HL-LHCへ向けた
ピクセル検出器のビームテスト解析

筑波大学　修士1年　佐藤和之

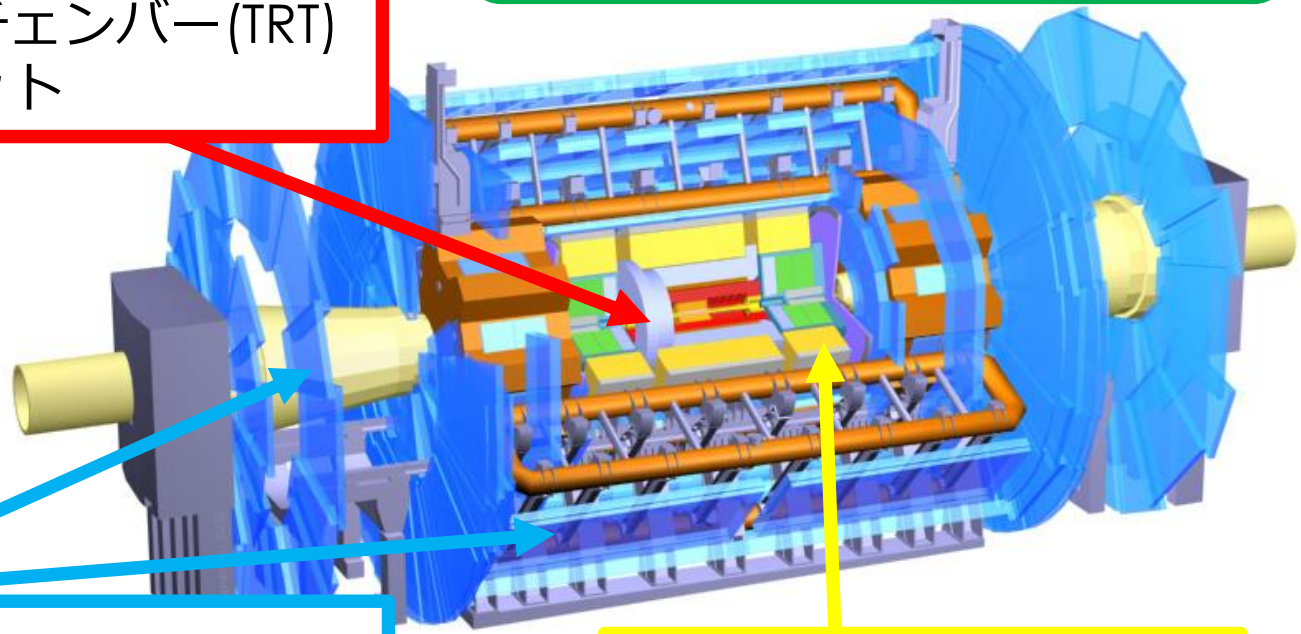
目次

- ATLAS upgradeについて
- ピクセル検出器について
- ビームテスト @DESY
- 解析結果
- まとめ

A Toroidal LHC ApparatuS(ATLAS)

