

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^A, Leibniz University Hannover^B

村山 由亞, 中村 浩二^A, 堀越 一生, 佐藤 構二, 今村 友香^B, 北 彩友海



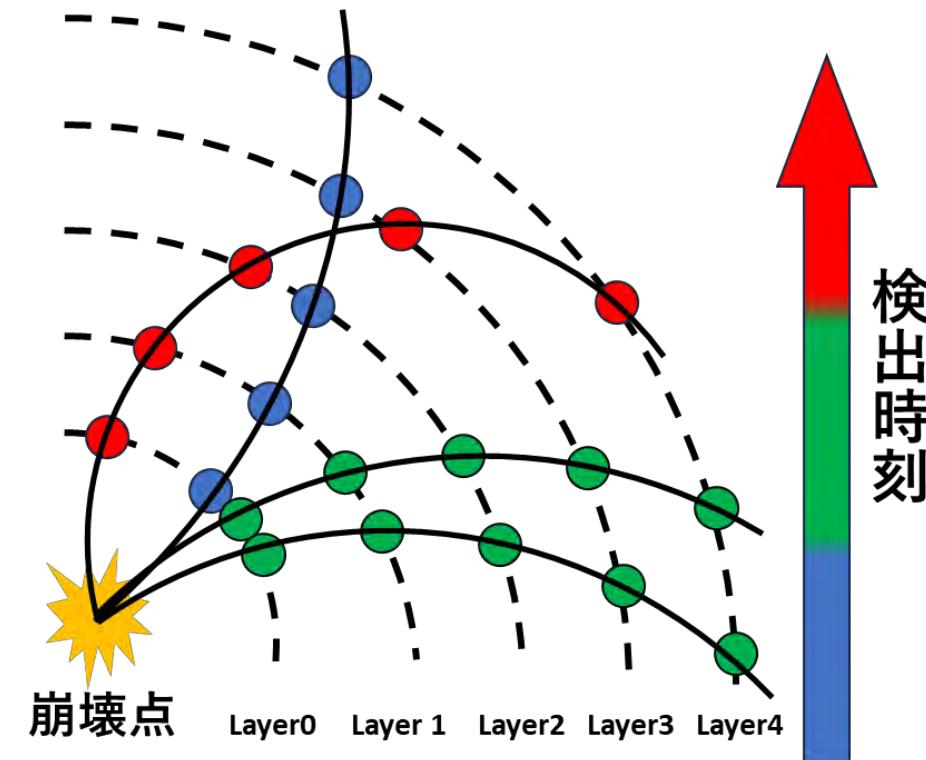
筑波大学
University of Tsukuba



Leibniz
Universität
Hannover

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

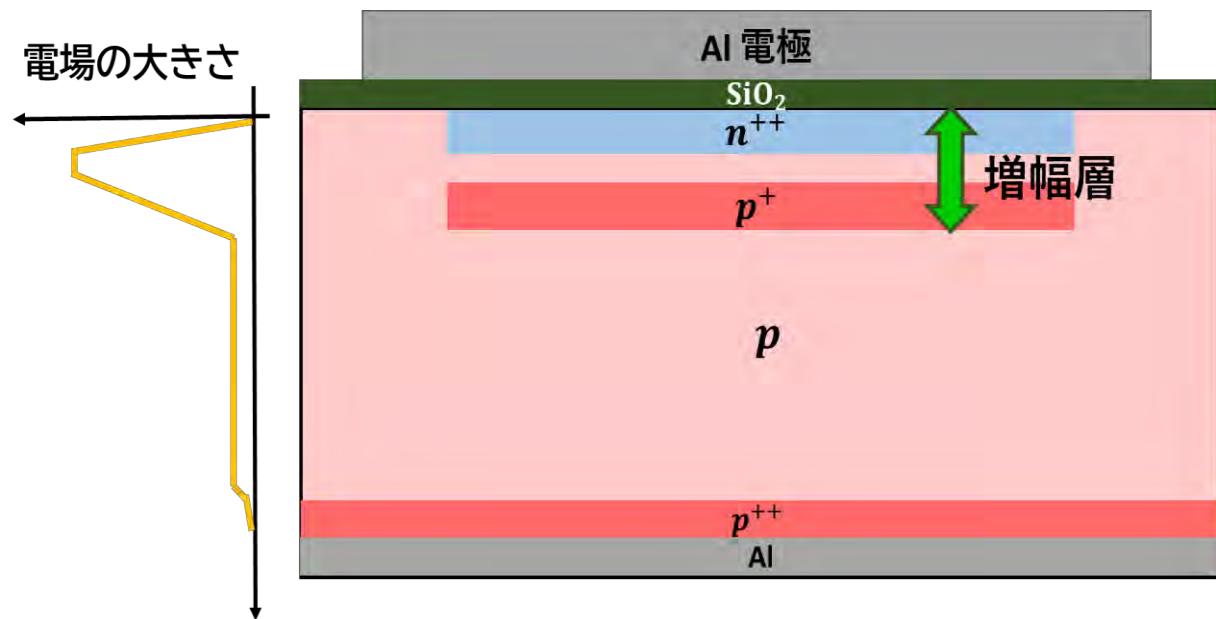


- 位置情報だけでなく時間情報も用いることで、崩壊点を識別可能
⇒パイルアップイベントの除去が可能
- 高い時間分解能の検出器は将来の加速器実験にとって非常に重要

■ 時間情報を用いて崩壊点を識別

Low-Gain-Avalanche-Diode(LGAD)

■ LGADの構造



- **LGAD(Low-Gain-Avalanche-Diode)検出器**
 - 追加でp+層をドープ⇒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)

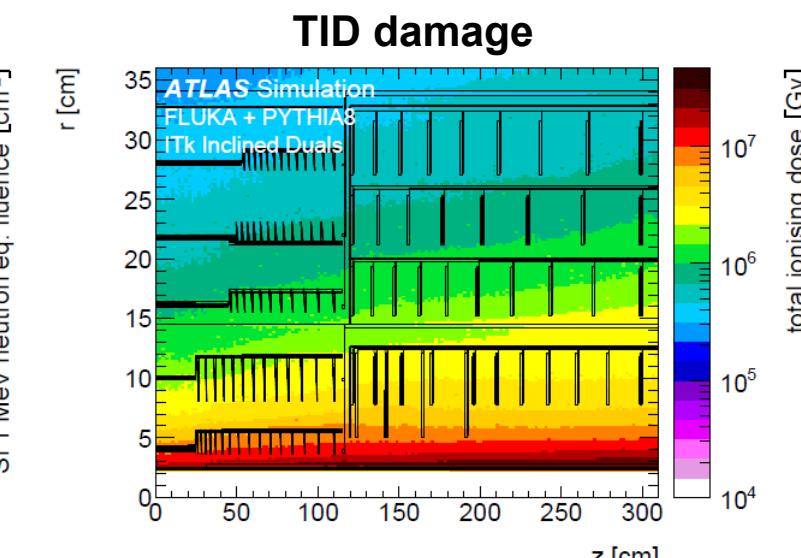
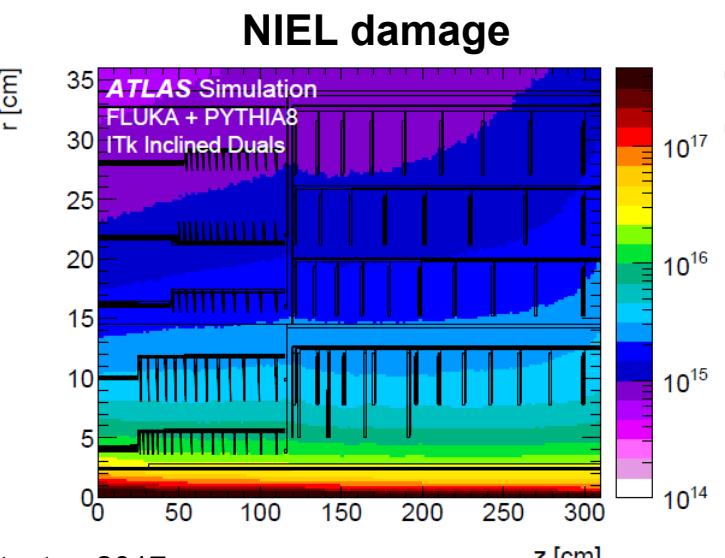
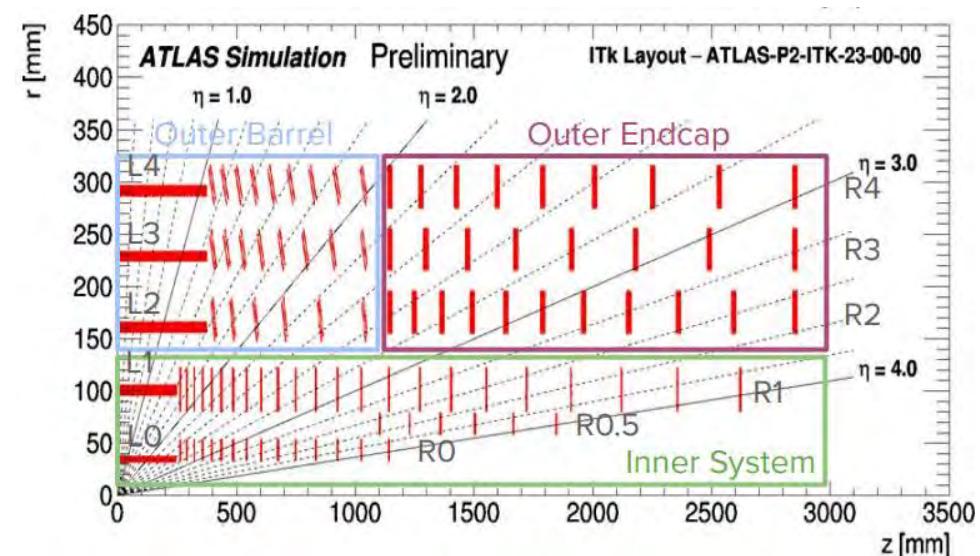
◆放射線耐性

