

大面積SOI ピクセル検出器INTPIX を用いた KEK テストビームライン用 高精度トラッキングシステムの構築



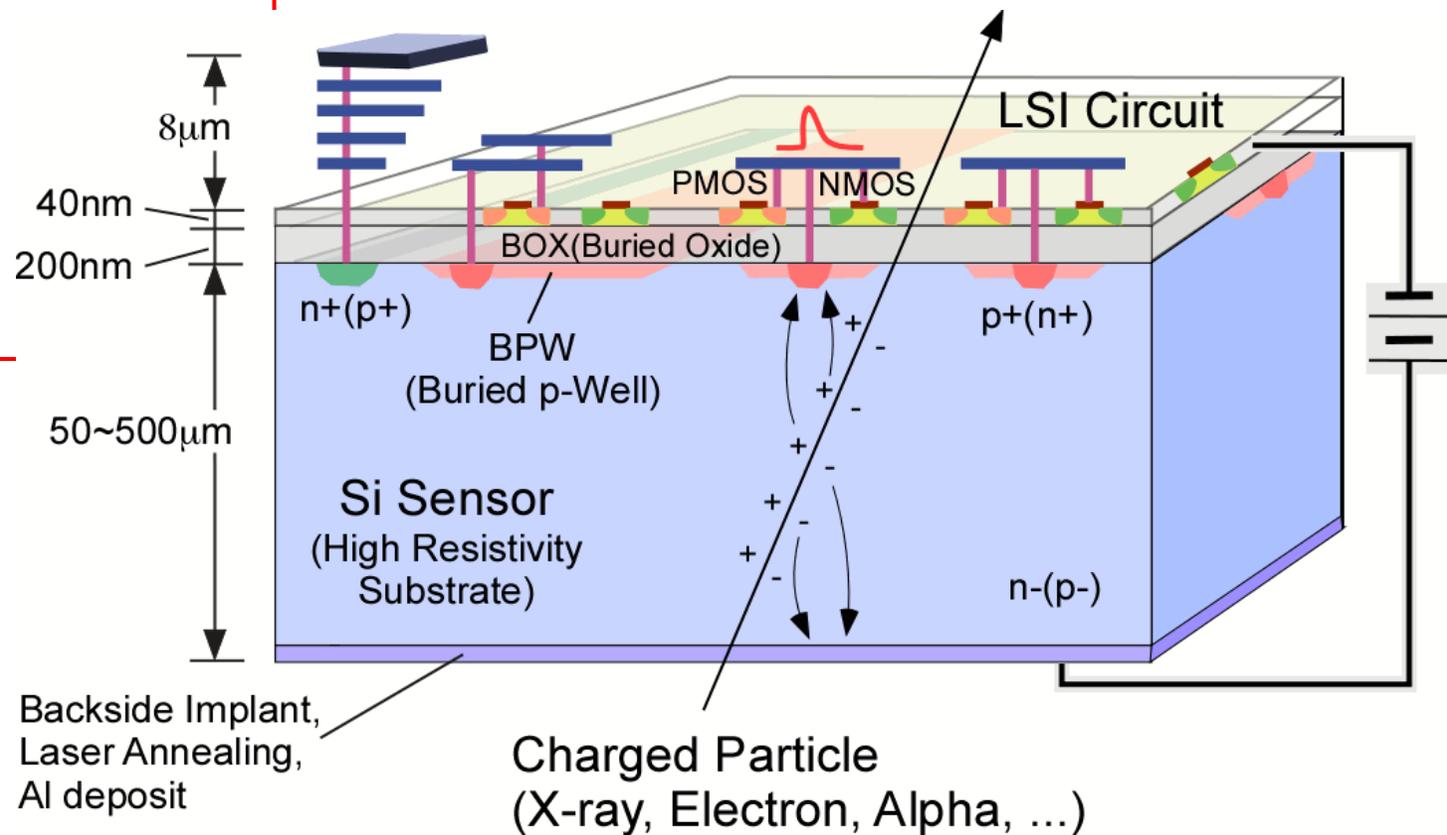
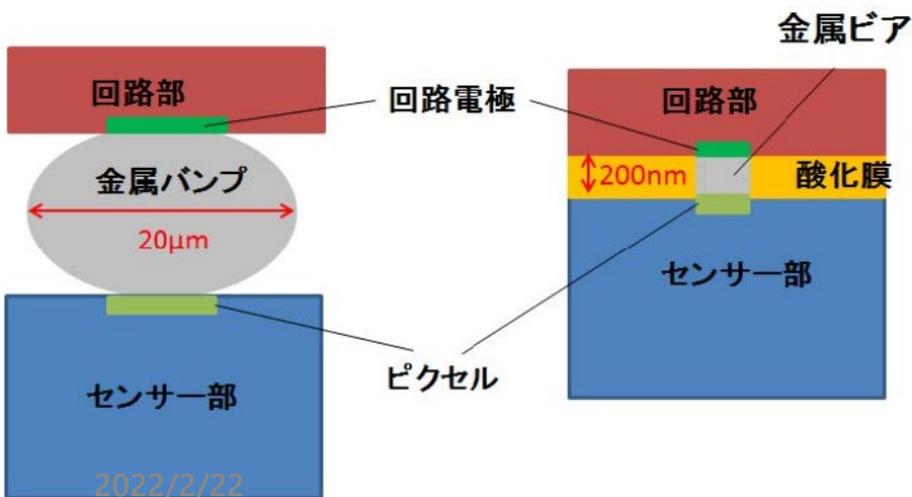
鈴木尚紀, 大森匠, 原和彦, 武田彩希^C, 三住京也^C, 山田美帆^B, 坪山透^A,
筑波大学, 高工研^A, 産技高専^B, 宮崎大学^C

導入

SOIピクセル検出器

SOI (Silicon On Insulator) 技術によりSiO₂酸化膜上にトランジスタを形成
読み出し回路一体型の半導体検出器

- SOI-CMOS
酸化膜で各トランジスタを電氣的に分離
- モノリシック型
回路・センサー部が一体構造
→ 微細化・薄型化が可能



背景 —KEK AR-TBとテレスコープ—

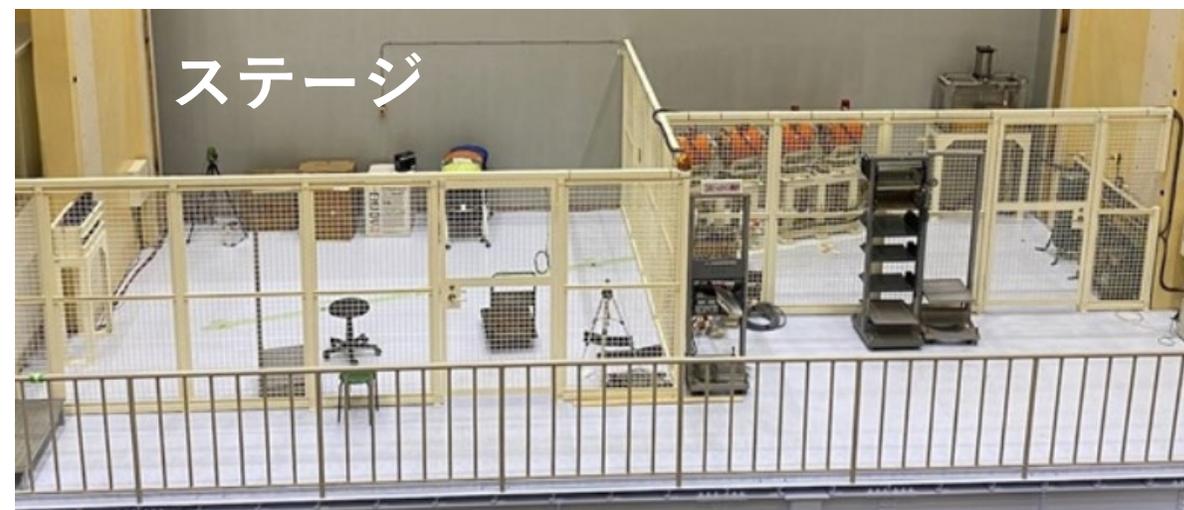
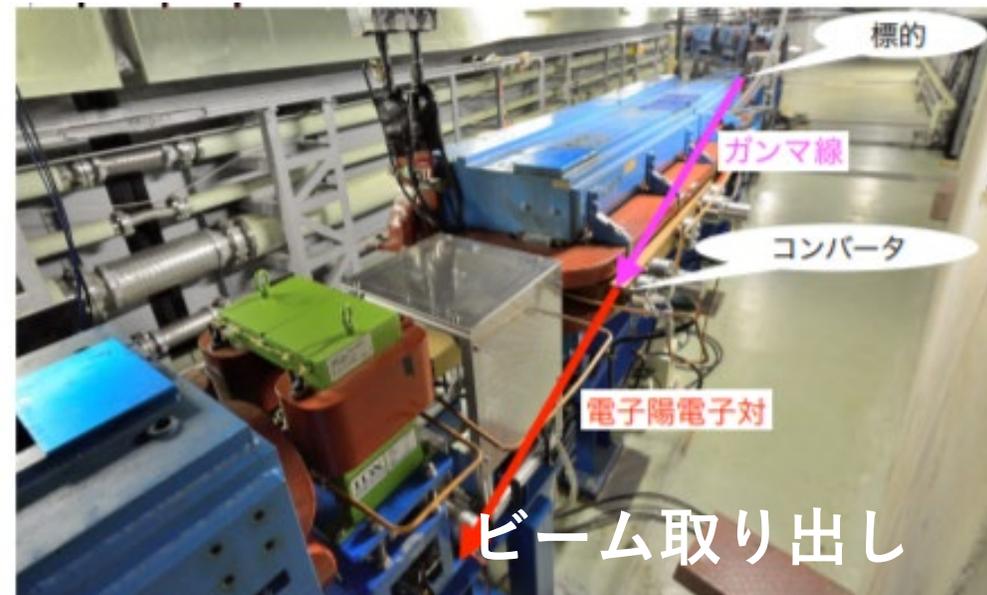
国内における高エネルギー実験の測定器開発・評価用のGeVオーダーテストビームラインへの需要

→電子ビームライン“KEK AR-TB”が2022年稼働

PF-AR6.5GeV電子ビームから1~5GeV電子ビーム取り出し

高い位置精度で検出器を評価するためのテレスコープが必要

→低多重散乱・微細ピクセル化が可能なSOIピクセル検出器による高精度テレスコープシステムの開発



開発目標とステップ

本研究での実施内容

目標

- ◆ 1~5GeV電子ビームにおいて汎用的に使えるSOIピクセル検出器高精度テレスコープシステムの開発
- ◆ 2022年 SOIピクセル検出器 DuTiPのAR-テストビームラインでの評価
 - ➔ 10 μ m程度の位置分解能

