

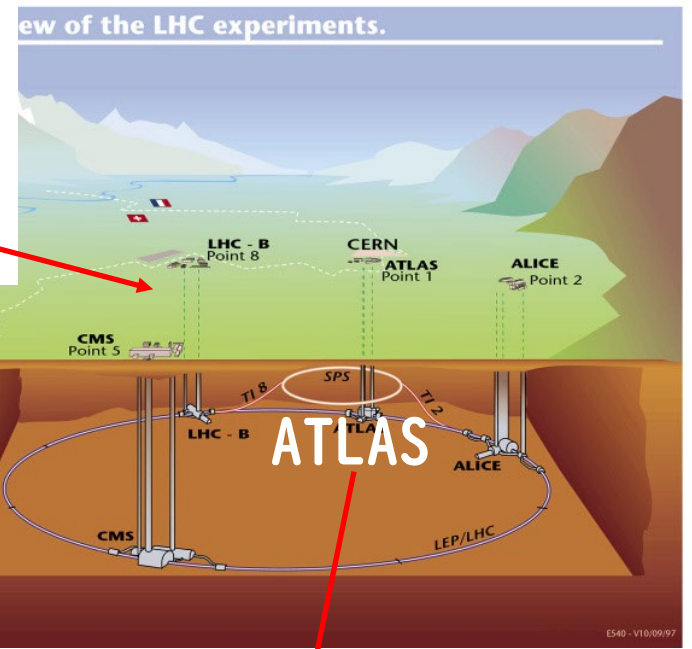
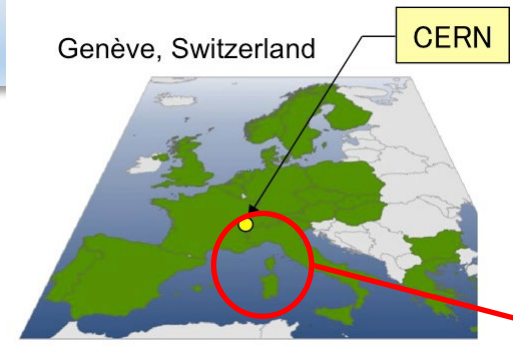
TCADシミュレーションを用いた ATLAS実験 SCT検出器の放射線損傷の評価

筑波大学
鈴木 尚紀



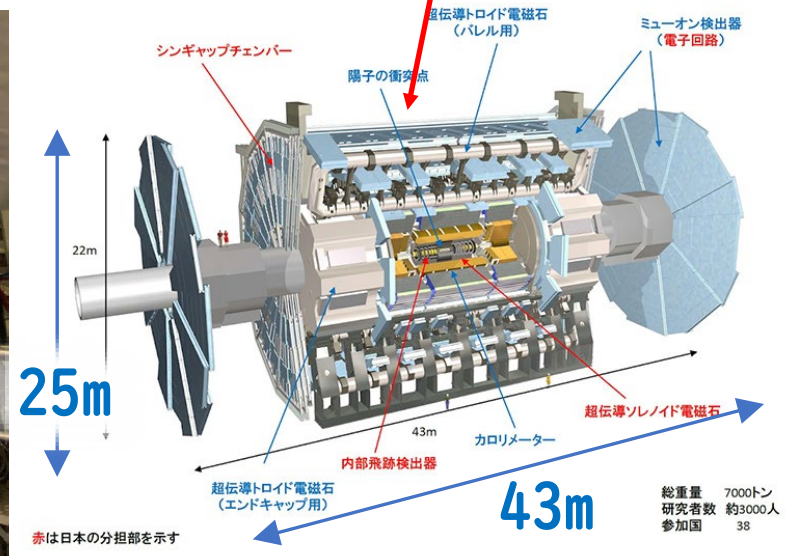
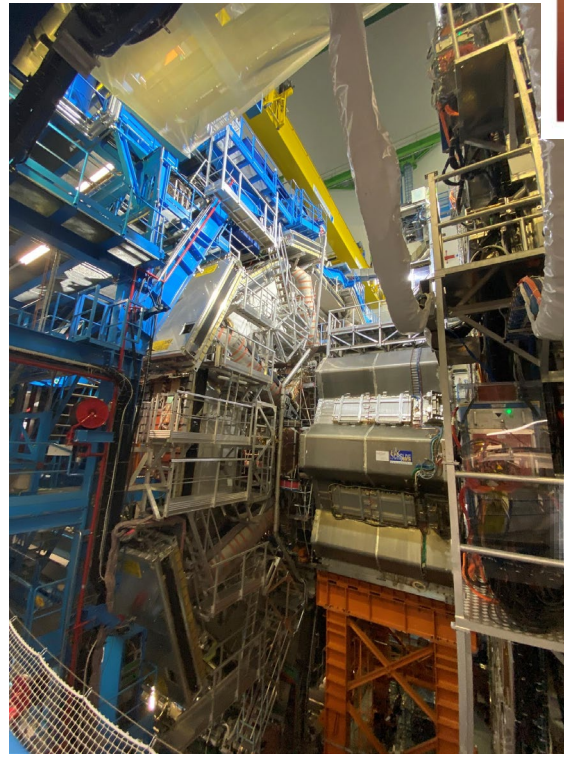
■ CERN LHC加速器

- ✓ 世界最高の衝突エネルギーを誇る陽子・陽子衝突型加速器
- ✓ 周長27km
- ✓ 重心系エネルギー13.6TeV

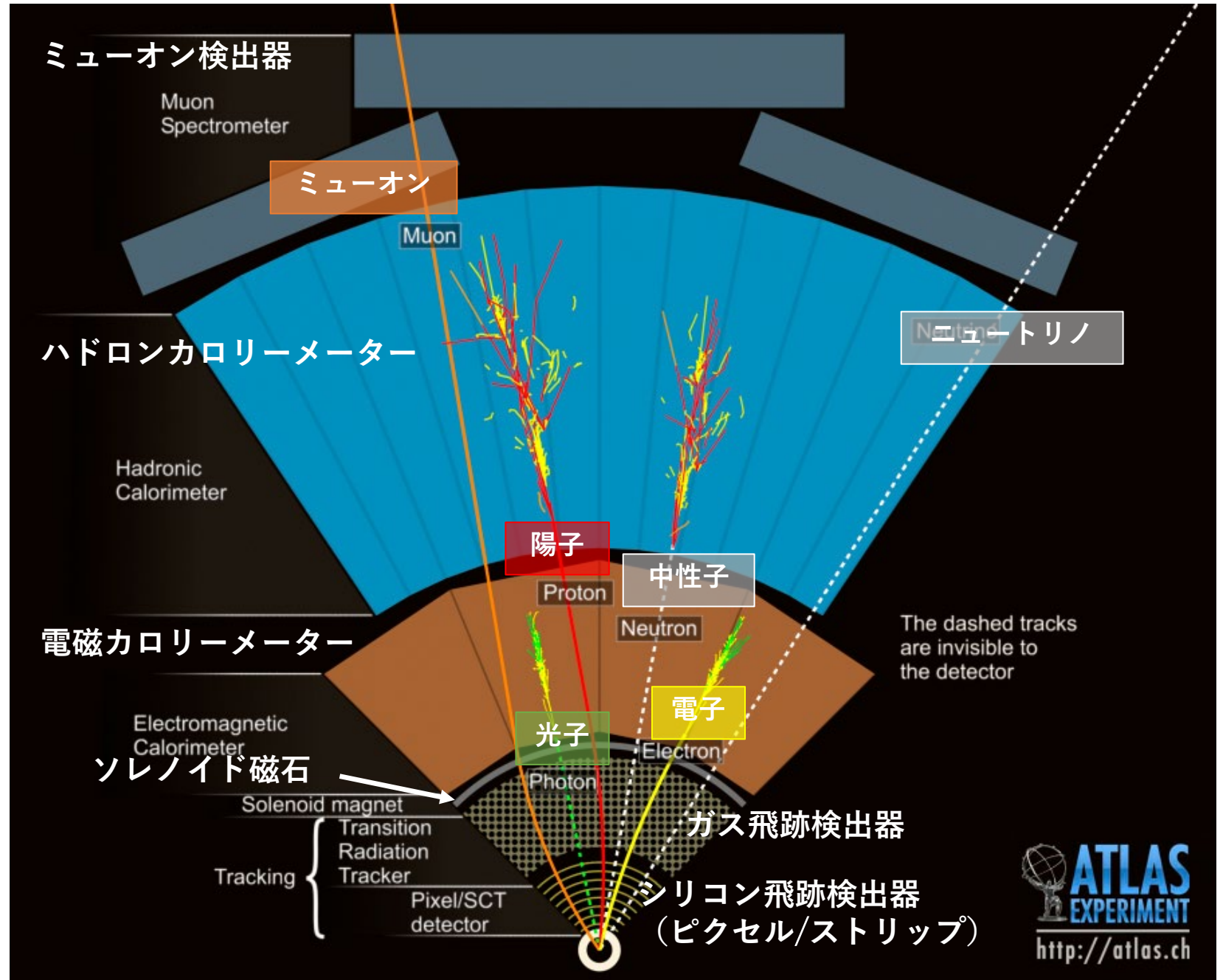


■ ATLAS検出器

- ✓ 陽子・陽子衝突から発生する粒子を検出
- ✓ ヒッグス粒子の発見・検証
- ✓ 標準模型の検証
- ✓ 新物理の探索（超対称性粒子，ダークマター，余剰次元...）



