

電子ビームおよびレーザー光による DuTIPセンサーの特性評価

奈良女子大学大学院
人間文化総合科学研究科数物科学専攻
修士2年 尾崎恵美

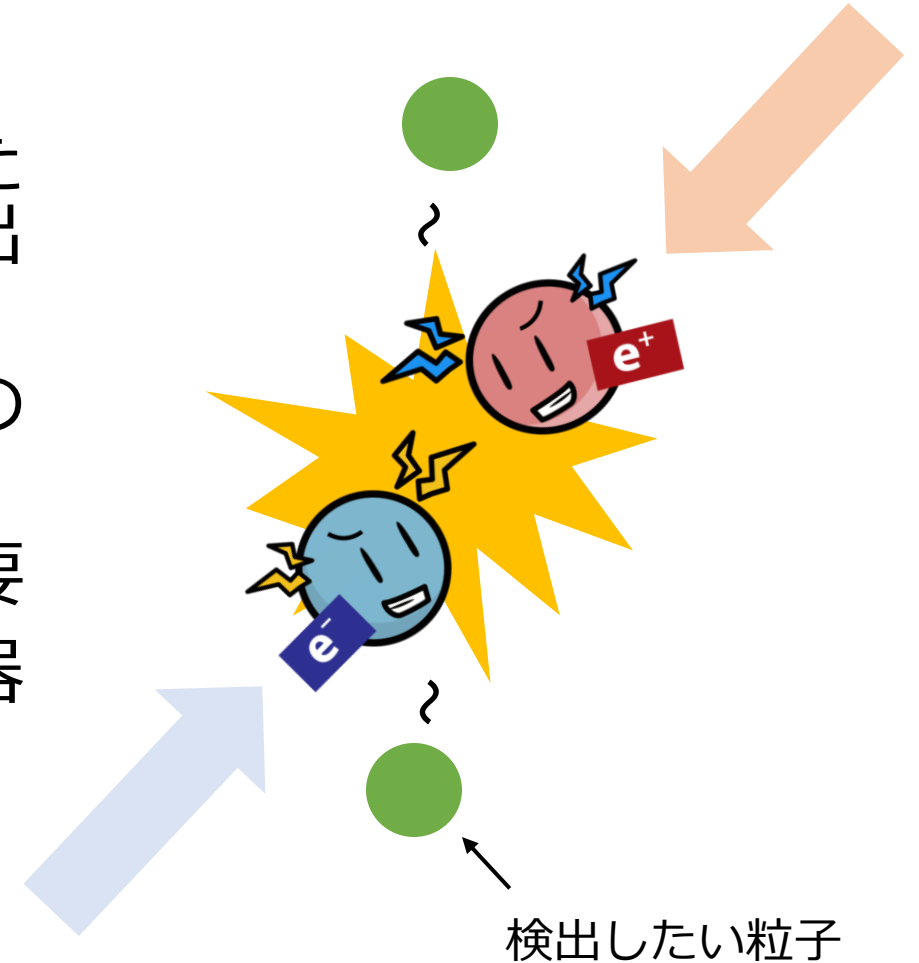
2025/12/2
SOIPIX量子イメージング研究会2025



奈良女子大学
Nara Women's University

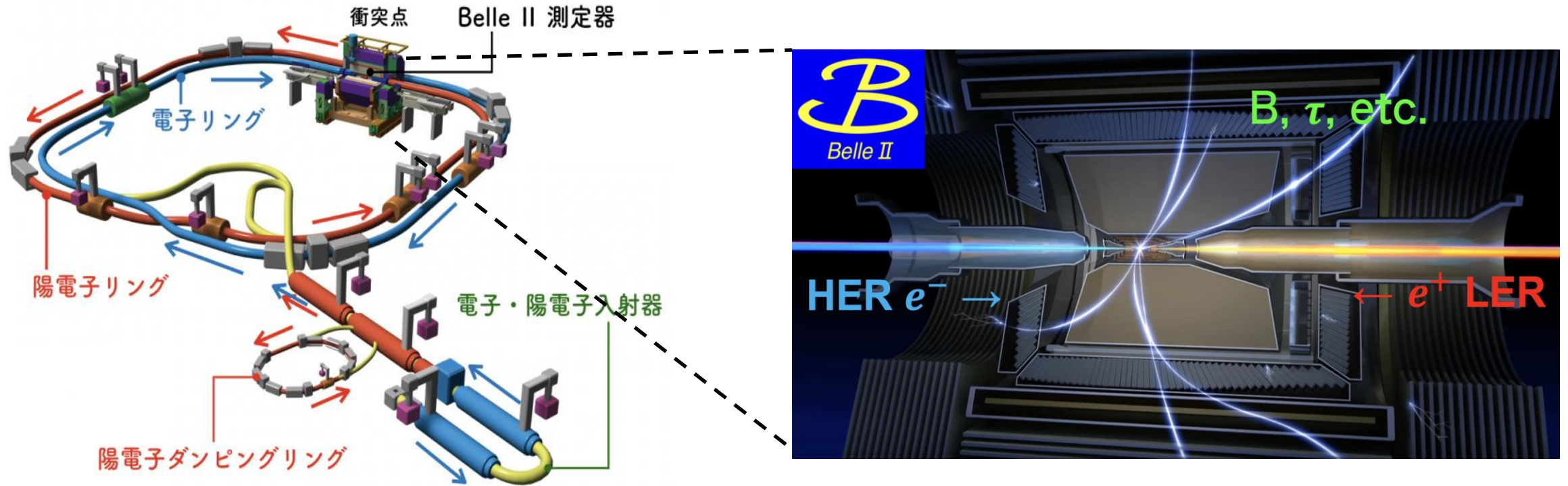
加速器実験

- 加速器を用いて高エネルギーに加速した粒子同士を衝突させ、出来た粒子を検出器を使って観測
- 実験結果から新たな物理法則や新粒子の探索を行う
- 加速器も大事だが、**検出器の性能**も重要
- 高レートかつ高放射線耐性を持つ検出器の開発が必要



Belle II 実験

茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構で行われている電子・陽電子衝突実験



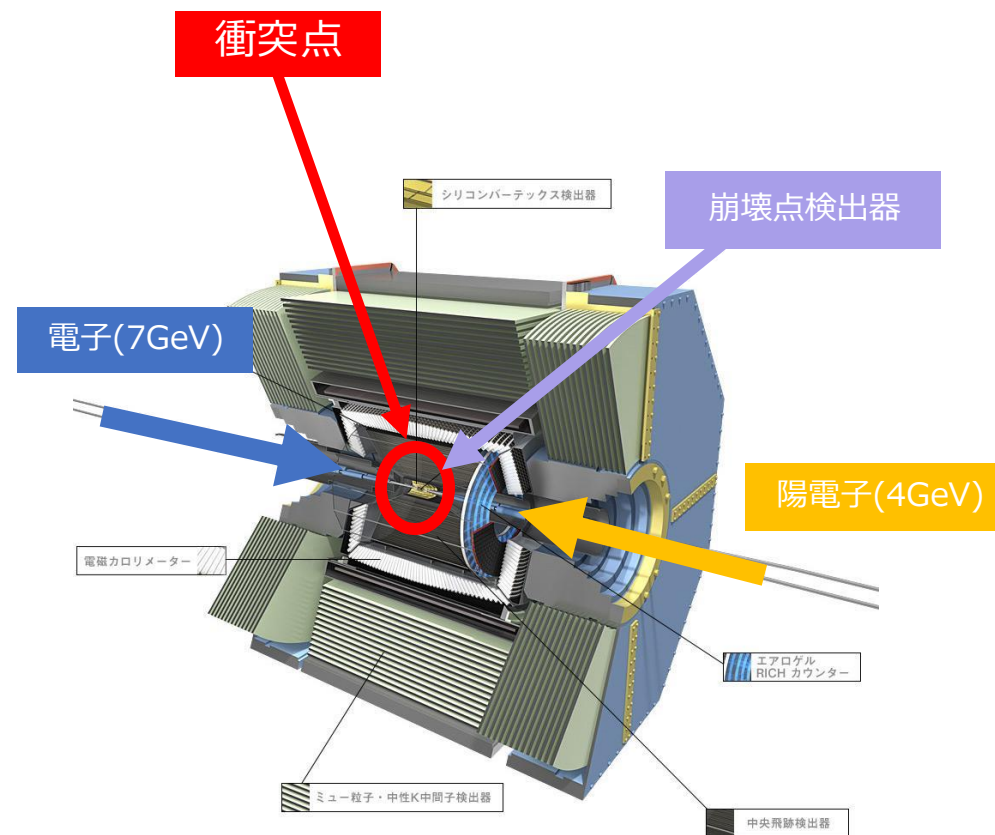
- SuperKEKB加速器とBelle II 測定器で構成
- 衝突によって生成するB中間子やタウレプトンの崩壊をBelle II 測定器で測定することで粒子・反粒子の対称性の破れや新しい物理法則を探索

Belle II 測定器

- 衝突点を覆うように役割の異なる複数の検出器で構成
- 衝突後に様々な粒子が生成されるため、運動量やエネルギーの測定、飛跡の再構成、粒子の識別が必要

崩壊点検出器(VXD)

- Belle II 測定器の最内層に存在する半導体検出器
- 荷電粒子の通過位置を測定
- 崩壊点を再構成するのが目的

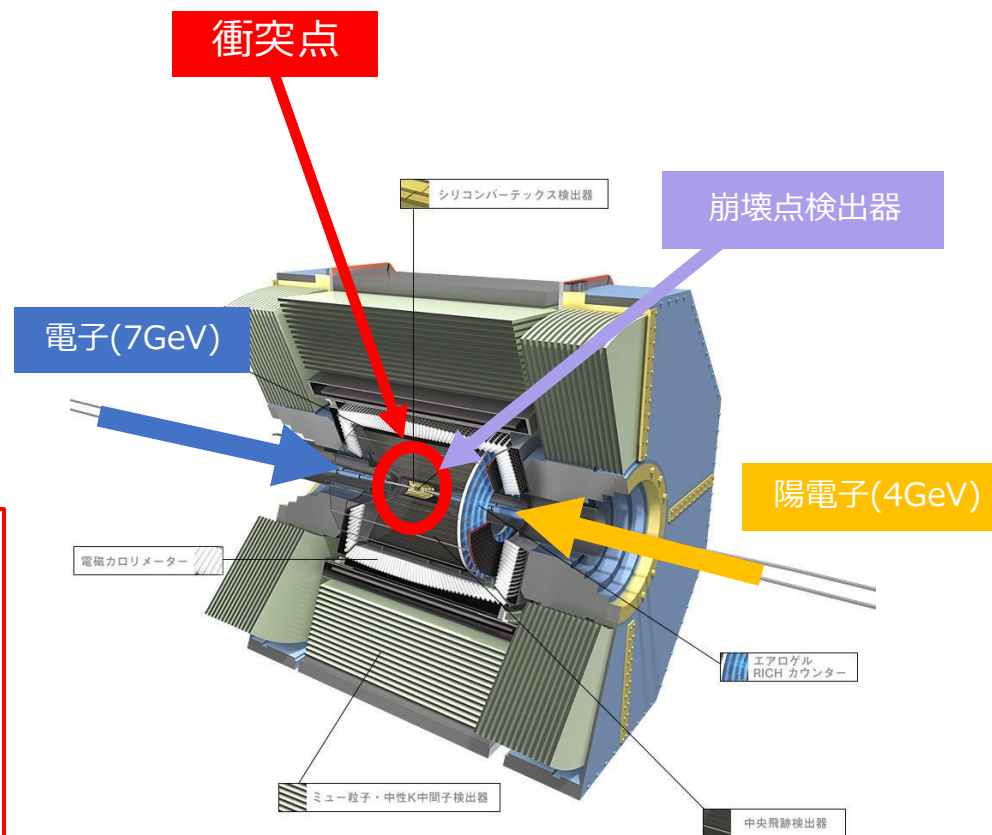


Belle II 測定器

- 衝突点を覆うように役割の異なる複数の検出器で構成
- 衝突後に様々な粒子が生成されるため、運動量やエネルギーの測定、飛跡の再構成、粒子の識別が必要

崩壊点検出器(VXD)