内部飛跡検出器
- ピクセル検出器(Pixel)
- シリコンストリップ検出器(SCT)
- ストローチューブチェンバー(TRT)
- ソレノイドマグネット

HL-LHC(2025~)のインストールを目指し開発中！！

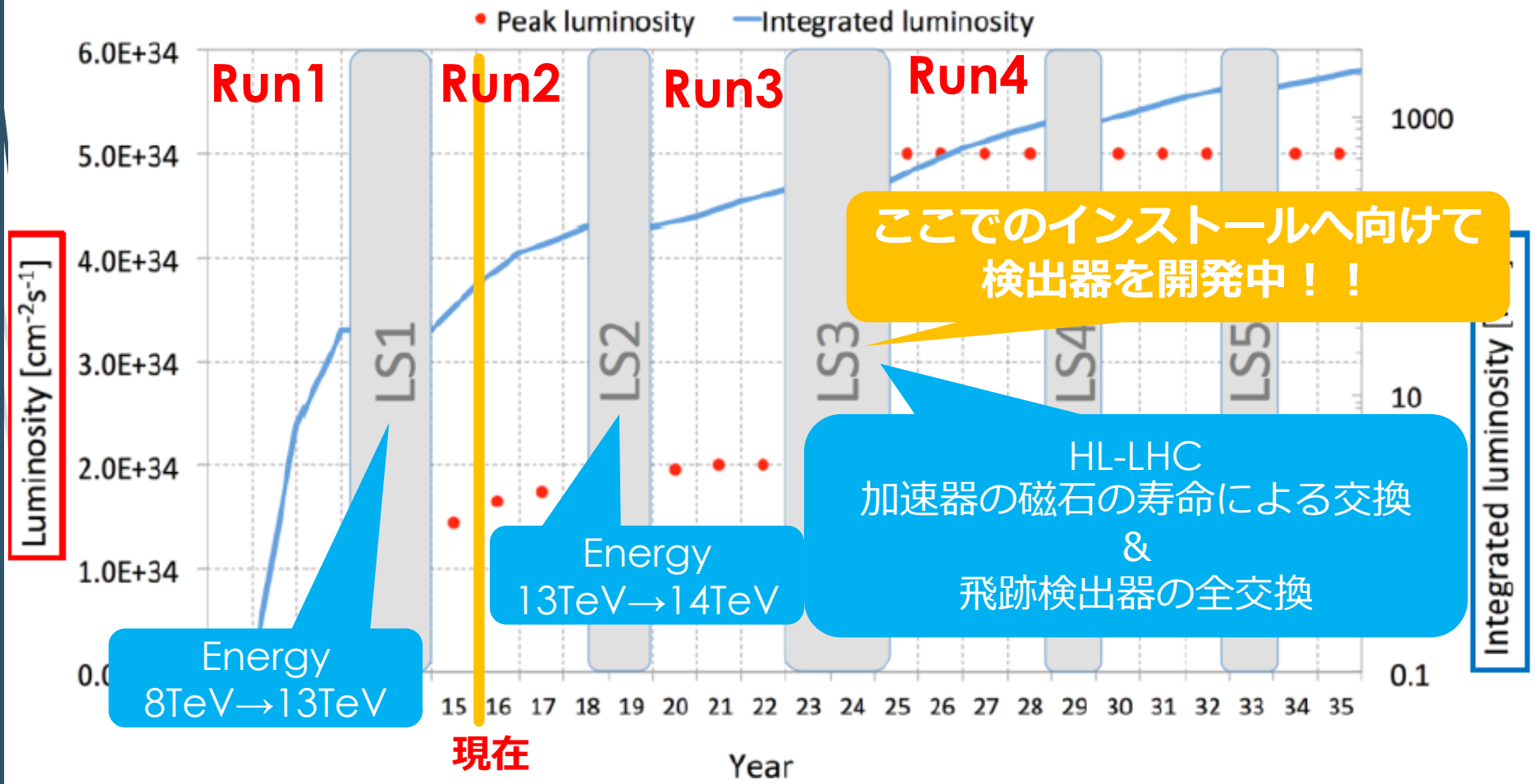


ミュー粒子検出器
- トリガーチェンバー(TGC,RPC)
- ドリフトチューブチェンバー(MDT)
- トロイドマグネット

カロリメータ
- 電磁カロリメータ
- ハドロンカロリメータ

アップグレード計画

HL-LHCにおける放射線量増大に耐える＆性能向上を目指す！！



Pixel & Strip Detector

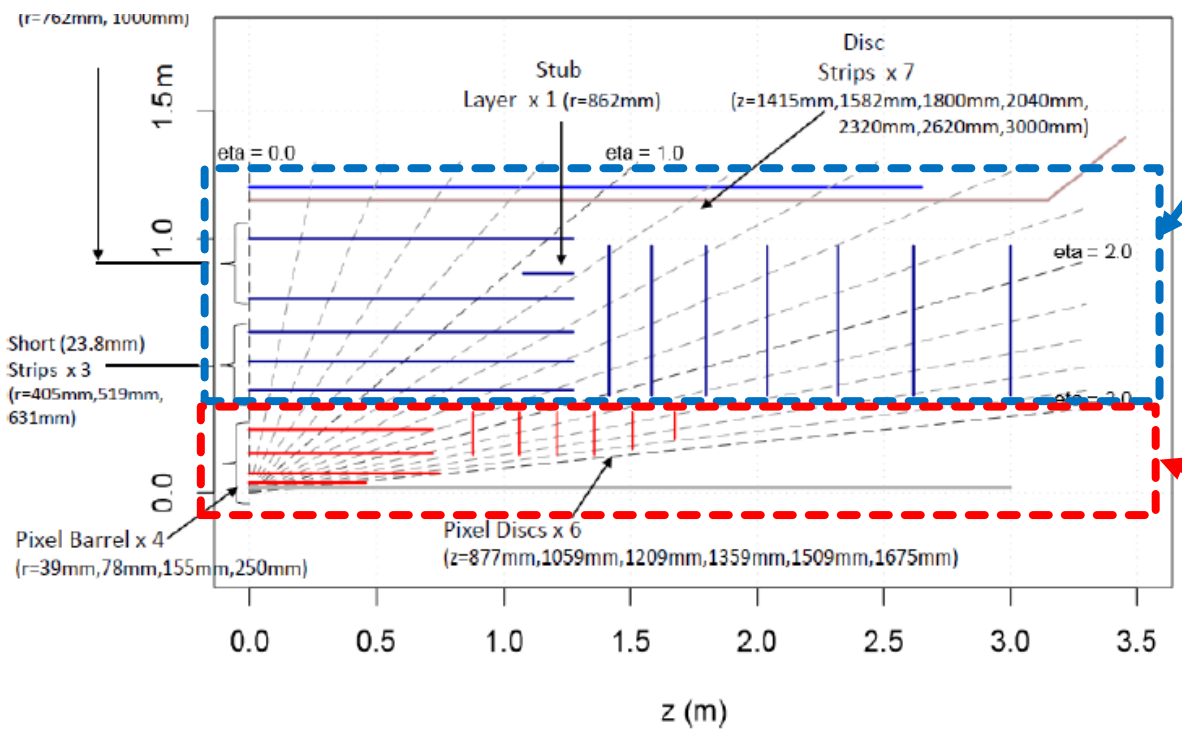
- ストリップ検出器

  放射線耐性と基礎特性、放射線における特性の変化 etc

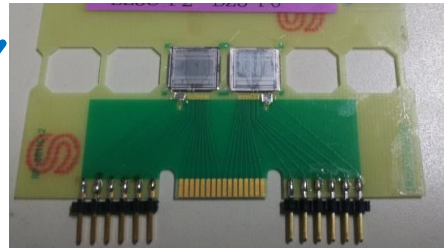
- ピクセル検出器

  モジュール作成方法の確立、放射線耐性、構造の最適化 etc

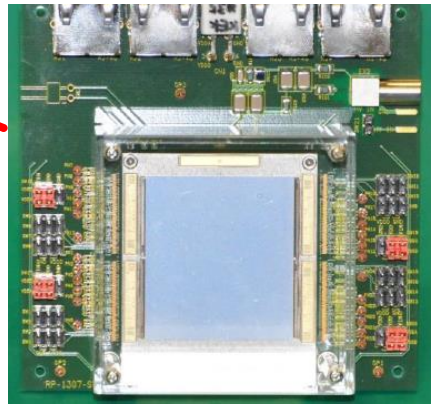
内部飛跡検出器　Upgrade後のレイアウト予定図



Stripe Detector

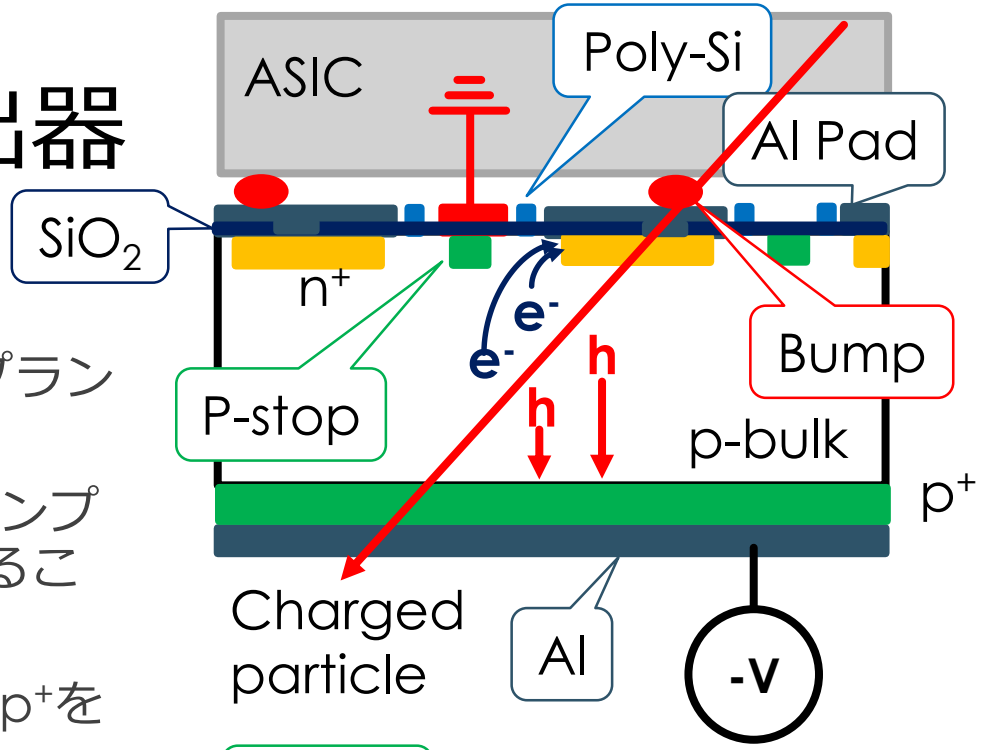


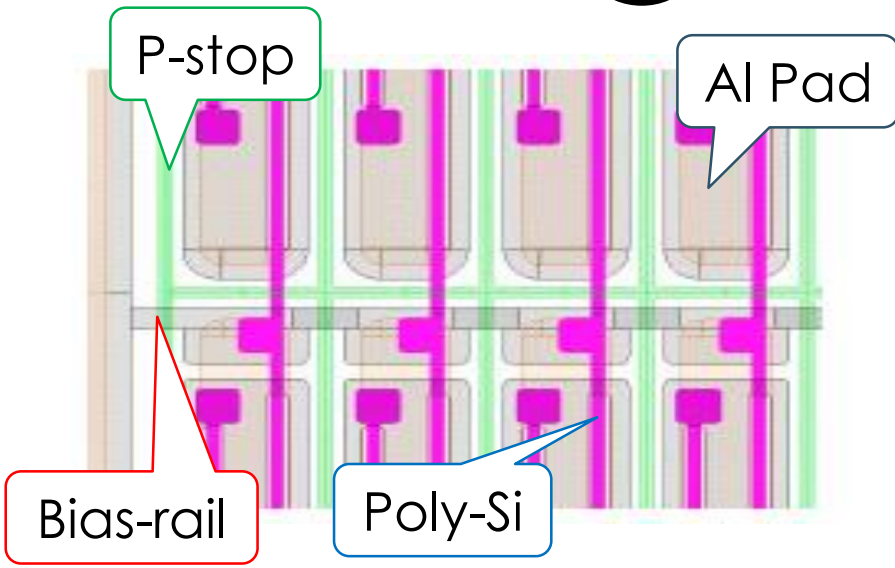
Pixel Detector



ピクセル検出器

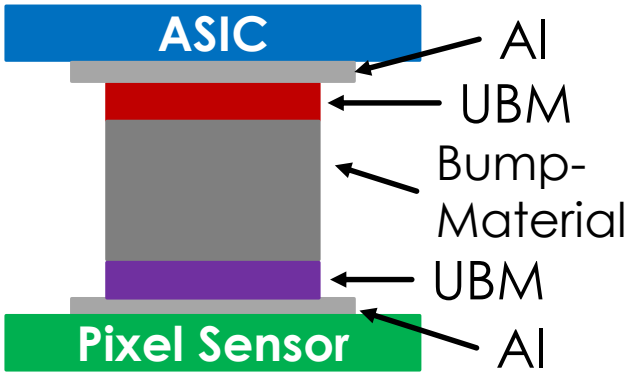
- n^+-in-p型半導体検出器
  - p型半導体にn型不純物をインプラントし、p-n接合を作る。
  - 裏面に逆バイアスをかけて、インプラントしたn型半導体を接地することにより、空乏層を広げる。
  - 電極の分離をよくするために、p^+を埋め込む。
- ピクセル検出器
  - Al Padが2次元的な配置をしているため、n^+を接地するためにBias rail、Poly-Siを引く必要がある。
  - 読み出し回路を全ピクセルとつなげるために**Bump-bonding**を行う





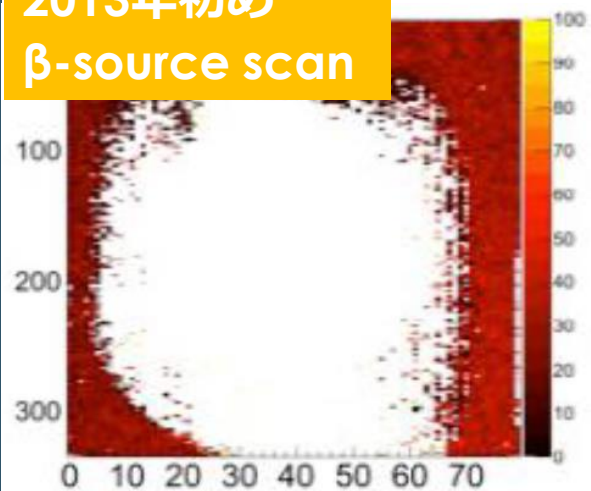
Bump bonding

ピクセル検出器の2次元的に配置された各ピクセルから読み出すためにASICとチップをはんだバンプで繋げる手法。

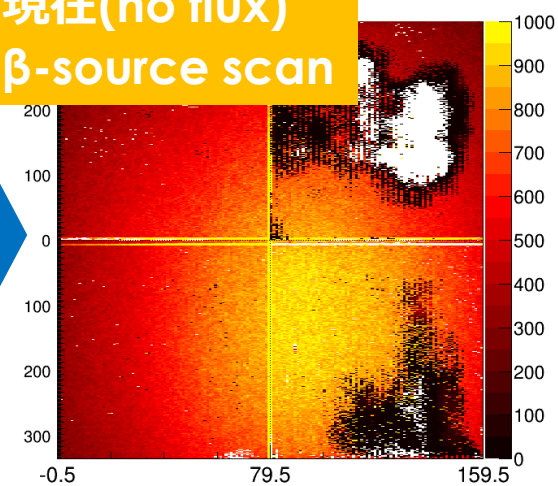


開発初期と比べるとBump-open、動作不良などが減少してきて、クオリティが安定してきた。

2013年初め β-source scan



現在(no flux) β-source scan



＊β-source scan

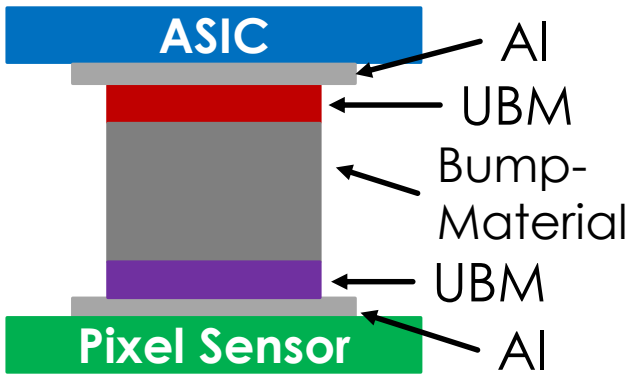
Sr90のβ線源を用いて、モジュールの応答を検査する。

Bump-openは信号が返って来ないため白い領域。

Bump-Bondingをする際の固定方法を
「ガラス製サポート」→「真空吸着（中心１穴ジグ）」
→「真空吸着（２次元マトリックス配置したジグ）」にすることで改善

