

高い位置・時間分解能を持つ半導体飛跡検出器AC-LGADの 多チャンネル読み出しに向けた低消費電力かつ高速応答ASICの開発と性能評価

素粒子実験研究室 M2 堀越一生

2025年12月16日 宇宙史研究センター構成員会議

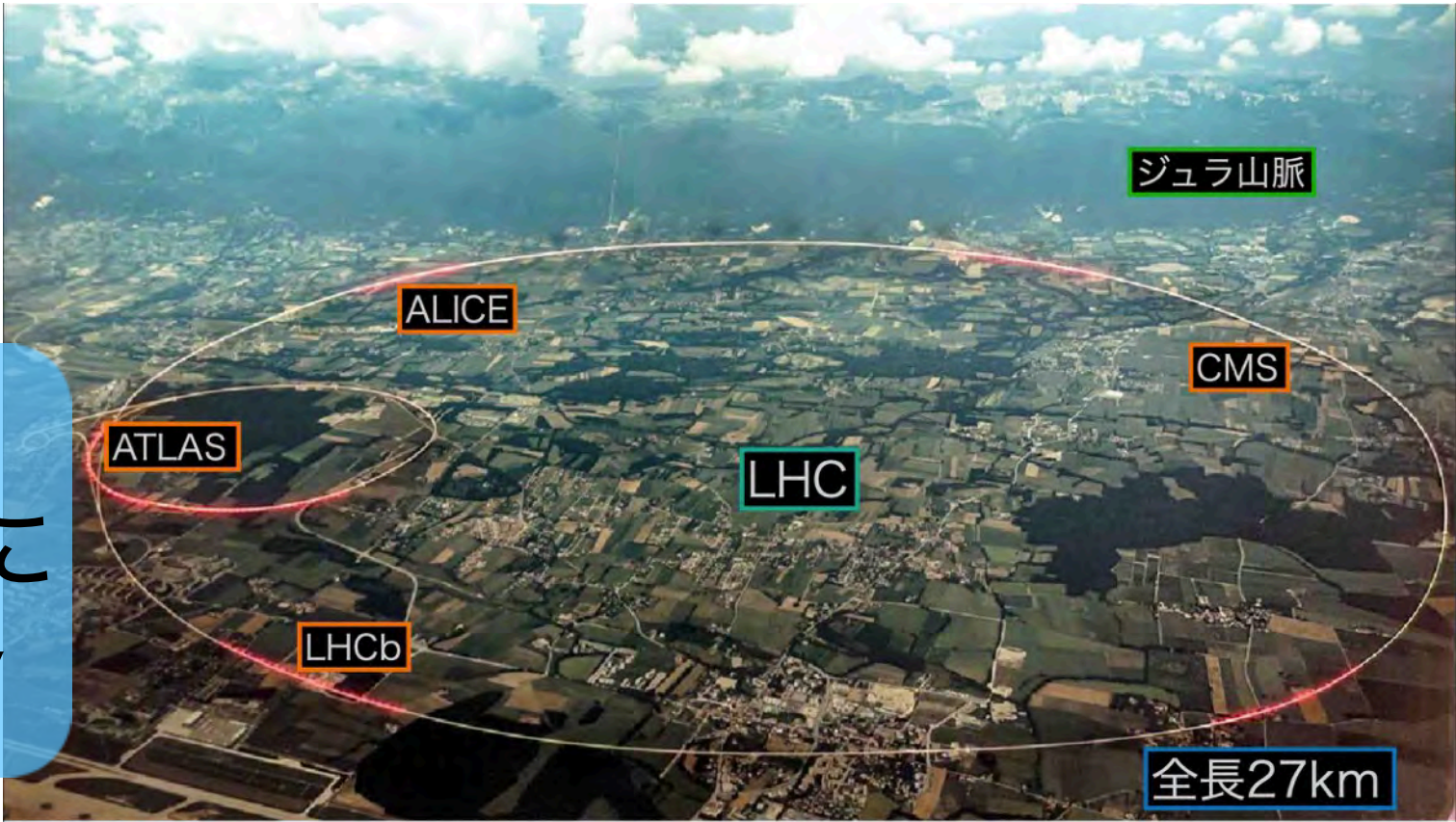
モチベーション

将来の加速器実験

2011～2026年：LHC

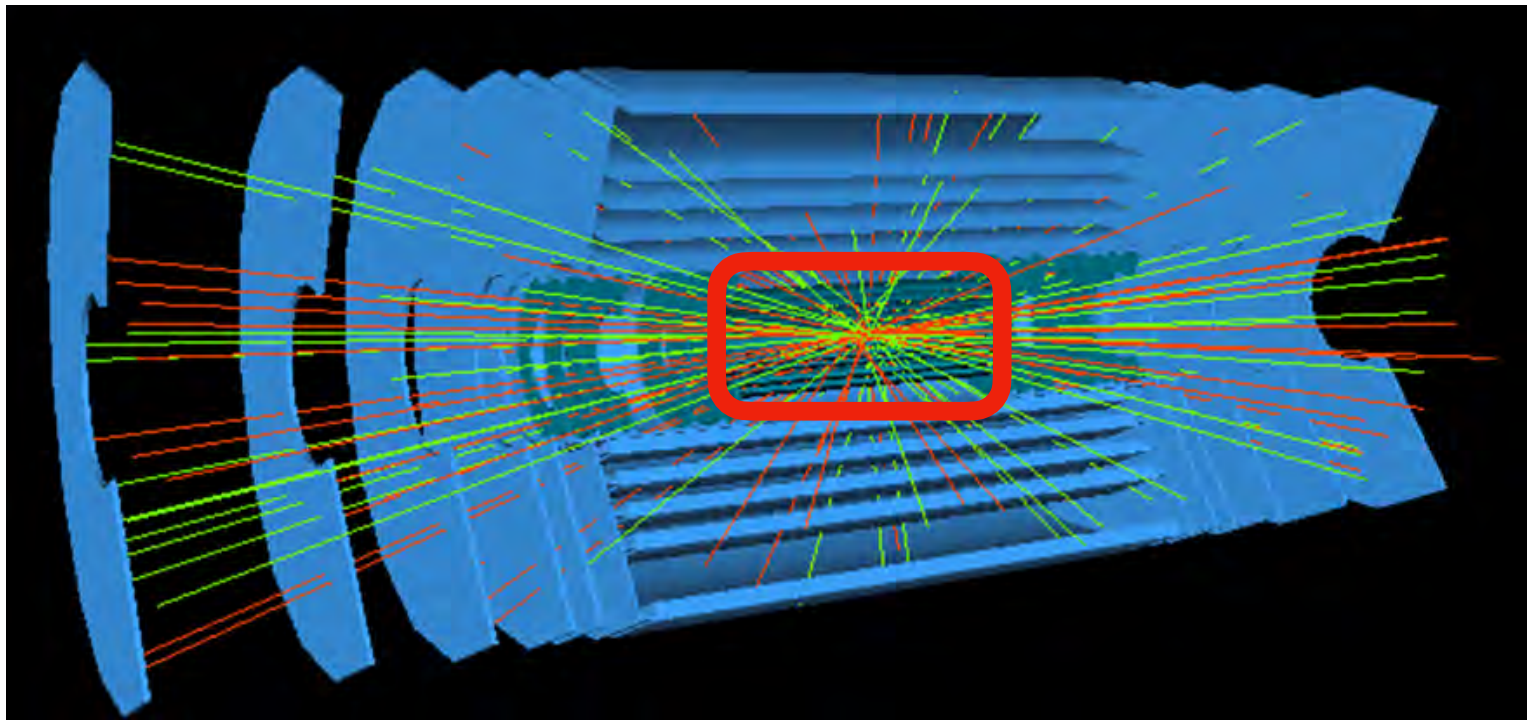
2030～2041年：高輝度LHC

LHCをアップグレードして、合計データ量を10倍に
エネルギーは最大14TeV



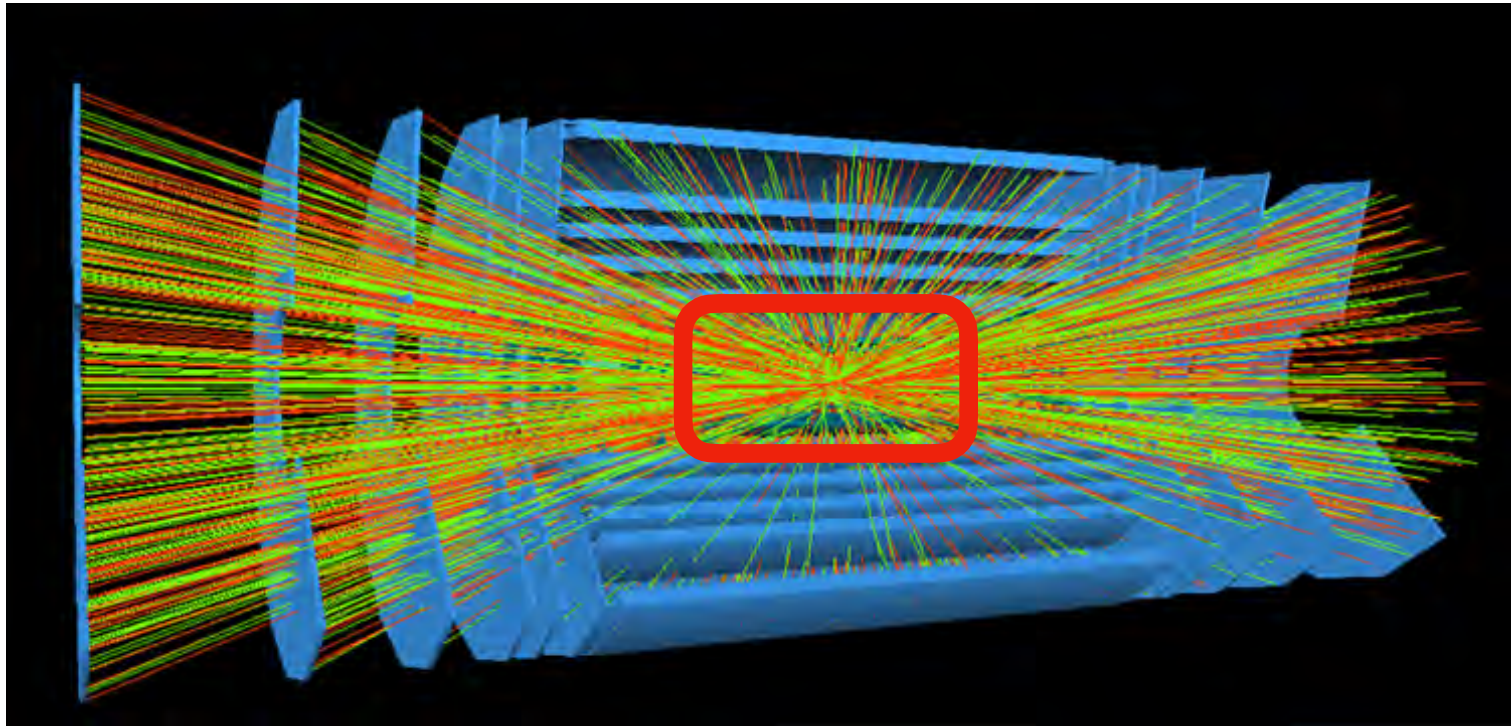
予想される困難

2011～2026年：LHC



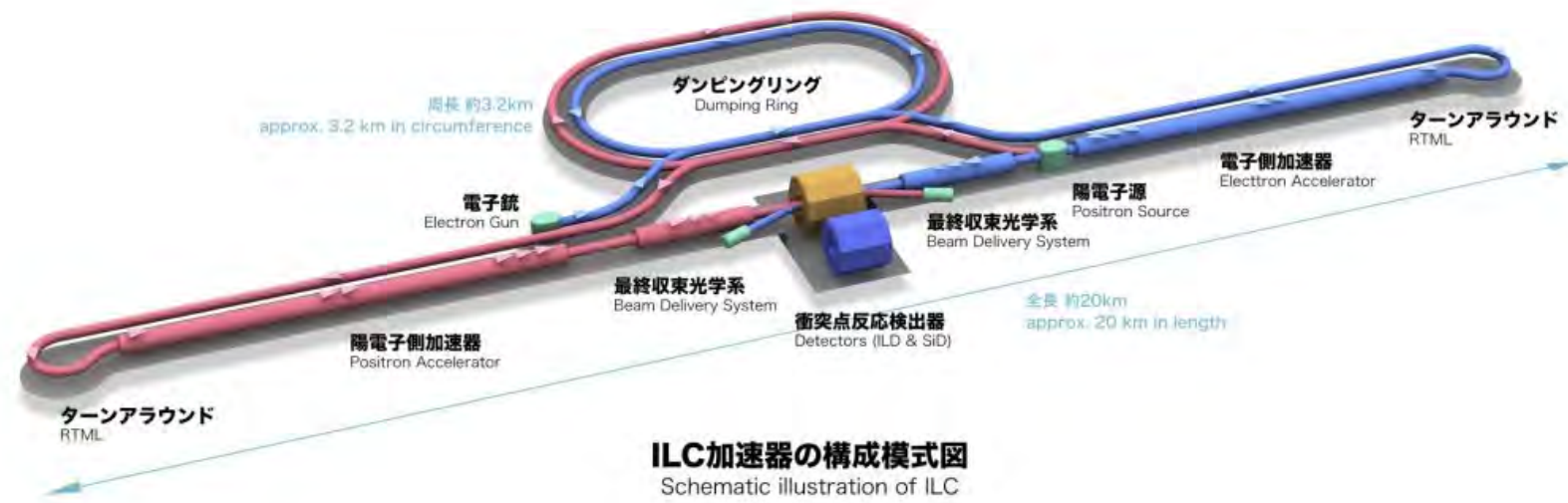
陽子の衝突数が3~4倍
に増加
→背景事象が増加

2030～2041年：高輝度LHC

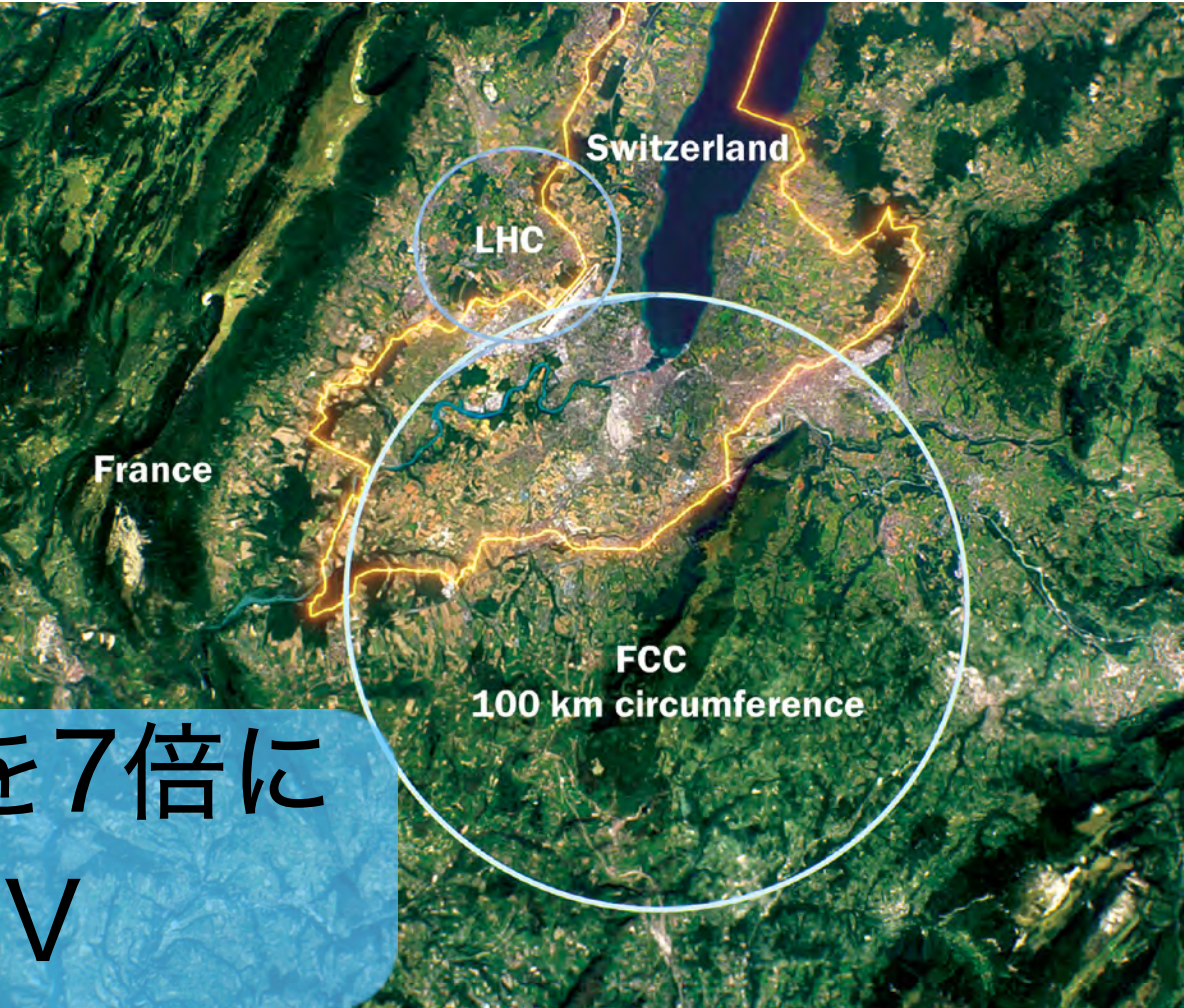


FCCではさら
に増加の
予定？

ILC：国際リニアコライダー



FCC：Future Circular Collider

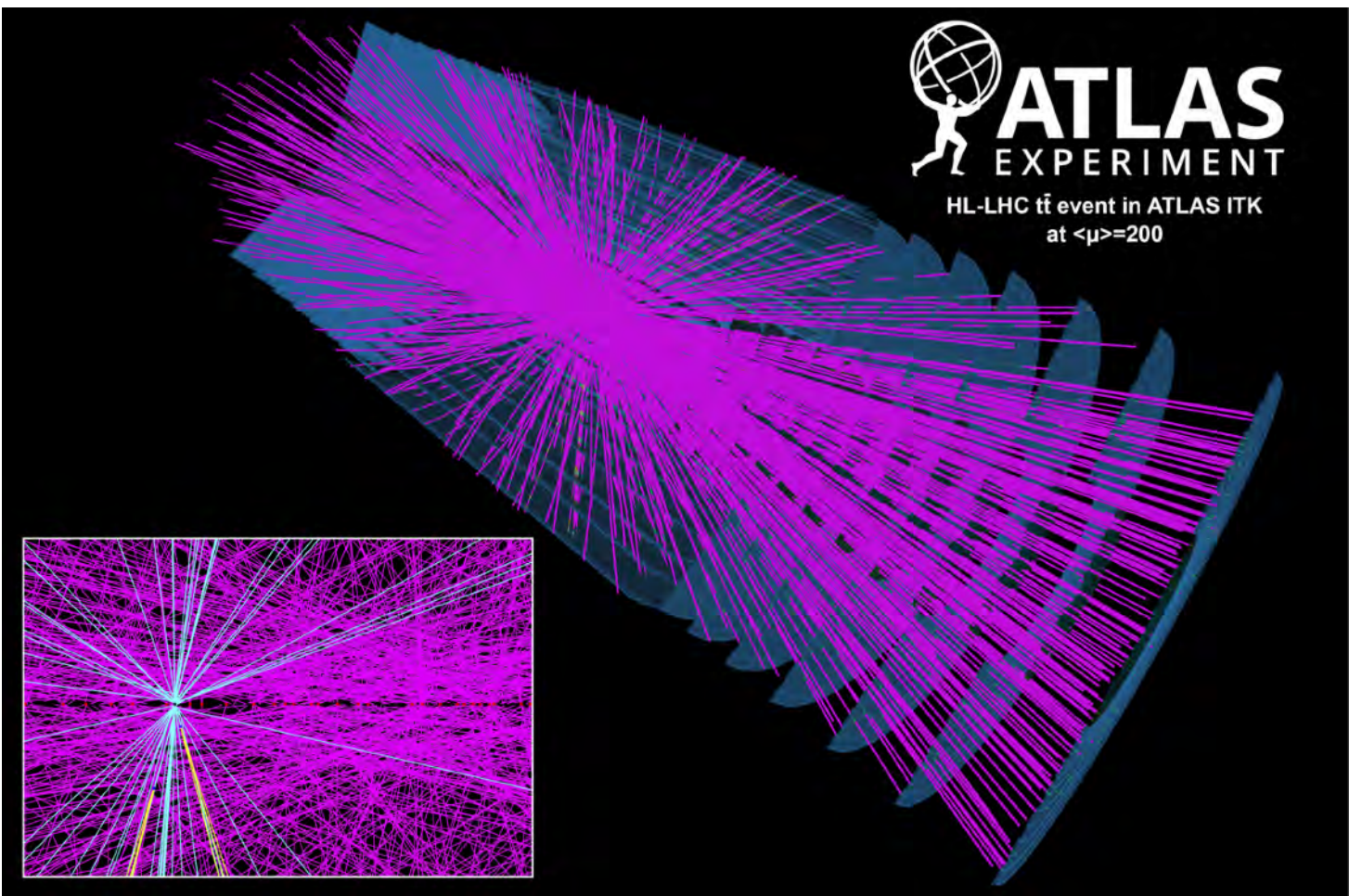


エネルギーを7倍に
100TeV

モチベーション

これからの内部飛跡検出器の課題と解決策

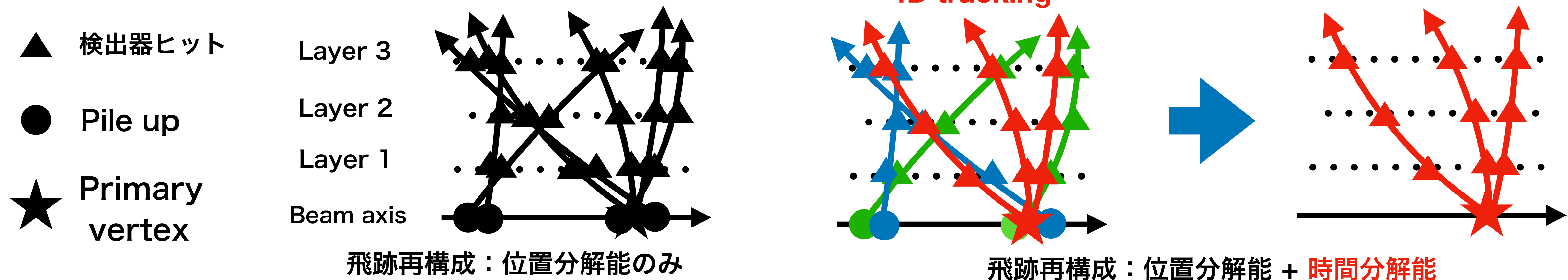
- 将来の高エネルギー衝突型加速器実験：
 - 高輝度化による瞬間ルミノシティの増加
 - 多数の衝突点, 検出器ヒットでも高い飛跡再構成の精度が必要
- 位置分解能と時間分解能による**4次元的な飛跡再構成**が有効



↑ HL-LHC pile up simulation
[\[1\] Exploring the scientific potential of the ATLAS experiment at the High-Luminosity LHC](#)

高輝度LHCにおける要求値

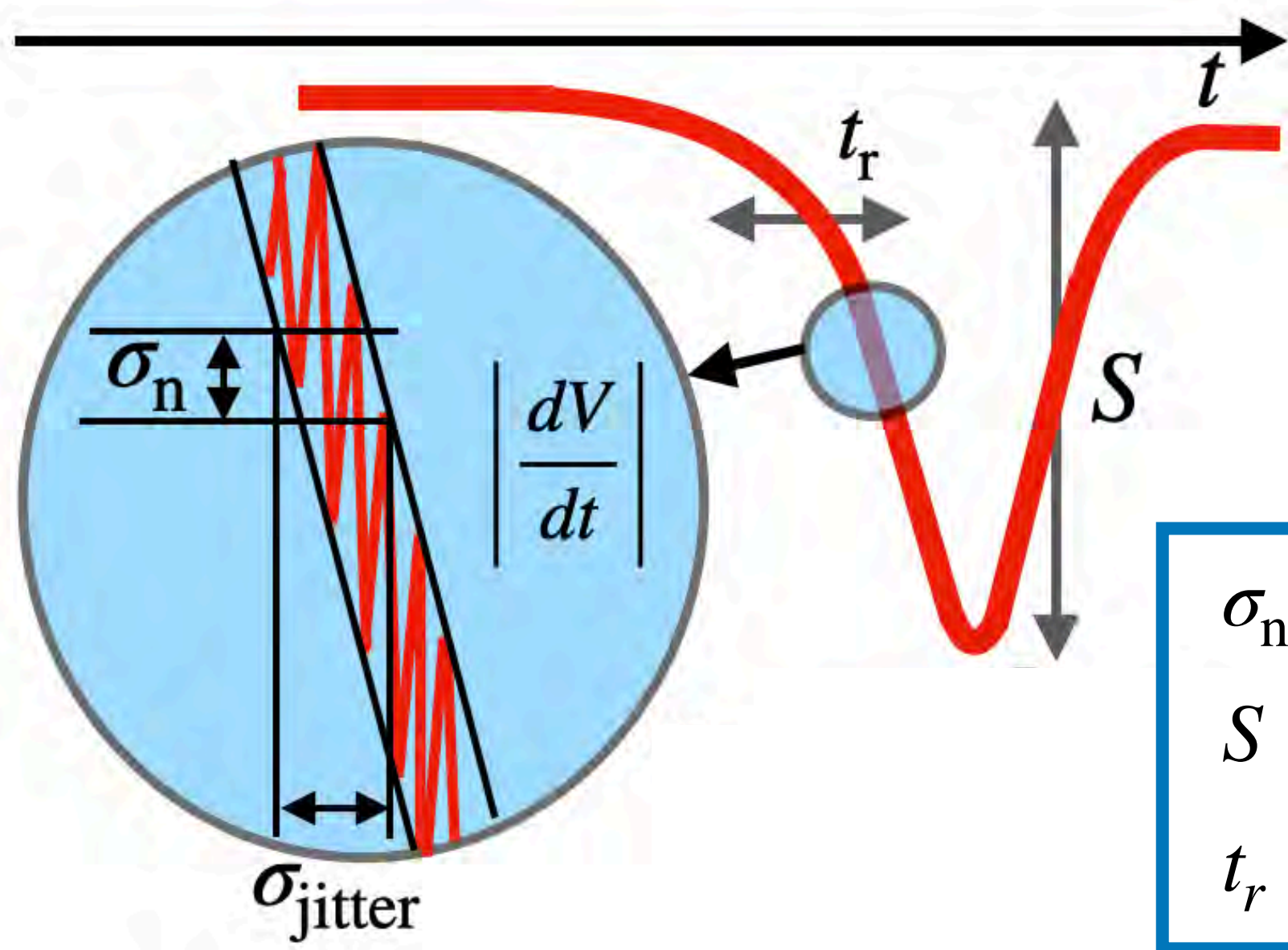
- **~30 ps** の時間分解能 + **O(10 μm)** の位置分解能
 - 高輝度LHC途中の内部飛跡検出器の入れ替えで、AC-LGADのインストールを目指す