ATLAS 検出器





■ 2011～2018年 (Run1, Run2) までで積分ルミノシティ 190fb^{-1} の統計量

✓ ヒッグス物理

2012年ヒッグス粒子発見 → 精密測定へ

カップリング測定、稀な崩壊やダイヒッグス過程などの探索

➤ 新粒子・新物理探索

より高質量な粒子・稀な過程を狙った解析や、新しいフェーズスペースの探索

■ LS2が終了し昨年 Run3スタート、積分ルミノシティ 450fb^{-1} 目指す

✓ ソフトウェア・ハードウェアのアップグレード、13.6TeVへエネルギー上昇

◆ ピークルミノシティは速やかに上昇

➡以前のLS後より素早く上昇

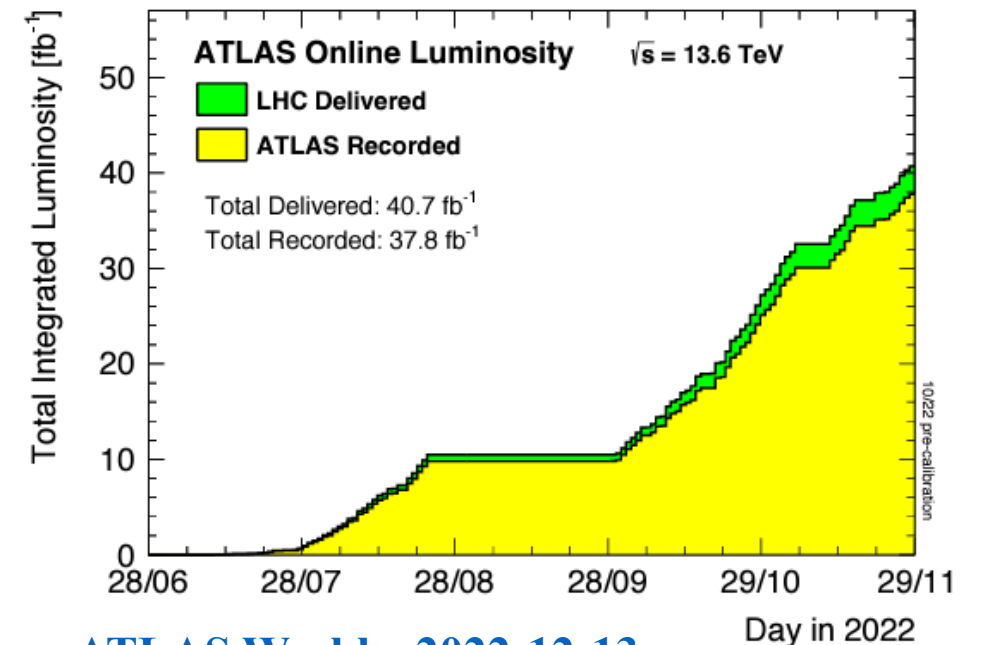
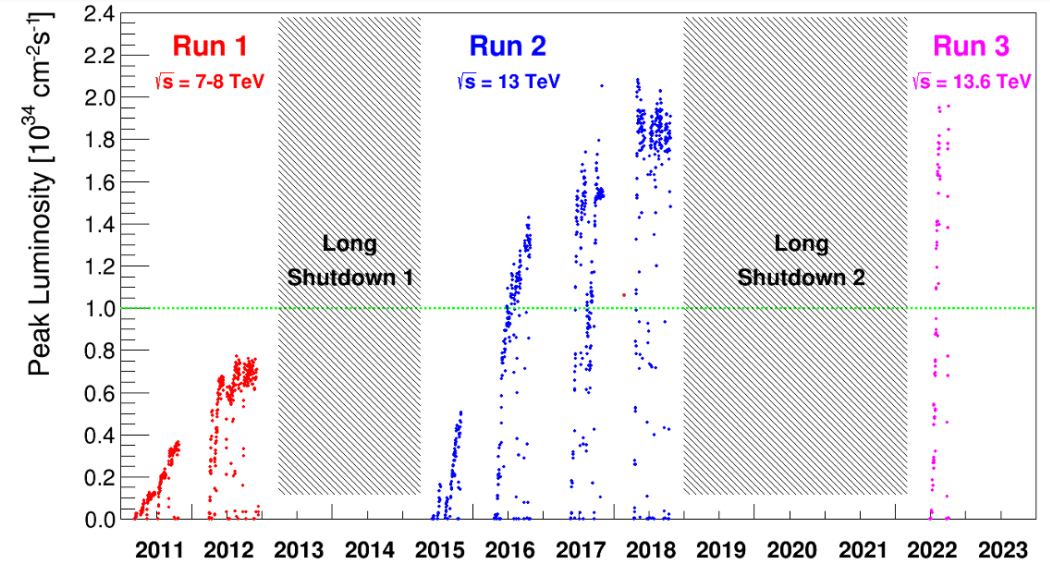
LHCオペレーションに対する理解が進んだ恩恵

◆ 積分ルミノシティも安定して増加

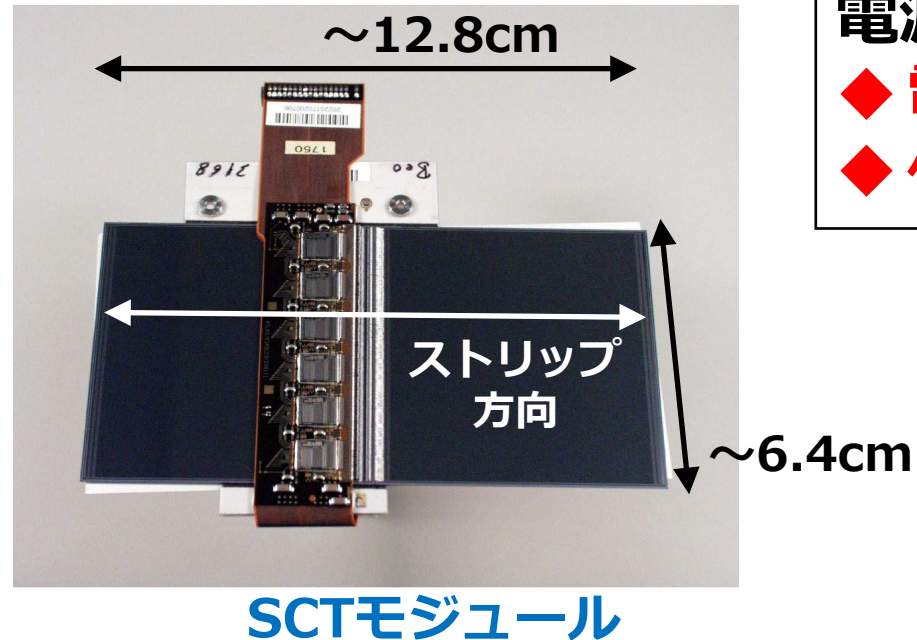
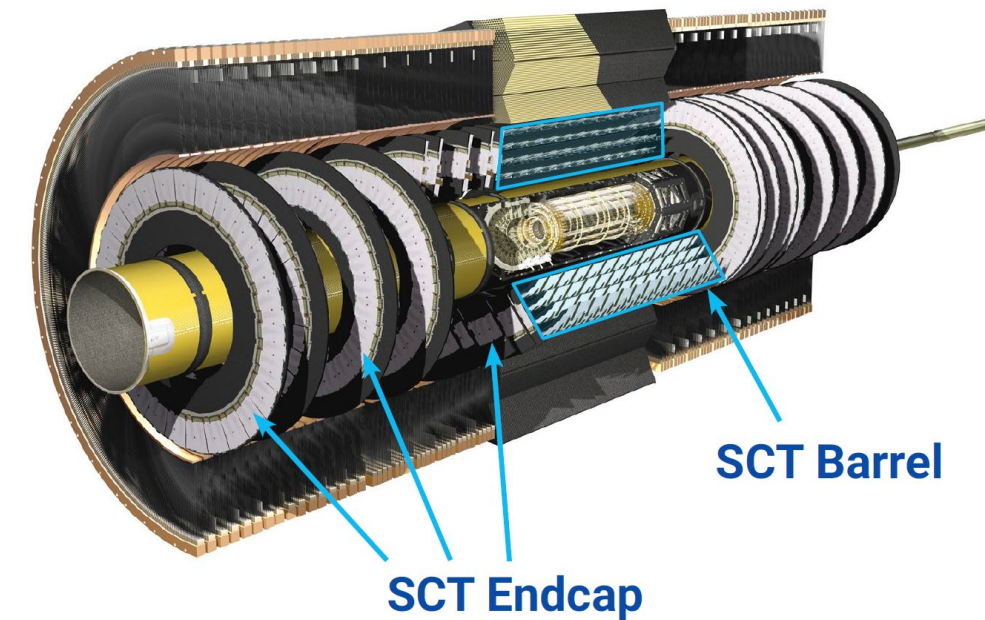
➡LHCより約 40.7fb^{-1} 供給、ATLASで 37.8fb^{-1} 取得

