



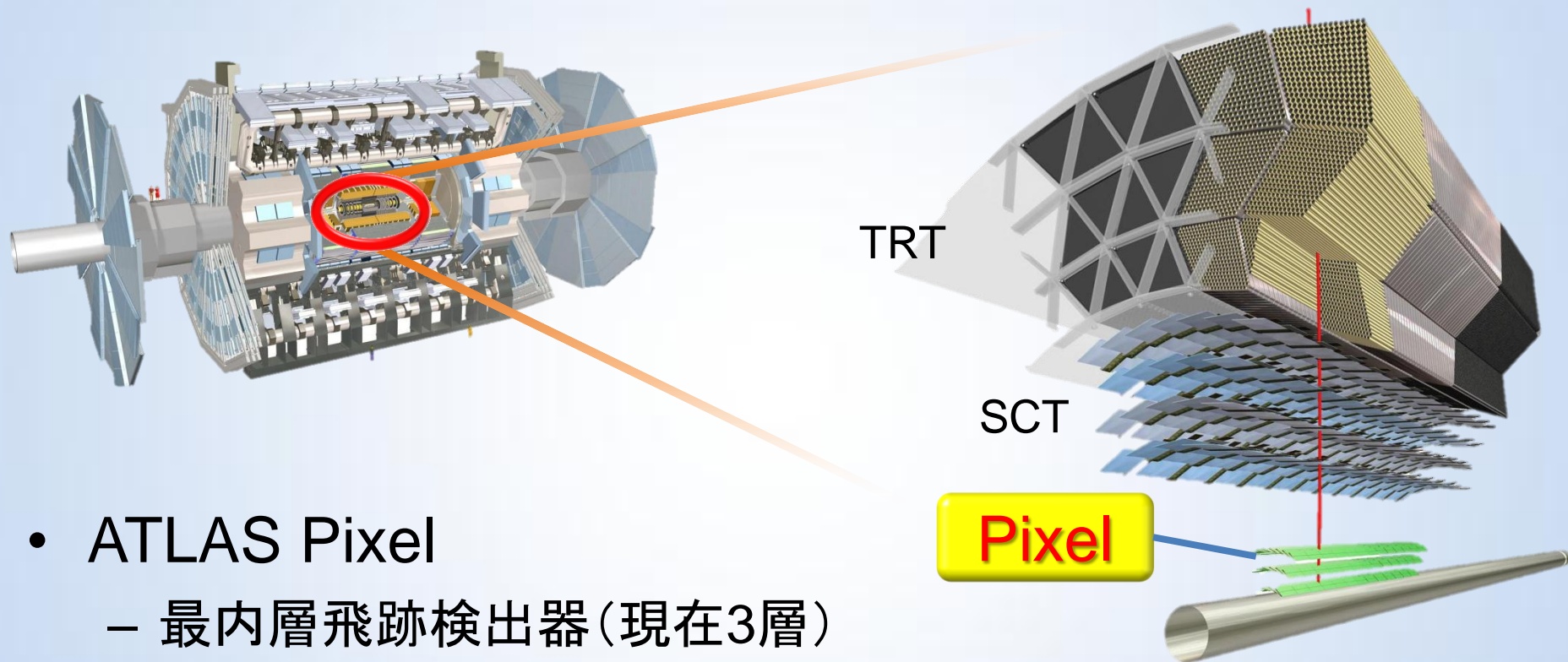
# HL-LHC実験に用いる プラナー型ピクセルセンサーの 放射線耐性と検出器性能評価

東京工業大学 基礎物理学専攻  
永井遼

陣内修, 海野義信<sup>A</sup>, 田窪洋介<sup>A</sup>, 池上陽一<sup>A</sup>, 木村直樹<sup>F</sup>, 近藤敬比古<sup>A</sup>,  
高嶋隆一<sup>D</sup>, 東城順治<sup>A</sup>, 寺田進<sup>A</sup>, 永井康一<sup>E</sup>, 中野逸夫<sup>C</sup>,  
花垣和則<sup>B</sup>, 原和彦<sup>E</sup>, 寄田浩平<sup>F</sup>

東工大, 高工研<sup>A</sup>, 阪大<sup>B</sup>, 岡山大<sup>C</sup>, 京都教育大<sup>D</sup>,  
筑波大<sup>E</sup>, 早大理工研<sup>F</sup>, 他 PPS testbeam コラボレーション

