

# J-PARC muon $g - 2$ /EDM実験に 向けたシリコンストリップ検出器 の試験運用と性能評価

東京大学  
佐藤 太希

# 目次

0. タイトル
1. 背景 ( $\text{Muon } g - 2$  実験の目的)
2.  $g - 2$  検出器 (Silicon strip detector) の概要
3. MuSEUM 実験とは
4. なぜ MuSEUM で検出器試験を行う必要があるのか
5. ビーム試験セットアップ
6. 結果
  - 6-1. タイムスペクトラム
  - 6-2. ToT 分布
7. ノイズに関する追加調査
  - 7-1. ノイズ測定
  - 7-2. ノイズ増加要因
  - 7-3. ノイズ低減調査
  - 7-4. ノイズ低減手法
8. 新しい検出器製作に関して
9. まとめ
10. 今後の展望

# J-PARC muon $g - 2$ /EDM実験

3/21

## 目的: muon $g - 2$ の検証と世界最高感度でのmuon EDM探索

### 異常磁気モーメント ( $g - 2$ )

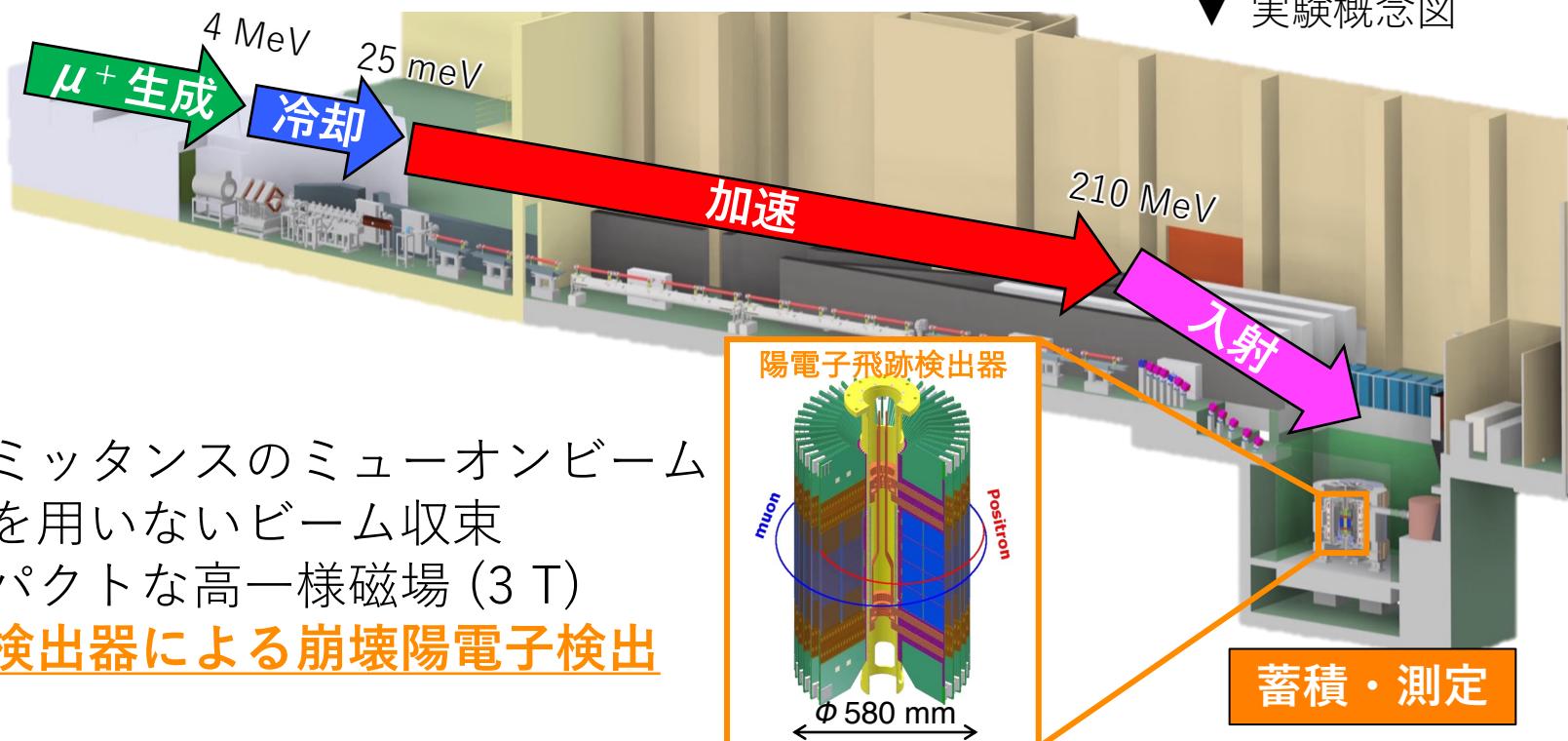
- 実験値: 0.12 ppm の精度 (FNAL)
- 標準理論とのすれば解決?

