



大阪大学  
The University of Osaka

# COMET実験に用いる トリガー検出器の読み出し回路開発

住村明紀、上野一樹、吉沢直道、Thomas Bouillaud<sup>A</sup>、水野貴裕<sup>A</sup>  
田中真伸<sup>B</sup>、庄子正剛<sup>B</sup>、藤井祐樹<sup>C</sup>、Jonathan Bonnard<sup>D</sup>、Alex Miles<sup>E</sup>  
大阪大学、九州大学<sup>A</sup>、KEK<sup>B</sup>

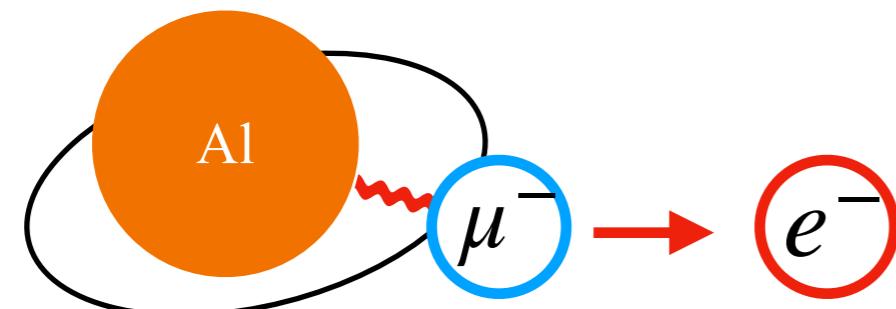
Imperial College London<sup>C</sup>、Université Clermont Auvergne<sup>D</sup>、Monash University<sup>E</sup>

# COMET Phase-I実験

- $\mu$ -e転換過程の探索 @ J-PARC



→ 信号事象は  $105 \text{ MeV}/c$  の運動量を持つ単一電子



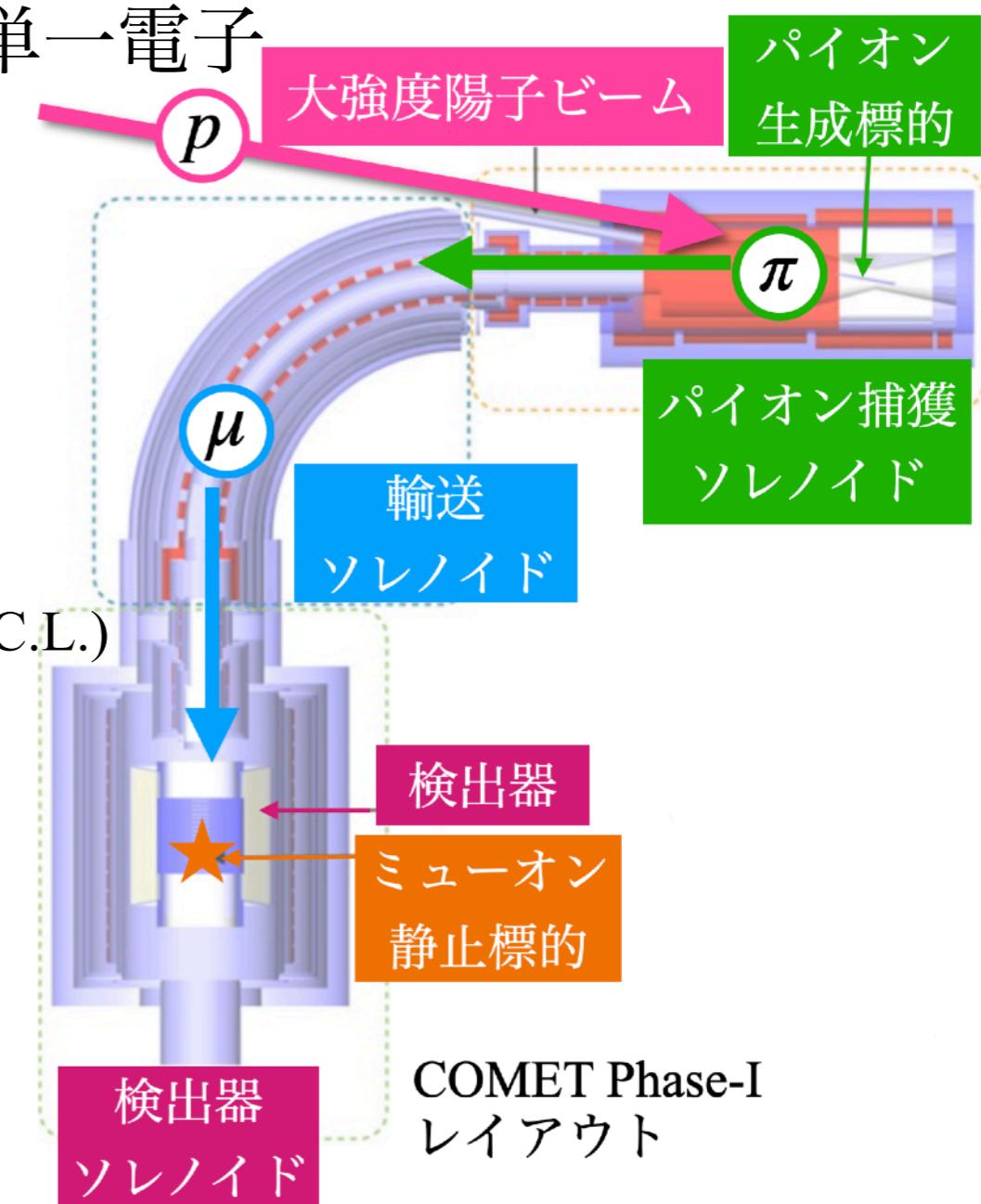
- 目標单一事象感度:  $3 \times 10^{-15}$

Cf) 現在の分岐比の上限:  $7.0 \times 10^{-13}$  (90% C.L.)

(Au標的 SINDRUM II 2006)

DOI:10.1088/0954-3899/29/8/306

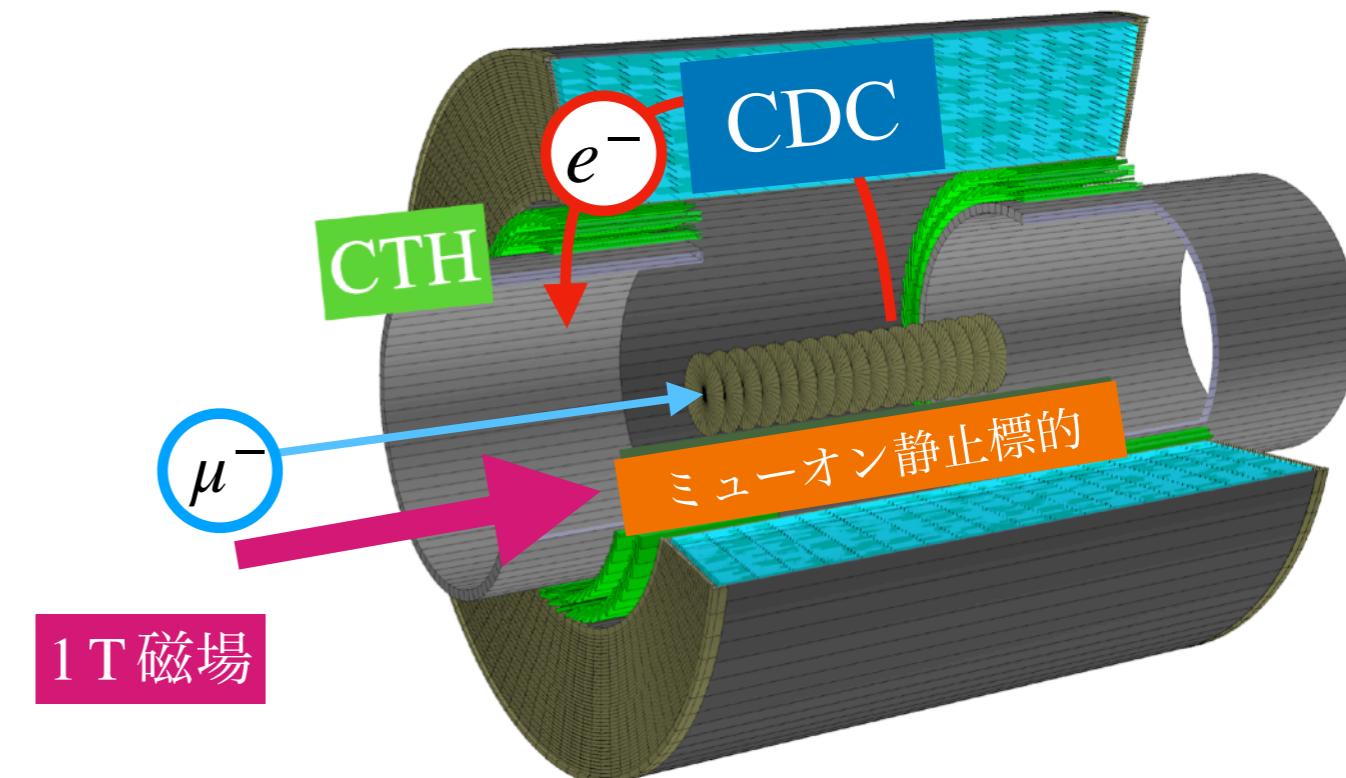
新物理の証拠



# COMET実験で用いる検出器

## CyDet (Cylindrical Detector System)

- CDC (Cylindrical Drift Chamber) : ガス検出器
  - 磁場中の荷電粒子飛跡測定 → 200 keV/cの分解能で運動量決定
- CTH (Cylindrical Trigger Hodoscope) : シンチレーション検出器
  - トリガー発行
  - 1 nsの分解能で電子の入射タイミングの決定→ CDCの飛跡再構成に使用