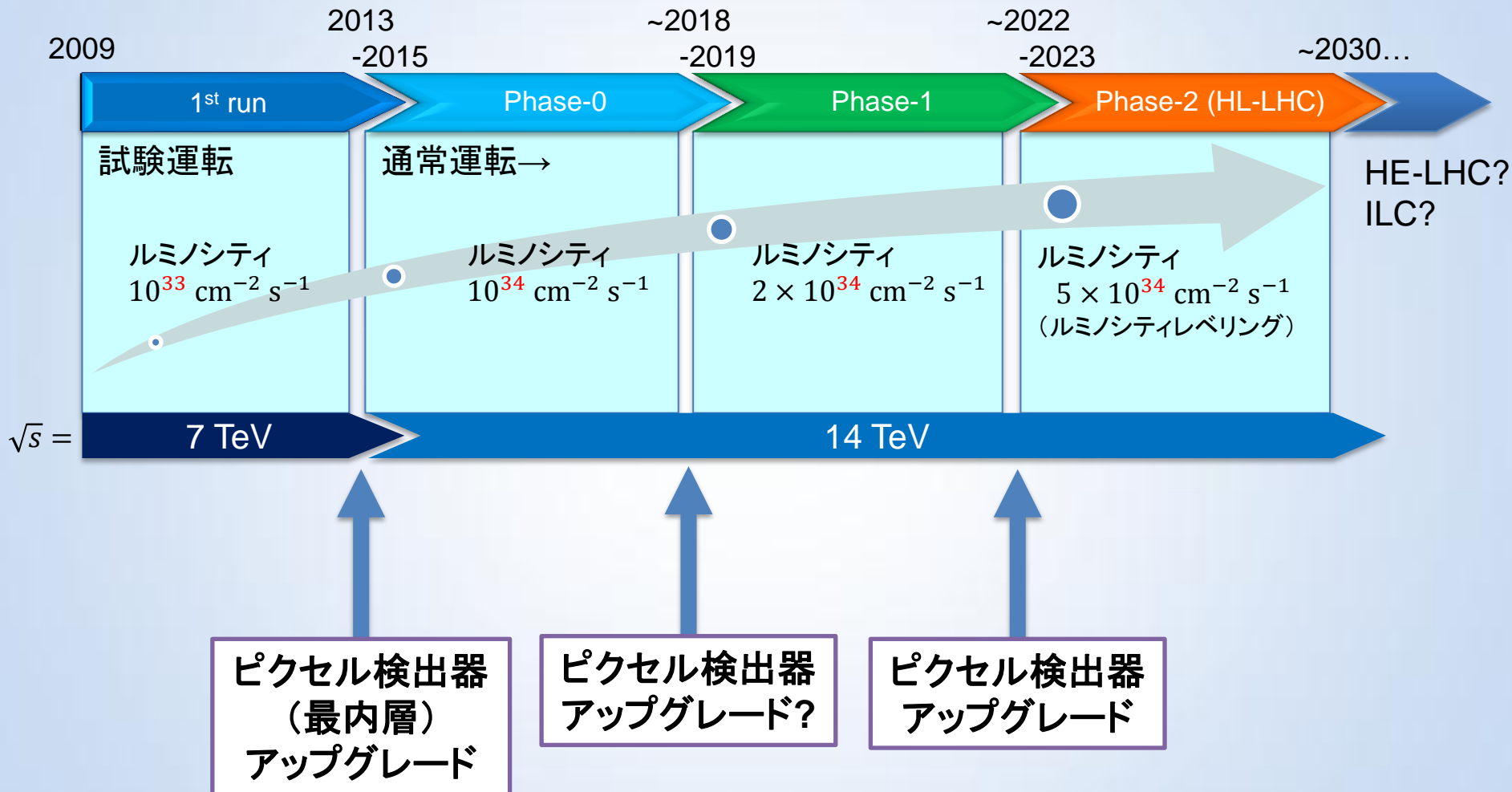
# ATLASピクセル検出器



- ATLAS Pixel

- 最内層飛跡検出器 (現在3層)
- $50 \times 400 \mu\text{m}^2$  のピクセルサイズ
- ToT (Time over Threshold) による  $dE/dx$  測定

# LHCアップグレード計画



# ATLASピクセル検出器アップグレード

- LHCアップグレード(HL-LHC, 2022)
  - 瞬間ルミノシティ:  $10^{34} \rightarrow 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  **5倍!**
  - 積分ルミノシティ:  $350 \rightarrow 3000 \text{ fb}^{-1}$  **10倍!**
  - 粒子密度の上昇、放射線環境の激化
  - 現ピクセル検出器での検出は難しい

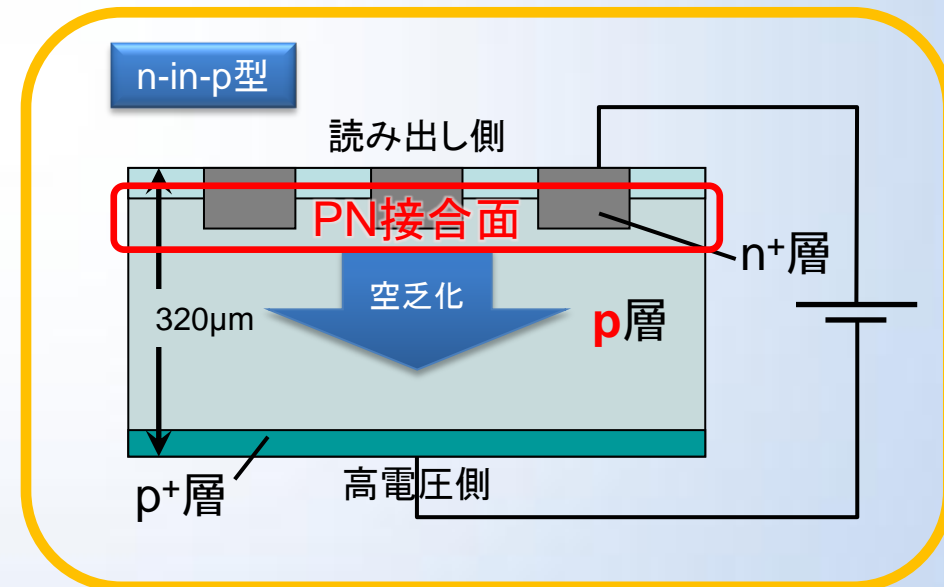
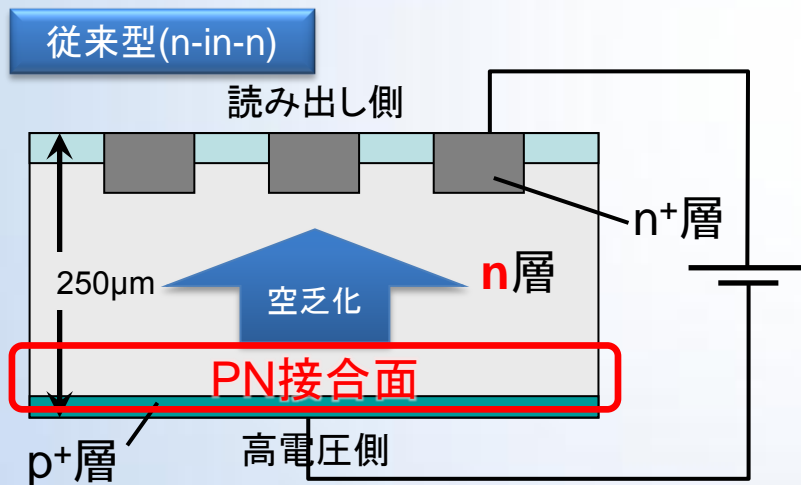