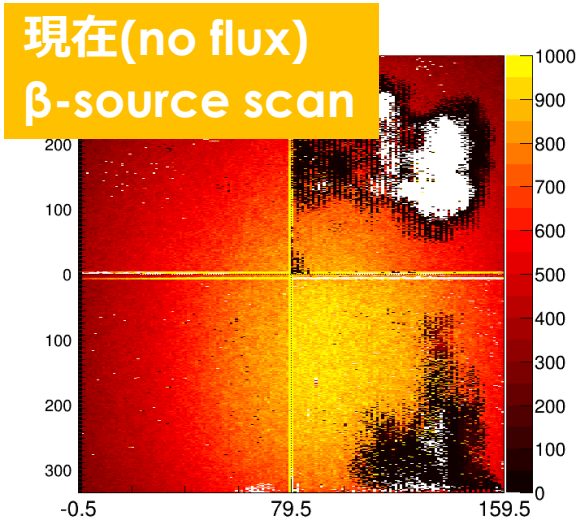
Bump bonding

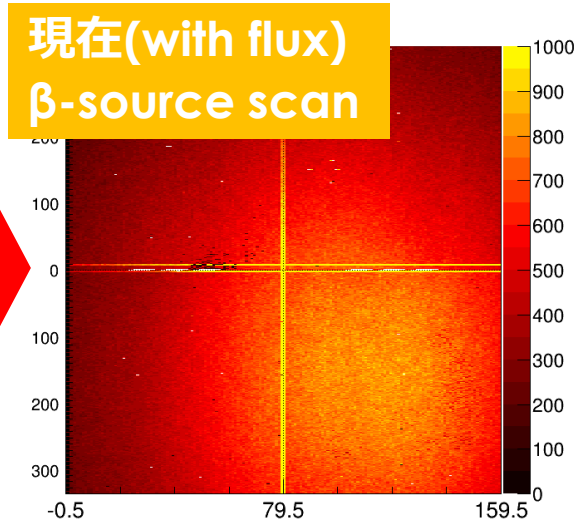
ピクセル検出器の2次元的に配置された各ピクセルから読み出すためにASICとチップをはんだバンプで繋げる手法。



開発初期と比べるとBump-open、動作不良などが減少してきて、クオリティが安定してきた。

フラックスを用いてはんだの濡れ性を向上させることにより改善。
→フラックス残渣によりコネクタに接触不良が起こりやすくなるためできるだけ使用したくない
→他の方法を模索中





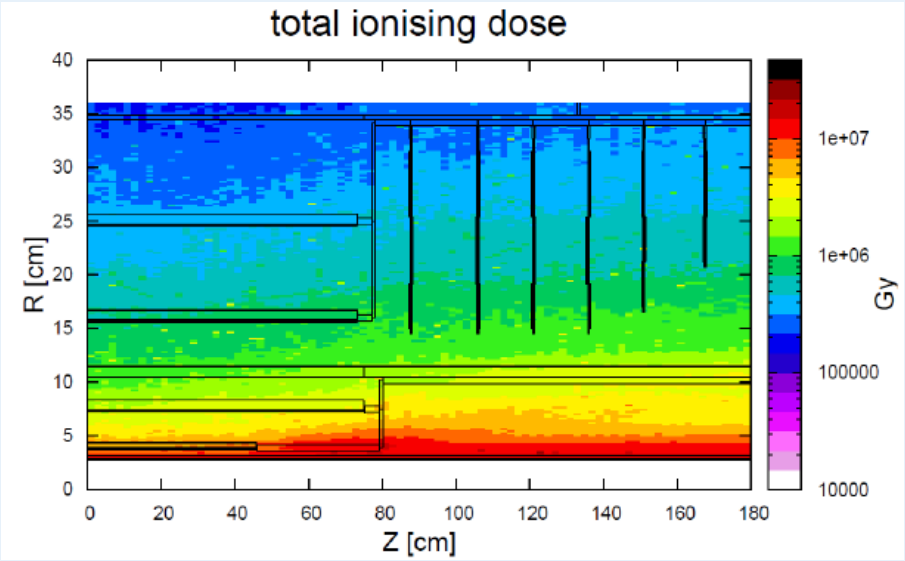
照射試験

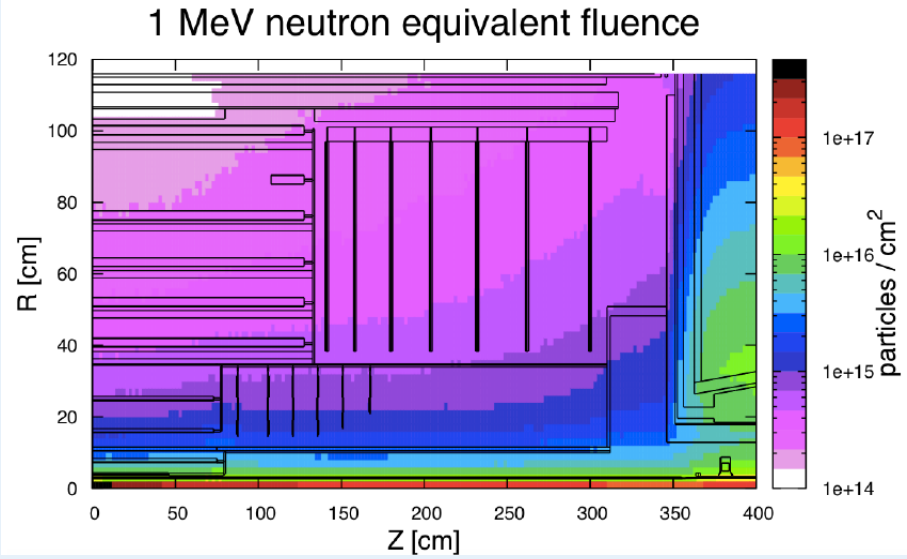
- HL-LHCでは、高い放射線耐性が必要

→γ線・陽子線照射を行い、HL-LHCでの放射線損傷を再現し、放射線照射後のセンサーの性能評価を行う。

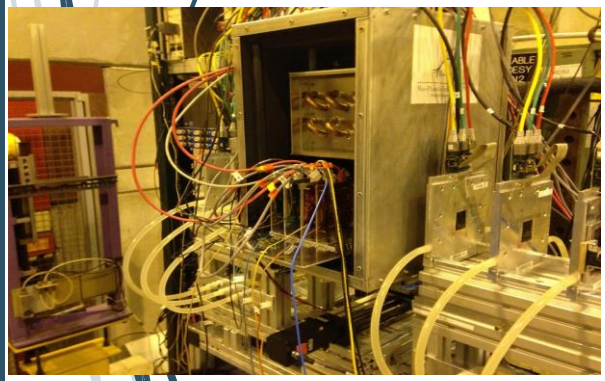
（本発表では、陽子線照射されたセンサーの解析について発表する）

ガンマ線照射：表面損傷	陽子線照射：バルク損傷
HL-LHC run ~ 1MGy	HL-LHC run ~ 1.7×10^{15} neq/cm^2





開発サイクル



照射前試験

サンプルの状態確認

照射

- 陽子線@CYRIC
- ガンマ線@高崎

照射後試験

サンプルの状態確認

テストビーム

検出器の位置分解能、検出効率の試験
@CERN , DESY etc

浜松ホトニクスへ Feedback

ビームテスト

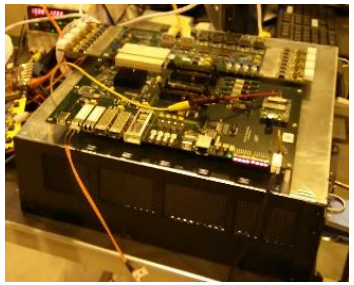
- 粒子ビームを用いて、検出器の検出効率、位置分解能を調べる
  - CERN　125Gev pion beam
  - DESY　4GeV electron beam