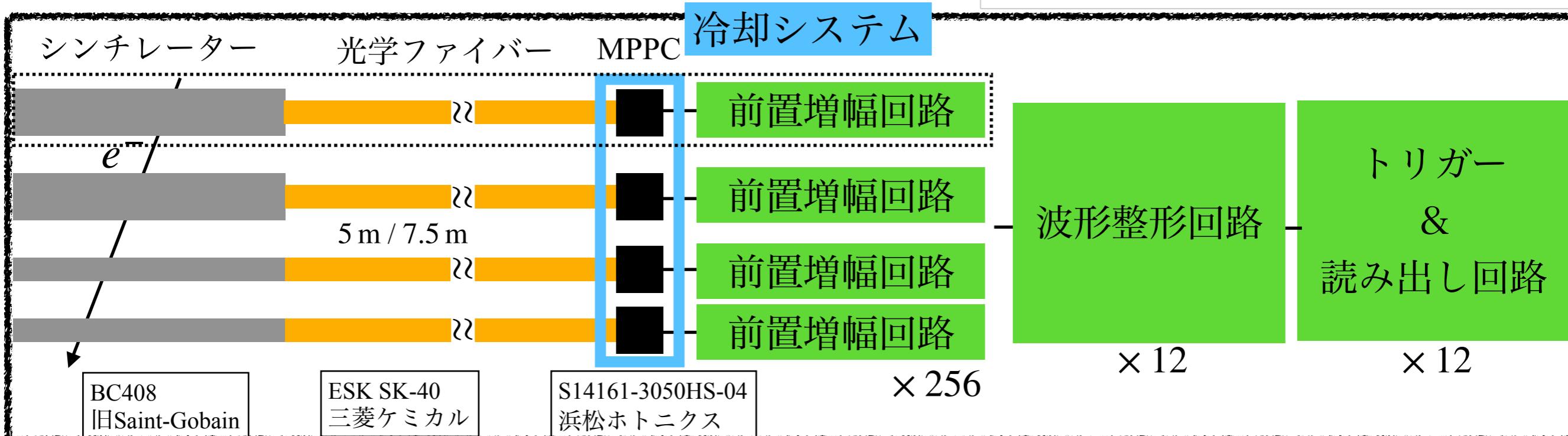
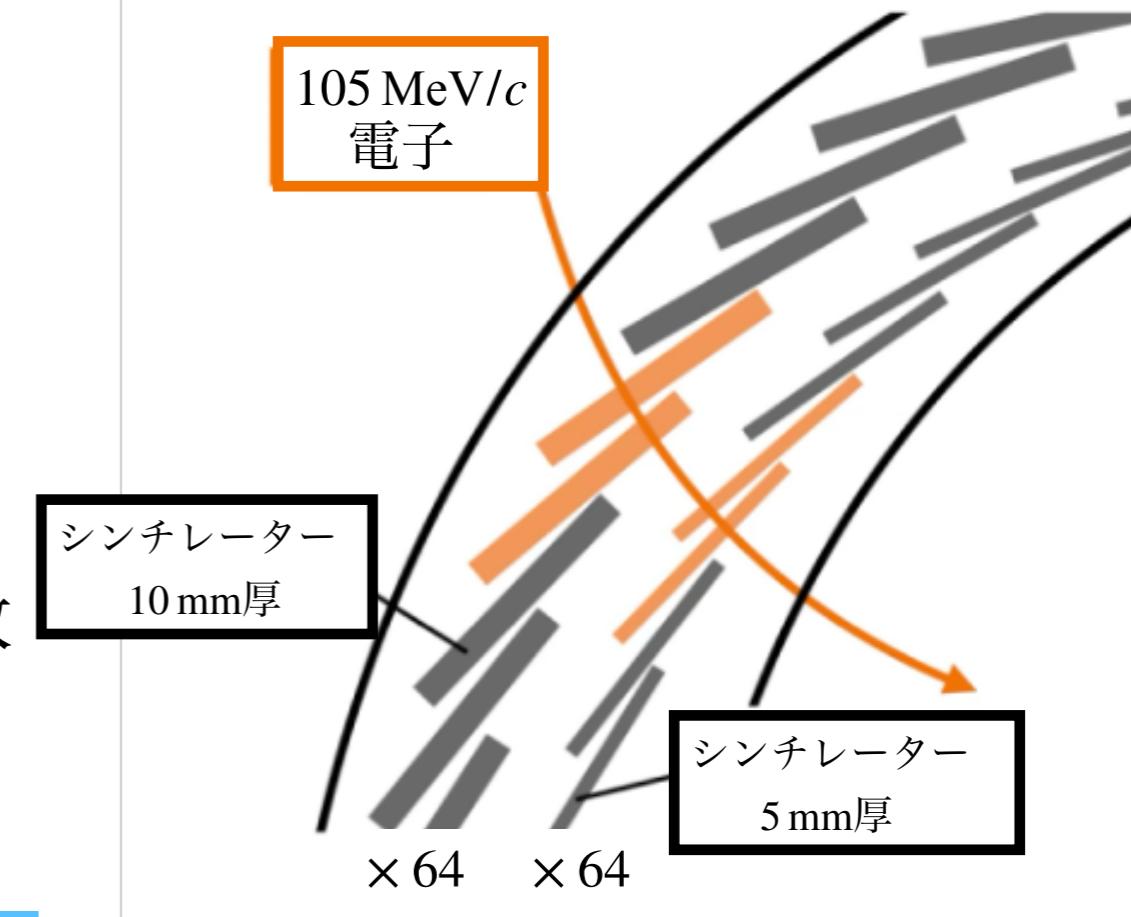
# CTHの概要

## CTHの要求

- 1 nsの時間分解能
- トリガー計数率削減

## CTHのデザイン

- 上流下流に合計256枚のシンチレーター
- 内・外側層で隣接する各2枚 計4枚で同時計数
- 光学ファイバーでシンチレーション光を輸送
- MPPC(半導体光検出器)で信号読み出し



# CTHの信号読み出し回路基板

## 要求性能

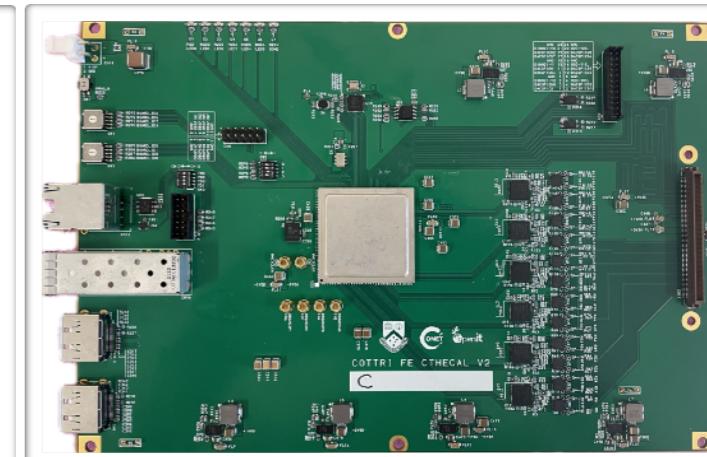
- 放射線耐性 ← 試験済みのパーツを使用
- 1 p.e. - 100 p.e. 相当の信号応答の線形性
- 最大5 MHzのレート耐性
- 1 nsの時間分解能

SAM



(50 × 50 mm<sup>2</sup>)

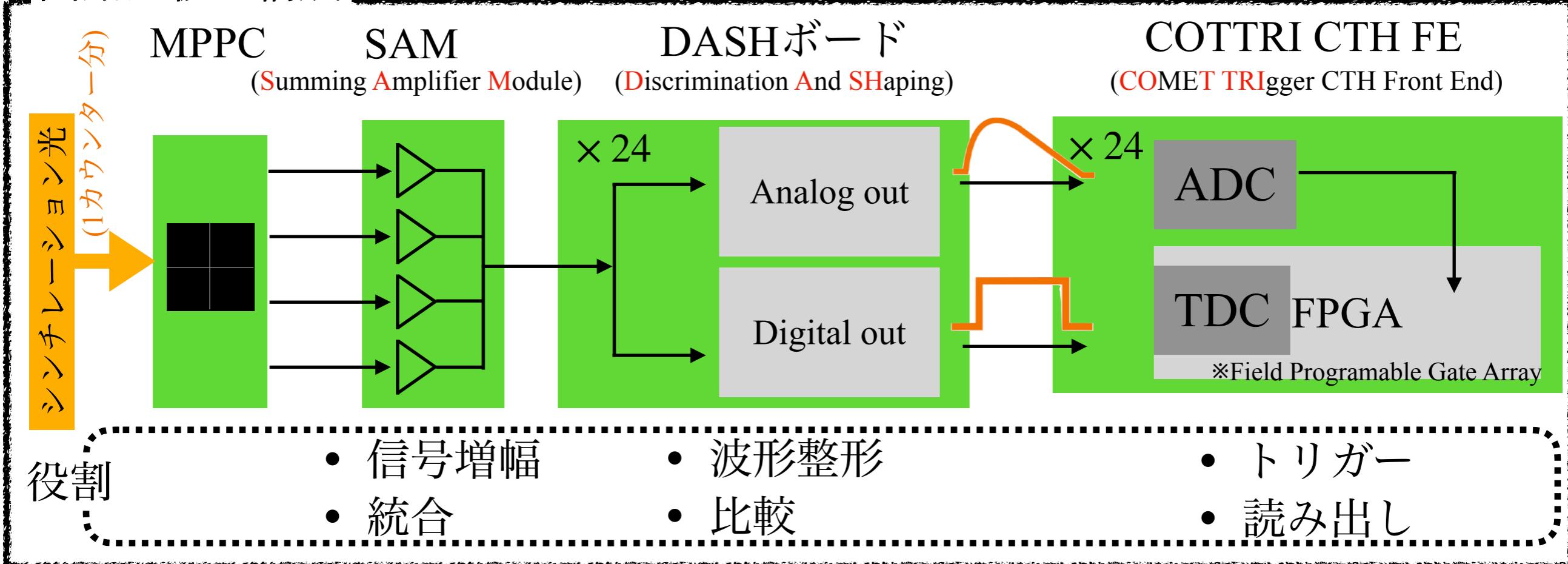
COTTRI CTH FE



(233 × 160 mm<sup>2</sup>)

(※以下 COTTRI)