Low-Gain Avalanche Diode (LGAD)

時間分解能

- ジッター σ_{jitter} : 読み出し回路由来のノイズによる時間方向の揺らぎ
- ジッターは式で表現可能
→ 信号サイズ大, ノイズ小, 立ち上がりが速い信号であることが重要

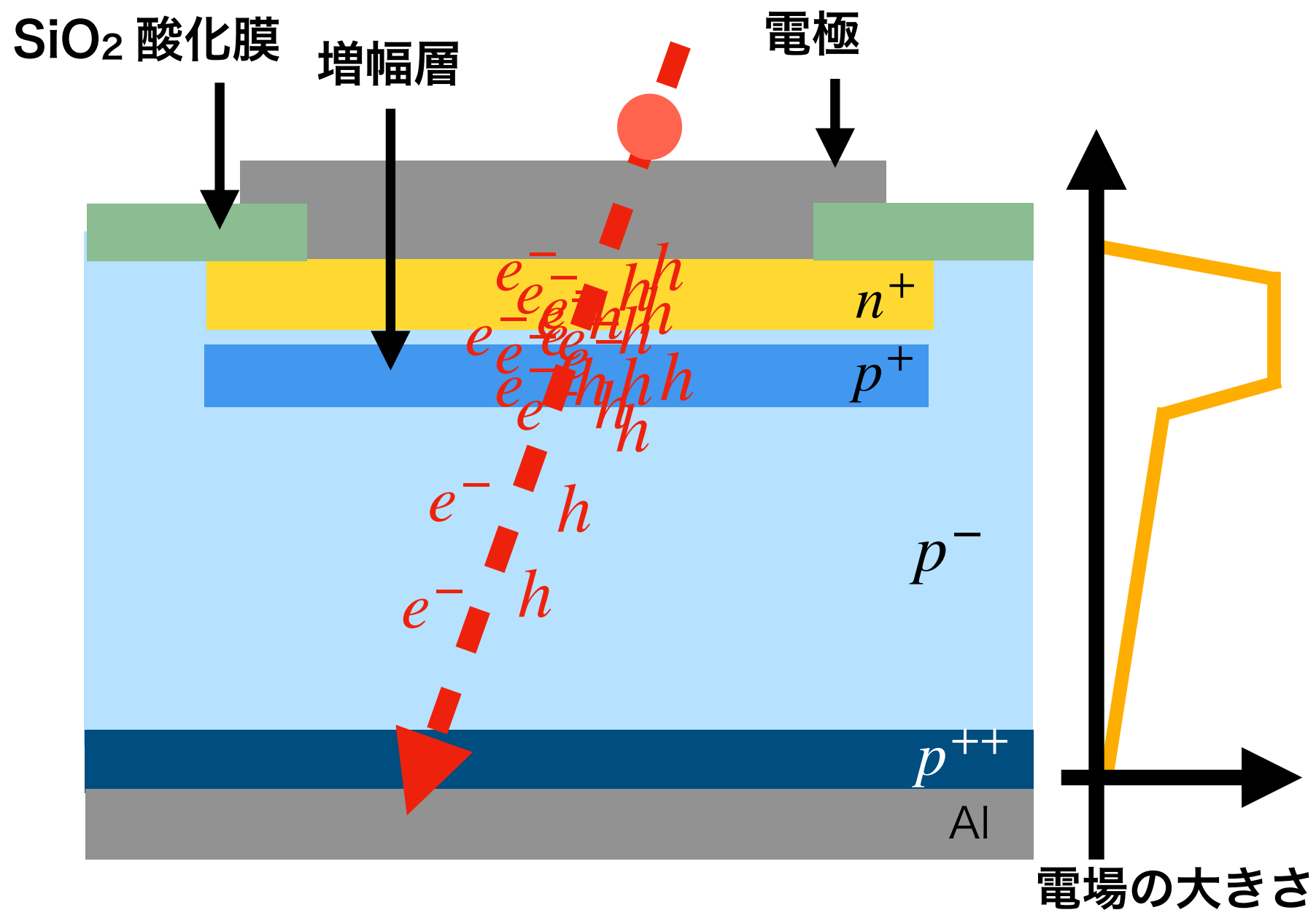


$$\sigma_{\text{jitter}} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{S}{t_r} \right|}$$

σ_{noise} : 読み出し回路由来のノイズ
 S : 信号の大きさ
 t_r : 信号の立ち上がり時間

LGADの利点

- アクセプター濃度の高い増幅層 (p⁺ 層) により局所的な高電場を生み出す
→ 雪崩増幅によって信号サイズ S が大きい
→ 高電場による電子正孔対の加速により立ち上がり時間 t_r が速い

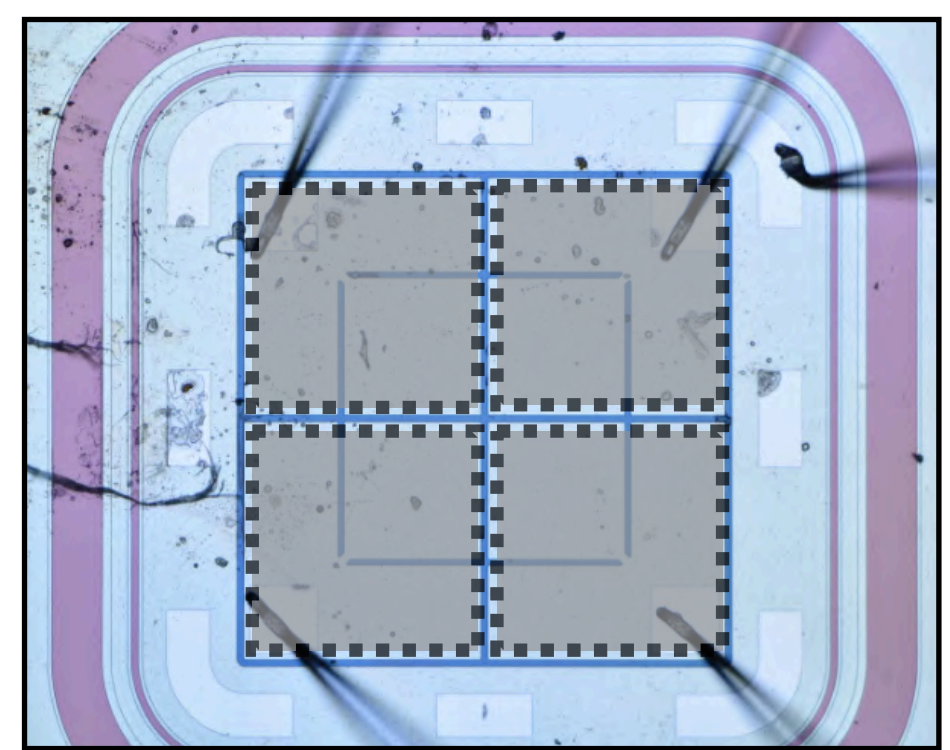


AC-LGAD

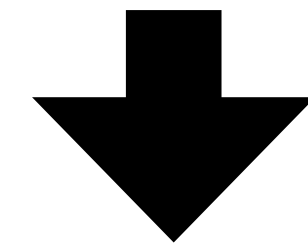
- **AC-LGAD**：静電容量型増幅機能付き半導体検出器
→ 一様に増幅層を設置することにより、不感領域をなくすることができる

AC-LGAD Pixel Sensor

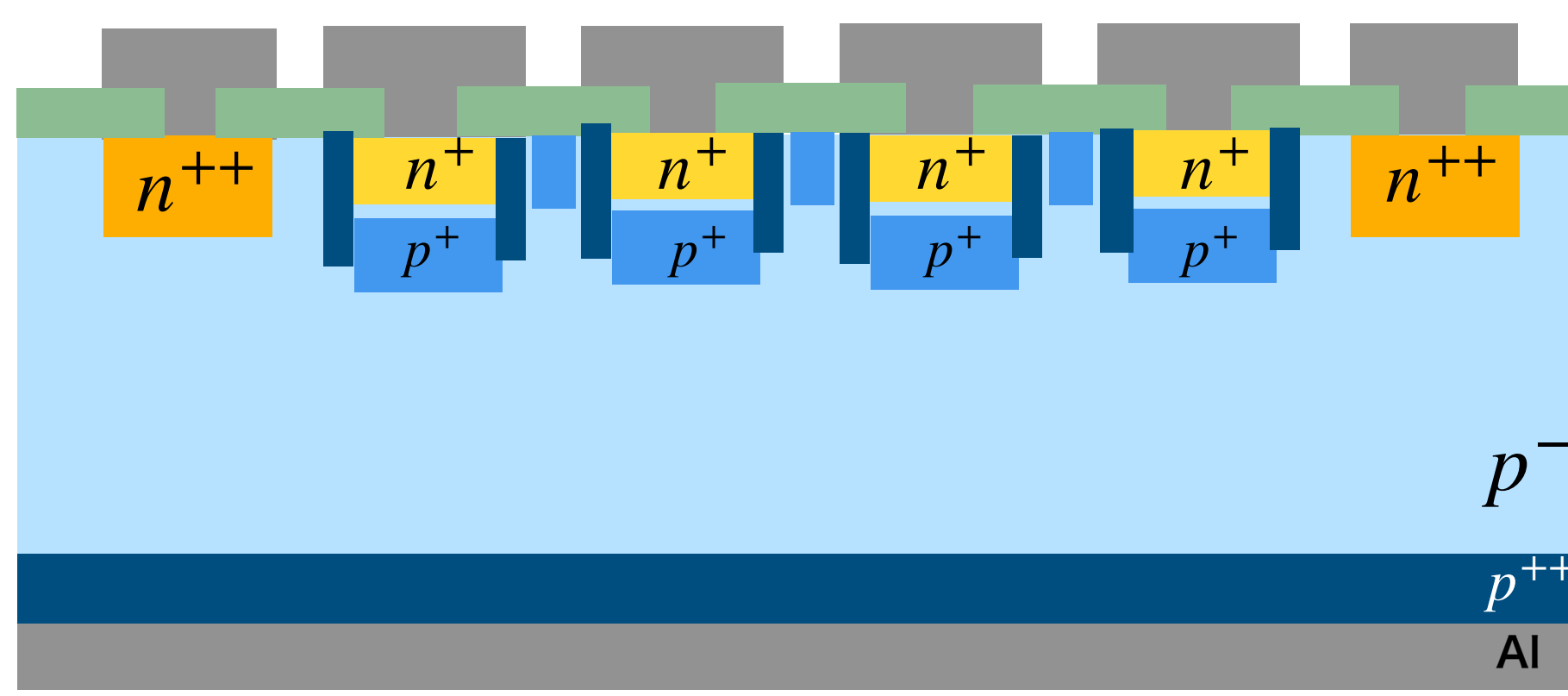
- **AC-LGADpix**：電極サイズを $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ まで細密化したAC-LGAD
- 電極を細密化しても、100%の有感領域と全ての領域で高い時間分解能を実現



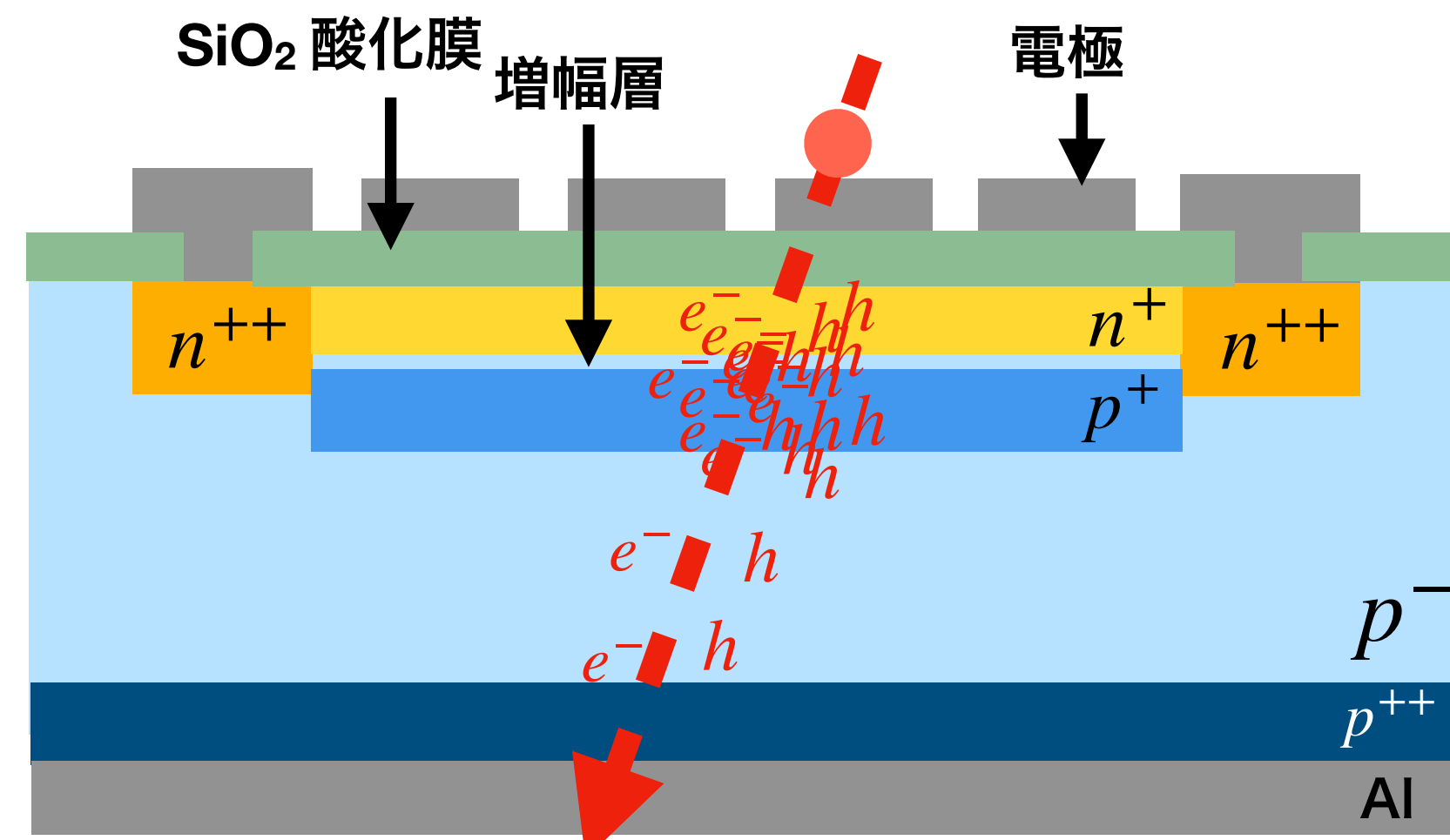
↑ AC-LGAD：電極 500μm ピッチ



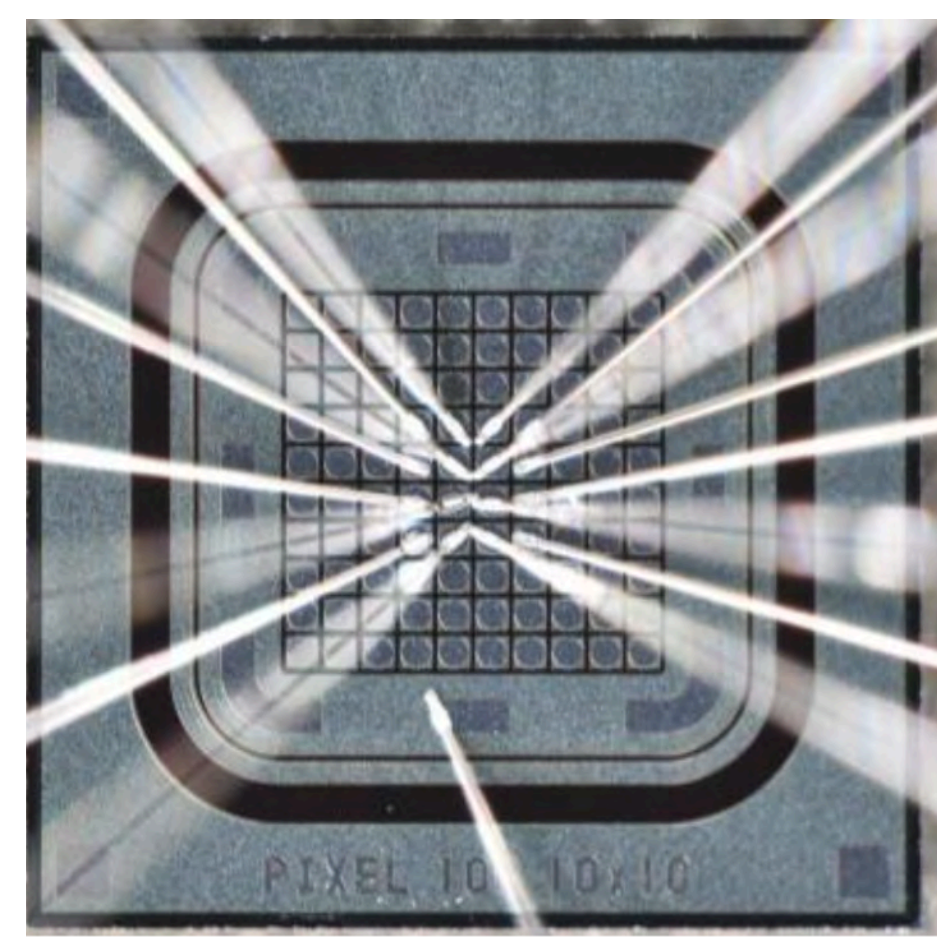
高い位置分解能と時間分解能の両方を兼ね備えた検出器



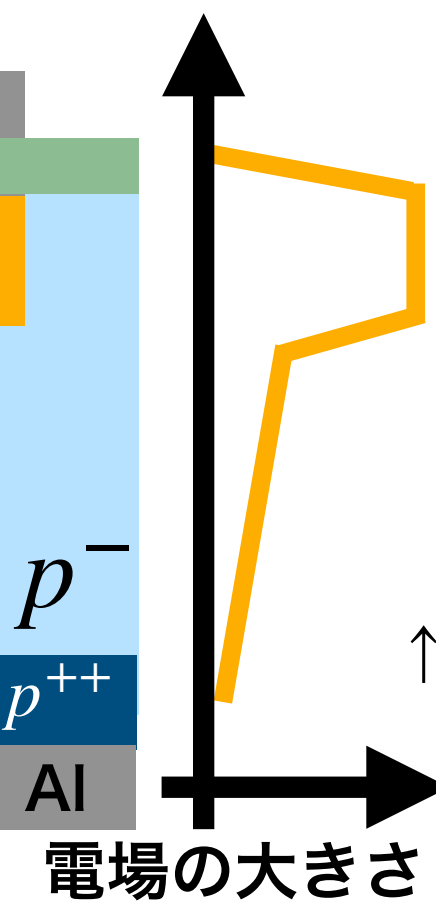
↑ 通常のLGADの構造



↑ AC-LGADの構造



↑ AC-LGADpix：電極 100 μmピッチ



読み出しASICの開発



AC-LGADの読み出しASICへの要求

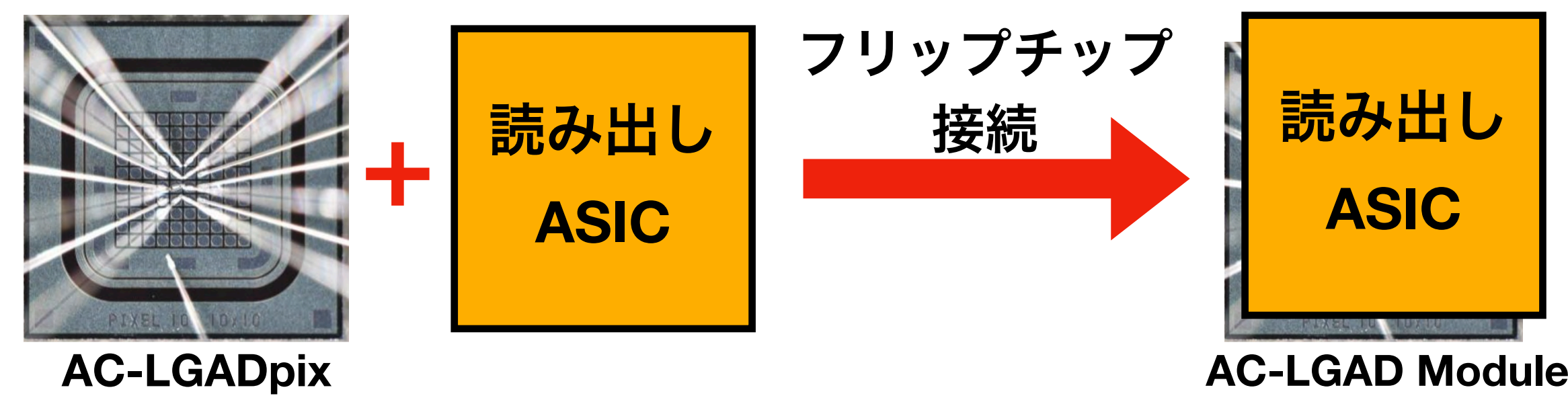
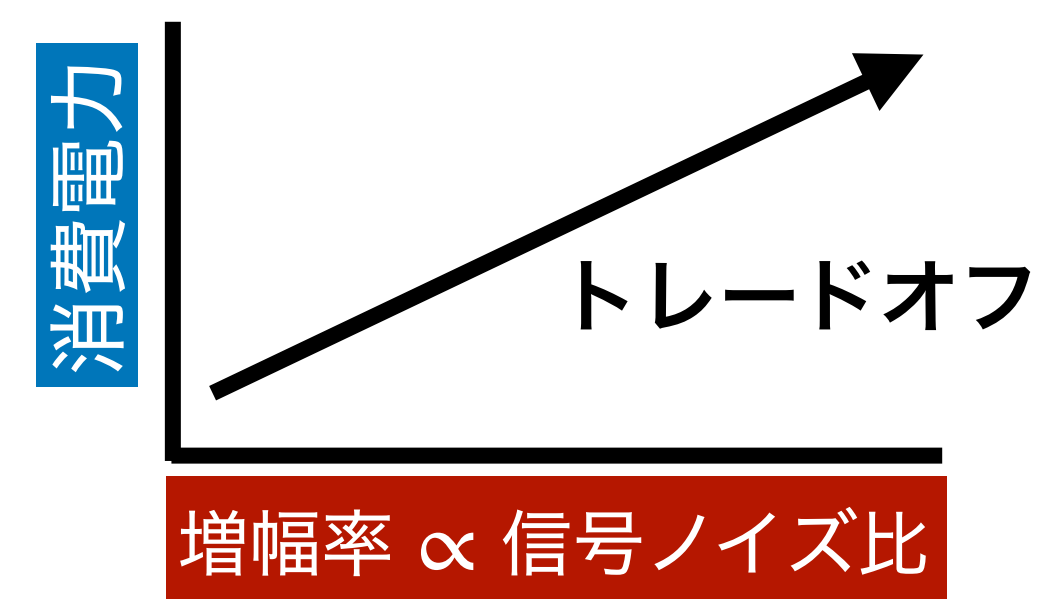
- **低ジッター** = 高い信号ノイズ比：高い時間分解能を得るため
- **低消費電力**：冷却機構の要求上限を超えないため
- **消費電力**と**アンプの増幅率**を考慮して回路構造を開発する必要がある

ASICへの要求

- ▶ 入力電荷 2-50 fC
- ▶ 検出器容量 6-10 fF
- ▶ 消費電力 <100 μ W/ch
 - ・ Preamp < 10 μ W/ch
- ▶ ジッター < 10 ps
- ▶ TDC << 30 ps
- ▶ Time walk 補正