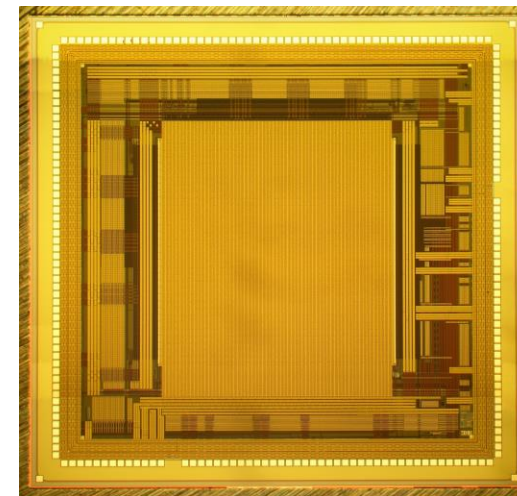
- SuperKEKB加速器がアップグレードするとビームバックグラウンドの量も増える
- 物理事象のデータを効率よく検出しつつ、バックグラウンド信号を除去するセンサーの開発が必要



DuTiP

- **Dual Timer Pixel**
 - 崩壊点検出器向けに開発中のSOIピクセル検出器
 - ピクセル内に、デジタル化に使う7bitのタイマーが2つ存在
 - タイマー：FPGAの18.75 MHzクロックで駆動
 - タイマーが二つあることで1つのタイマーが動作中でも次のヒットを検出することができる
- ハイビームバックグラウンド環境に対応できる
- 低電力で動作するALPIDE型のアンプを使用

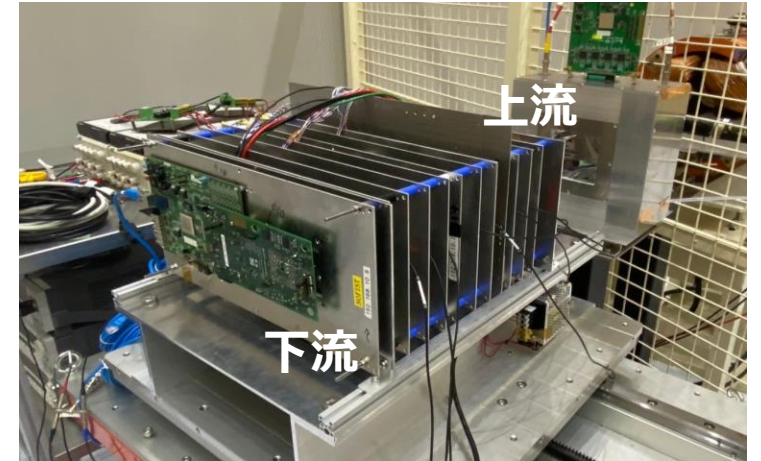
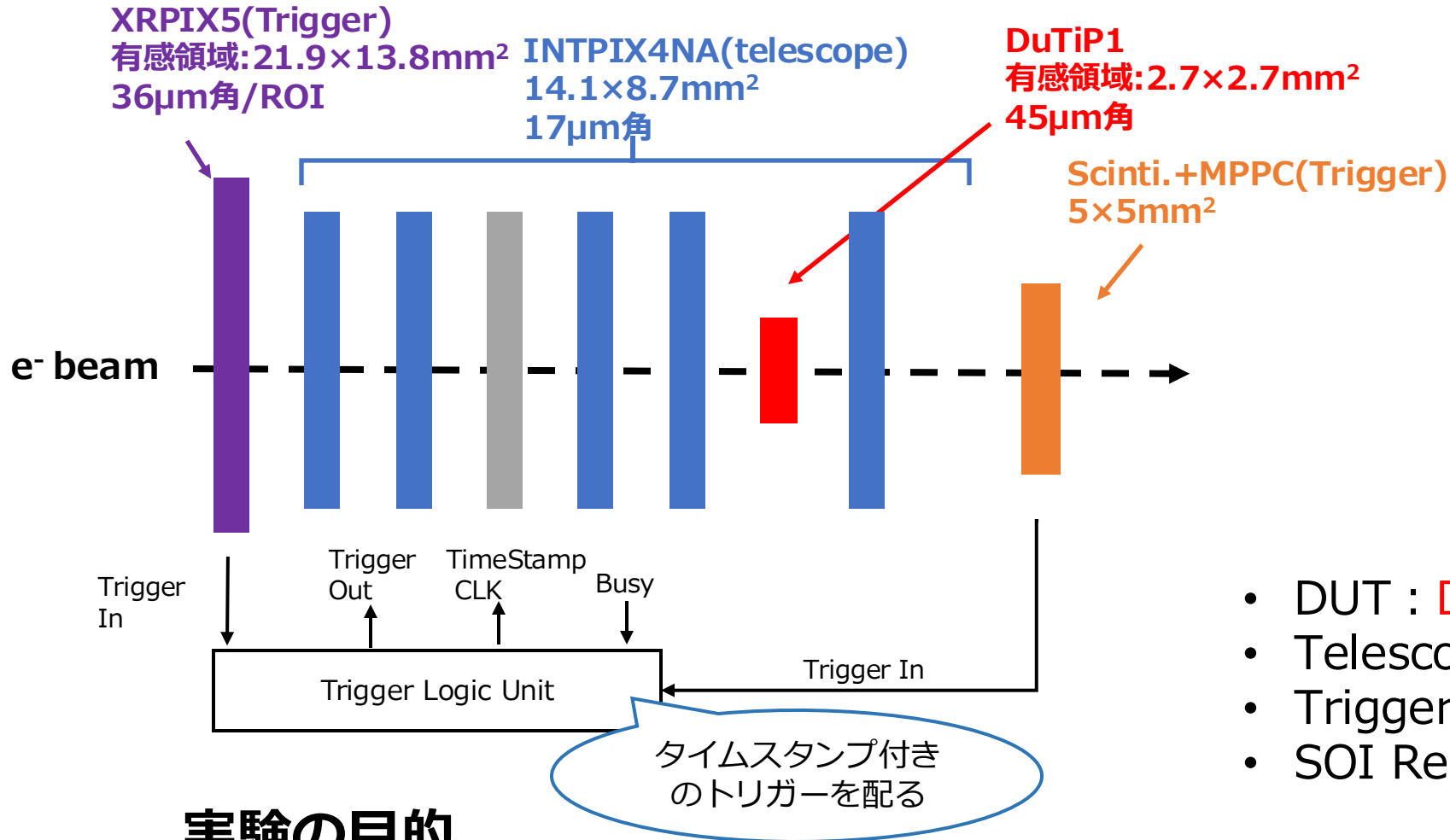
DuTiP1



チップサイズ	6.0mm×6.0mm
有感領域	2.7mm×2.7mm
ピクセルサイズ	45μm×45μm
ピクセル数	64×64
厚み	310μm
読み出し方法	バイナリー

KEK PF-ARTBLでのテストビーム実験

2024年12月



- DUT : DuTiP1, TJ-MonoPIX2
- Telescope : INTPIX4NA
- Trigger : Scinti.+MPPC or XRPIX5
- SOI Readout board SEABAS

実験の目的

DuTiPの荷電粒子通過に対する検出効率の評価

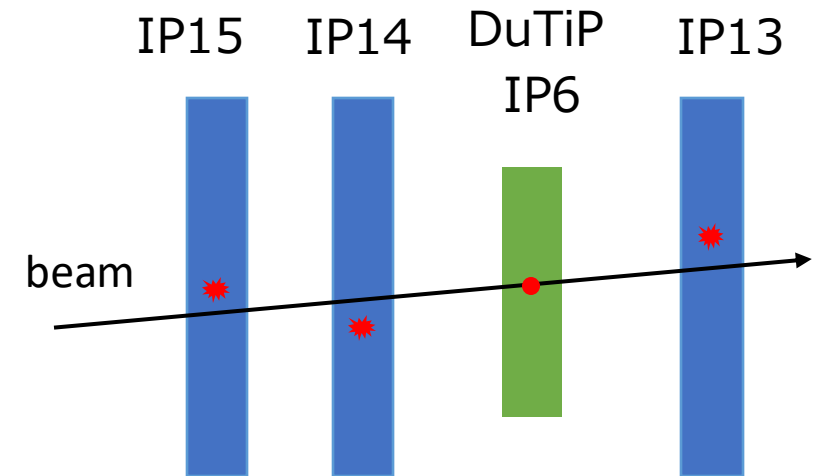
検出効率の算出方法

$$\text{検出効率} = \frac{\text{実際にDuTiP上でヒットが見つかった数}}{\text{トラック位置がDuTiPの有感領域にあったイベント数}}$$

DuTiPの上流2枚、下流1枚にあるINTPIXのヒット位置の
情報から、トラックを再構成し、DuTiP上に外挿

分母の条件

- トラック位置がDuTiPの有感領域の端から200μm内側であること
- ノイジーpixelの位置に引かれたトラックを除外



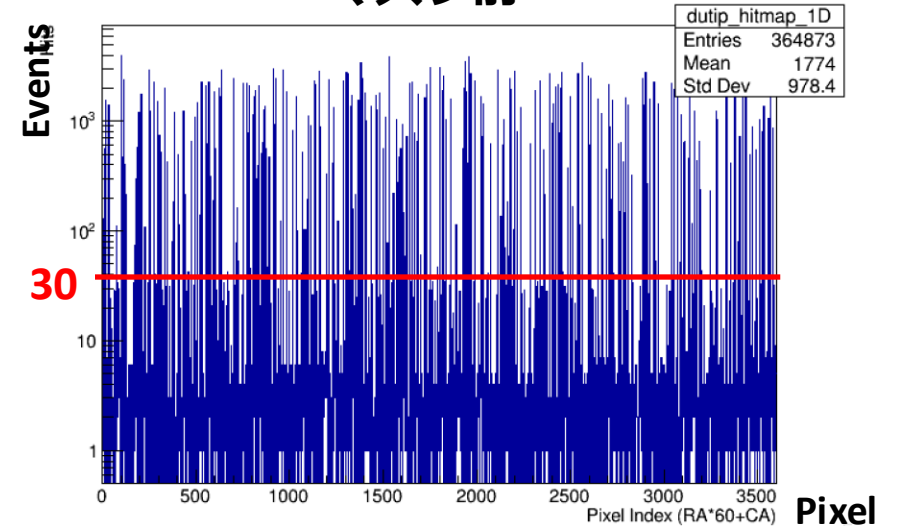
ノイジーpixel

- テストビーム実験中、ビームの有無に関わらずにhitを読み出すpixelの数が多かった
 - 原因は調査中だが、実験室で再現できていない
- 電子が通過する際に、4pixelにまたがって通過したとすると占有率は