◆ 今後の予定

- 2023: p-p $\sim 70/\text{fb}$
- 2024: p-p $\sim 95/\text{fb}$
- 2025: p-p $\sim 100/\text{fb}$
- **Total: $\sim 300\text{fb}$**

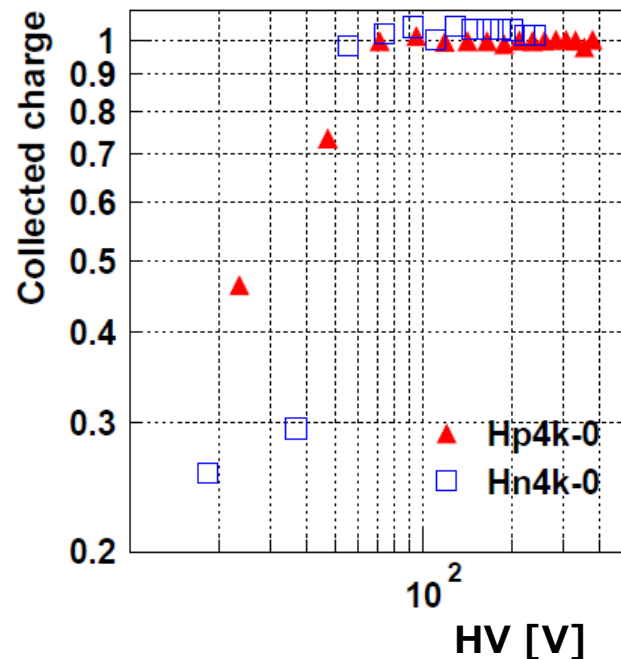
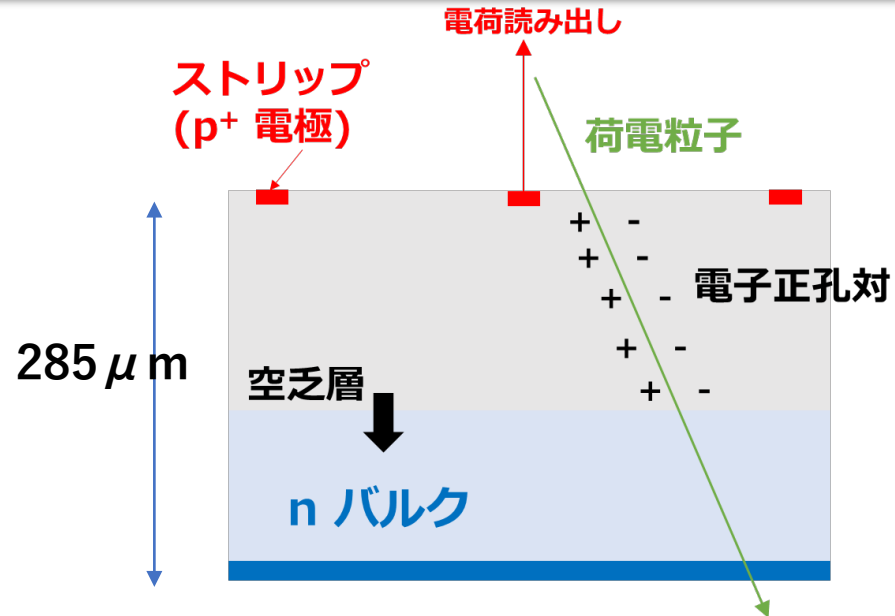


- ◆ ATLAS実験におけるストリップ読み出し方式の内部飛跡検出器
 - 各モジュールは表裏に各2枚ずつ、4枚のセンサーから構成
 - 1モジュールあたり768×2ストリップ（ピッチ80 μ m長さ12.8cm）
- ◆ SCT全体は4088モジュールで構成
 - 4層のbarrel部と2×9層 endcap disks部

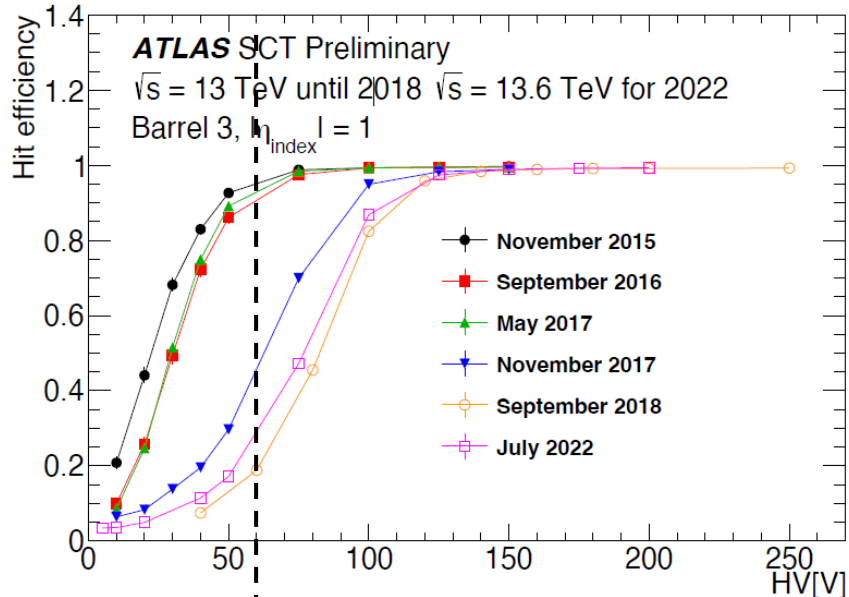
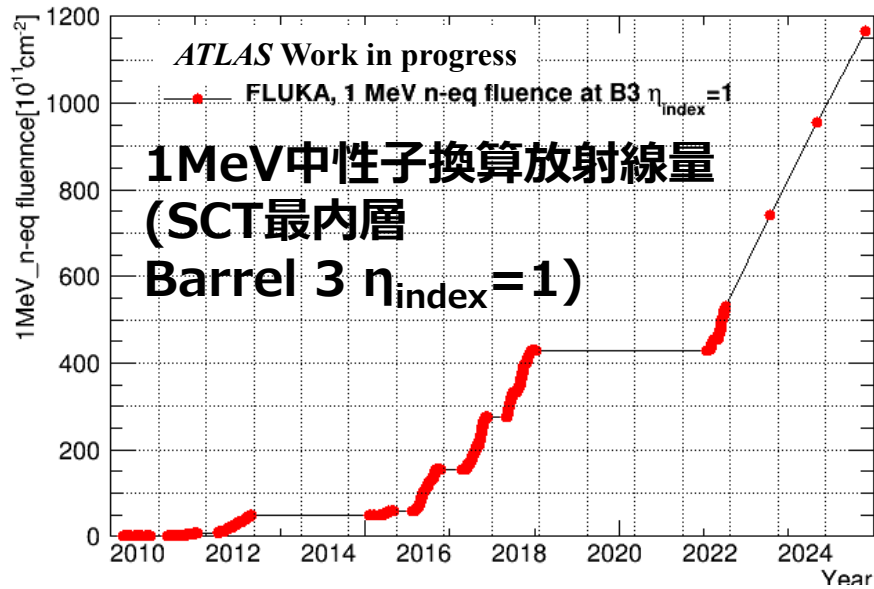