本研究の目的

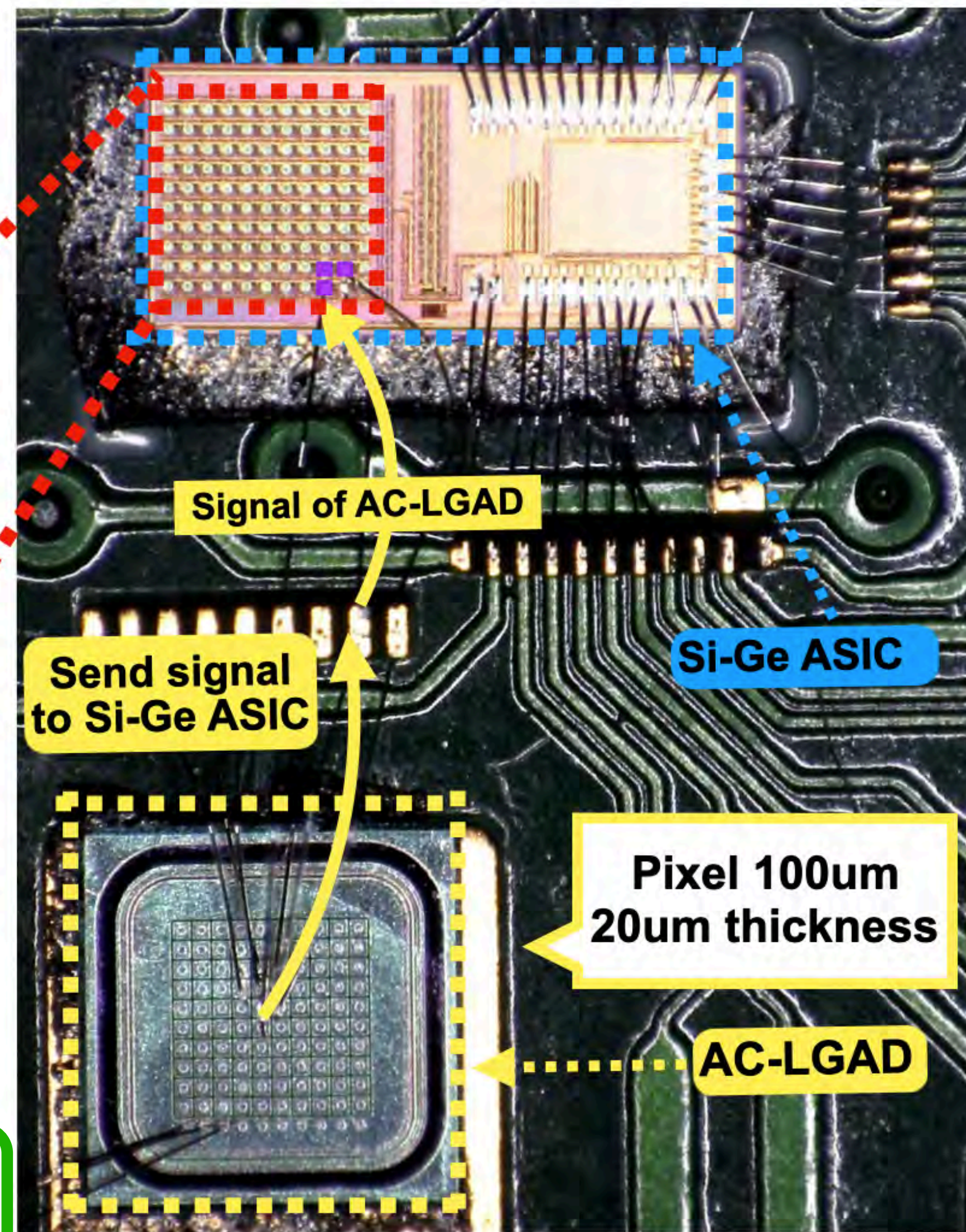
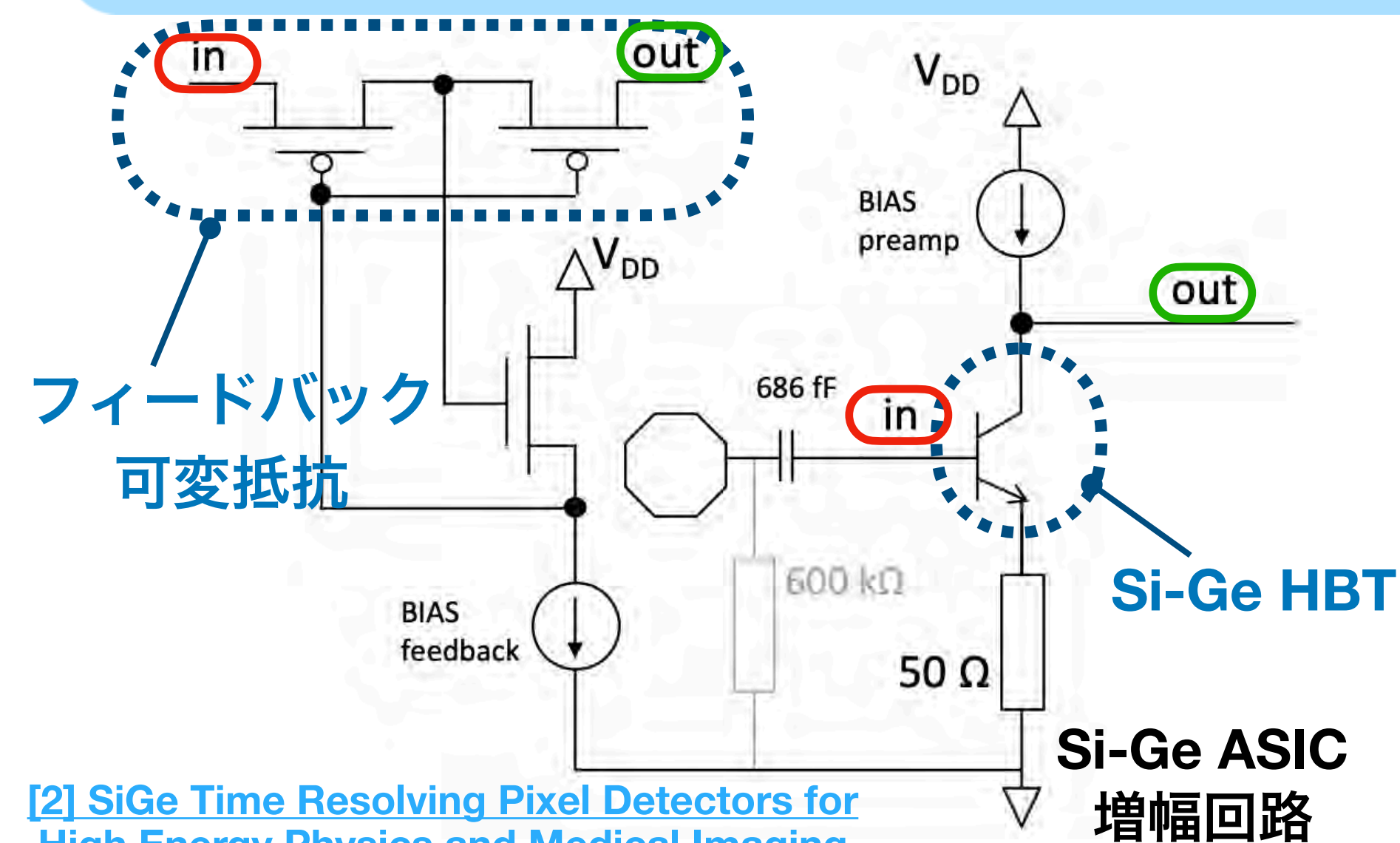
- ➔ AC-LGADの信号を30 psの時間分解能かつ低消費電力で読みだすことができるASICの開発
- ➔ Si-Ge BJT ASICとCMOS ASICの性能評価を通して、最適なプロセスを決定する



Si-Ge ASIC

Si-Ge ASIC の特徴

- Si-Ge (シリコン-ゲルマニウム) を用いた読み出しASIC
→ 入力電荷をフィードバック抵抗で電圧の変換する増幅回路
- Si-GeのHBT：高い増幅率と速い読み出しが特徴
- ASICの入力電極は $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ の電極が 10×10 の100 個存在
- Si-Ge ASICの性能評価では、アナログ回路の信号を出力できる3ch分の信号を用いて行う。



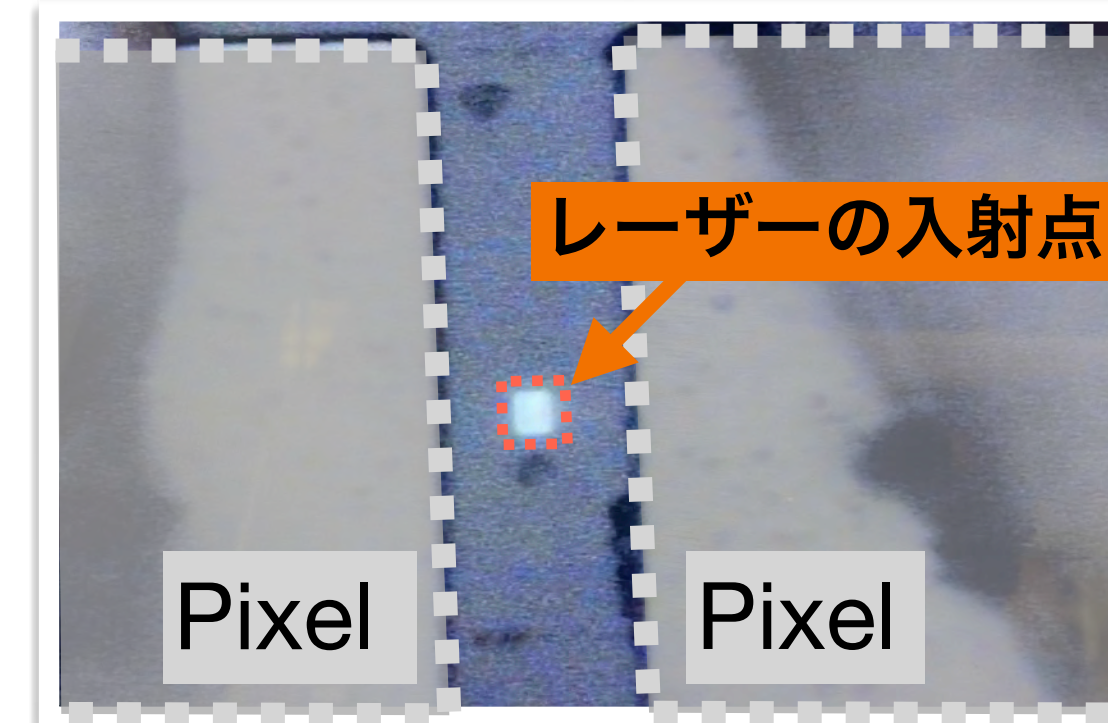
↑ Si-Ge ASICとAC-LGADpixの接続の様子

[2] SiGe Time Resolving Pixel Detectors for High Energy Physics and Medical Imaging

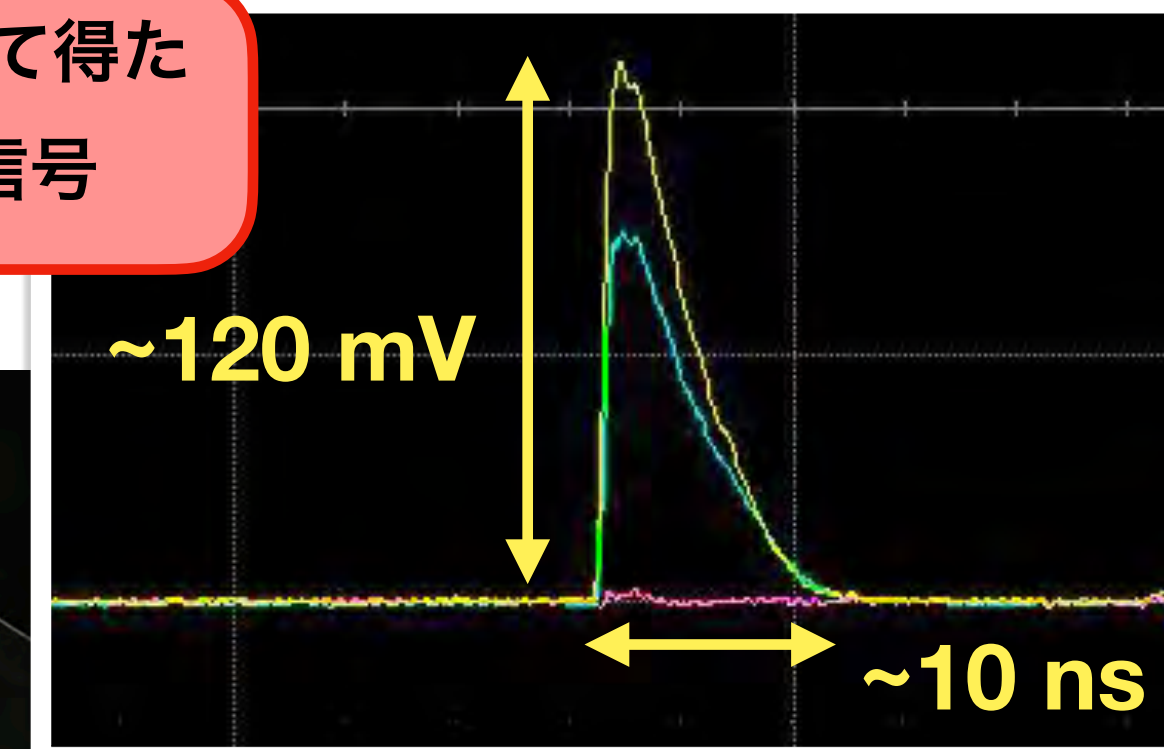
測定セットアップと解析方法

レーザーのセットアップ

- 赤外線パルスレーザー : 波長 1064 nm
- レーザーの焦点を **2 μm** まで絞ることが可能
→ Pixel電極の間にレーザーを入射できる

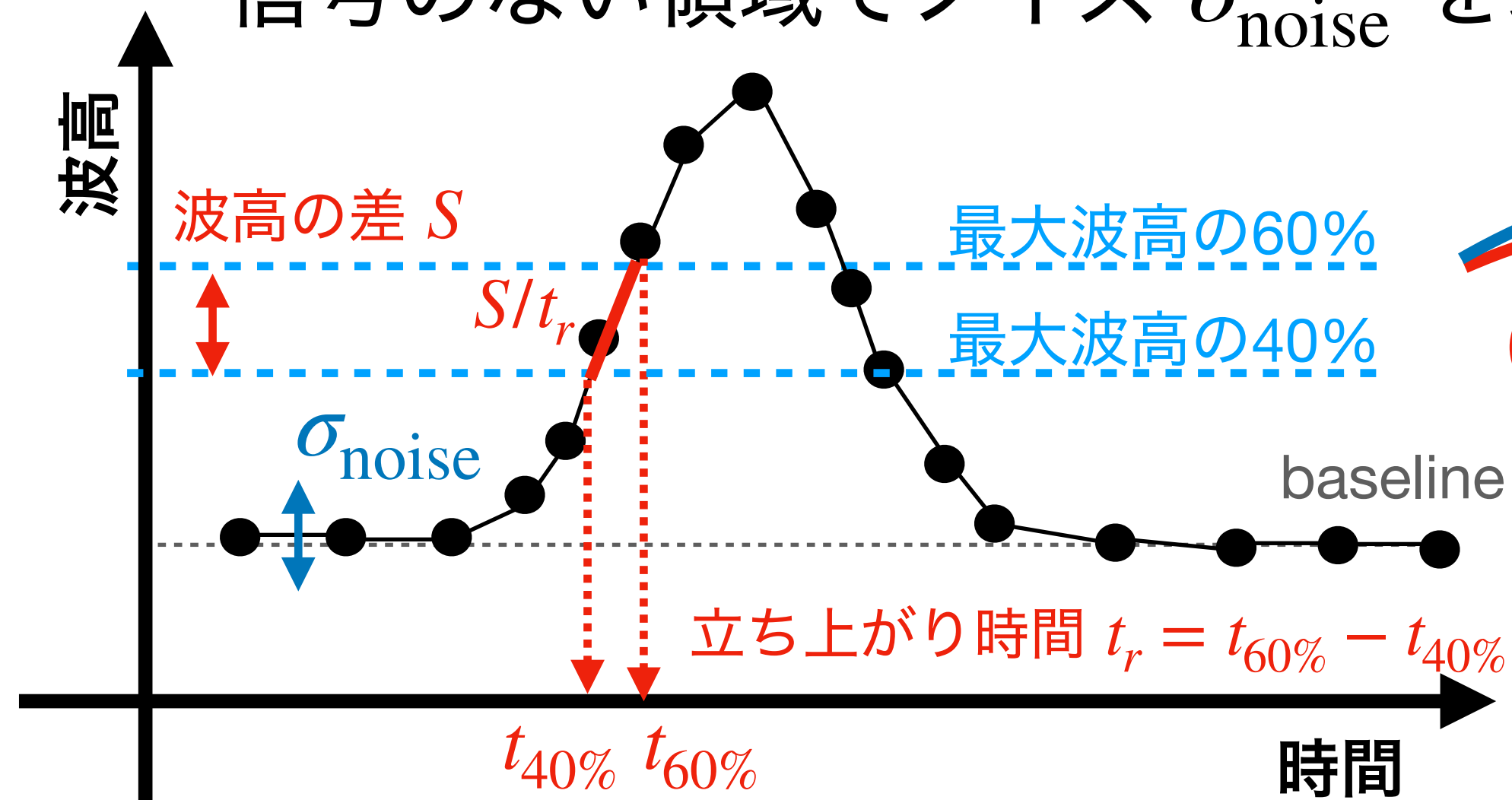


IRレーザーを使って得た
Si-Ge ASICの信号



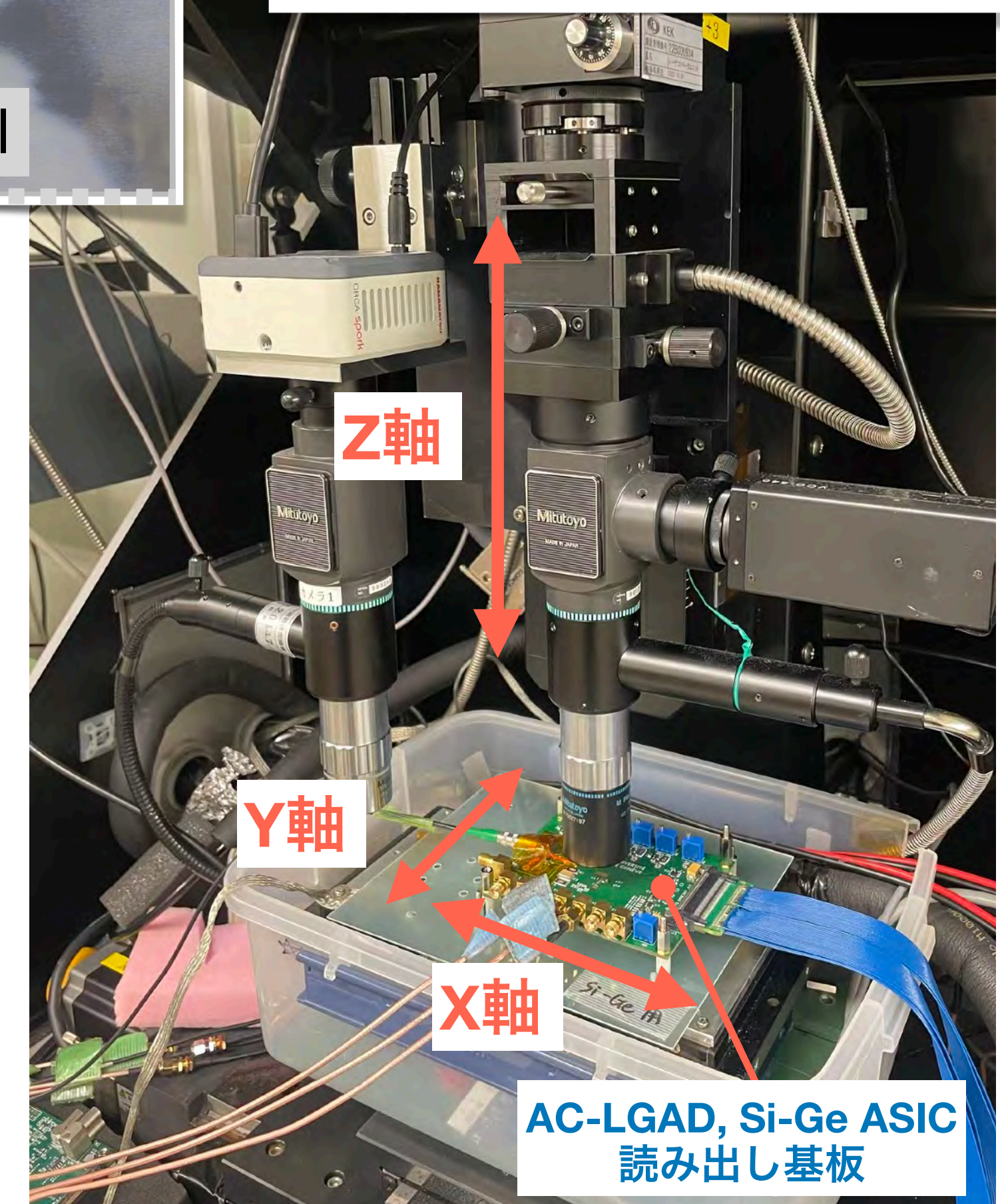
ジッターの解析方法

- 信号波形から、波高の40%から60%の時の信号の傾き S/t_r と、
信号のない領域でノイズ σ_{noise} を求めてジッターを計算する



ジッターを計算

$$\sigma_{\text{jitter}} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{S}{t_r} \right|}$$

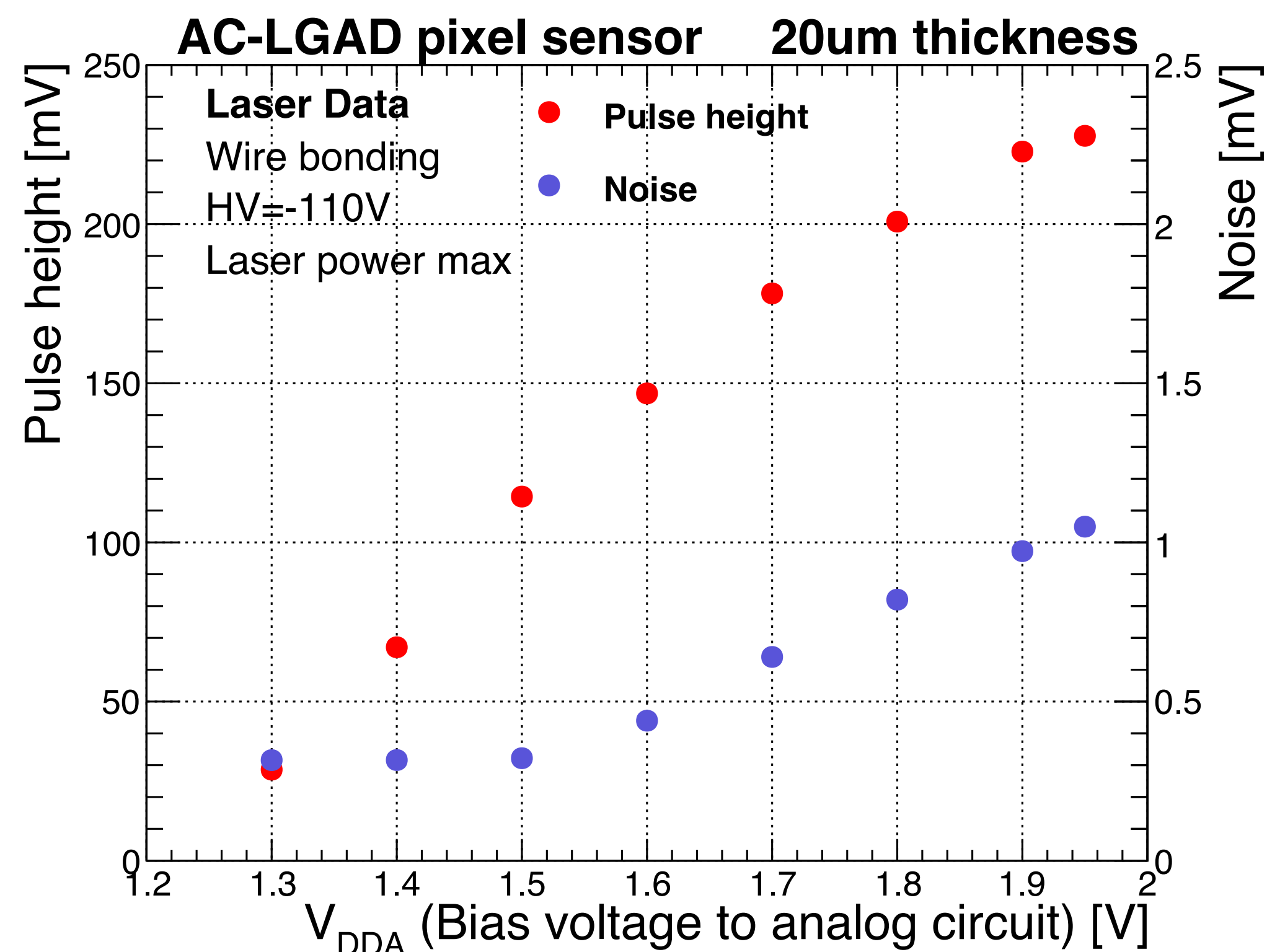


↑ レーザーのセットアップ

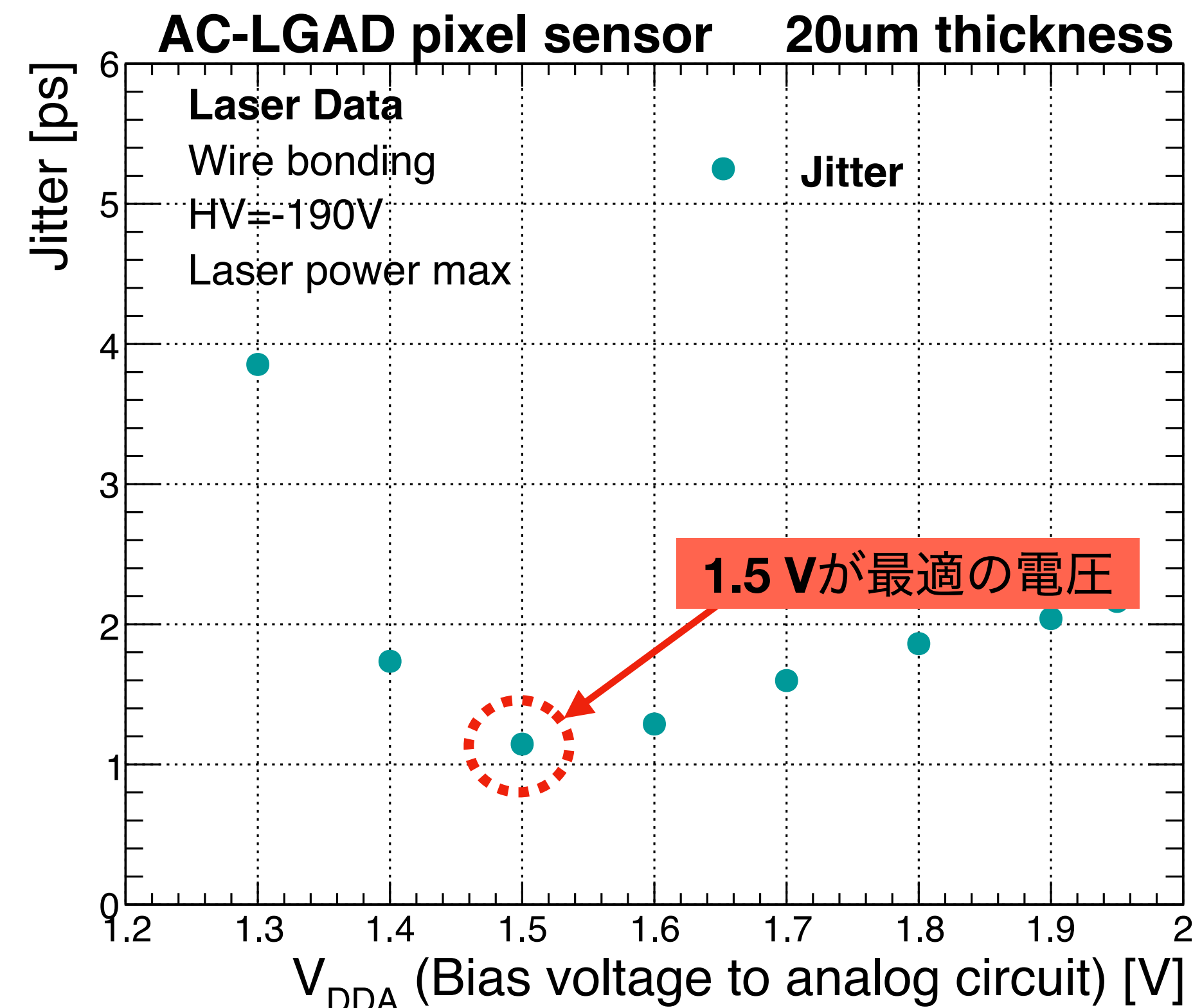
レーザー測定の結果

最適な V_{DDA} の測定

- レーザー強度を最大にして測定
- V_{DDA} が上昇するに伴って波高とノイズも増加→最小のノイズは **~ 0.3 mV**
- ジッターが最も小さい時の電圧を最適な V_{DDA} とすると **1.5 V**