- ピクセル検出器アップグレード計画
  - 放射化対応、高密度下での精細な検出を目指す

センサー、エレクトロニクス開発が必要

# プラナー型n-in-pセンサー

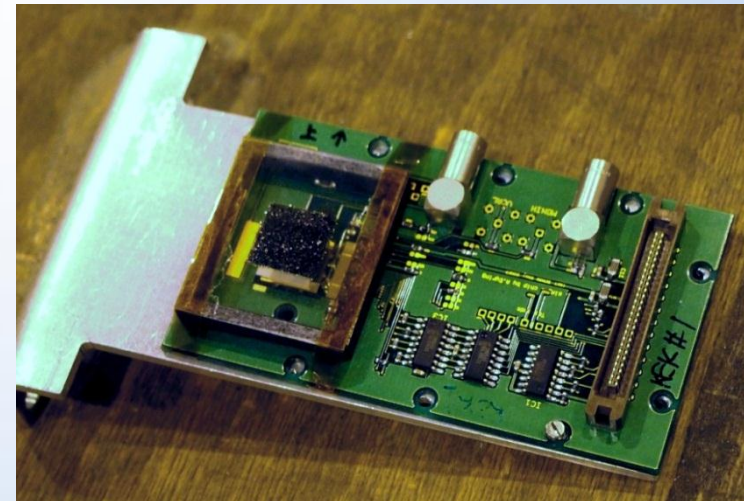
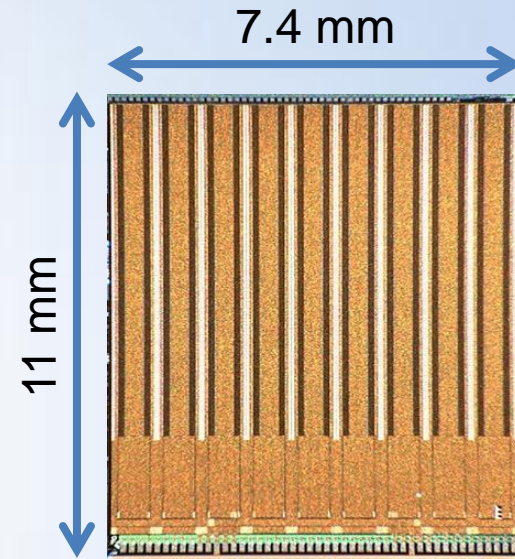
- バルク型変換なし → 安定！  
(放射化によるn型 → p型変換がない)
- PN接合は読み出し側 → 全空乏化でなくとも検出可能！
- 表面加工片側だけ → コスト削減！



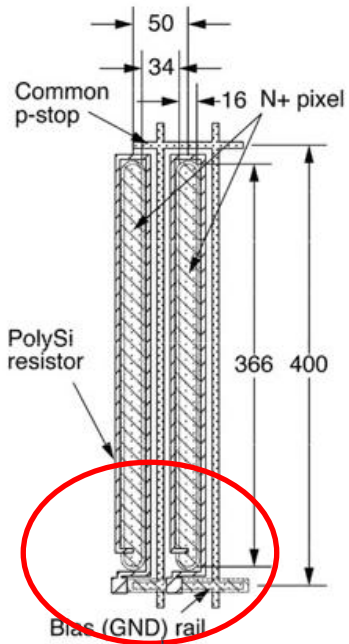
従来型(プラナー型n-in-n)から変えるメリットは大きい

# 使用センサー

- 浜松ホトニクス製プレーナ型n-in-pセンサー  
(320  $\mu\text{m}$ 厚)
  - 現ATLAS標準読み出しチップ(FE-I3)搭載
  - 2010.10に未照射状態でビームテスト
  - $1.1 \times 10^{15} n_{eq}/\text{cm}^2$  照射済(@CYRIC, 2011.02)
  - P-stop common, PolySilicon バイアス抵抗
  - P-stop individual, PolySilicon バイアス抵抗
- ビームテストにより、  
これらの違いを考察

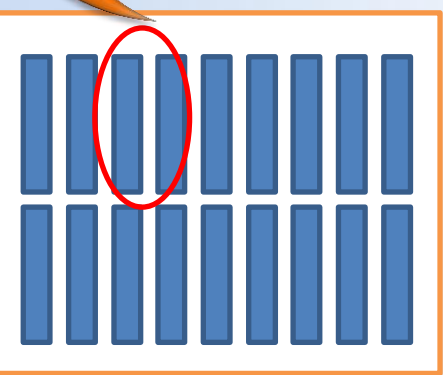
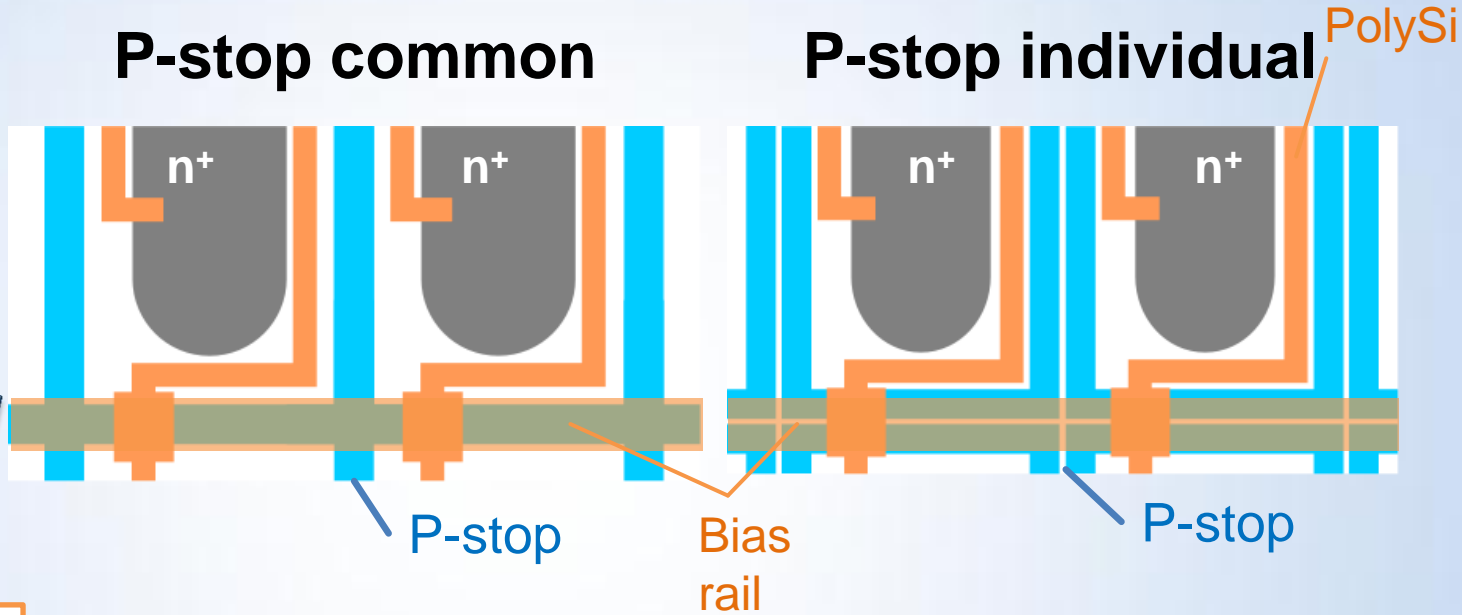


