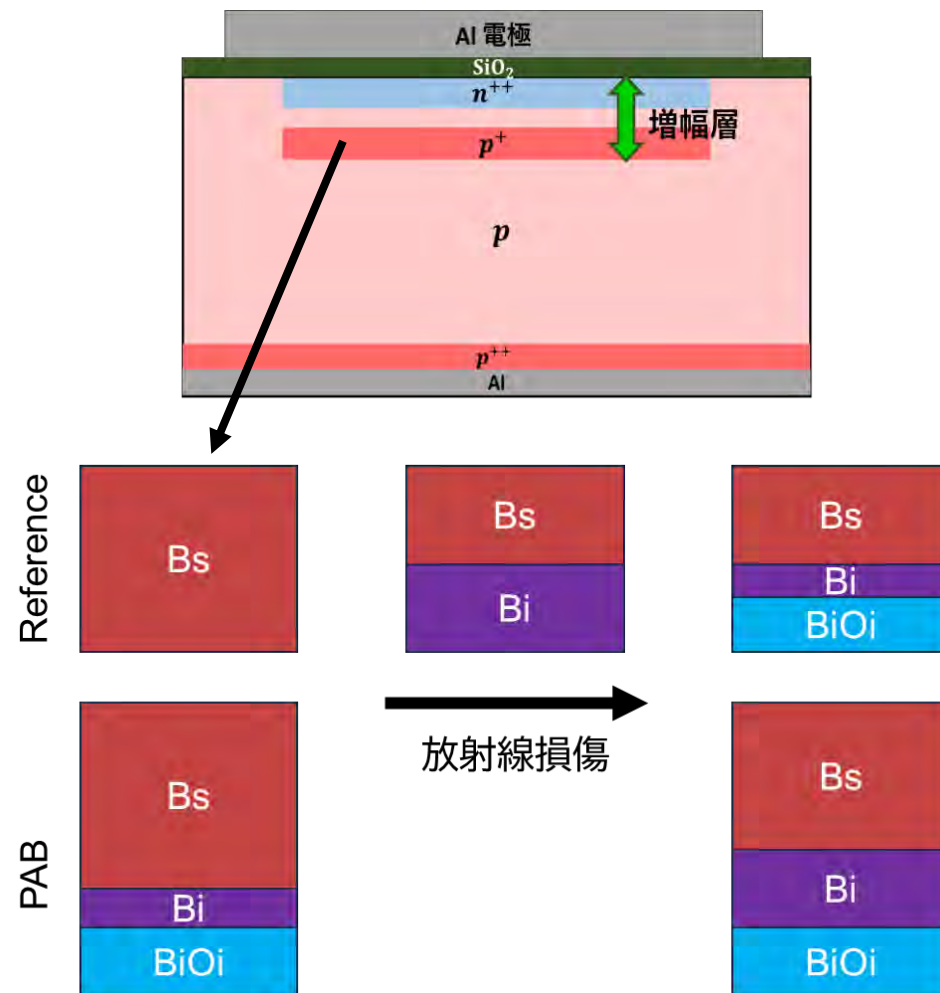
➤ M.Moll, Acceptor Removal - Effects of displacement damage involving the shallow acceptor doping in p-type silicon devices, vertex2019

# Partially Activated Boron (PAB)

- $B_iO_i$  が原因ならば、センサー中の酸素を減らすことアクセプターリムーバルの抑制が可能

## □Partially Activated Boron法

- p+層に不活性ホウ素( $B_i$ )を事前ドーピング
  - ⇒  $B_i + O_i \rightarrow B_iO_i$  による酸素の除去
  - ⇒ 照射で生じる  $B_i$  が結びつく酸素が少ない
  - ⇒  $B_iO_i$  形成の抑制



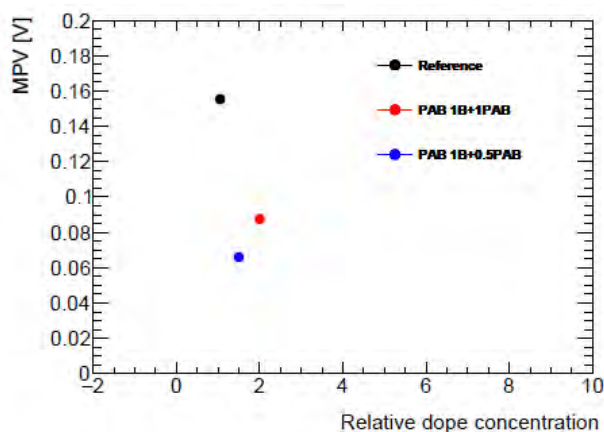
■ PABとReferenceのイメージ



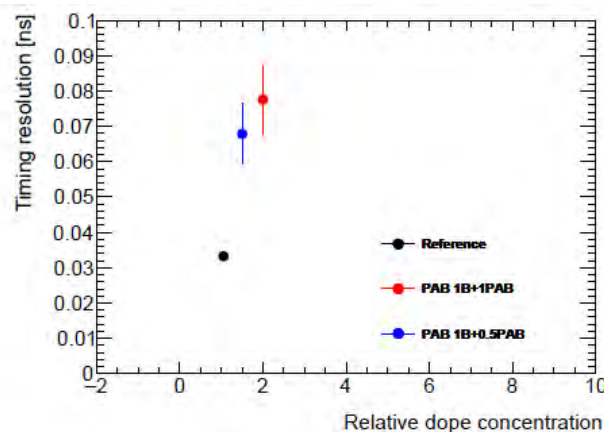
# 過去の結果[PAB(酸素濃度大)]

サンプル	作りかた
Reference	全てのホウ素を活性化
PAB 1B+1PAB	ホウ素活性化後、それと同量の不活性ホウ素を注入
PAB 1B+0.5PAB	ホウ素活性化後、その半量の不活性ホウ素を注入

## ■ 性能のドーパ濃度依存性



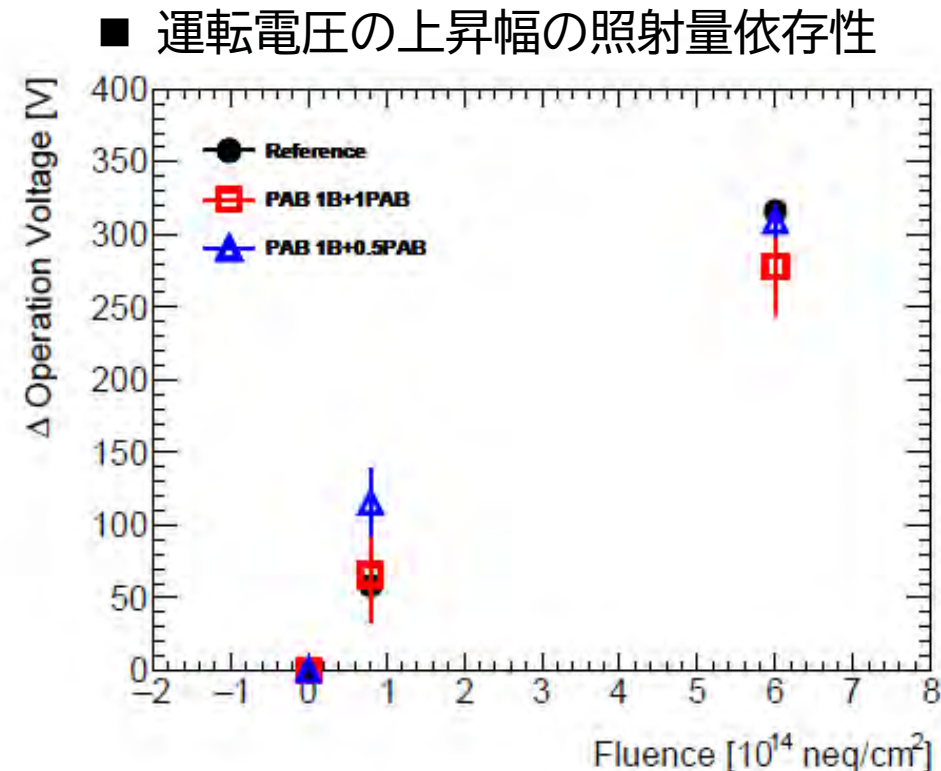
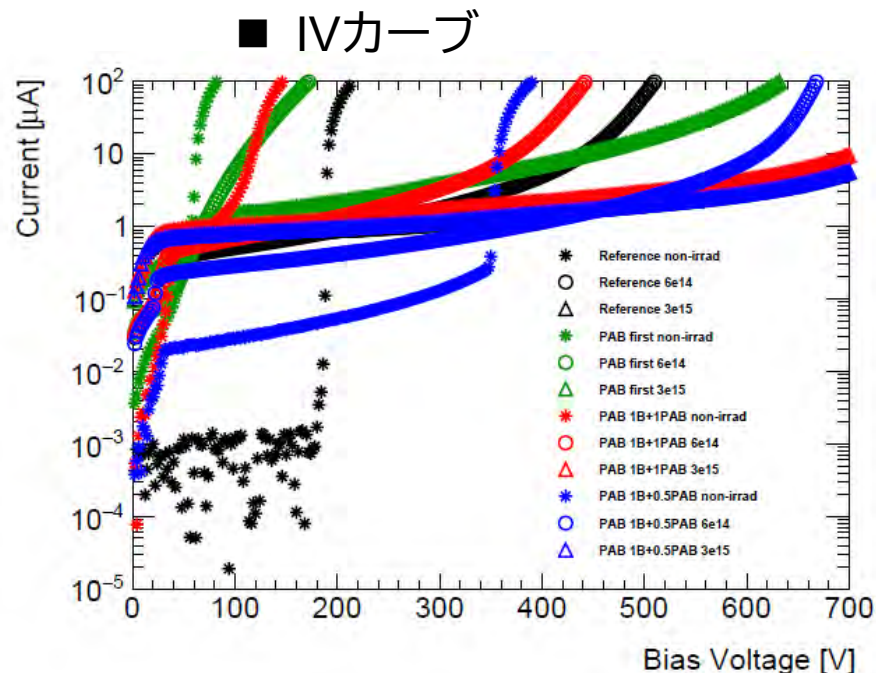
(a) MPV のドーパ濃度依存性