◆開発のステップ

システム構築・検出器同期試験



2021年10月 820MeV/c
電子ビームテスト @東北大学 ELPH



GEANT4による性能予測



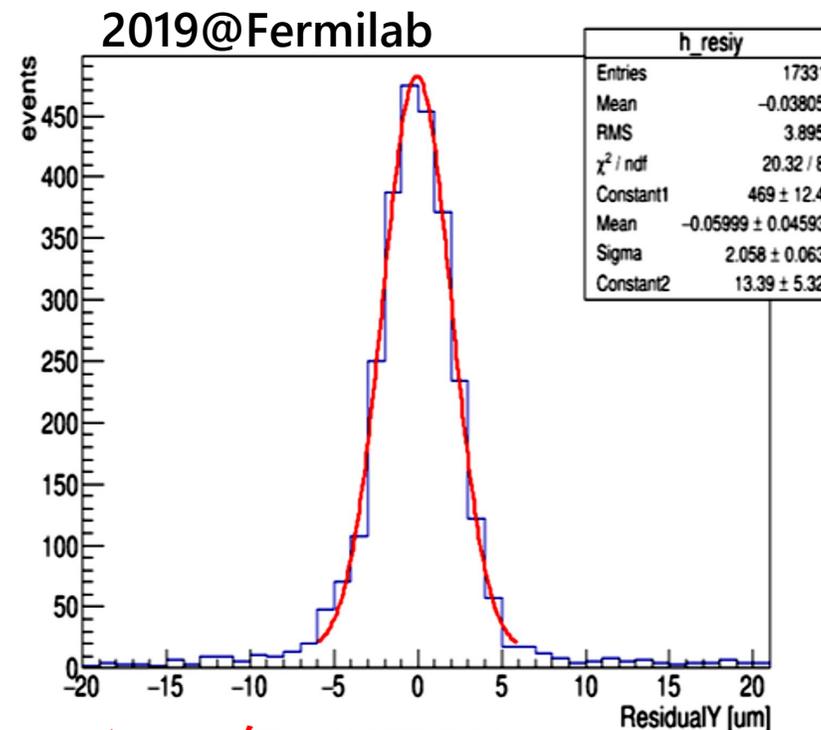
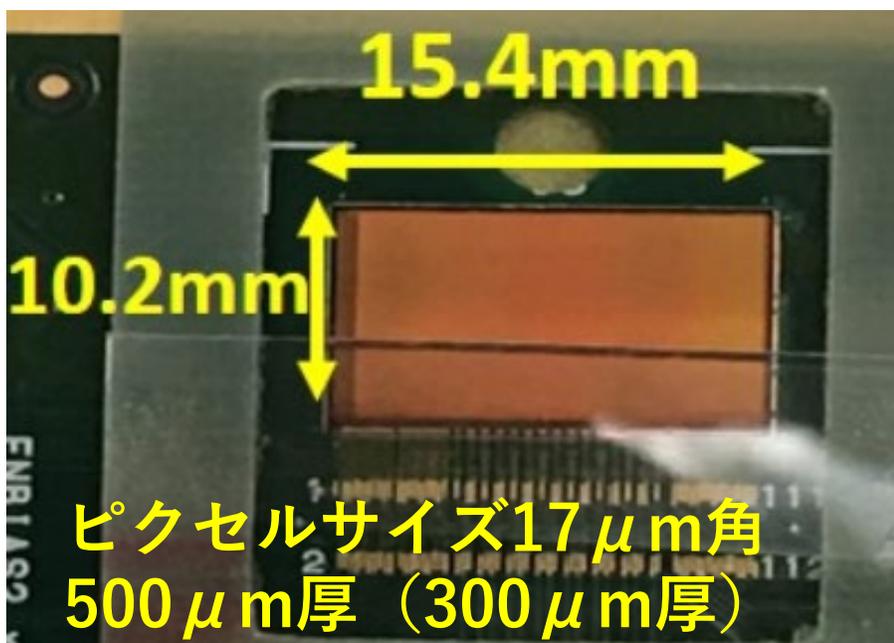
AR-テストビームラインに合わせた
SW/HWの改良



2022年 AR-TBを用いたDuTiPの評価

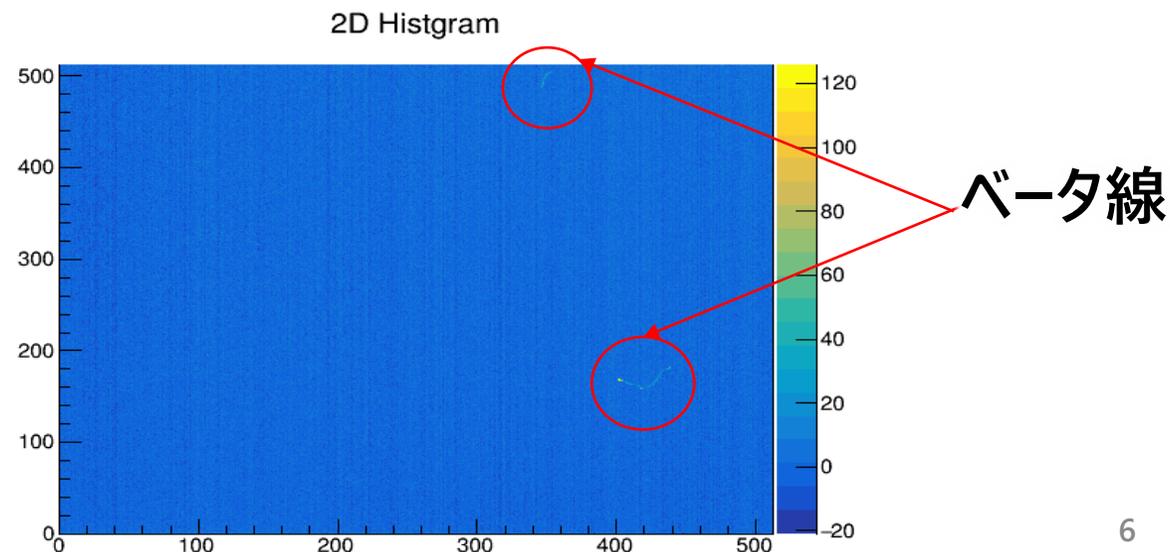
飛跡検出器 INTPIX

- ◆ $17\mu\text{m} \times 17\mu\text{m}$ の微細ピクセルサイズ
- ◆ 大きな有感領域 (14mm×9mm)
- ◆ 13ブロック並列アナログ出力
 - ADCでデジタル変換して読み出し

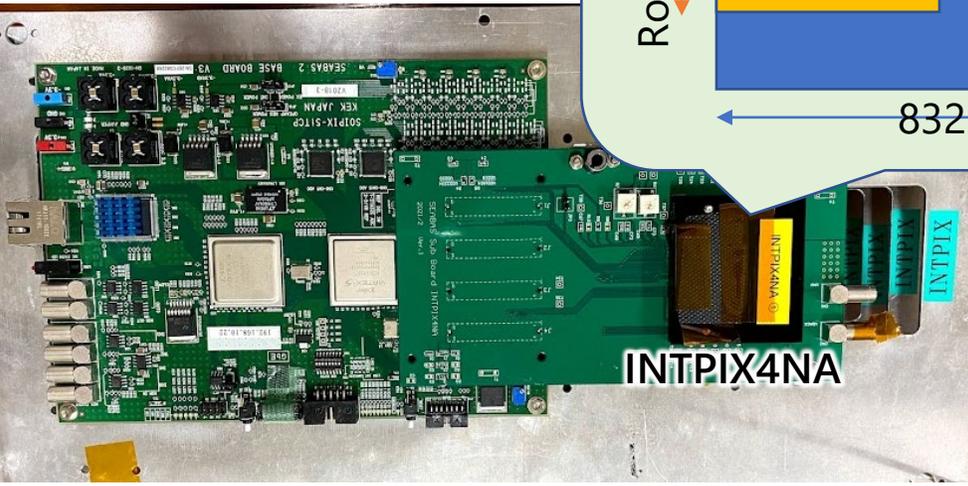
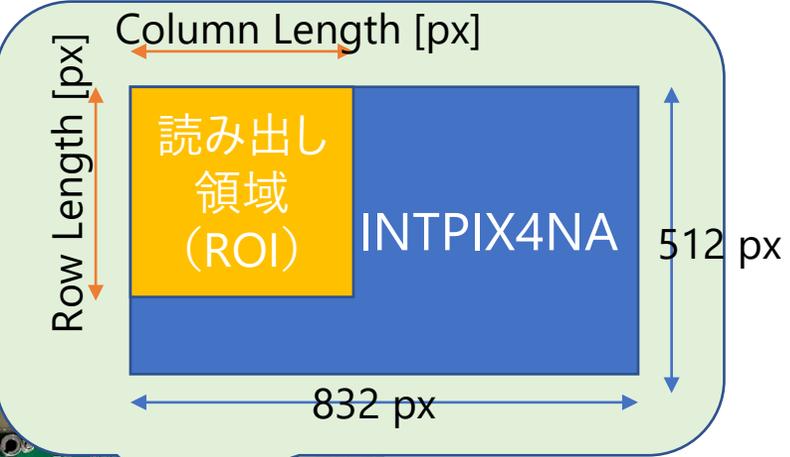


◆ 2019年 INTPIX4

◆ 120GeV陽子ビームテストで $\sim 1.5\mu\text{m}$ の位置分解能

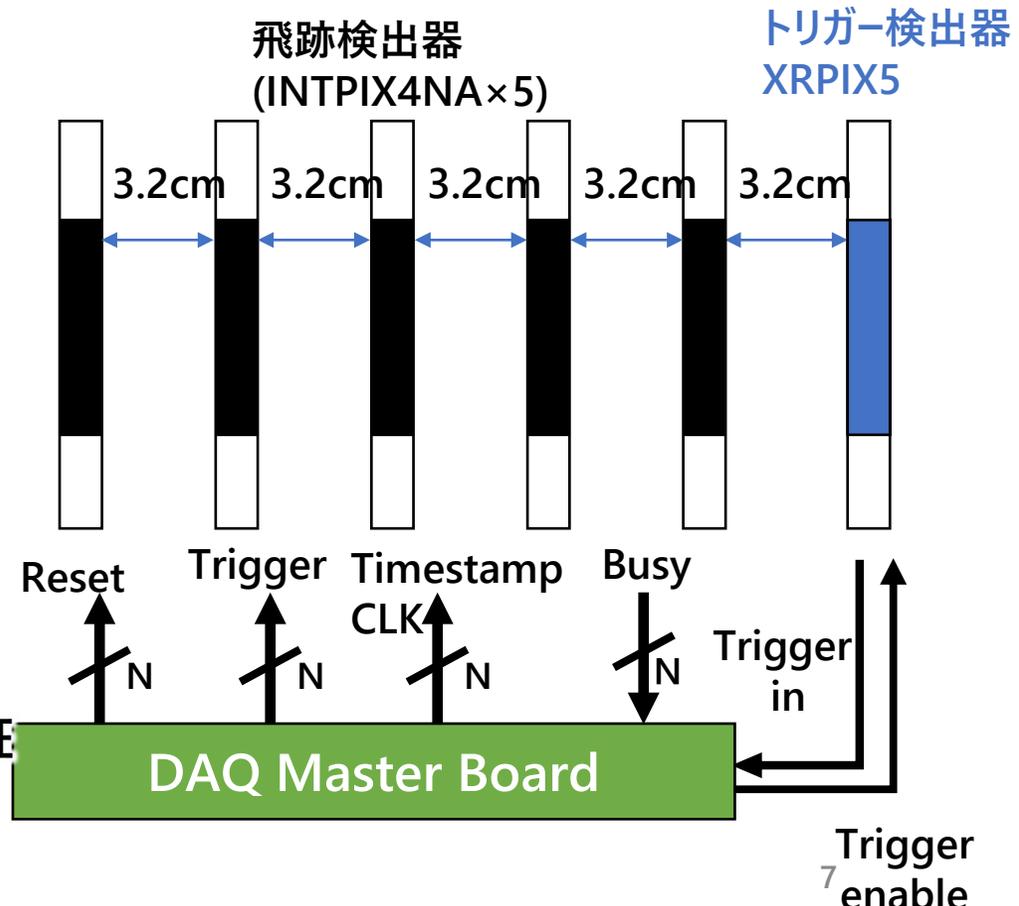


読み出しシステム



- ◆ FPGAボード+サブボードの構成
- ◆ 各チップは読み出し領域 (ROI) の設定ができる
- ◆ INTPIX4はリセットと積分を繰り返す
- ◆ マスターボードから制御信号を配布
 - ✓ 外部リセット信号により全チップを同じタイミングでリセット開始
 - ✓ 各フレームに時間情報 (タイムスタンプ) を付与することで、同期を保証
 - ✓ マスターボードがBUSYを受信している間はトリガーを受付しない