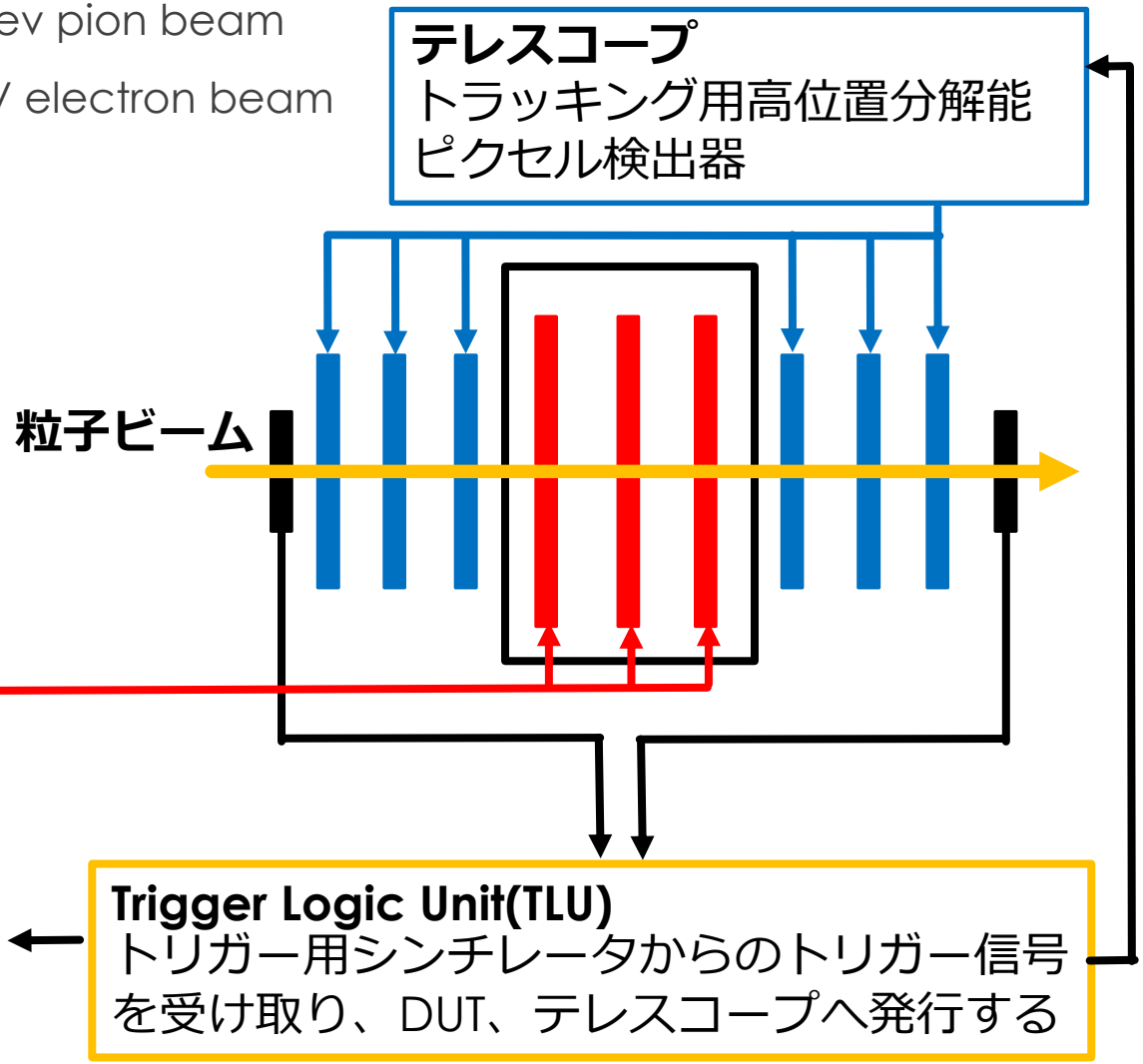
Detector Under Test(DUT)
性能評価するピクセル検出器

DAQシステム

- USBPix

- RCE





2015April DESY Testbeam

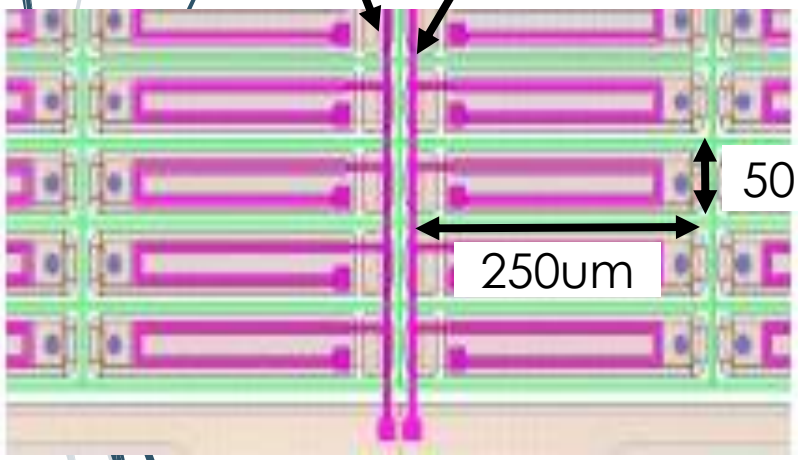
- 2015年4月にDESYで行われたビームテストの解析を行った。

1. **Bias-railを電極の上に乗せることによる効果の検証**
2. ピクセルサイズの検証（50um×250um→25um×500um）

Type12

Proton-Irrad 3.0E+15neq/cm^2

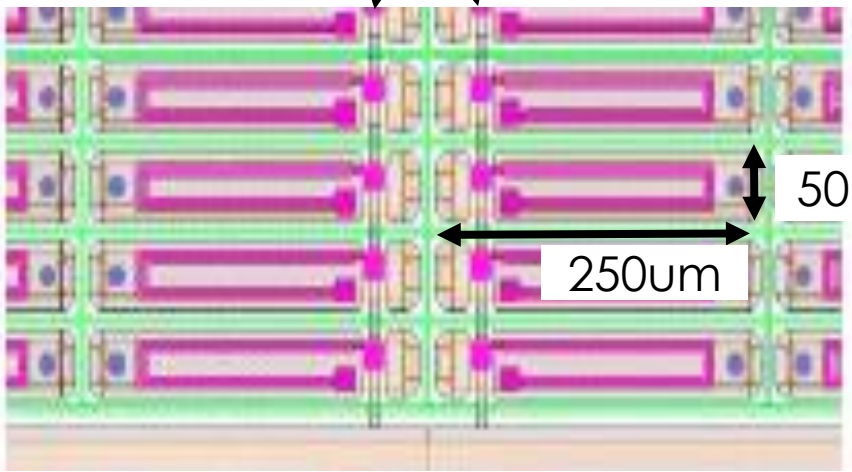
2本のbias-railがピクセル境界に置かれている



Type2

Proton-Irrad 3.0E+15neq/cm^2

2本のbias-railをピクセル上に置いている

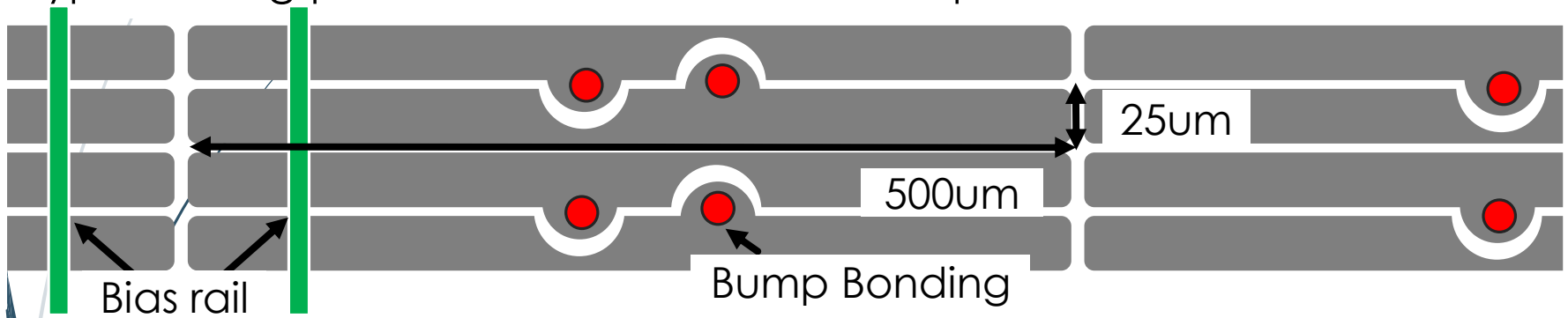


2015April DESY Testbeam

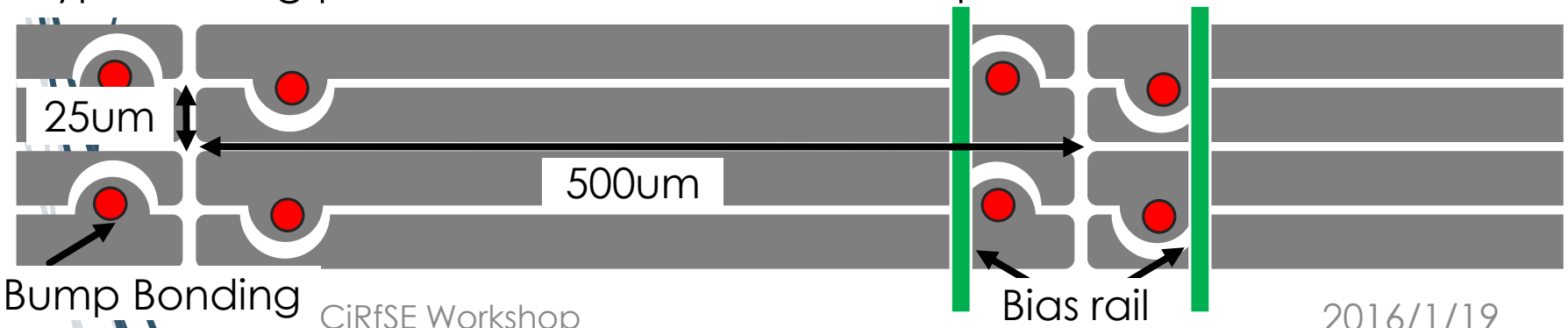
- 2015年4月にDESYで行われたビームテストの解析を行った。

1. Bias-railを電極の上に乗せることによる効果の検証
2. **ピクセルサイズの検証（50um×250um→25um×500um）**

Type26 Long pixel ,Proton-Irrad 3.0E+15neq/cm^2



Type22 Long pixel ,Proton-Irrad 3.0E+15neq/cm^2