(b) 時間分解能のドーパ濃度依存性

- 不活性ホウ素の量を変えた3つのサンプルを使用
  - PABはReferenceに比べて時間分解能が悪くなっている
- ⇒注入した不活性ホウ素が形成したドナー準位の影響？

# 過去の結果[PAB(酸素濃度大)]

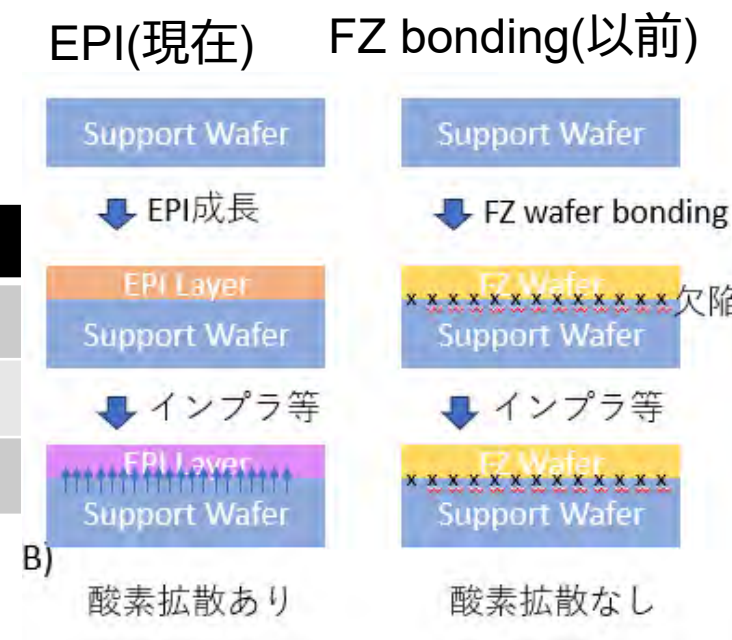


- 全サンプルで照射量増加に伴い運転電圧は増加
  - 誤差の範囲で有意な改善は見られない
- ⇒このサンプルはセンサー中の酸素量が多いことが判明
- 不活性ホウ素で使いきれの量をはるかに超えていた可能性

# 酸素濃度低減サンプル

- PABの効果を十分発揮するために、センサーの酸素コンタミを削減
  - アニール工程でサポートウェハー中の酸素がエピ層に侵入⇒酸素のコンタミ
  - アニール時間をできるだけ削減⇒酸素量がSIMSの測定限界以下
- 以下の3つのサンプルを作成→放射線照射→評価測定

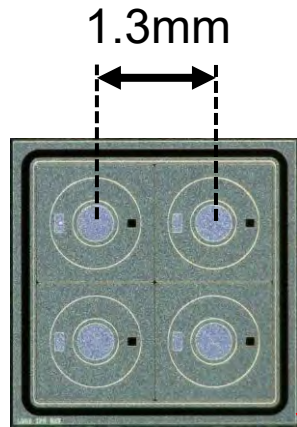
サンプル名	条件
Reference	従来通りの方法で作成(酸素コンタミあり)
Low Thermal Budget(LTB)	アニール工程をできるだけ削減(酸素コンタミなし)
LTB+PAB	酸素コンタミなしサンプルにPAB法を適用(酸素量極小)



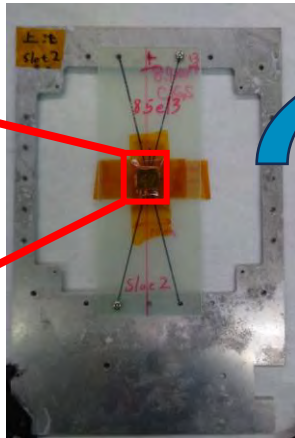
# 照射試験

- 東北大のRARiS (旧CYRIC)で照射試験を実施
  - 50MeV陽子を使用 (加速器の不調のため、通常は70MeV)
  - ビームに対してサンプルを動かして一様に照射

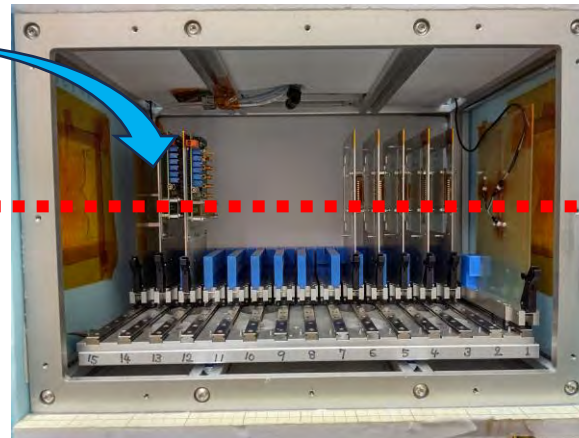
- 試作サンプルを  $\left\{ \begin{array}{l} 7 \times 10^{13} \\ 6 \times 10^{14} \\ 2 \times 10^{15} \\ 4 \times 10^{15} \end{array} \right. n_{eq}/cm^2$  の4照射点で照射



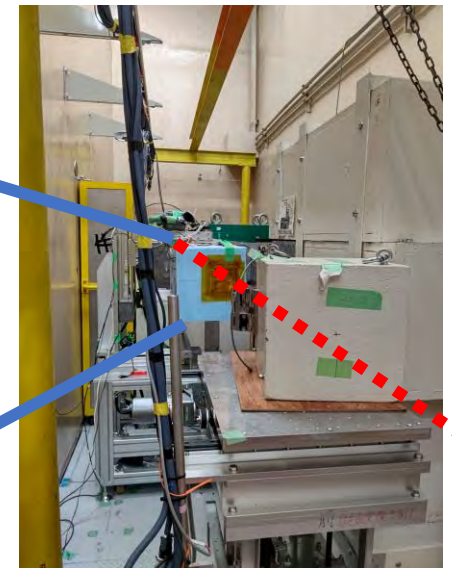
■ LGAD



■ 照射サンプル



■ 照射品を格納したボックス

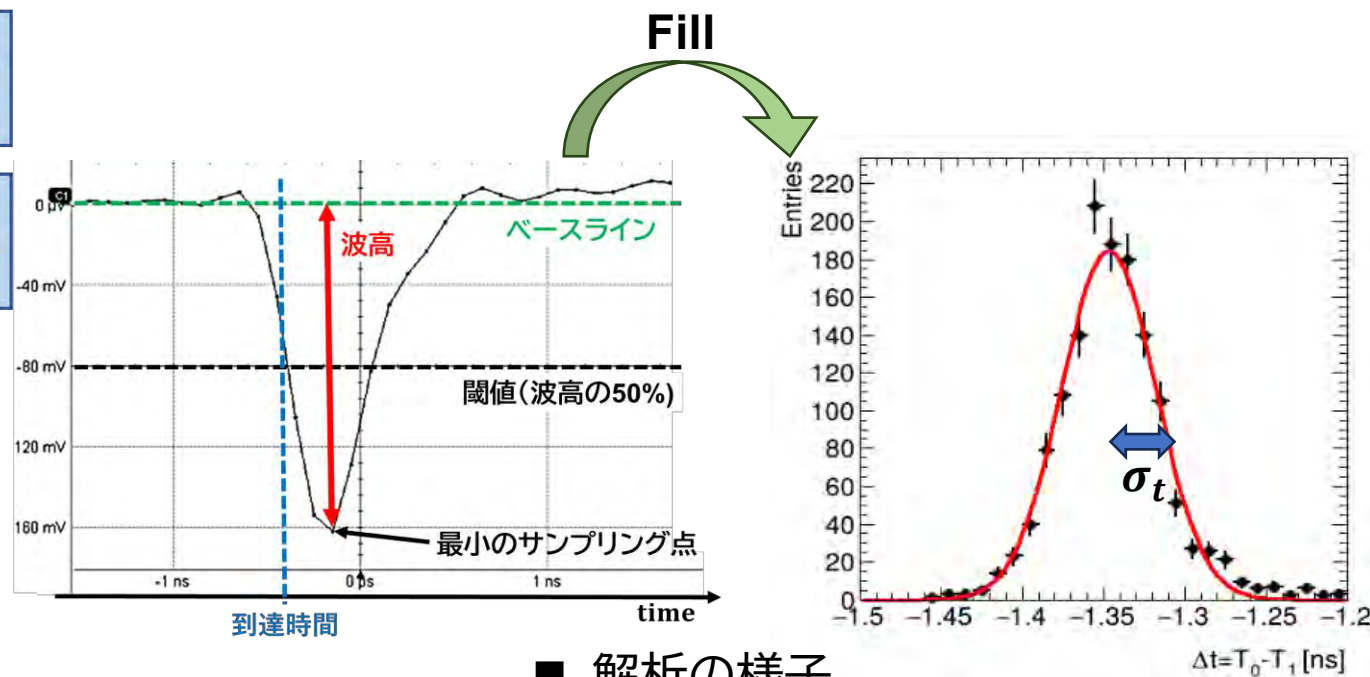
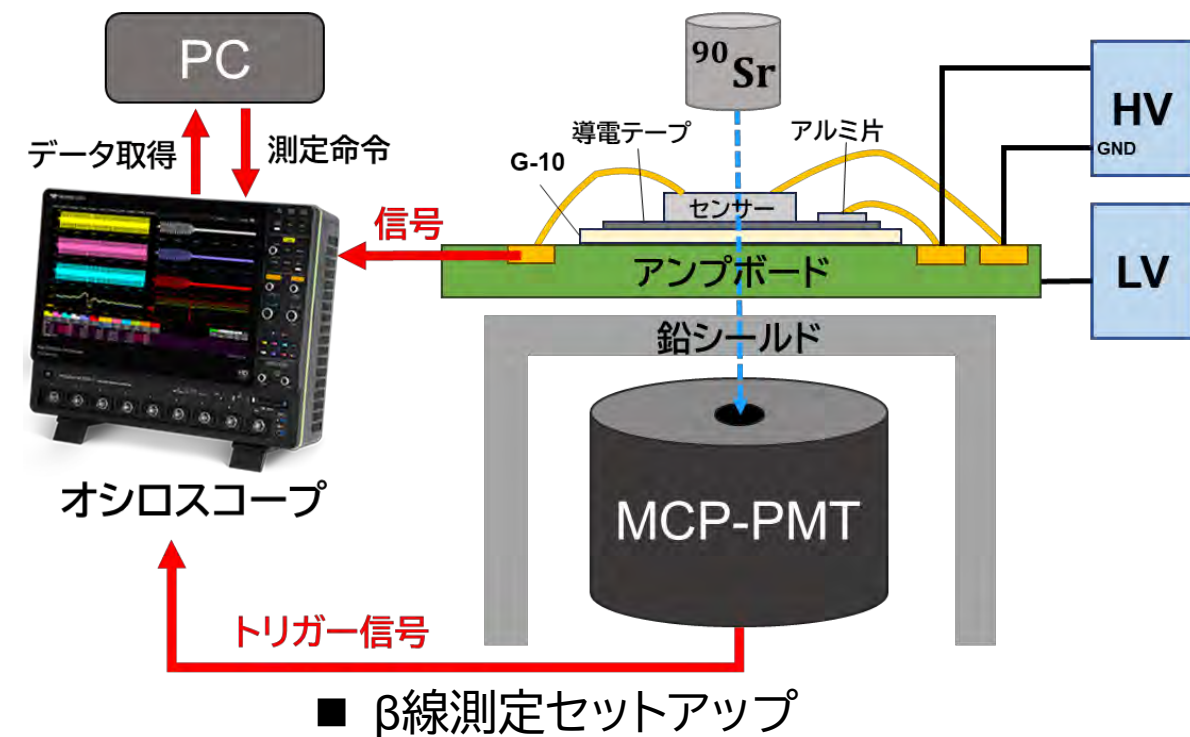