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

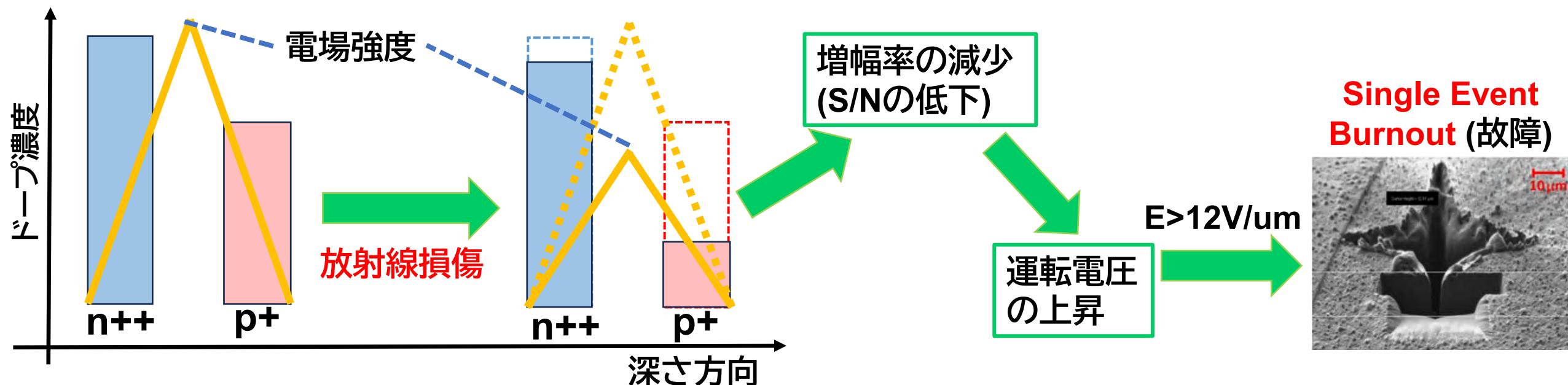
- 電離損傷:TID(Total Ionization Doze)
 - 電子正孔対が生成⇒移動度の小さい正孔が酸化膜に取り残される
 - 暗電流の増加、降伏電圧の上昇等に影響
 - 単位はGy
- 非電離損傷:NIEL(Non-Ionizing Energy Loss)損傷
 - 格子欠損が不純物準位(欠陥準位)を生成
⇒収集電荷量の低下や暗電流の増加
 - 損傷の度合い α エネルギー損失量と仮定(NIEL仮説)
 - 単位は n_{eq}/cm^2 (1MeV中性子換算)

アクセプター/ドナーリムーバル

- 放射線損傷 \Rightarrow 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、 ϕ : 照射量、 C_A, C_D : 不純物濃度減少係数

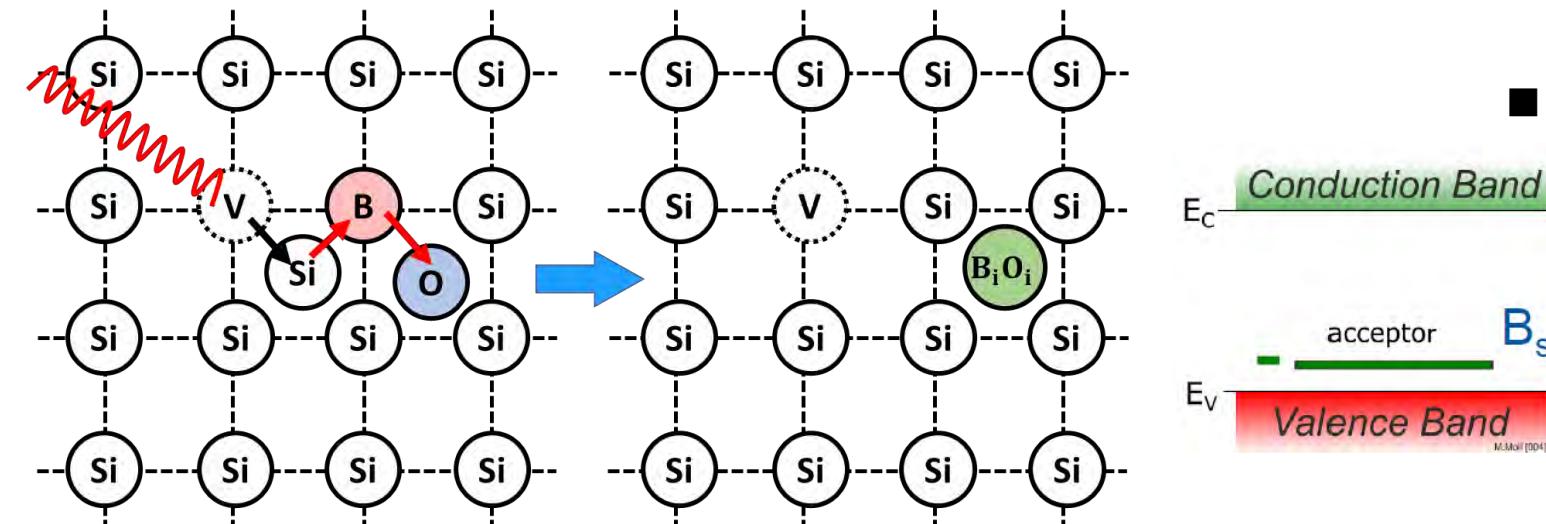


➤ L. Beresford, et al. Destructive breakdown studies of irradiated lgads at beam tests for the atlas hgtd. Journal of Instrumentation, Vol. 18, No. 07, p. P07030, 2023.

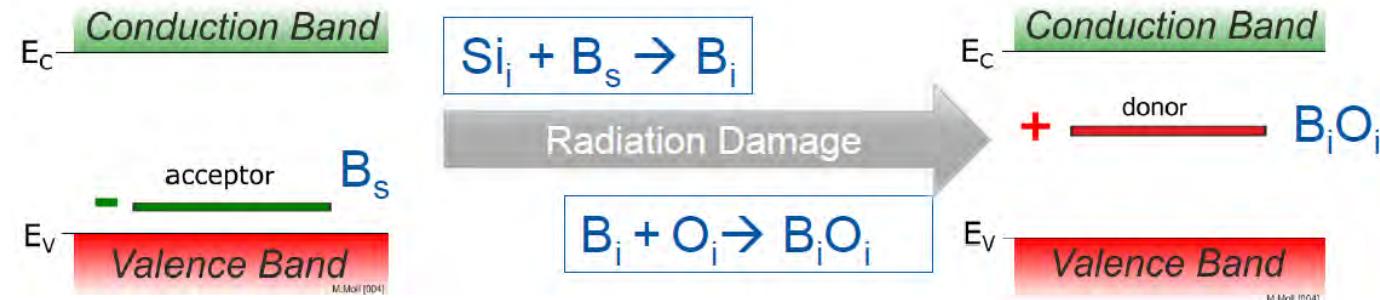
アクセプタリムーバルのメカニズム

- 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 (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. B_iO_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リムーバルの抑制が可能

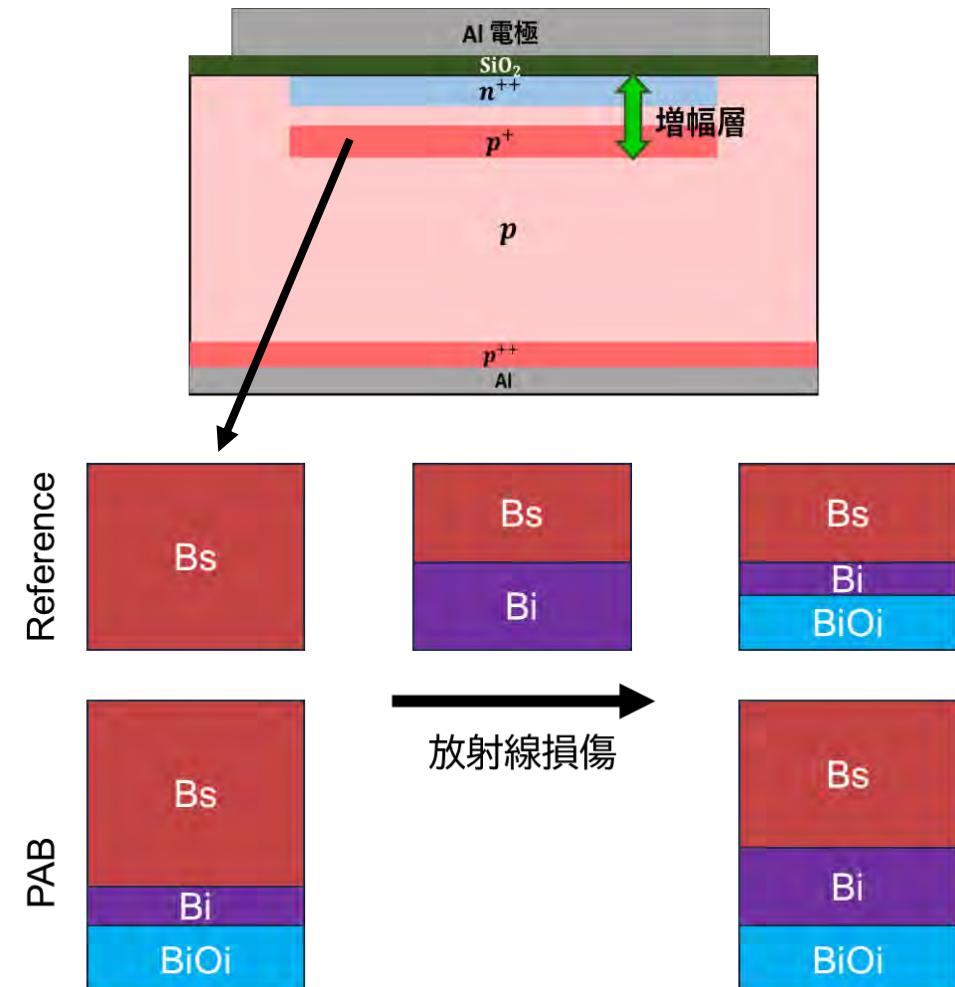
□ Partially Activated Boron法

- p+層に不活性ボウ素(B_i)を事前ドープ

⇒ $B_i + O_i \rightarrow B_iO_i$ 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