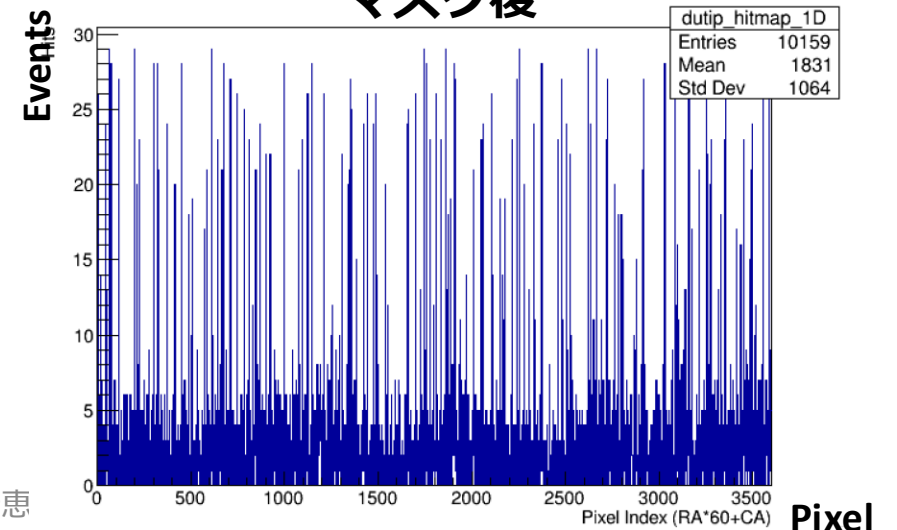
$$\frac{4}{64 \times 64 \text{ pixel}} \cong 0.1 \%$$

- 30000eventのRunでは30回以上hitあったpixelをノイジーとしてマスクし、そのpixelはDuTIPヒットのリストから除外するとともに、外挿したトラック位置がそのpixel上にあった事象は除いた

マスク前

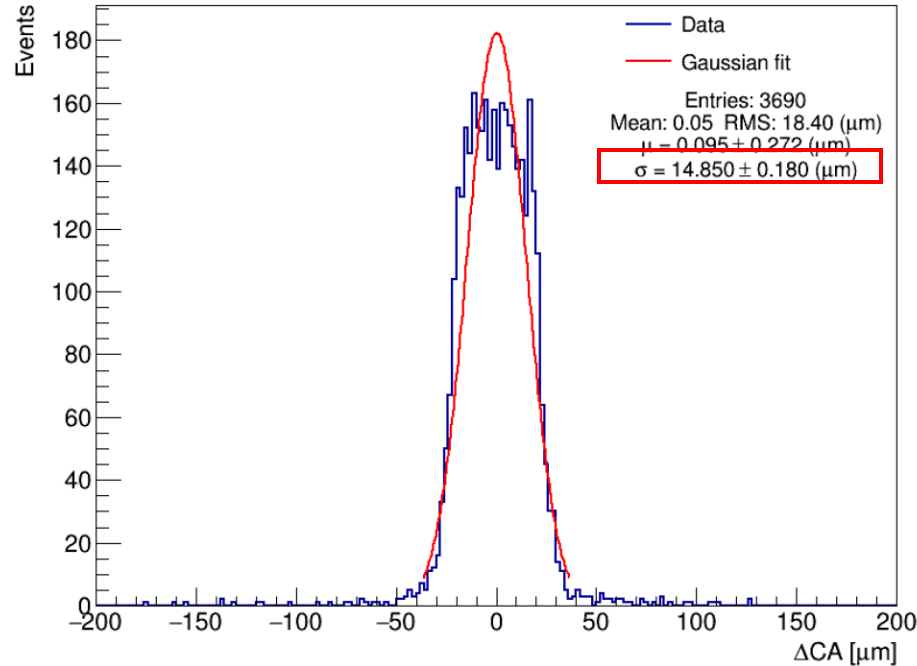


マスク後

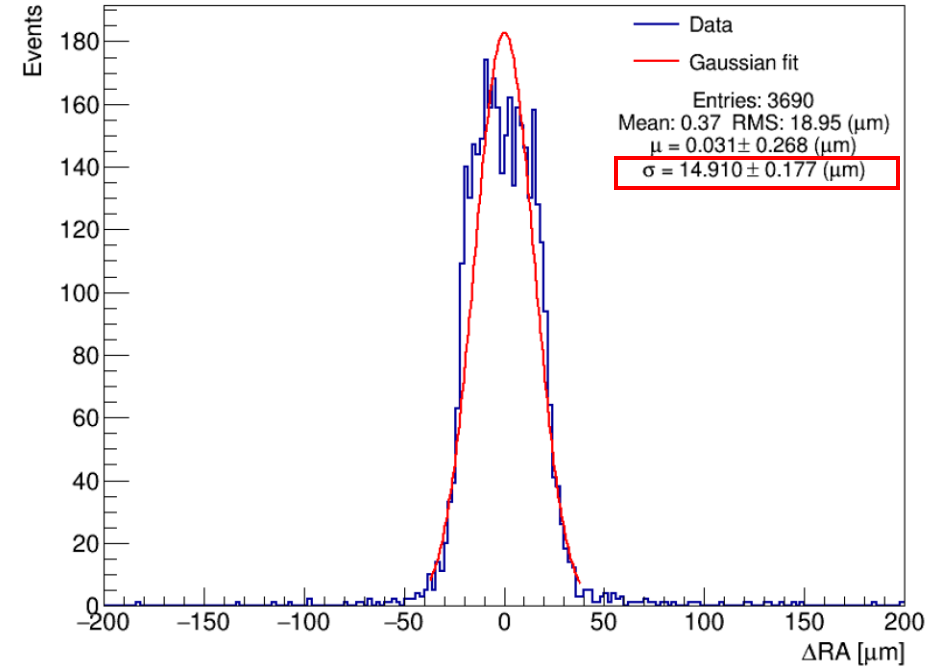


トラックの精度

垂直方向residual分布



水平方向residual分布



Residual = (*DuTiP*のヒット位置) - (トラック位置)

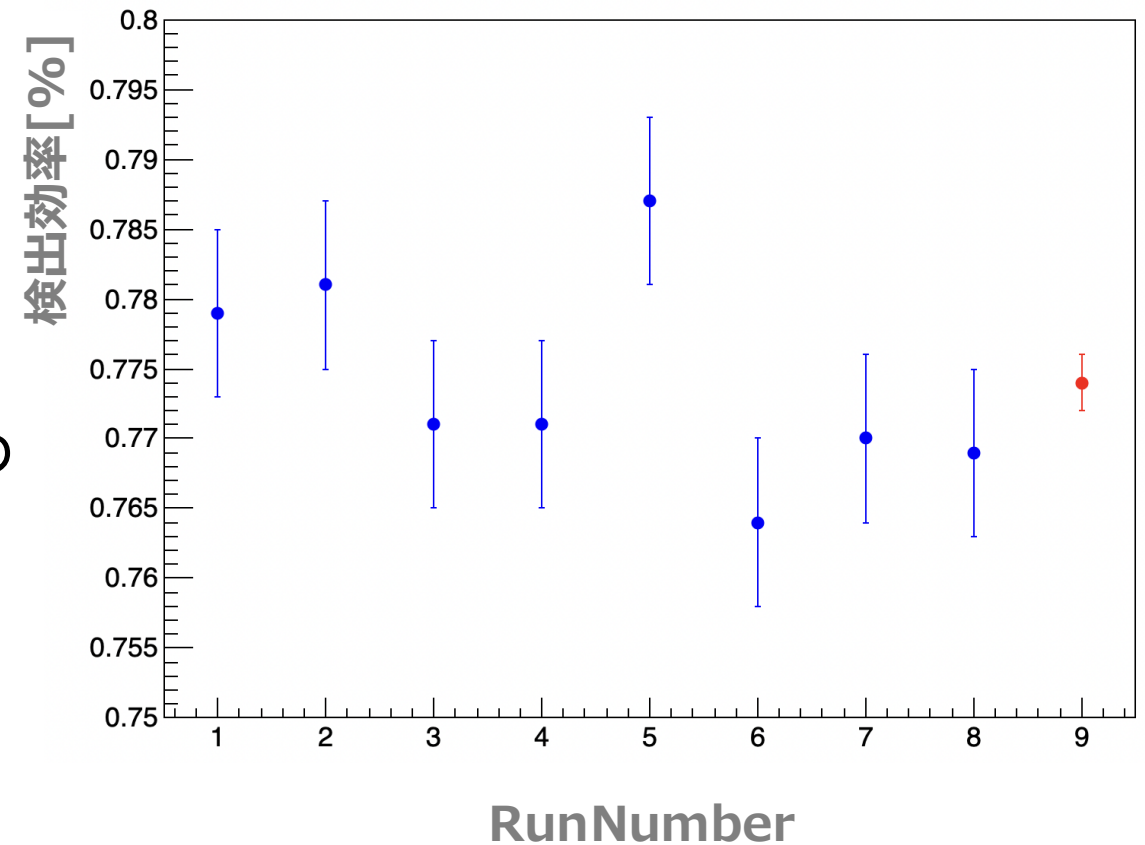
- $\sigma_{res} = \sqrt{\sigma_{dut}^2 + \sigma_{trk}^2}$
- $\sigma_{dut} = \frac{45}{\sqrt{12}} \doteq 13\mu m$ よりトラックの精度は $\sigma_{trk} = \sqrt{14.9^2 - 13.0^2} \doteq 7.3\mu m$