↑ 信号の大きさとノイズの V_{DDA} 依存性



↑ 消費電力とジッターの V_{DDA} 依存性

1 MIP相当のレーザー測定

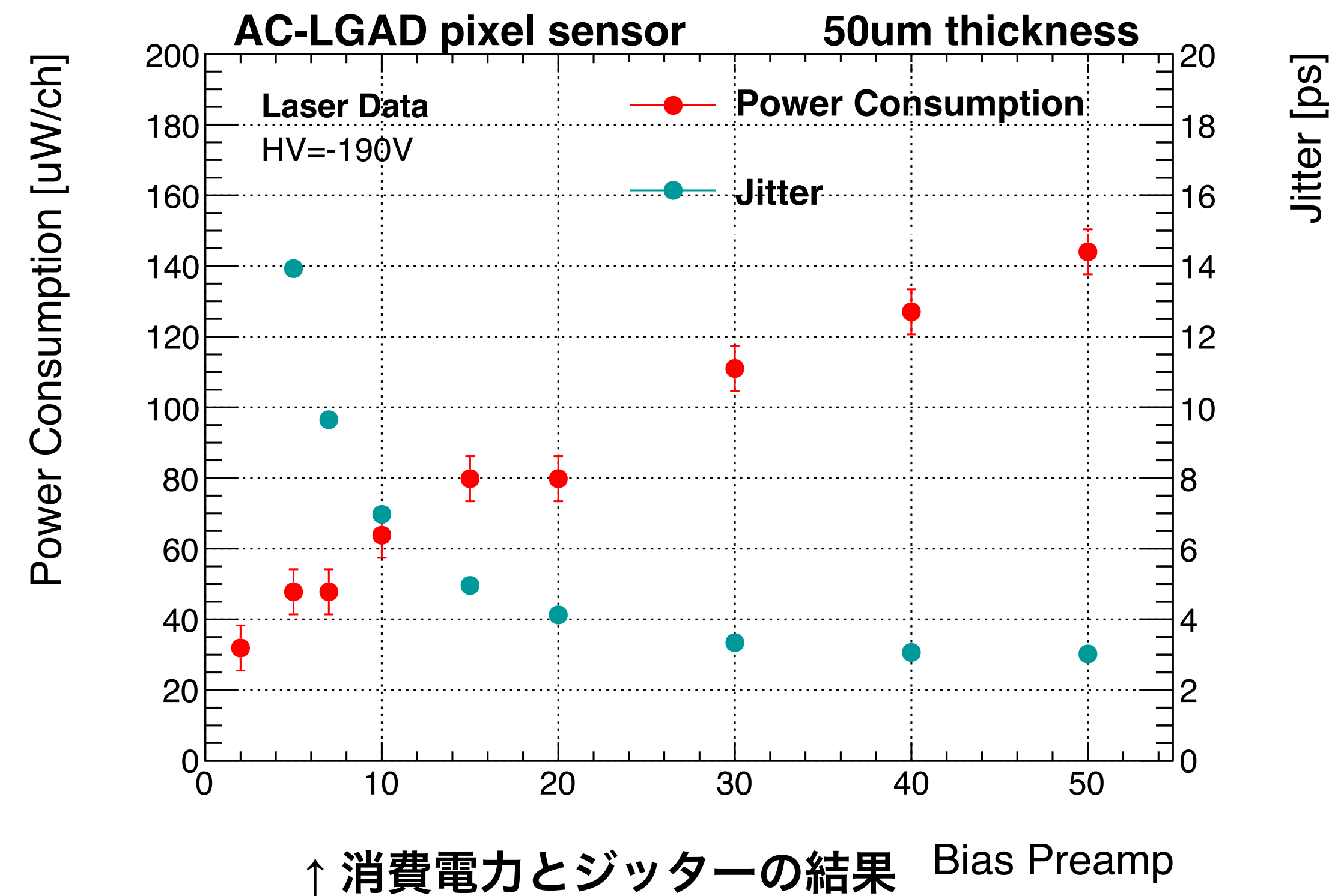
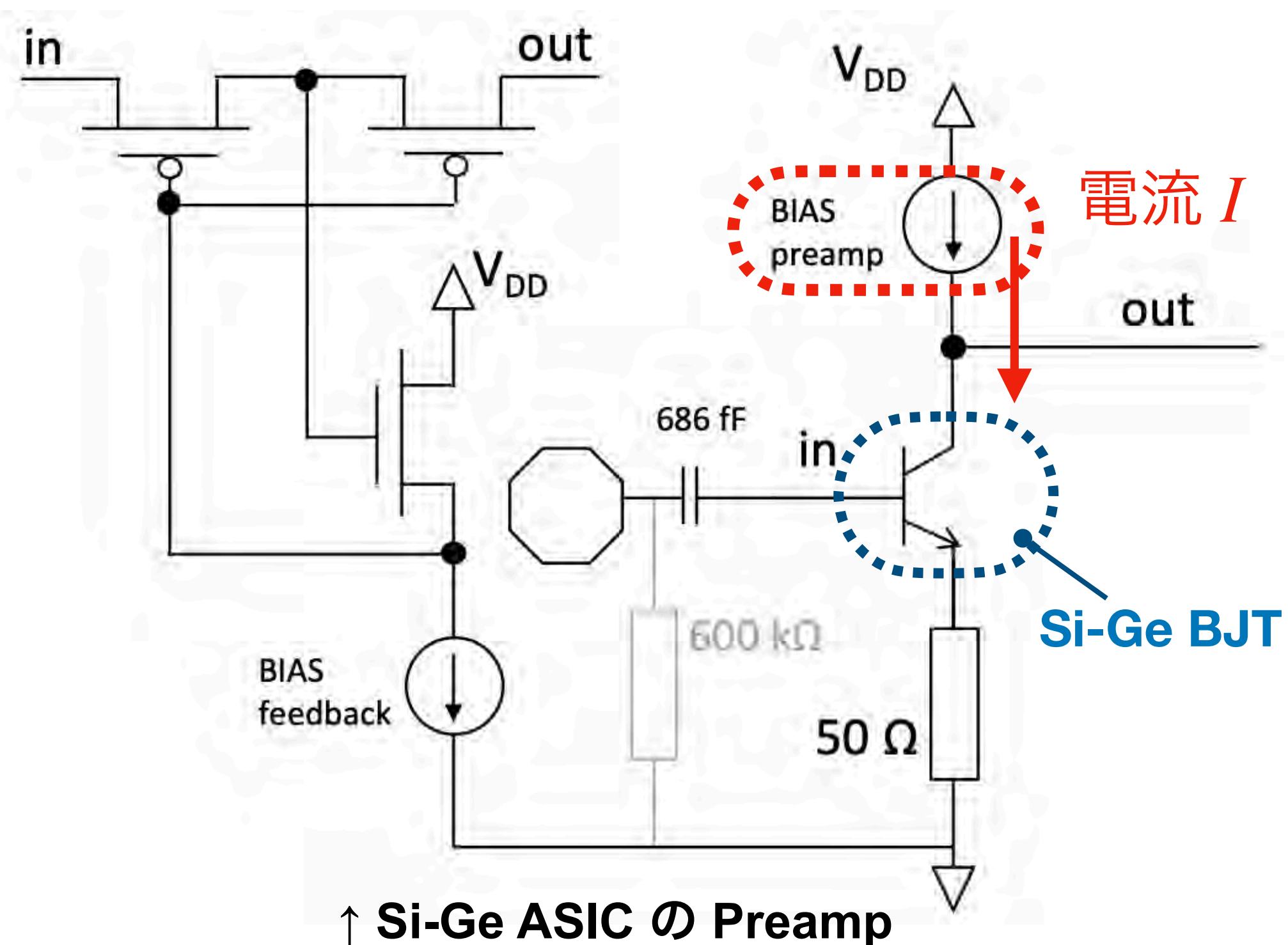
消費電力vsジッター

- MIP相当のレーザー強度でジッターの消費電力依存性を測定
- Si-Ge BJTへ流す電流を変えることで、消費電力を調節することができる。
- Si-Ge ASICの最高性能：ジッター 3.02 ps, 消費電力 $144 \pm 6 \mu\text{W}/\text{ch}$

消費電力を抑えた時の性能：ジッター 9.65 ps, 消費電力 $47.8 \pm 6 \mu\text{W}/\text{ch}$

ASICへの要求

- ▶ 消費電力 $< 100 \mu\text{W}/\text{ch}$
 - ・ Preamplifier $< 10 \mu\text{W}/\text{ch}$
- ▶ ジッター $< 10 \text{ ps}$



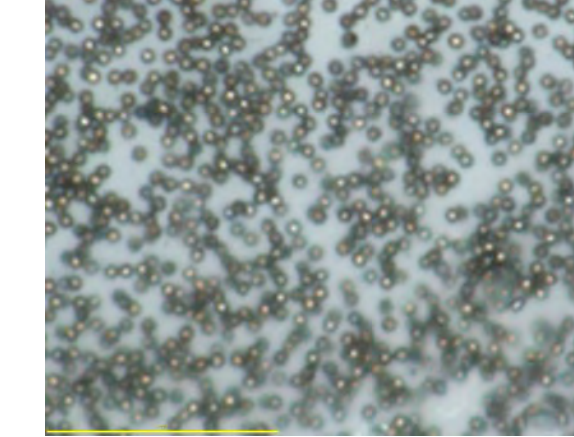
フリップチップ接続

ACFを用いたフリップチップ

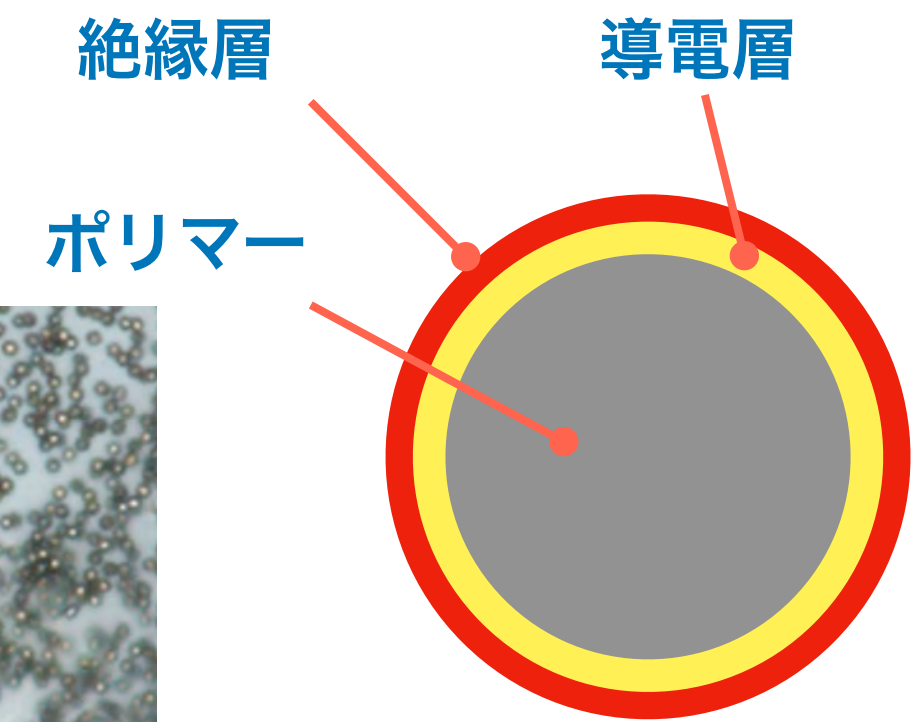
- **ACF** (異方導電性フィルム) を用いて、AC-LGADとSi-Ge ASICをフリップチップ
- ACFに含まれる粒子はポリマーを導電層と絶縁層でコーティングした構造
- 電極上にACF粒子を潰すためのバンプを形成
- バンプでACF粒子を潰すことで潰された領域のみ接続



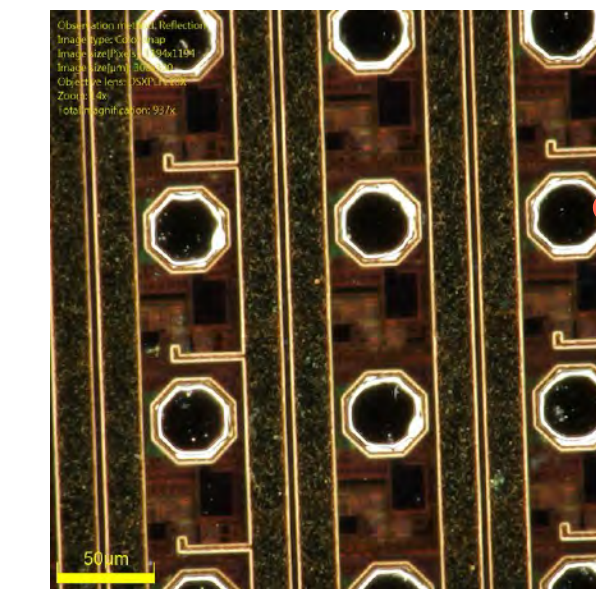
↑ ACF



↑ ACFの拡大図



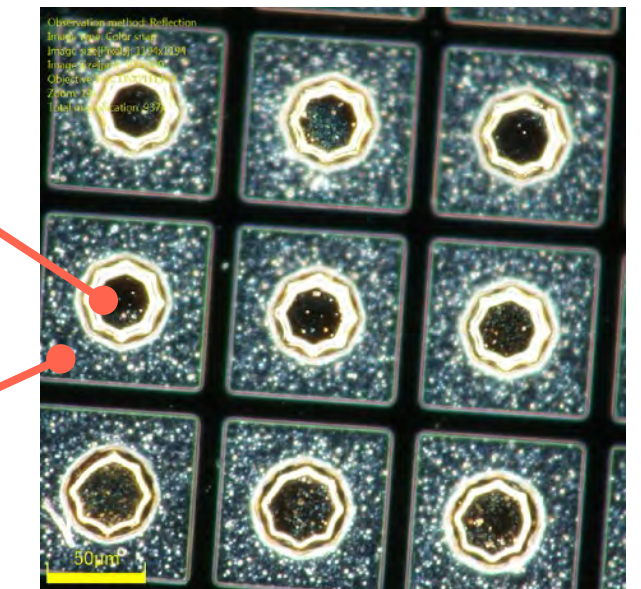
↑ ACF粒子の断面図



↑ Si-Ge ASIC と AC-LGAD の電極上のバンプ

バンプ

電極

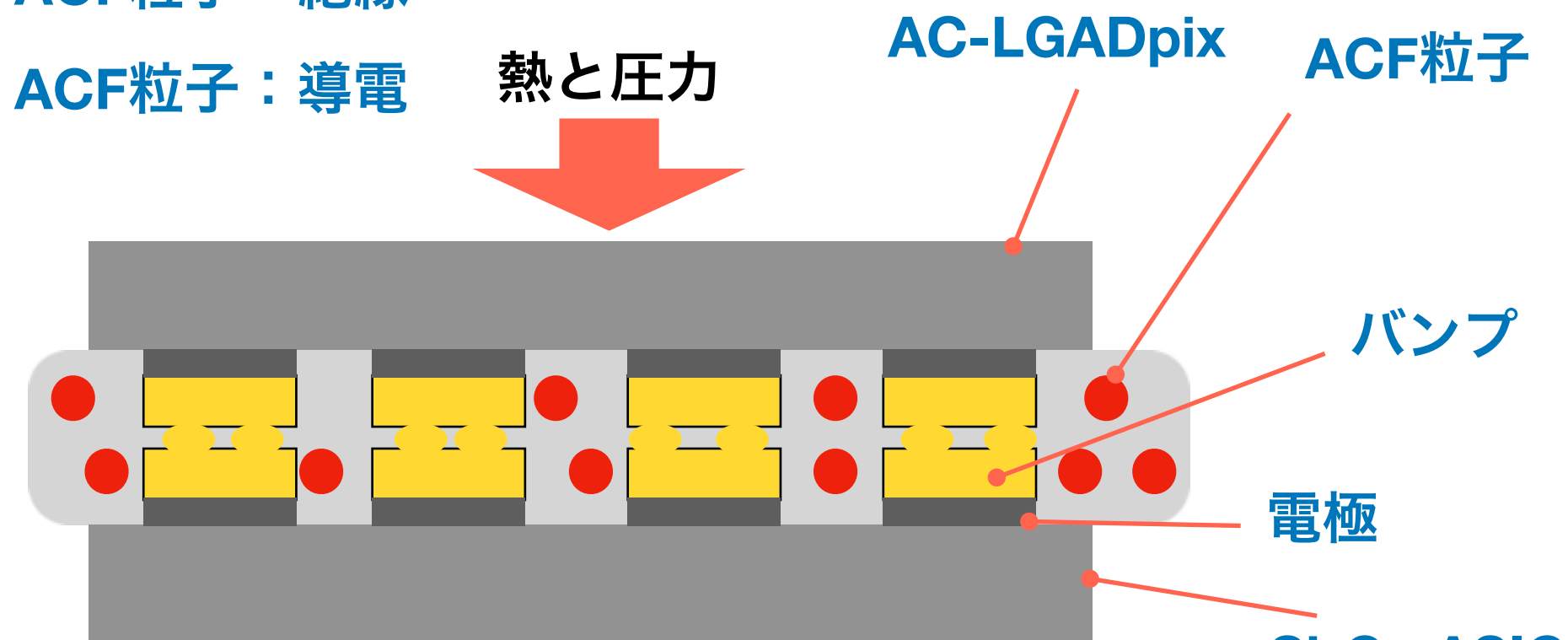


↑ フリップチップボンダー
(ACCμRA 100)

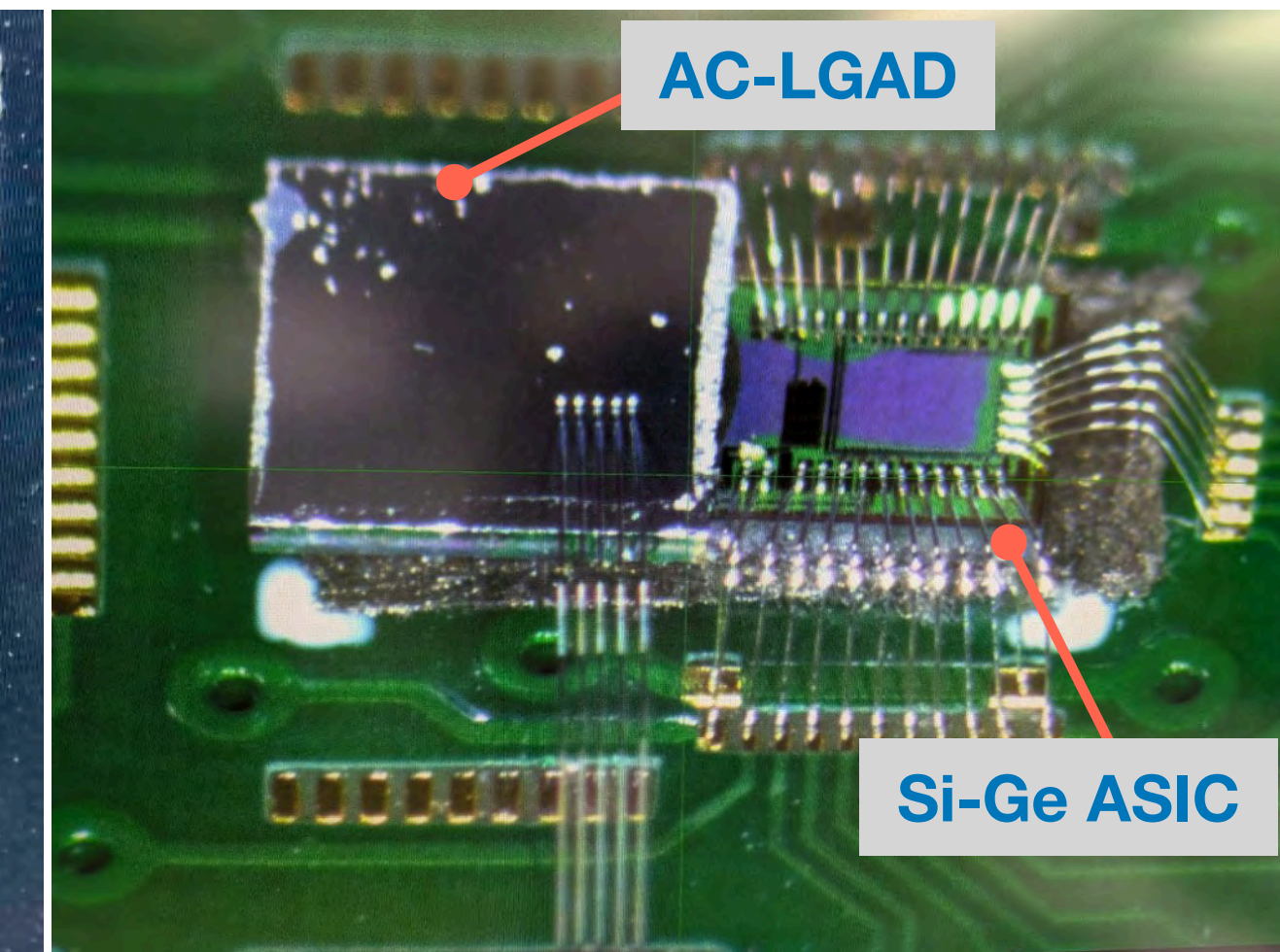
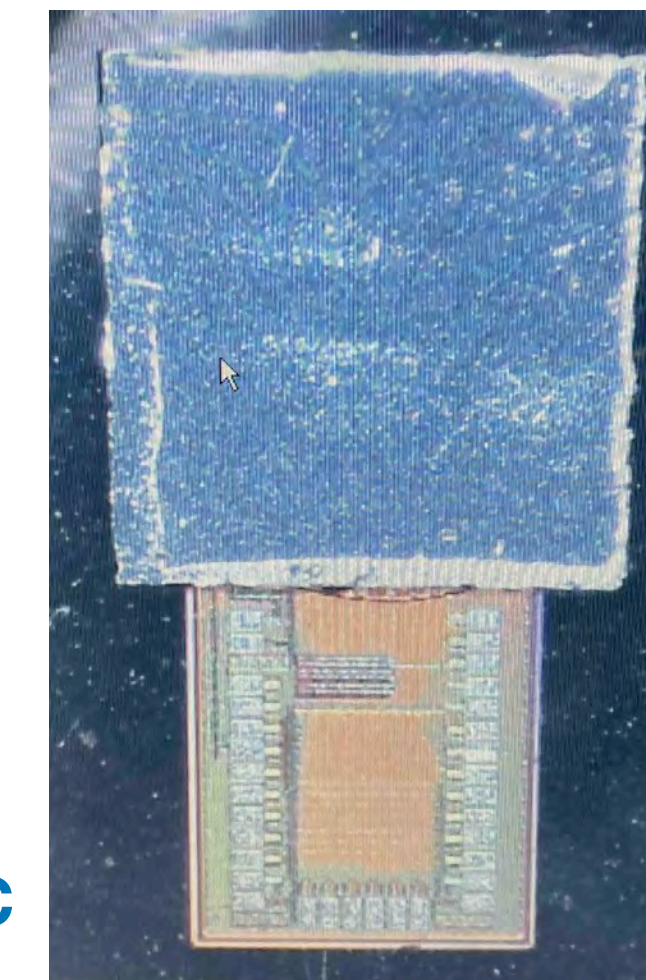
● ACF粒子：絶縁