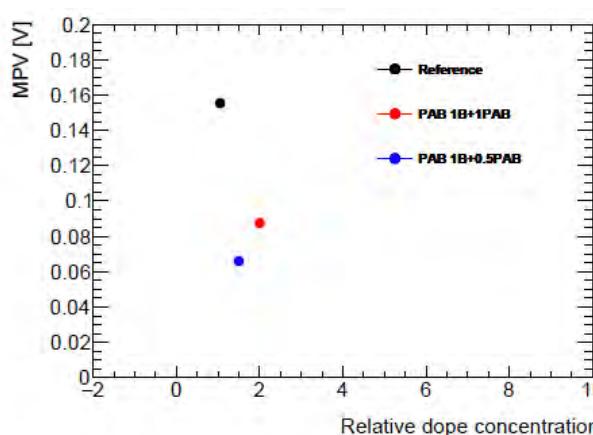
⇒ B_iO_i 形成の抑制



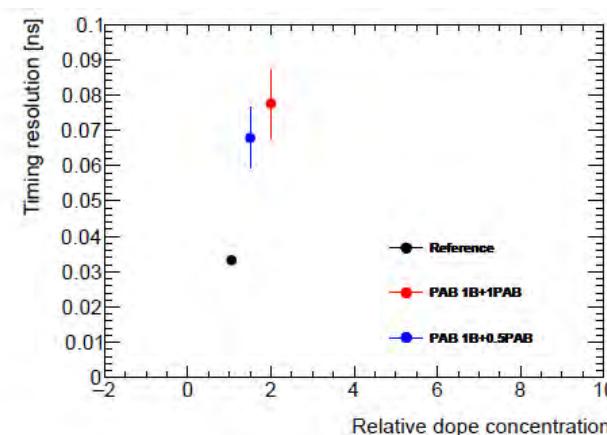
過去の結果[PAB(酸素濃度大)]

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

■ 性能のドープ濃度依存性



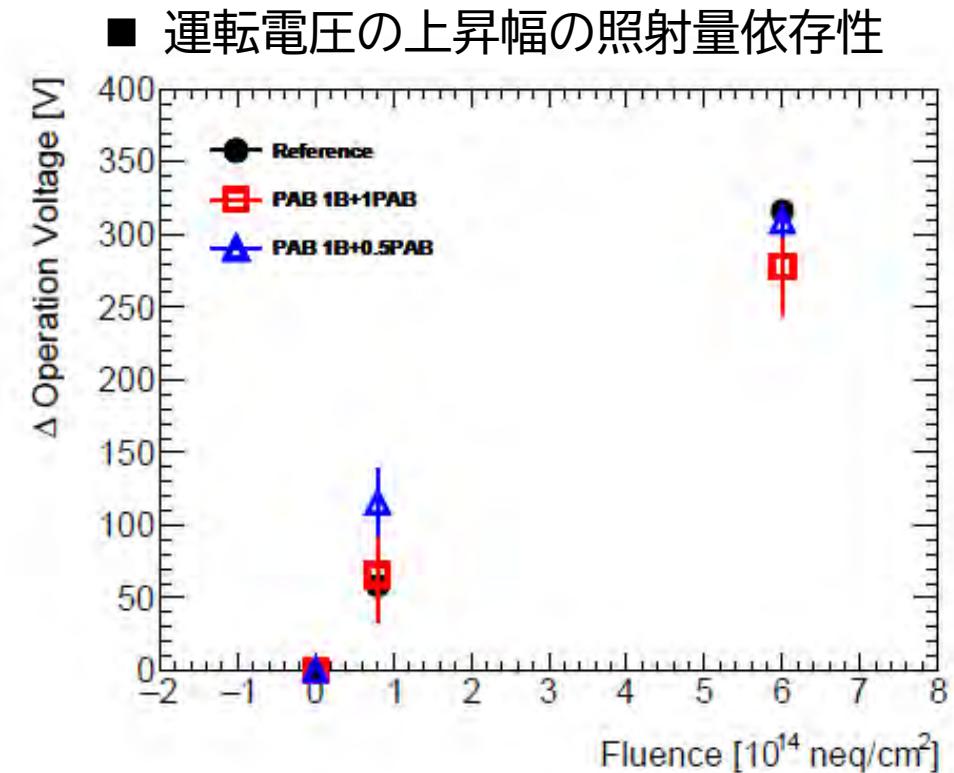
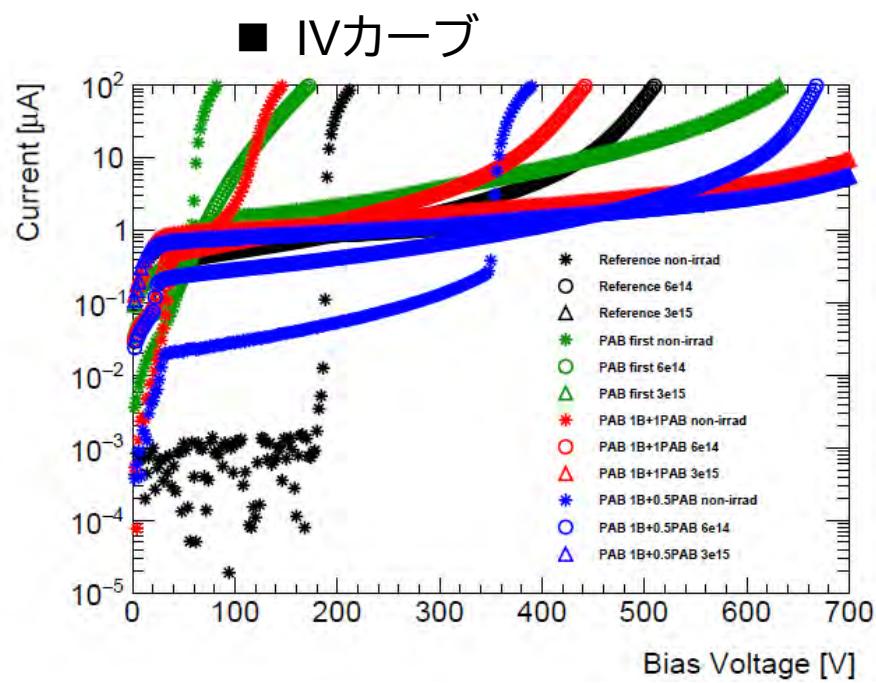
(a) MPV のドープ濃度依存性



(b) 時間分解能のドープ濃度依存性

- 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)]

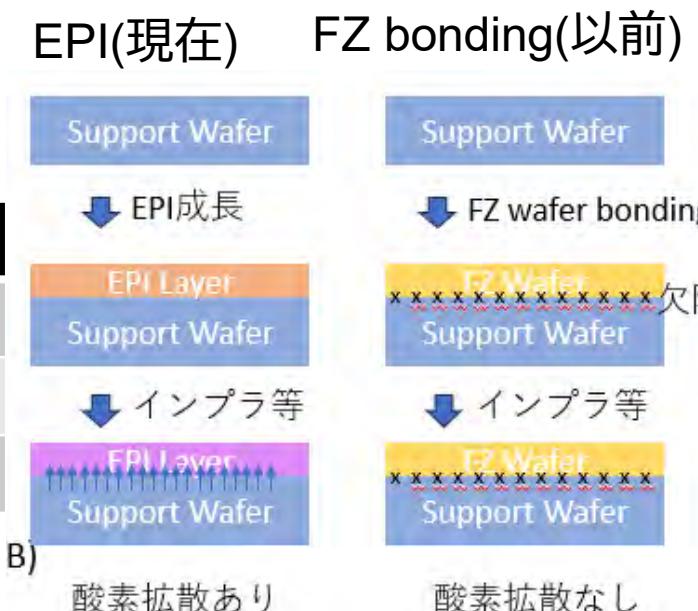


- 全サンプルで照射量増加に伴い運転電圧は増加
- 誤差の範囲で有意な改善は見られない
⇒このサンプルはセンサー中の酸素量が多いことが判明
 - 不活性ホウ素で使いきれる量をはるかに超えていた可能性

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
 - アニーリング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
 - アニーリング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

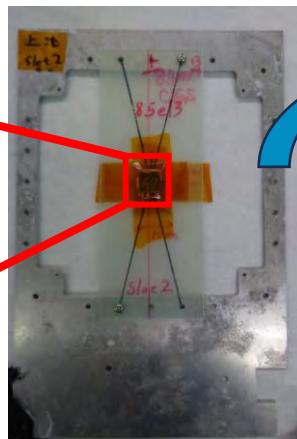
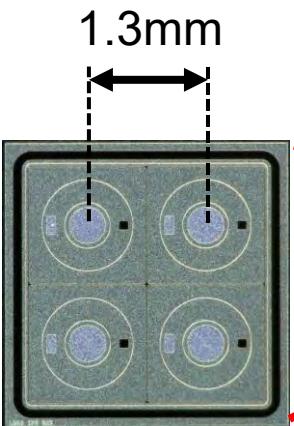
サンプル名	条件
Reference	従来通りの方法で作成(酸素コンタミあり)
Low Thermal Budget(LTB)	アニーリング工程をできるだけ削減(酸素コンタミなし)
LTB+PAB	酸素コンタミなしサンプルにPAB法を適用(酸素量極小)