## 回路基板の構成



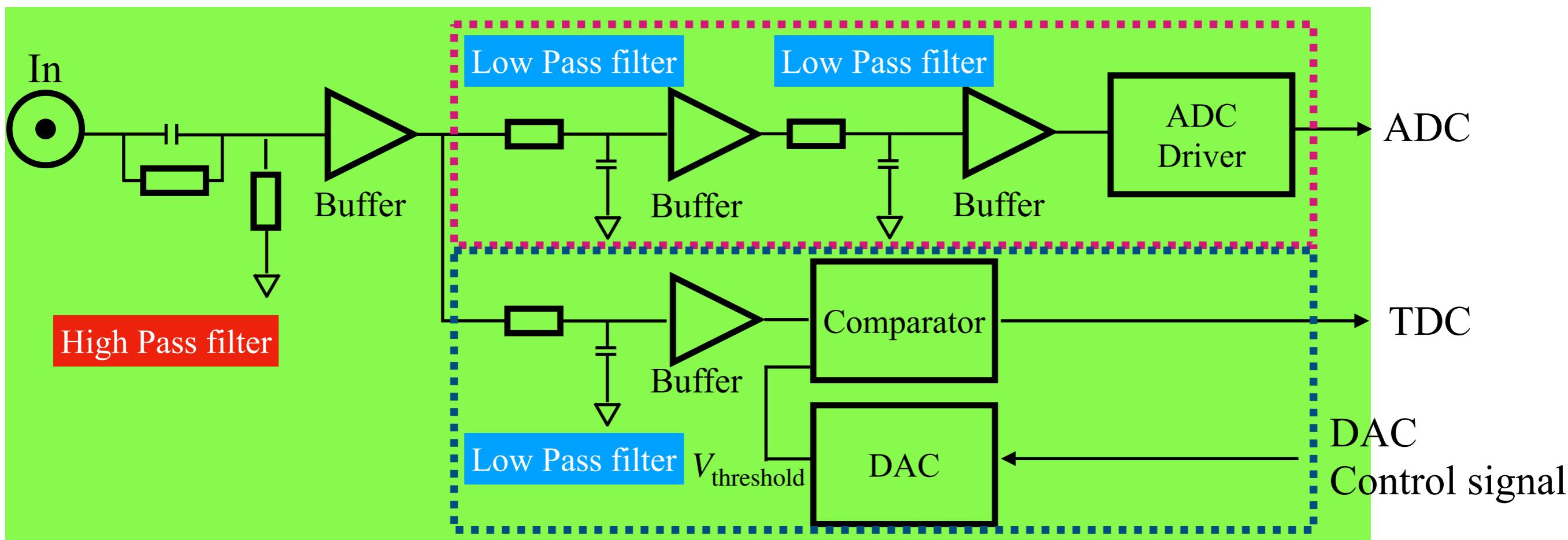
# DASHボード

## 役割

アナログ信号をデジタル変換する準備

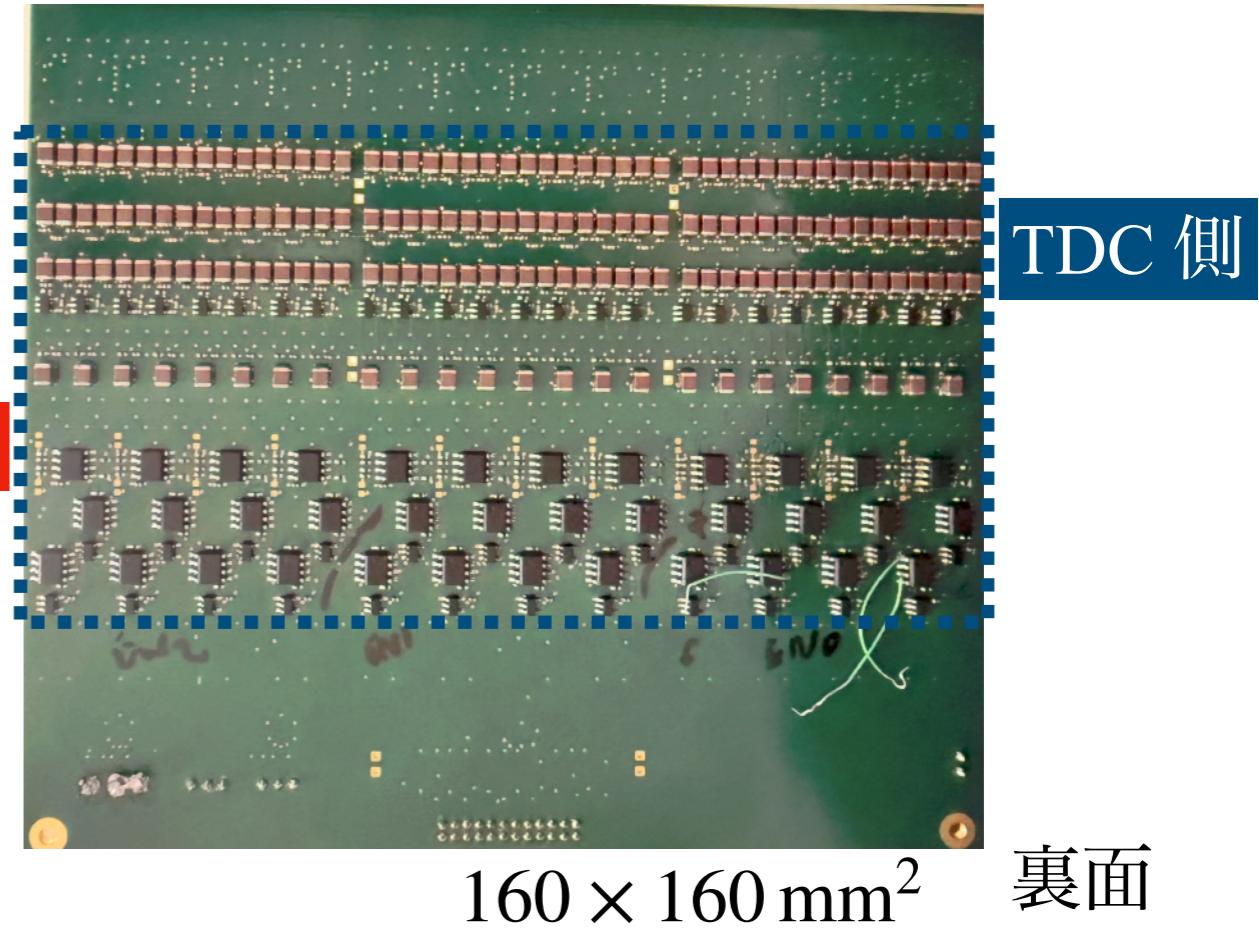
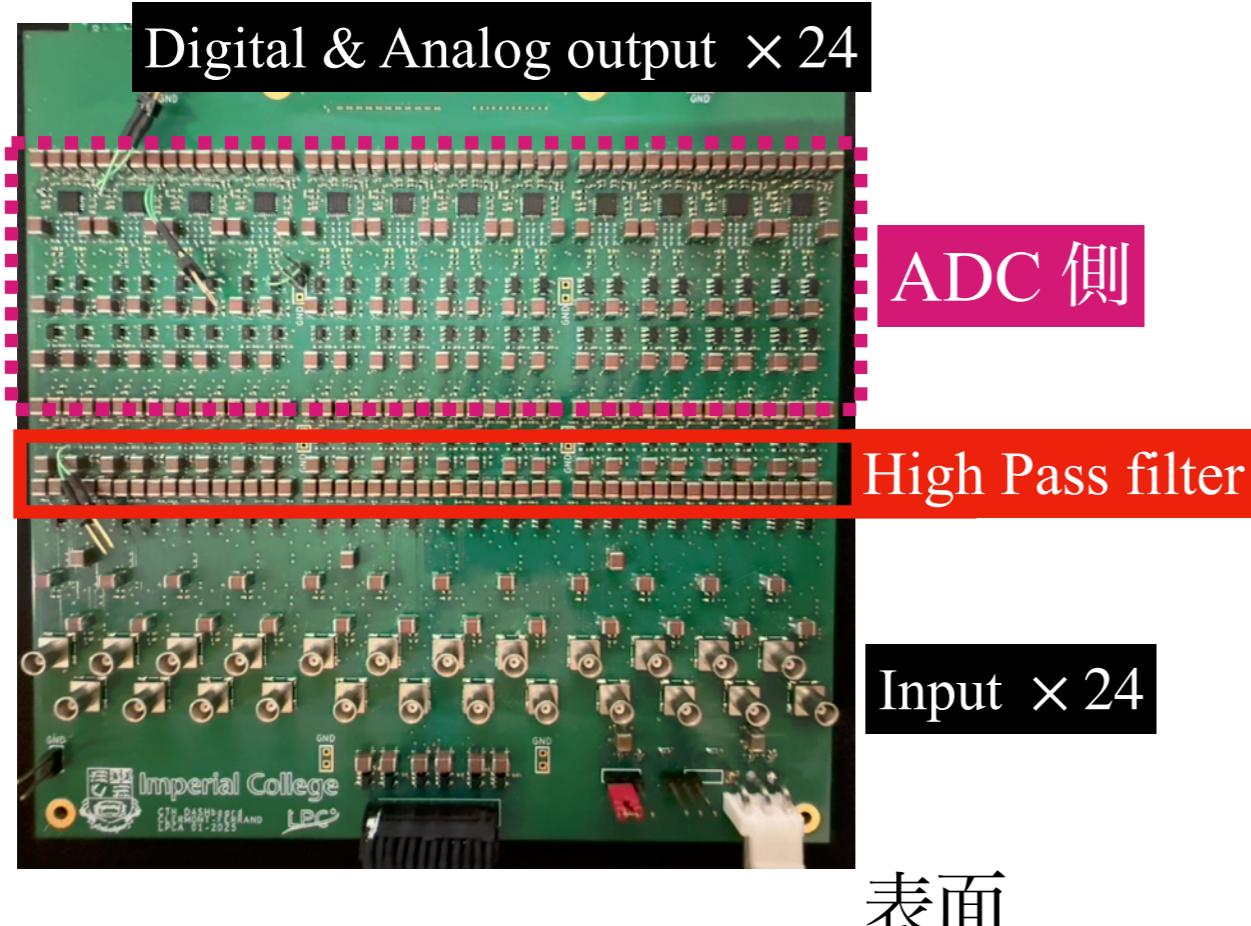
- ADC側：波形整形
- TDC側：信号比較

## 回路の簡略図



# DASHボードの試作機

実機

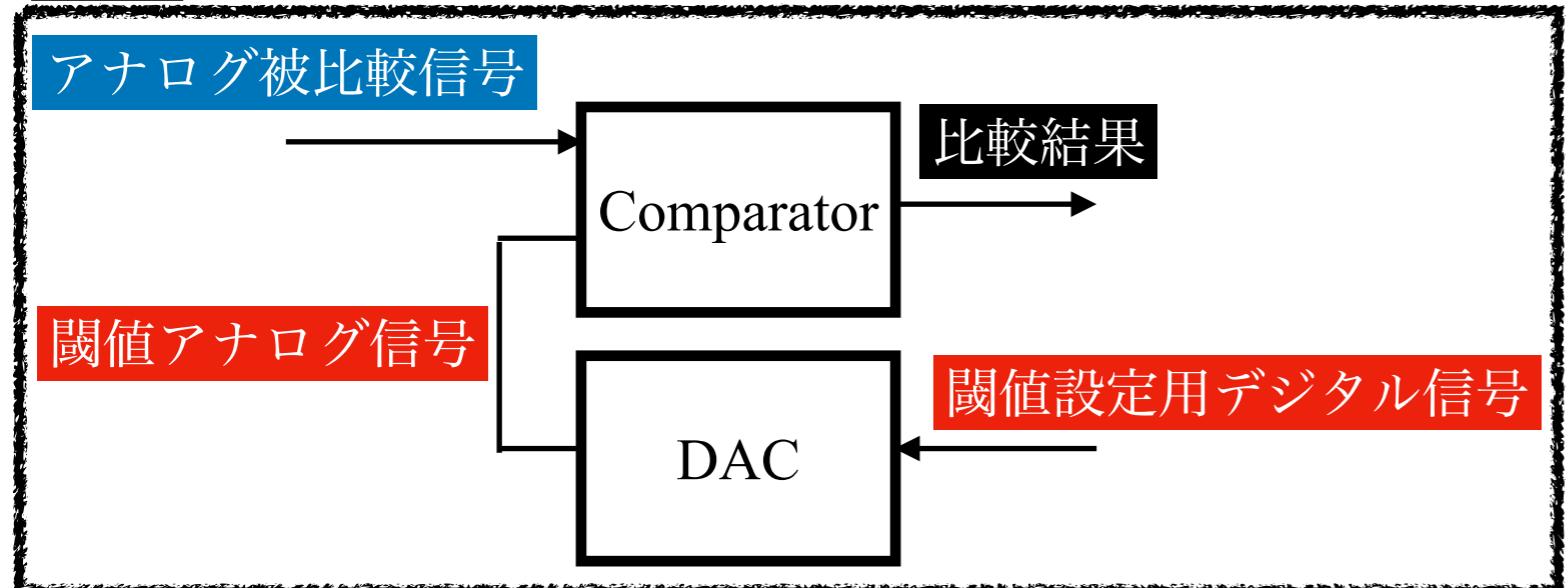


本講演では、

- DACの調整幅の調査 → 改善の要請
- 回路基板の改善
- DASHボードを用いたCTHの回路基板の性能評価

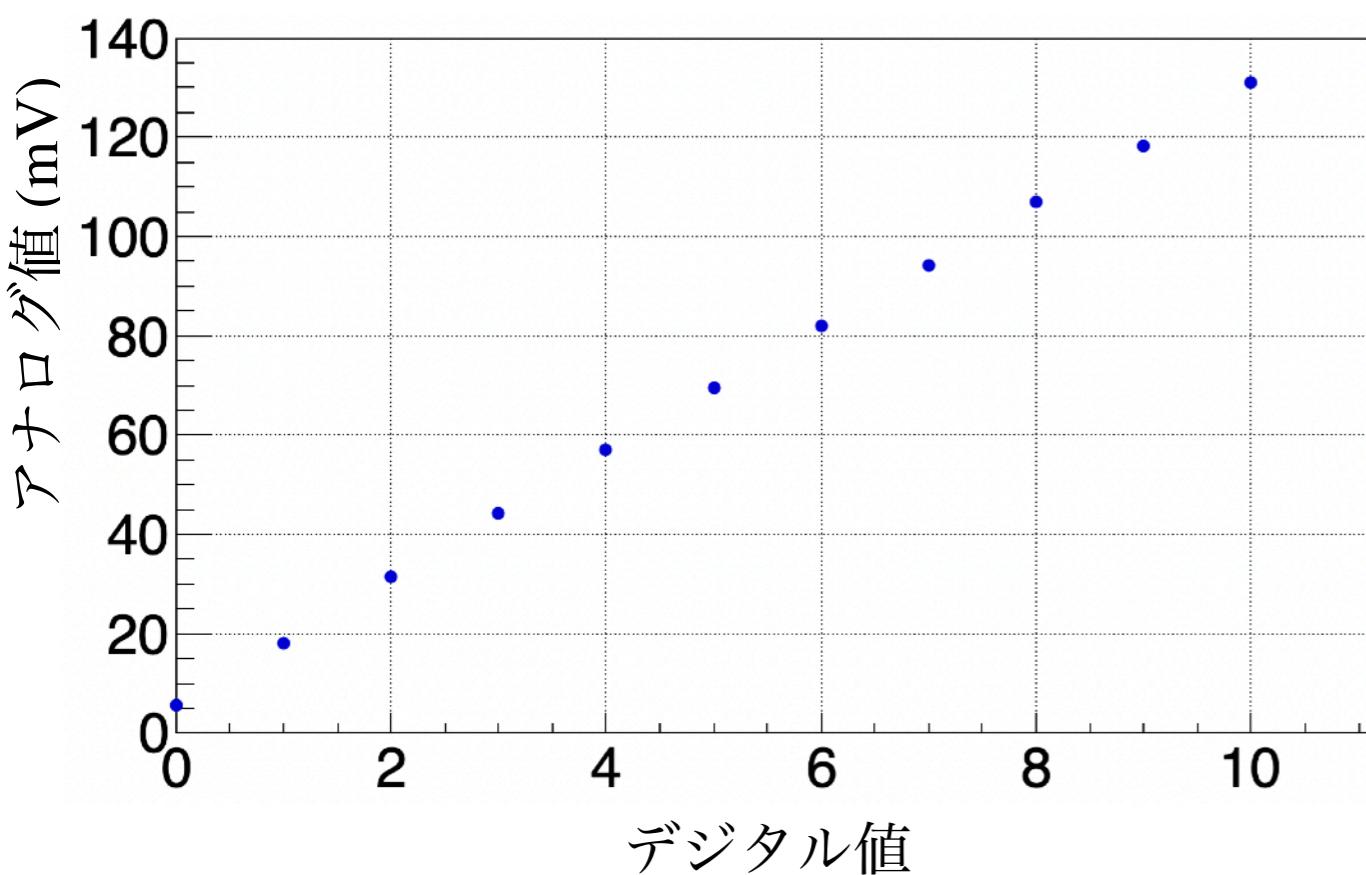
# DACの調整幅の調査

## DAC



閾値の設定値をデジタルで変換し、その時のアナログ信号を測定

## 結果



- 最小閾値アナログ値：約6 mV
- 閾値ステップ：約13 mV
- Comparator直前の1 p.e.の信号～2.5 mV  
→ 今後ステップ間隔を調整予定