■ 照射の様子



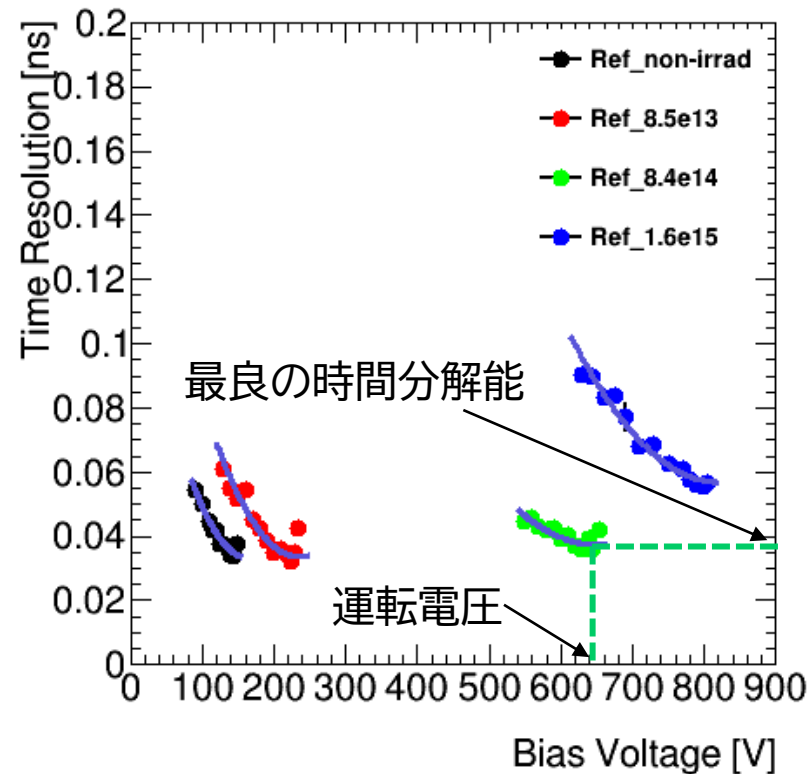
# β線信号測定・解析方法

- 信号はセンサー→アンプボード→オシロスコープ(LeCroy:10 GS/s)で測定
- MCP-PMTをトリガーに使用
- 時間分解能：トリガーとセンサーの信号到達時間差のばらつき
- 照射品は 60°C, 80分のアニーリング後に、-20°Cまで冷やした状態で測定