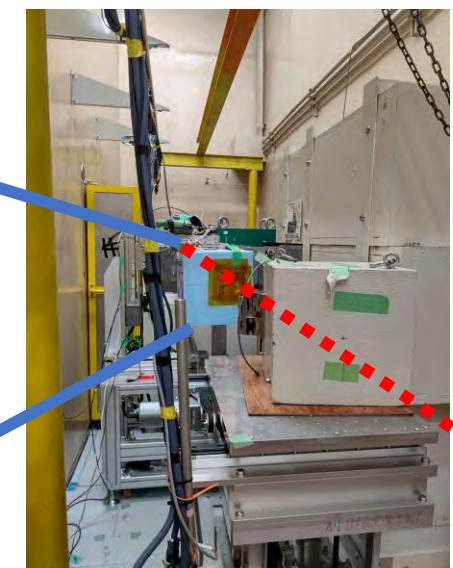
照射試験

- ・ 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



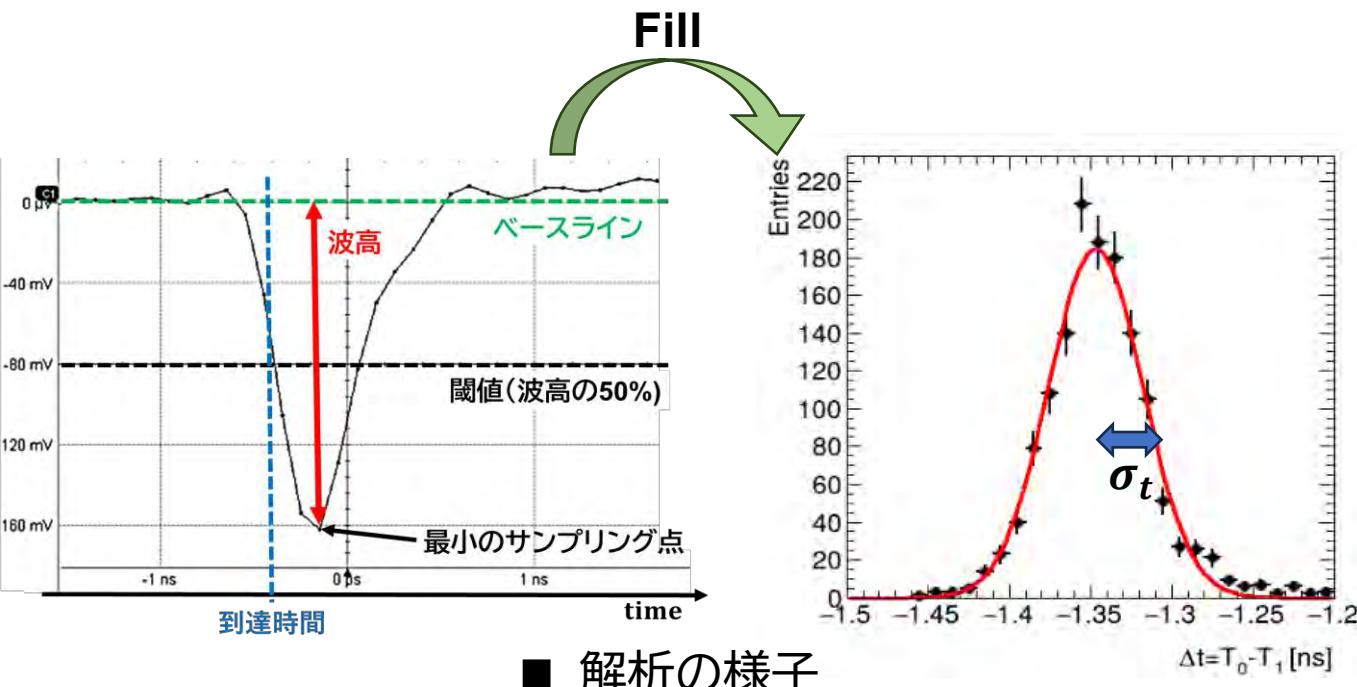
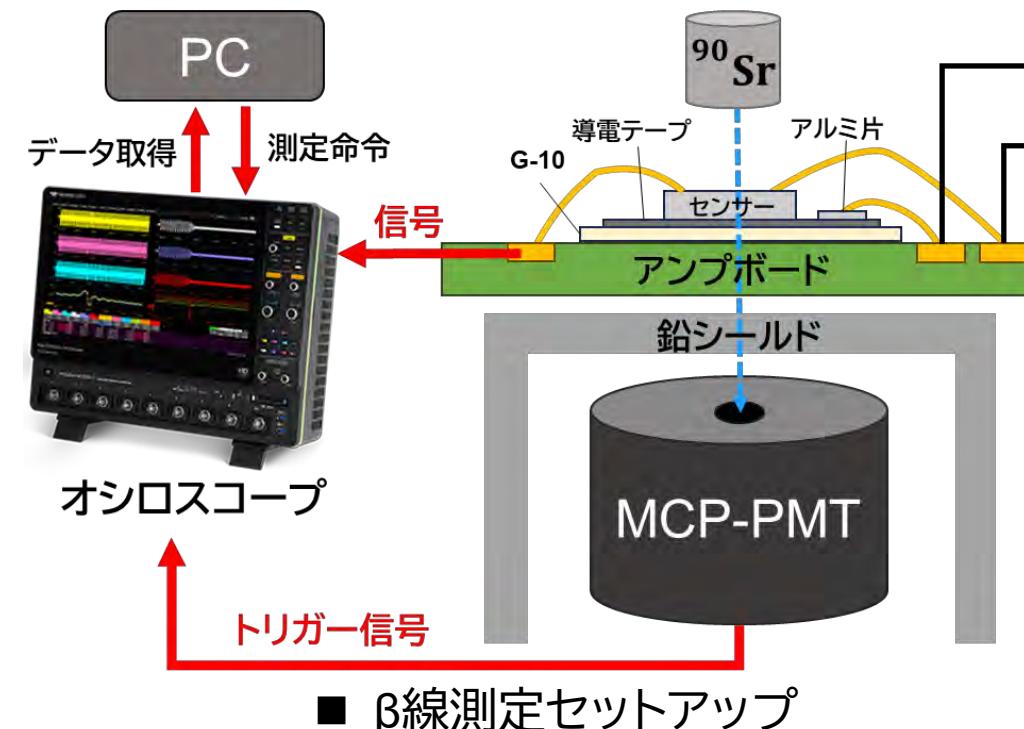
p