電源装置による制限

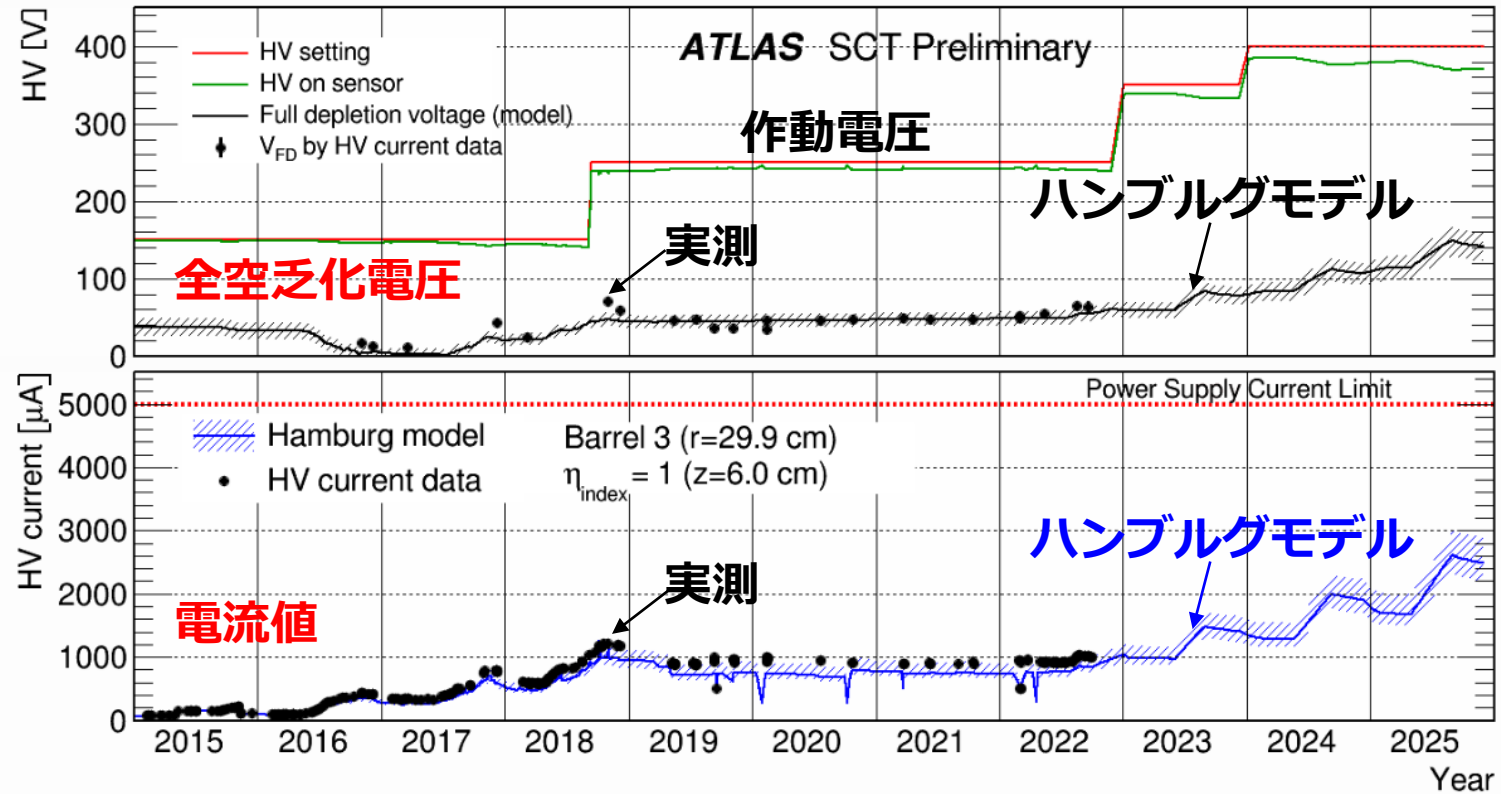
- ◆ 電流値 < 5mA
- ◆ 作動電圧 < 450V



- ◆ SCTはp-in-n型のシリコンセンサ
- ◆ 最大収集電荷量 $\sim 3\text{fC}$
- ◆ 荷電粒子の通過に伴い空乏層で電子正孔対が発生
 - ストリップ電極で誘導電荷を読み出し
 - ➔ 閾値 1fC でヒット判定
- ◆ 収集電荷量は空乏層の広がり按比例して増加
 - ➔ 運転電圧はセンサ全体が空乏化するよう印加



2022 July 全空乏化電圧



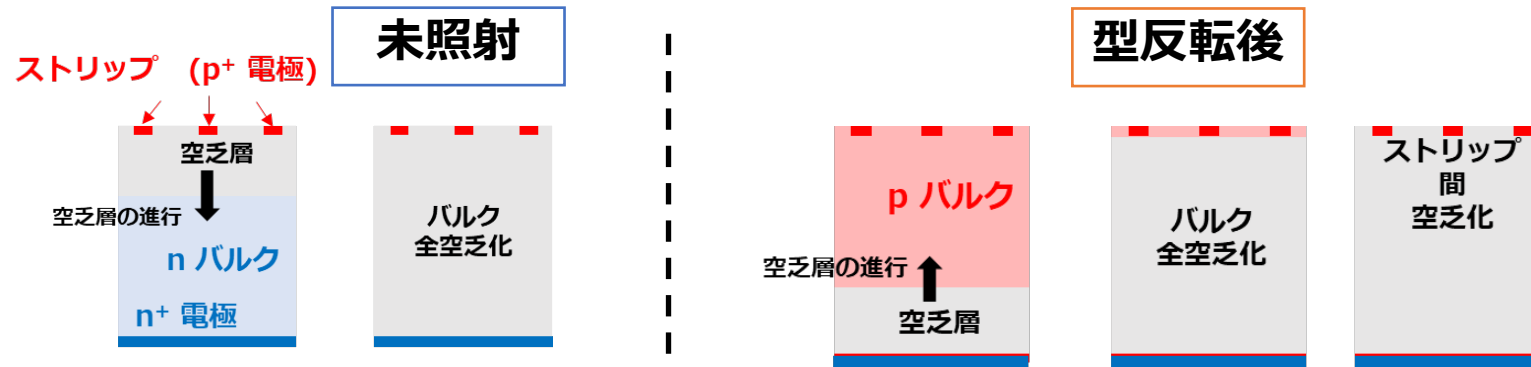
◆ バルク中の不純物密度を記述するハンブルグモデルは、電流値と全空乏化電圧をよく再現する

◆ 放射線損傷が増えると、全空乏化電圧に達しても検出効率は上がりきらない

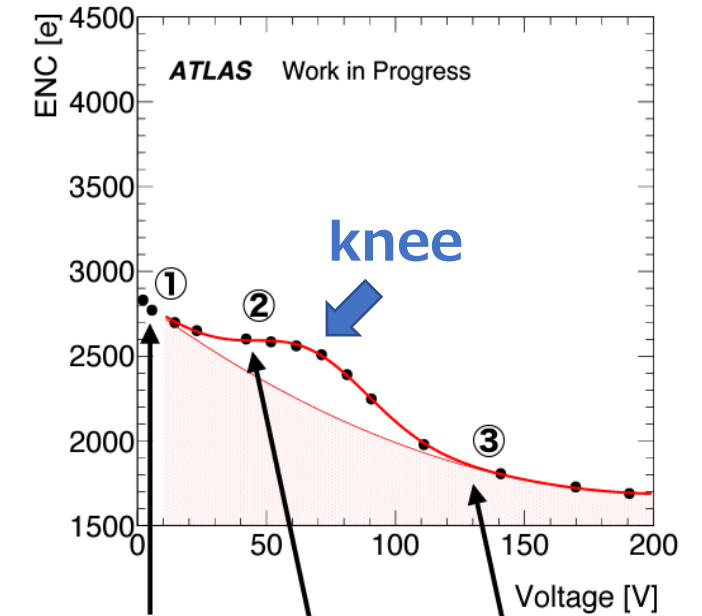
➔ さらに高い作動電圧が必要

型反転とストリップ間空乏化電圧

- ◆ 放射線損傷が小さいときはストリップ電極がある面から空乏化が進行
 - 放射線損傷によって、バルクがp型に反転、裏面から空乏化進行
 - ➔ 高い検出効率達成には、バルク全空乏化後にストリップ間の電气的分離（空乏化）が必要
 - ハンブルグモデルではストリップ間空乏化に必要な電圧は評価できない