結果 – 検出効率

解析に用いたデータの条件

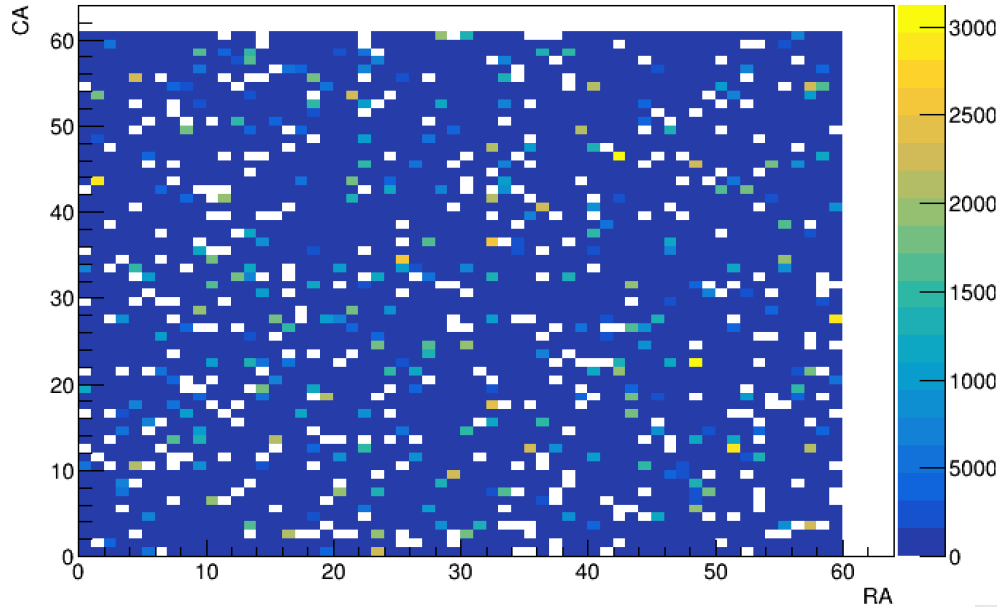
- 運動量：5GeV /c
- トリガー：シンチレーター
- 1 Run = 30000イベント

- 先行研究で比較的良好な検出効率を示したアンプの供給電圧パラメータで測定した8つのRunを解析
 - 検出効率は平均で $77.4 \pm 0.6\%$
- ⇒ ヒット検出を2割損失させた要因は？

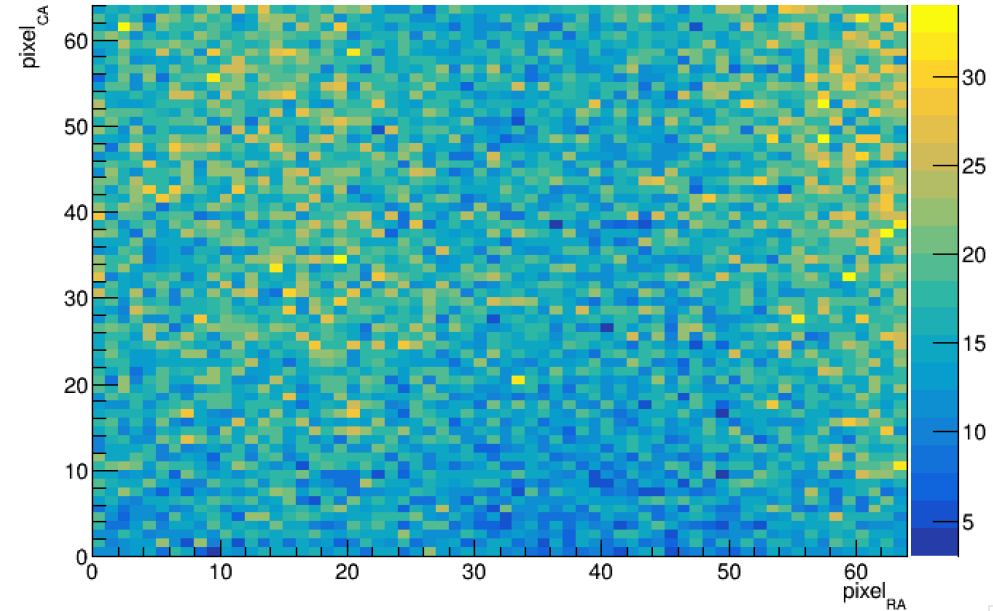


HitMapとTrackMapの比較

HitMap



TrackMap



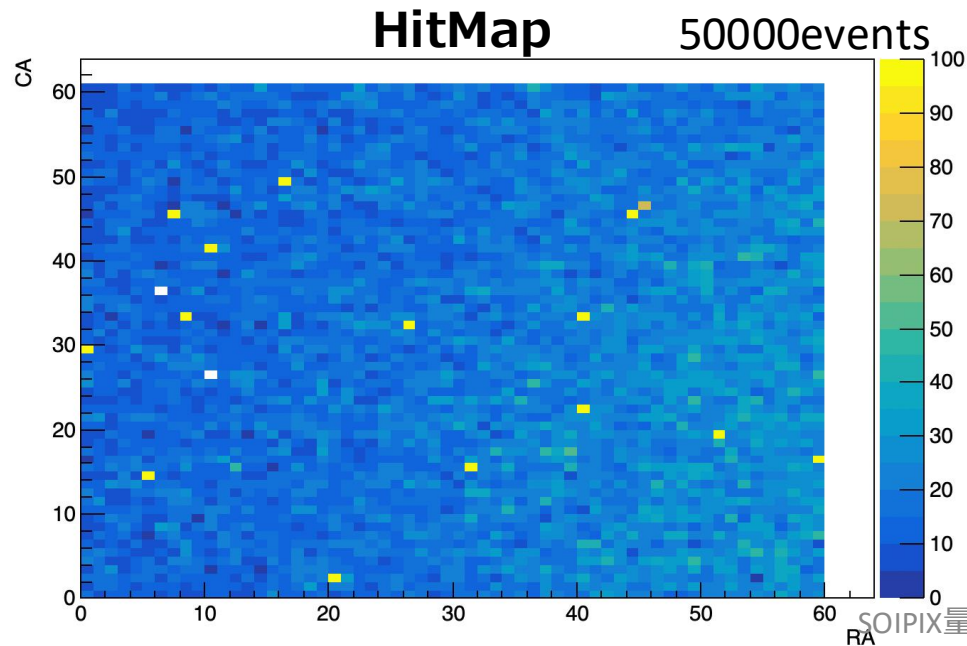
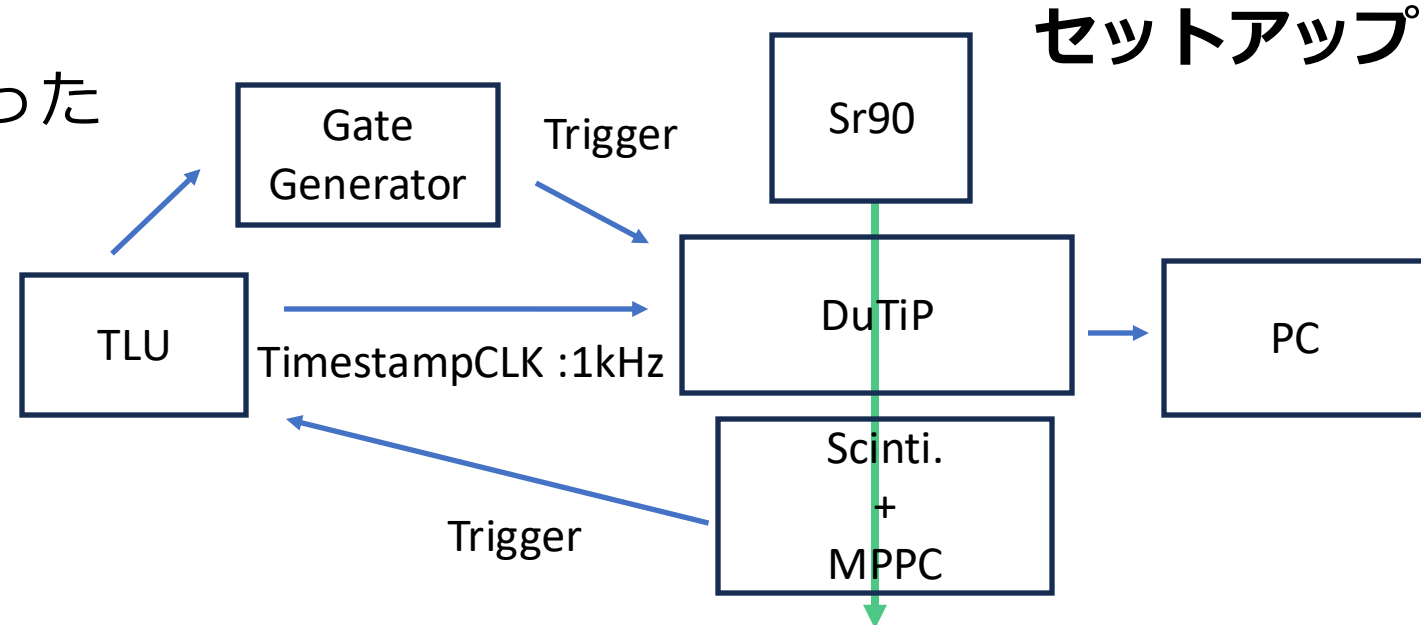
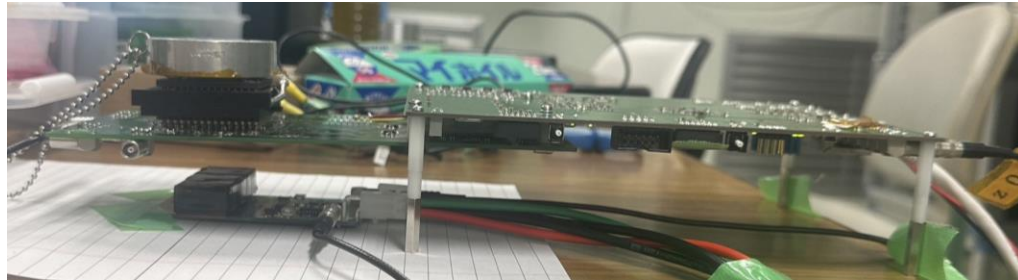
- 8Run合計24万トリガー分のhitmapとtrackmapを比較すると、Hitmapでエントリー0のpixelが1割ほどある
- シンチレーターとDuTiPの面積比から約8万電子がDuTiPを通過しており、ビームが一様に入ると考えると、ヒットが0になる確率は

$$\left(1 - \frac{1}{3600}\right)^{80000} = 2.2 \times 10^{-8} \approx 0\%$$

→ビームテスト時に正常に働いていないpixelが1割あった？

実験室でのβ線テスト

ビームテスト後に、
実験室でβ線源を用いたテストを行った



- 2pixelを除くpixelでヒットを検出
- ノイジーpixelの数もビームテストの時と比べると少ない(ビームテスト時は1割程のpixelをマスク)
- hitがないorノイジーなpixelがあった時に、テストパルスでそのpixelの状況を調べるFWとSWが必要