● ACF粒子：導電

熱と圧力



↑ フリップチップ後



ベータ線測定の設定アップと解析方法

測定セットアップ

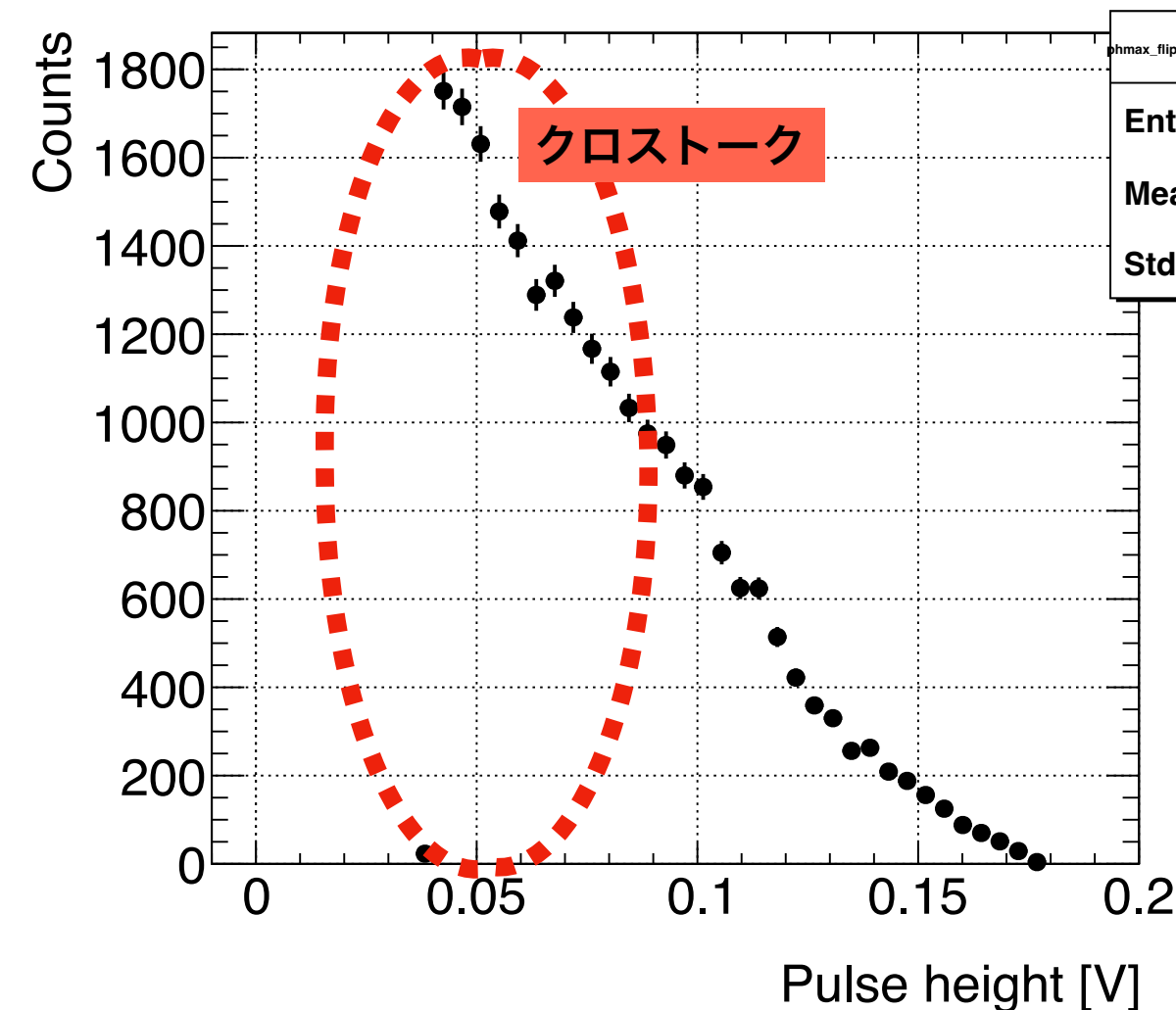
- ベータ線：ストロンチウム90, セルフトリガーで測定

解析方法

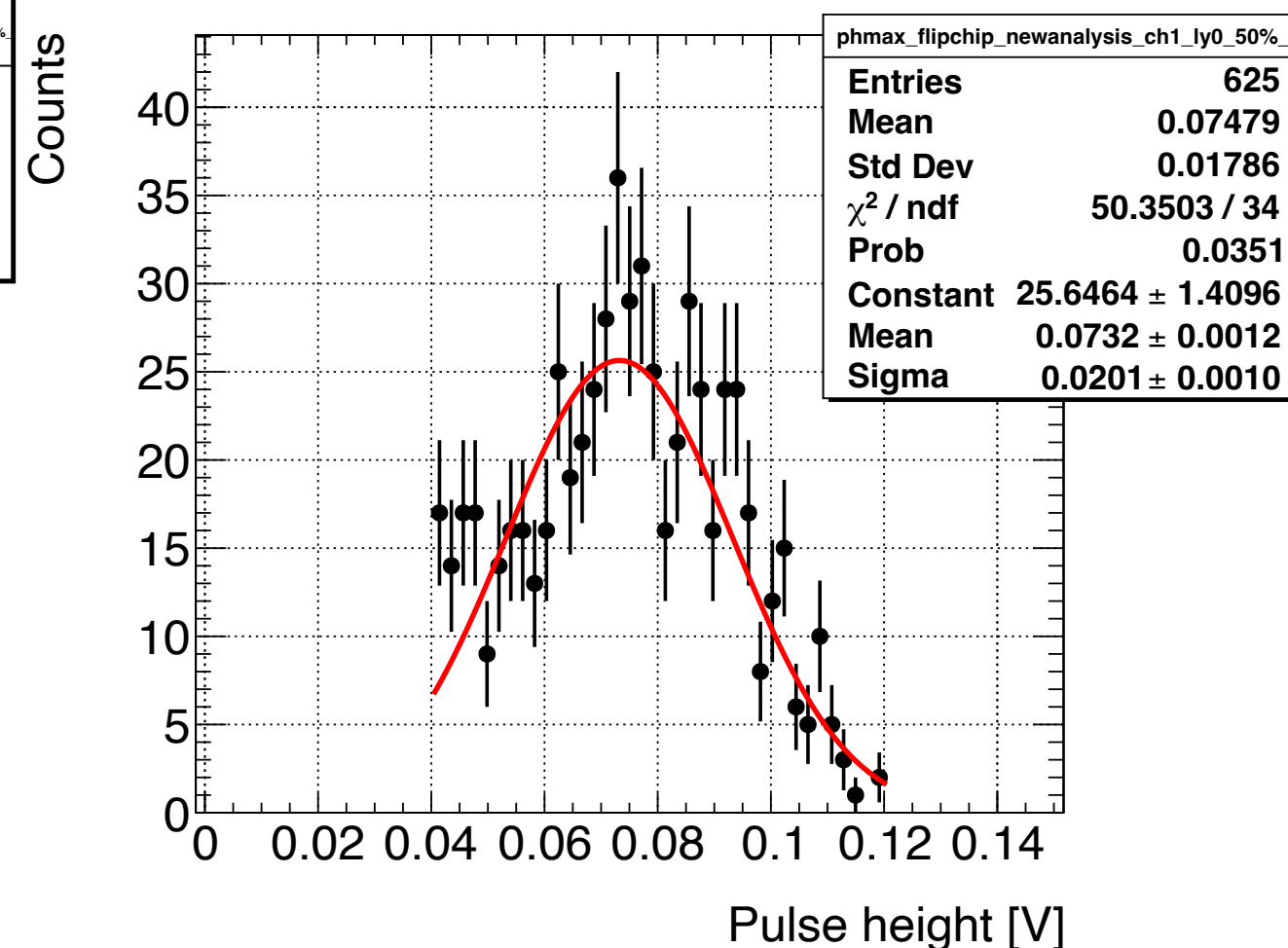
- 波高を求めるために隣のチャンネルとの波高比でクロストークを除去

$$\frac{Ph_{ch2}}{Ph_{ch1}} < 50\%, \frac{Ph_{ch3}}{Ph_{ch1}} < 50\%$$

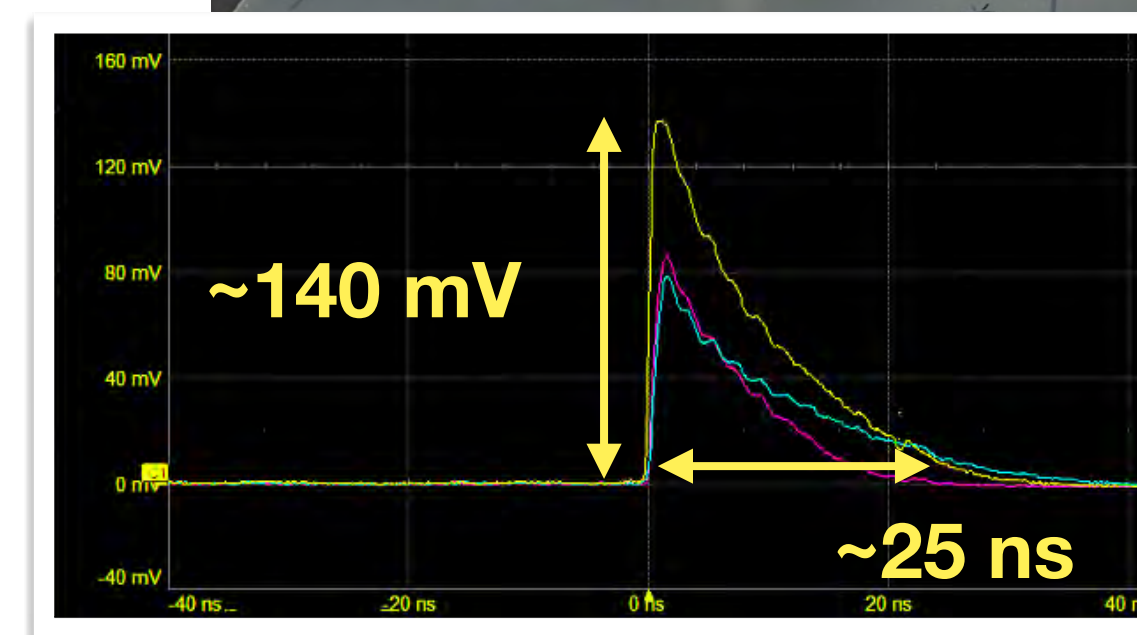
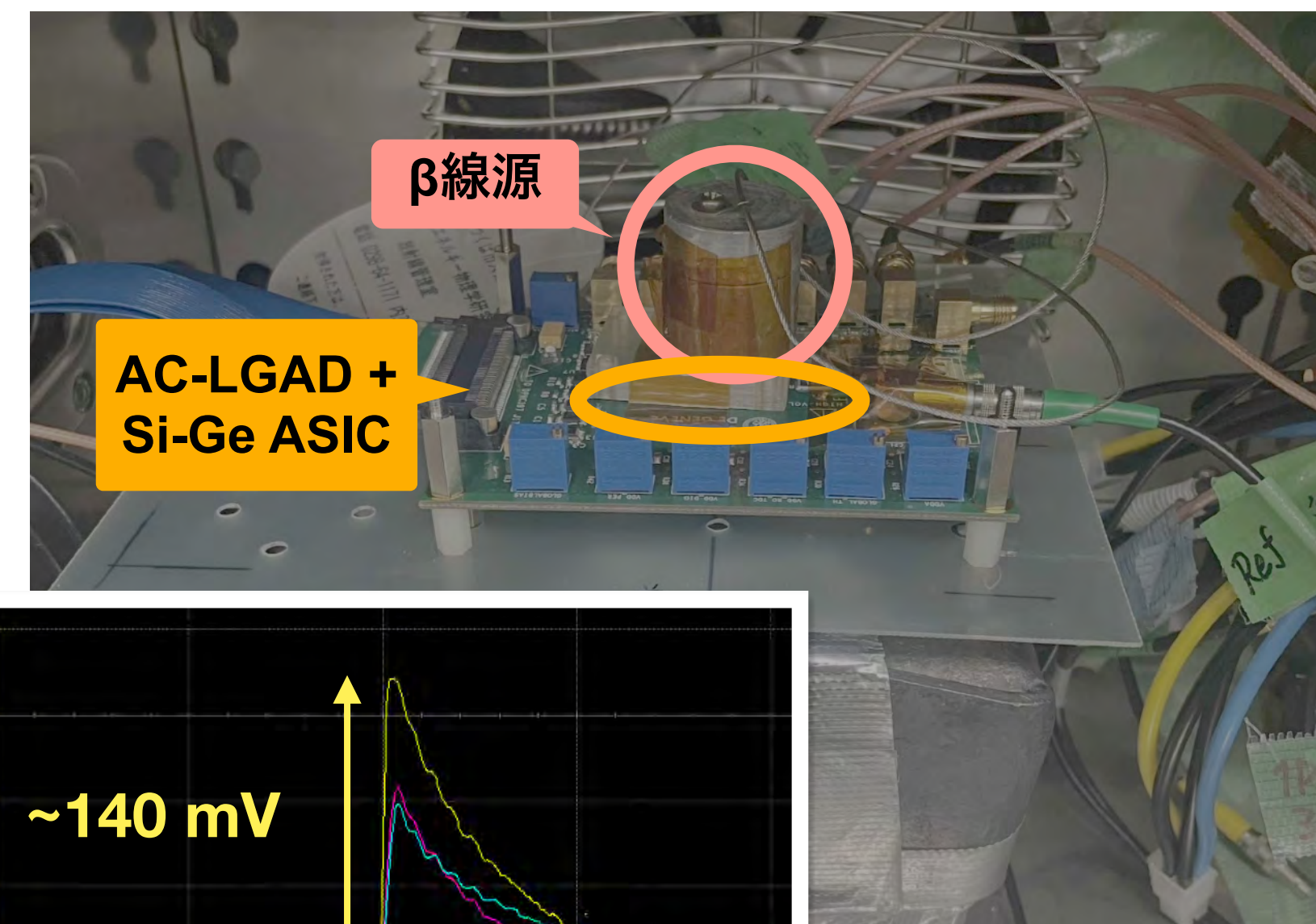
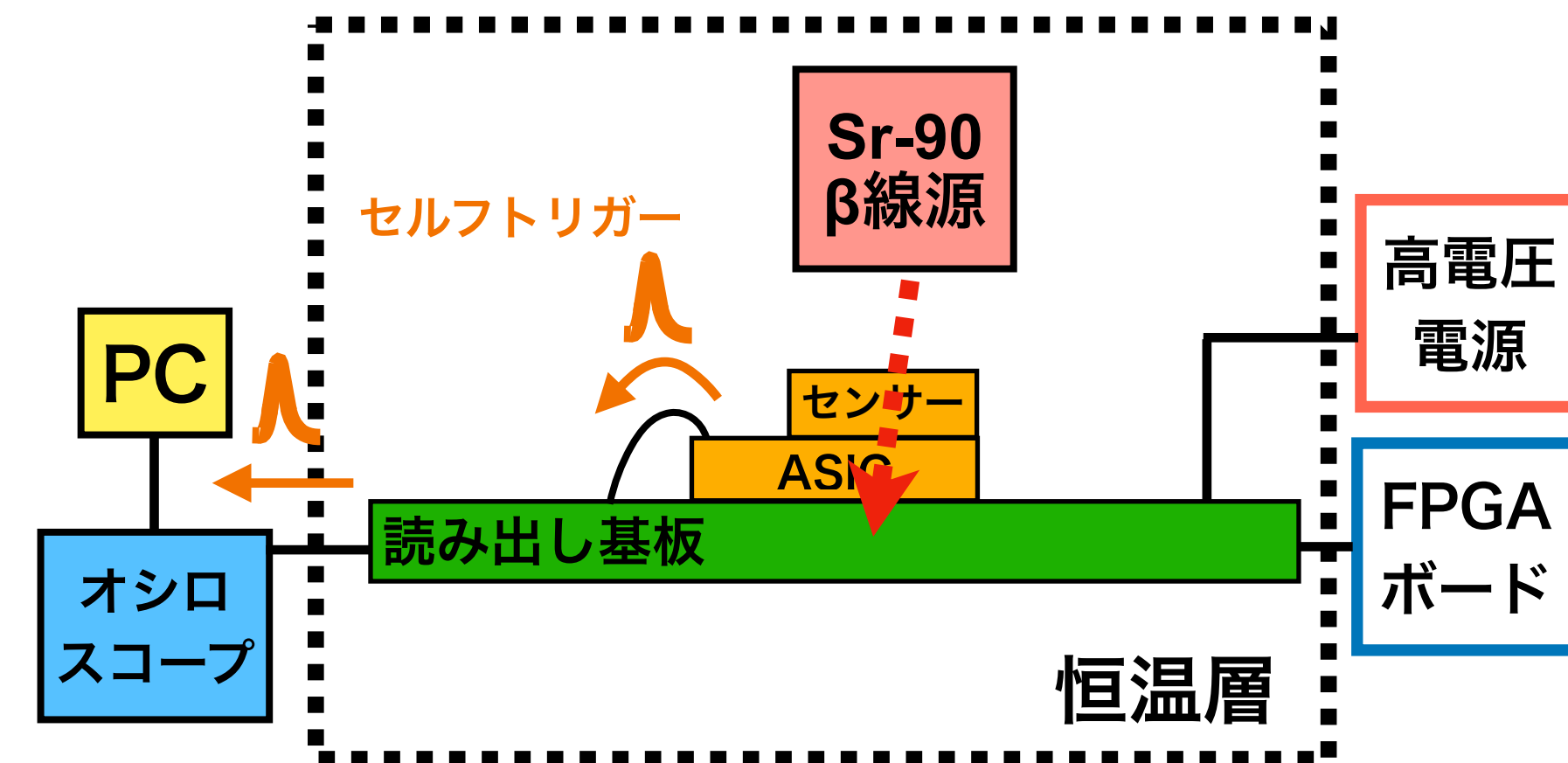
ch1にヒットした場合
ch1が最も波高が高い



↑ 波高比カットなしの波高分布



↑ 波高比カット50%の波高分布

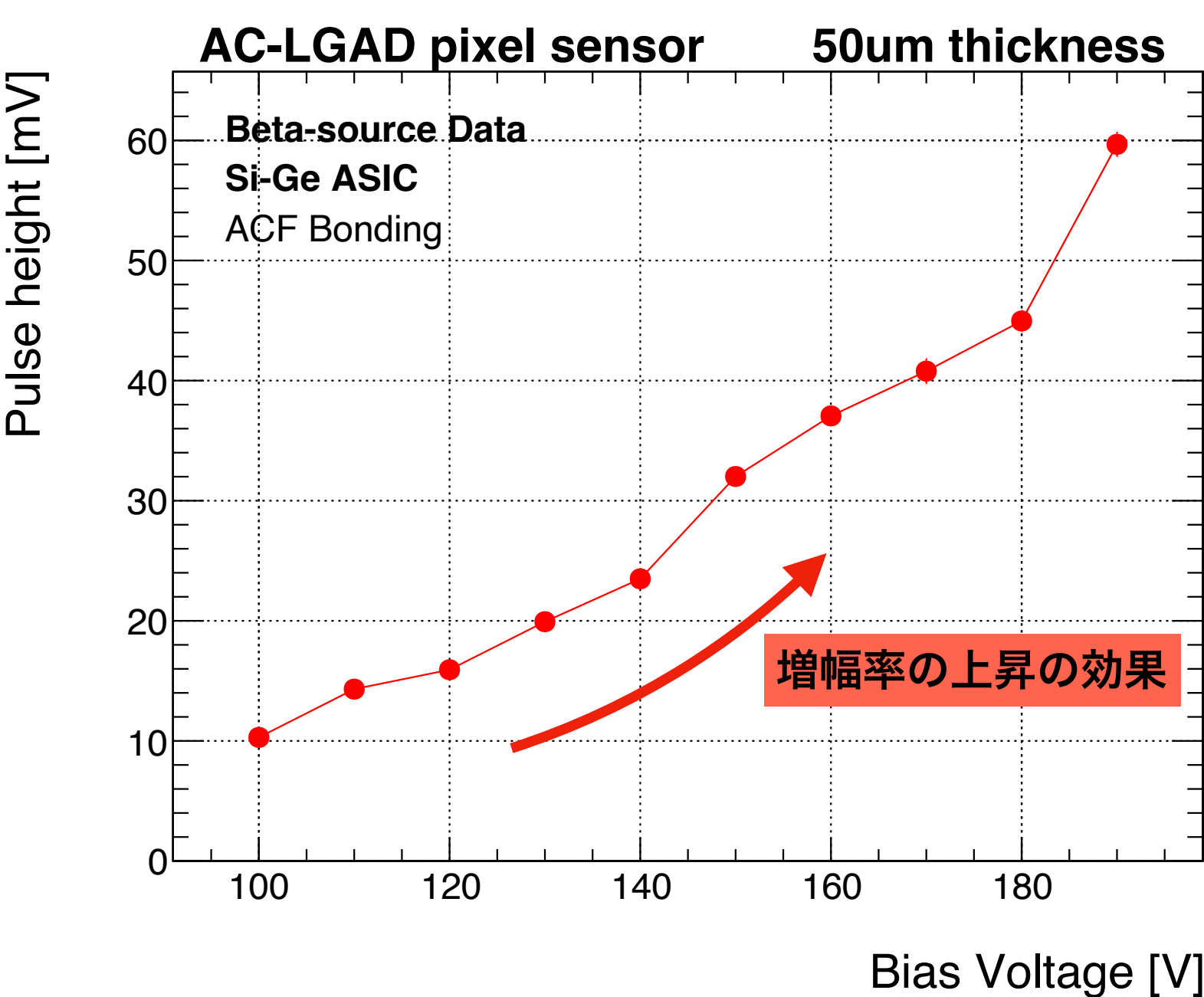
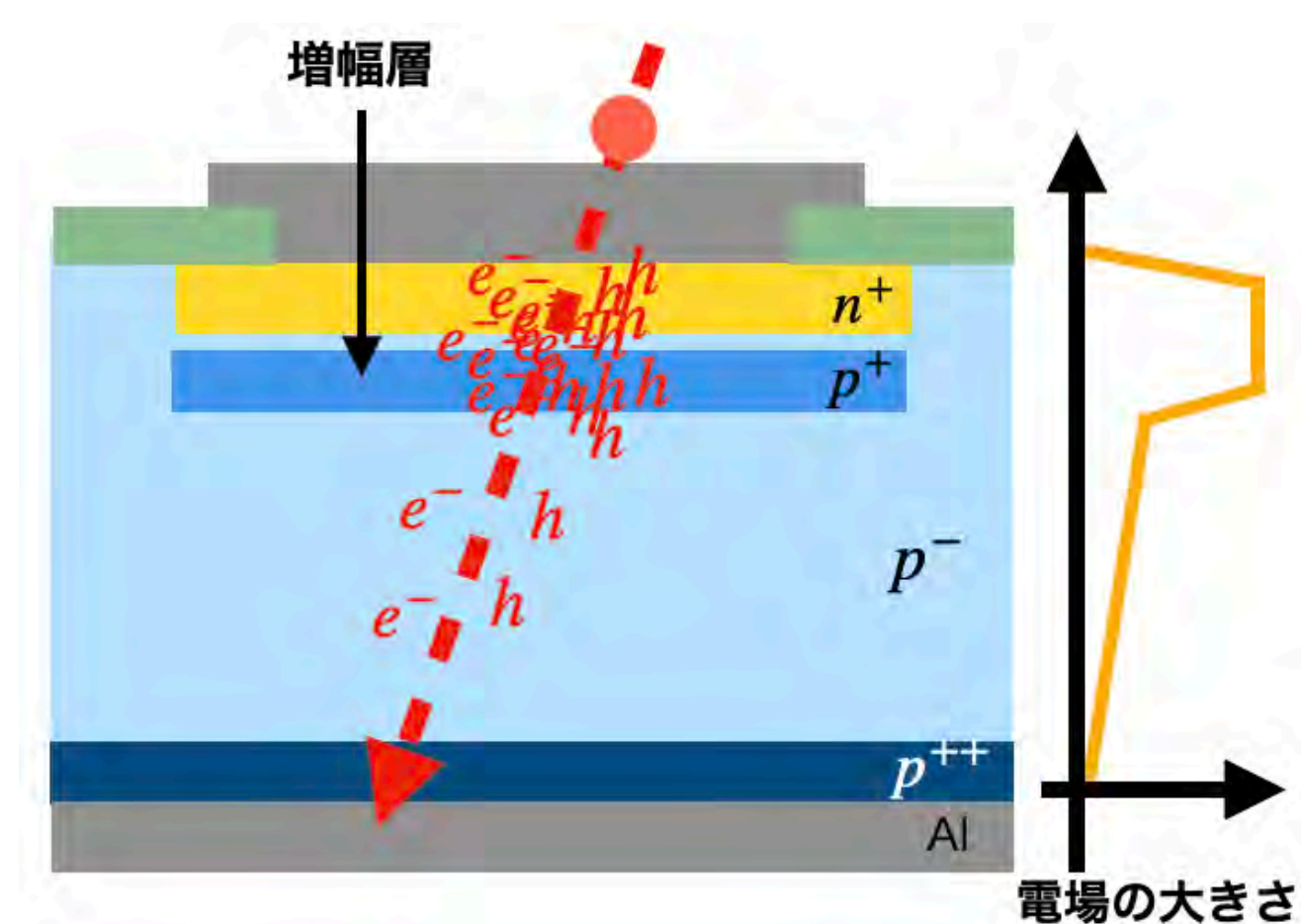