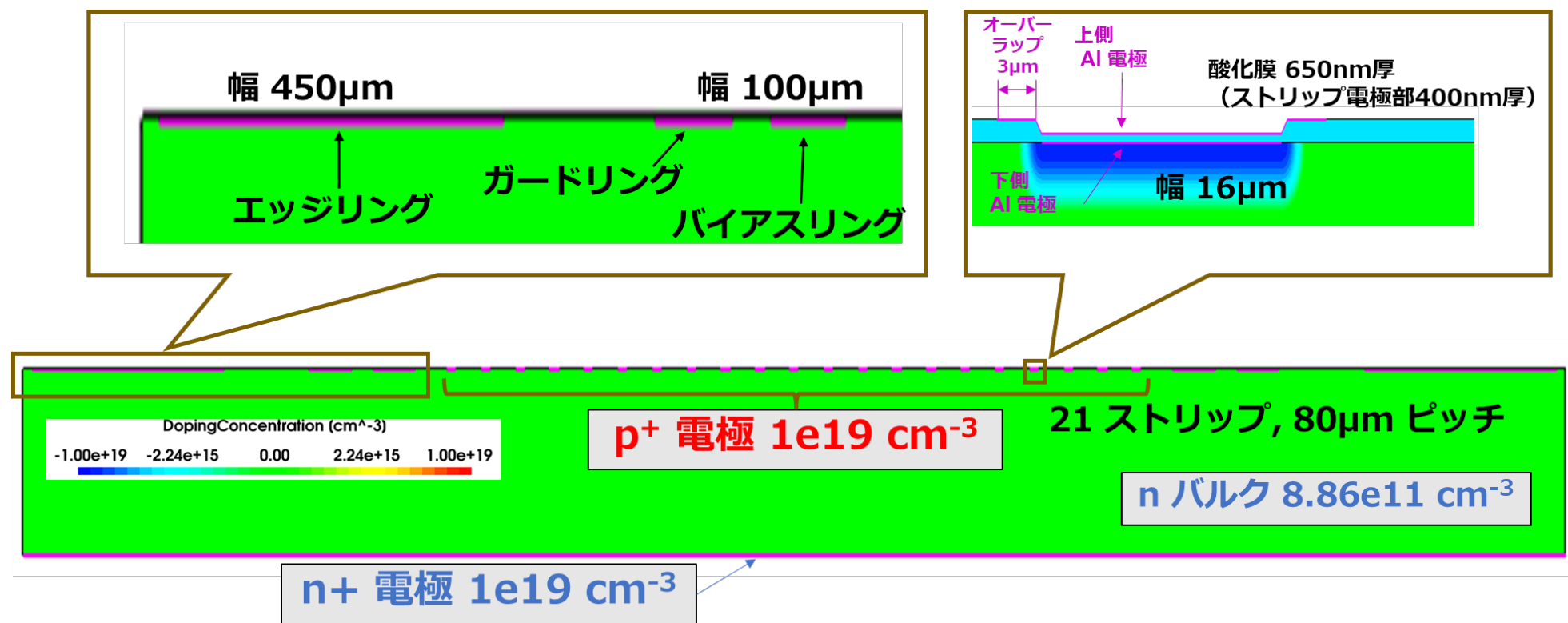


- ◆ 実測：ノイズの電圧依存性を用いてストリップ間空乏化を評価
 - ➔ (和田冨, 2021JPS春季大会)
 - 型反転後のノイズ-電圧特性に現れる“knee”構造による推定



➔ 今後のストリップ間空乏化の推移を予測するため、TCADシミュレーションを用いて評価

◆ SCTセンサーを再現した2Dモデル



➔ 2Dモデルに対して放射線損傷（表面損傷・バルク損傷）を導入し、シミュレーション

表面損傷 (Total Ionizing Dose, TID)

- 酸化膜電荷
- Si/SiO_2 界面準位

➔ 先行研究 ([NIMA924\(2019\)198](#)) を参考に電荷密度・界面準位密度を計算

バルク損傷 (Non Ionizing Energy Loss)

- ◆ Deep Acceptor 欠陥
- ◆ Donor Removal

➔ 次ページで解説

◆ Deep Acceptor 欠陥

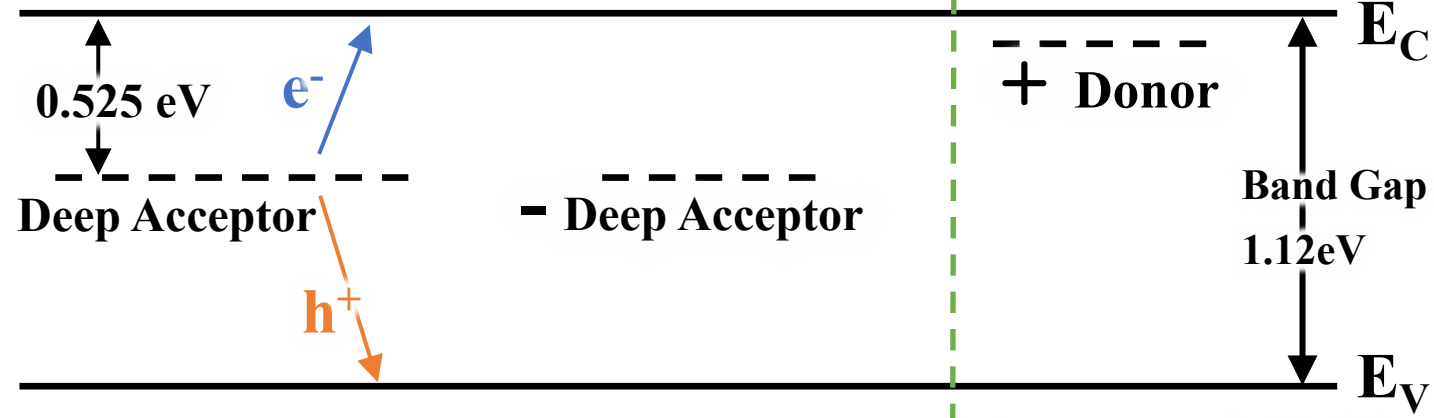
- ✓ バンドギャップ中の深いレベル (先行研究より $E_C - 0.525\text{eV}$) にAcceptor型の欠陥を設定

パラメータ

- **キャリア捕獲断面積 σ**
 - ✓ キャリアを捕獲する効率
 - ✓ 照射量によらない一定値
- **Deep Acceptor密度 N_{acc}**
 - ✓ 照射量に比例して増加

◆ Donor Removal

- ✓ 放射線損傷に伴うnバルク不純物濃度の減少



- ◆ 欠陥を介したキャリア生成・再結合
- **電流量**に影響

- ◆ イオン化による負空間電荷の増加
- **全空乏化電圧**に影響

- ◆ Donorイオン減少による正空間電荷の減少
- **全空乏化電圧**に影響

➤ **キャリア捕獲断面積 σ**
 ➤ **Deep Acceptor密度 N_{acc}**

で決まる

➔ **IV特性 (電流値・全空乏化電圧)**
 を指標に σ と N_{acc} を調整

ハンブルグモデルに基づいてDonor減少濃度を計算

捕獲断面積(σ)と Deep Acceptor密度 (N_{acc})の決定

捕獲断面積σを任意に設定
(先行研究より $0.5 \times 10^{-14} \sim 2.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ の範囲から選択)

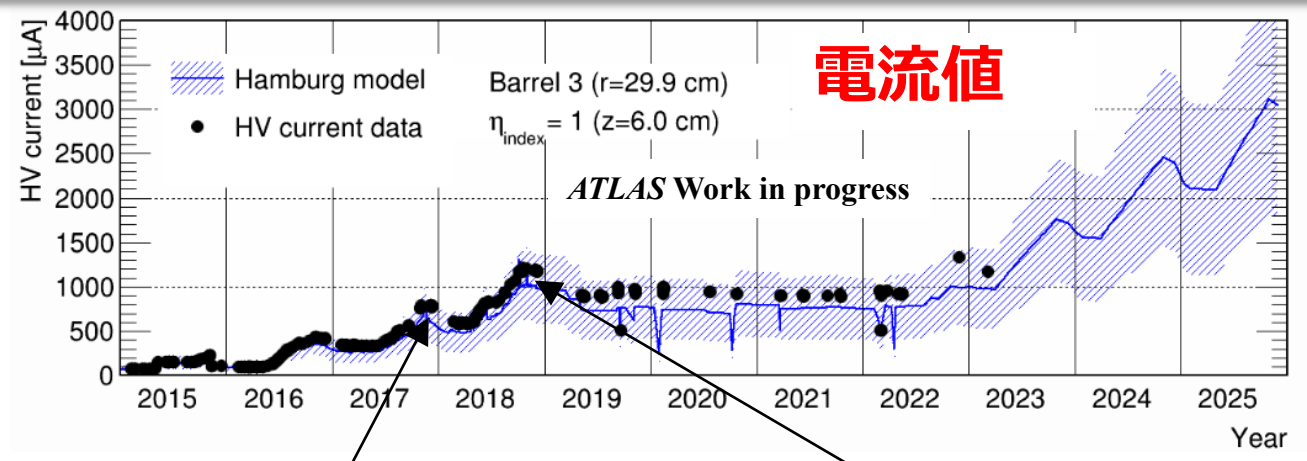
Deep Acceptor密度 N_{acc} と電流値は比例関係
→電流値 (2023年3月まで実測/それ以降ハンブルグモデル) によってN_{acc} を計算
※アニーリング効果も電流値の増減で考慮