赤外線レーザー試験

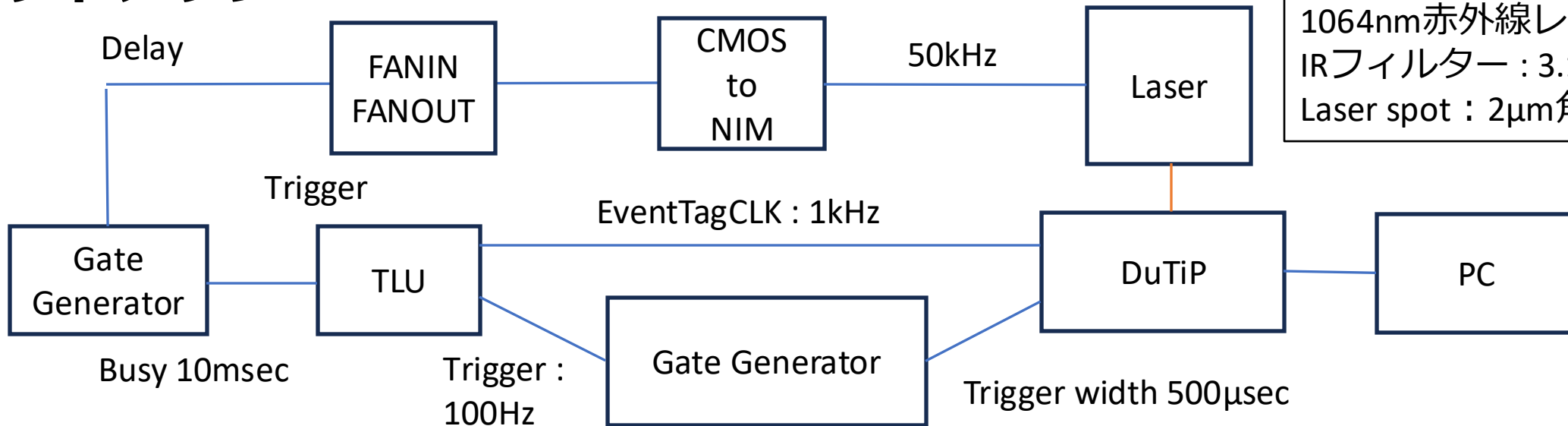
- 裏面から赤外線レーザーを照射し、照射位置による検出効率の変化を調べる
- レーザーは照射位置を1 μm 程度の精度で制御できるため、ビームテストでは見えない位置依存性を評価可能

検出効率の算出方法

- 分母：DuTiPが受け取ったTrigger数
- 分子：hit数

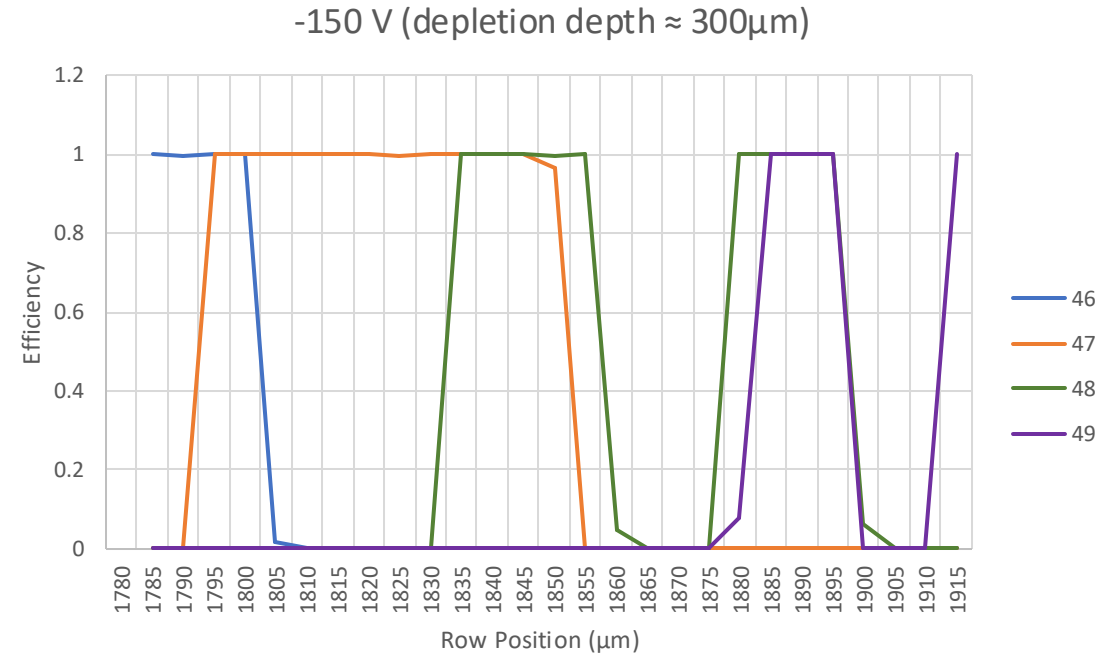
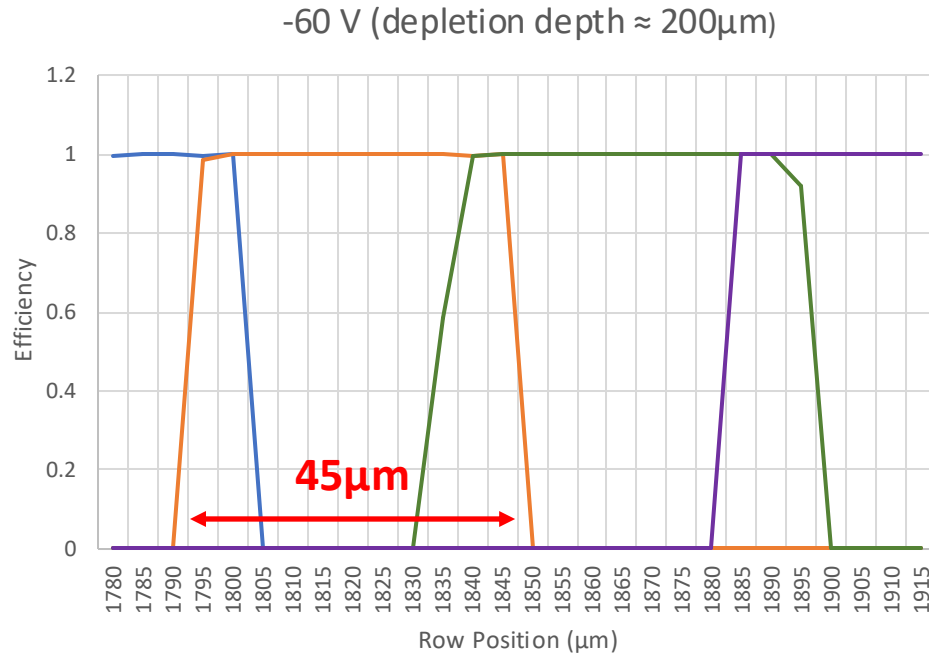


セットアップ



1064nm赤外線レーザー
IRフィルター：3.1(1mip相当)
Laser spot：2 μm 角

結果 - 位置のスキャン



- Column方向を固定してRow方向に $5\mu\text{m}$ ずつレーザーの照射位置を変えて測定
- -60Vでは安定して検出効率100%なのに対して、-150Vではrow address **48,49**の中心にレーザーが当たった時にhitの検出がなくなっている
- ALPIDEは大きすぎる入力信号が来た時に抑制する働きがあり、信号が急激に減衰するためhitとして検出されない可能性がある
- アナログ信号の観測による調査も行いたい

まとめと今後

- Belle II 崩壊点検出器向けに開発されたDuTiPの動作試験を行っている
- 5GeVの電子ビームを入射させるテストの結果、検出効率は、先行研究で比較的良好な検出効率を示したアンプの供給電圧パラメータで8割弱
- 2割のhitをどこで落としているのか調査中
- 赤外線レーザーを用いて数pixelで位置のスキャンを行ったところ、pixel中心に入射した際にhit検出をしないpixelが存在した

今後

- 全面スキャンして、中心や境界でhitを検出しないpixelの数を調べる必要がある
- ALPIDEはセンサー層50 μm を想定して設計されている
- 現在評価中のチップは300 μm 厚であり、完全空乏化していない場合には中性領域での拡散の影響があるため、60 μm 厚のDuTiP1を用いてテストを行う
- アナログ信号を観測するためのファームウェアとソフトウェアが必要