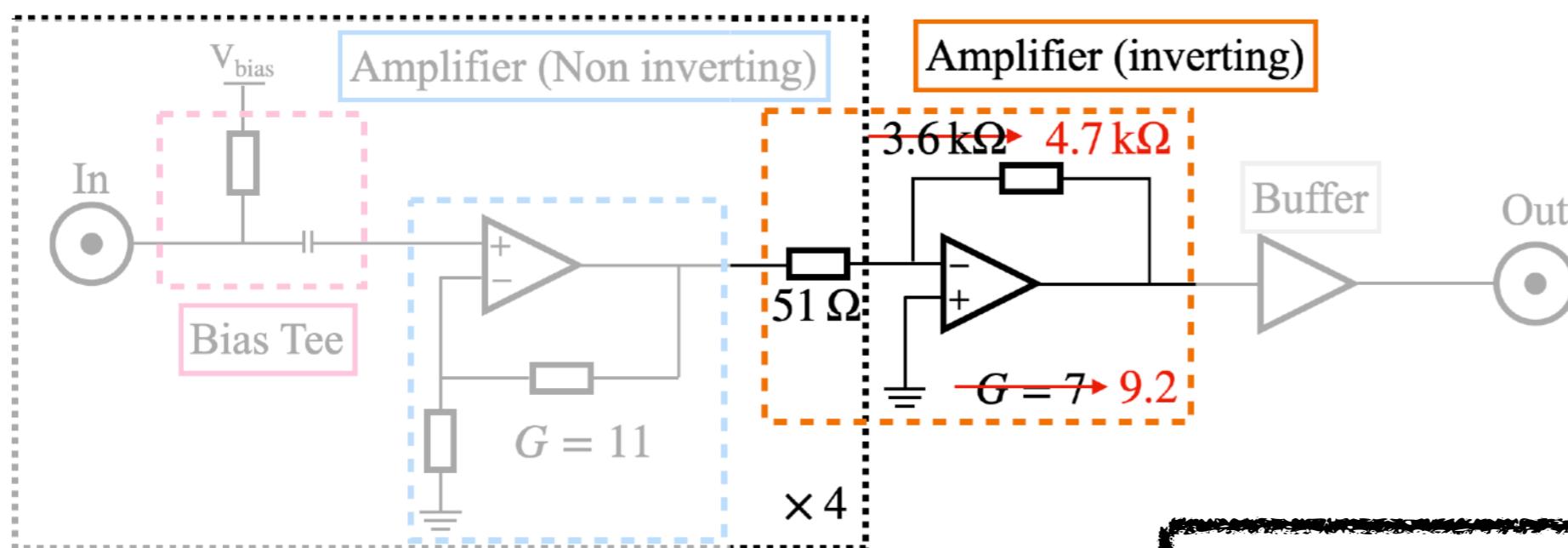
## 回路全体としての改善案

- SAMのゲイン調整
- DASHボードのカットオフ周波数の調整

# SAMの改良とその評価方法

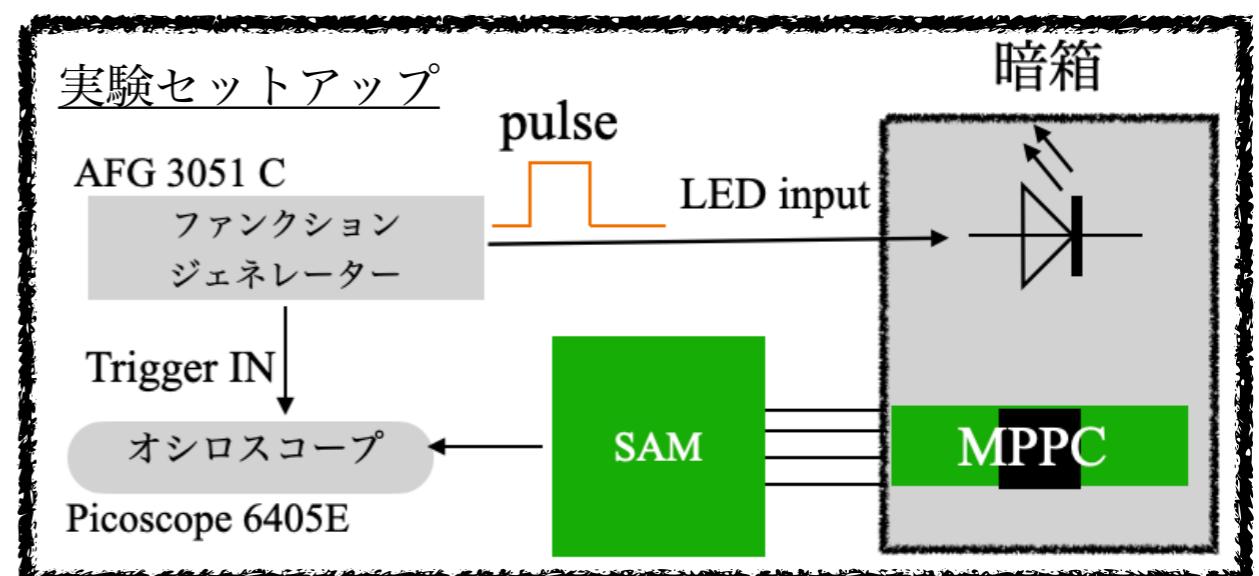
- CTHで使用するMPPCのゲインが想定よりも小さい
- 現行のDASHのDACの調整幅が大きい  
→ SAMのゲインを上げる