IVシミュレーション

I-√Vカーブから全空乏化電圧(V_{FD})を推定

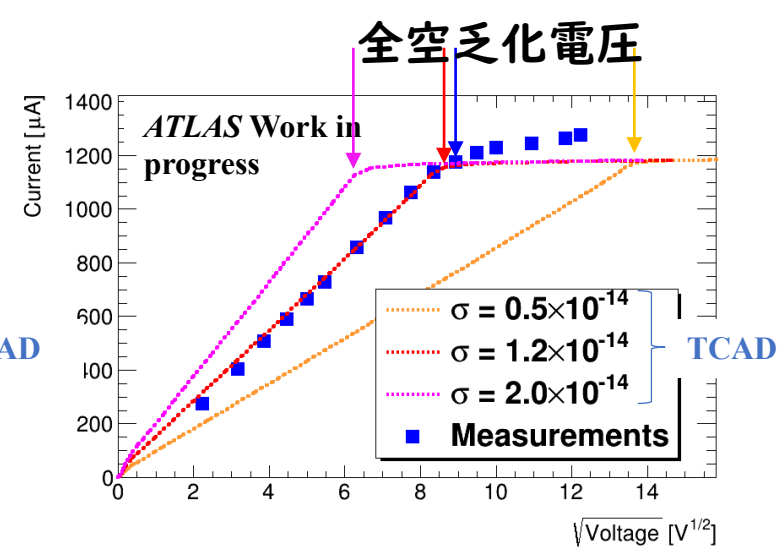
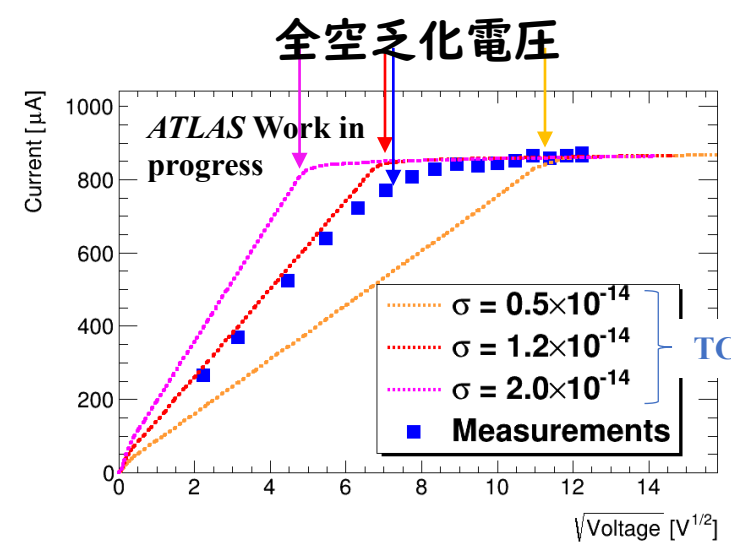
各捕獲断面積σで2015年~2025年の全空乏化電圧(V_{FD})を比較