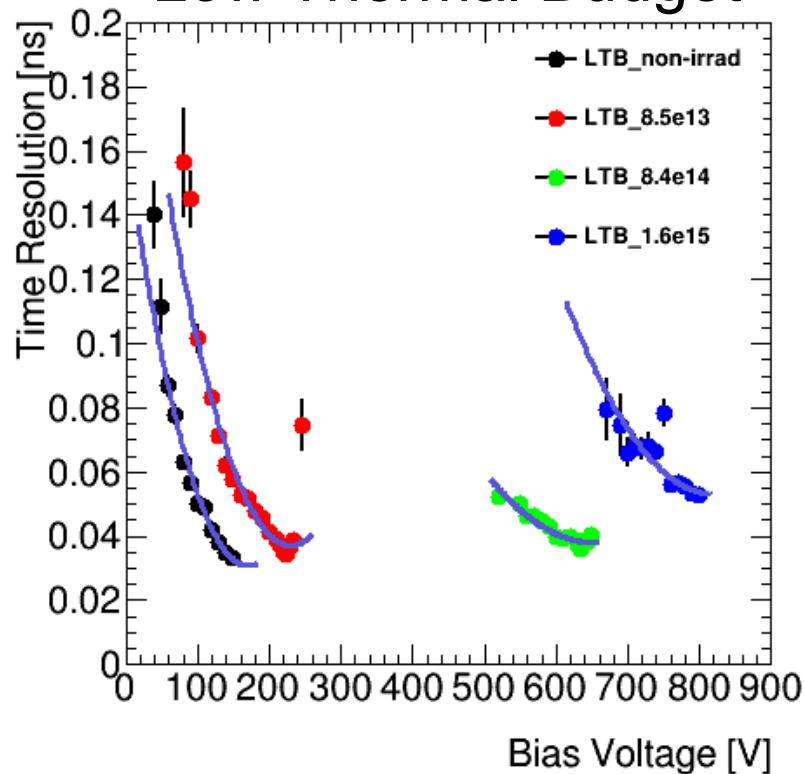


# 時間分解能の印加電圧依存性

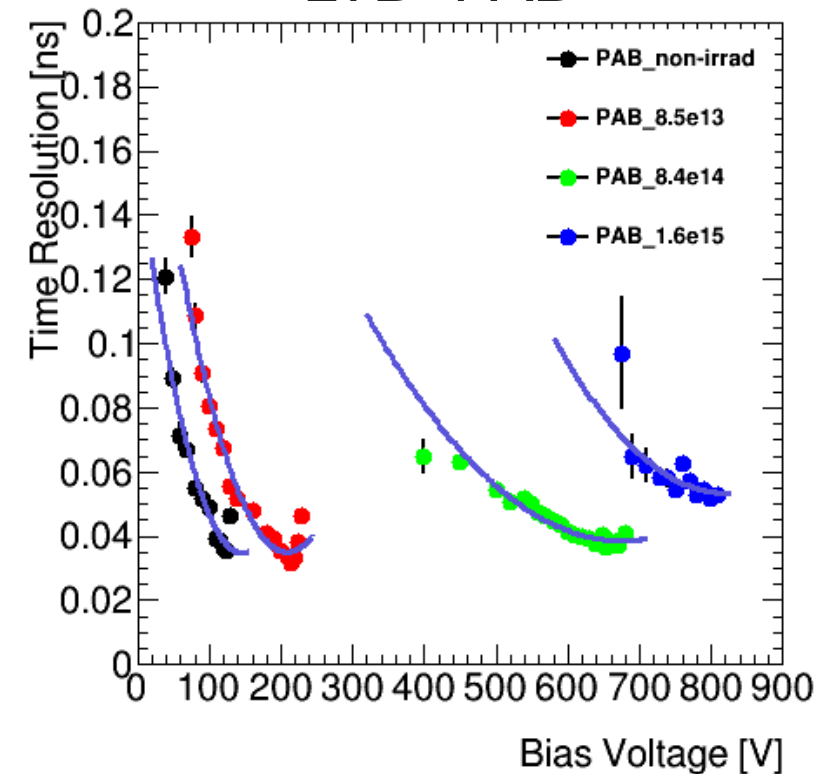
## Reference



## Low Thermal Budget



## LTB+PAB

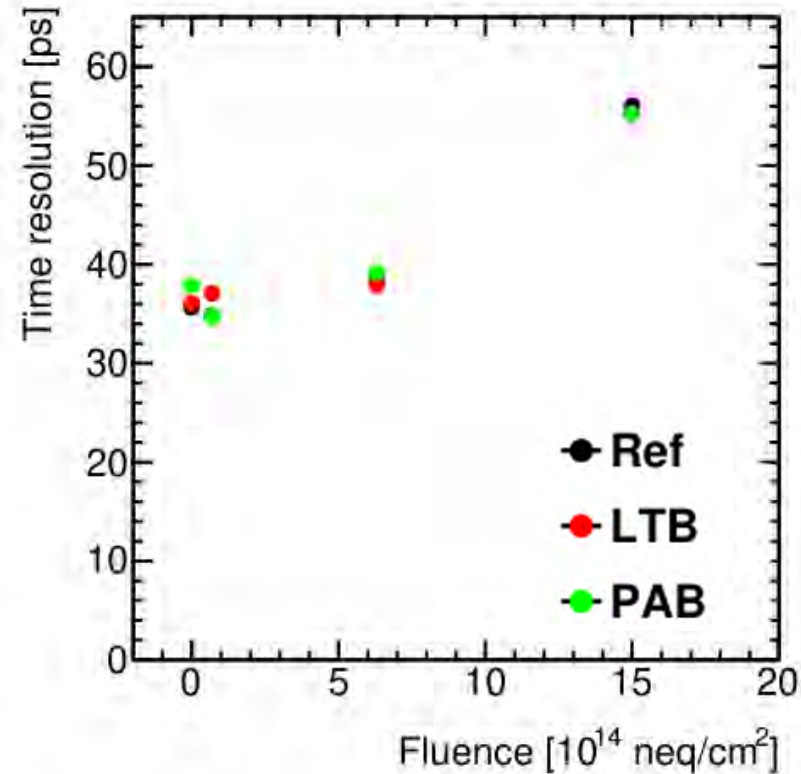


- 時間分解能の最小値付近を二次関数でFit
  - ✓ 最良の時間分解能  $\equiv$  フィットで求めた最小値
  - ✓ 運転電圧  $\equiv$  最小値の時の印加電圧

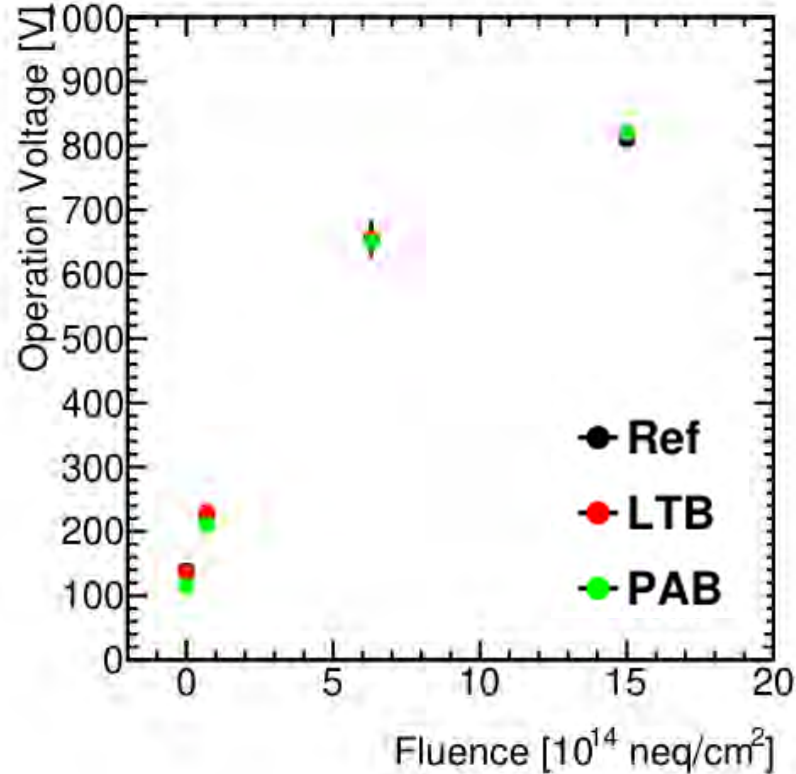


# 照射量依存性

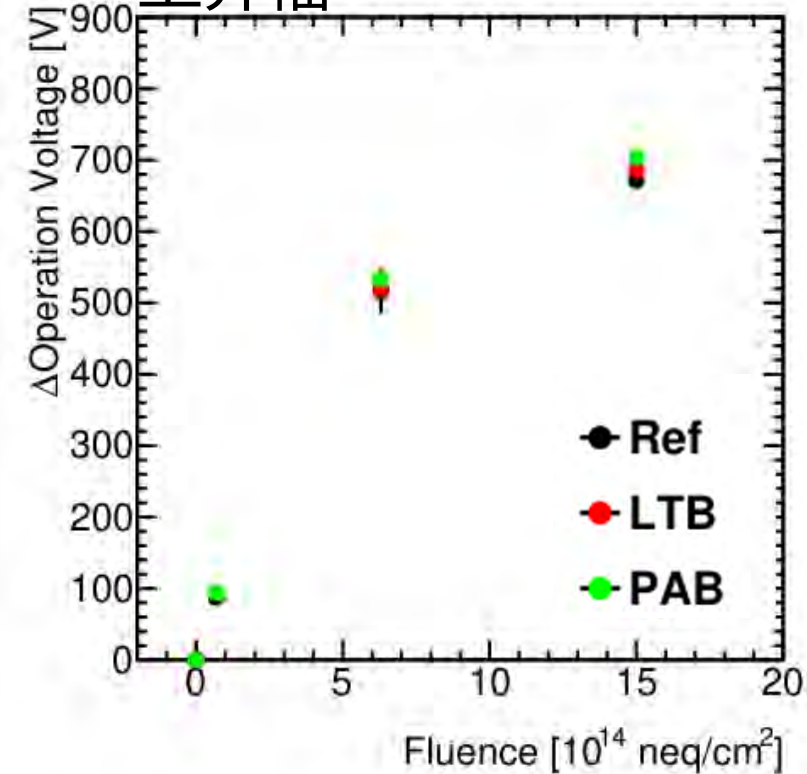
## ■ 最良の時間分解能



## ■ 運転電圧

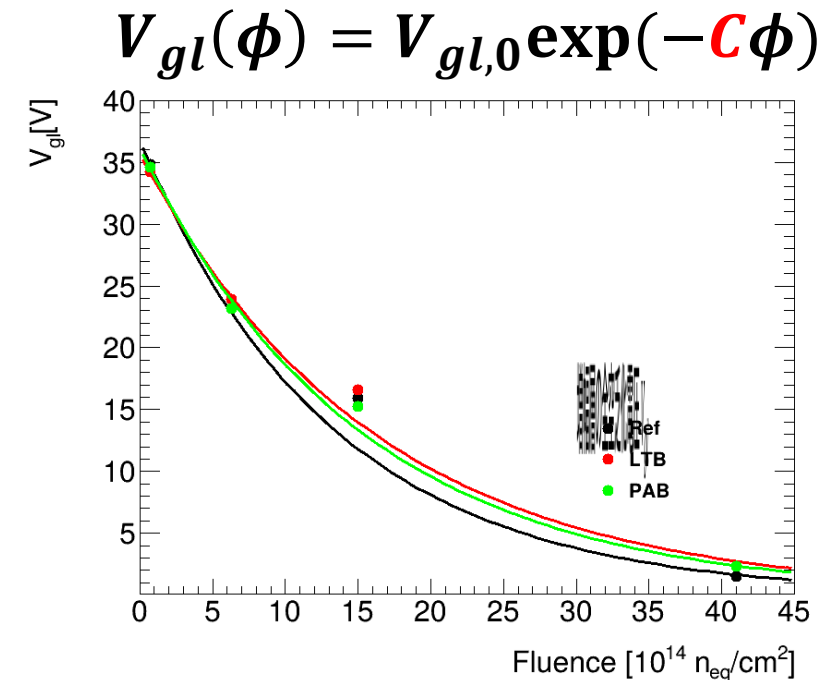
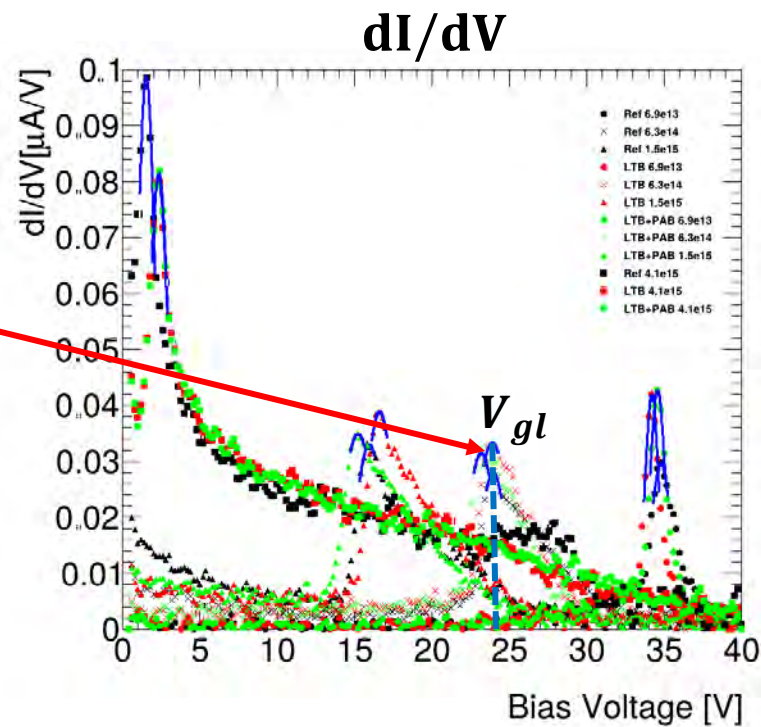
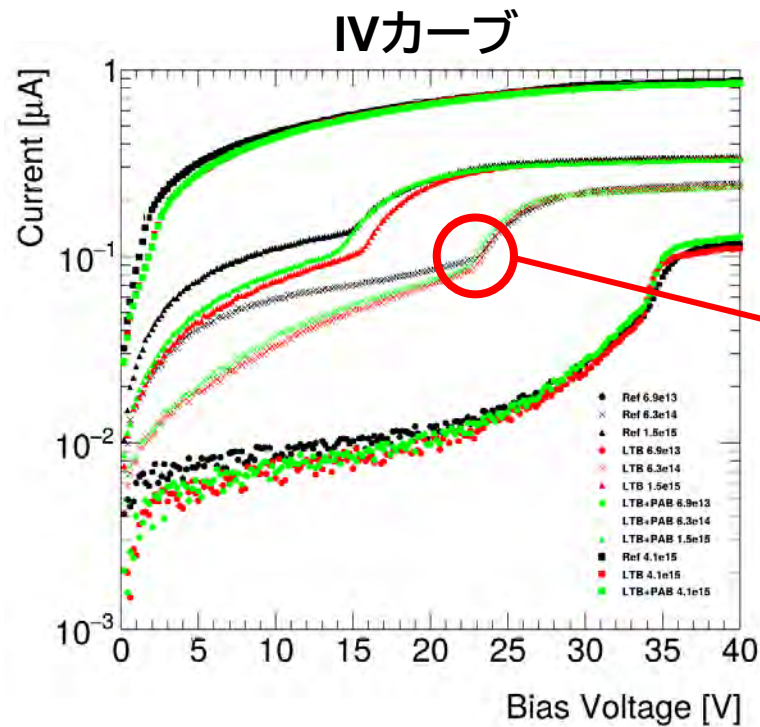