トリガー

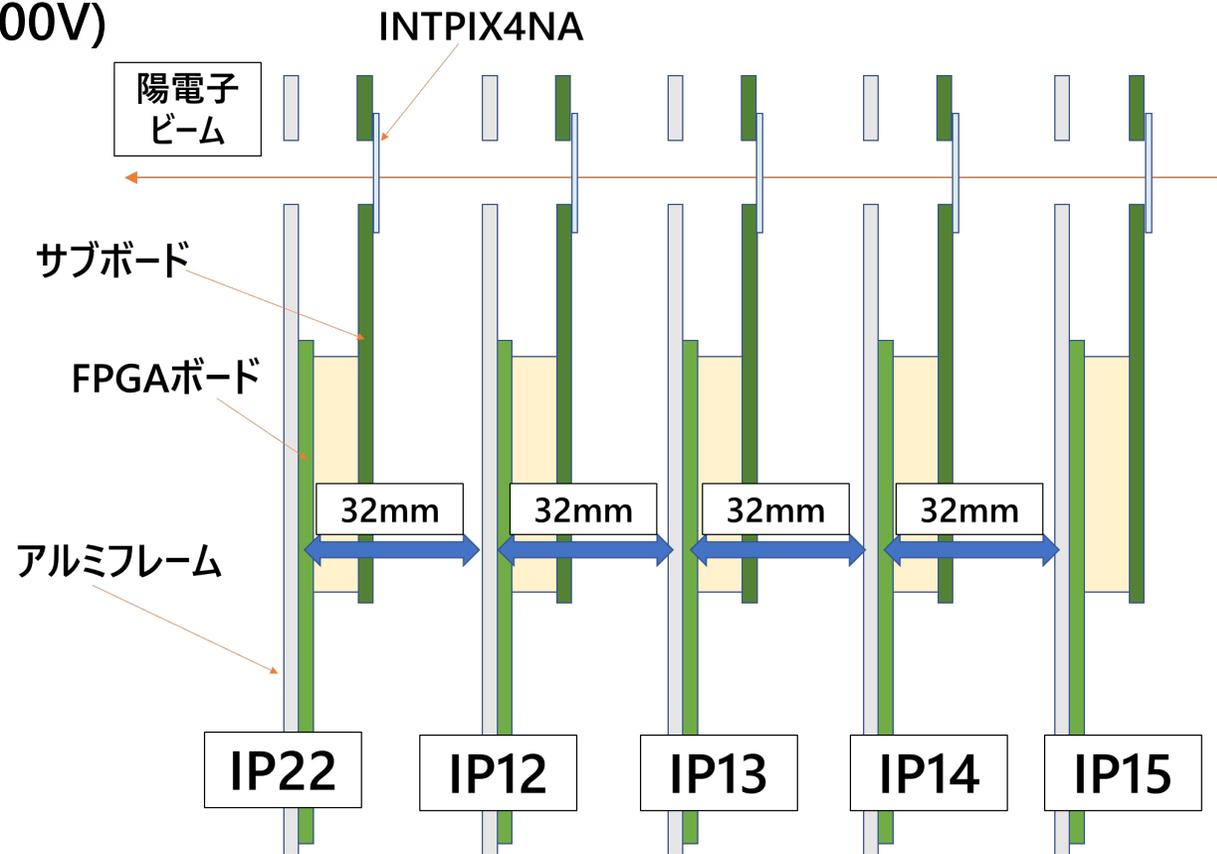
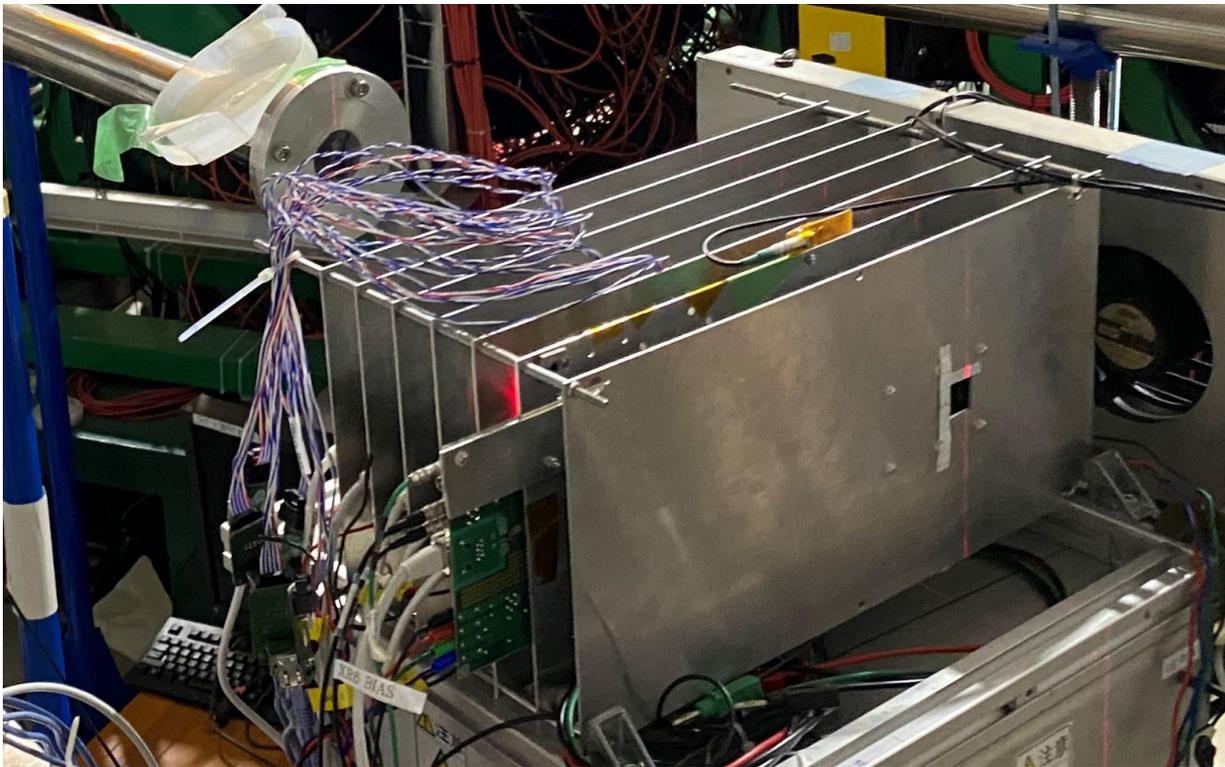


電子ビームテスト

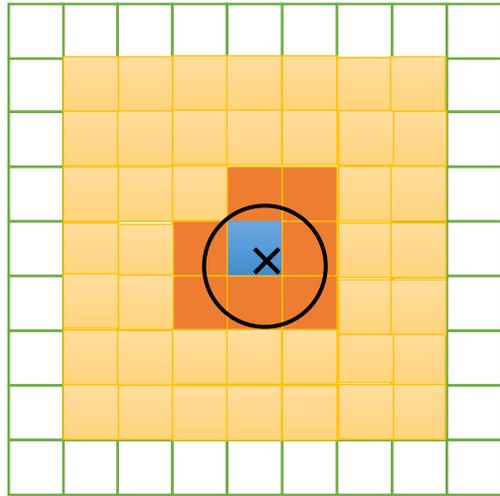
性能評価

ELPH 820MeV電子ビームテスト

- クラスタリング評価・SN評価
- 飛跡再構成による位置分解能評価
 - ✓ ビーム運動量 820MeV/c (運動量スキャン200~820MeV/c)
 - ✓ 逆バイアス電圧 20V (HVスキャン 1V~100V)

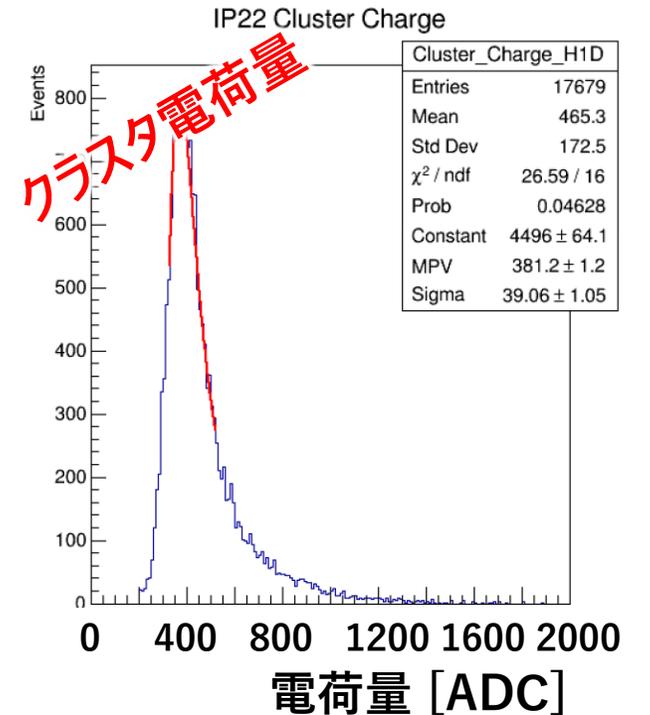
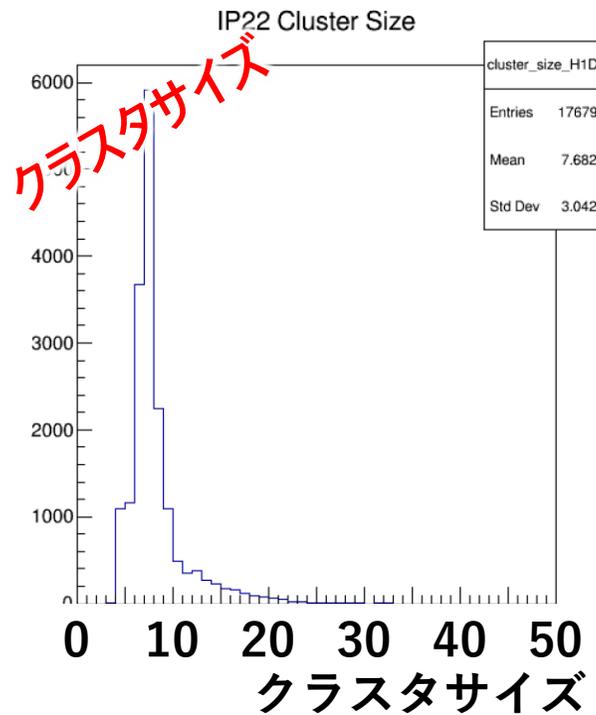