捕獲断面積 $\sigma = 1.2 \times 10^{-14}$
N_{acc}はシミュレーション前に決定した計算値

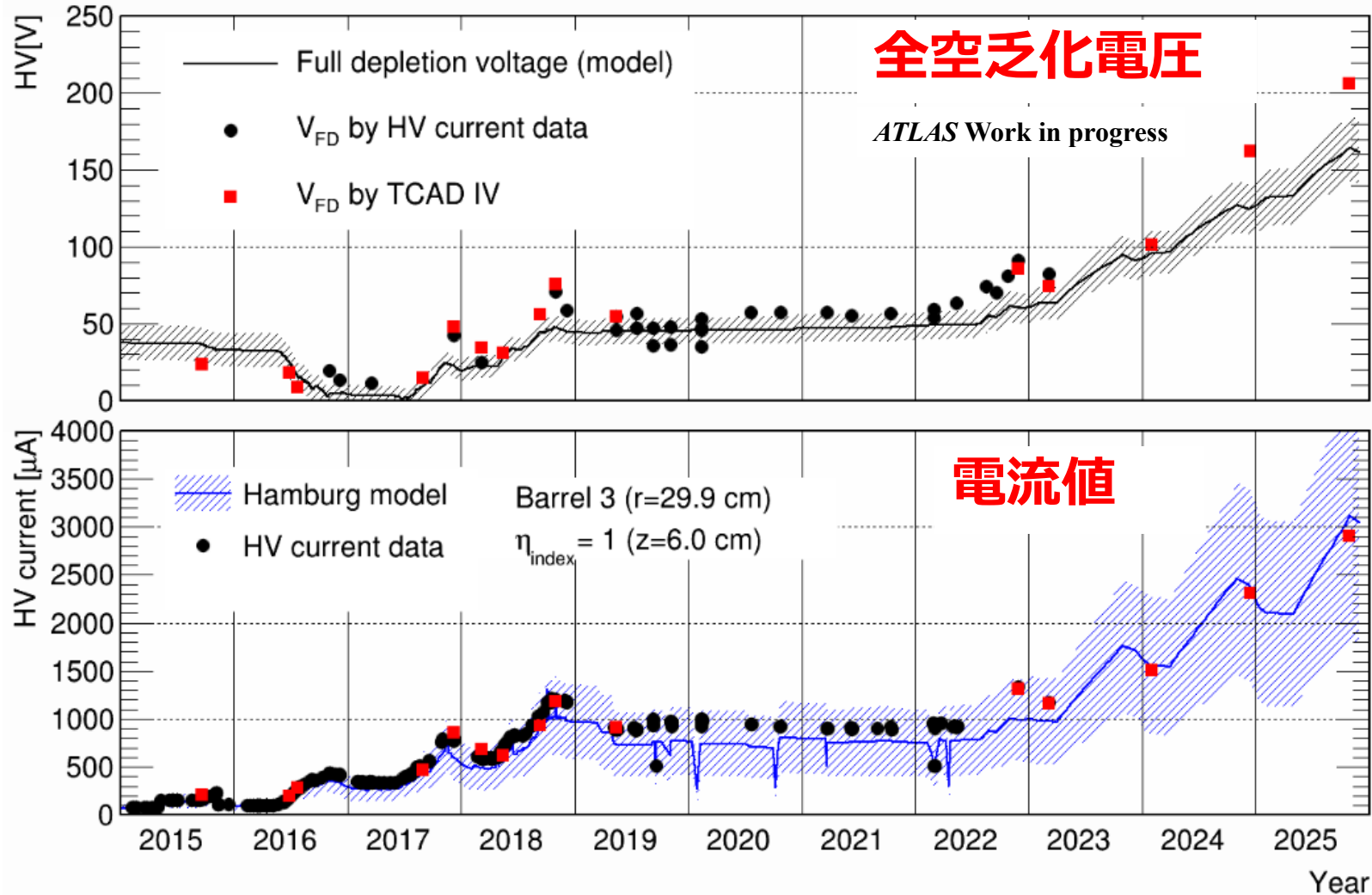


2017-Dec

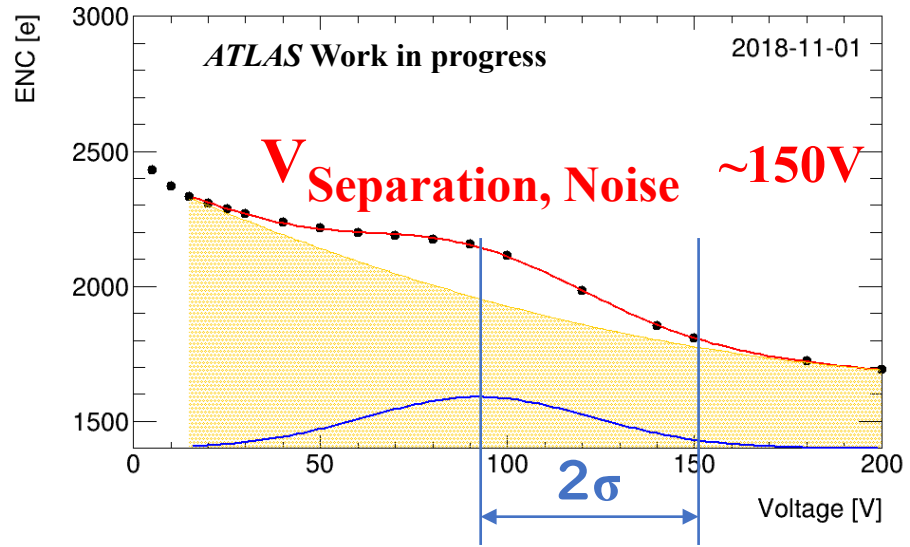
2018-Nov



- ◆ 2015年～2025年までの全空乏化電圧・電流値が概ね一致
 - SCTの放射線損傷を説明する適切なパラメータセッティング

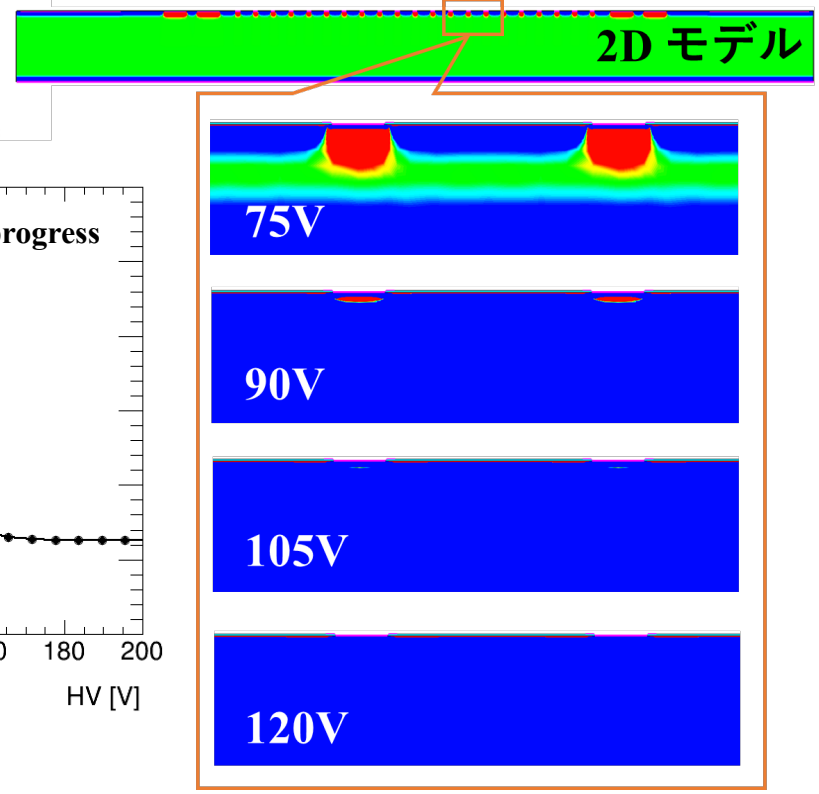
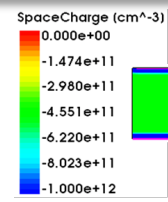
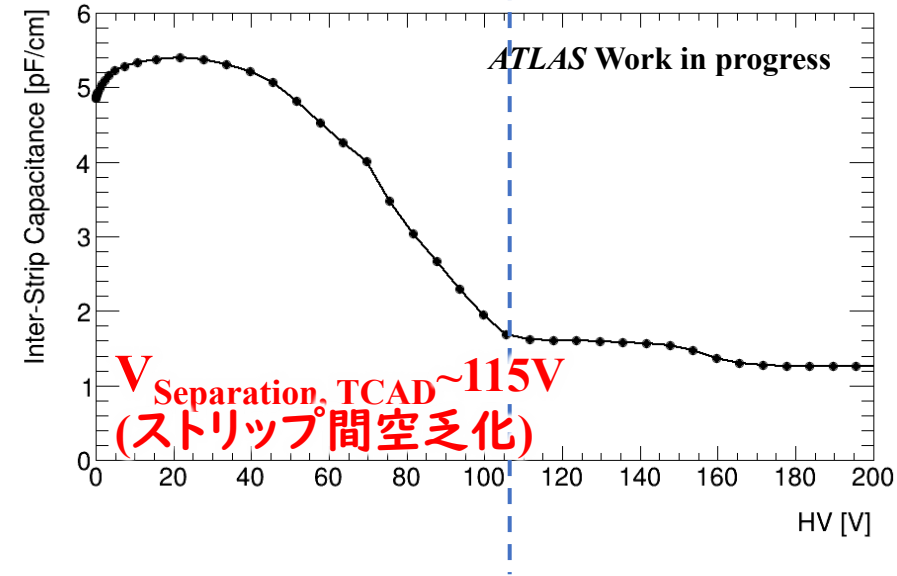


実測 ノイズ分布 (2018-Nov)

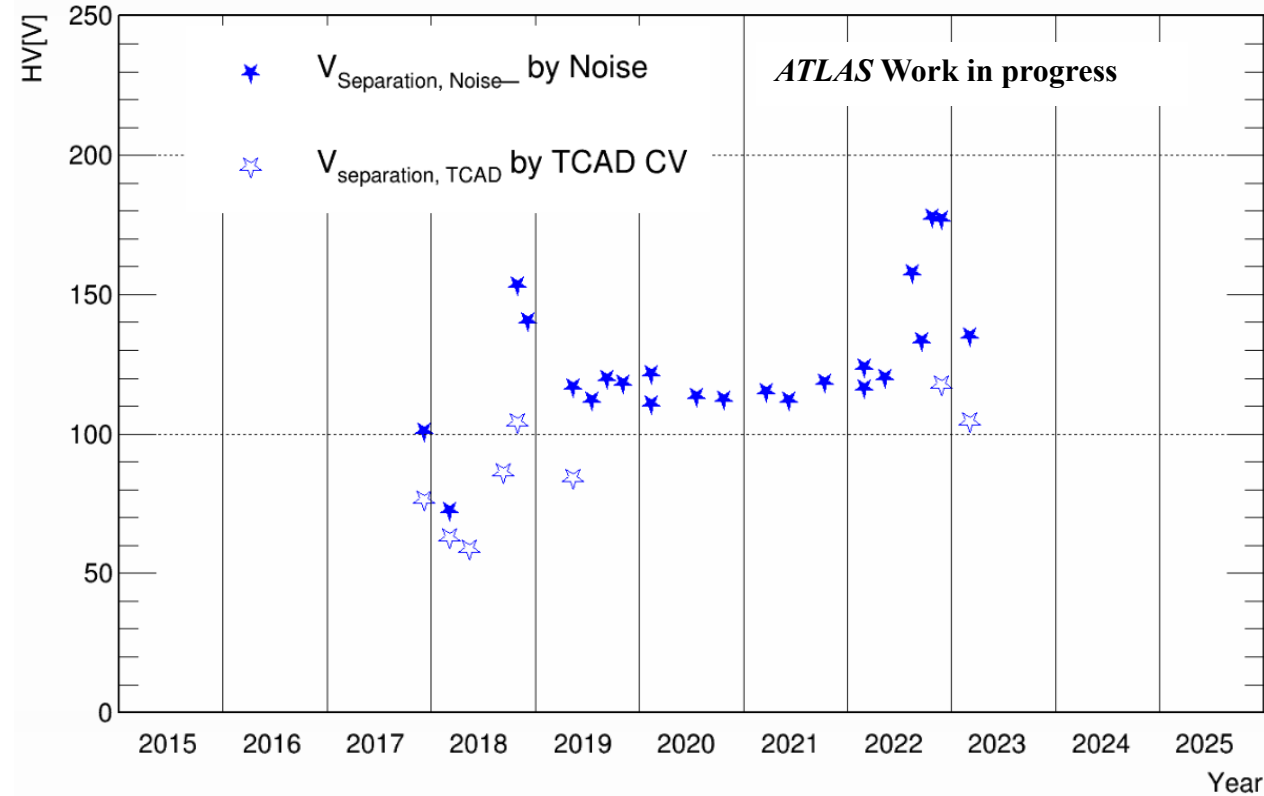


- ◆ 2次関数+ガウス関数でフィット
 - ガウス関数中心値 + 2σ
 - ➔ ストリップ間空乏化電圧として $V_{Separation, Noise}$ を評価

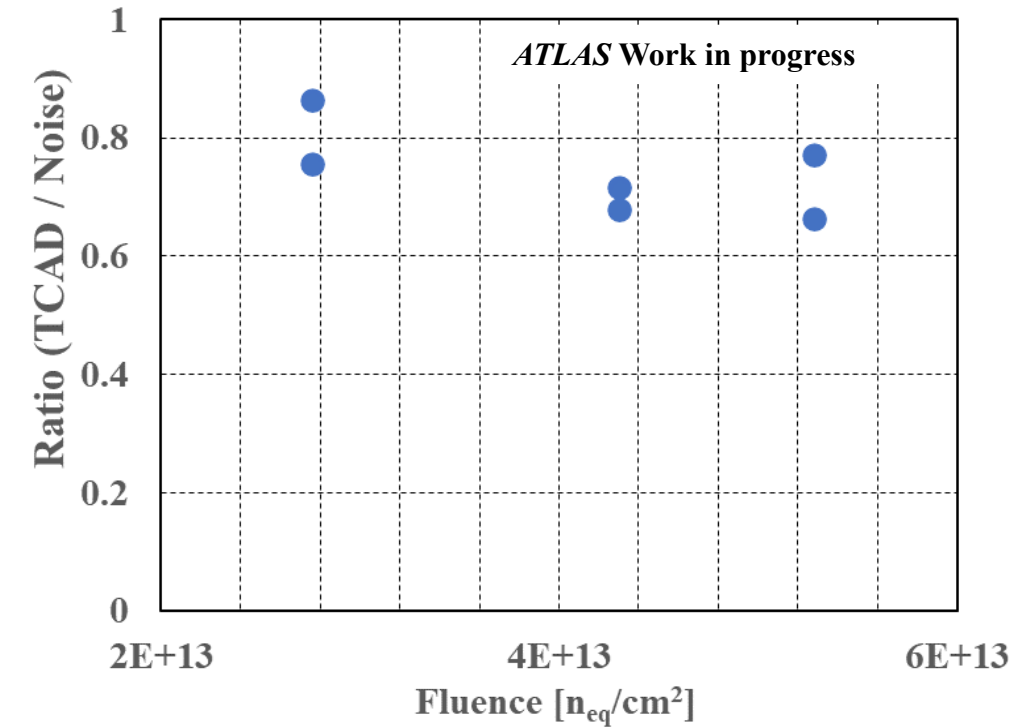
TCAD C_{int} -V (2018-Nov)