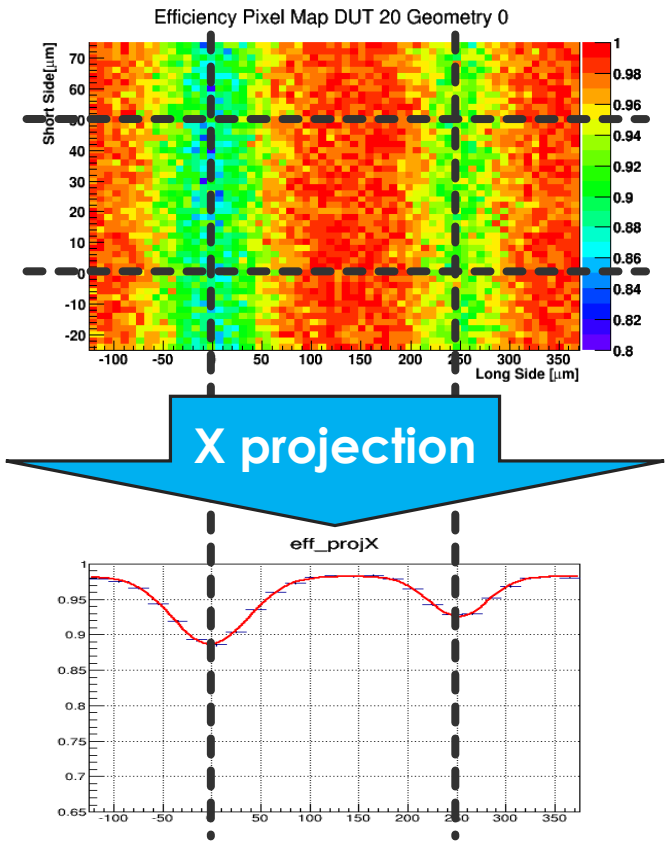
解析方法

- ピクセル内の検出効率マップを射影し、**ピクセルの検出効率**と**ピクセルの端の効率**を求め、比較する。

1. 射影したヒストグラムを
   Double Gaussian + constant Fit
2. Constantを**ピクセルの検出効率**とする
3. 両側のGaussianをそれぞれ積分し、積分領域の長さで割ることで**ピクセル端の効率**とする

→この値をピクセルの構造ごとに比較することにより、どのような構造が最適なのか検証していく

Ex. Type 200V

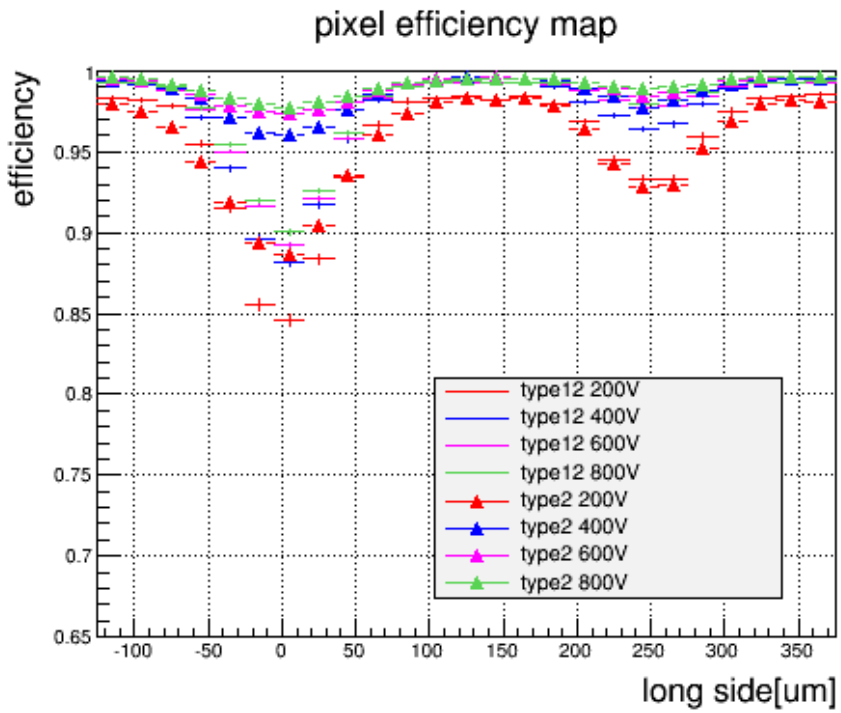


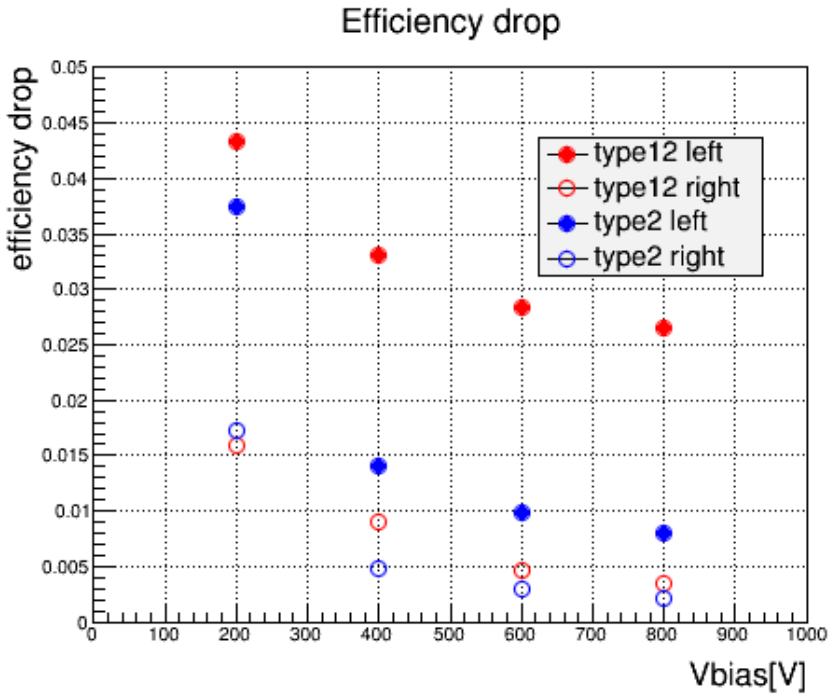
Analysis about bias-rail

- Type2：bias-railが電極上にある構造
- Type12：bias-railがピクセル境界上にある構造

→先行研究からの予想通り、Type2の方が検出効率の低下が小さくなっている

→bias-railを電極に乗せることにより検出効率の低下を抑制できる





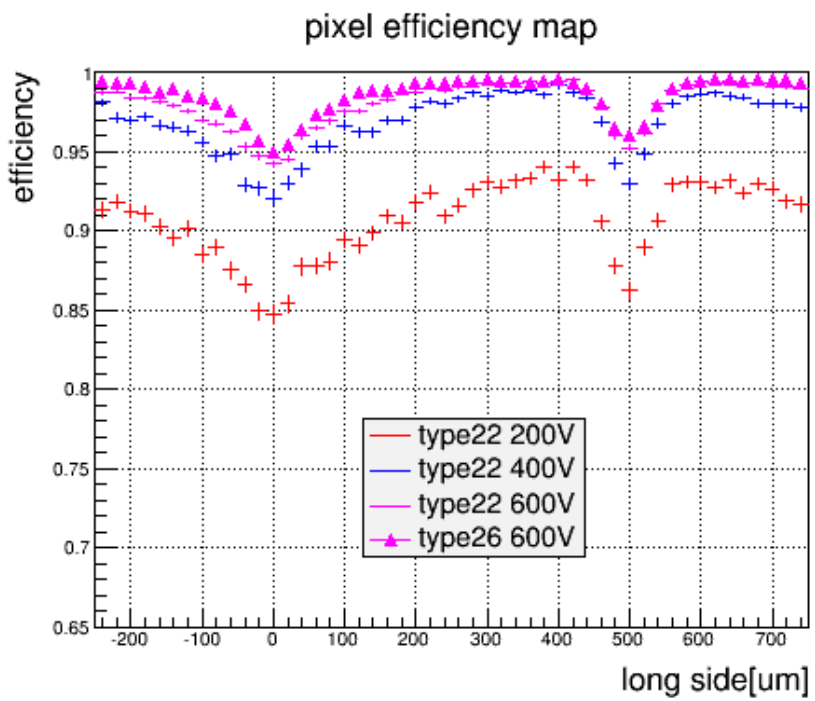
Analysis about long pixel

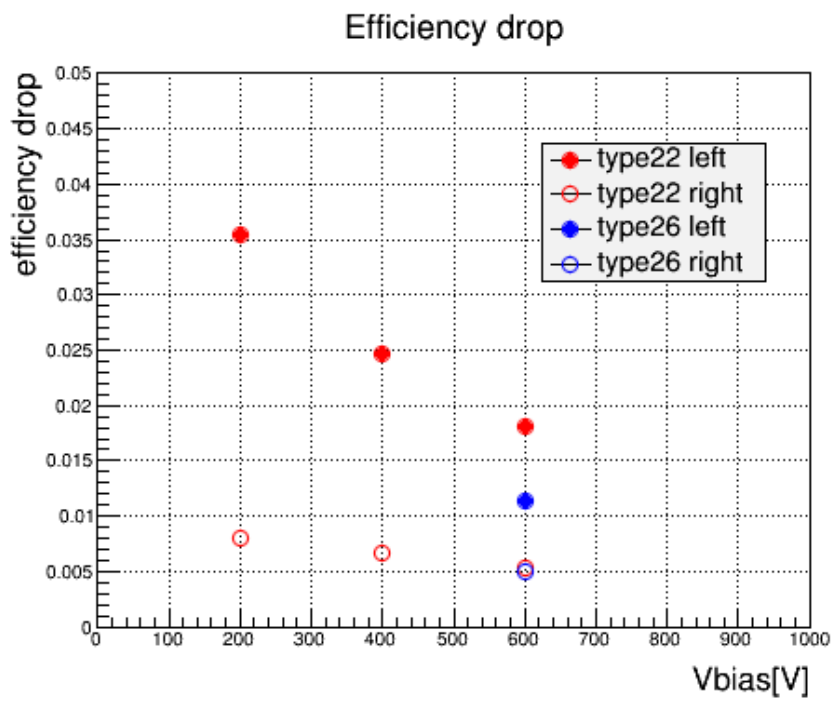
- Type22：bias-railが電極上に存在＋End pad
- Type26：bias-railが電極上に存在＋Center pad