# センサー構造の違い



P-stop common

P-stop individual

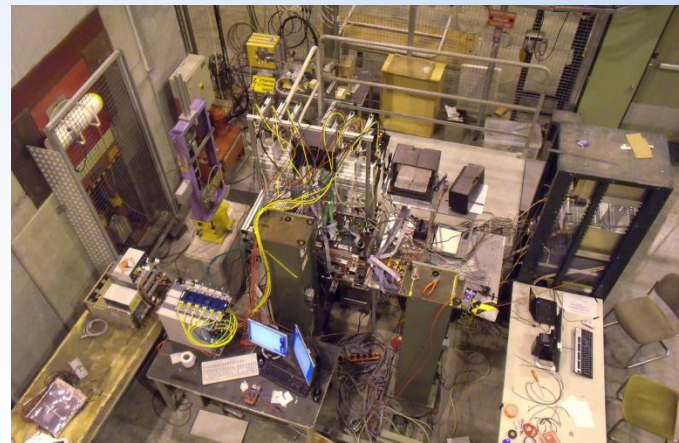


1センサー

- P-stop: 個々のピクセルを分離するために必要
  - $n^+$ に電荷が貯まったとき、隣に漏れ出すのを防止
- Bias rail: チップ無のセンサーテストに必要
  - チップにつけたら不要
  - PolySi 抵抗で浮かせる

# ビームテスト@CERN

- 2011.07.13—28 CERN Preveessin site
- 120 GeV  $\pi^+$ ビーム (SPS)
  - 平均トリガーレート: 650 Hz
  - 照射前での試験と同様のセットアップ



- 使用センサー

- 浜松ホトニクス製n-in-pセンサー(放射化後): 2台
- その他
  - 浜松ホトニクス製n-in-pセンサー(未照射): 4台
  - ドルトムント工科大放射化後センサー: 4台
  - IBL用センサー: 5台
  - マックスプランク研究所: 7台

[ATLAS PPS testbeam コラボレーション Jens Weingarten, et al.]