p

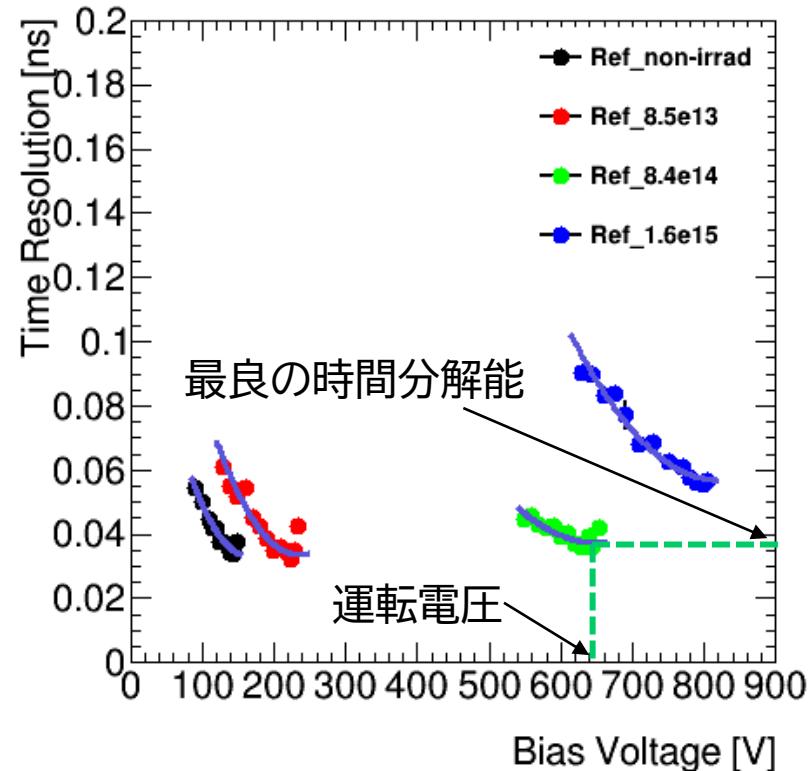
β線信号測定・解析方法

- ・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

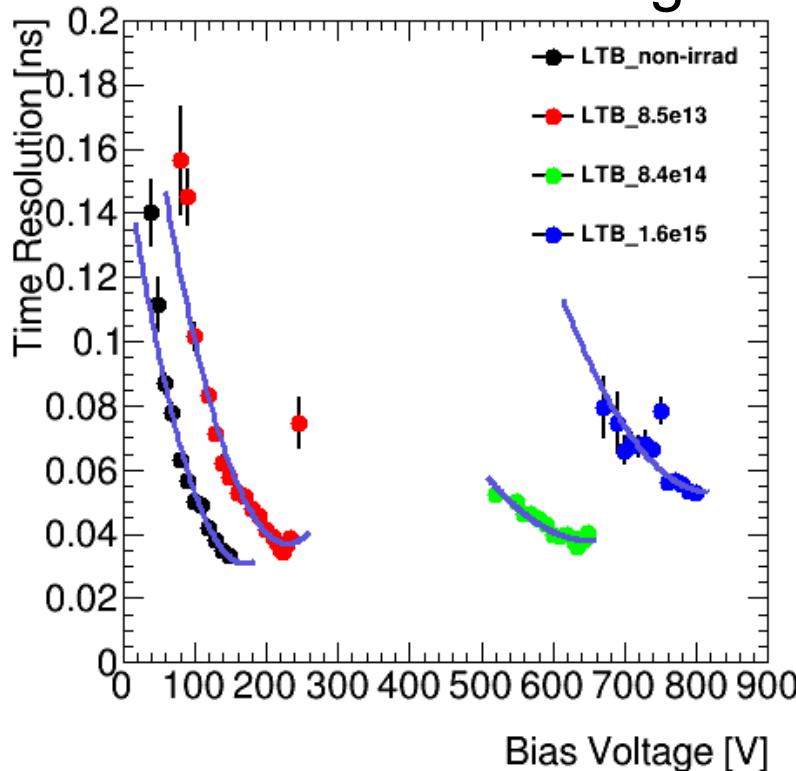


時間分解能の印加電圧依存性

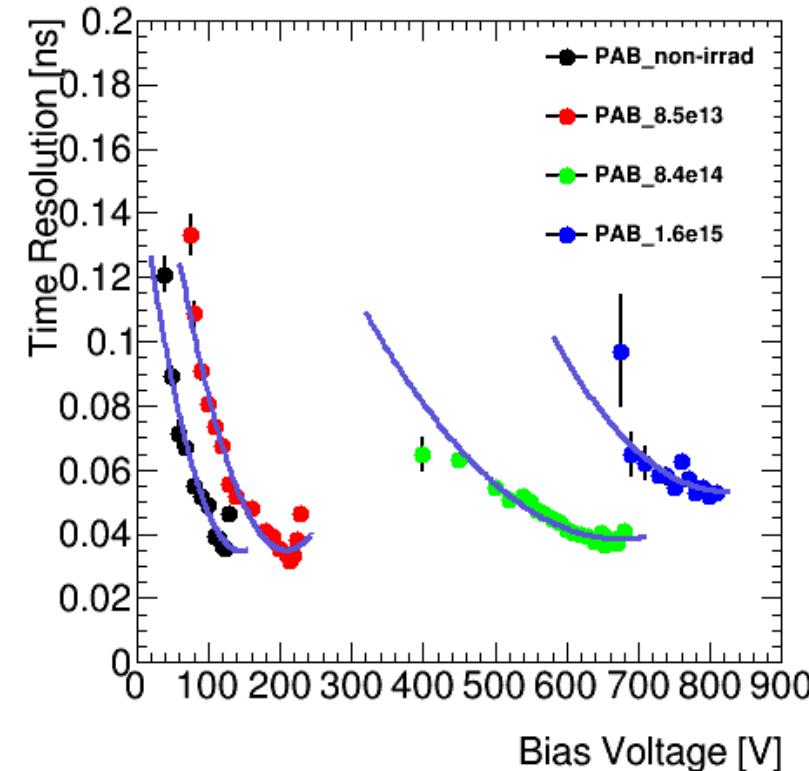
Reference



Low Thermal Budget



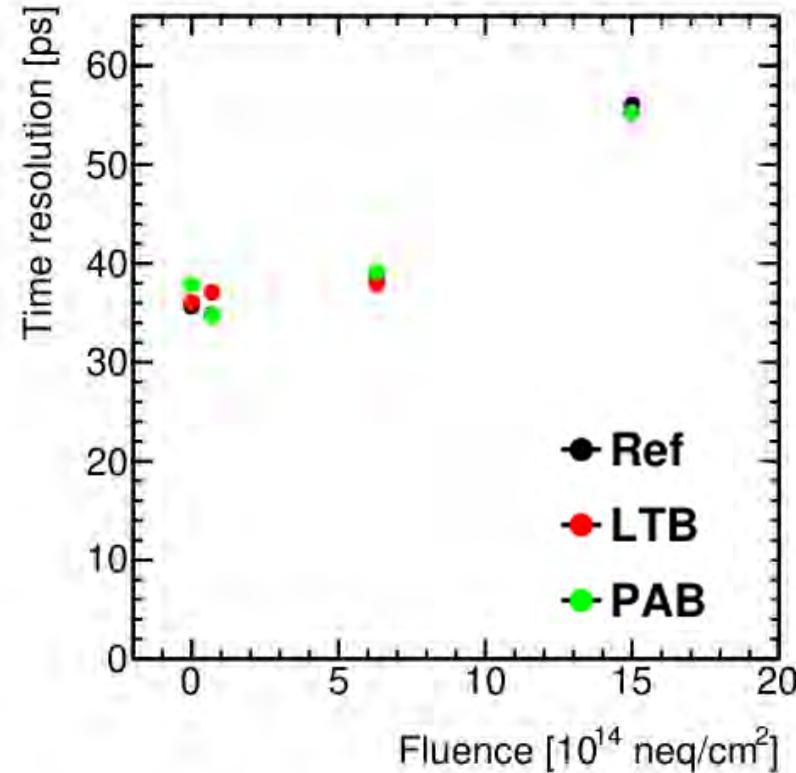
LTB+PAB



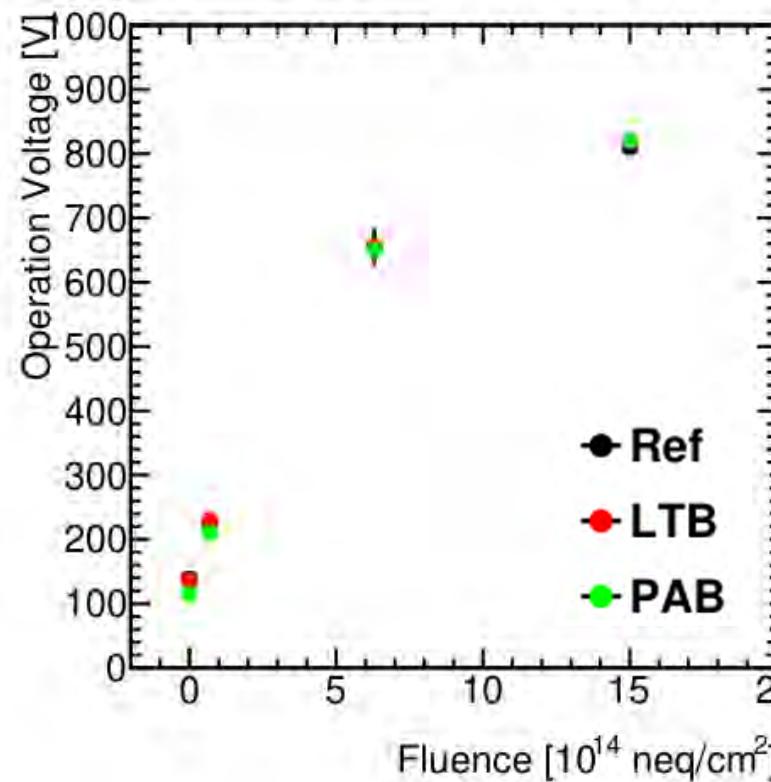
- 時間分解能の最小値付近を二次関数でFit
 - ✓ 最良の時間分解能 $\stackrel{\text{def}}{=}$ フィットで求めた最小値
 - ✓ 運転電圧 $\stackrel{\text{def}}{=}$ 最小値の時の印加電圧