## 回路の簡略図

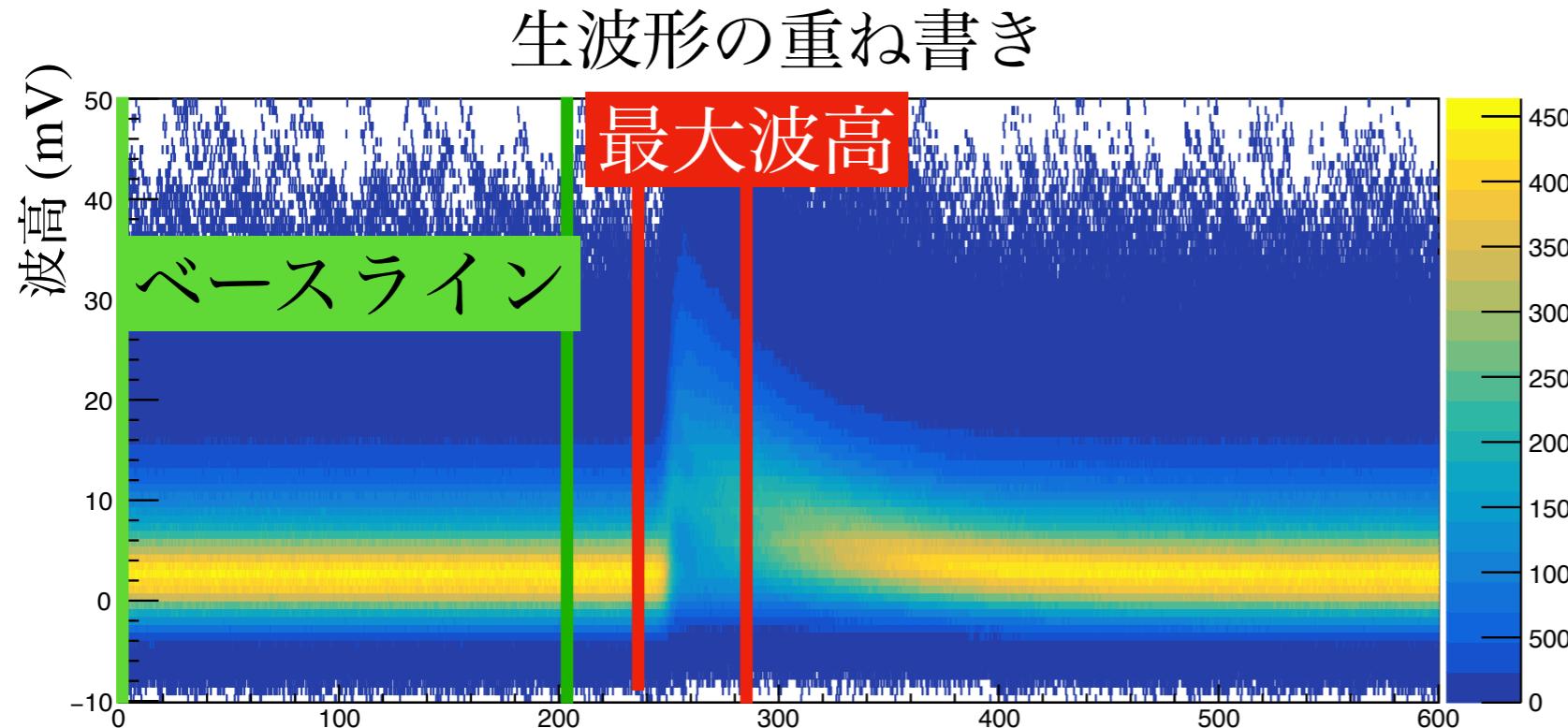


## 評価方法

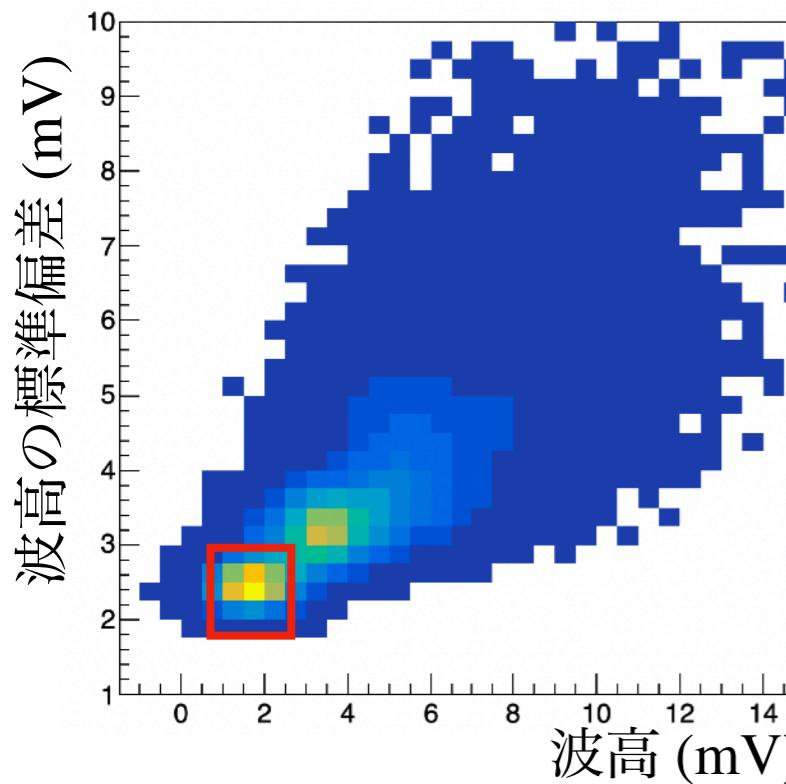
1 p.e.相当の信号波高の大きさを比較



# 取得される波形とフィルタリング



## データ選別とフィルタリング

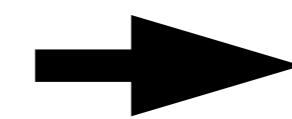


### ベースラインによるデータ選別

- ベースラインの波高 vs 波高の標準偏差
- トリガー以前のノイズ発生イベントの除去

### 移動平均

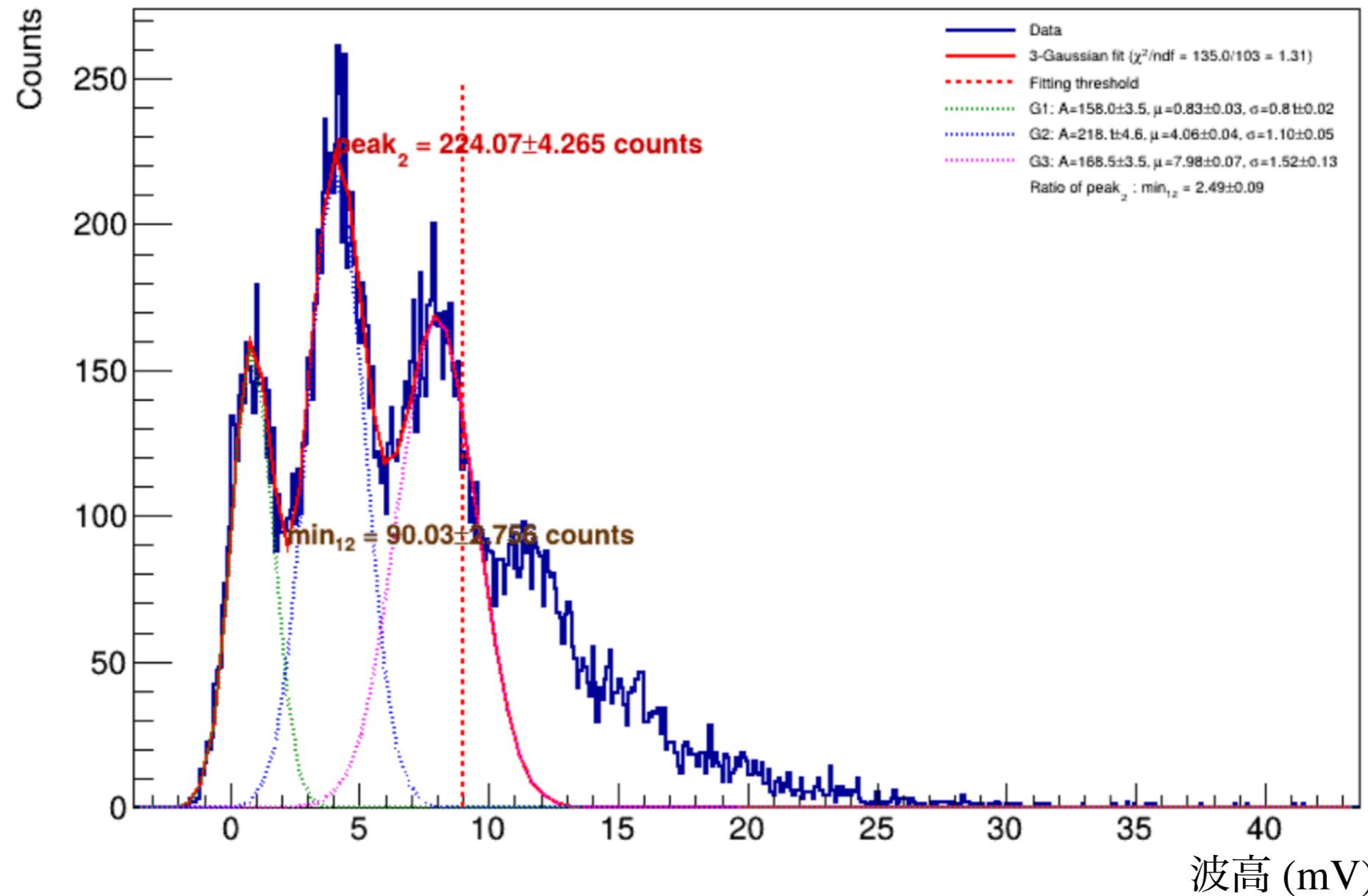
- 高周波ノイズ除去のため、20 MHz相当の移動平均



最大波高分布の分解能を上げる

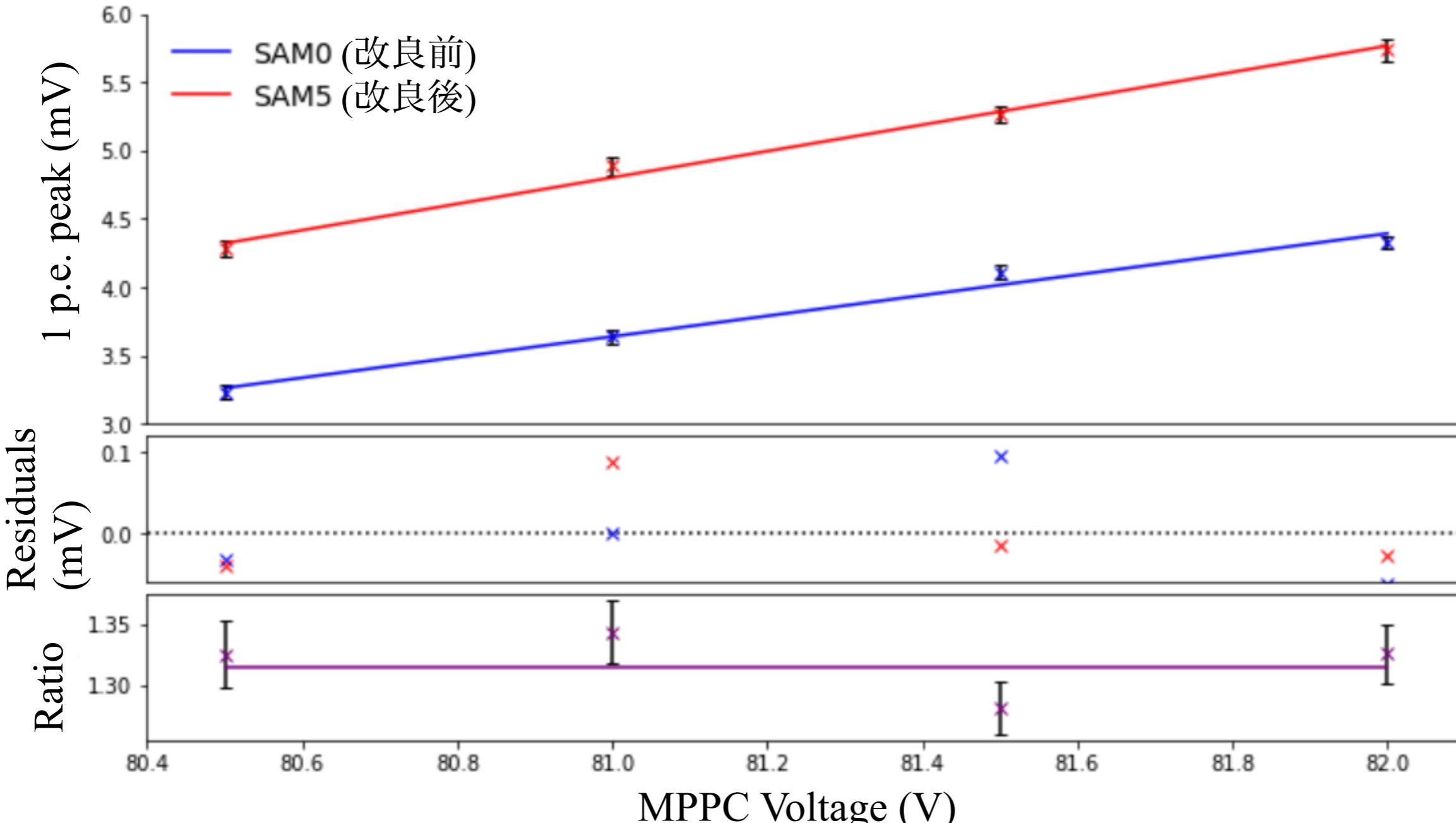
# 評価方法

Peak height distribution (MA = 30)



- セパレーションのピークをガウス関数でフィッティング
- ピーク間の波高 = 1 p.e. の波高に対応
- 本評価ではペデスタル - 1 p.e. のピーク間隔を評価に使用