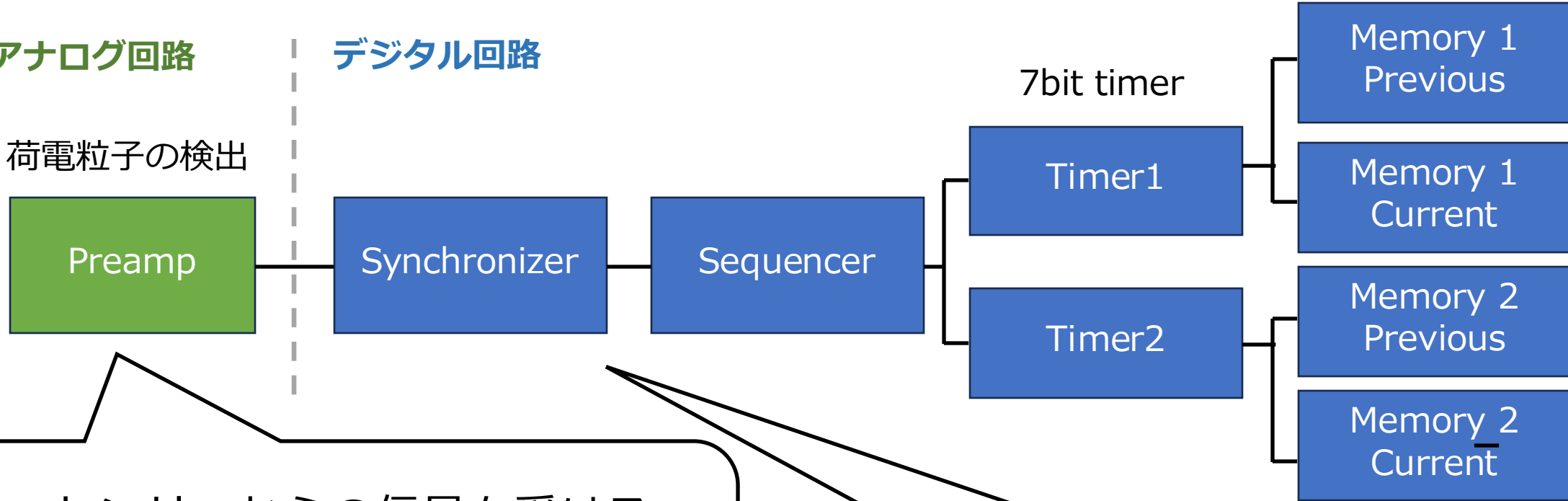
BACK UP

DuTiPのコンセプト

アナログ回路

デジタル回路

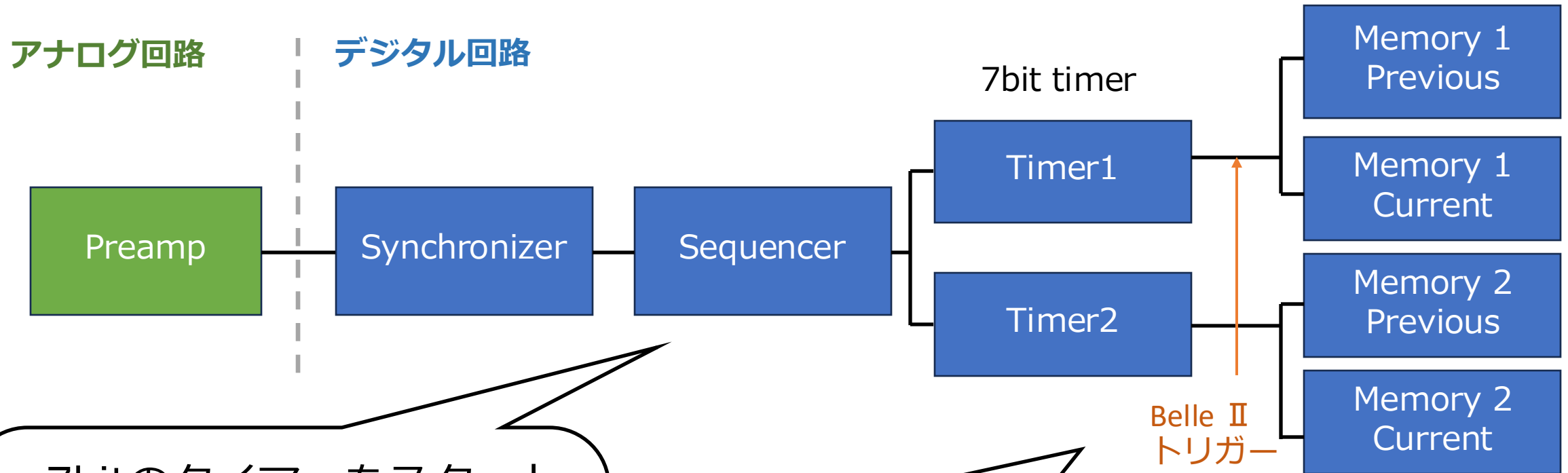
荷電粒子の検出



- センサーからの信号を受ける
- 低電力で動作するALPIDE型のアンプを使用

1CLK幅のHITパルスに成形

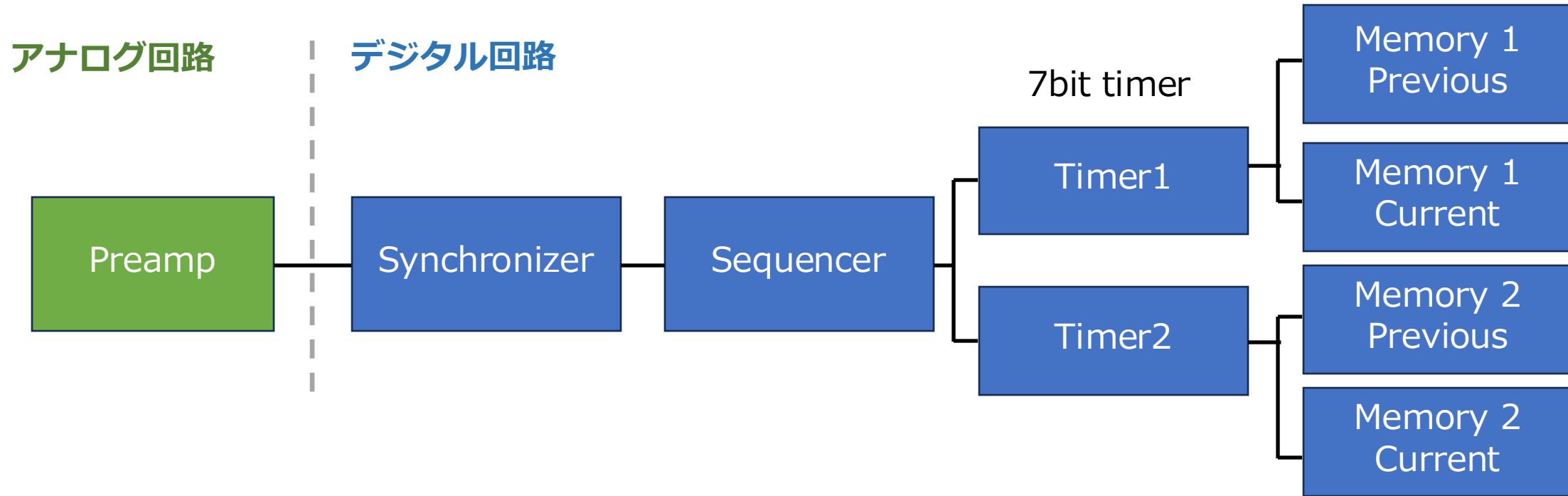
DuTiPのコンセプト



- 7bitのタイマーをスタートさせる
- タイマー1から動かし、すでに1が動いていればタイマー2をスタートさせる

タイマーの最終カウントとトリガー信号が一致した時Previous、1CLK遅延している場合はCurrentのタイミングとしてヒット情報が該当メモリに保存される

DuTiPのコンセプト



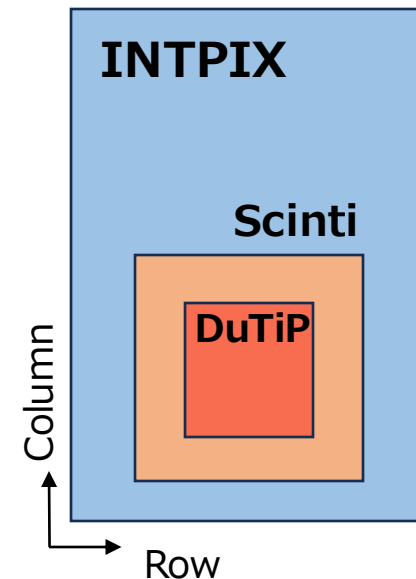
- Pixelごとに、外部トリガーとコインシデンスを取る機能がある
 - 時間分解能100nsec
- ⇒ハイビームバックグラウンド環境に対応できる

イベントセレクション

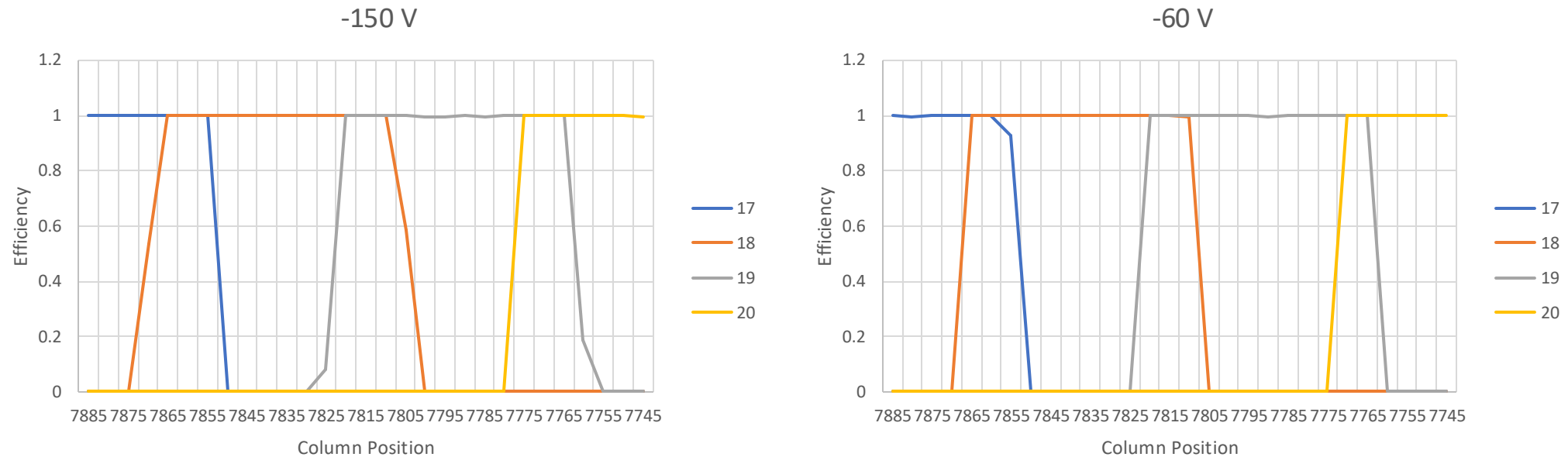
1. トリガー数
2. 全てのINTPIXにヒットが見つかり、かつDuTiPとタイムスタンプが一致
3. 2の中でトラックが再構成できたイベント
4. 3の中でトラックがDuTiPの有感領域(端200 μ mカット)にあり、かつトラックがマスクしたpixel上でない
5. 4の中で実際にDuTiP上にヒットが見つかった(3σ 以内)

条件	イベント数
1	30000
2	25000
3	25000
4	4556
5	3548
検出効率 = 5/4	0.778 ± 0.006

サイズ比較



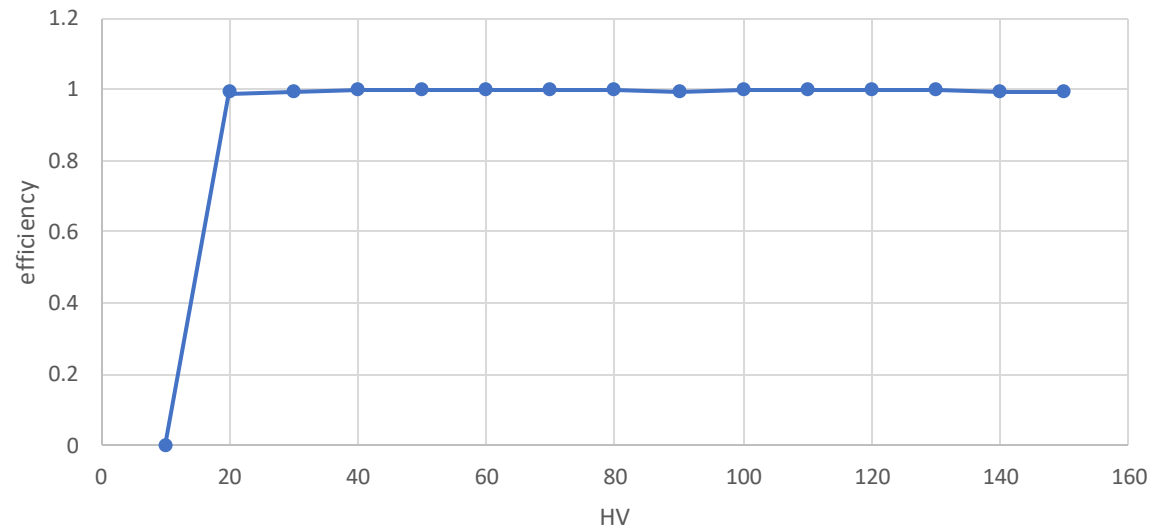
Column方向の位置のスキャン



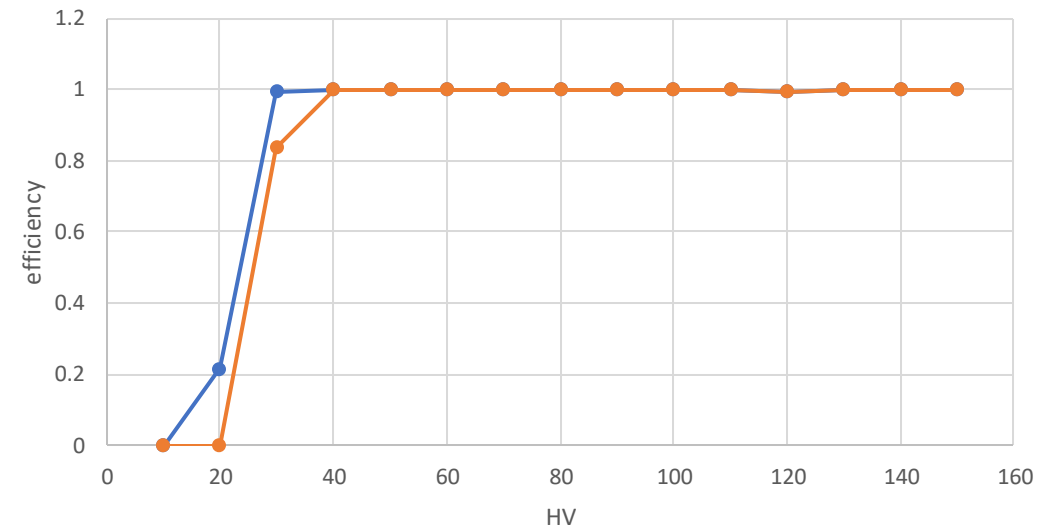
- Row方向を固定してColumn方向に $5\mu\text{m}$ ずつレーザーの位置を変えて測定
- -150V、-60Vどちらも検出効率100%