- ◆ ストリップ間容量 C_{int} 分布 : 低電圧側でバンプ構造を確認
 - ノイズ分布と違い、 $V \rightarrow 0$ で上昇しない
 - Donor Removalの進行とともに顕著に
 - 原因を調査中
- ◆ 空間分布の変化 (=空乏化過程) : C_{int} が下がりきった時点でストリップ下の空間電荷が消失
 - ➔ ストリップ間空乏化と見なして $V_{Separation, TCAD}$ を評価



年末年始のシャットダウン前後に、各照射量で2点ずつ ($V_{\text{Separation,TCAD}} / V_{\text{Separation,Noise}}$) を比較

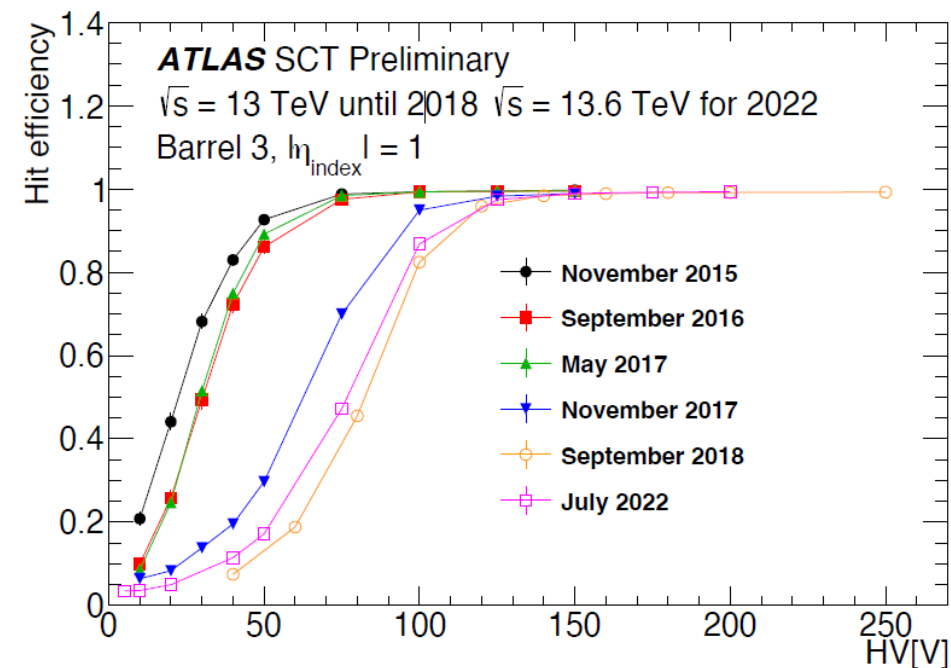
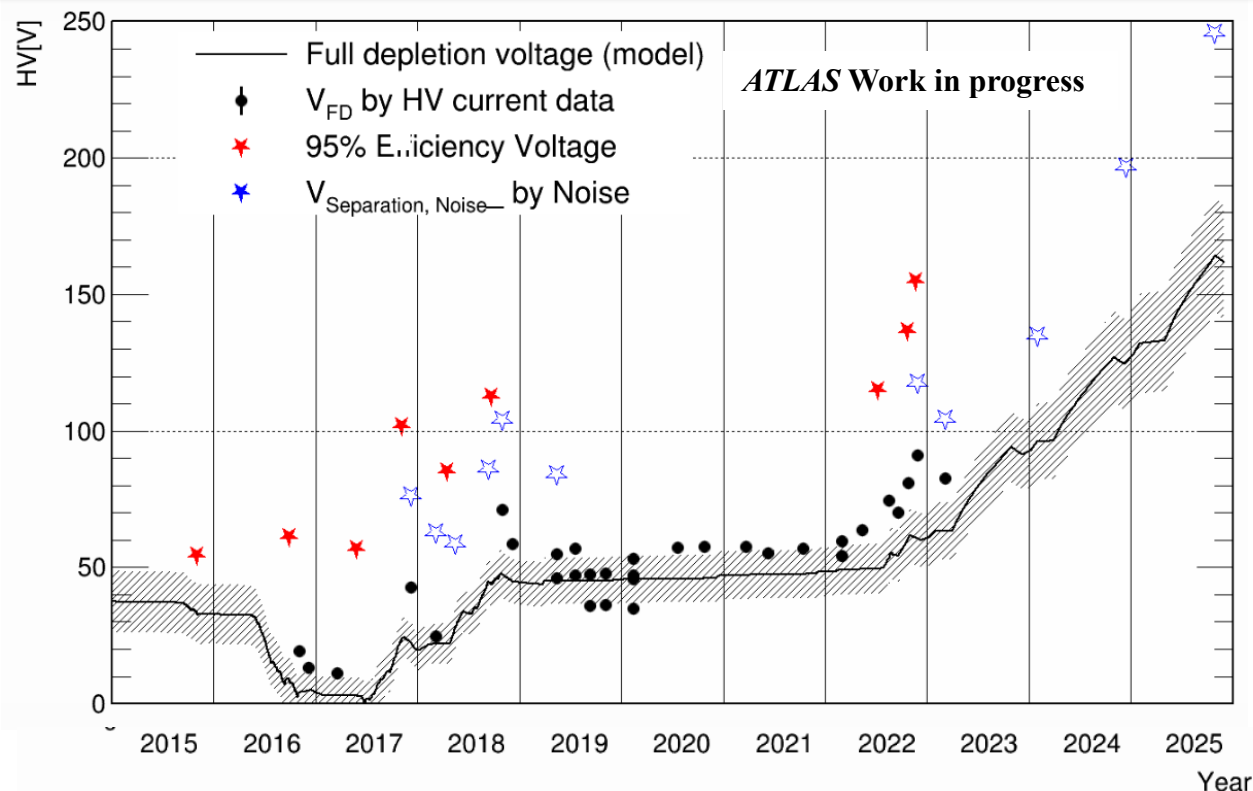


◆ $V_{\text{Separation,Noise}}$ (★) は高検出効率を達成する電圧の指標 ([和田冨, 2021JPS春季大会](#))

◆ $V_{\text{Separation,TCAD}}$ (☆) は $V_{\text{Separation,Noise}}$ (★) よりも小さい傾向

➤ ($V_{\text{Separation,TCAD}} / V_{\text{Separation,Noise}}$) ~ 0.7

Run3終盤までの予測、高検出効率となる電圧との比較



◆ TCAD評価方法でのRun3終盤の予測

➤ $V_{Separation, TCAD} \sim 245V$

$V_{Separation, TCAD} / 0.7 \sim 350V$ ($V_{Separation, Noise}$ 相当)

◆ $V_{Separation, TCAD}$ は、高検出効率 (95%目安) を達成する電圧 ($V_{95\%}$) に対して全空乏化電圧より良い見積もり指標となるが、まだ過小評価

➡ 今後、MIP入射シミュレーションによって収集電荷効率・検出効率の評価

- ◆ SCTの放射線損傷を理解するためTCADシミュレーションを実施
 - 実測・ハンブルグモデル予測の電流・全空乏化電圧と比較して整合性のある結果

 - ◆ C_{int} -Vシミュレーションを用いてストリップ間空乏化電圧 ($V_{Separation,TCAD}$) を推定
 - 実測のNoise評価による $V_{Separation,Noise}$ に対し、 $(V_{Separation,TCAD} / V_{Separation,Noise}) \sim 0.7$

 - ◆ TCAD評価によるRun 3終了時点の予測
 - ◆ $V_{Separation,TCAD} \sim 245V$
 - $V_{Separation,TCAD} / 0.7 \sim 350V$
($V_{separation,Noise}$ は $V_{95\%}$ に対応)
- 電源装置による制限**

 - ◆ 電流値 < 5mA
 - ◆ 作動電圧 < 450V
- ◆ $V_{Separation,TCAD}$ は $V_{95\%}$ に対して全空乏化電圧より良い見積もり指標となるが、まだ過小評価
 - ➔ 今後、MIP入射シミュレーションによって収集電荷効率・検出効率の評価