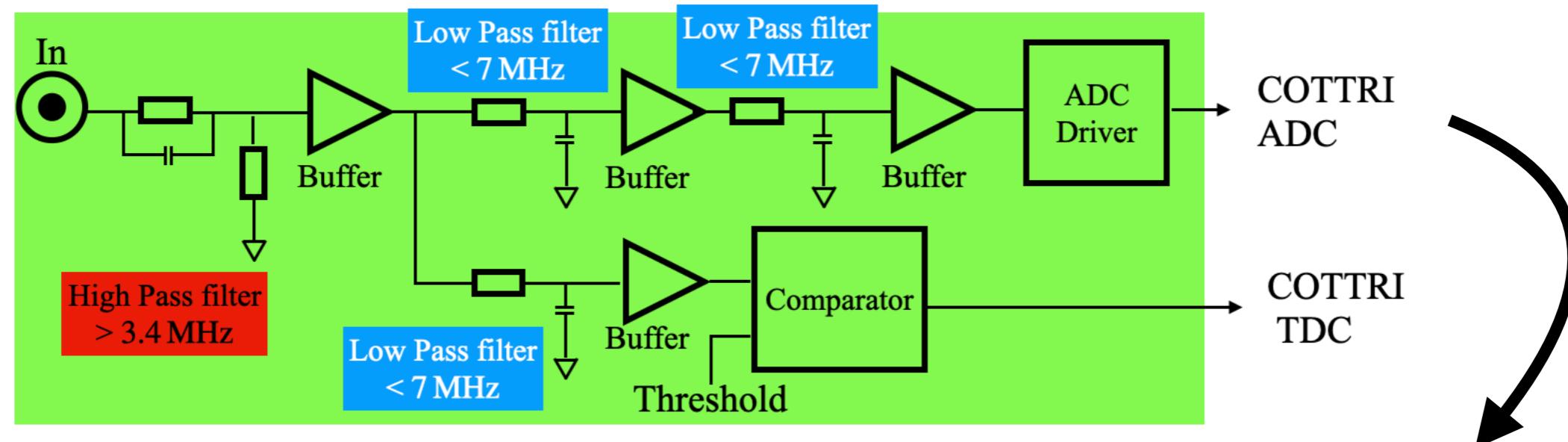
# 結果



- 予想通り、ゲインが1.3倍になった

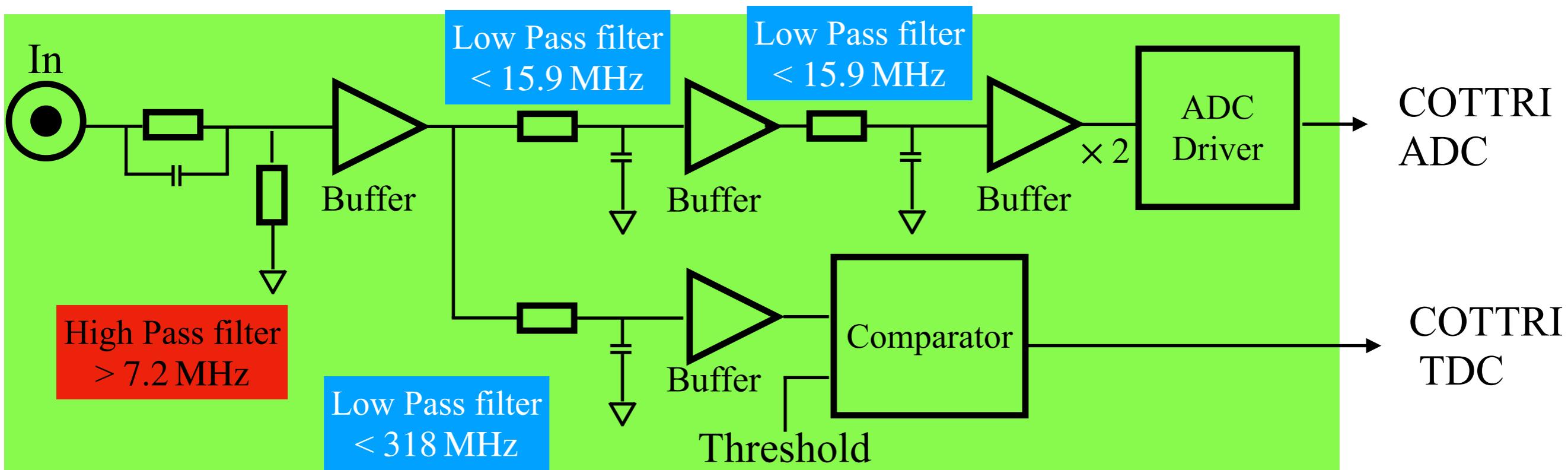
# DASHボードのカットオフ周波数の調整

調整前



COTTRI  
ADC

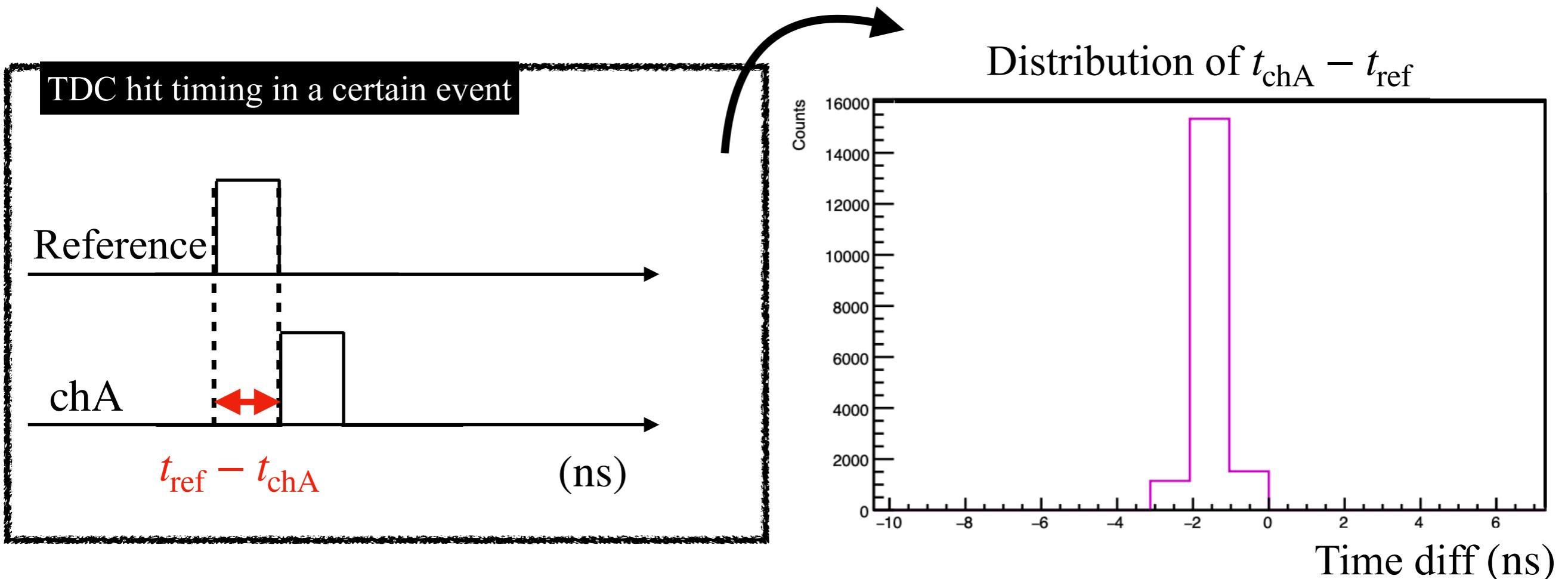
COTTRI  
TDC



High pass filter: MPPCのテールを短縮 → 高レート耐性

Low pass filter: MPPCの信号の立ち上がり成分を保持

# 時間分解能測定の評価方法



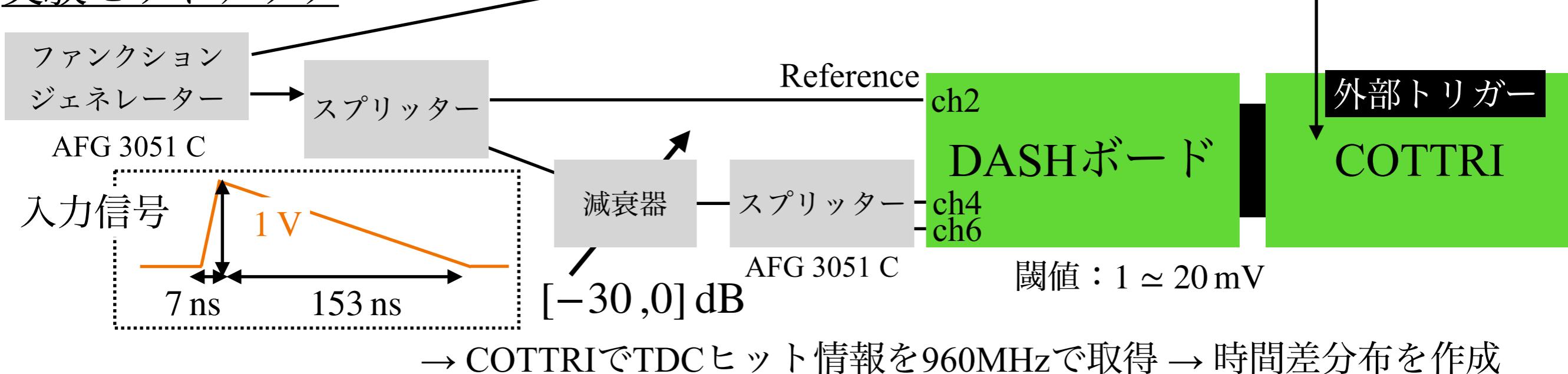
- Suppose  $\text{Cov}(t_{\text{ref}}, t_{\text{chA}}) = 0$
  - $\text{Var}(t_{\text{ref}} - t_{\text{chA}}) = \text{Var}(t_{\text{ref}}) + \text{Var}(t_{\text{chA}}) = \sigma^2 \leftarrow \text{Variance we get}$
  - Suppose  $\text{Var}(t_{\text{ref}}) = \frac{(1000/960)^2}{12}$
- Timing resolution  $\sigma_{\text{chA}} = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_{\text{ref}}^2} = \sqrt{\sigma^2 - \frac{(1000/960)^2}{12}} < 1 \text{ ns is required.}$

# DASHボード+COTTRIの接続試験

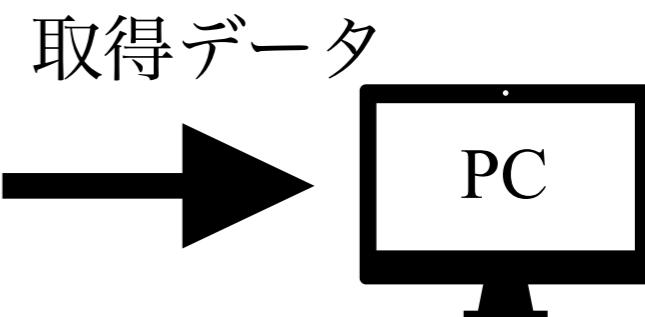
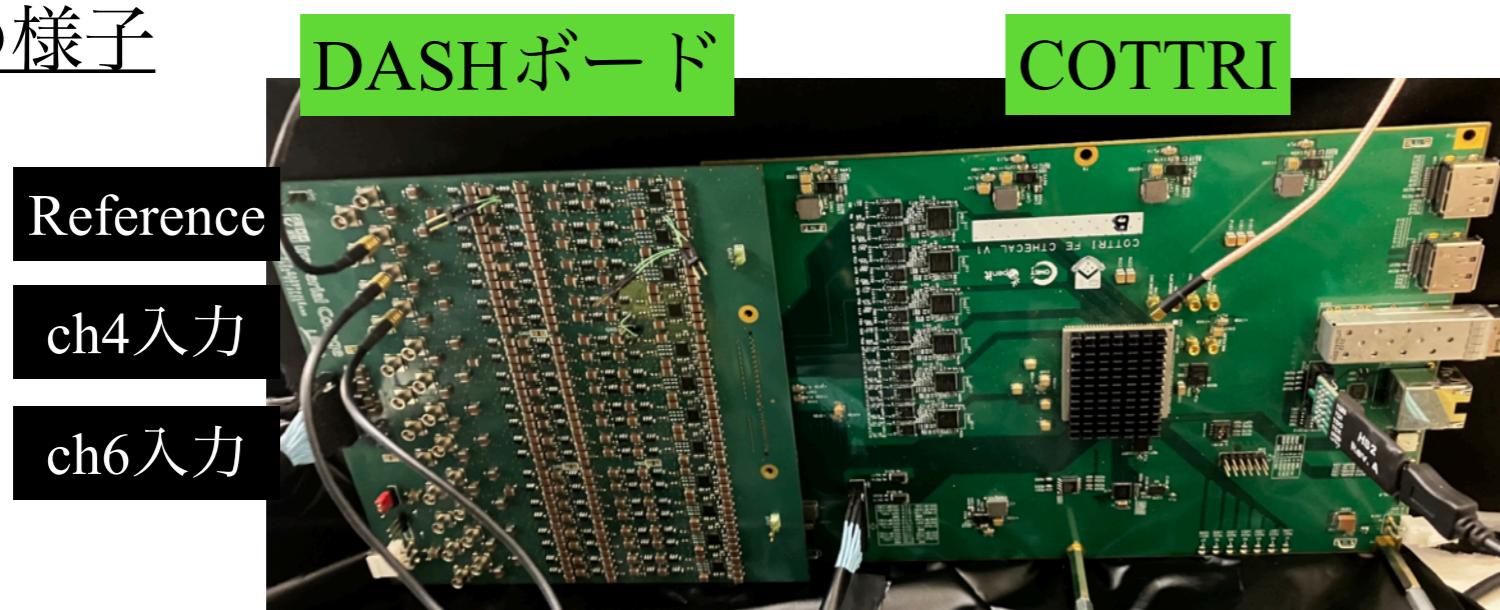
## 評価項目