## ■ 未照射からの運転電圧上昇幅



- 異なる酸素量のサンプルで放射線耐性の違いが見られない  
⇒  $B_iO_i$  がアクセプターリムーバルの主要因ではない可能性

# 増幅層の全空乏化電圧 $V_{gl}$

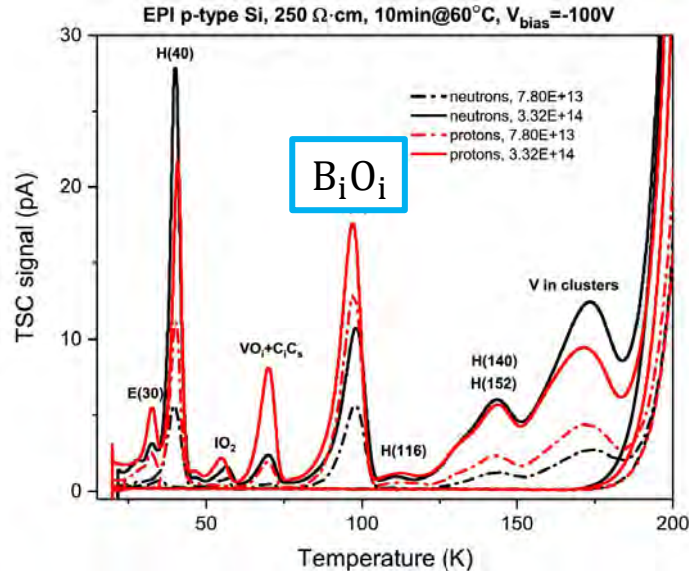


- $\frac{dI(V_i)}{dV}$  は、 $V_{i-2}, V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, V_{i+2}$  のデータを線形フィットして求める
- $dI/dV$  のピークをガウスフィットし、ゲイン層の空乏化電圧  $V_{gl}$  を求める
- $V_{gl}$  の照射量依存性は  $V_{gl}(\phi) = V_{gl,0} \exp(-C\phi)$  でフィット

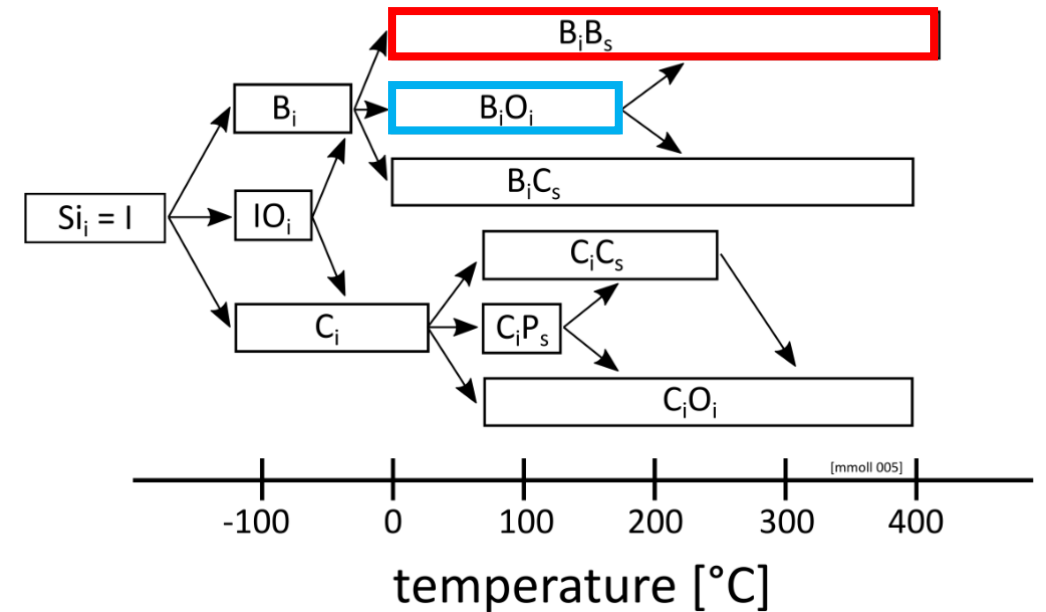
Type	C [ $10^{-16} \text{cm}^2/n_{eq}$ ]
Ref	$7.573 \pm 0.001$
LTB	$6.262 \pm 0.001$
PAB	$6.643 \pm 0.001$

# 考察

- $B_iO_i$  がアクセプターリムーバルの原因という結果は、アクセプター濃度が  $0(10^{12})\text{cm}^{-3}$  のp型センサーから得られたもの



■ epi p型Si センサー(250Ωcm)の照射後TSCスペクトル



■ 格子間シリコンと不純物の反応過程

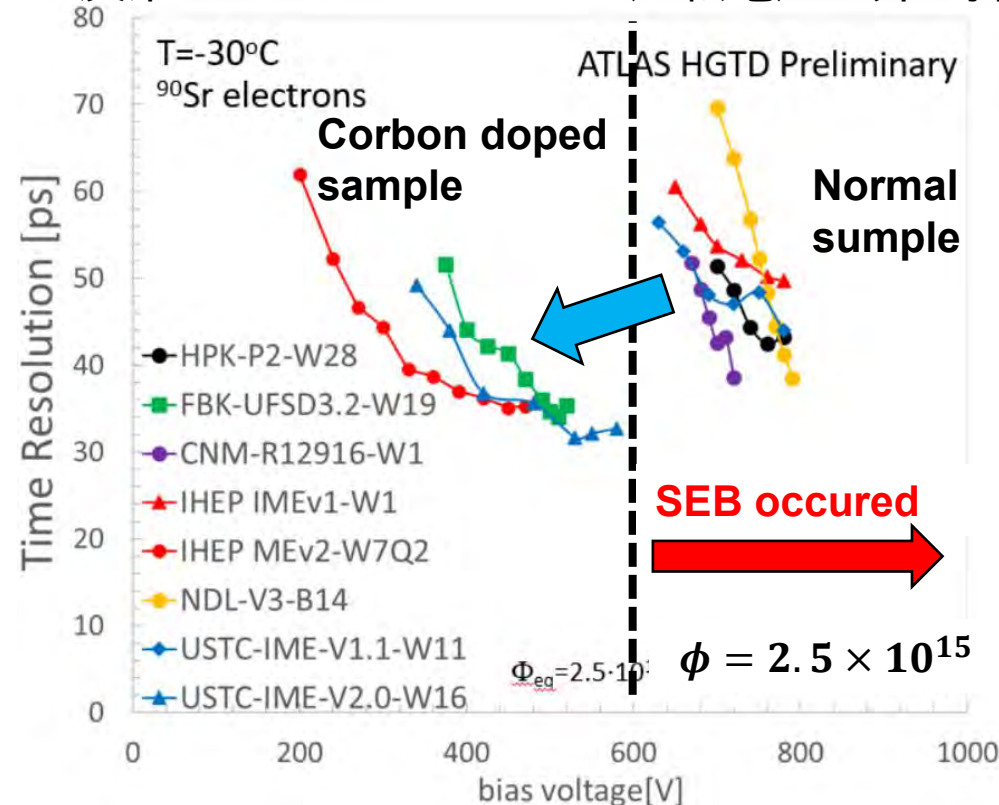
- しかし、LGADのp+層のアクセプター濃度は  $0(10^{16})\text{cm}^{-3}$   
⇒ ホウ素の量が  $10^4$  倍も異なる
- したがって、LGADのp+層では、 $B_iO_i$  以外の欠陥準位(e.g.  $B_iB_s$ ) が支配的?