➤ 目標精度0.14 ppmで独立の検証

### 電気双極子モーメント (EDM)

- 時間反転対称性を破る → CP対称性を破る
  - 実験上限値:  $\sim 10^{-19} \text{ e}\cdot\text{cm}$**  ≫ 理論予測値:  $\sim 10^{-38}$
- 目標精度:  $10^{-21} \text{ e}\cdot\text{cm}$

▼ 実験概念図



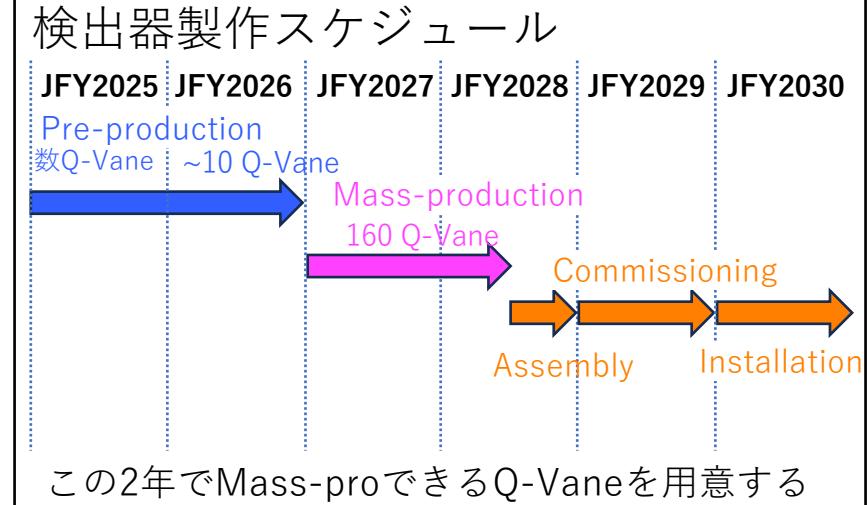
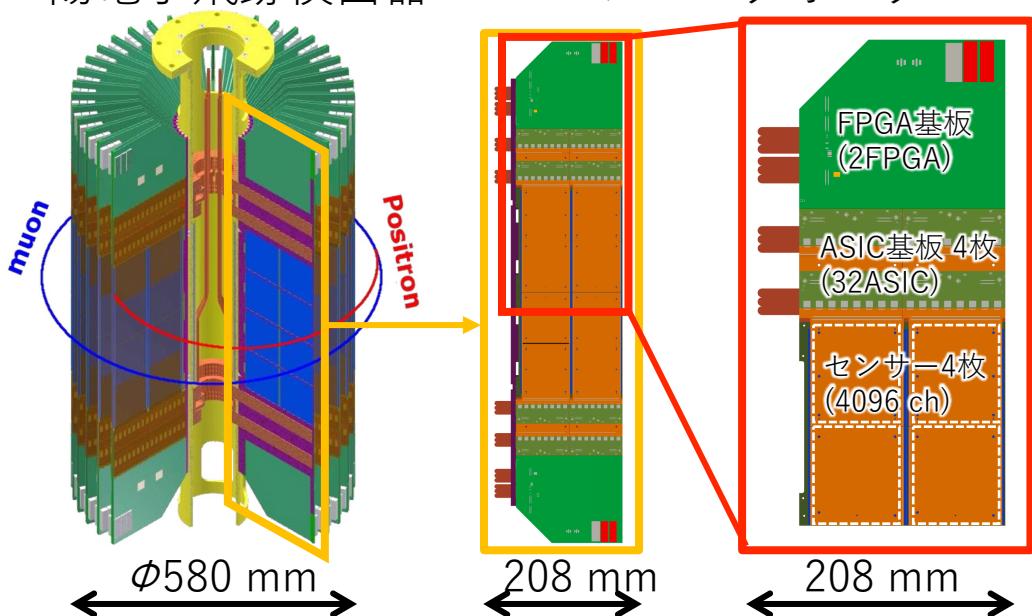
### 特徴

- 低エミッタンスのミューオンビーム
- 電場を用いないビーム収束
- コンパクトな高一様磁場 (3 T)
- 飛跡検出器による崩壊陽電子検出**

# 陽電子飛跡検出器の概要

- シリコンストリップ検出器の陽電子飛跡からmuon g-2/EDMを測定する
  - 40枚のベーン(クオーターベーン×4枚)を放射状に配置
  - シリコンストリップセンサー(浜ホト製S13804)を使用
- 要求
  - 真空中(0.1 atm)かつ**3 Tの磁場中**で動作し、蓄積領域の磁場を乱さない
  - 陽電子の運動量をバイアスなく測定するためのアライメント精度
  - 最大5 nsあたり30ヒットの計数率耐性(**最大~1 MHz/strip**)
  - ~150倍(寿命5周期分)の**計数率変化**に対する安定性