照射量依存性

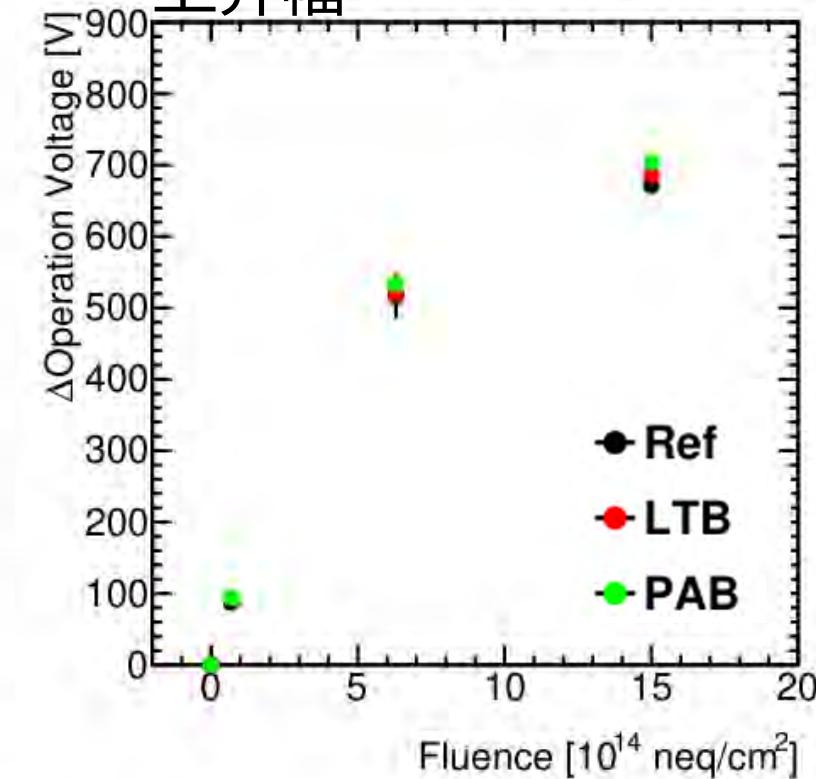
■ 最良の時間分解能



■ 運転電圧

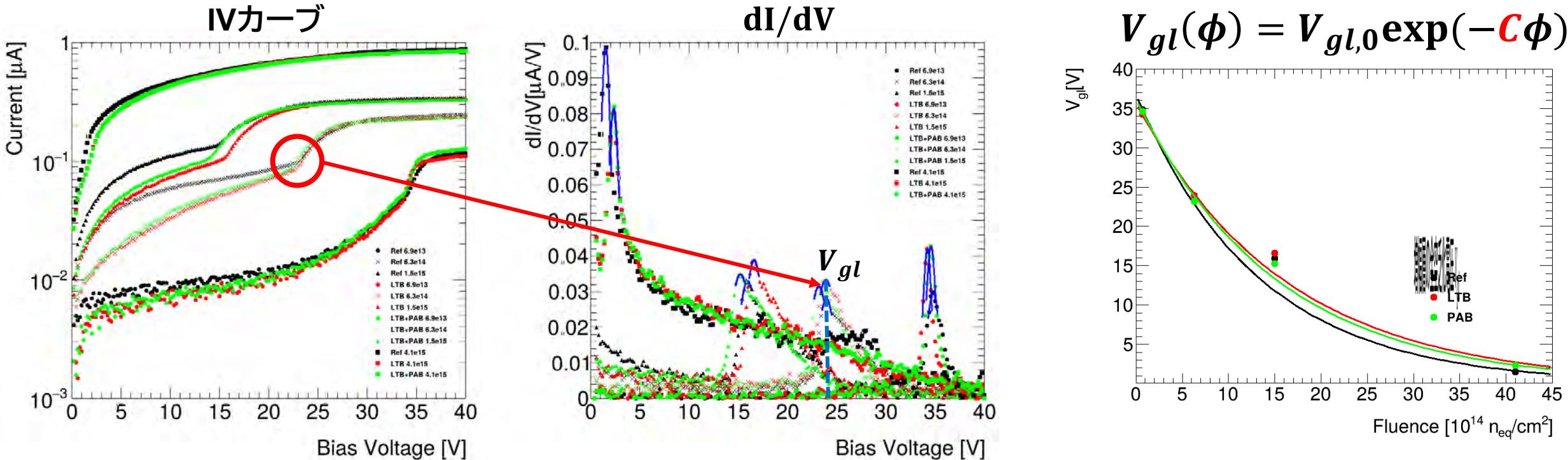


■ 未照射からの運転電圧上昇幅



- 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}

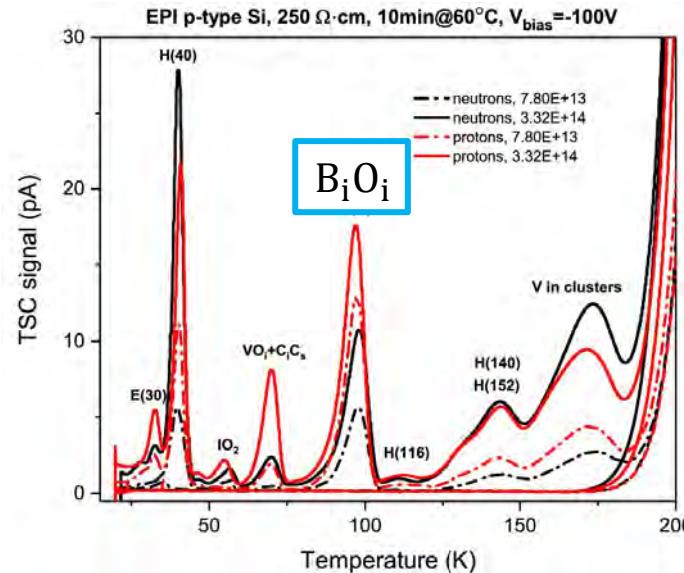


- $\frac{dI(V_i)}{dV}$ は、 $V_{i-2}, V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, V_{i+2}$ のデータを線形フィットして求める
- dI/dV のピークをガウスフィットし、ゲイン層の空乏化電圧 V_{gl} を求める
- V_{gl} の照射量依存性は $V_{gl}(\phi) = V_{gl,0} \exp(-C\phi)$ でフィット

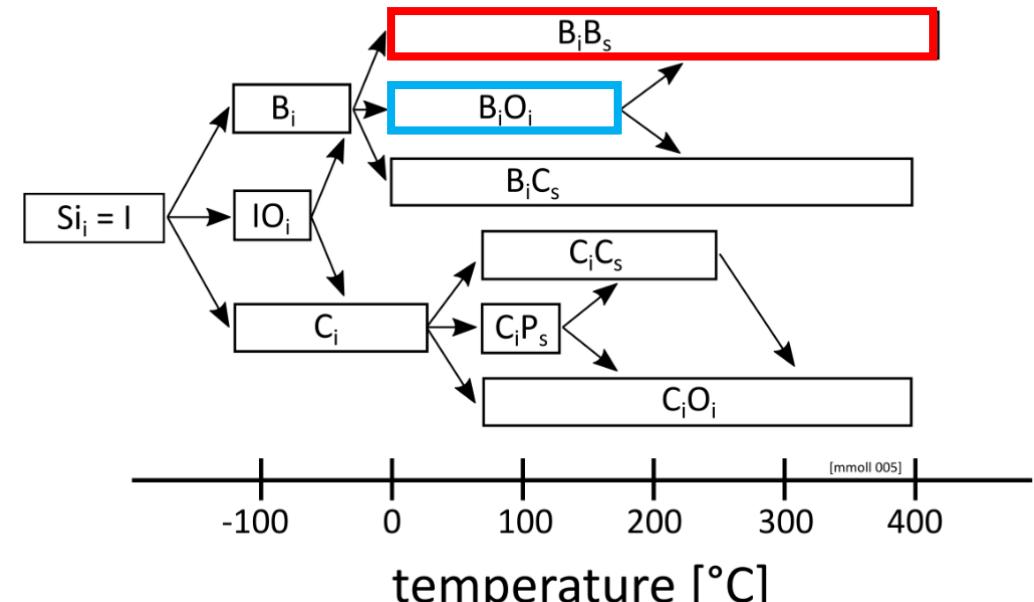
Type	$C [10^{-16} cm^2/n_{eq}]$
Ref	7.573 ± 0.001
LTB	6.262 ± 0.001
PAB	6.643 ± 0.001

考察

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



■ epi p型Si センサー($250\Omega\text{cm}$)の照射後TSCスペクトル



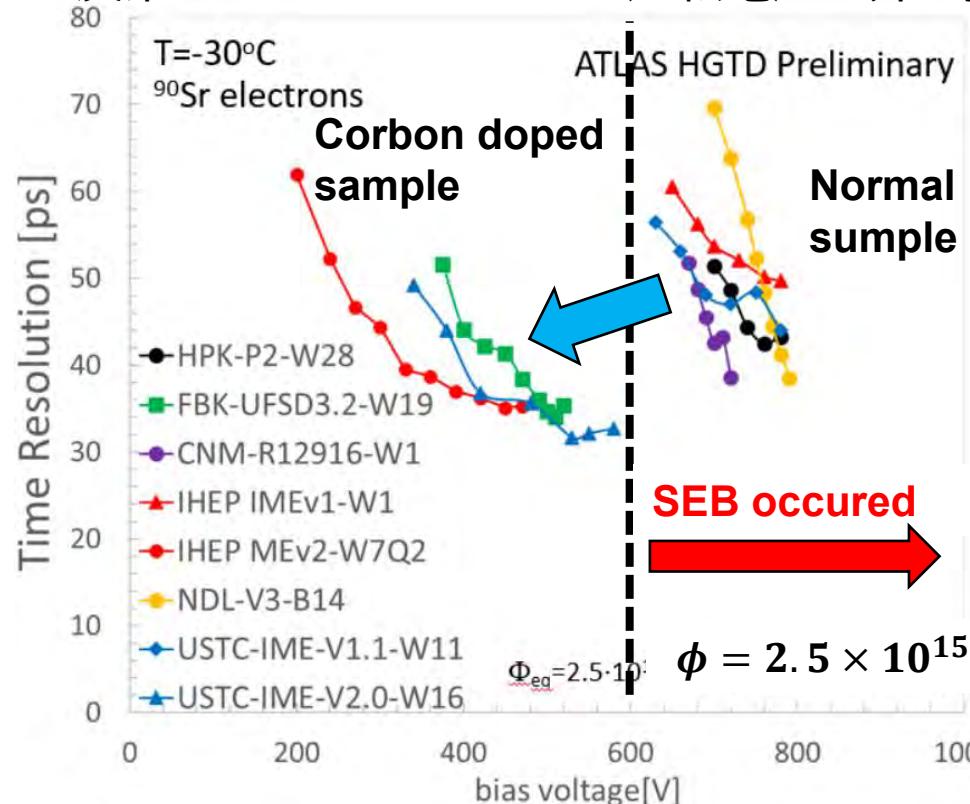
- しかし、LGADのp+層のアクセプター濃度は $O(10^{16})\text{cm}^{-3}$
⇒ ホウ素の量が 10^4 倍も異なる
- したがって、LGADのp+層では、 B_iO_i 以外の欠陥準位(e.g. B_iB_s)が支配的?

- Y.Gurimskaya 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

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

■ 炭素ドープサンプルによる運転電圧上昇の抑制

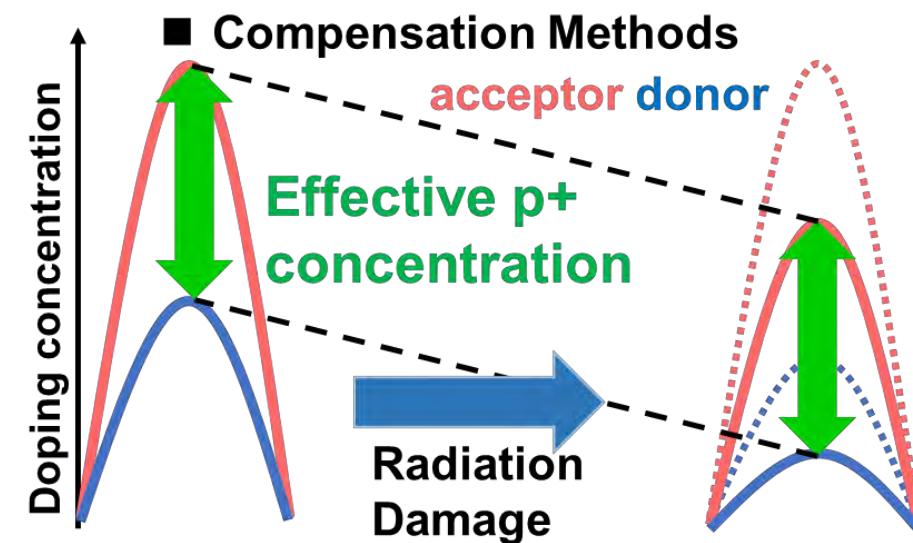
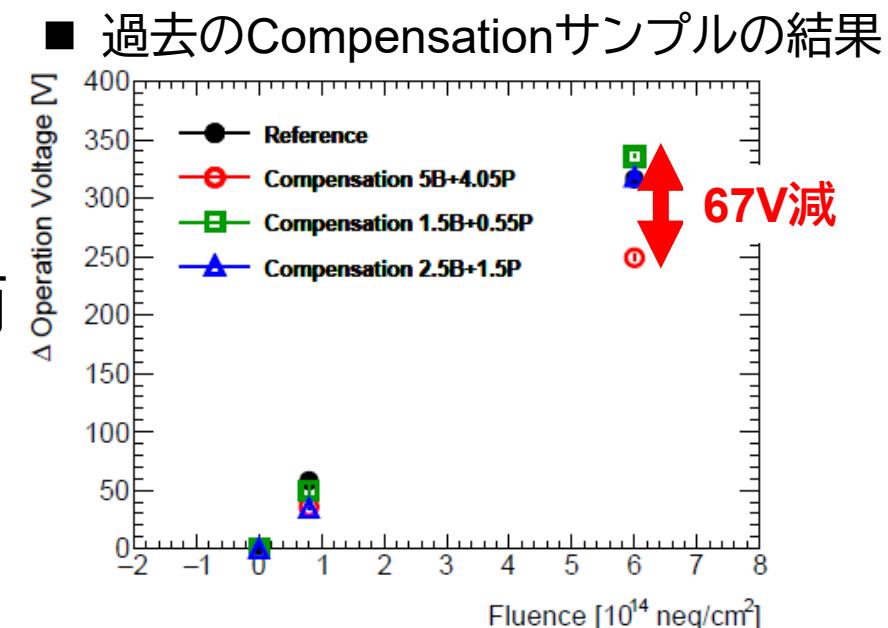


➤ ATLAS-Collaboration. Atlas high-granularity timing detector (hgtd) public plots.2022.https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HGTPublicPlots.