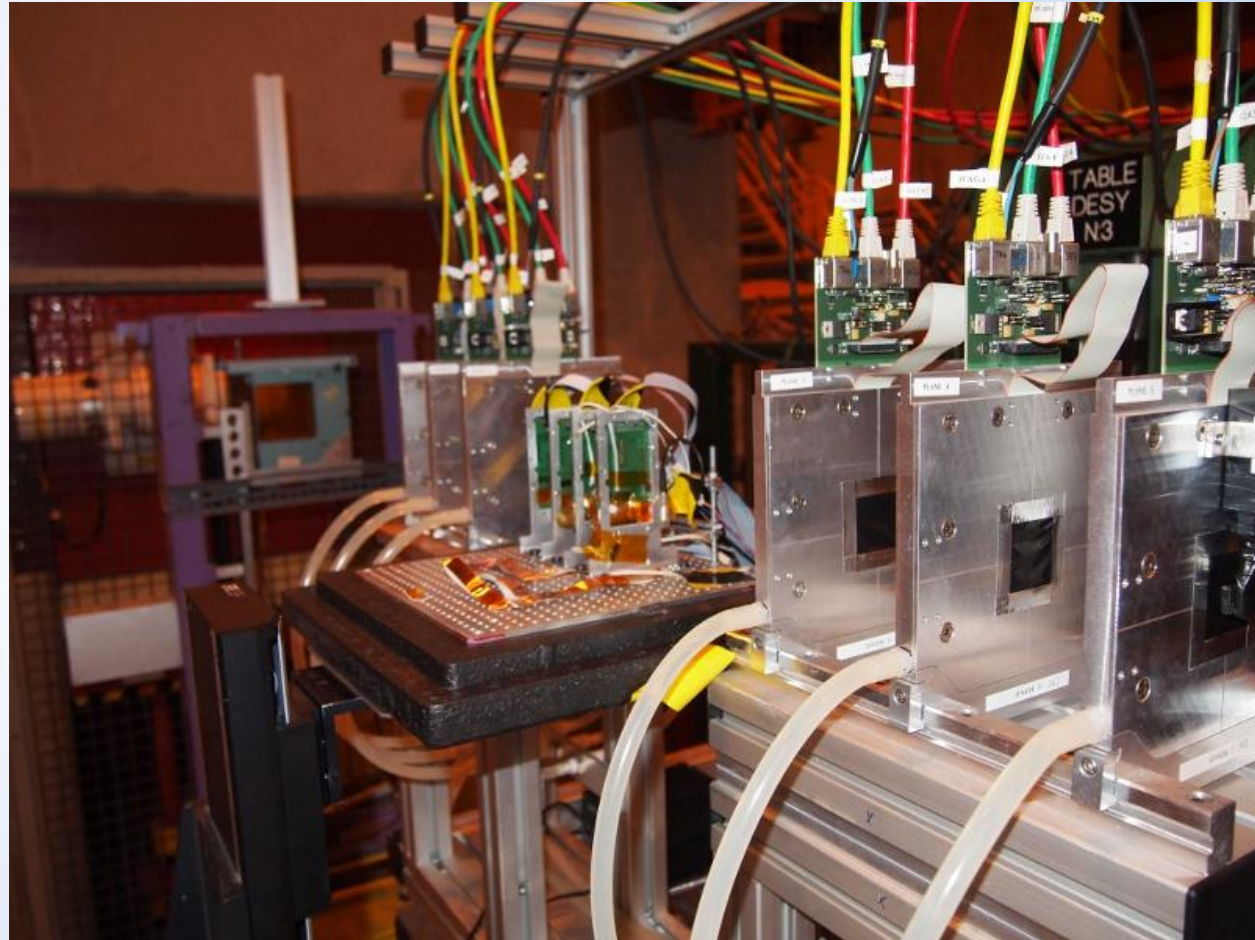
# セットアップ、解析手法

- 収集電荷量
  - 検出効率
- を照射前後で比較

構造上の違いを踏まえ、  
センサーの性質を調べた

使用テレスコープ“EUDET”  
<http://www.eudet.org/e26/>

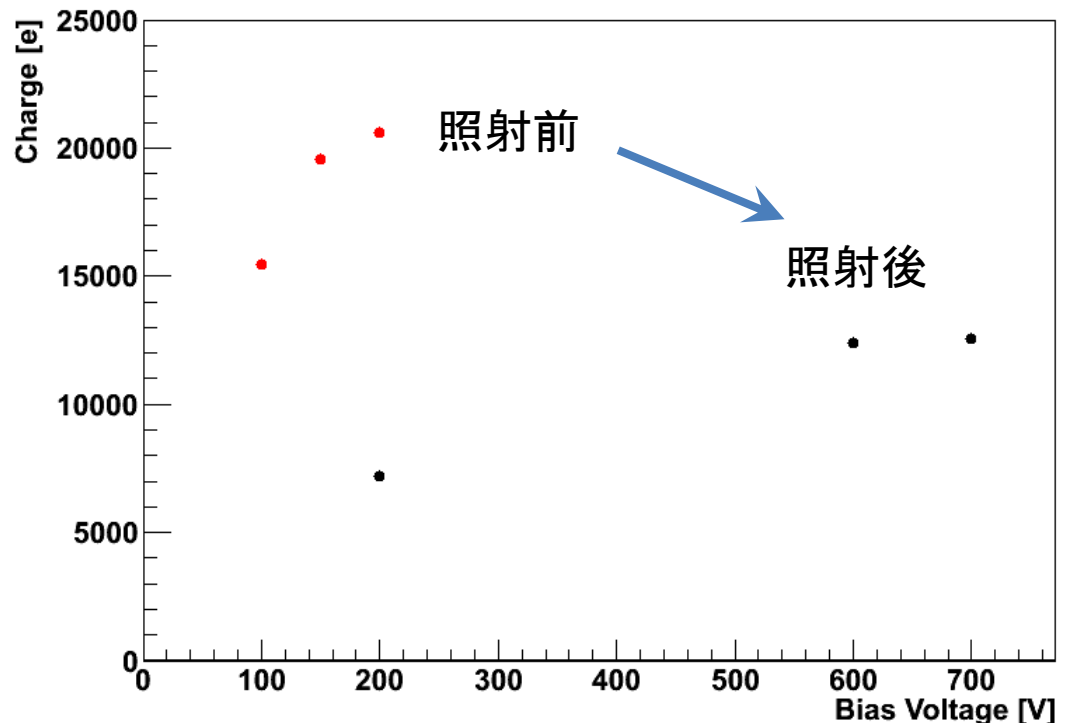
- Read out speed: 100  $\mu$ s
- Resolution: < 3  $\mu$ m



# 収集電荷量

- 今回のセンサーでの照射前後の収集の違い
  - 但し、値は2サンプルの平均値
  - 放射化後は収集量が落ちている
  - 完全空乏化400-500Vと推定
  - 低バイアス電圧で検出できている！