→どちらの構造もbias-railが隠れるようになっているが、Type22の方が検出効率の低下が大きい

→Bonding Padとバイアスレールが重なると問題が起こるのか？

→現在検証中





まとめ

- 現在、HL-LHC Run4(2025~)の内部検出器へのインストールへ向けてピクセル検出器の開発を行っている。
- 検出器の構造の最適化を目指し、ビームテストを行い検出効率低下の原因を探索中
  - Bias-railによる検出効率の低下は先行研究通りの結果となり、Bias-railを隠すことにより抑制できると考えられる。
  - ピクセルサイズ：25um×500umのセンサーについては、Bonding Padの影響があるかどうか、今後も検証を続けていくとともに、25um方向についての有用性を検証していく必要がある。

Back up

Large Hadron Collider(LHC)

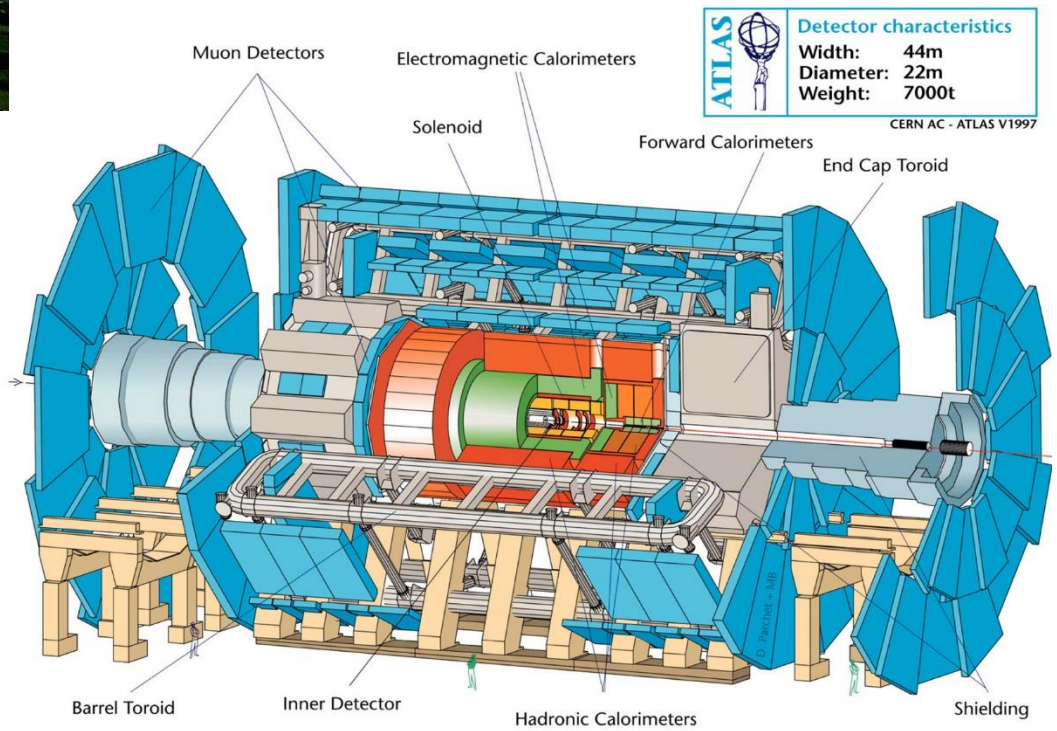
スイスとフランスの国境に位置している
周長　27km
地下　約100m
陽子-陽子衝突型加速器
2010年~2012年　最大8TeV
現在、最大13TeVで稼働

A Toroidal LHC ApparatuS(ATLAS)

全長 44m、高さ 25m、
重さ 7000tの汎用粒子検出器。

目的

- Higgs粒子の精密測定
- 超対称性粒子の探索
- 余剰次元の探索
- 新しい物理

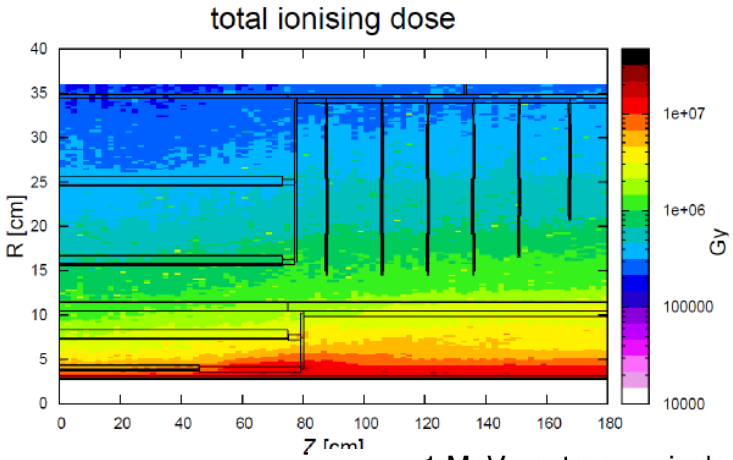


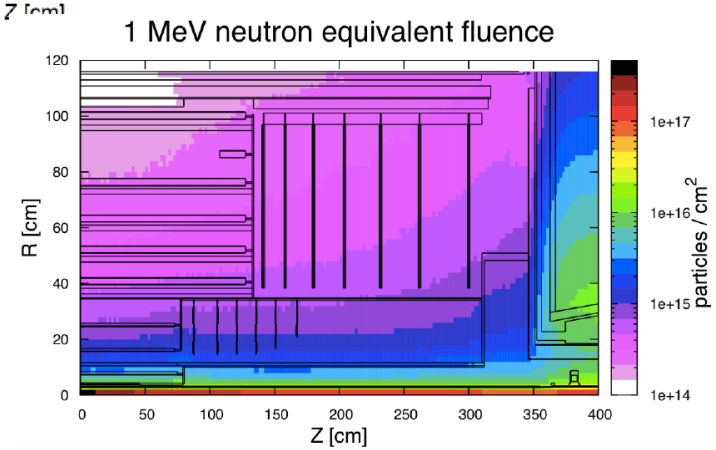
HL-LHCにおける電離性放射線量

- 衝突点近傍では多量の放射線が放出される。

HL-LHC（Luminosity~3000fb^{-1}）での線量マップ

(ATL-UPGRADE-PUB-2014-003)





Barrel	R [cm]	$\Phi_{1\,\mathrm{MeV}}$ [10^{14} cm^{-2}]		Dose [10^6 Gy]	
		average	maximum	average	maximum
layer 1	3.8	134.9	142.1	7.200	7.677
layer 2	7.3	47.7	54.0	2.625	3.205
layer 3	15.6	15.1	17.4	0.751	0.898
layer 4	24.6	8.2	9.1	0.377	0.414

現在、3層目、4層目へのインストールを考えている

Max 1MGy(HL-LHC run)