レーザー - HVスキャン

HV スキャン pixel中心

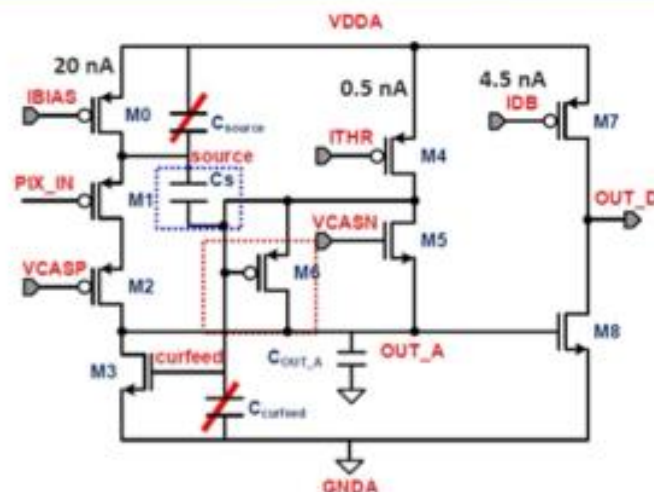


HVスキャン pixel境界

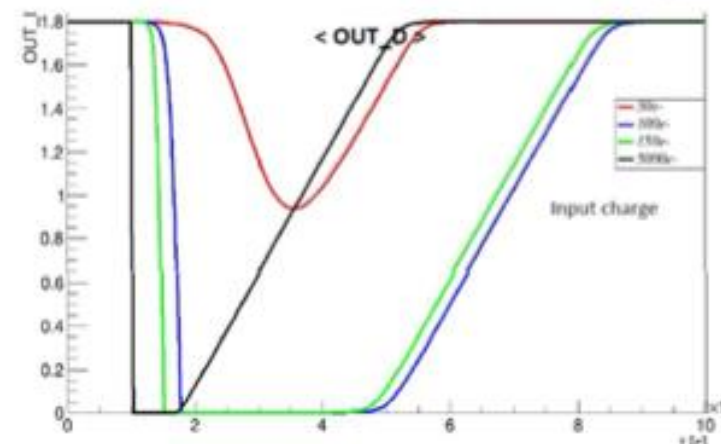
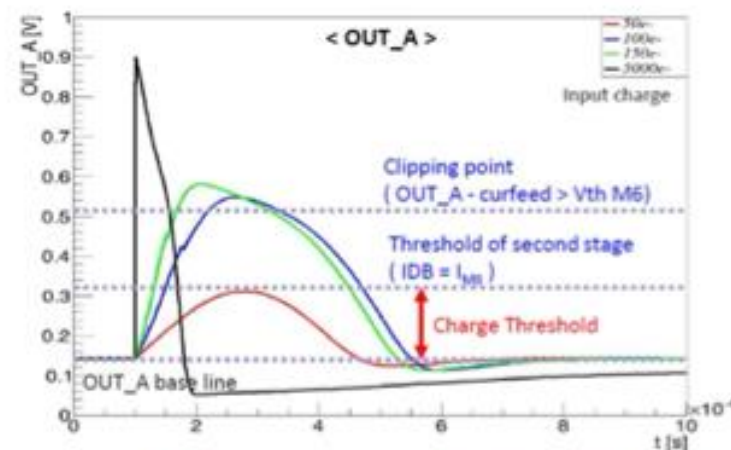


Appendix. ALPIDE資料(1)

ALPIDE: Pixel Front-end Circuit (3)



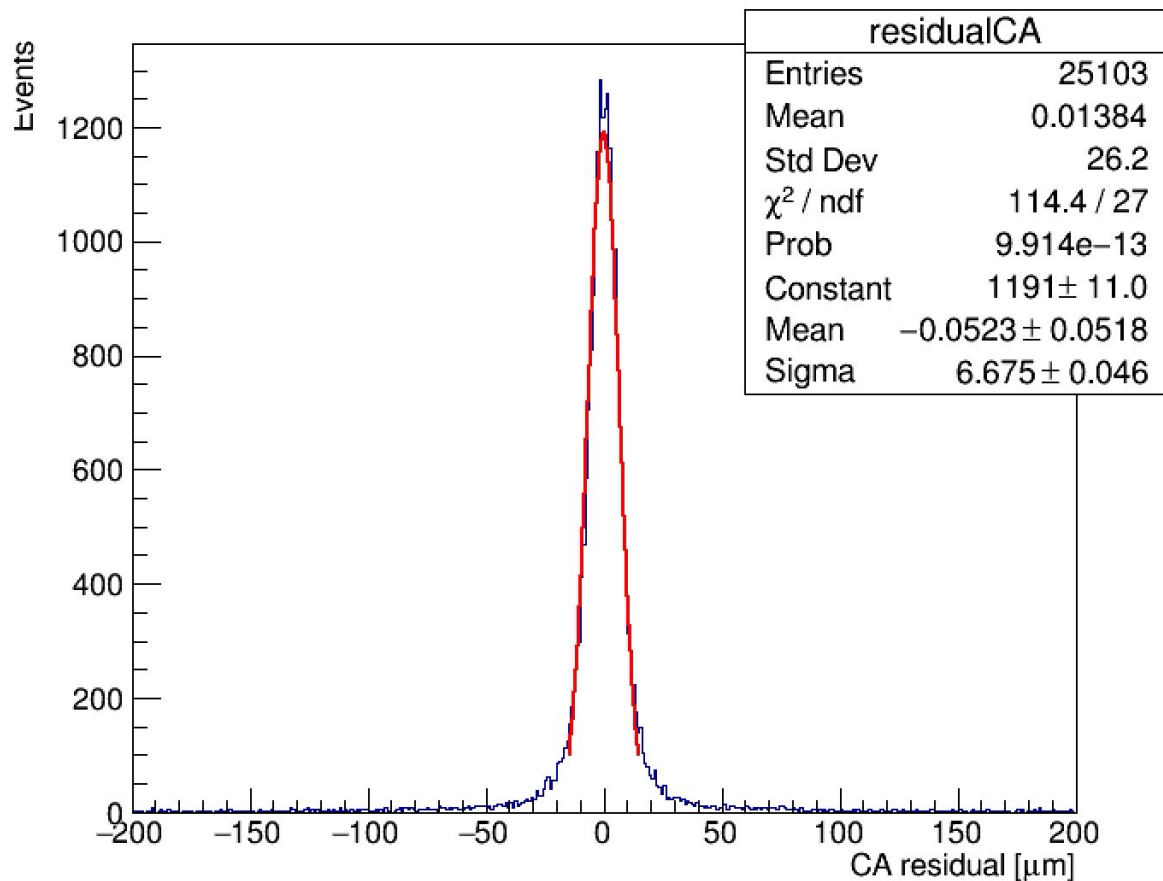
- Combined capa. to reduce layout area
 C_{source} and $C_{curfeed} \rightarrow C_s$
- Charge threshold parameters
 OUT_A baseline value : $ITHR, VCASN$
 Threshold of second stage : IDB
- M6 is used to clip large signals and force OUT_A to quickly return to its DC value
- Keeping $C_{OUT_A} \ll C_{source}$