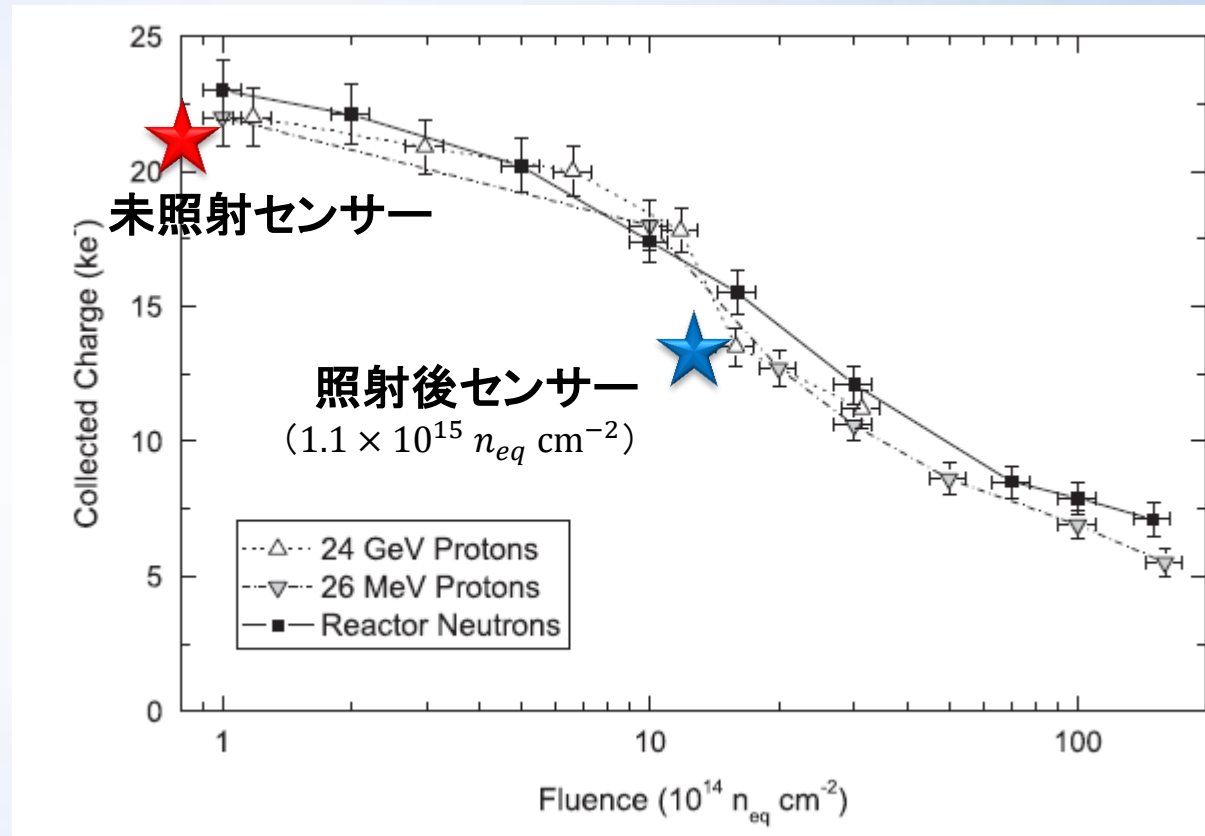
落ち方は適切か？



# 放射化による収集電荷量の変化

- 今回の結果と他のデータとの比較

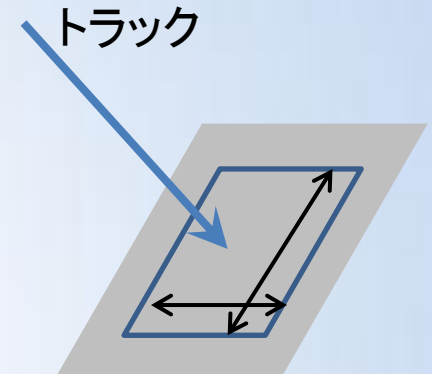
この振舞と酷似



A. Affolder, et al. "Charge collection efficiencies of planar silicon detectors after reactor neutron and proton doses up to  $1.6 \times 10^{16} n_{eq} cm^{-2}$ " (2009)

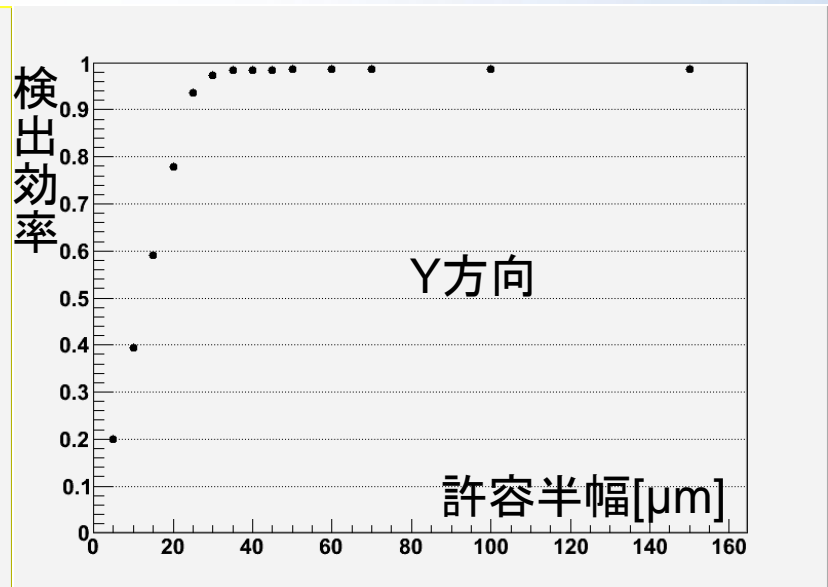
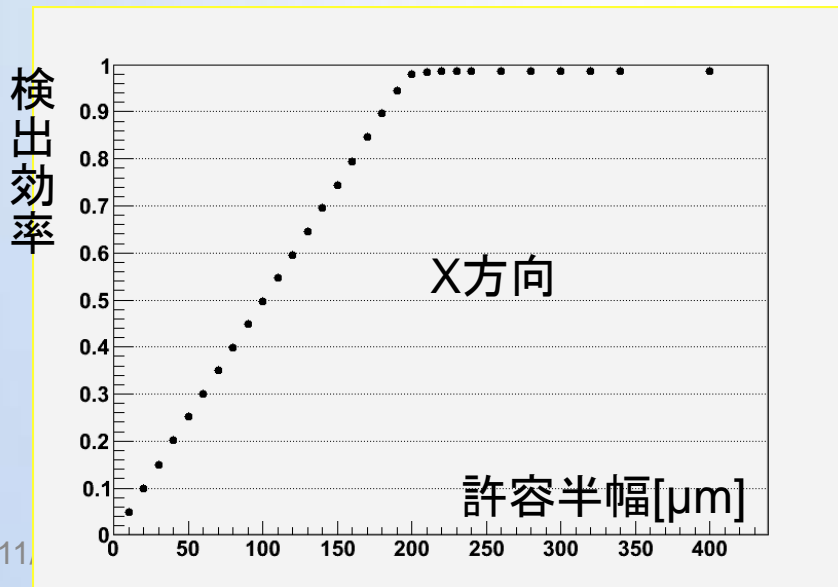
# 検出効率の比較

- 1ピクセル内の検出効率を、以下で比較
    - 照射前後
    - 2サンプル(P-stop common & individual)
- ピクセル表面構造による違いを調べる