陽電子飛跡検出器 ベーン クオーターベーン



# MuSEUM実験

5/21

## ■ Mu超微細構造 (MuHFS) 測定

- 4 463 302 765(53) Hz (**12ppb**)
  - Stat. 51 Hz, Sys. 17 Hz

*W. Liu et al., Phys. Rev. Lett. 82 711 (1999)*

## ■ 高磁場MuSEUM実験の目標

- ~**(8) Hz (~2ppb)**
  - Stat. ~5 Hz, Sys. ~7 Hz

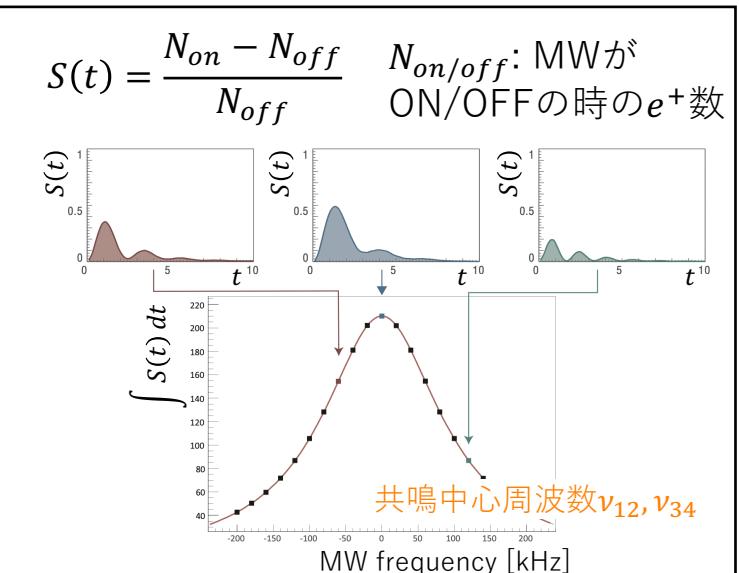
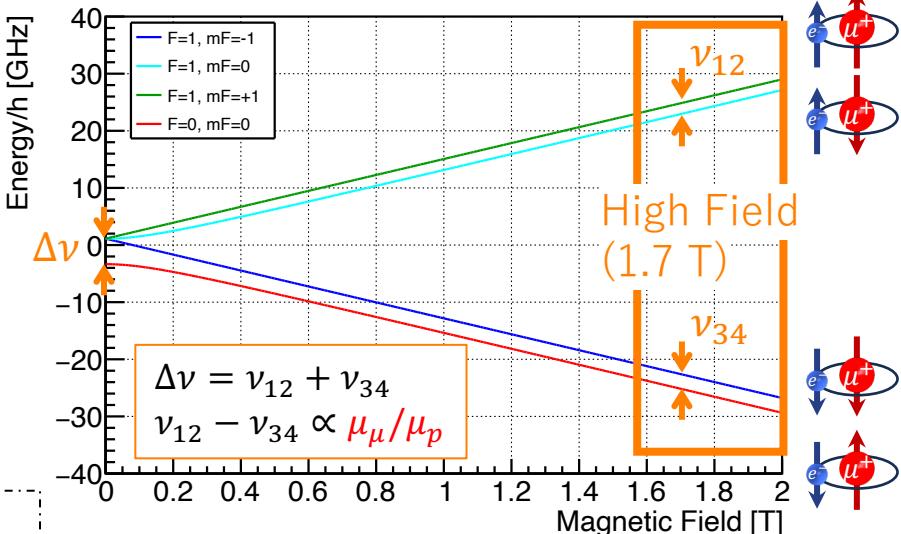
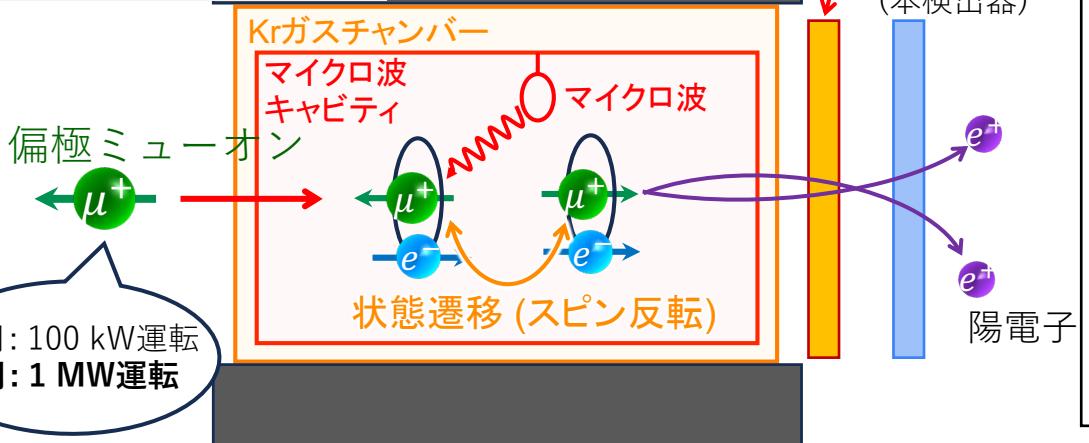
ミューオン  $g - 2$  の値