Compensation + Carbon法

- ・アクセプタ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
 - ✓ドナリムーバルの促進
- ・炭素ドープ&酸素濃度低減サンプルに、 Compensation法を適用

が必要



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のみドープ)
2	Compensation	$p+$ 層にBとPを2対1でドープ
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

}

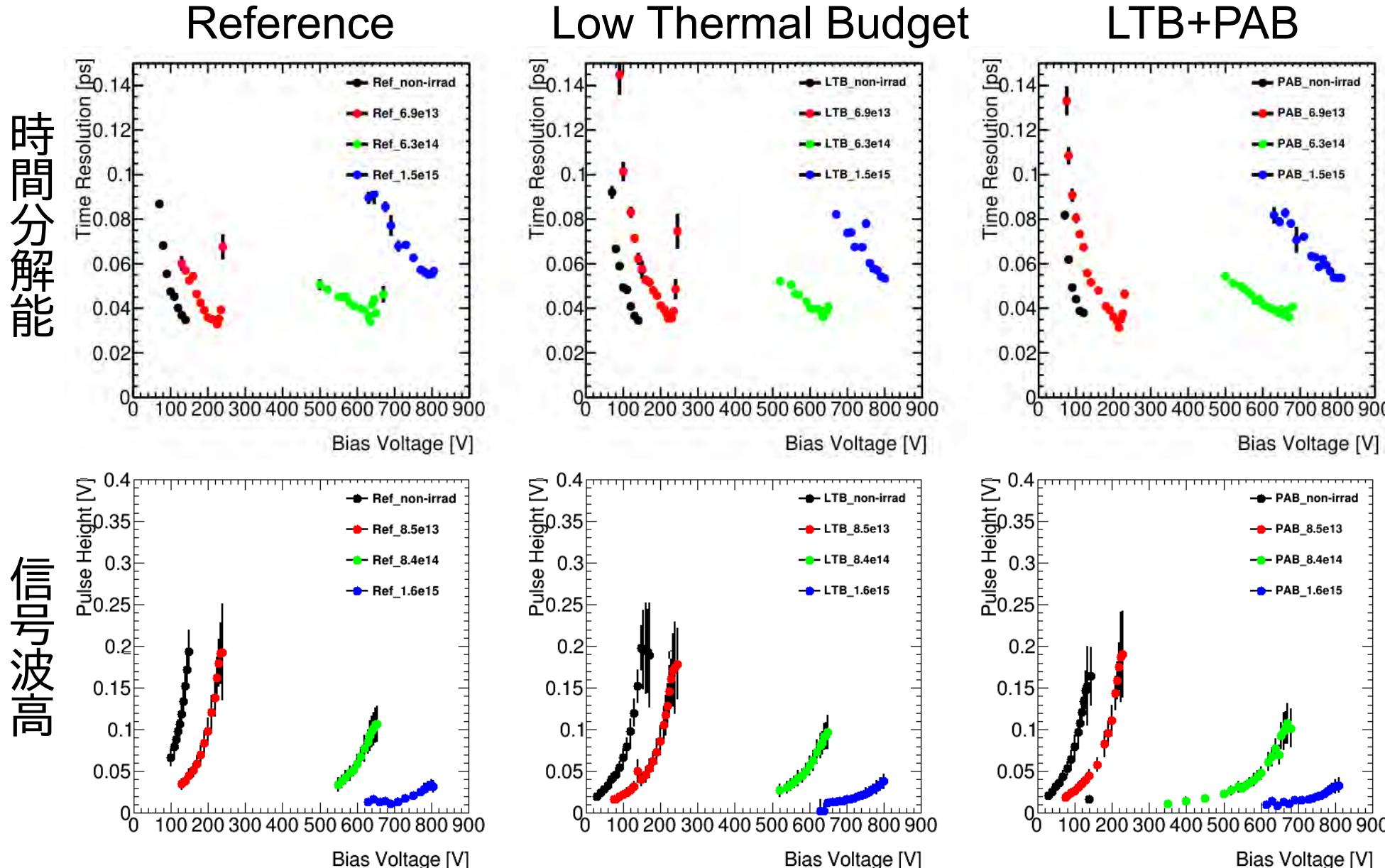
- 2と3の比較から, 酸素によるドナーリムーバルの影響を
- 2と6の比較から, 放射線耐性向上の有無を調べる
- サンプルは11月に照射済み⇒今後測定予定

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



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 $12\text{V}/\mu\text{m}$ 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