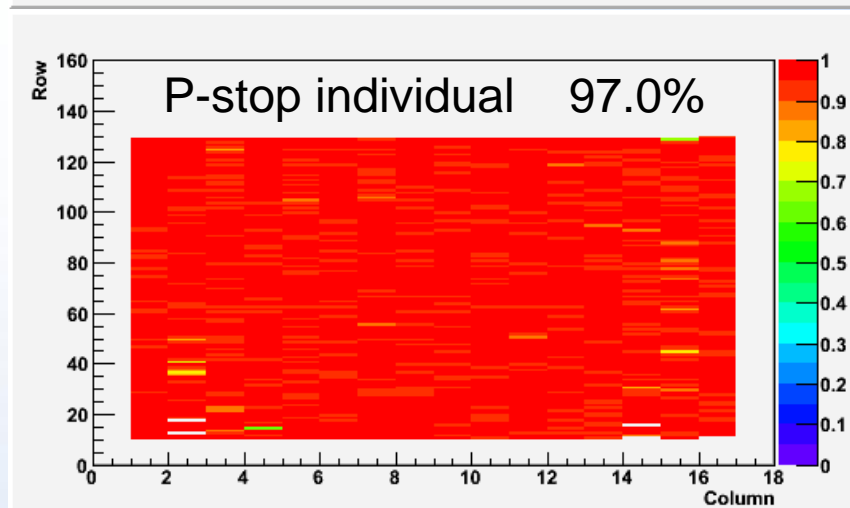
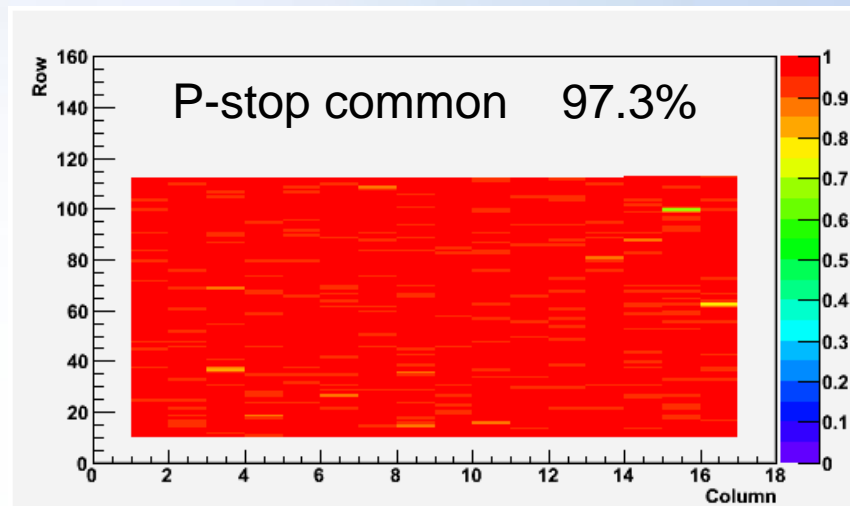
- 検出効率の計算法

- 1トラックに対して、どの範囲までをヒットとして認めるか  
x方向: 800  $\mu\text{m}$ , y方向: 100  $\mu\text{m}$  の幅で許容(2ピクセル分)



# 1チップ検出効率の比較

- 再構成したトラックと検出器のヒット情報をもとに、検出効率を計算
  - 上部の白い領域：  
トリガーをかけていない
  - 左右1ピクセル、上下10ピクセル：  
アライメントの都合でカット
- 双方とも高い効率を記録
  - 1ピクセル内の検出効率を調査  
→ ピクセル内構造の調査

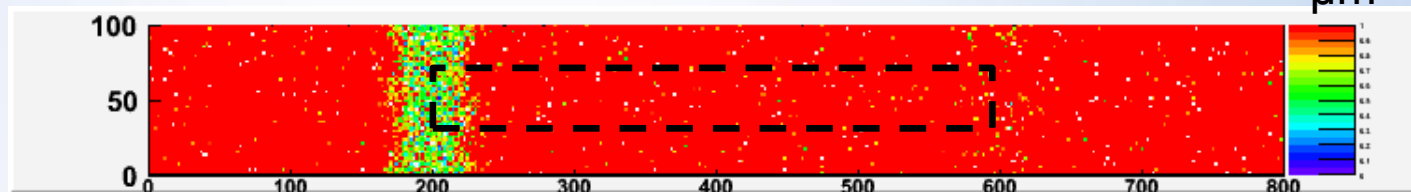
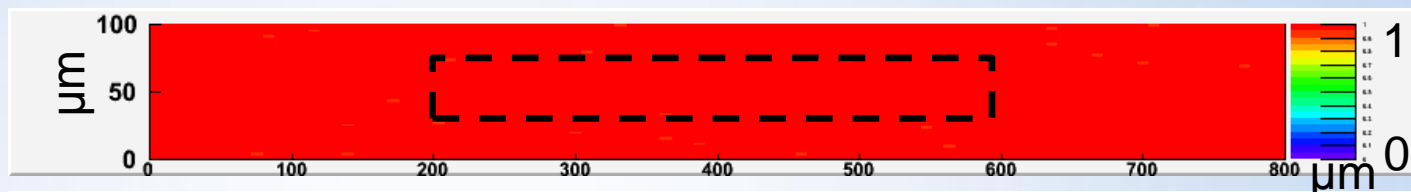