クラスタリング評価・SN評価



クラスタの定義

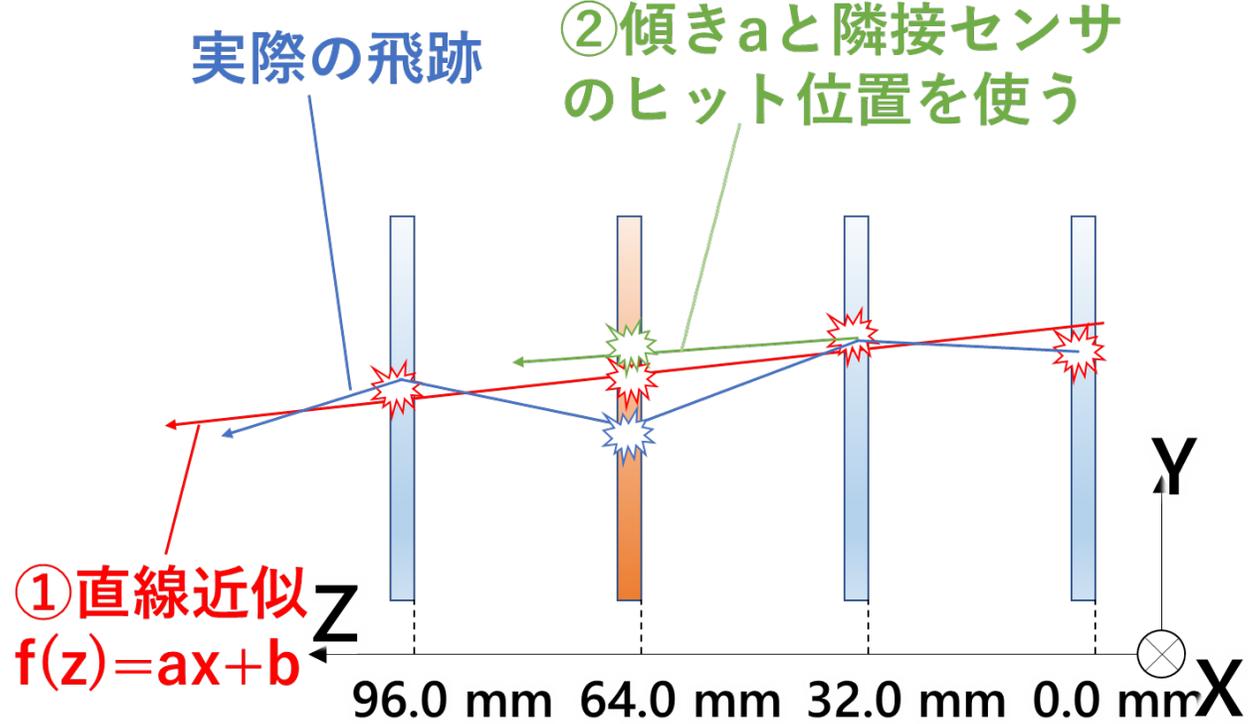
- クラスタシード
- クラスタ範囲
- 抽出されたピクセル
- × ヒット位置, 電荷の広がり



- 検出器内での発生電荷は近傍ピクセルに共有される
- 電荷量で重みづけして位置をヒット位置を計算することで位置分解能が向上
 - ➡ クラスタは6~7px程度に広がる
- クラスタ電荷量からSN比を算出

IP	noise	signal	S/N
IP22	1.6	381	237
IP12	1.8	339	188
IP13	1.8	354	188
IP14	1.7	275	156
IP15	1.6	382	242

飛跡再構成 $\sim 1\text{GeV}/c$ 電子ビーム



①直線近似

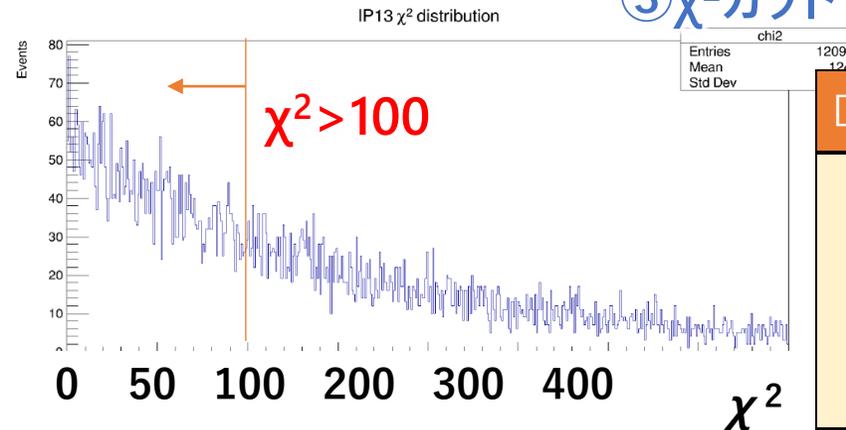
DUT	トラッキング方法	σ_x [um]
13	上流 1 枚/下流 1 枚	12.15 ± 0.10
13	上流 1 枚/下流 2 枚	14.48 ± 0.12
13	上流 2 枚/下流 1 枚	14.42 ± 0.12
13	上流 2 枚/下流 2 枚	20.28 ± 0.16

①隣接センサのヒット位置使用

DUT	トラッキング方法	σ_x [um]
13	上流 1 枚/下流 1 枚	12.15 ± 0.10
13	上流 1 枚/下流 2 枚	12.18 ± 0.10
13	上流 2 枚/下流 1 枚	11.8 ± 0.10
13	上流 2 枚/下流 2 枚	14.57 ± 0.12

- INTPIX4NA自身をDUTとして飛跡再構成
- 3層以上で分解能を悪くするのは散乱の大きいトラック

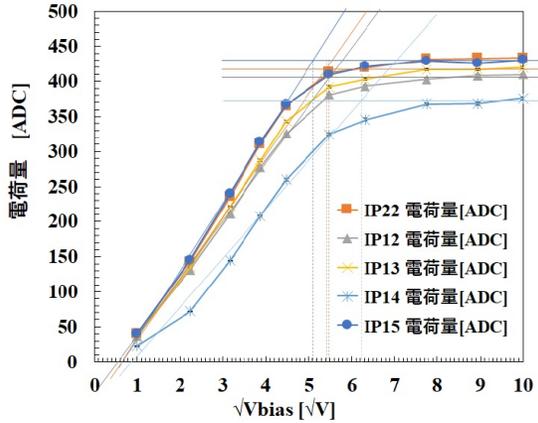
③ χ^2 カット



DUT	トラッキング方法	σ_x [um]
13	上流 1 枚/下流 1 枚	12.15 ± 0.10
13	上流 1 枚/下流 2 枚	10.29 ± 0.12
13	上流 2 枚/下流 1 枚	10.25 ± 0.12
13	上流 2 枚/下流 2 枚	12.22 ± 0.12

HVスキャン

- 全センサに 1~100Vを印加
 - ✓ クラスタサイズ, 位置分解能, クラスタ電荷量を評価
- クラスタ電荷量から完全空乏化電圧を評価

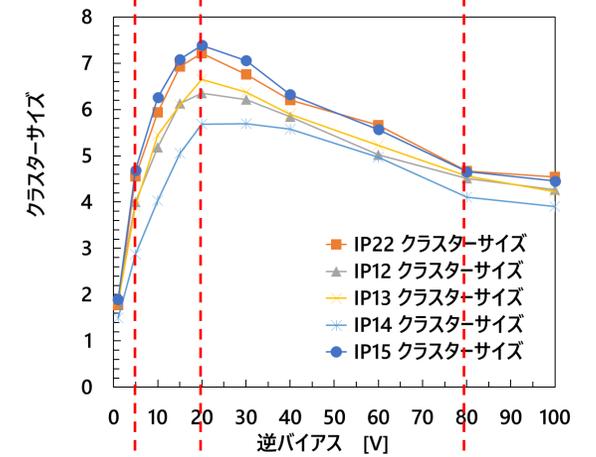


IP	完全空乏化電圧 [V]
IP22	26.01
IP12	30.25
IP13	29.16
IP14	38.44
IP15	26.01

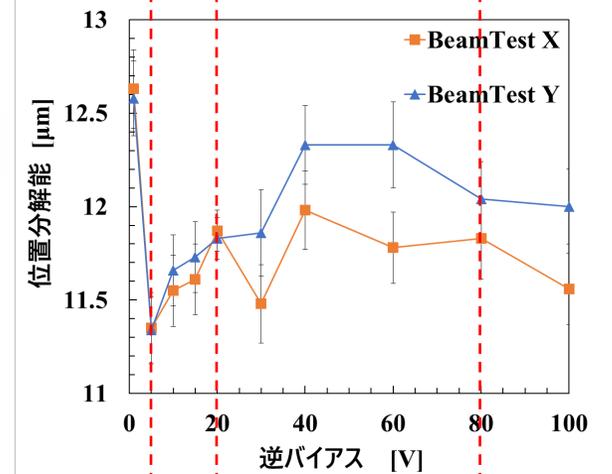
- クラスタサイズ > 20Vでピーク
 - ✓ < 20Vでは空乏層の広がり, > 20Vでは電場の強さで収束
 - ✓ 分解能については電荷の広がりとは相関はあまりない
- 信号量が1/3程度に落ちてても位置分解能はほとんど変わらず
 - ✓ 5Vで空乏層厚~130 μ m, 20Vで空乏層厚~250 μ m

➔ 300 μ mより薄くすることで位置分解能を維持しつつ散乱を低減できる

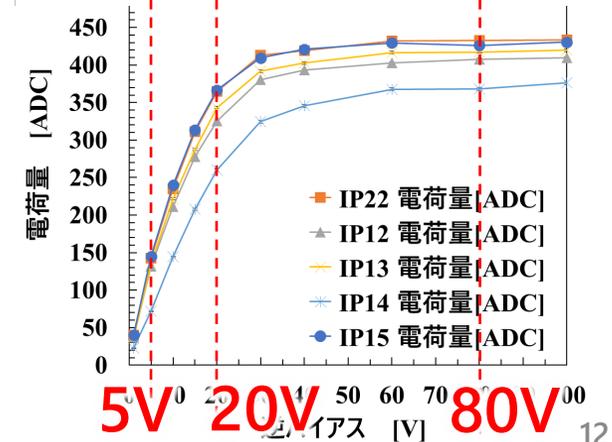
クラスタサイズ



位置分解能



電荷量

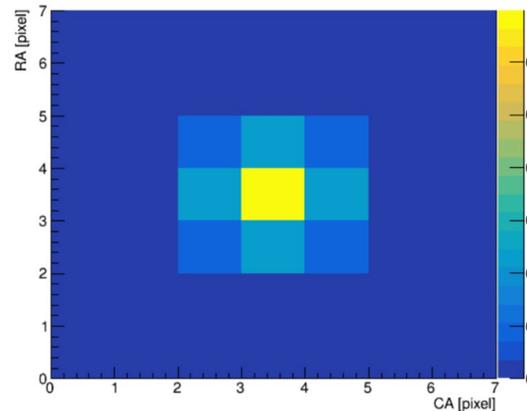
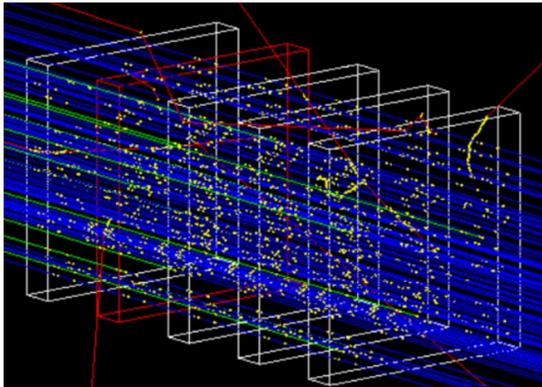