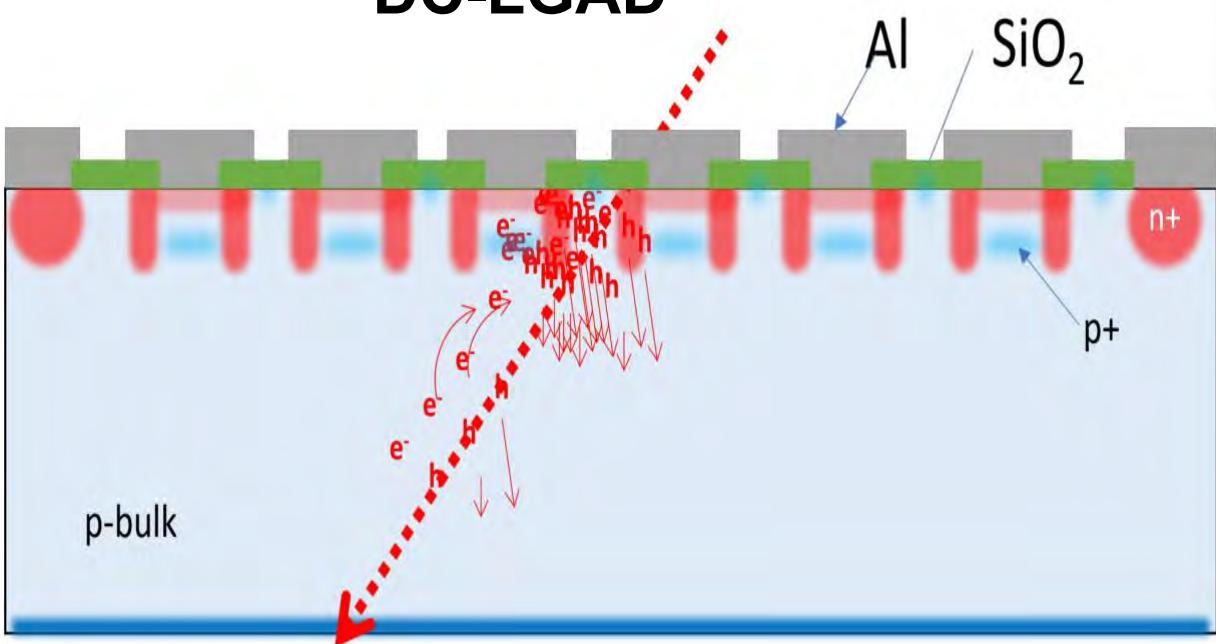


➤ SEBのメカニズム
粒子通過で電子正孔対が生成
⇒電子正孔対が高電場により加速
⇒局所的に大電流が発生
⇒熱破壊

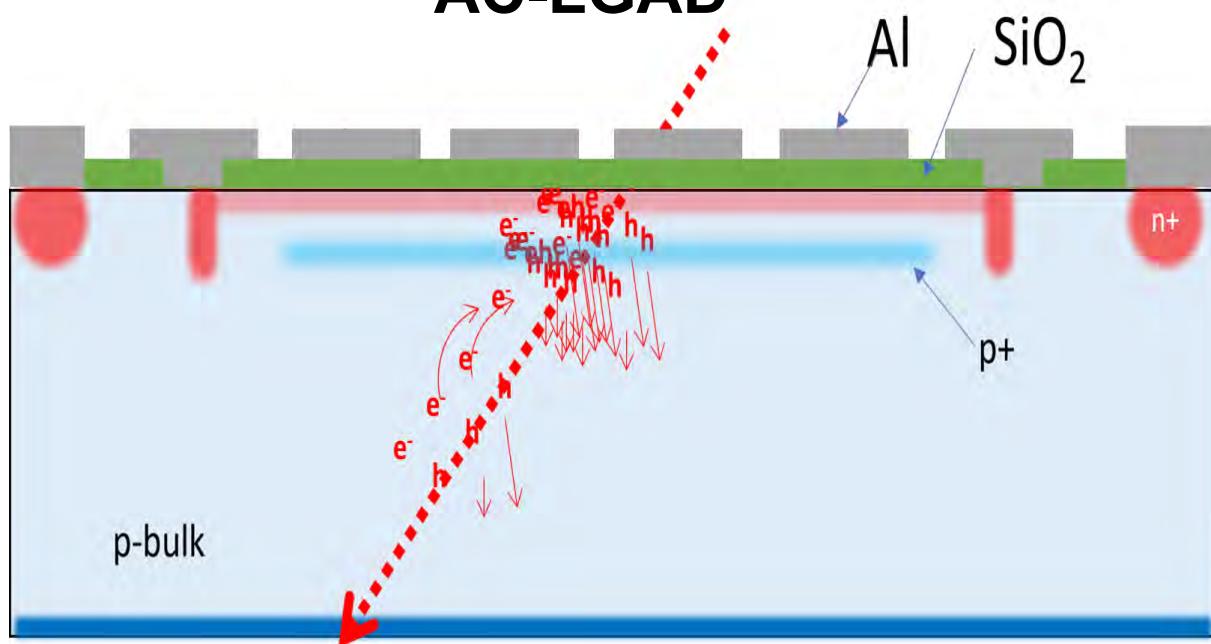
- SEBが生じたときのLGAD表面の写真

DC-LGADとAC-LGAD

DC-LGAD



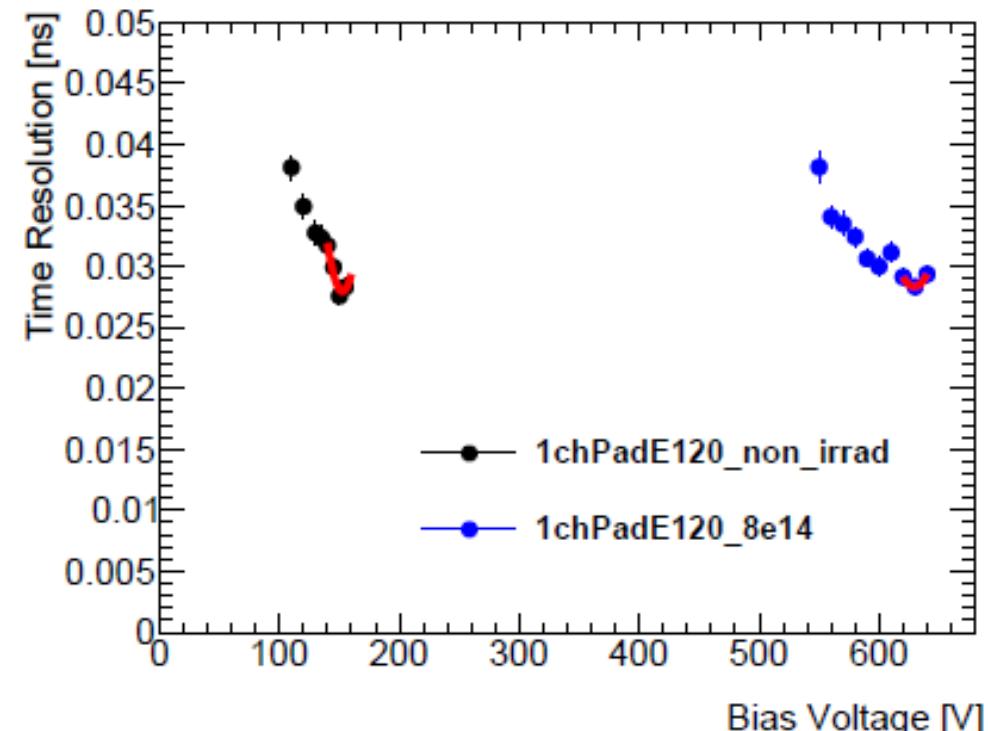
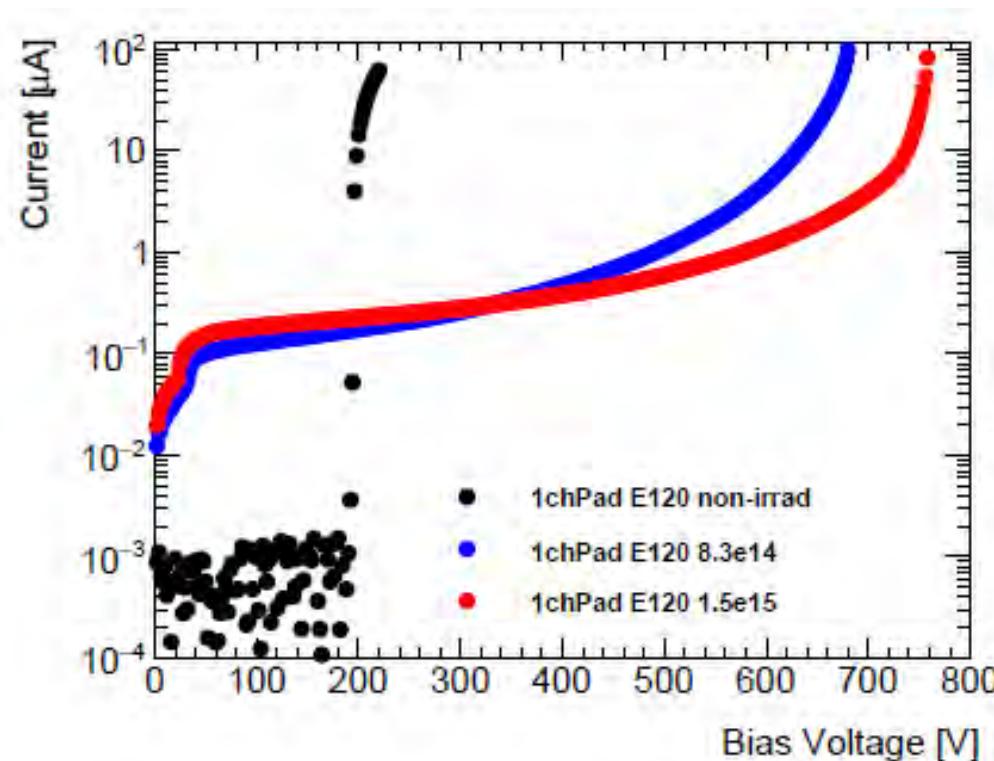
AC-LGAD



- 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

- 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樣に設置
 - 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

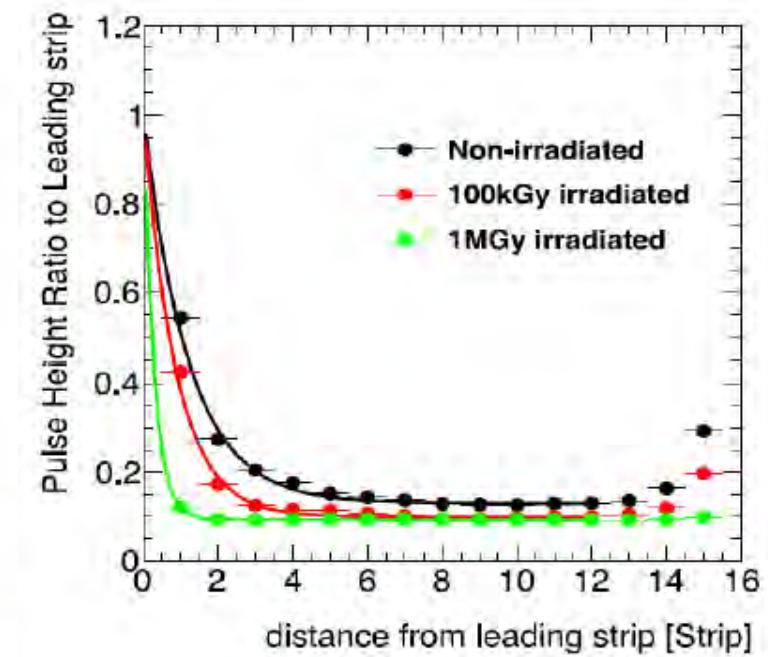
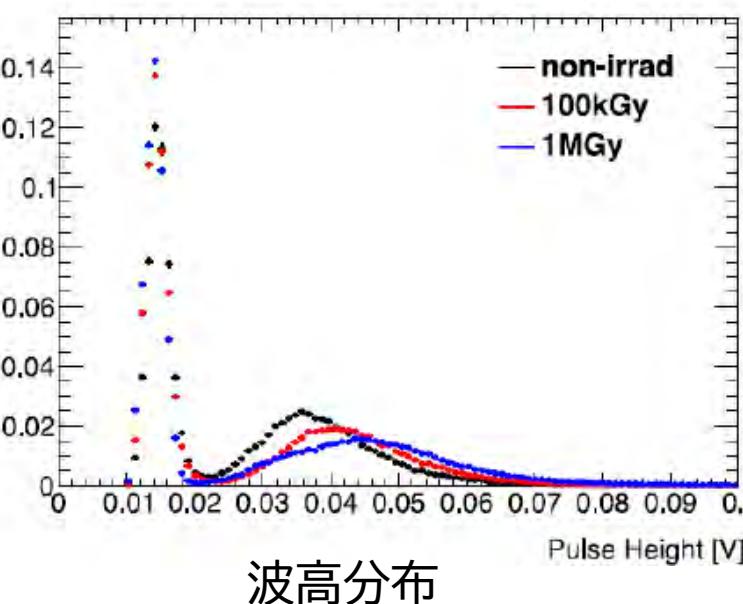
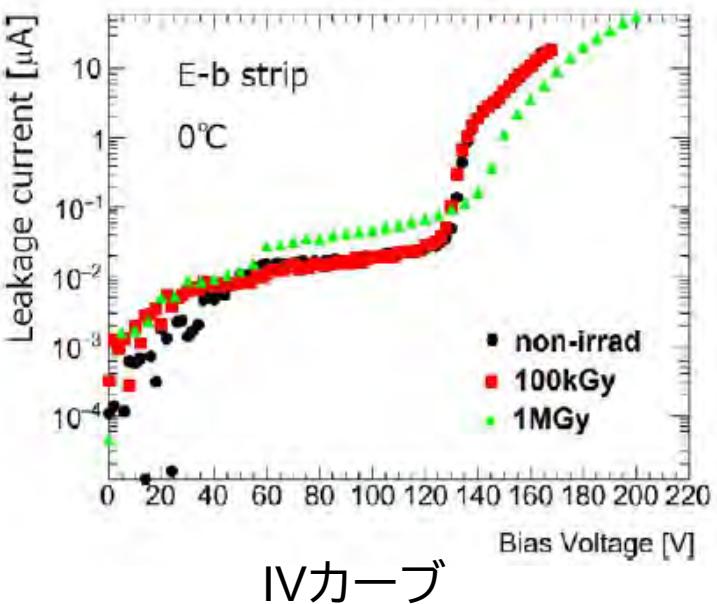


■ AC-LGAD 1chPad E120の照射前後の変化

- 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



- 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 アクセプタリムーバルの改善が重要