- Y.Gurinskaya et al., Radiation damage in p-type EPI silicon pad diodes irradiated with protons and neutrons, NIMA, in press. 2019.
- L.C. Kimerling et al., Interstitial defect reactions in silicon, Materials Science Forum Vols. 38-41(1989) pp 141-150

# 炭素注入法

- 炭素ドーピングがアクセプターリムーバルを抑制することが知られている
  - 炭素ドーピングLGADの放射線耐性は  $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  以上
- 酸素によるドナーリムーバルの抑制の可能性がある

## ■ 炭素ドーピングサンプルによる運転電圧上昇の抑制

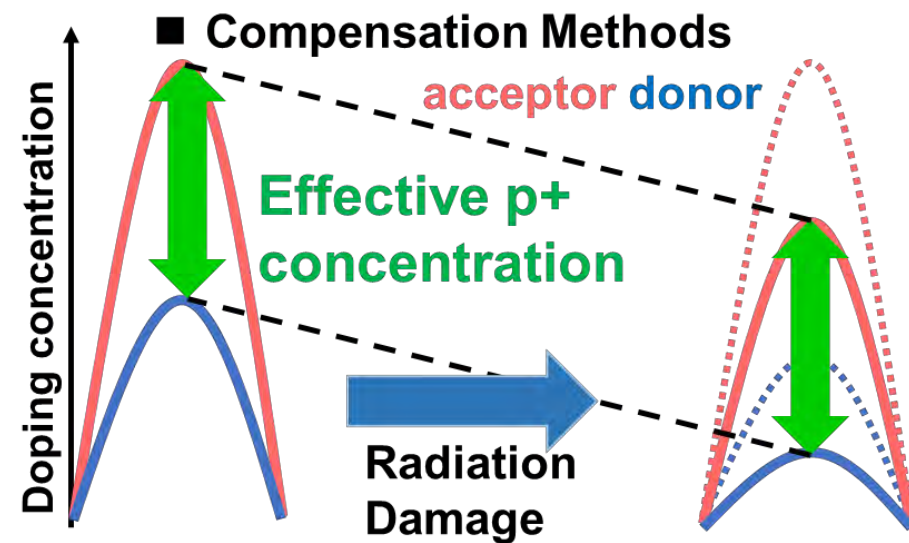
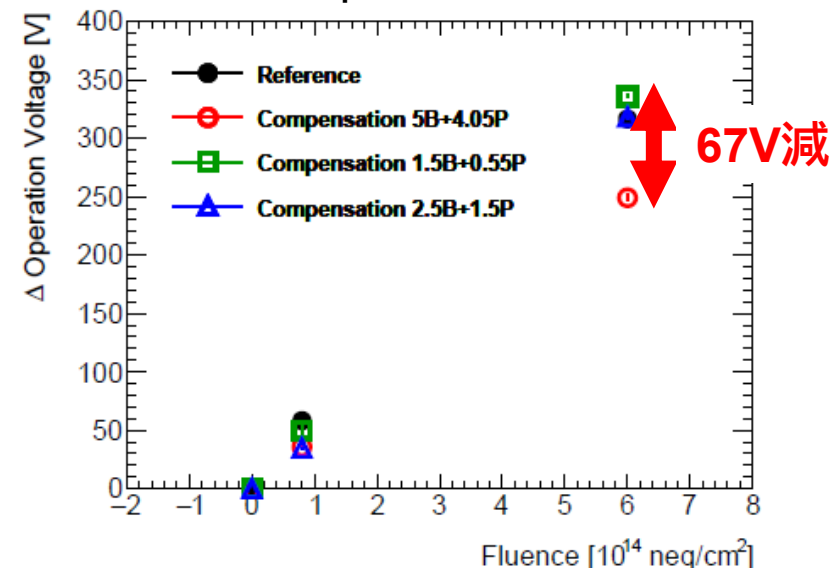




# Compensation + Carbon法

- アクセプターリムーバルの抑制は非常に困難
  - 唯一の方法は炭素ドーピング
- 別のアイデアとして、p+層にアクセプターとドナーの両方をドーピング(Compensation法)
- 実効p+濃度の低下を抑制するには、
  - ✓アクセプタリムーバルの抑制
  - ✓ドナーリムーバルの促進が必要
- 炭素ドーピング&酸素濃度低減サンプルに、Compensation法を適用

■ 過去のCompensationサンプルの結果



# 作成サンプル

No.	サンプル名	条件
1	B (Reference)	酸素コンタミなしの通常サンプル(p+にBのみドーピング)
2	Compensation	p+層にBとPを2対1でドーピング
3	Compensation+O	酸素コンタミありサンプルに, Compensationを適用
4	B+C	1サンプルに炭素注入
5	B+C+O	酸素コンタミありのサンプルに炭素注入
6	Compensation+C	2のサンプルに炭素注入

}

- 2と3の比較から, 酸素によるドナーリムーバルの影響を
- 2と6の比較から, 放射線耐性向上の有無を調べる
- サンプルは11月に照射済み⇒今後測定予定



# まとめ

---

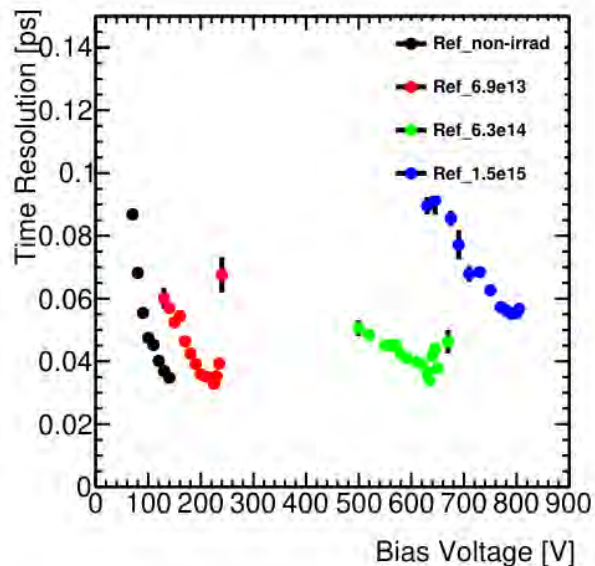
- アクセプターリムーバル抑制のために
  - 酸素濃度低減サンプル
  - 酸素濃度低減PABサンプル
- センサー中の酸素濃度はアクセプターリムーバルにほとんど影響なし  
⇒ 高ホウ素環境下では、 $B_iO_i$ ではなく $B_iB_s$ がアクセプターリムーバルの主要因となる可能性
- 改善案としてはCompensation+炭素ドープ法
  - 炭素ドープ⇒アクセプタリムーバル減速
  - 酸素低減⇒ドナーリムーバル加速
  - 11月に照射済み、今後測定予定