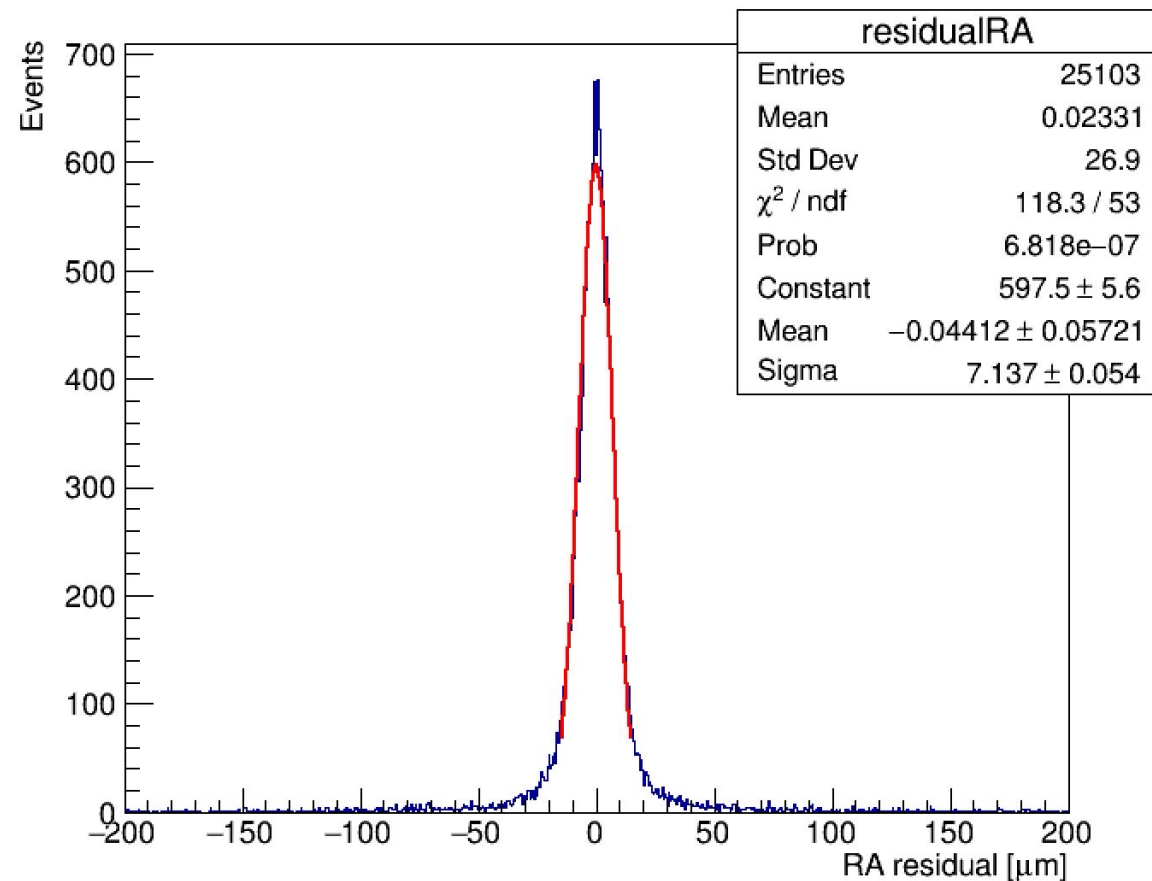
Ref. D. Kim, 2016 JINST 11 C02042

Resolution IP14

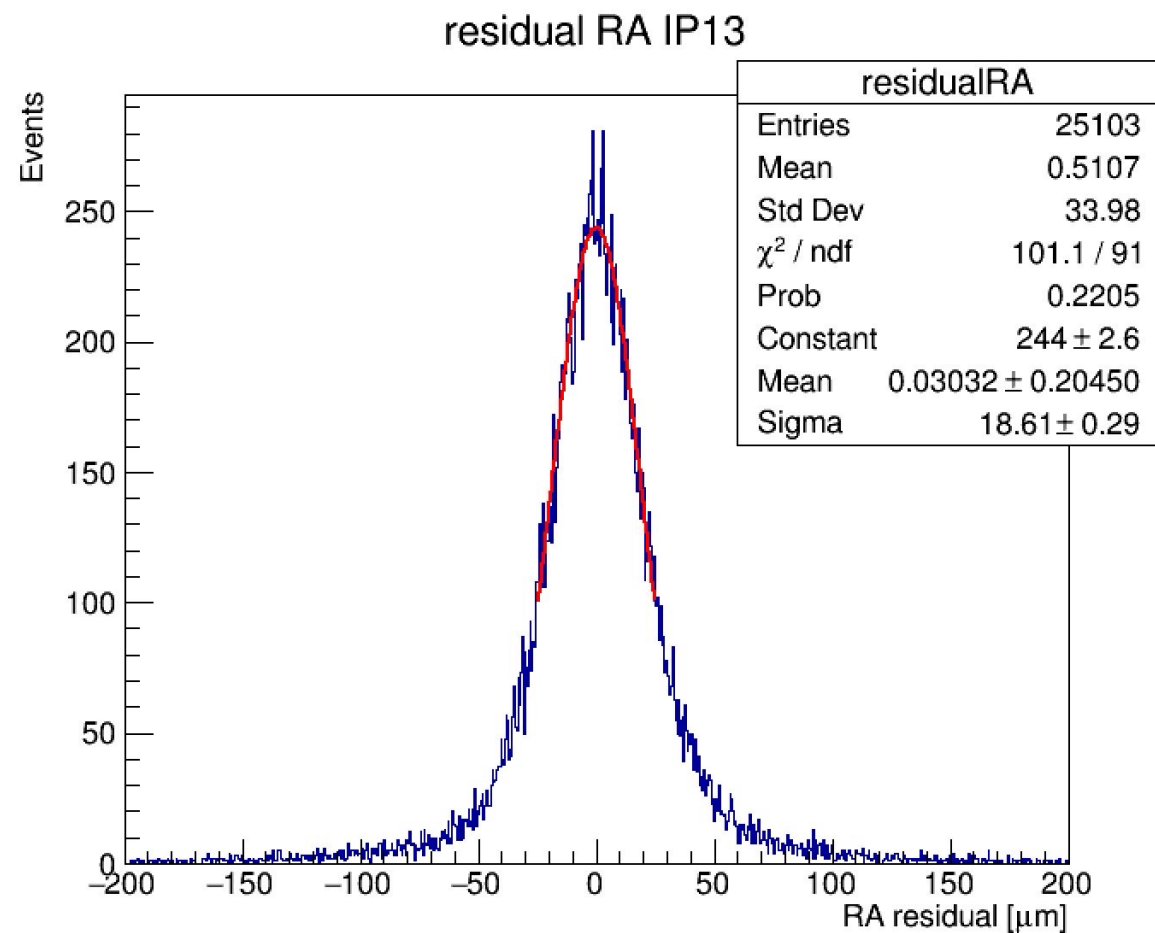
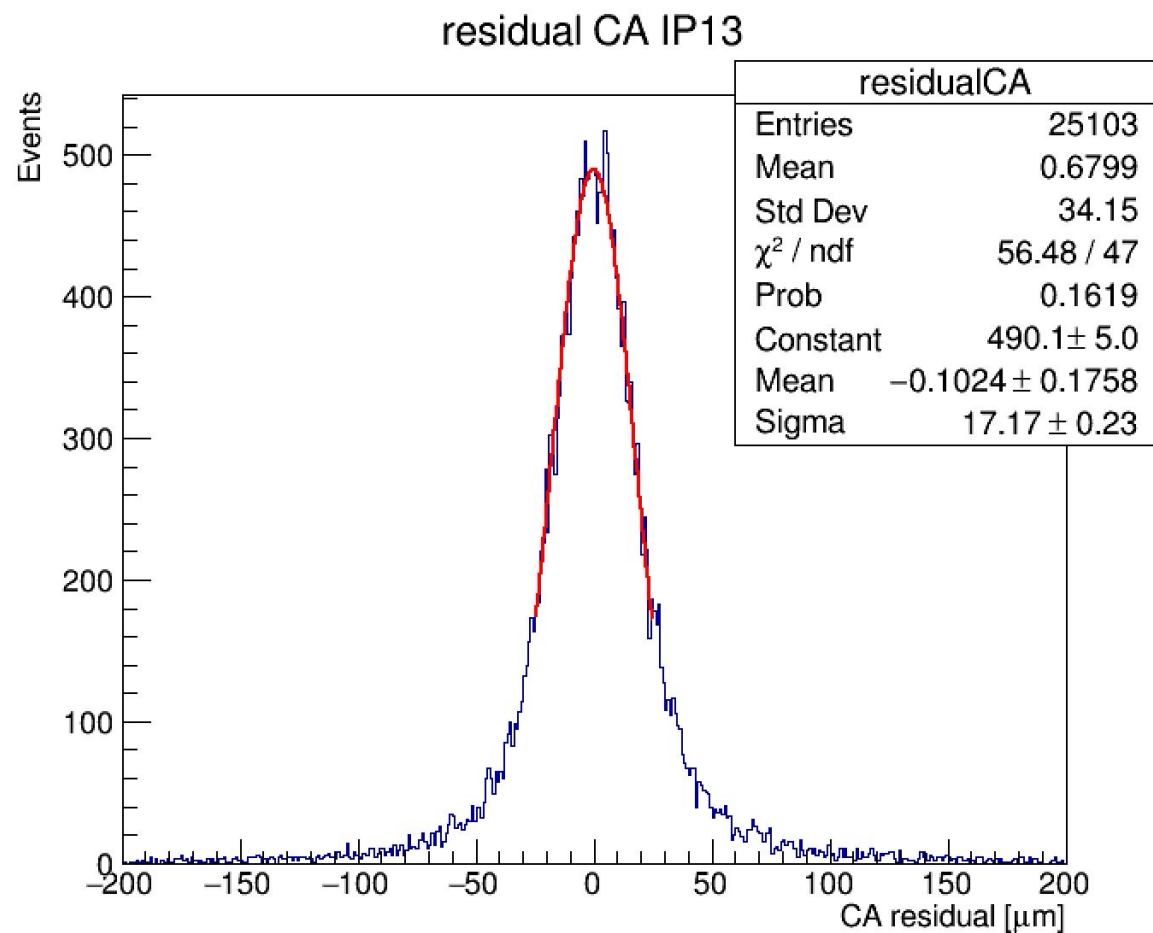
residual CA IP14



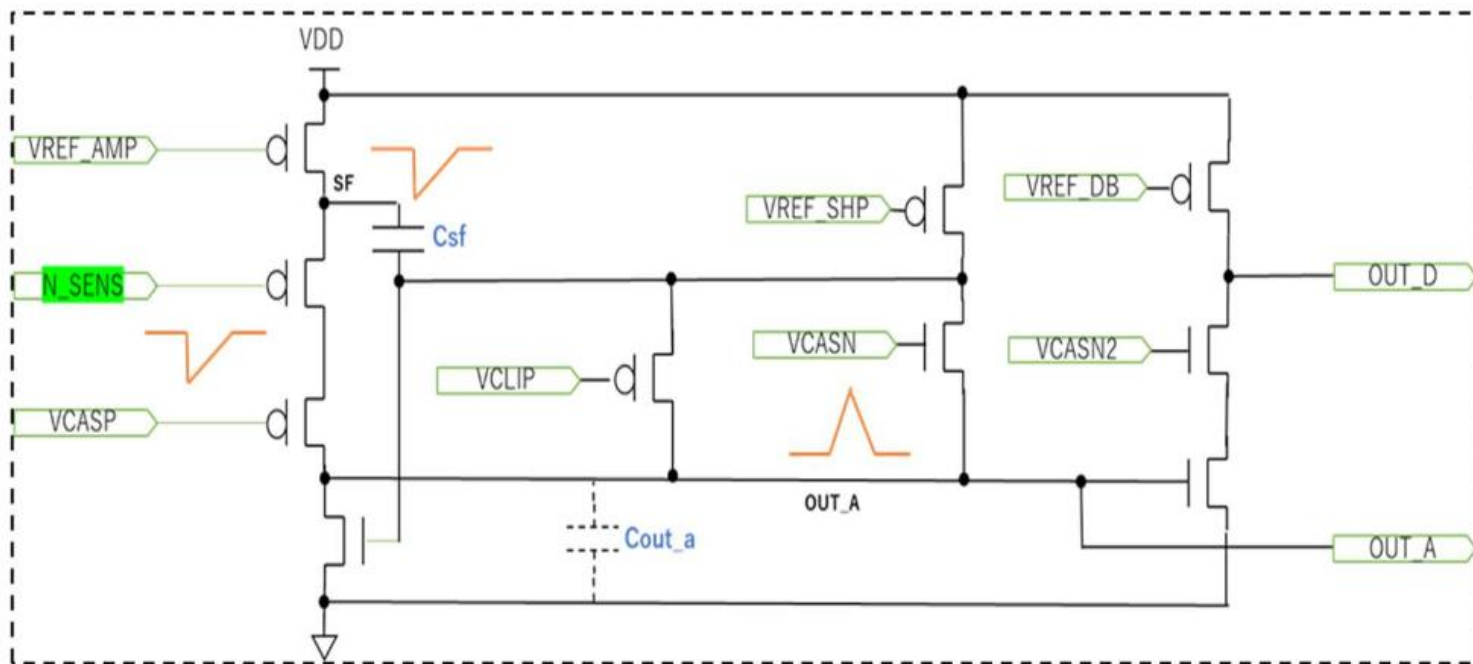
residual RA IP14



Resolution IP13



ALPIDE



端子名	機能
VDIODE	入力リセット電圧
VREF_RESET	入力リセット電流
VREF_AMP	初段電流
N_SENS	入力
VCASP	P オン電流
VCLIP	クリッピング電圧
VREF_SHP	フィードバック電流
VCASN	OUTA baseline
VREF_DB	スレッシュホールド電流
VCASN2	N オン電圧
OUT_B	デジタル出力
OUT_A	アナログ出力