GEANT4

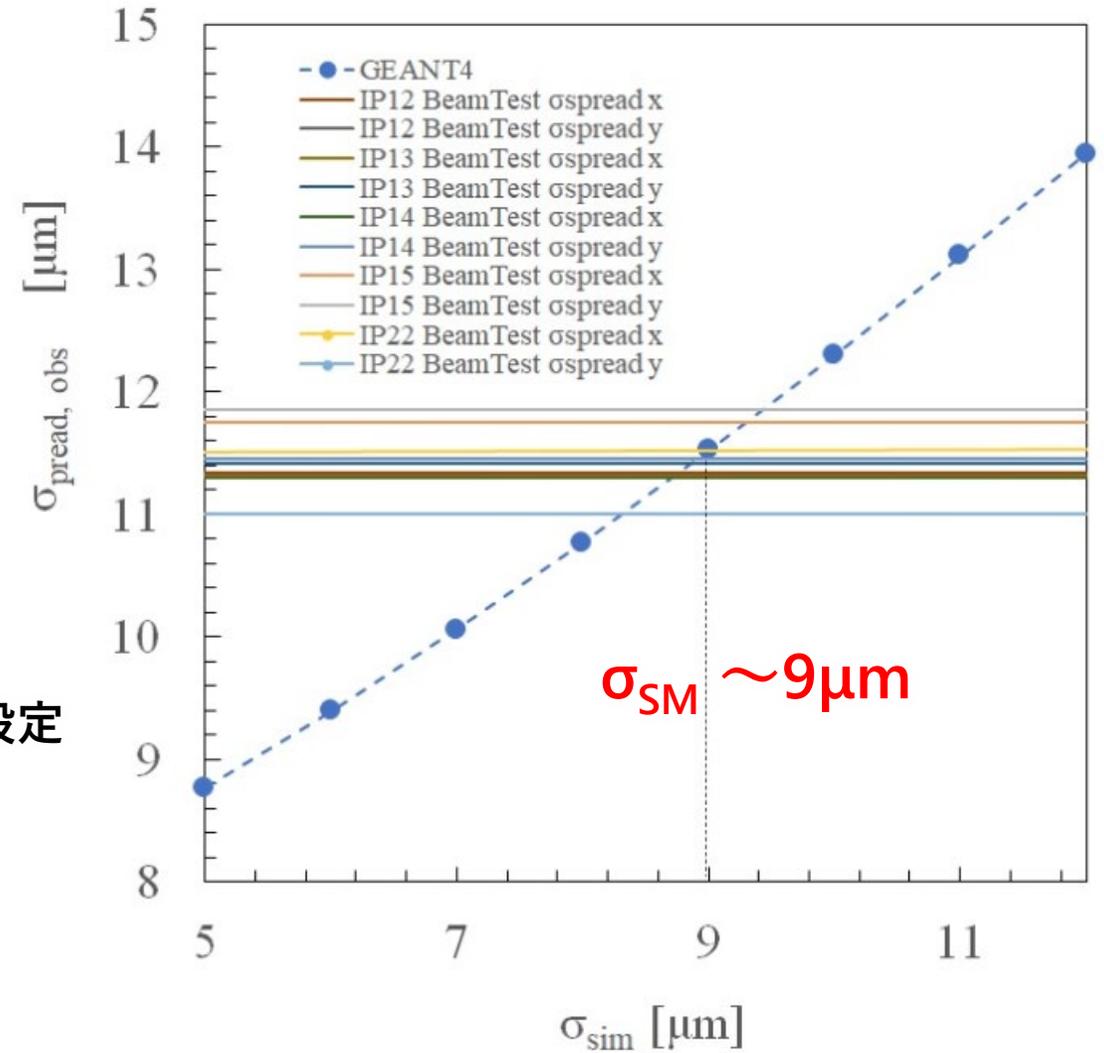
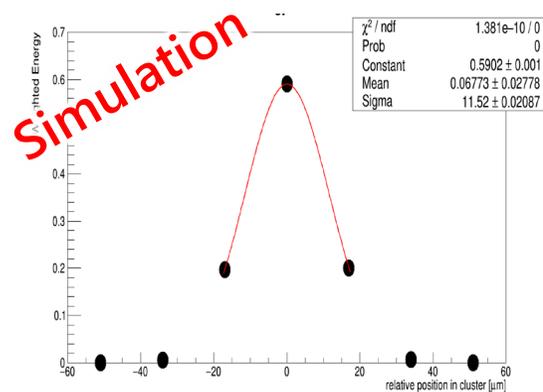
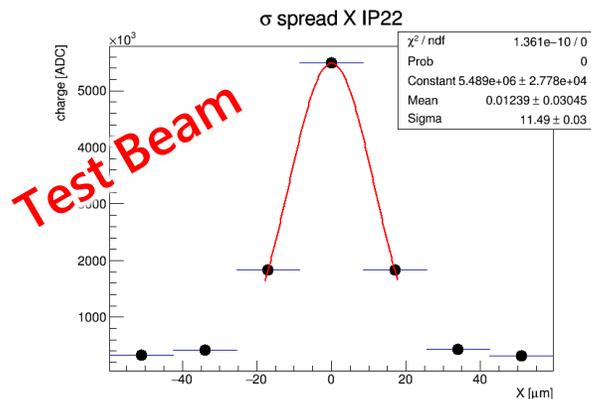
シミュレーション

Geant4シミュレーション

- Geant4では相互作用点でエネルギー計算
- 電荷の広がりを標準偏差 σ_{sim} の2次元ガウス分布で定義
- ➡その σ をシミュレーション上のパラメータとして指定



- 1次元上に射影してガウス関数フィット, σ_{spread} として評価
- ➡シミュレーション・ビームテストの結果を比較して $\sigma_{sim} = 9\mu\text{m}$ と設定

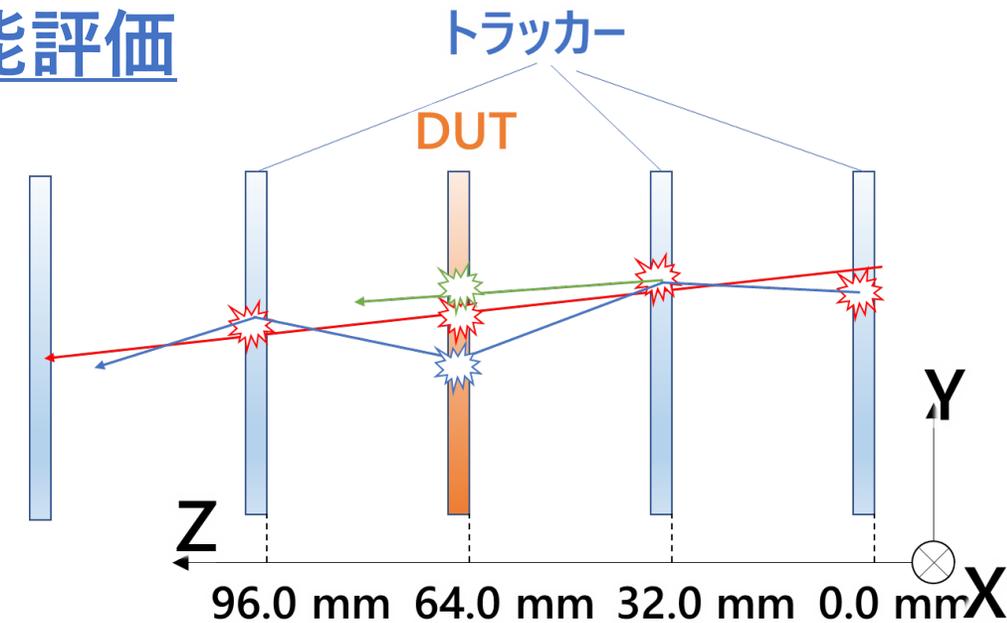
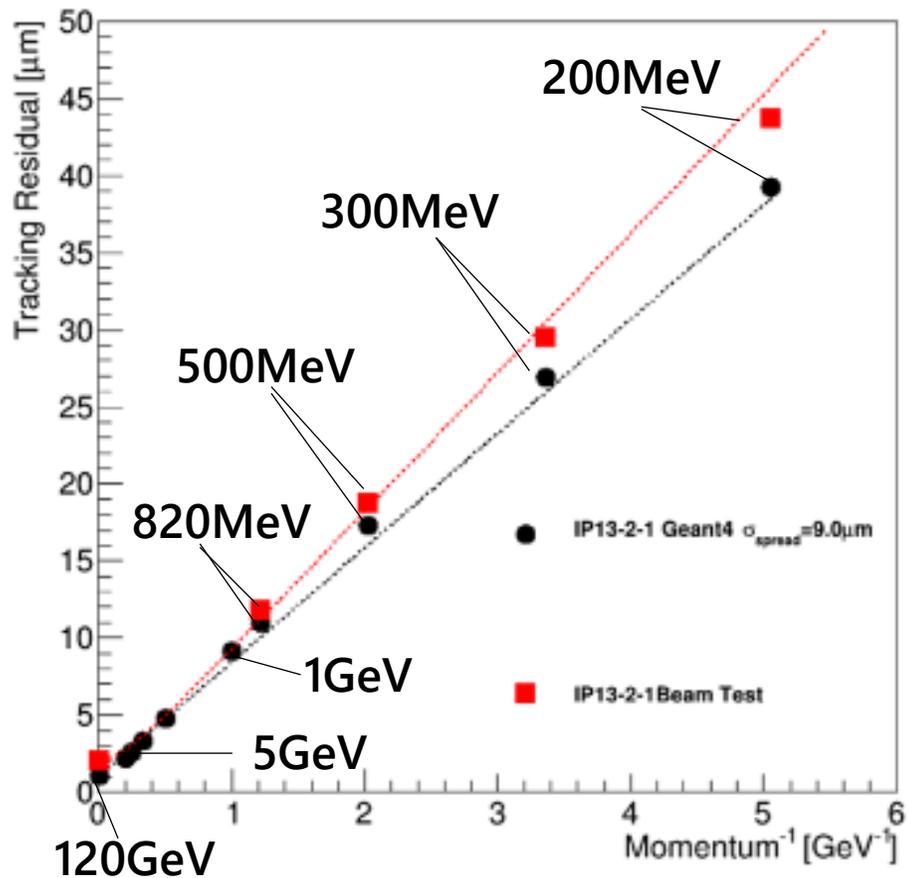


Geant4シミュレーション 各運動量の位置分解能評価

➤ SN比からノイズを再現し，荷電重心法で位置を計算

➔ 上流 2 枚/下流 1 枚で飛跡再構成

➤ $\sigma_{obs} \sim \sqrt{\sigma_{trk}^2 + \frac{\sigma_{sct}^2}{p^2}}$ でフィット
 トラッキングの分解能 散乱の影響



➤ INTPIXは最高で60μm厚程度まで薄化可能

➔ 厚みを変えて1~5GeVの結果を予測

運動量 [GeV]	300 μm厚	130 μm厚	60 μm厚
1	8.72 ± 0.09	5.95 ± 0.05	4.76 ± 0.06
2	4.56 ± 0.04	3.23 ± 0.03	3.67 ± 0.04
3	3.07 ± 0.03	2.41 ± 0.02	3.33 ± 0.03
4	2.36 ± 0.02	2.06 ± 0.02	3.31 ± 0.03
5	1.90 ± 0.02	1.83 ± 0.01	3.36 ± 0.03