# Back up

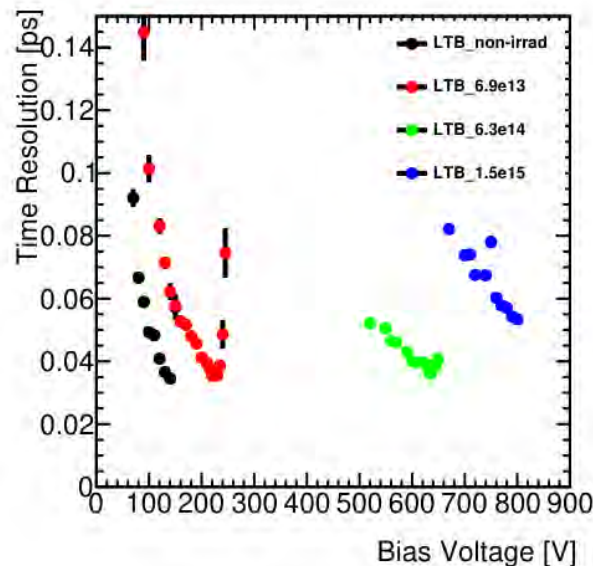
# 印加電圧依存性

## Reference

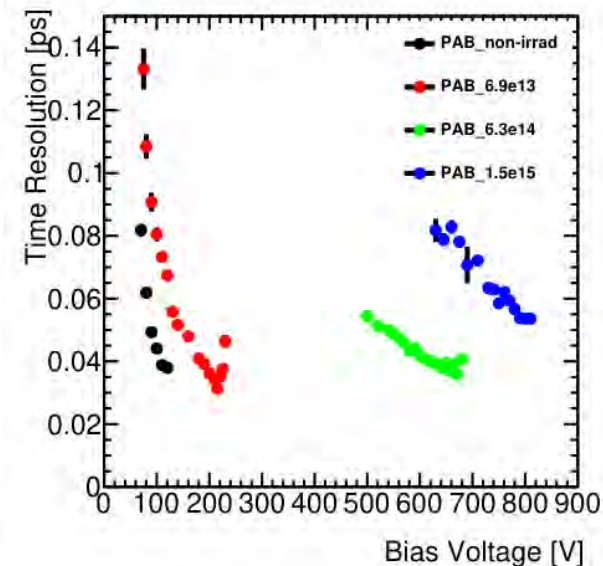
時間分解能



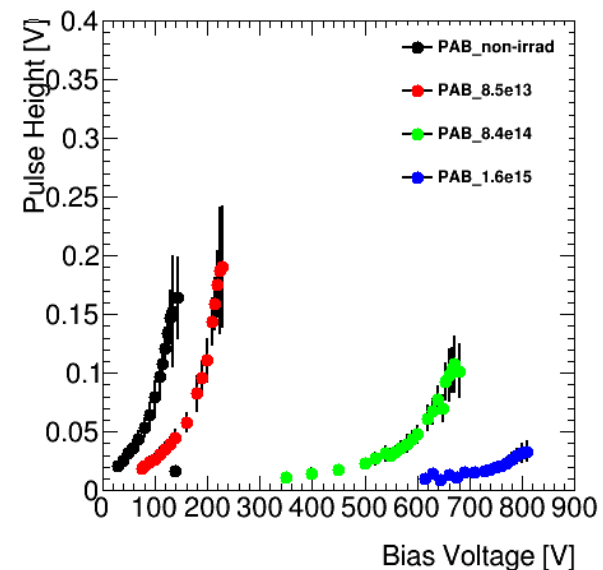
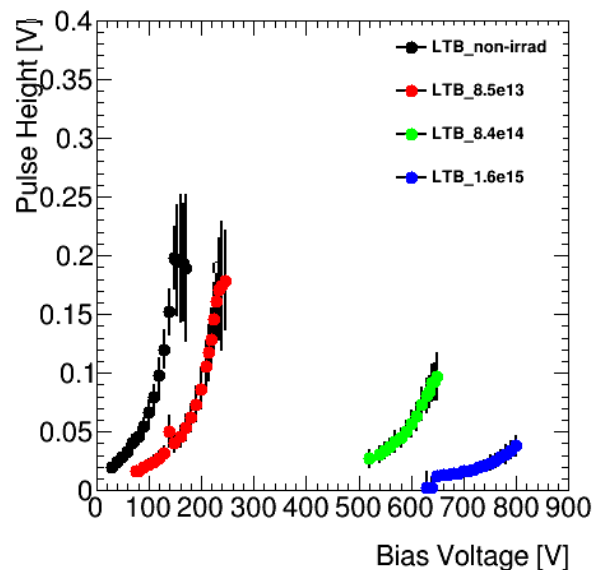
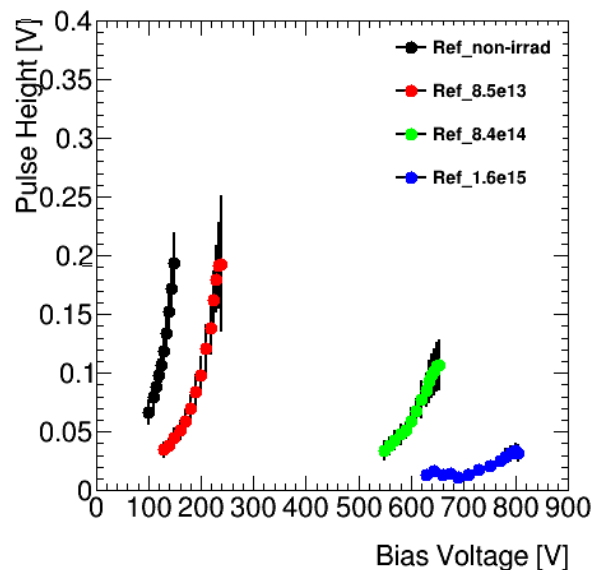
## Low Thermal Budget



## LTB+PAB



信号波高



# Single Event Burnout

- 放射線損傷⇒運転電圧の上昇
  - ある程度までは運転電圧を上げれば性能はある程度維持
- 電場が平均12V/ $\mu\text{m}$ 以上となる電圧を印加時に発生
- 厚み50 $\mu\text{m}$ の場合600V以上の印加で生じる