- ADC値の入力波高に対する線形性
- TDCの時間分解能

## 実験セットアップ

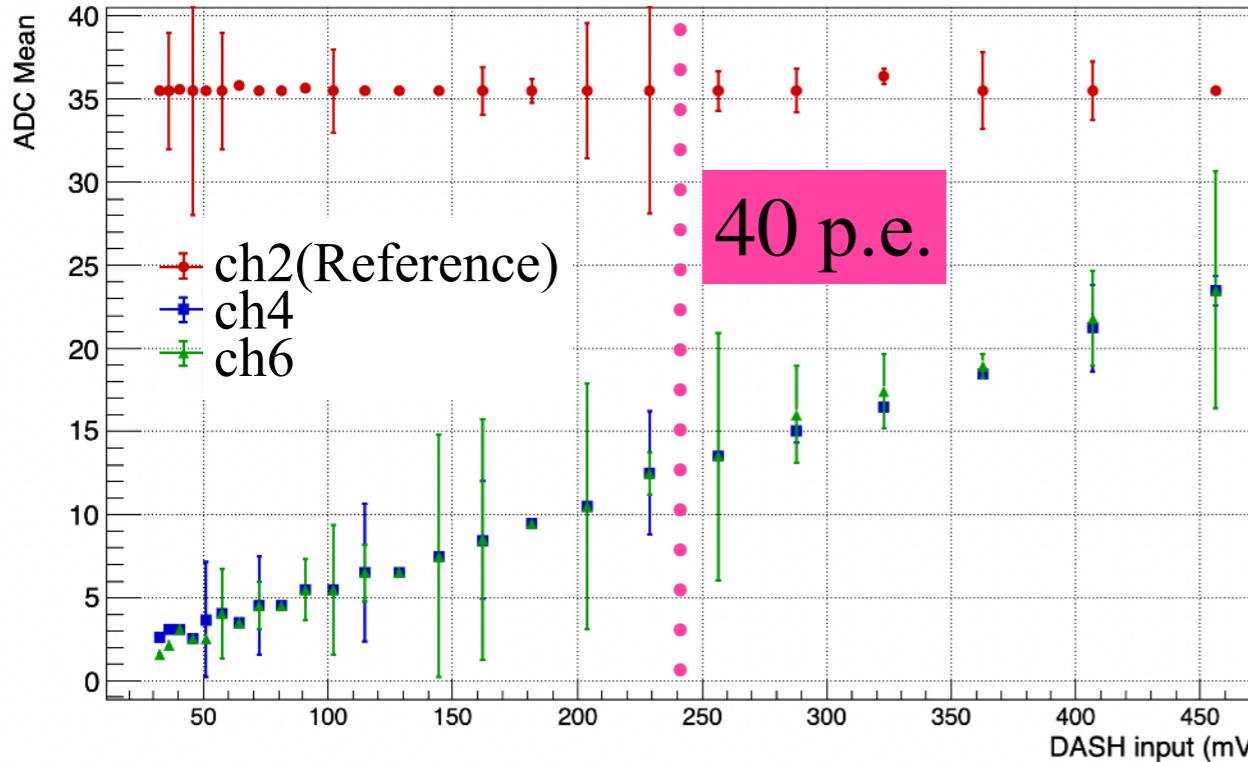


## 試験の様子

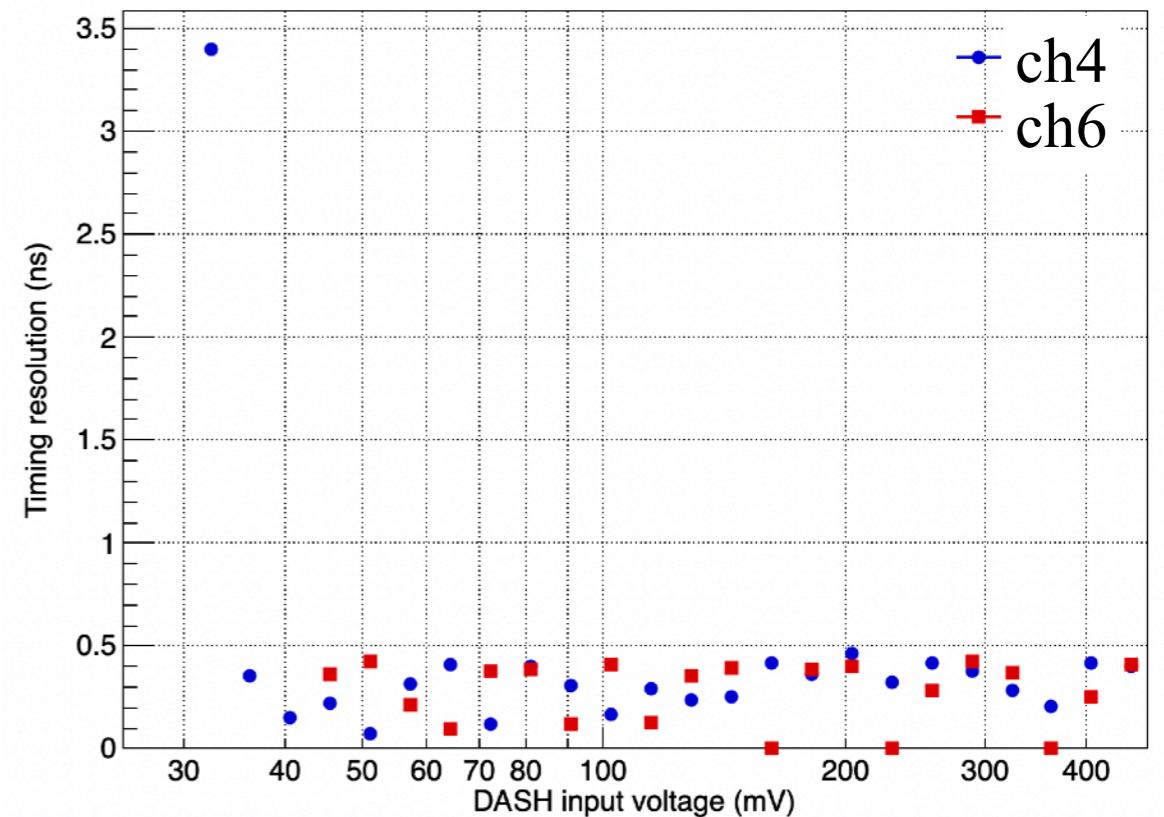


# 結果

DASH boardのADC波高の線形性



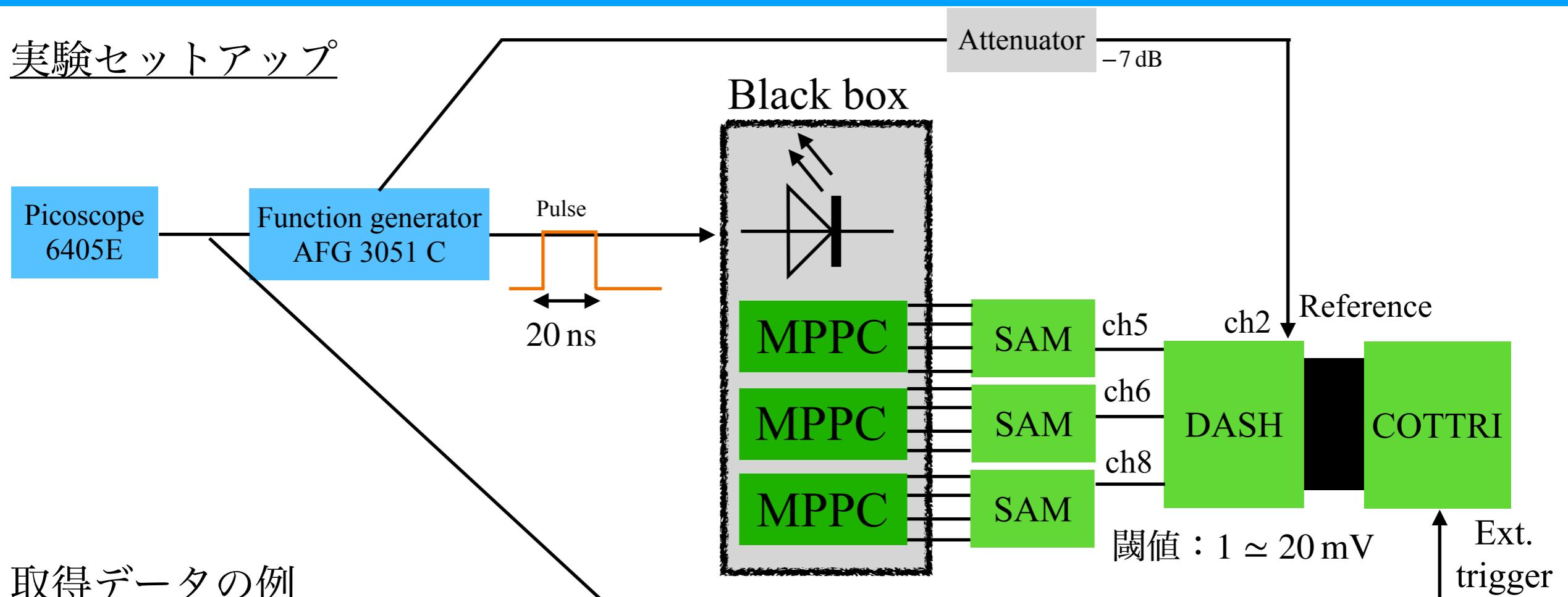
DASH board + COTTRIでの時間分解能



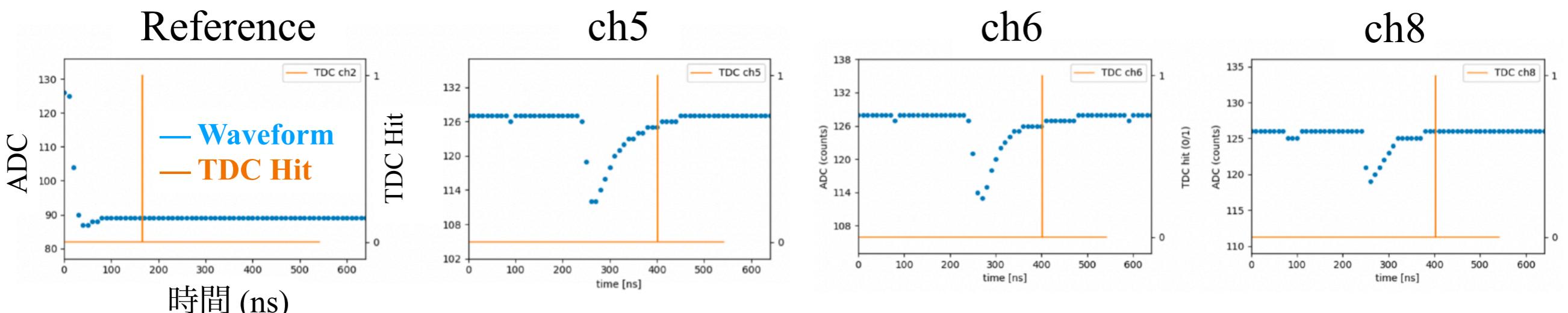
- ✓ ADC値の線型性を確認
- ✓ 閾値  $\simeq 20$  mV、入力波高 ch4  $\sim 32$  mV、ch6  $\sim 45$  mVに対して時間分解能  $< 1$  nsを満たすことを確認
- チャンネル依存性があることを確認