γ線損傷

- シリコンセンサーはγ線により表面損傷を受ける。
- γ線が原子をイオン化・励起し、エネルギーを落とす。

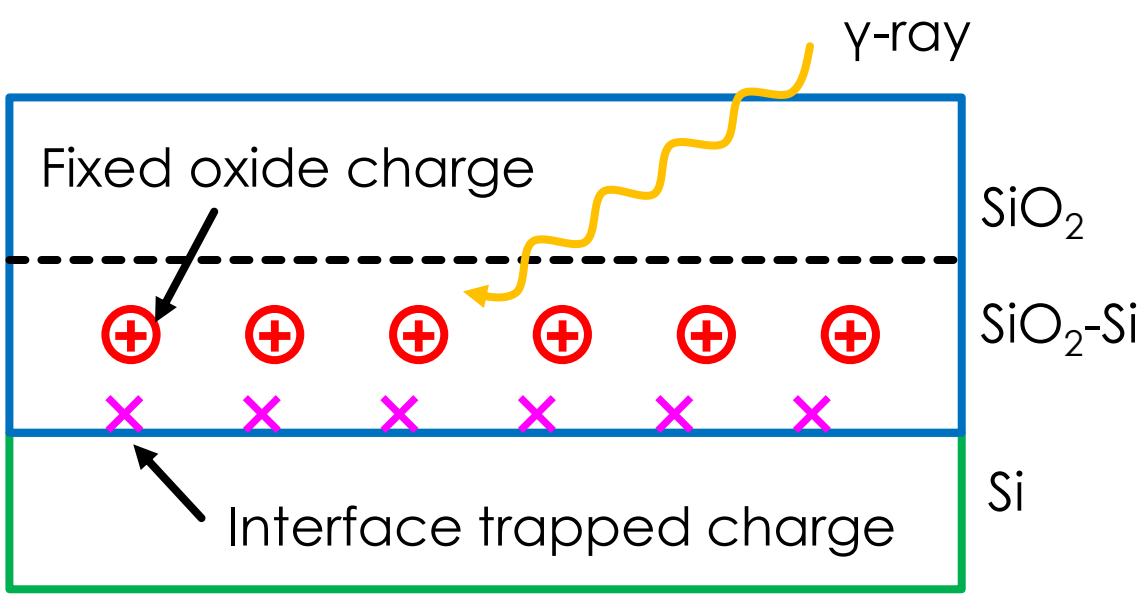
（イオン化損傷を受ける領域：SiO_2層、 SiO_2–Si界面）

Fixed oxide charge : 正孔捕獲によるもの、正に帯電

Interface trapped charge : 界面付近に + or - に帯電。エネルギー準位を形成。

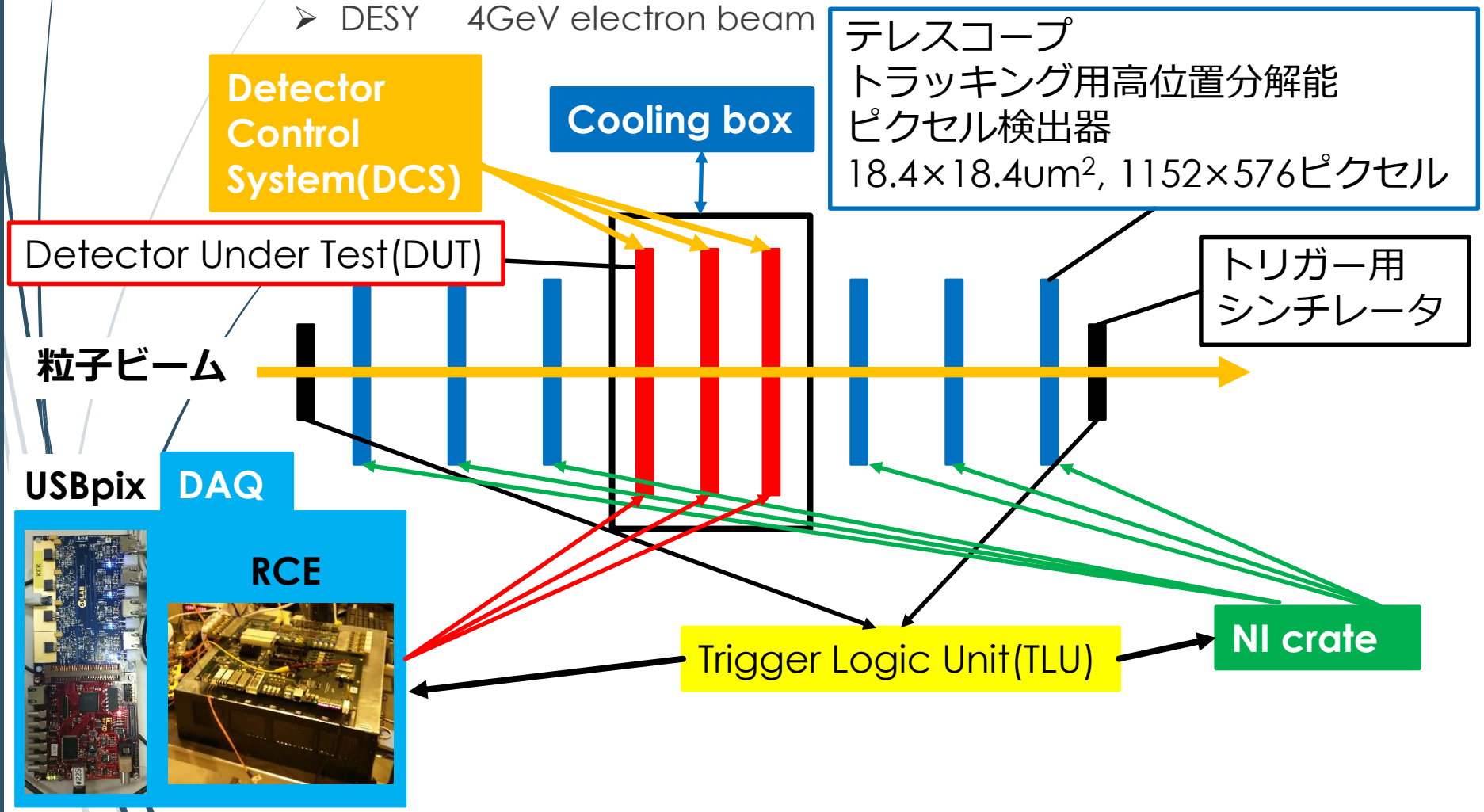
表面損傷により引き起こされる現象

1. 暗電流の増加
2. 表面電場の上昇によるブレークダウン電圧の変化
3. 空乏化しないDead layerの形成



ビームテスト

- 粒子ビームを用いて、検出器の検出効率、位置分解能を調べる
  - CERN　125Gev pion beam
  - DESY　4GeV electron beam



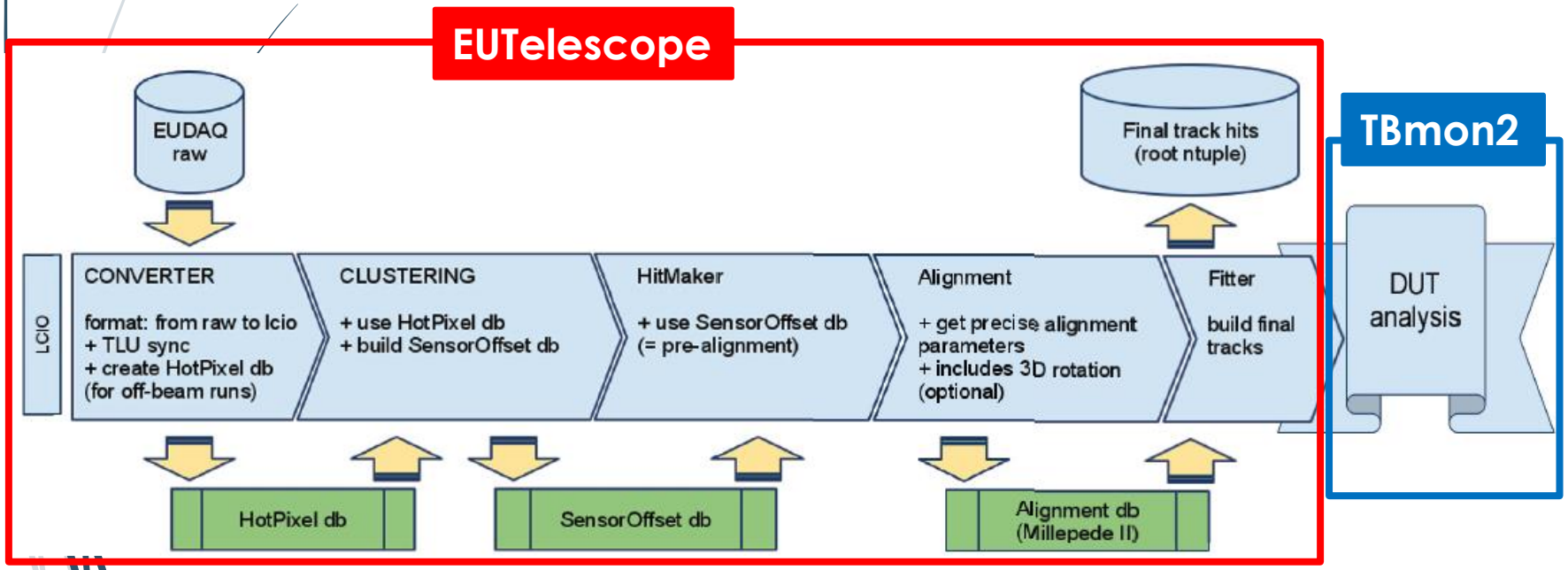
ビームテスト解析

- ビームテスト解析には2つのソフトウェアを用いる
  - EUTelescope

rawデータを変換し、テレスコープの位置情報を用いて、clustering、rotation、alignment、trackingなどを行う。その後、通過した粒子の飛跡情報を出力する