✓ 薄すぎると信号量が落ちて位置分解能が劣化する

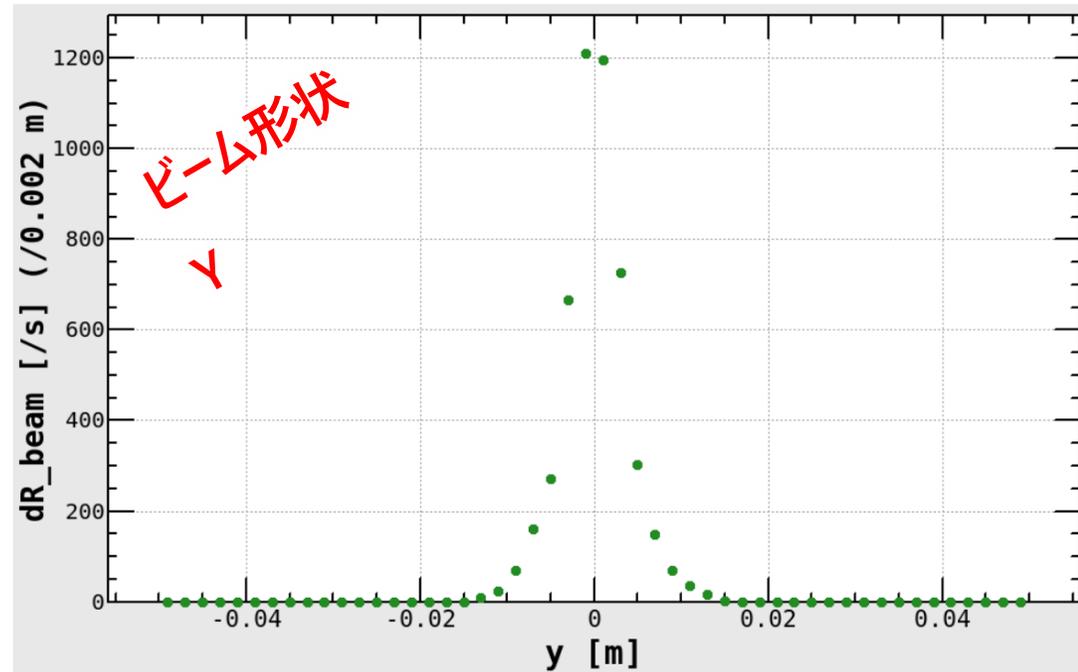
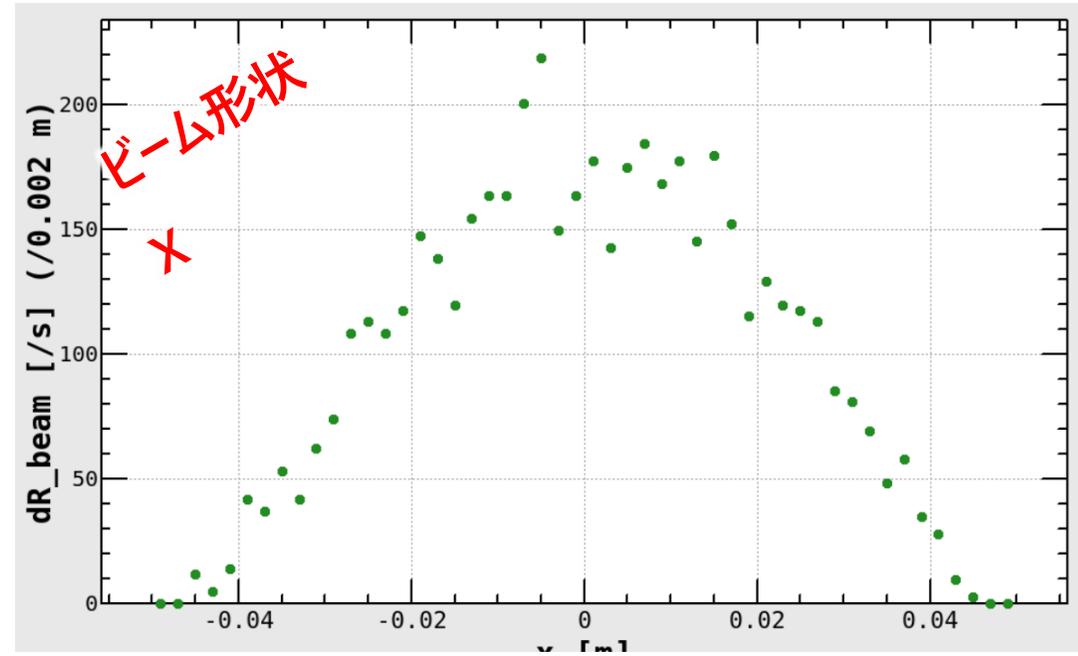
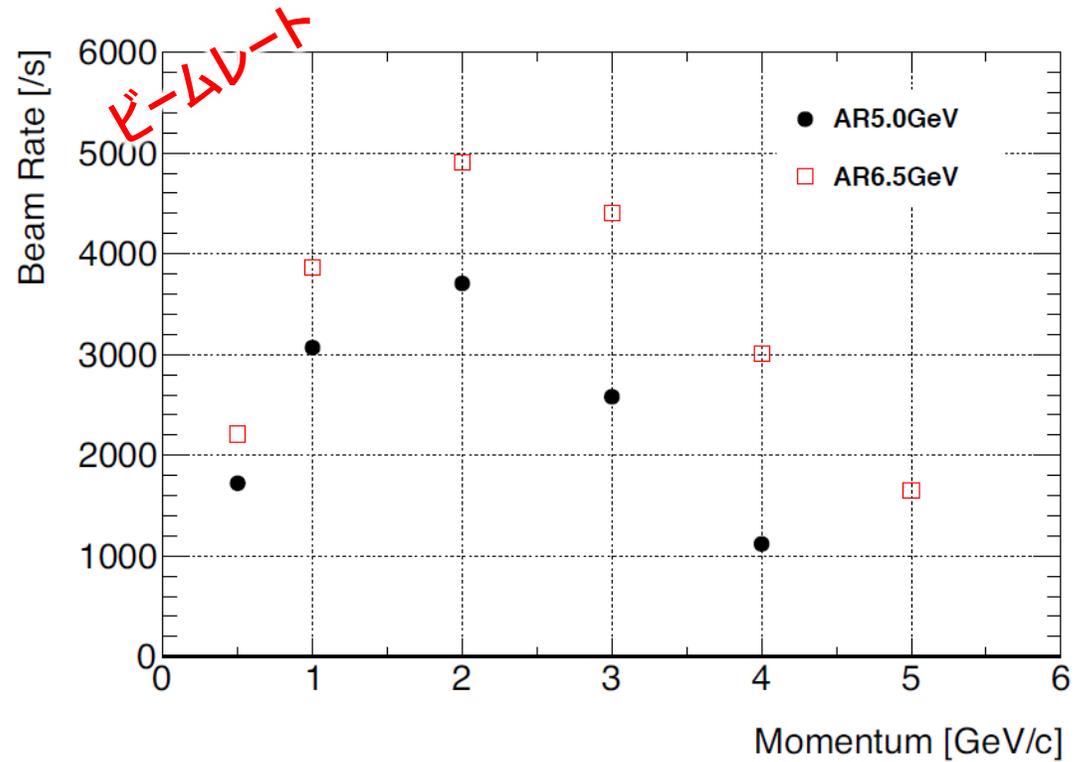
✓ 130μm厚程度がベストか？ → 今後センサ薄化して試験

まとめ / 今後方針

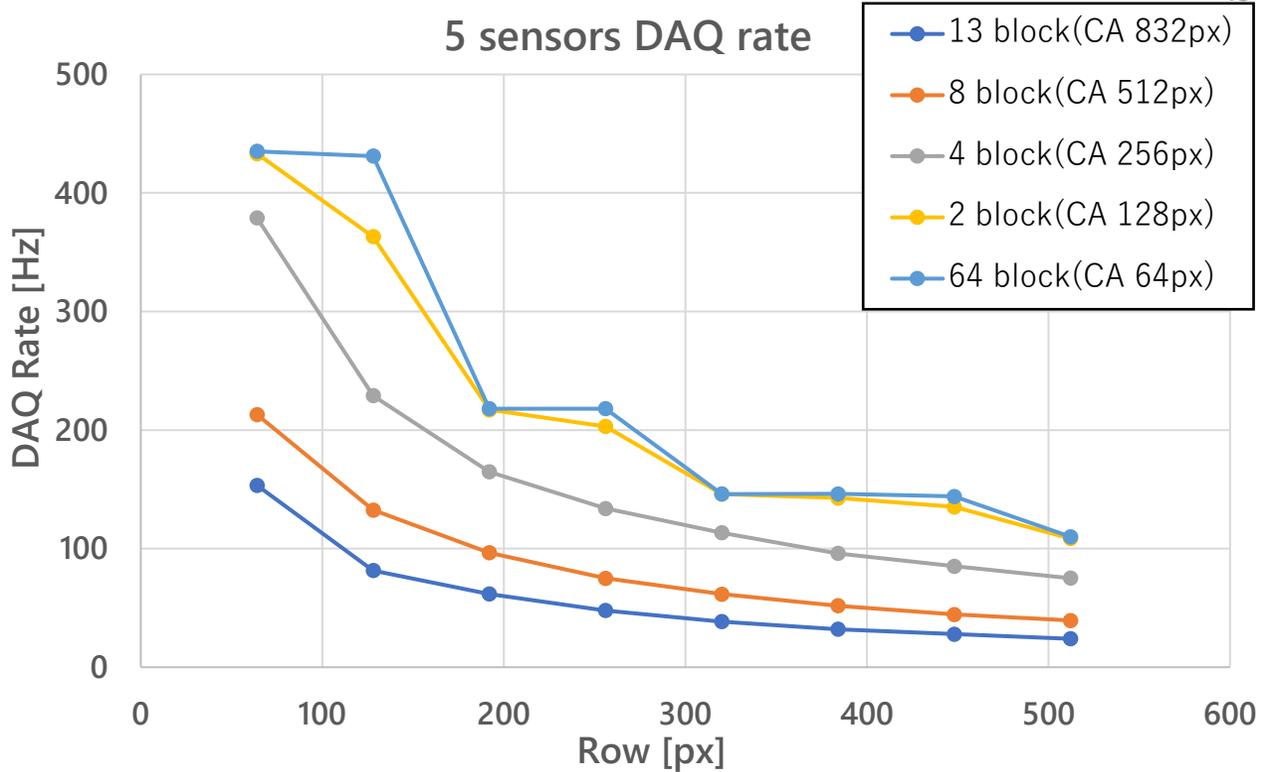
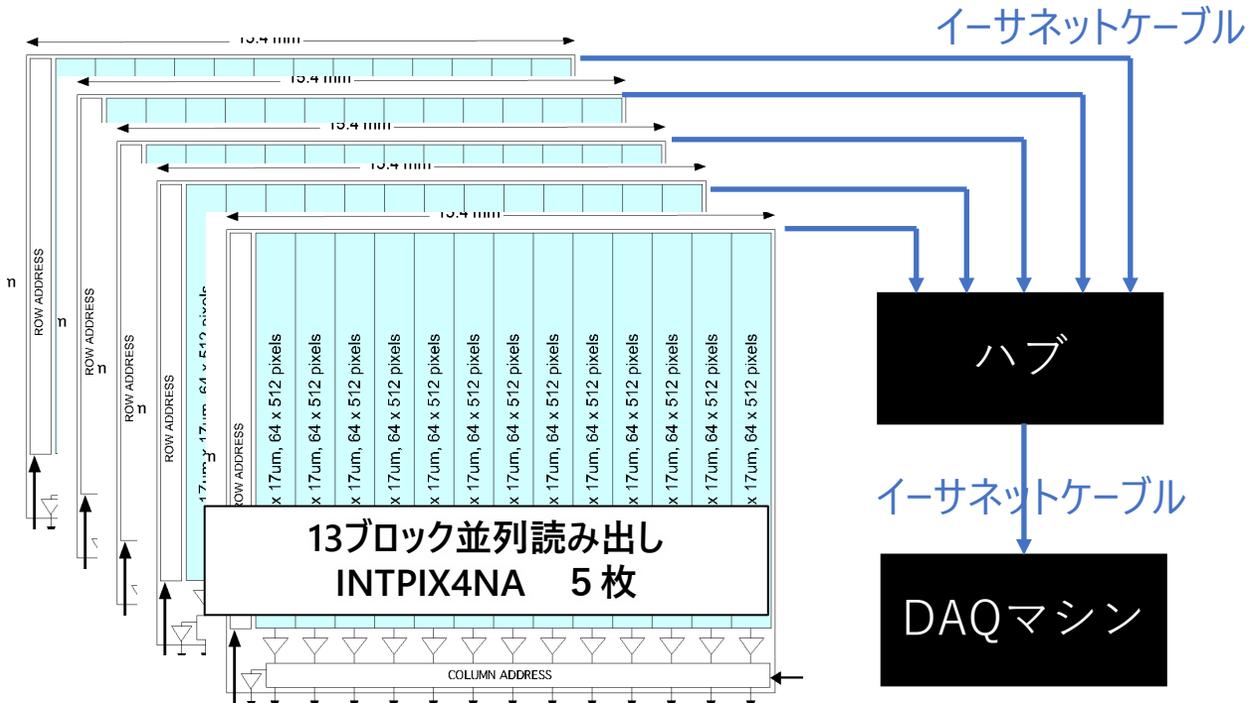
- KEK AR-TB用にSOIピクセル検出器を用いた高精度・低多重散乱のテレスコープを構築
- ELPHを用いたビームテストによる性能検証
 - ✓ 位置分解能評価（運動量スキャン、HVスキャン）
 - ✓ 位置分解能~11umが得られた
- Geant4でのシミュレーション
 - ✓ 1~5GeVにおける位置分解能予測 1.9~3.3 μ m @5GeV
 - ✓ 今後薄化したセンサで試験を行う