# Full chain試験

## 実験セットアップ



## 取得データの例

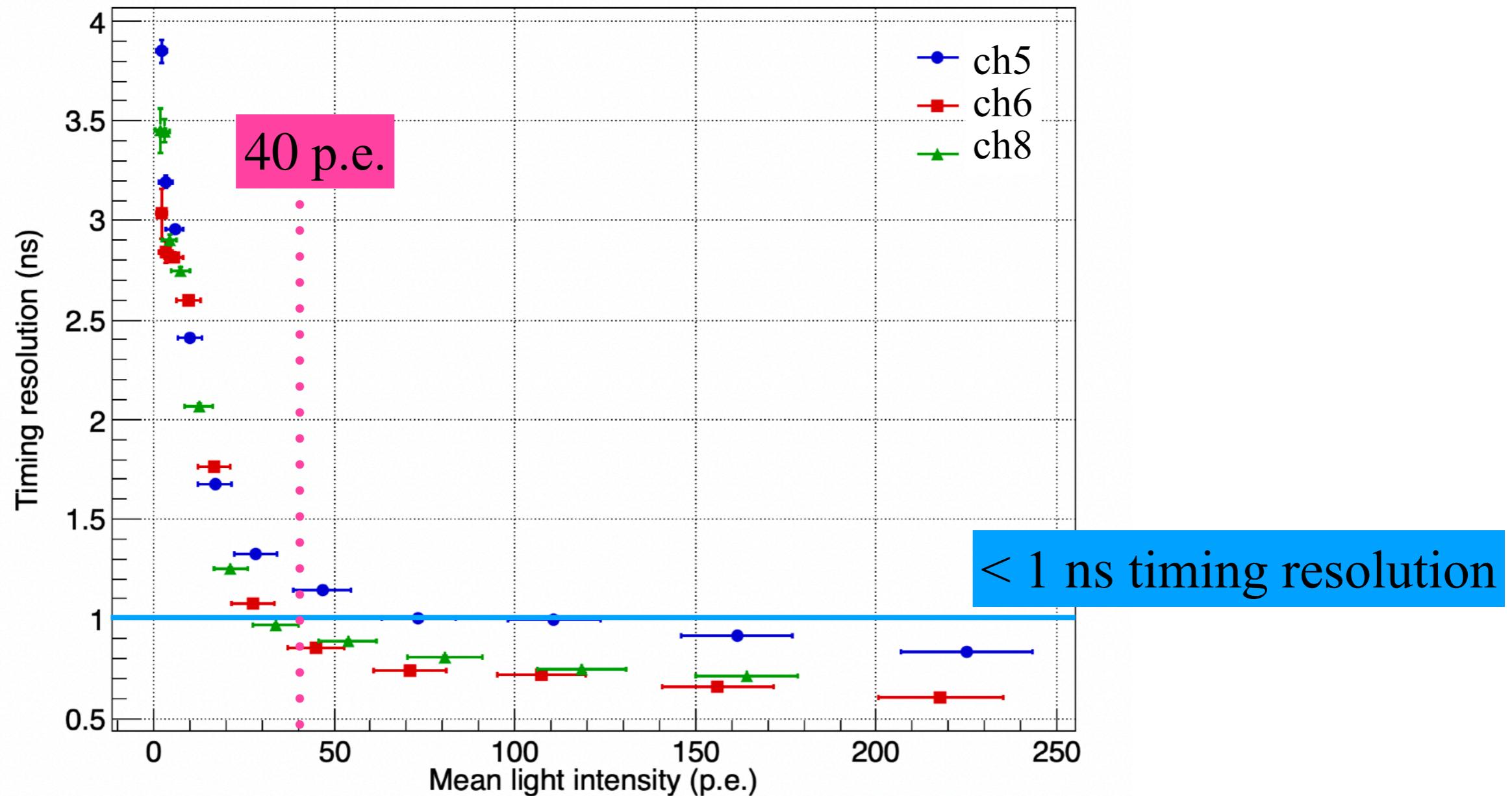


→ MPPCからのfull chainで信号の確認に成功

→ 先述の方法で解析

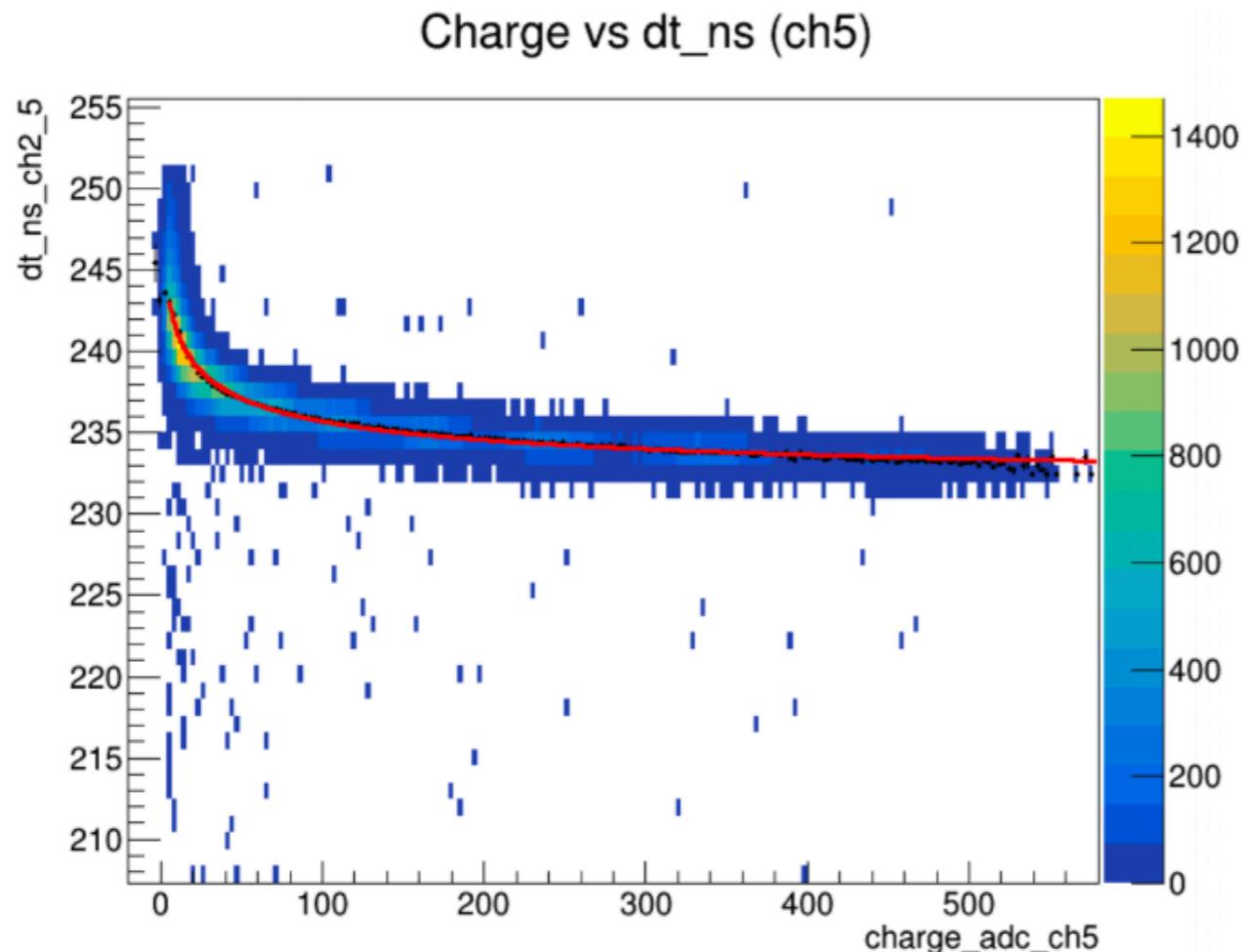
# 結果

## full chainでの時間分解能



- 約30p.e.相当以上の信号に対して、カウンター単体の時間分解能1 ns未満を達成  
(閾値 : DAC 1  $\simeq$  20 mV  $\simeq$  7 p.e.)
- Ch5の時間分解能が他のチャンネルよりも低い → 原因の分析中

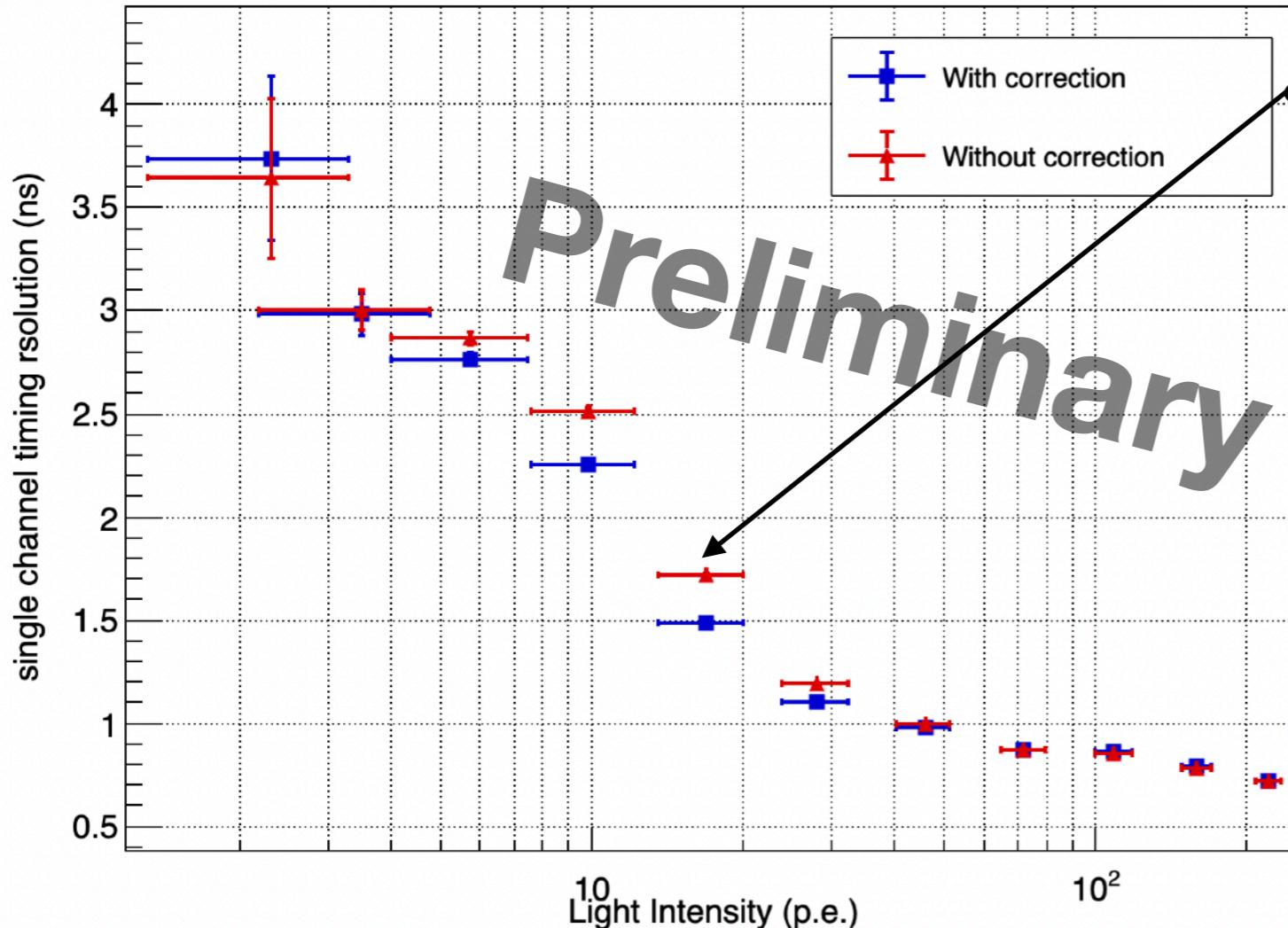
# Time walk correction



- 補正用のデータサンプルから( $\text{ADC integral}_{\text{ch}}$ ) vs  $(t_{\text{ch hit}} - t_{\text{ref hit}})$  の分布を作成
- $\frac{p_1}{\sqrt{x + p_2}} + p_0$  でフィット
- 得られたパラメータで $(t_{\text{ch hit}} - t_{\text{ref hit}})$ を補正

# Timewalk補正による影響

ch5-ch6チャンネル間時間差の分布のRMS/ $\sqrt{2}$

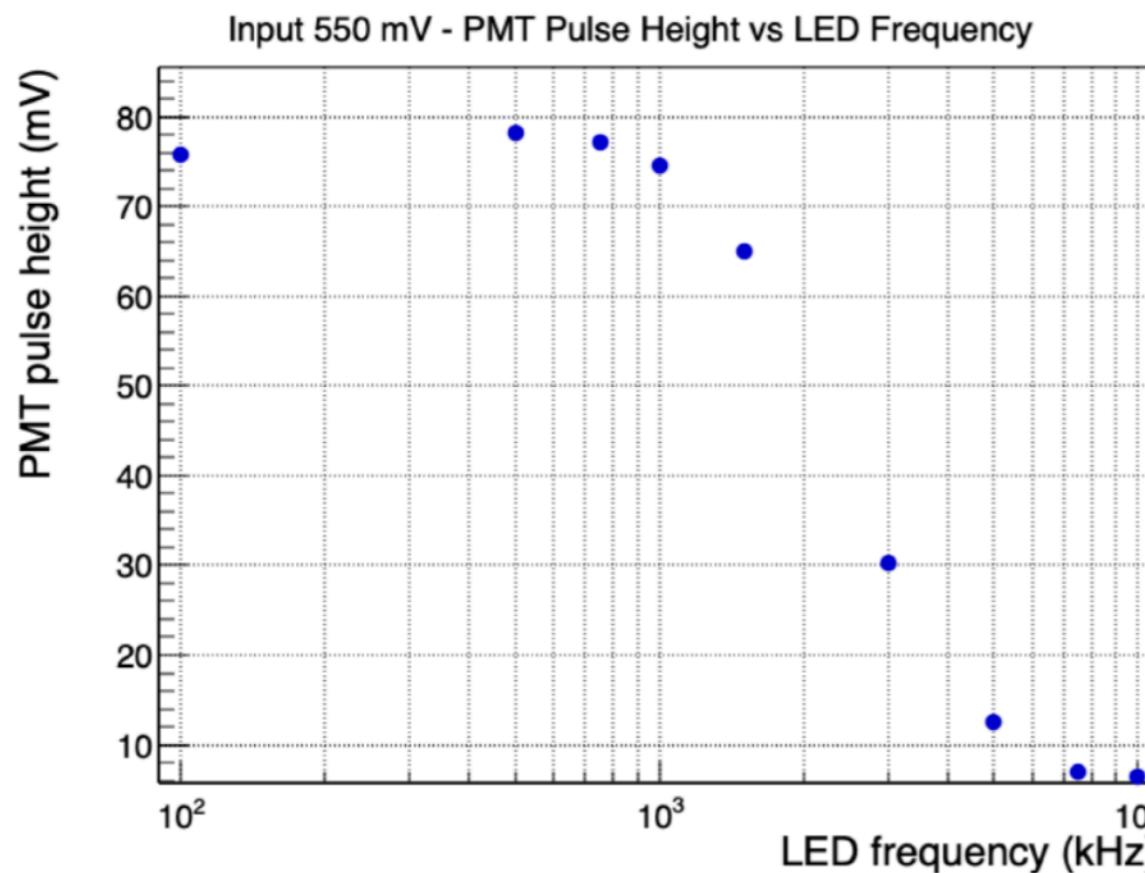


Above this light intensity, for almost all events and all channels are triggered.

- Threshold付近の信号が支配的な領域で時間分解能が向上  
→ 波高依存のタイミングのズレを補正が可能  
→ 4重コインシデンスからの粒子の入射タイミングの決定の分解能が向上

# たくさんの課題

- DASHボードコンパレータ直前にチャンネルごとのオフセットを確認
- DACの調整幅 → Ver.2で改善
- 高レート耐性試験 未



LEDを高レートで光らせることができない。。。。

# まとめと今後の展望

## まとめ

- COMET Phase-I実験は  $\mu$ -e転換過程の探索に向け、J-PARCで準備中
- DASHボードを新たに開発・性能評価
- 時間分解能
  - DASH board + COTTRI : 十分な大きさの入力に対して1 ns未満の時間分解能を達成
  - Full chain : 約30p.e.相当以上の信号に対して、カウンター単体の時間分解能1 ns未満を達成 (閾値約7 p.e.相当)
  - Timewalk補正によるさらなる時間分解能の向上が期待される

## 今後の展望

- 電子回路基盤の高レート耐性試験
- CTHの検出器からのfull chainでの性能評価

# Back Up