↑ ベータ線セットアップ

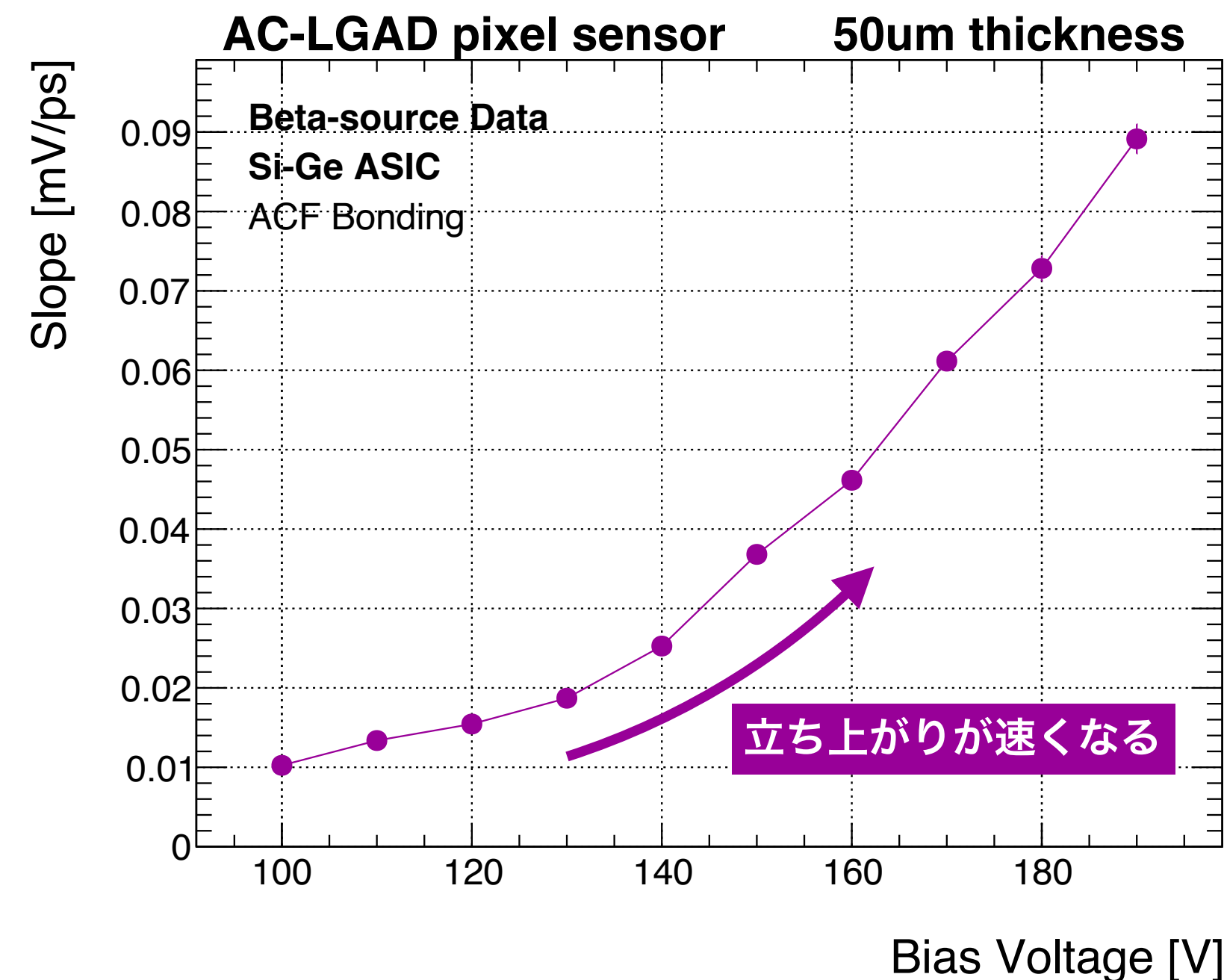
ベータ線の結果

信号の大きさとジッターのHVカーブ

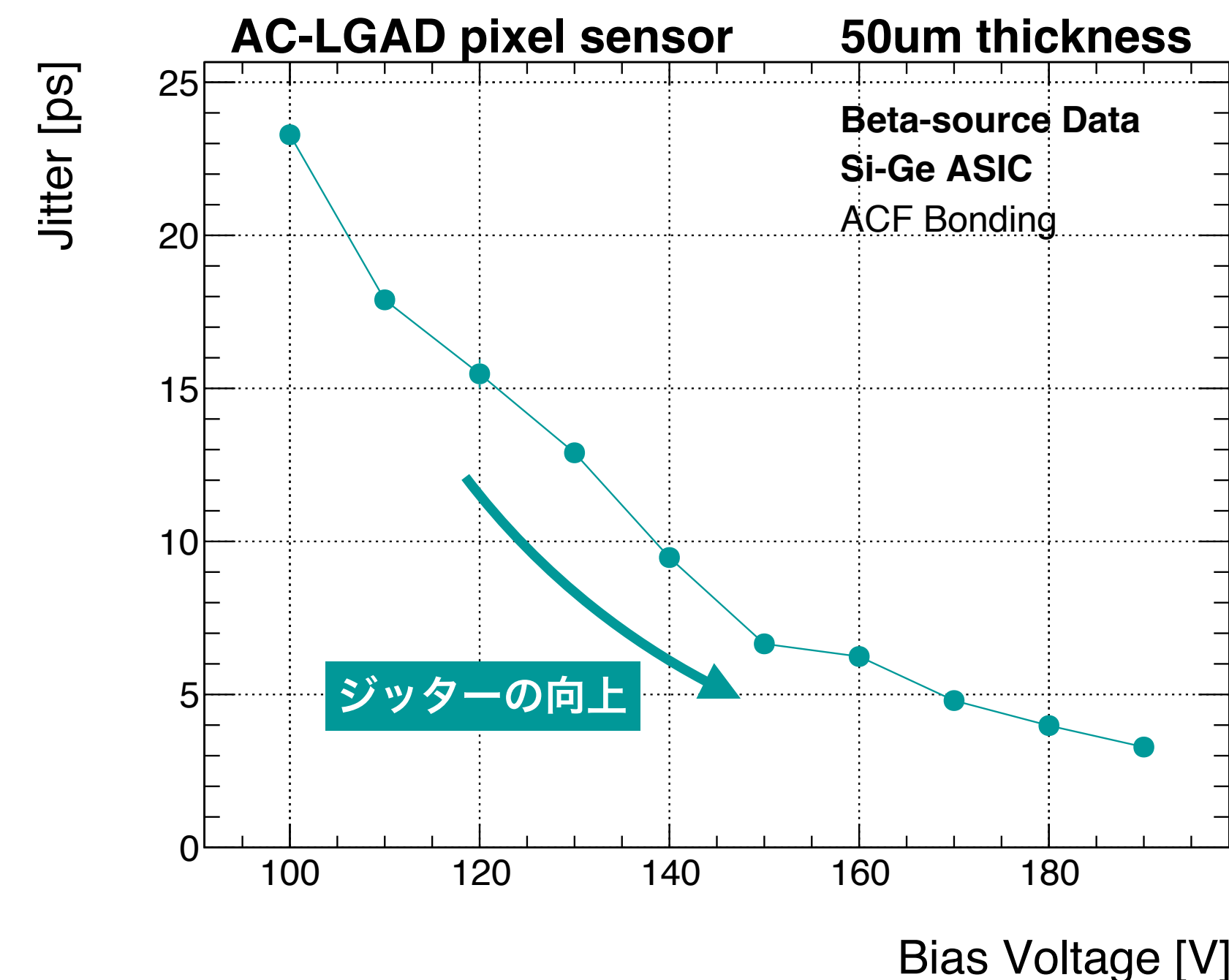
- 印加電圧を増やすとLGADの増幅率が上昇
→信号が大きく、立ち上がりが速くなるためジッターが向上
- 運転電圧190V印加時：信号の大きさ60 mV, ジッター4.0 ps



↑ 印加電圧 vs 信号の大きさ



↑ 印加電圧 vs 信号の傾き



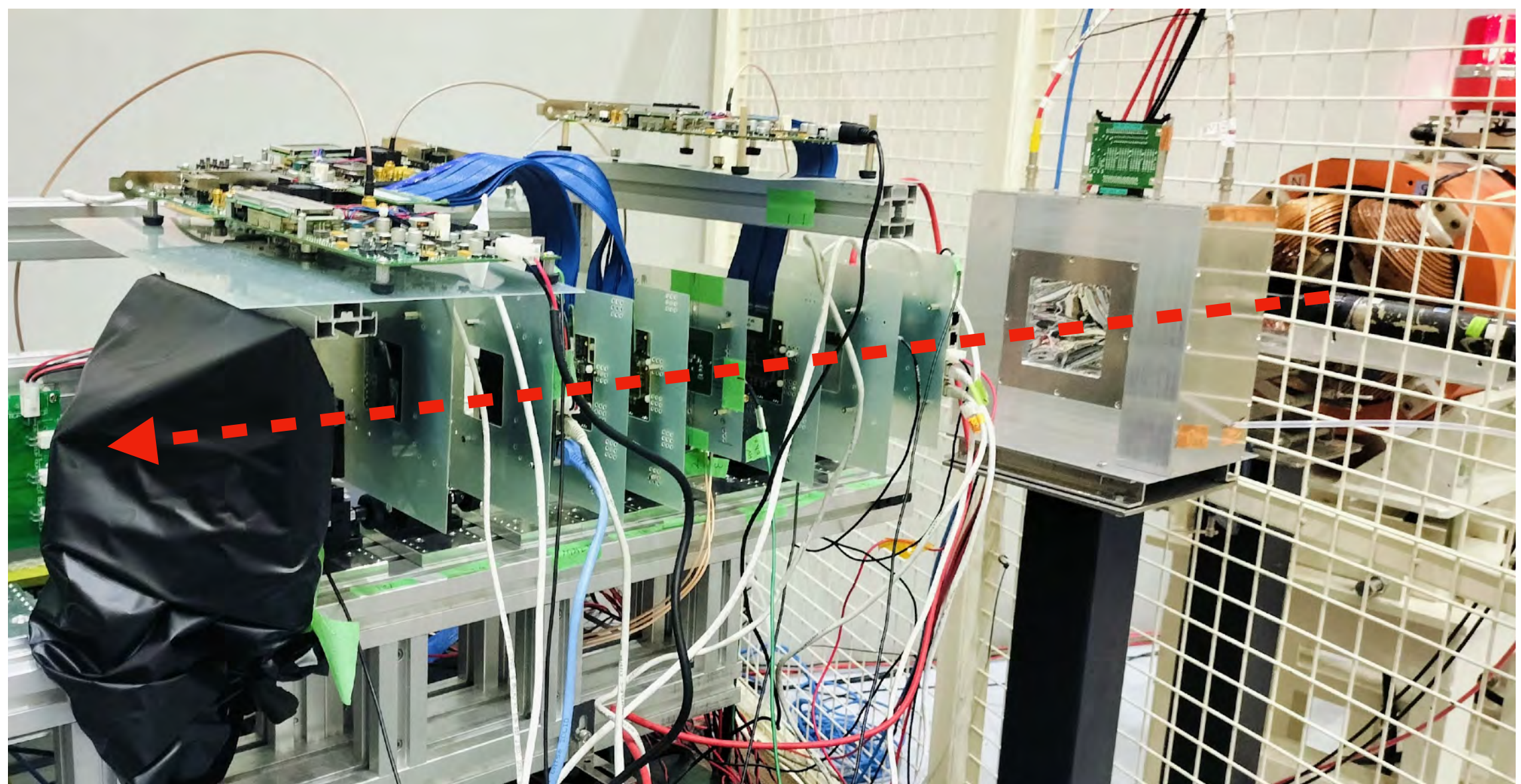
↑ 印加電圧 vs ジッター

テストビーム at KEK AR-TBL

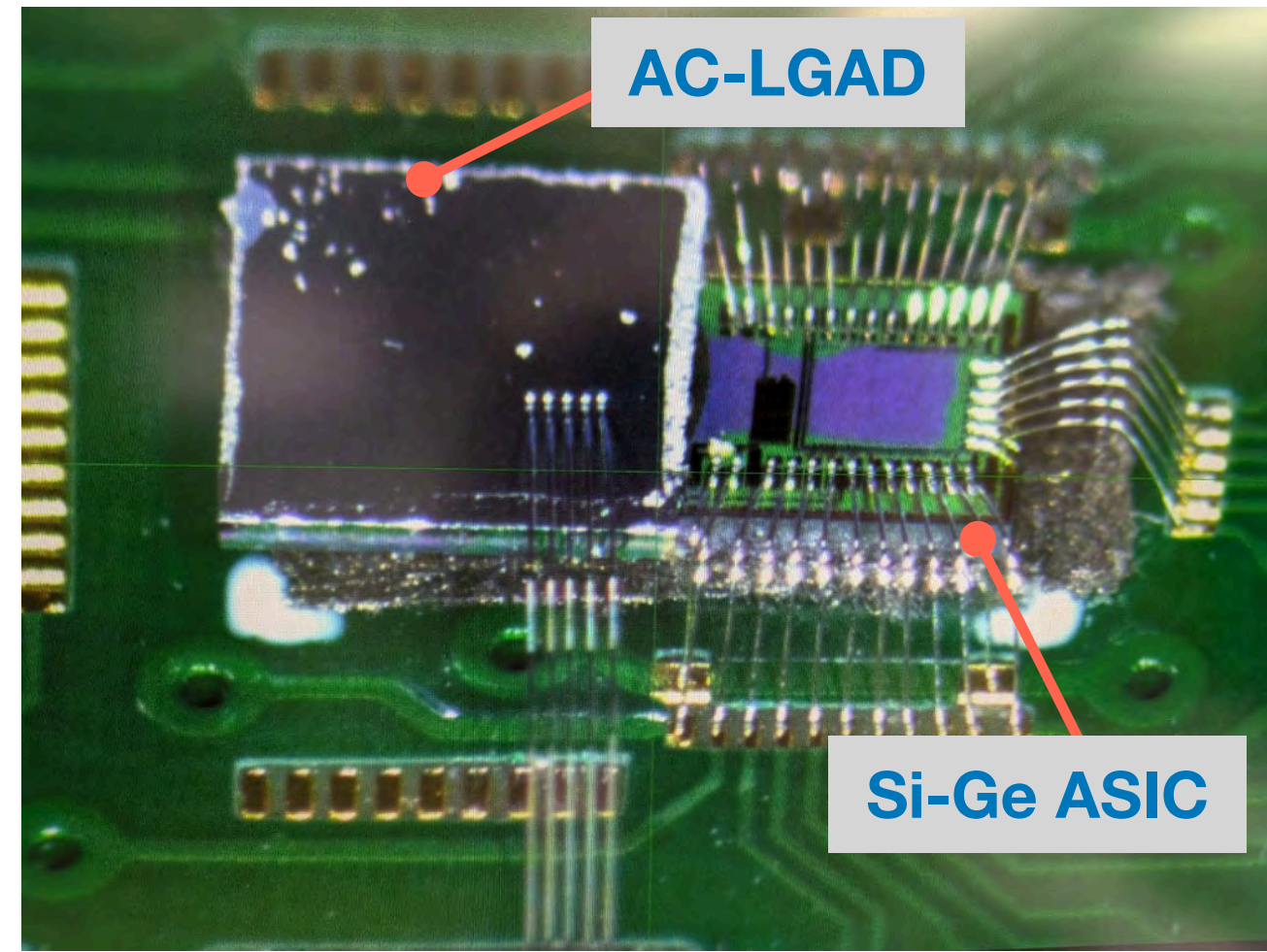
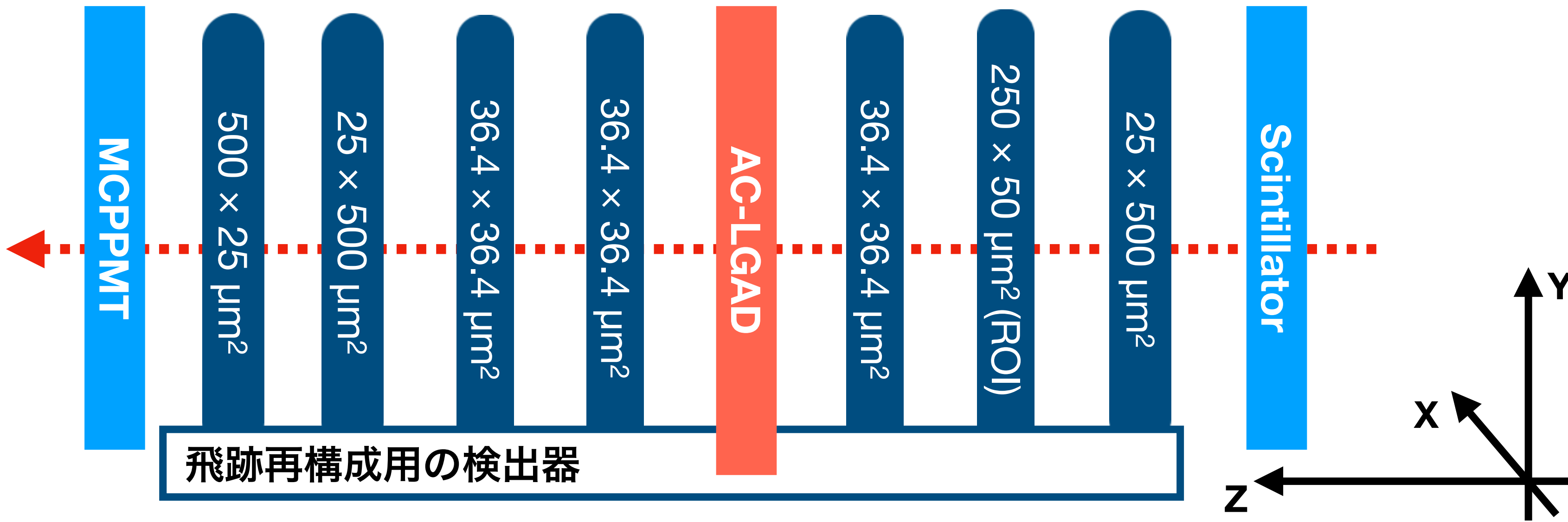
- 目的：AC-LGADとSi-Ge ASICのモジュールの位置分解能, 検出効率, 時間分解能の評価

セットアップ

- KEK AR-TBL : 3 GeV電子ビーム
- 7枚の検出器を飛跡再構成に使用
- 測定対象： ACF接続のAC-LGADpixとSi-Ge ASIC

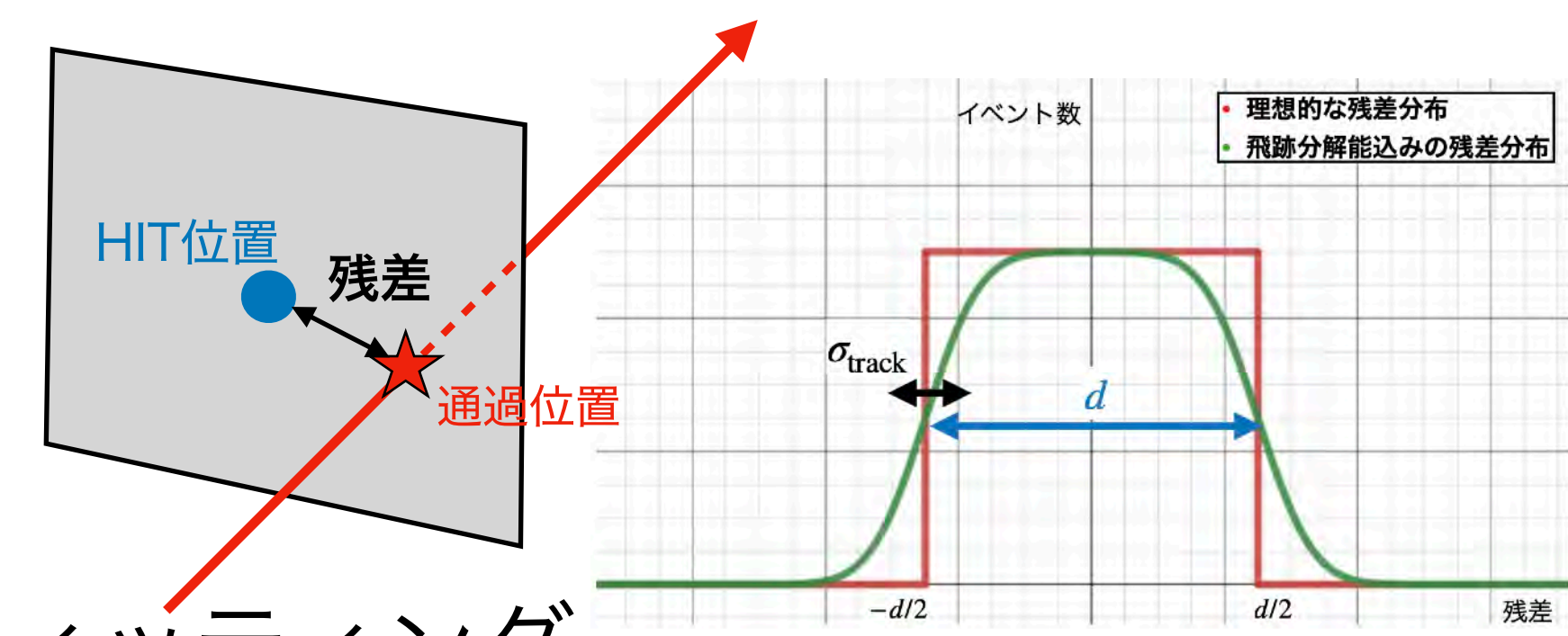


↑ テストビームのセットアップ



Track分解能, 位置分解能

- トラックの通過位置と検出器のヒット位置から位置分解能を解析
 - ・ 検出器のヒット位置は最大波高チャンネルの電極中心
- エラー関数の電極幅に対応する変数(p1-p2)は100 μmに固定してフィッティング



σ_{track}^2 : 飛跡の位置分解能

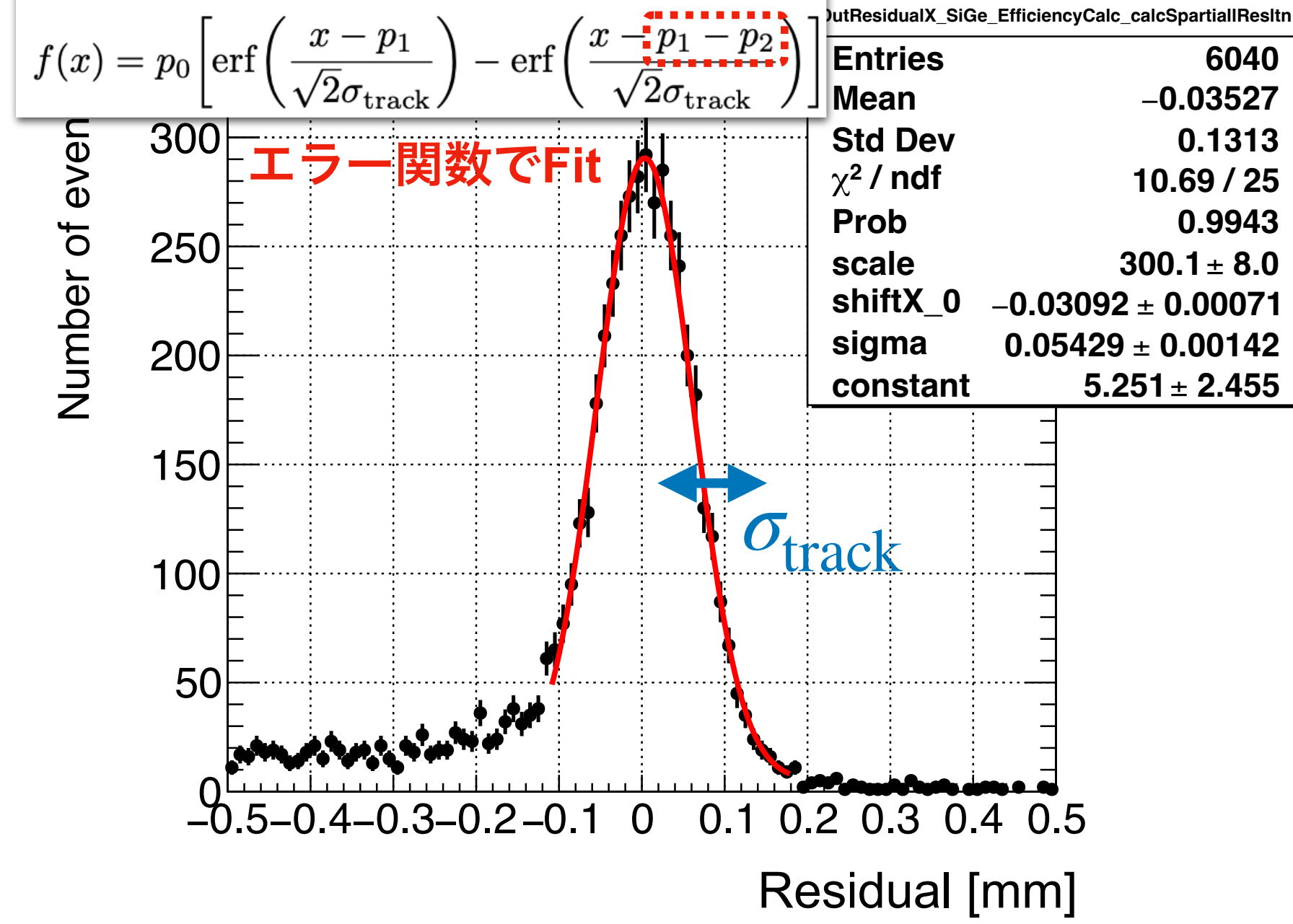
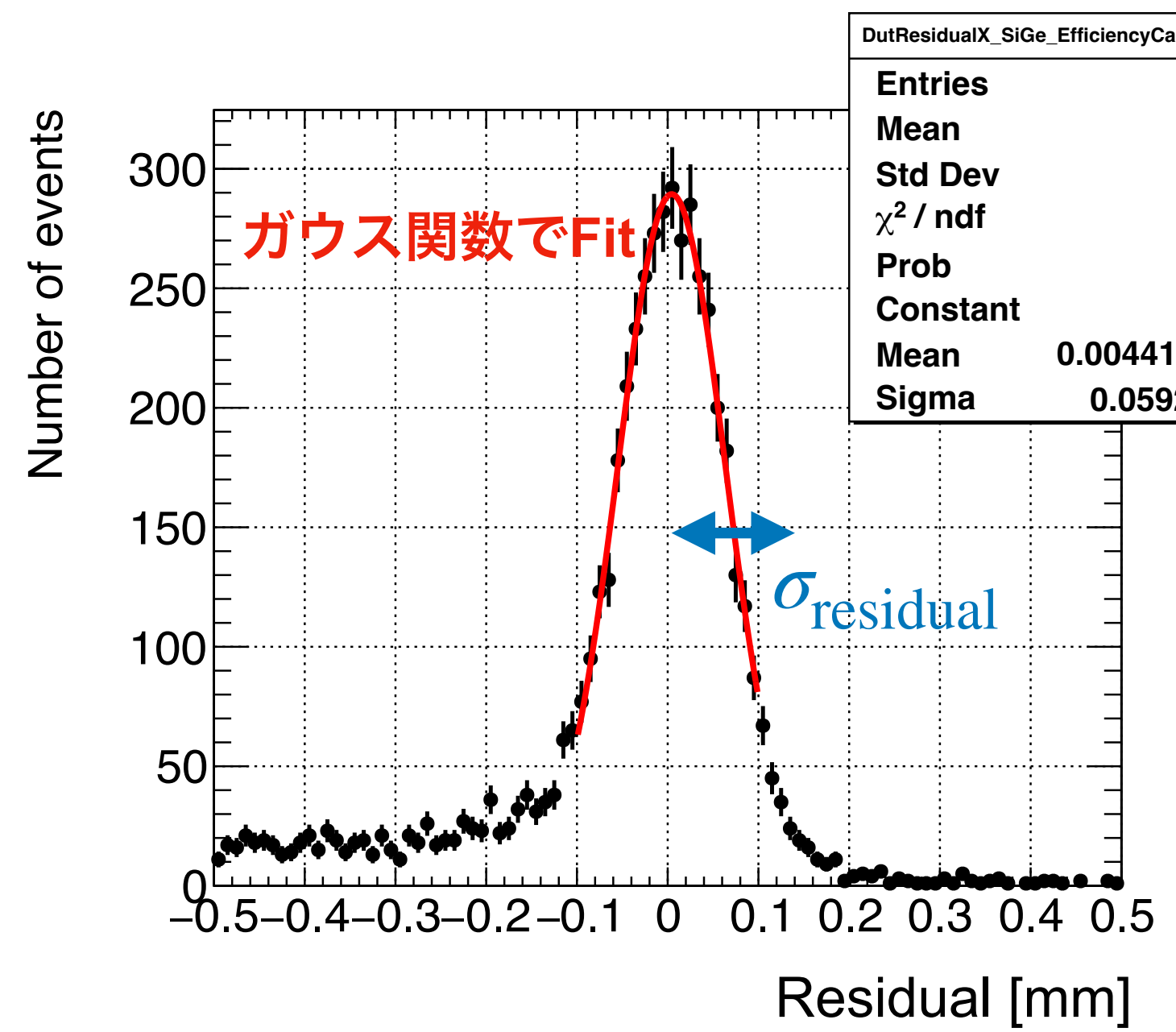
- ・ 飛跡再構成の不定性
- ・ エラー関数で評価