  - TBmon2

EUTelsescopeで出力された飛跡情報を用いて検出効率や収集電荷の解析を行う



Previous Research

- ピクセル構造の異なるセンサーについて解析を行い、検出効率低下の原因を調査

先行研究では、バイアスレール下で大きな検出効率の低下が見られた。

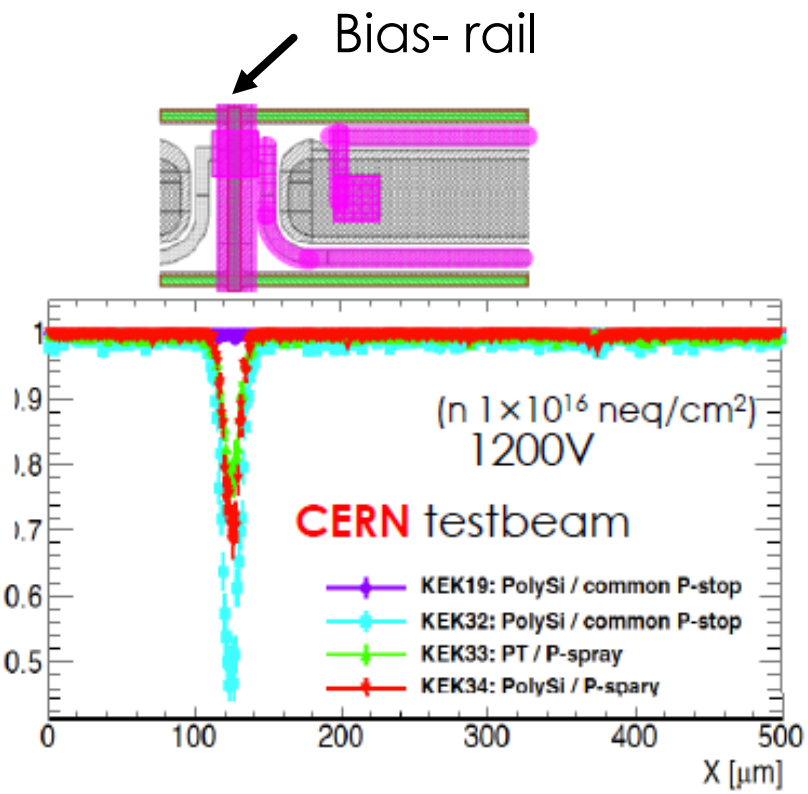
→バイアスレールの帯電により電荷が収集されていないのではないか？

→これを改善するための基本アイディア

「他の構造（電極、p-stop etc）でBias-railを隠す」

→Bias-railを隠した構造のセンサーを作成し、最適化を行う。

Previous research by K.Motohashi



Bump bonding

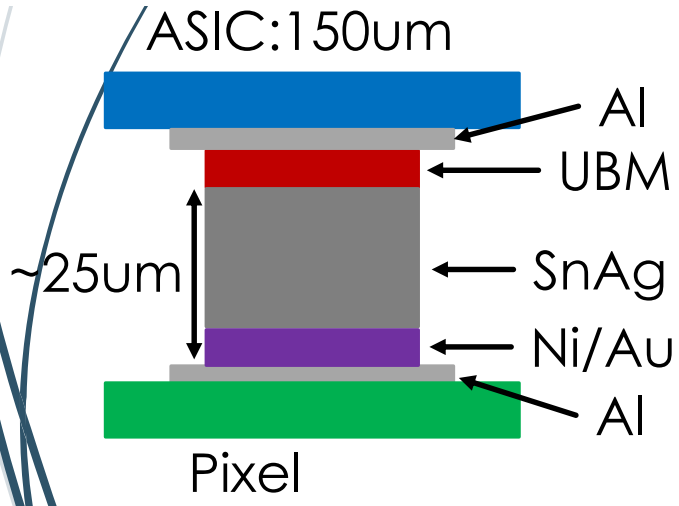
＊Bump bondingとは

ピクセル検出器の2次元的に配置された各ピクセルから読み出すためにASICとチップをはんだバンプで繋げる手法。

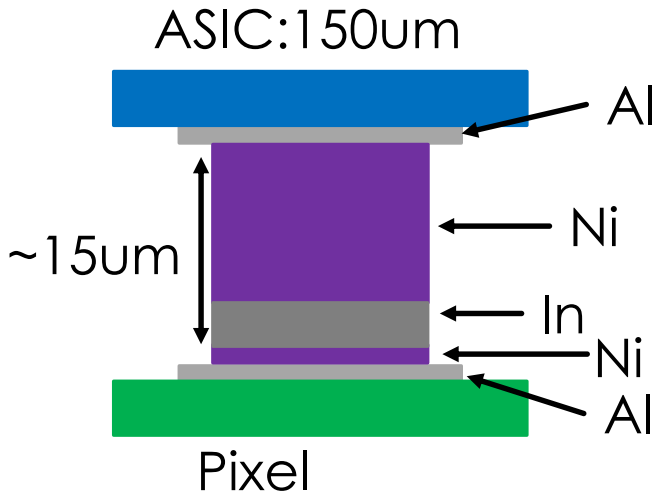
はんだとチップ電極であるAlを繋げるために
「Al(ASIC)-UBM-Bump-UBM-Al(chip)」のような層構造をしている。

UBM(Under Bump Metal)：Al電極にバンプを形成するために介在させる金属層

Main解：SnAg Bump-bonding



Back up解：Ni/In Bump-bonding



Bump bonding(SnAg)

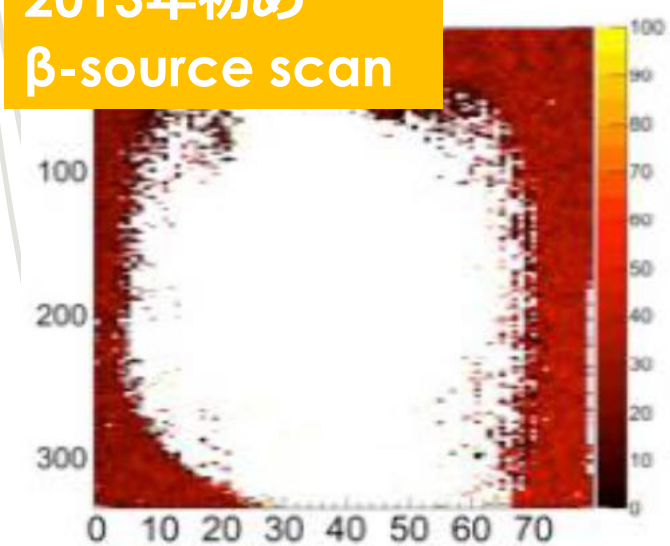
- 初期段階での問題点であったガラス製サポートによるBump-openは、真空吸着法の開発により改善。(300um厚センサー)

→150umのセンサー、150umのASICのバンプボンディングでバンプが剥がれてしまった

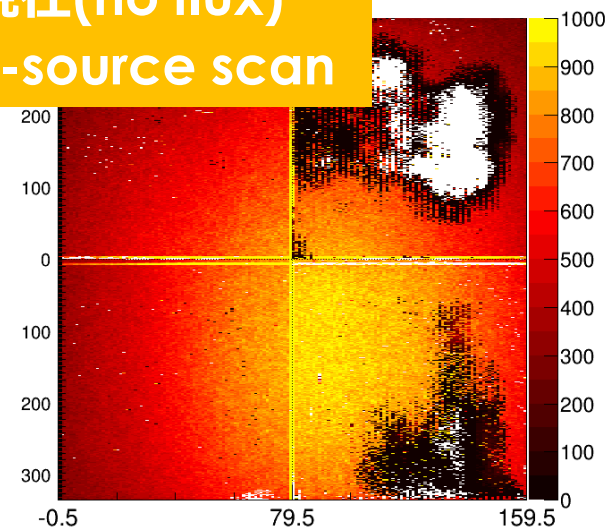
→真空吸着ジグの形を変更し解決

「**中心1穴のジグ**」から「**チップサイズに合わせて吸着穴を多数マトリックス配置したジグ**」にすることで改善

2013年初め
β-source scan



現在(no flux)
β-source scan



＊β-source scan

Sr90のβ線源を用いて、モジュールの応答を検査する。

Bump-openは信号が返って来ないため白い領域。

Bump bonding(SnAg)

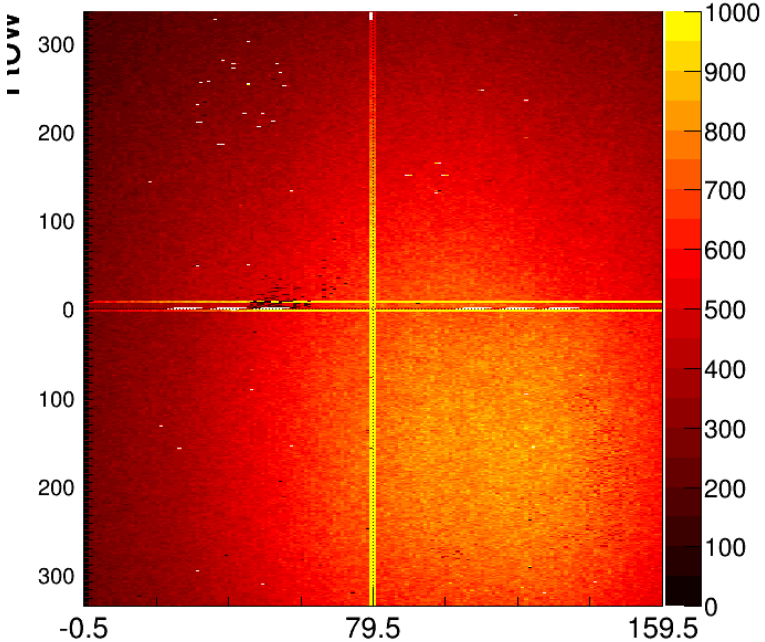
しかし、再現性、温度サイクルに弱いという問題が存在

→フラックスを用いることにより改善

→接合時に汚れとしてフラックスが残り、コネクタにおける接触不良や腐食が起こりやすくなるため、できるだけ使いたくない。

(*)IBL(Insertable b-Layer)の開発の際にフラックス残渣のせいでモジュールの60%に不具合があった

現在（with flux）
β-source scan



＊フラックス

はんだ付けの際に生じる酸化物や汚れを取り除き、加熱中の酸化を防止する。

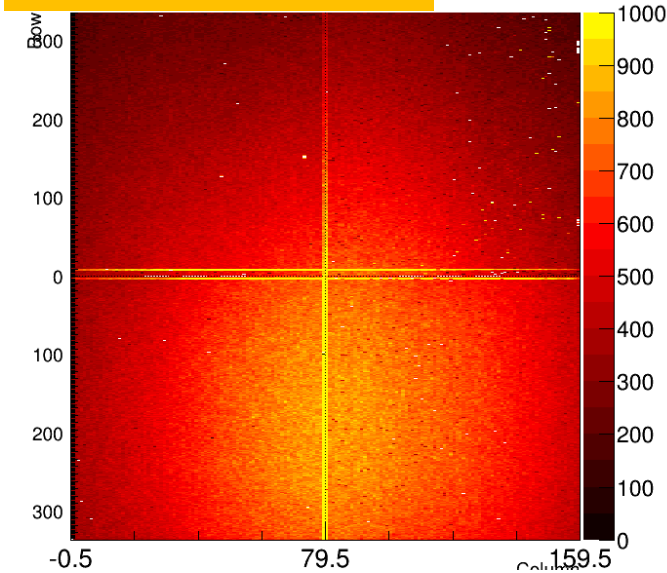
溶けたはんだの表面張力を下げ、はんだの接合部に対する濡れを良くする

Bump bonding(Ni/In)

- Back up解：Ni/In Bump-bonding
  - Ni-In-Ni
  - 今のところ、クオリティーが安定している。

Bump-openがあまりなく、Thermal Cycleにも強い

  - Niが強磁性体であるため、実際にATLASへインストールしたときに磁場の影響を受ける

→磁場耐性に対する試験を行う必要がある

現在
β-source scan