# 1ピクセル検出効率の比較

P-stop common  
未照射 99.7%



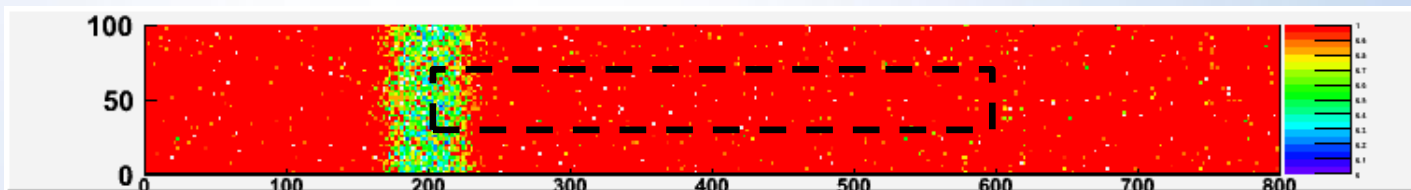
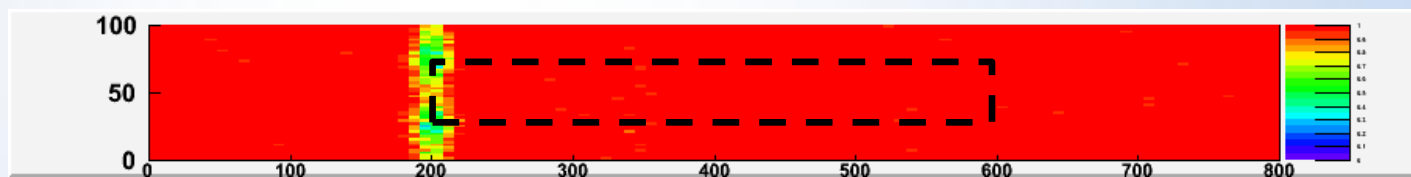
照射後 97.3%



P-stop individual  
未照射 98.6%



照射後 97.0%



- 放射化により、“バンド”が発生
  - Individualでは照射前でも発生している。
  - 構造上の問題？

この問題説明が鍵

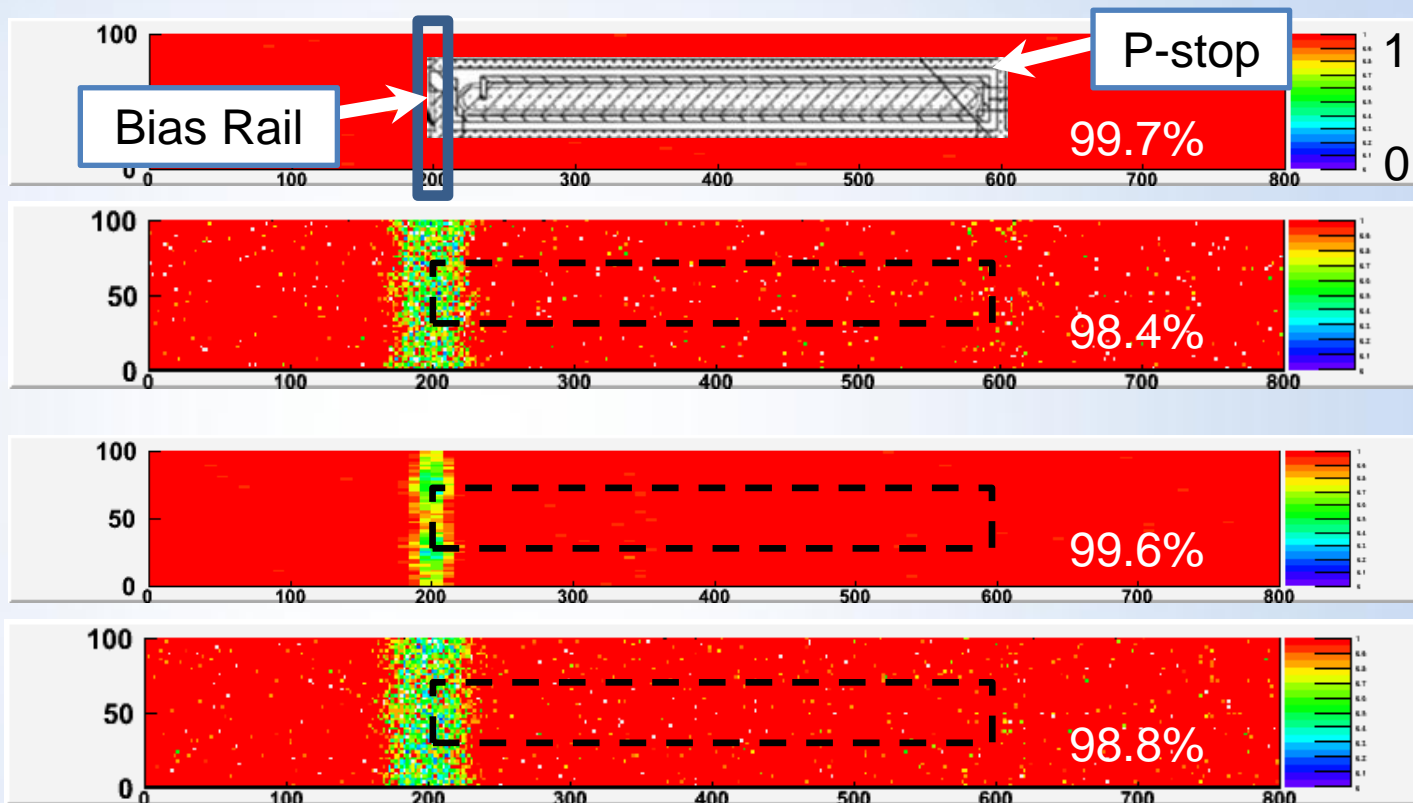
# 1ピクセル検出効率の比較

P-stop common  
未照射 99.7%

照射後 97.3%

P-stop individual  
未照射 98.6%

照射後 97.0%



- 放射化により、“バンド”が発生
  - Individualでは照射前でも発生している。
  - 構造上の問題？

この問題説明が鍵

# まとめ

- ATLASピクセル検出器アップグレードに向けて、シリコンセンサーの開発を行っている
- 今回作製したセンサーを放射線照射前後で2回のビームテストにかけ、読み出し試験を行った
- 収集電荷量は照射後センサーでは減少したが、
  - 低バイアス電圧で十分検出することが示せた
  - 放射化による影響を調べた他のデータと一致する結果となった
- これをもとに照射前後での検出効率を求め、比較した
  - 放射化後に“**バンド**”が現れる
  - 表面構造による違いがありそう  
→ 今後、究明していく