Back up

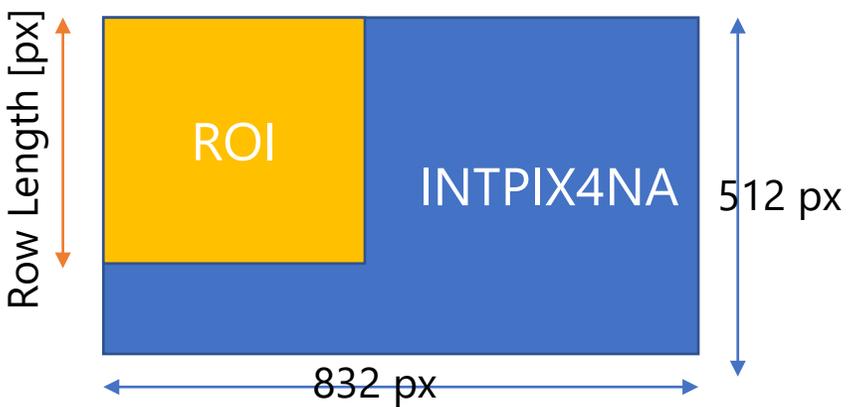
AR-TB ビーム情報



5枚同期 —DAQレート—

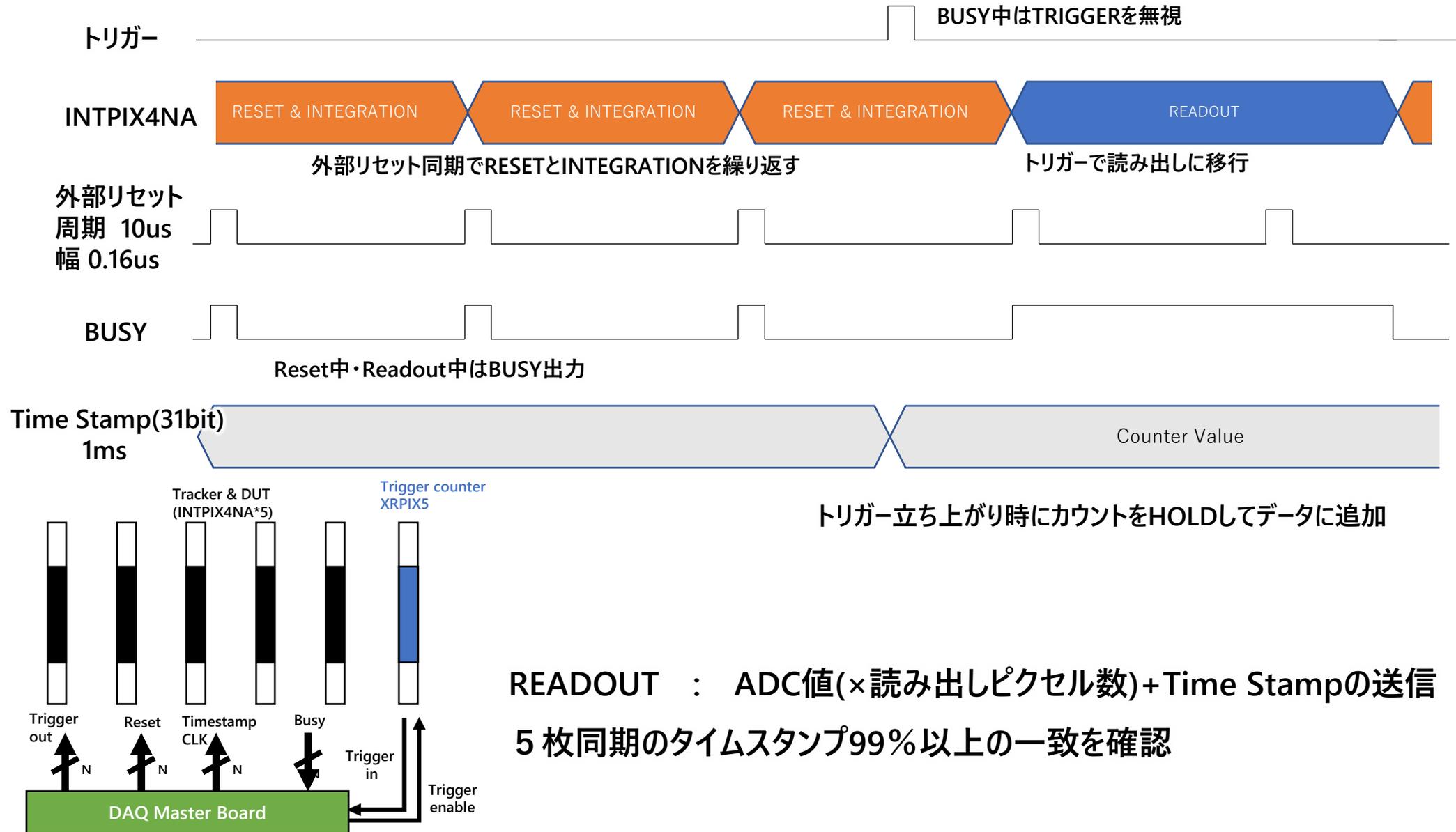


Column Length [px]



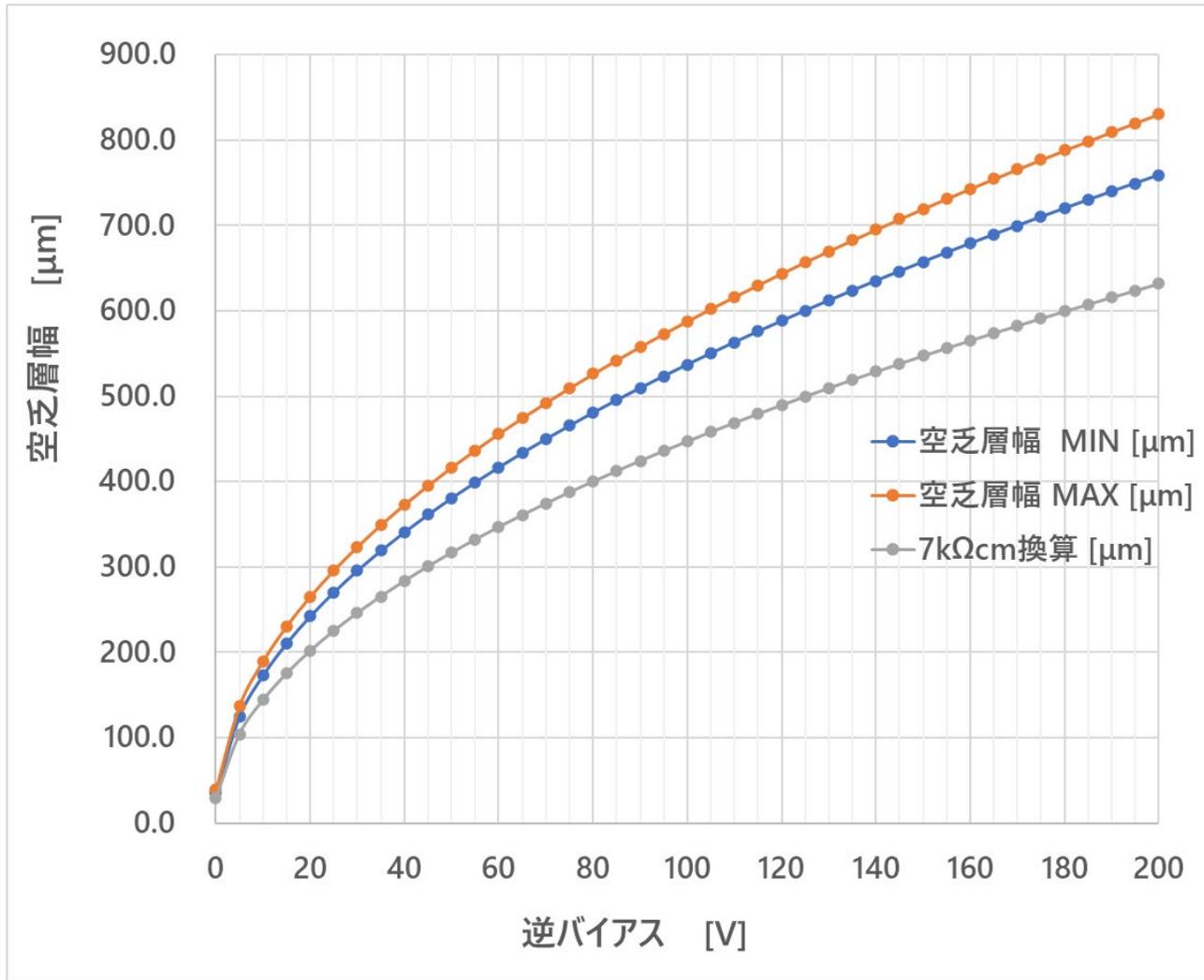
- ◆ ROIで読み出し領域を選択可能
 - 512px * 512px(40Hz) ~ 64px*64px(400Hz)
- ◆ KEK AR-TBではチップサイズ辺り200~300Hzのイベントが予測される
 - 読み出しビット数の削減・ゼロサプレッションの開発

5枚同期 —タイムチャート・同期の確認—



INTPIX4NAの空乏層厚

- 抵抗率(10.1~12.1kΩcm)から計算したINTPIX4NAの空乏層厚
- 7kΩcmはINTPIX4 の推定抵抗値 (2019年ビームテストより)