$\sigma_{detector}^2$: 検出器の位置分解能

- ・ 検出器による位置の不定性
- ・ 下式から評価

残差分布の標準偏差

$$\sigma_{residual}^2 = \sigma_{track}^2 + \sigma_{detector}^2$$

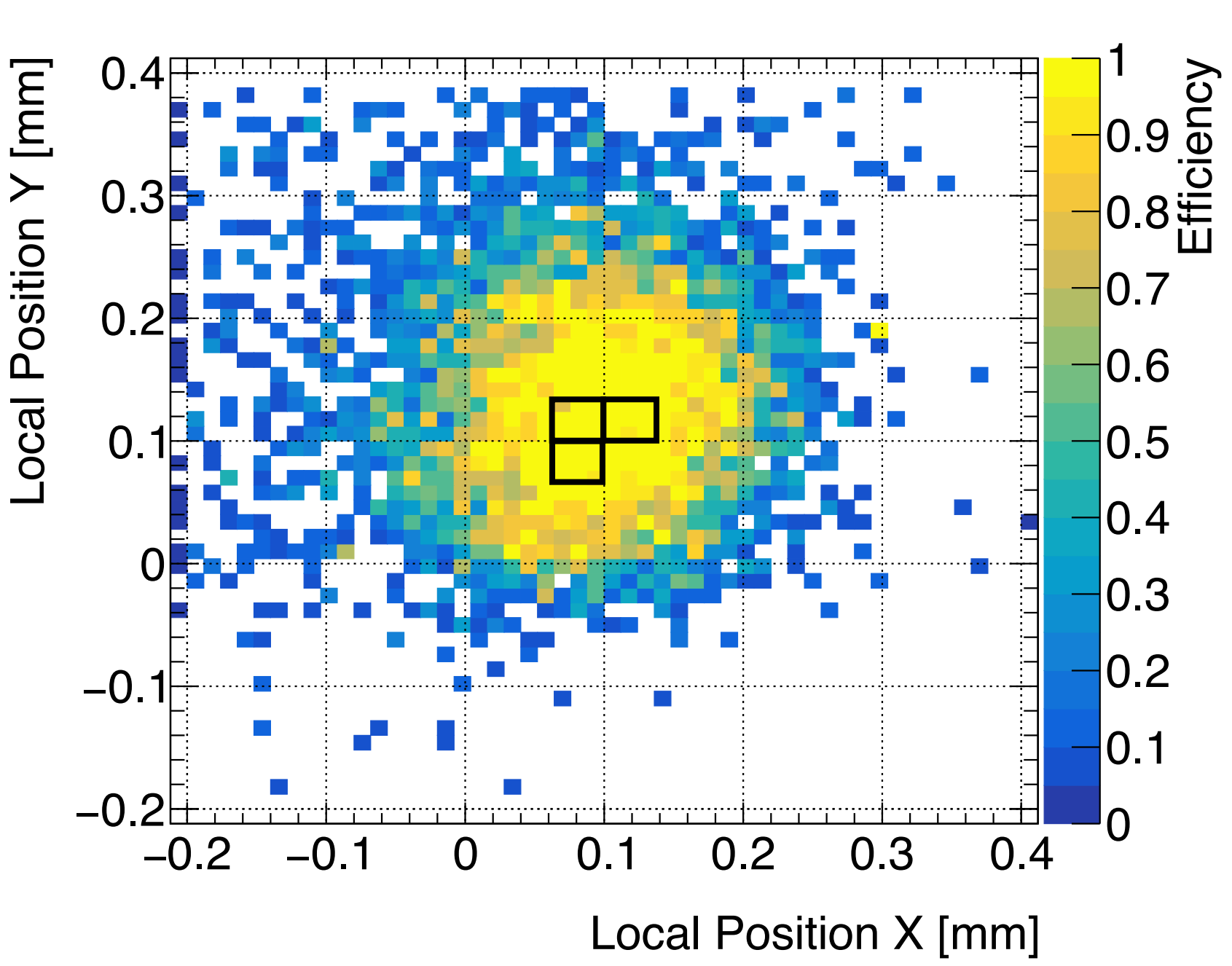
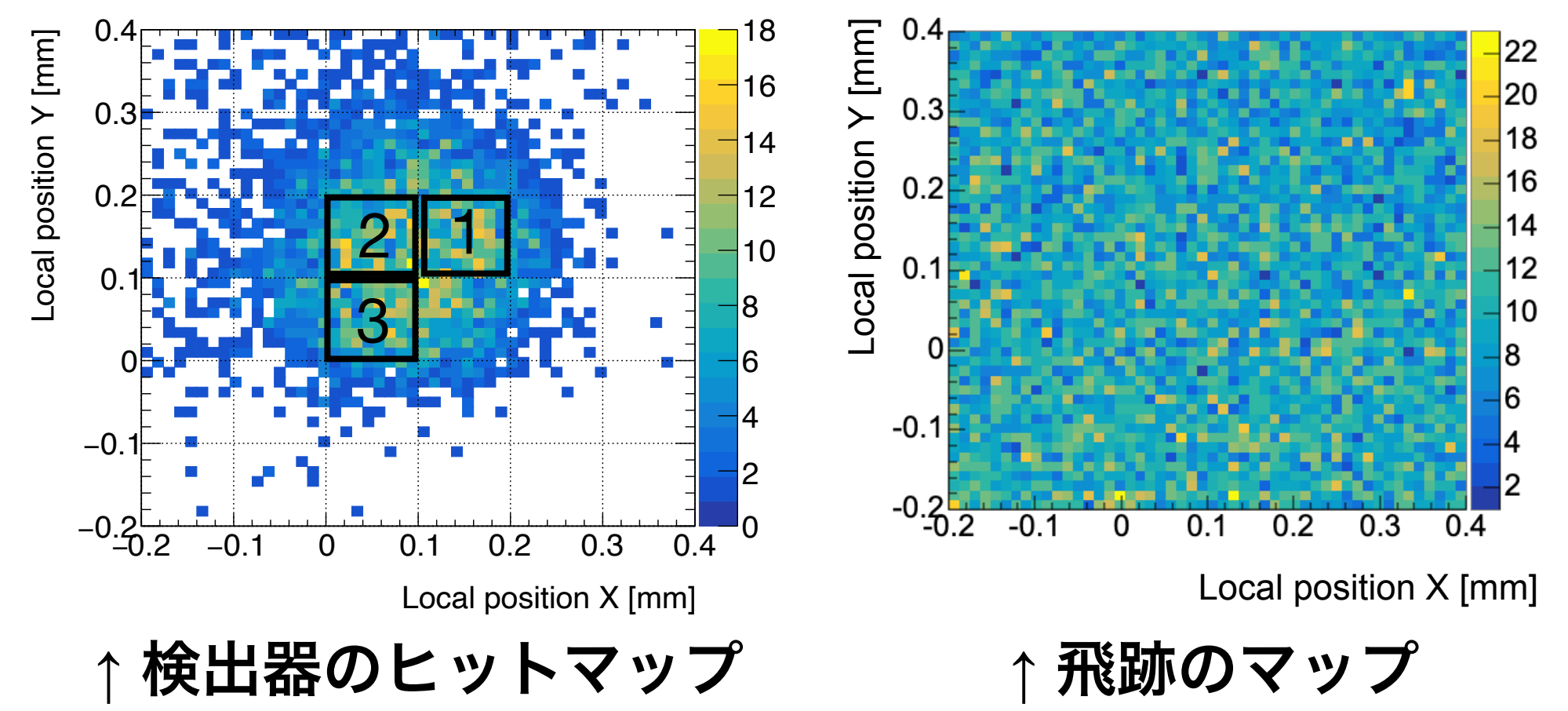


	$\sigma_{residual}$	σ_{track}	$\sigma_{detector}$
X	59.3±1.4 μm	54.3±1.4 μm	23.8±6.8 μm
Y	58.2±1.3 μm	52.6±1.2 μm	24.9±5.6 μm

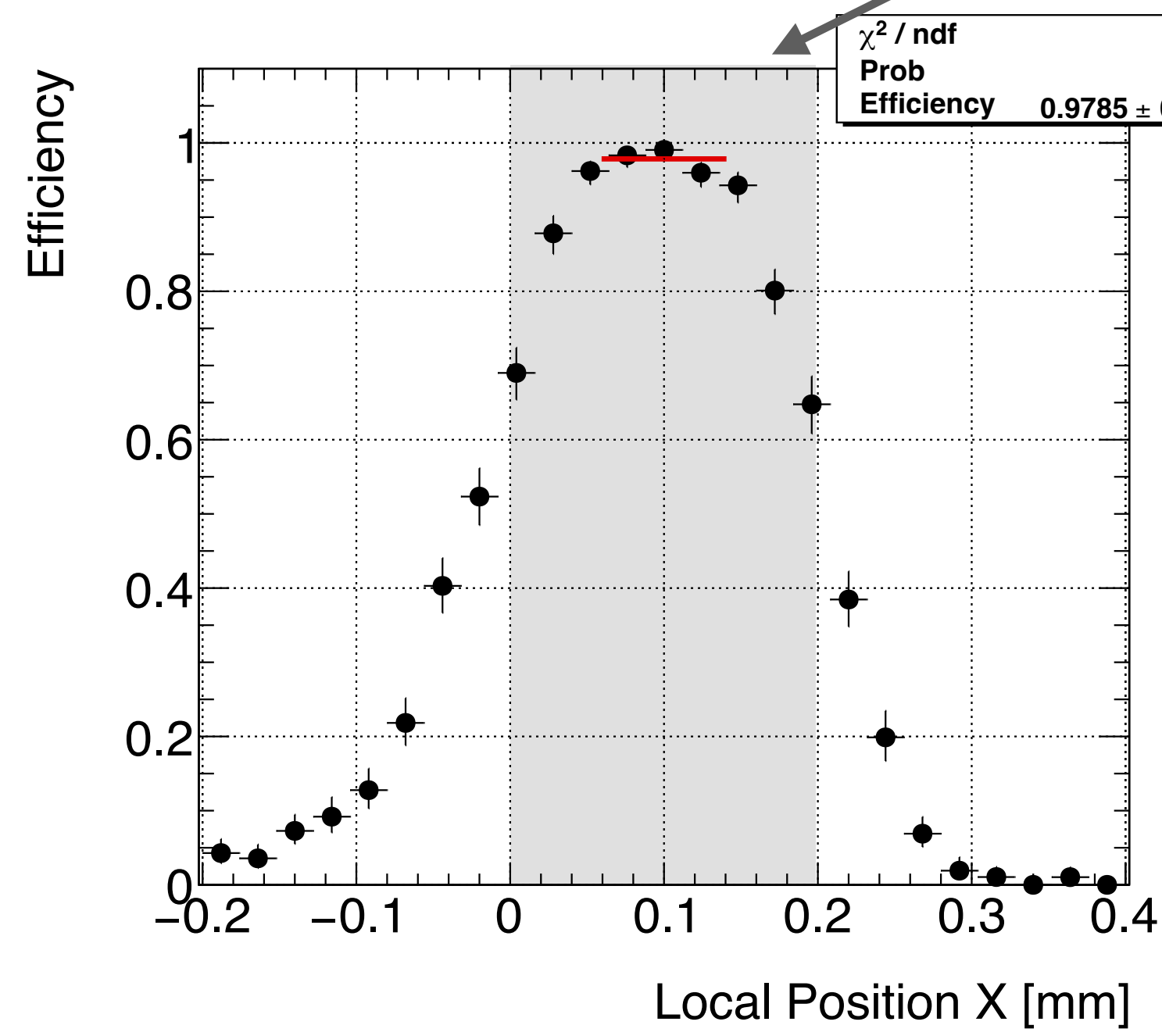
Efficiency : 検出効率

- 検出効率 = ヒットした数 / トラックが通過した数
- LGADのヒット判定とする残差の条件は $5\sigma_{\text{residual}}$ 以内

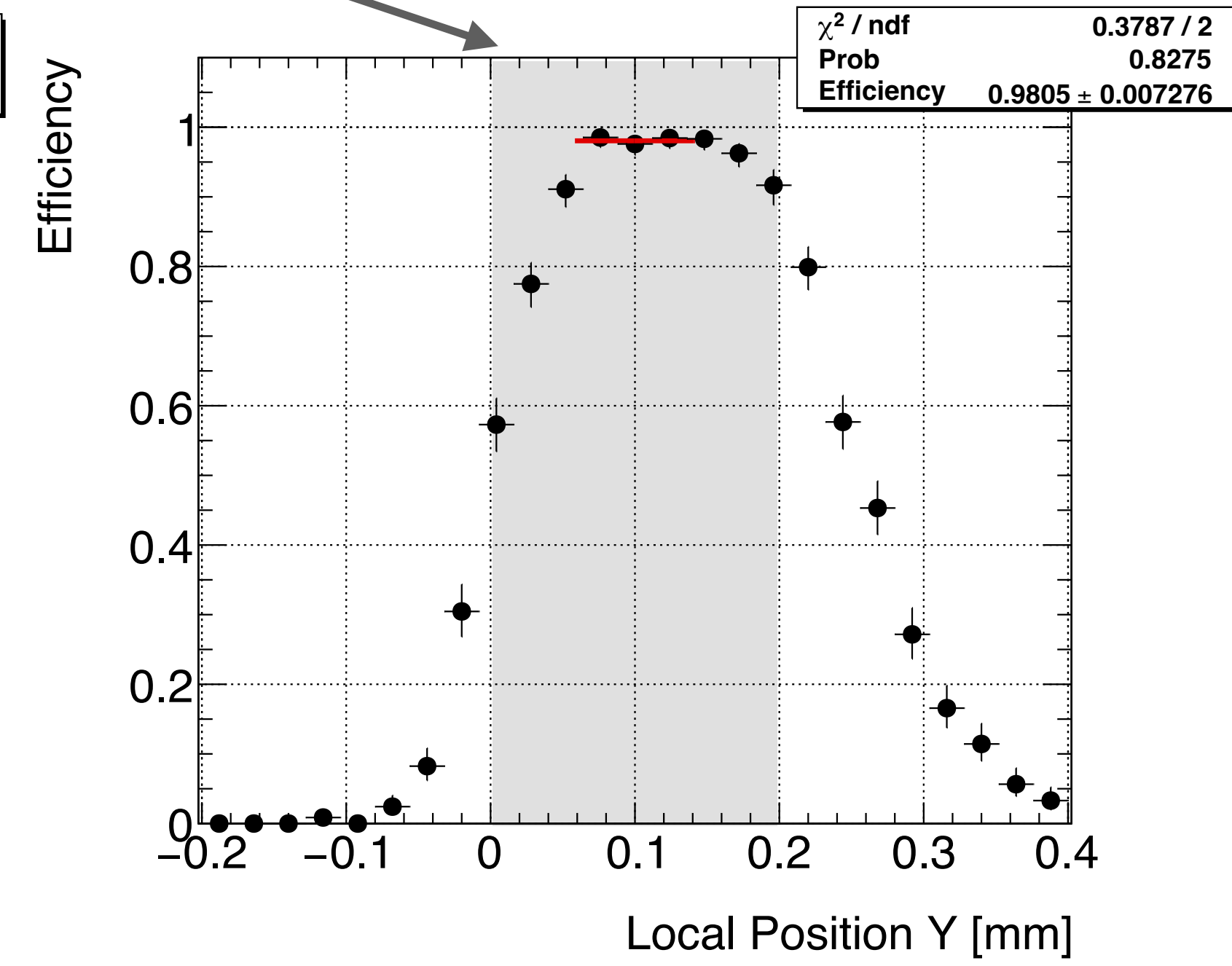
	X方向	Y方向	全体の領域
検出効率	$97.9 \pm 0.8 \%$	$98.1 \pm 0.7 \%$	$98.8 \pm 0.6 \%$



↑ 検出効率の2次元分布



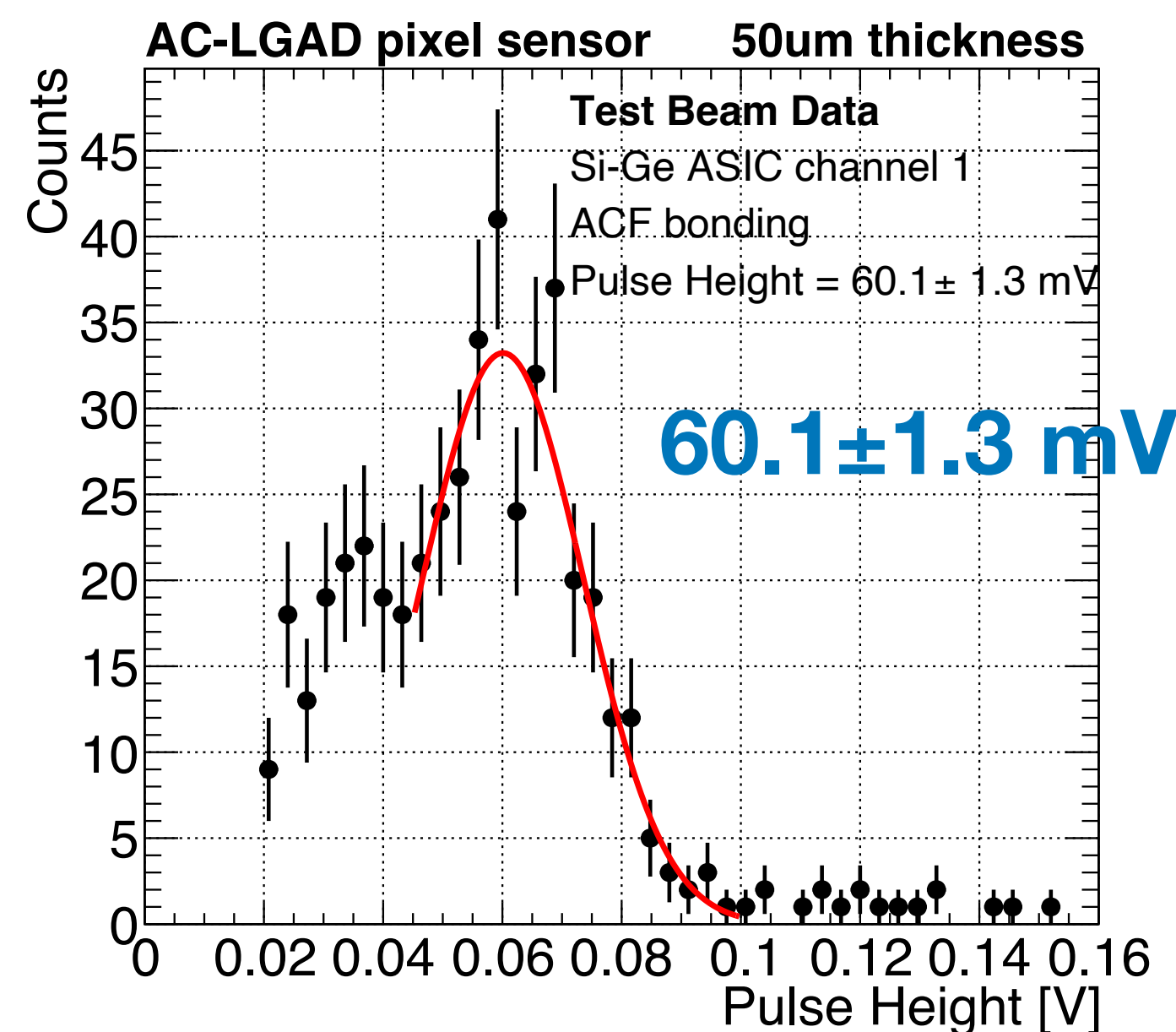
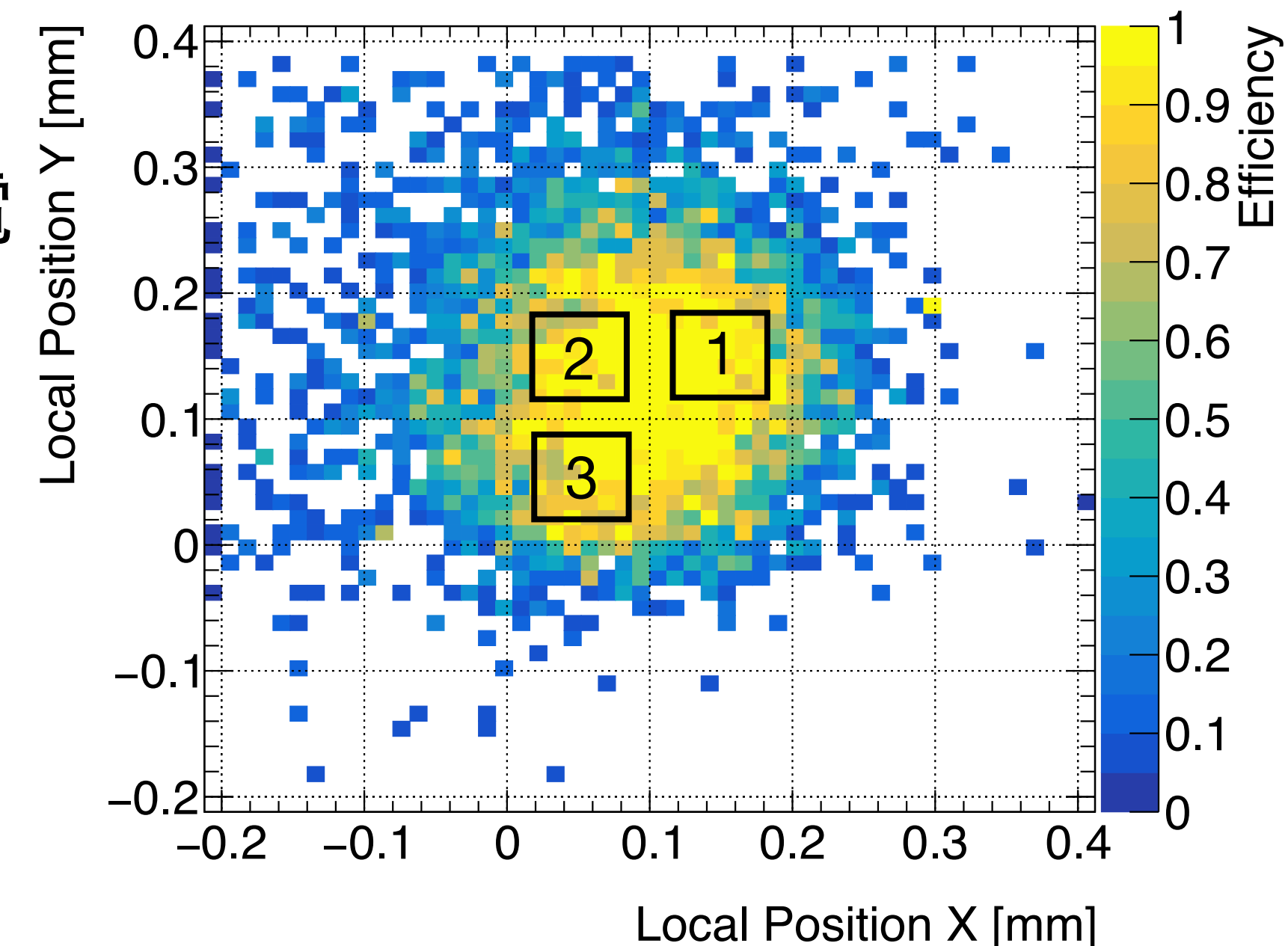
↑ 検出効率の1次元分布 (X方向に射影)