## ➤ SEBのメカニズム

粒子通過で電子正孔対が生成

⇒電子正孔対が高電場により加速

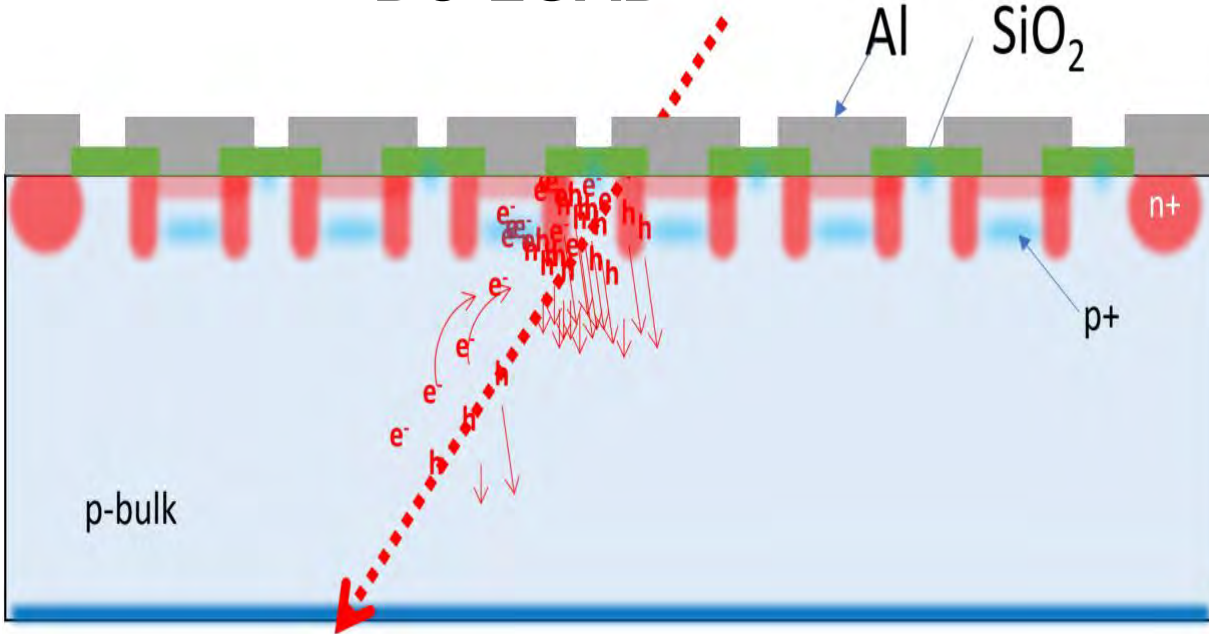
⇒局所的に大電流が発生

⇒熱破壊

## ■ SEBが生じたときのLGAD表面の写真

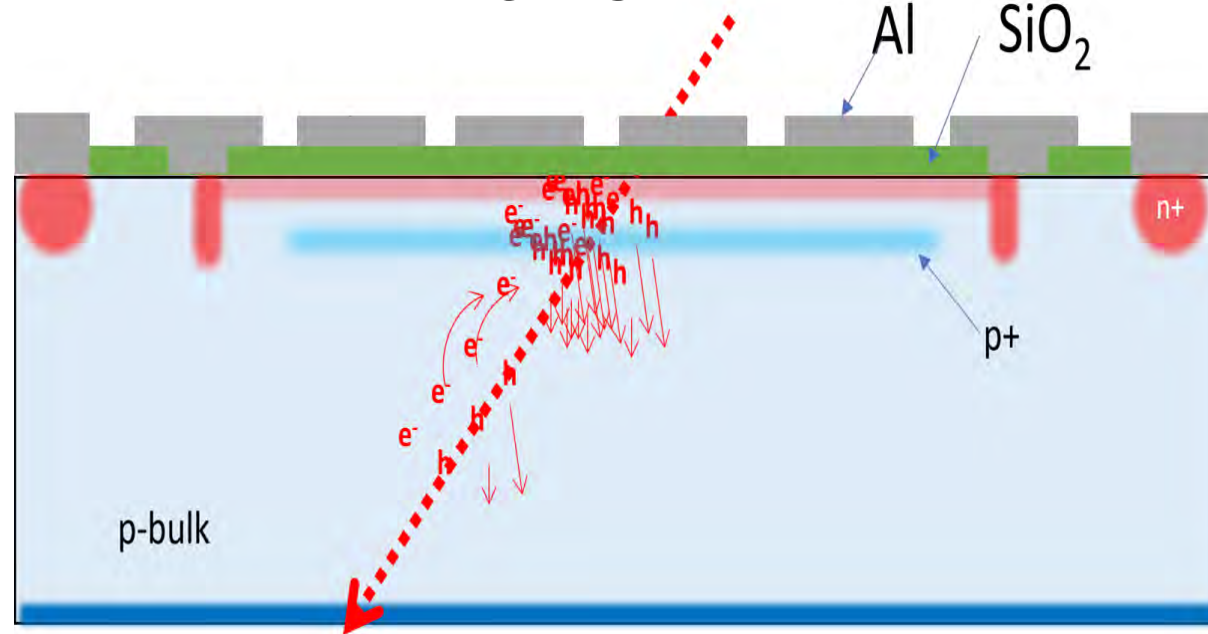
# DC-LGADとAC-LGAD

## DC-LGAD



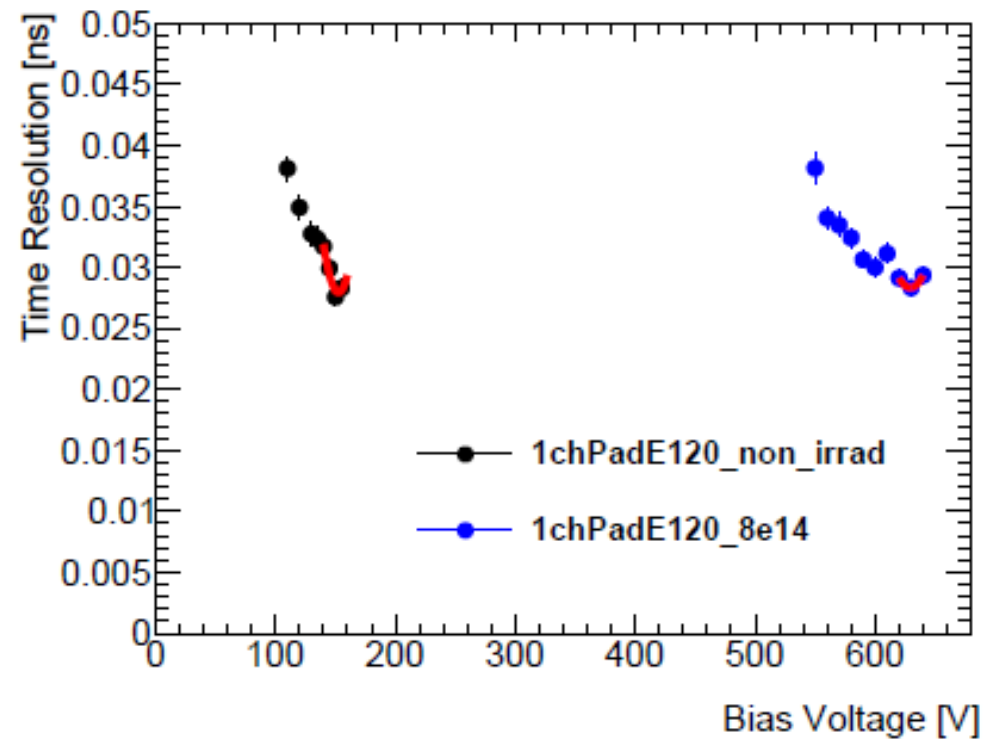
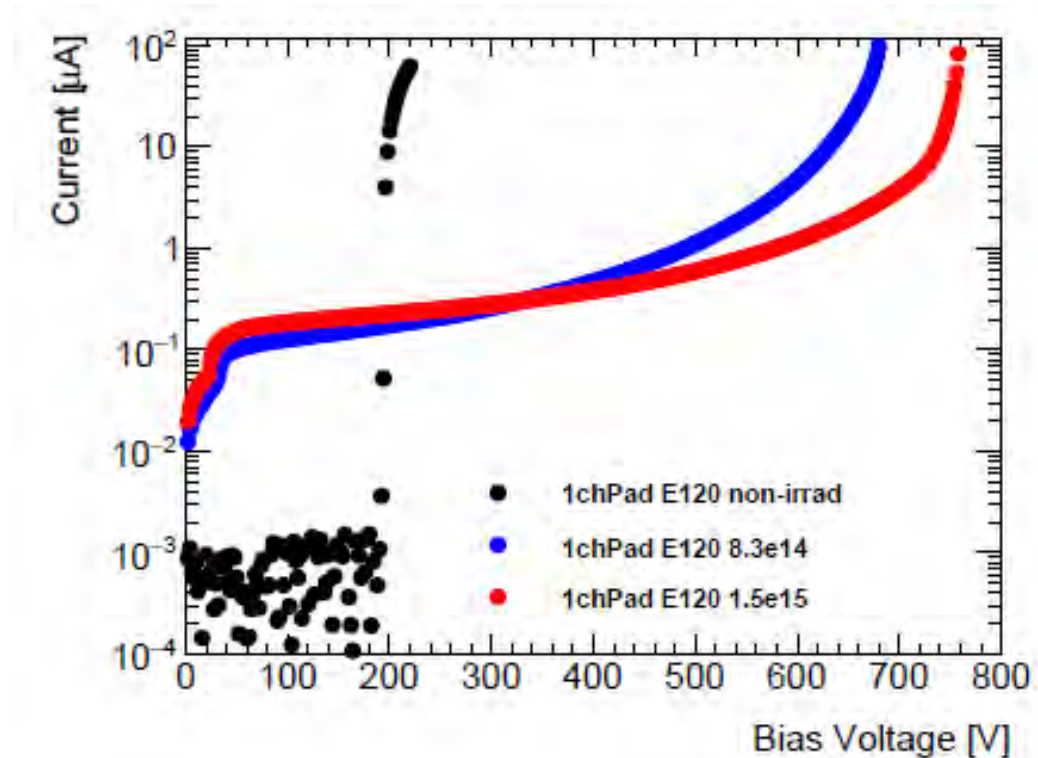
- 信号をDC的に読み出し
- 読み出し電極一つ一つに増幅層を設置
  - 不感領域が多く、検出効率が悪い

## AC-LGAD



- 信号は酸化膜を介してAC的に読み出し
  - 増幅層を酸化膜の下に一様に設置
    - 不感領域の問題は解決する
    - 一方でクロストークが増える
- ⇒n+抵抗と酸化膜厚を適切に調節

# AC-LGADの結果



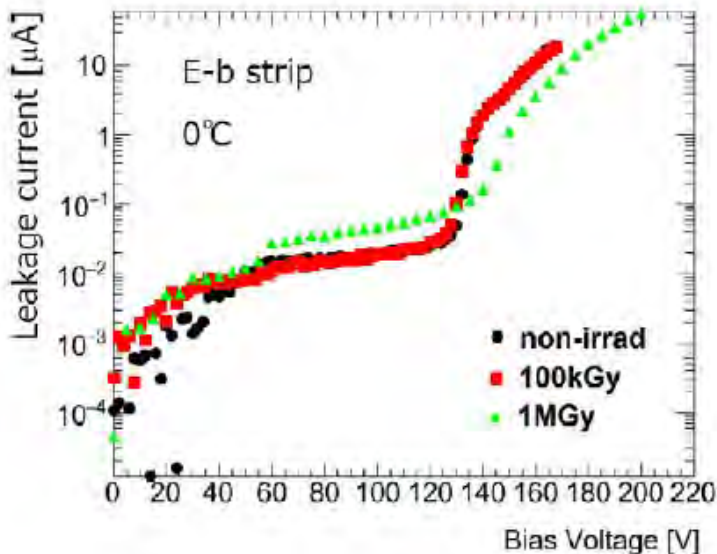
## ■ AC-LGAD 1chPad E120の照射前後の変化

- DC-LGAD同様AC-LGADも照射によって運転電圧が上昇
- 運転電圧以外にもクロストークや時間分解能、位置分解能等の影響の評価が必要

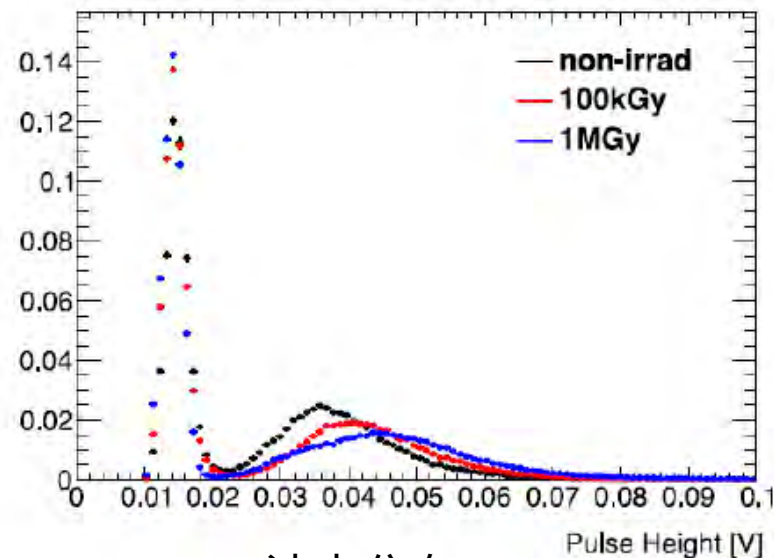


# TID損傷の影響

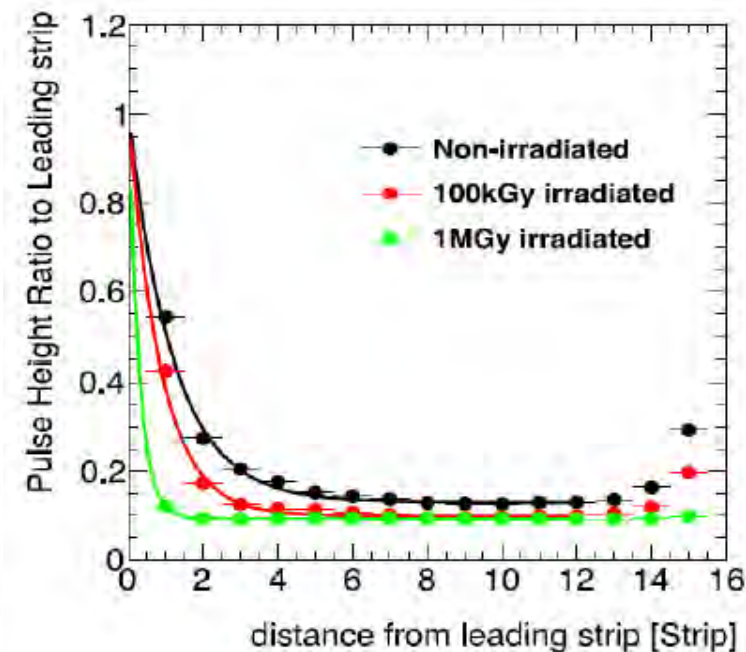
## ■ AC-LGADのTID損傷



IVカーブ



波高分布



クロストーク

- Co60を用いたガンマ線照射によるTID損傷の評価
- TID損傷で正孔が蓄積 $\Rightarrow$ n++抵抗が増加 $\Rightarrow$ クロストーク改善 $\Rightarrow$ アクセプターリムーバルの改善が重要