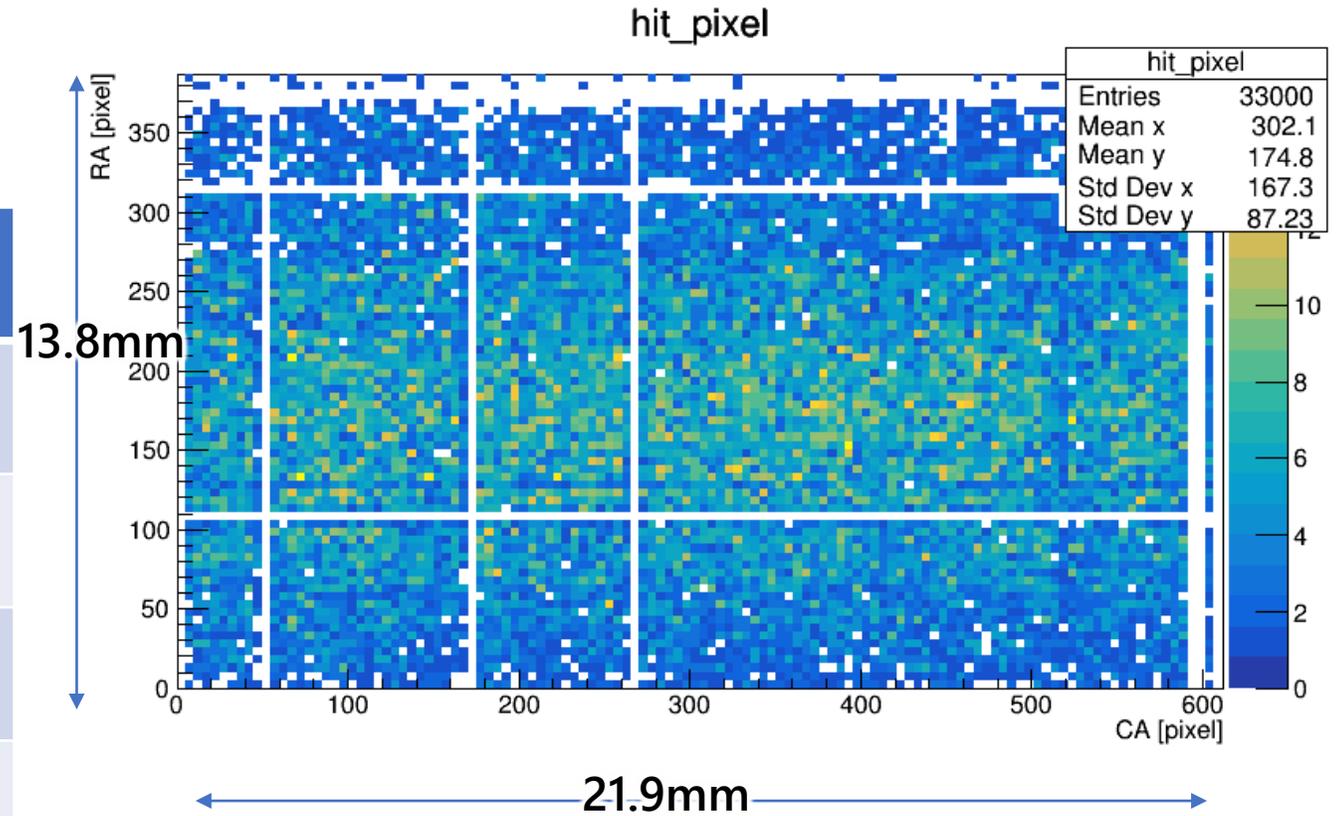
逆バイアス [V]	空乏層幅 MIN [μm]	空乏層幅 MAX [μm]	7kΩcm換算 [μm]
0	35.4	38.7	29.4
5	125.0	136.8	104.0
10	173.2	189.5	144.2
15	210.6	230.5	175.3
20	242.3	265.2	201.7
25	270.3	295.9	225.1
30	295.7	323.7	246.2
35	319.1	349.2	265.6
40	340.9	373.1	283.8
45	361.3	395.5	300.8
50	380.7	416.7	316.9
55	399.1	436.8	332.3
60	416.7	456.1	346.9
65	433.6	474.6	361.0
70	449.9	492.4	374.5
75	465.6	509.6	387.6
80	480.7	526.2	400.2
85	495.5	542.3	412.5
90	509.7	557.9	424.4
95	523.6	573.2	435.9
100	537.2	588.0	447.2
105	550.4	602.4	458.2
110	563.3	616.6	469.0
115	575.9	630.4	479.4
120	588.3	643.9	489.7
125	600.3	657.1	499.8
130	612.2	670.1	509.6
135	623.8	682.8	519.3
140	635.2	695.3	528.8
145	646.4	707.5	538.2
150	657.4	719.6	547.3
155	668.3	731.5	556.4
160	678.9	743.1	565.2
165	689.4	754.6	574.0
170	699.8	765.9	582.6
175	710.0	777.1	591.1
180	720.0	788.1	599.4
185	729.9	798.9	607.7
190	739.7	809.6	615.8
195	749.4	820.2	623.8
200	758.9	830.6	631.8

ELPHビームテスト e⁺ビームセッティング、プロフィール

➤ ビームターゲット：W（タングステン）

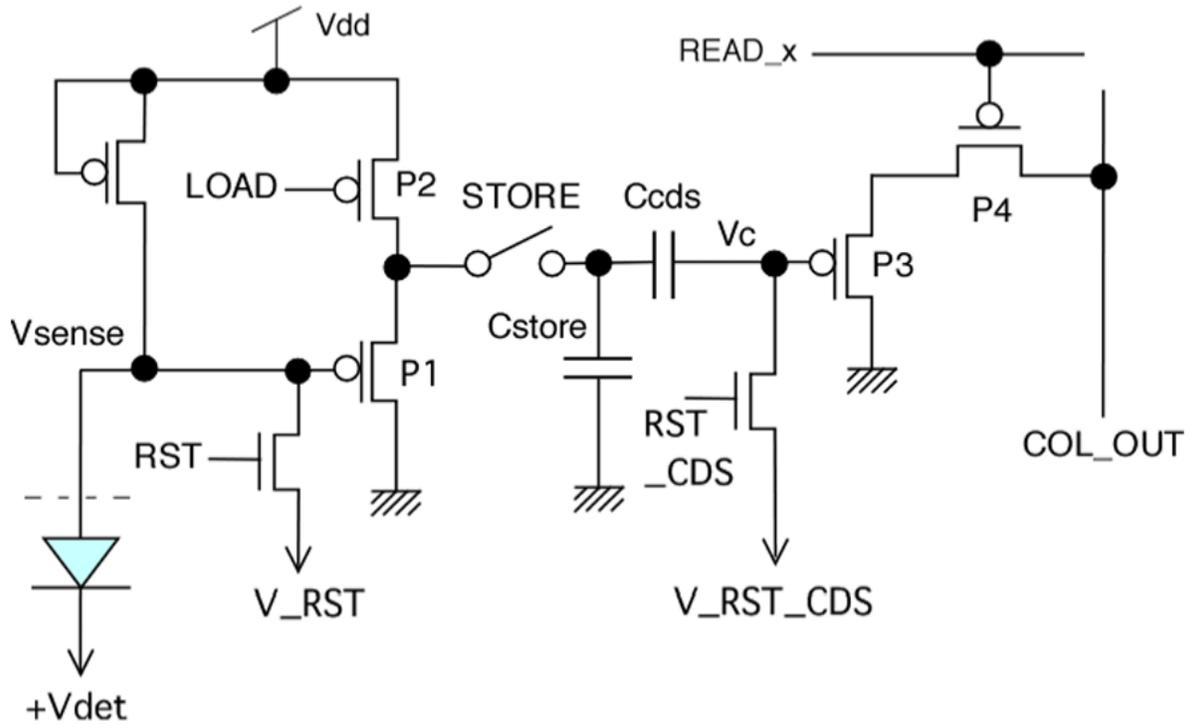
➤ ビームエネルギー：

XRPIX5で確認したビームプロフィール

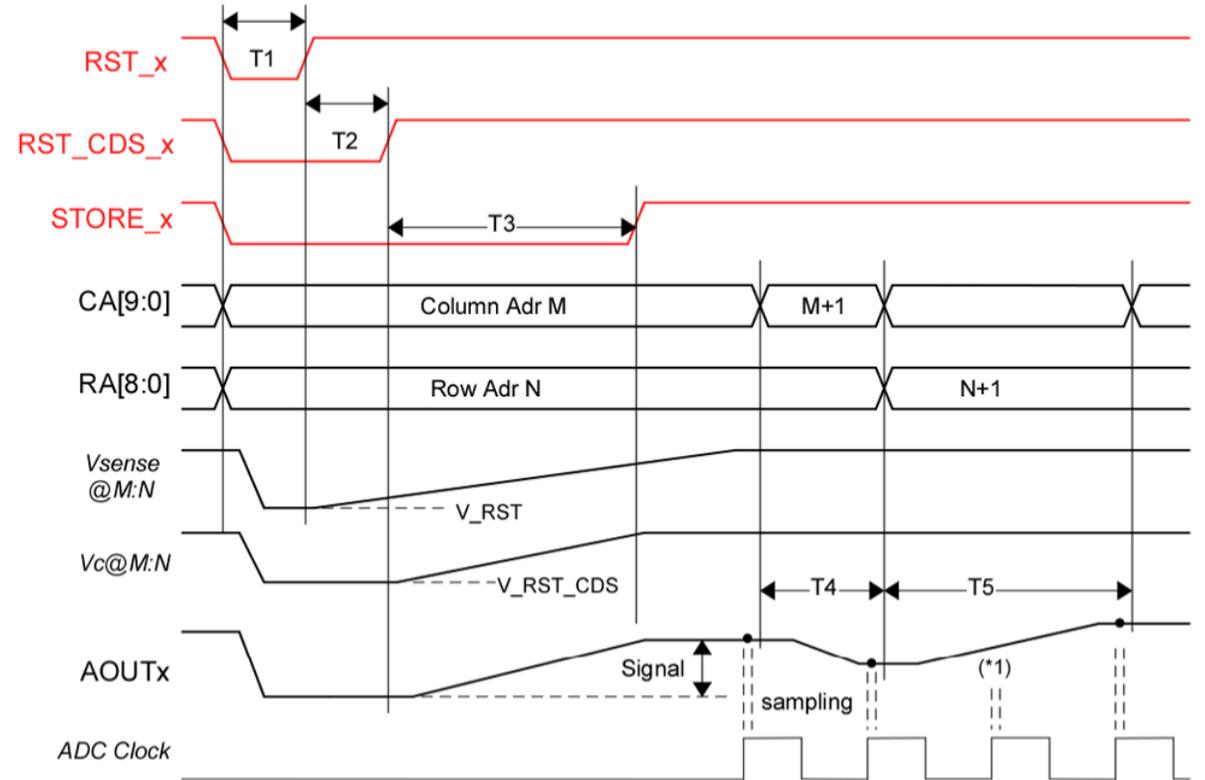


電磁石の電流量	エネルギー	4重極マグネット
100.0 A	197.79 MeV/c	QF=2T/m, QD=4T/m
150.0 A	297.30 MeV/c	QF=3T/m, QD=6T/m
250.0 A	492.5 MeV/c	QF=4T/m, QD=10T/m
475.0 A	822.37 MeV/c	QF=9T/m, QD=20T/m

INTPIX4 回路・ロジック



[AOUTx sampling timing]



(*1) Skip the data in this cycle when the clock period is shorter than T5.