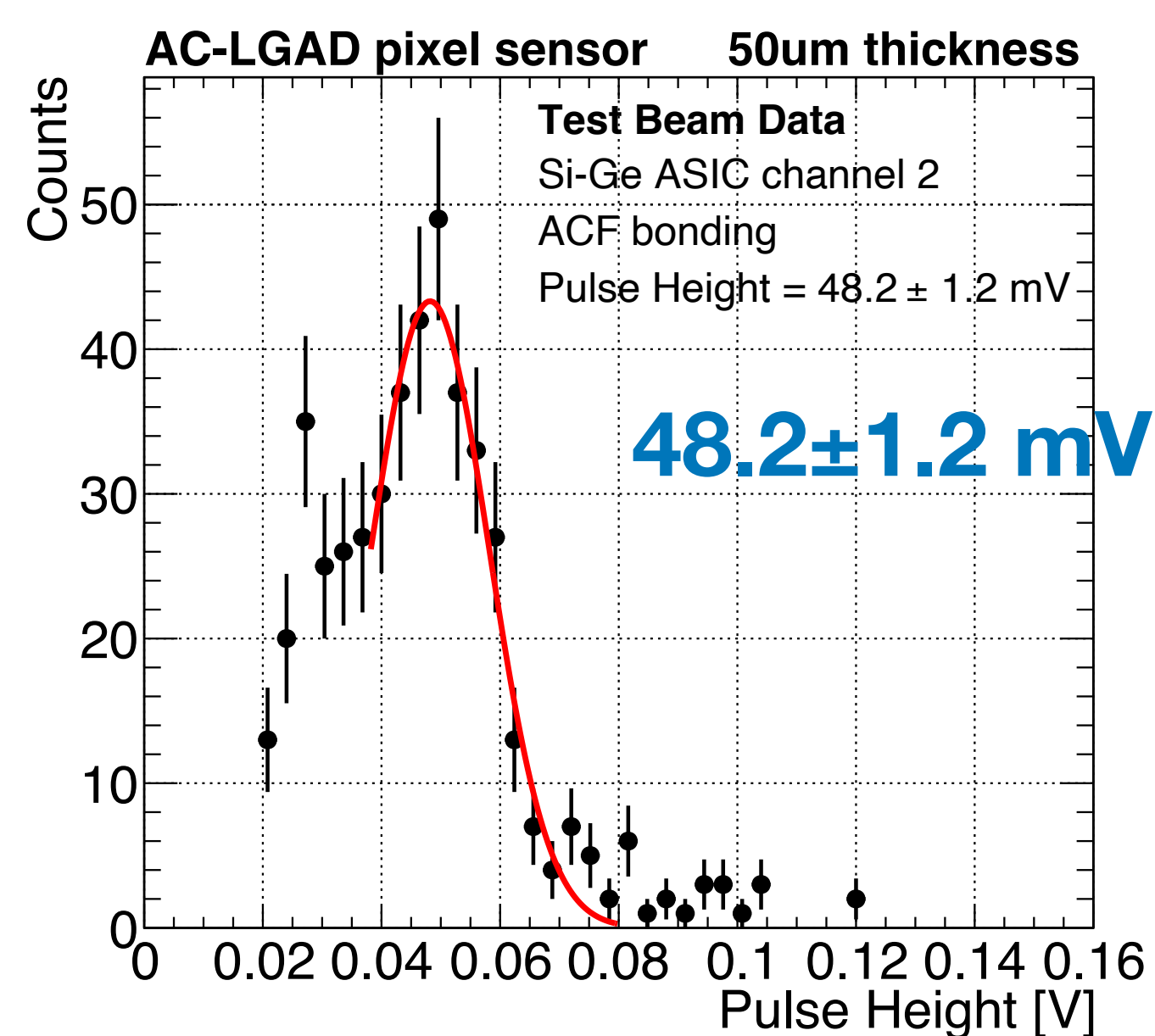
↑ 検出効率の1次元分布 (Y方向に射影)

各チャンネルの波高分布

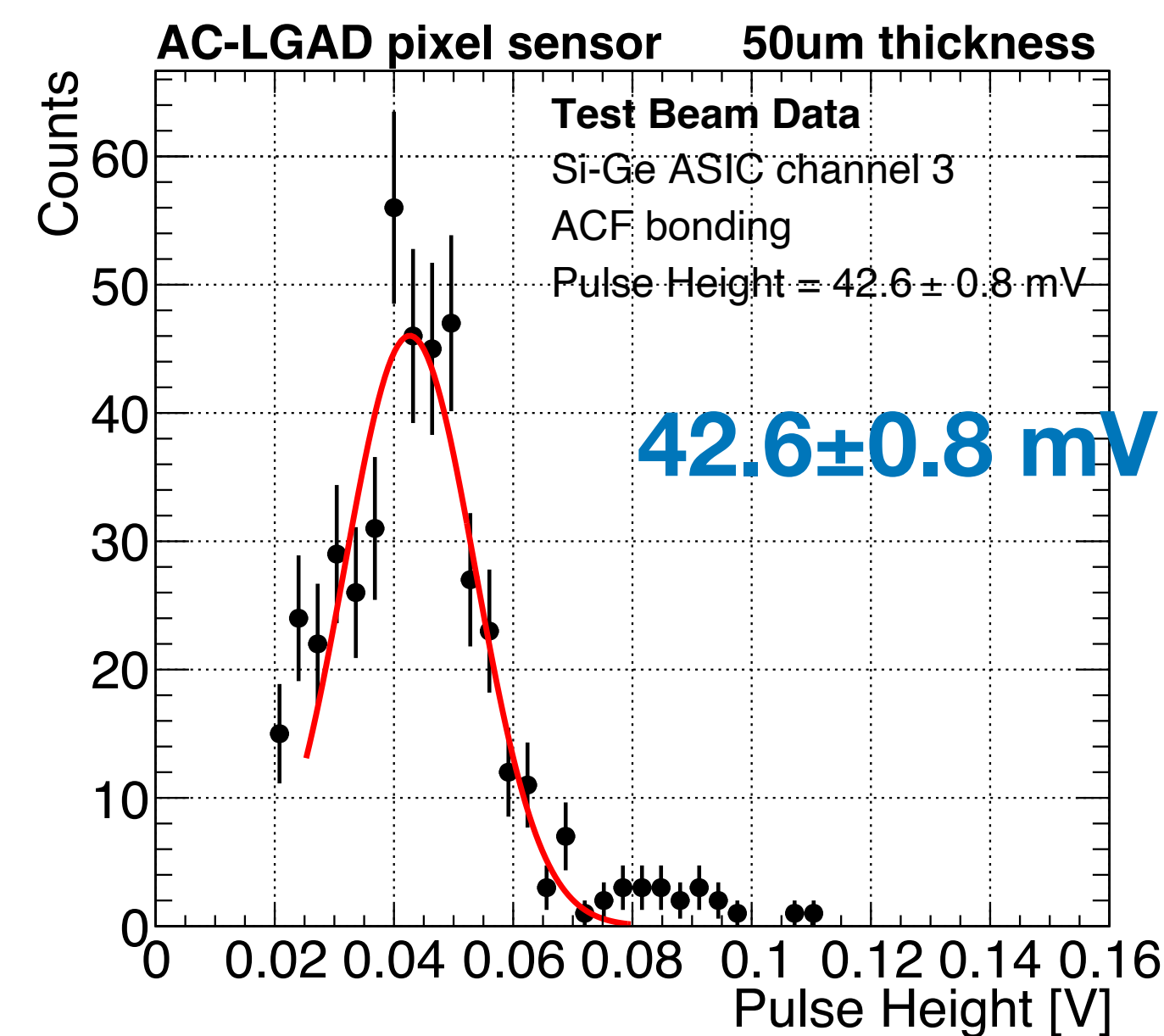
- クロストークを除去して波高分布を作成するために、100 μm の電極に対して、60 μm x 60 μm の領域に入ったイベントのみを使用
- AC-LGADとSi-Ge ASICをACF接続したサンプルの性能結果
 - ch1, 2, 3の波高は **60, 48, 43 mV** であった
 - 荷電粒子で、フリップチップ後も十分な信号が得られた



↑ ch1の波高分布



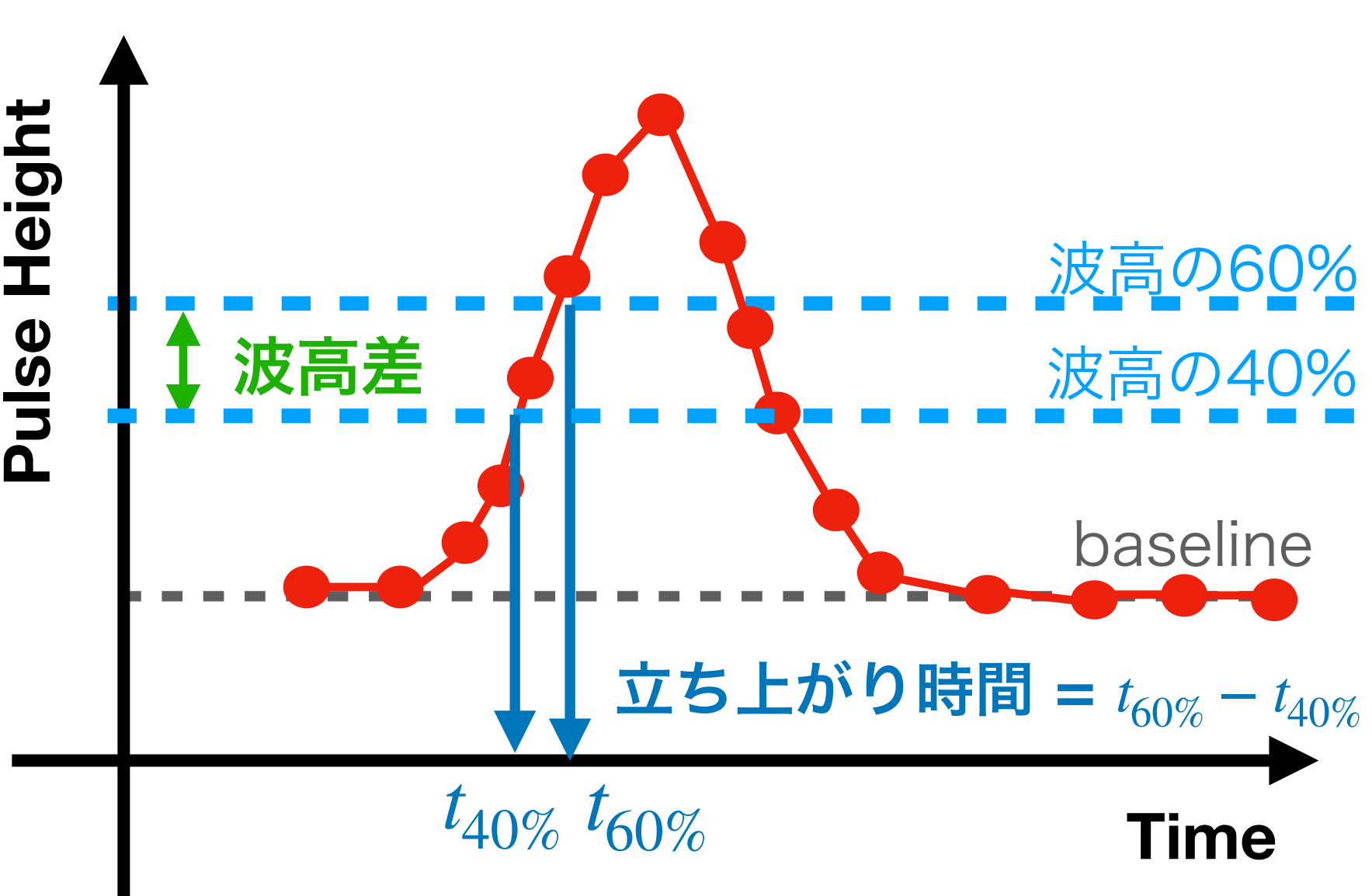
↑ ch2の波高分布



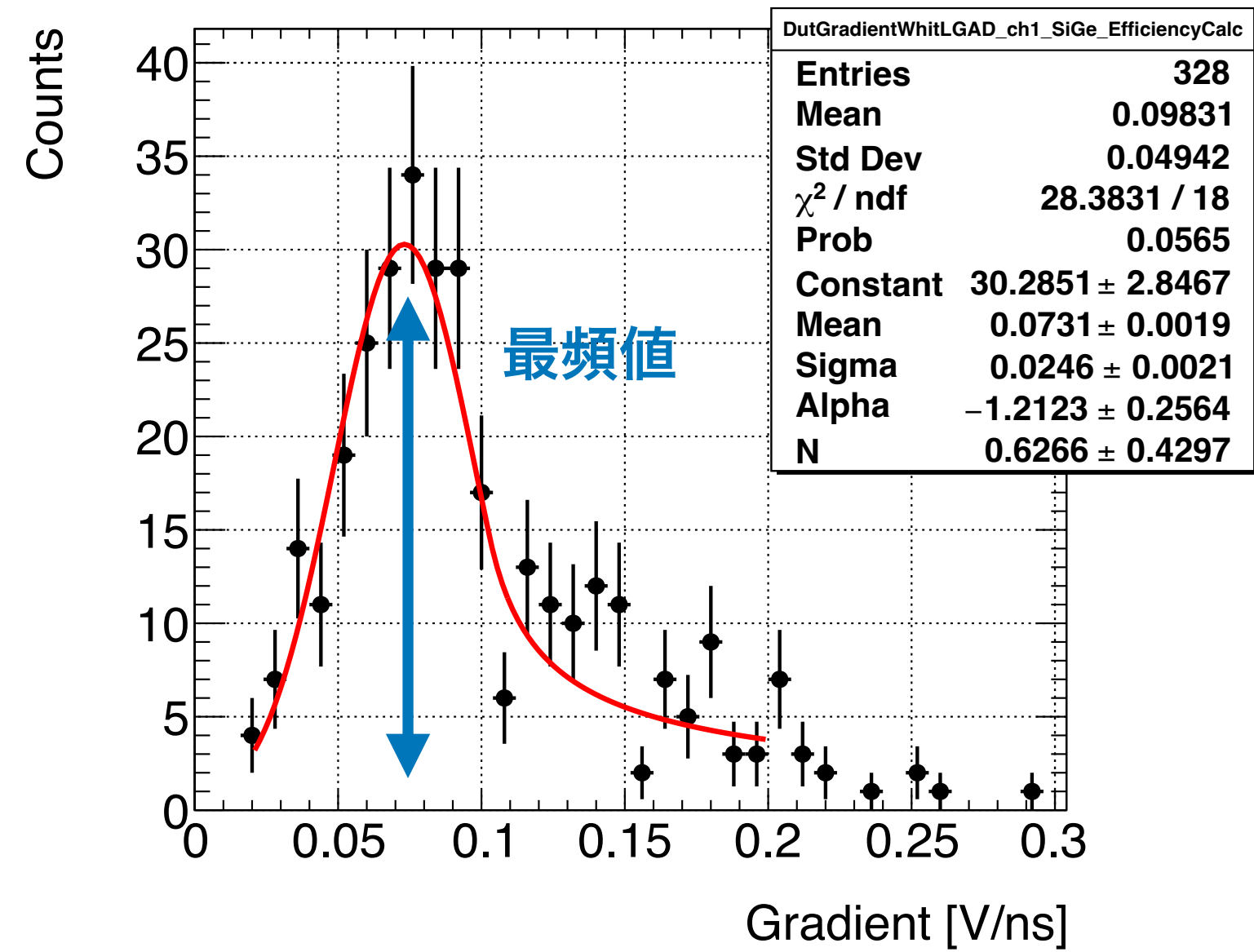
↑ ch3の波高分布

ジッター

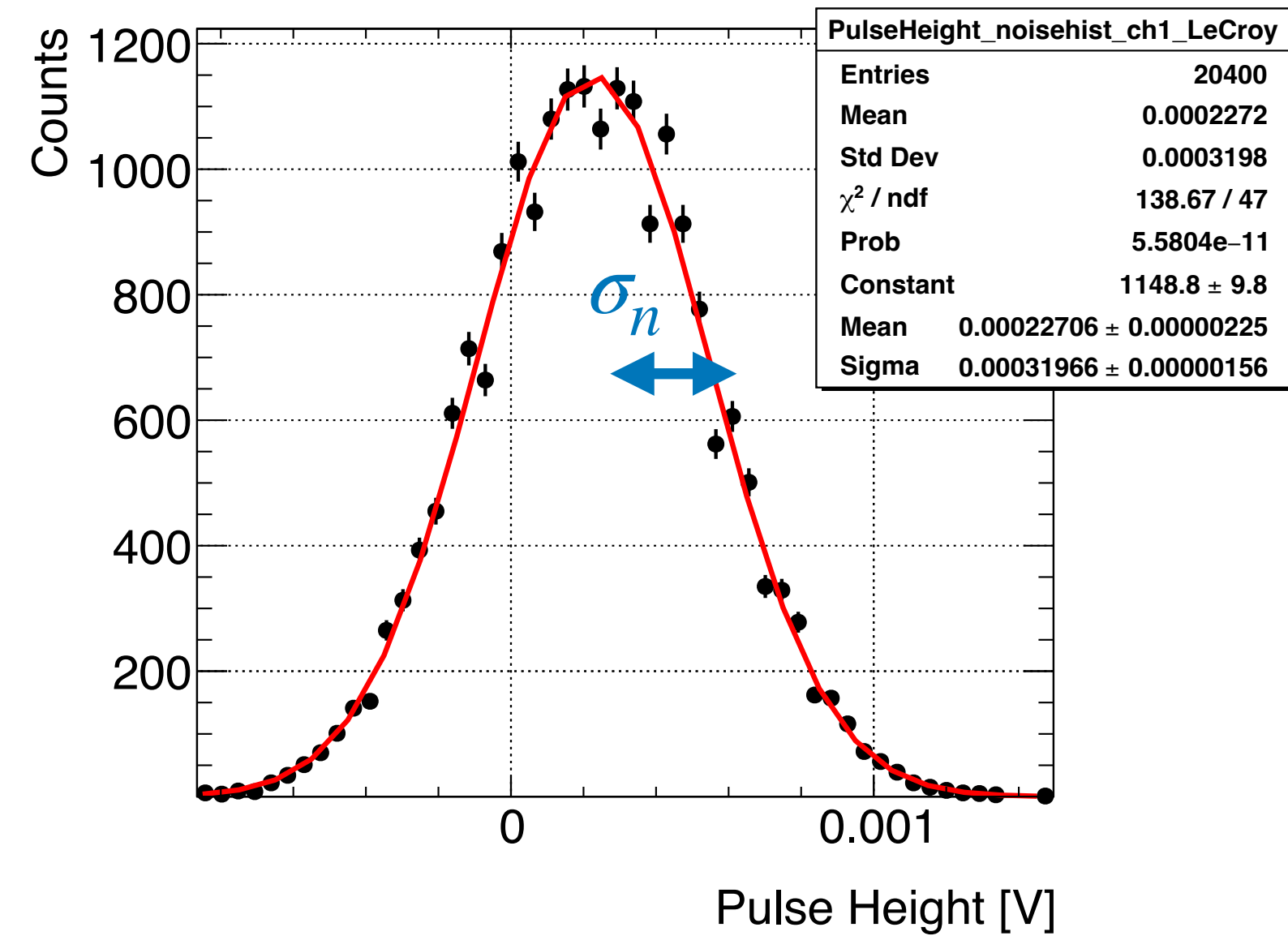
- 波高が40-60%の間での傾きとノイズから各チャンネルのジッターを求める
- 全てのチャンネルについて、4~5 psのジッターであることがわかった。
 - ・ Si-Ge ASICはジッターの影響がほとんどない状態の時間分解能が得られる



$$\sigma_{\text{jitter}} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{S}{t_r} \right|}$$



↑ 信号の傾きのヒストグラム

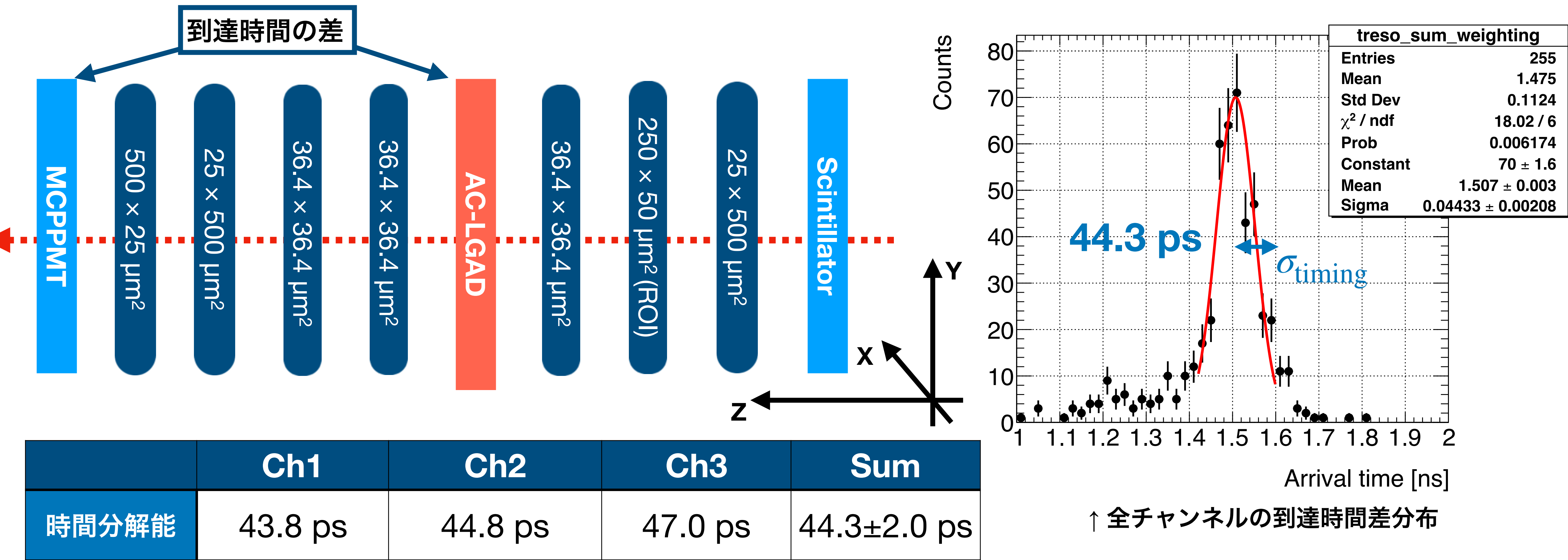


↑ ノイズのヒストグラム

	Ch1	Ch2	Ch3
ジッター	4.4±0.1 ps	5.4±0.1 ps	5.5±0.2 ps

時間分解能

- 時間分解能 10 ps 以下のMCP-PMTとの時間差をとることでAC-LGADの時間分解能を求める
- 統計を増やすために全チャンネルをピーク値が一致するように足し合わせて解析
 - ・ 時間分解能：44.3 ± 2.0 ps



↑ 全チャンネルの到達時間差分布

まとめ

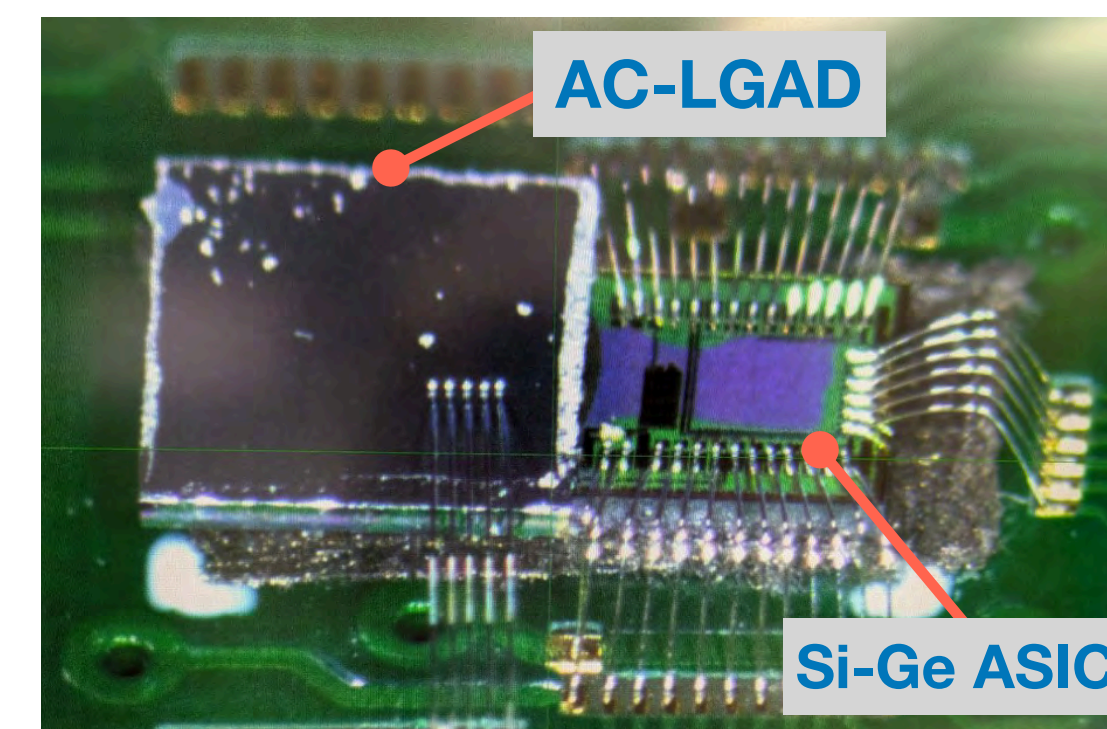
AC-LGADpixの読み出しASICの開発

- AC-LGADは一様な増幅層によって、不感領域がなく高い時間分解能を実現
- AC-LGADの読み出しASICは**低ノイズ**かつ**低消費電力**でないといけない

Si-Ge ASIC

- シリコンゲルマニウムを用いたHBTで構成 → $V_{DDA} = 1.5V$ が最適の運転電圧
- 赤外線レーザー測定：
 - ・ Si-Ge ASICの最高性能：ジッター 3.02 ps, 消費電力 $144 \pm 6 \mu W/ch$
 - ・ 消費電力を抑えた時の性能：ジッター 9.65 ps, 消費電力 $47.8 \pm 6 \mu W/ch$
- ベータ線測定：
 - ・ 信号の大きさ 60 mV, ジッター 4.0 ps
- テストビーム測定：
 - ・ 位置分解能： $23.8 \pm 4.7 \mu m$, 時間分解能： $44.3 \pm 2.0 ps$, 検出効率： $98.8 \pm 0.6 \%$

➡ 今後について：Si-Geの最適化, CMOSを用いた回路での可能性を検討, CFDの開発へ



ASICへの要求

- ▶ 入力電荷 2-50 fC
- ▶ 検出器容量 0.1-2 pF
- ▶ 消費電力 $< 100 \mu W/ch$
- ▶ ジッター $<< 30 ps$
- ▶ TDC $<< 30 ps$
- ▶ Time walk 補正

Backup