$$\frac{g - 2}{2} = \frac{\omega_a / \omega_p}{\mu_\mu / \mu_p - \omega_a / \omega_p}$$

- ① 偏極  $\mu^+$  入射による Mu 生成
- ② マイクロ波によるスピン反転
- ③ 陽電子数の非対称性

超伝導磁石

シンチレータ  
シリコン  
(本検出器)



# MuSEUM実験への応用

6/21

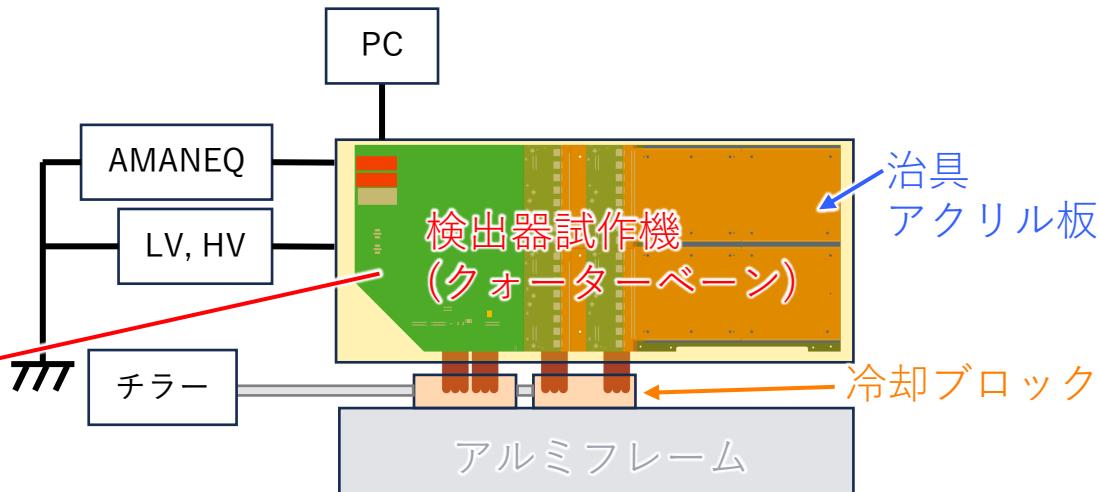
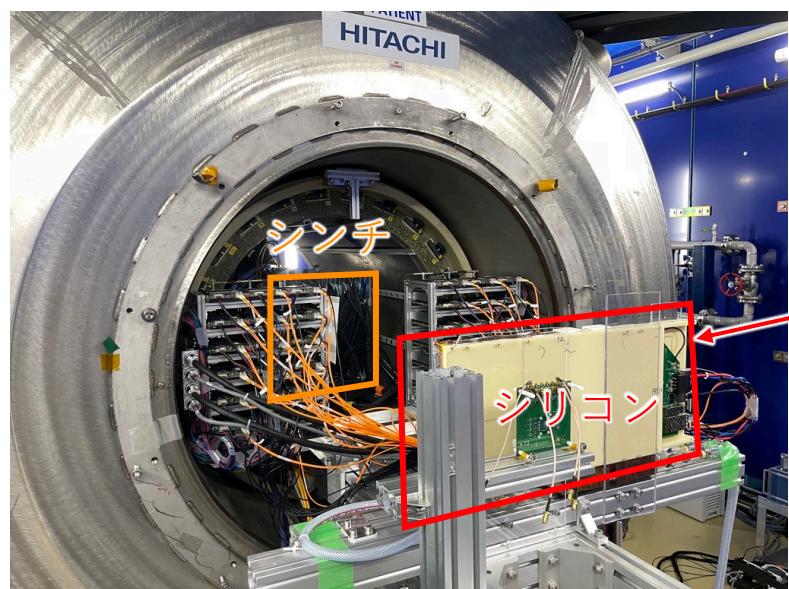
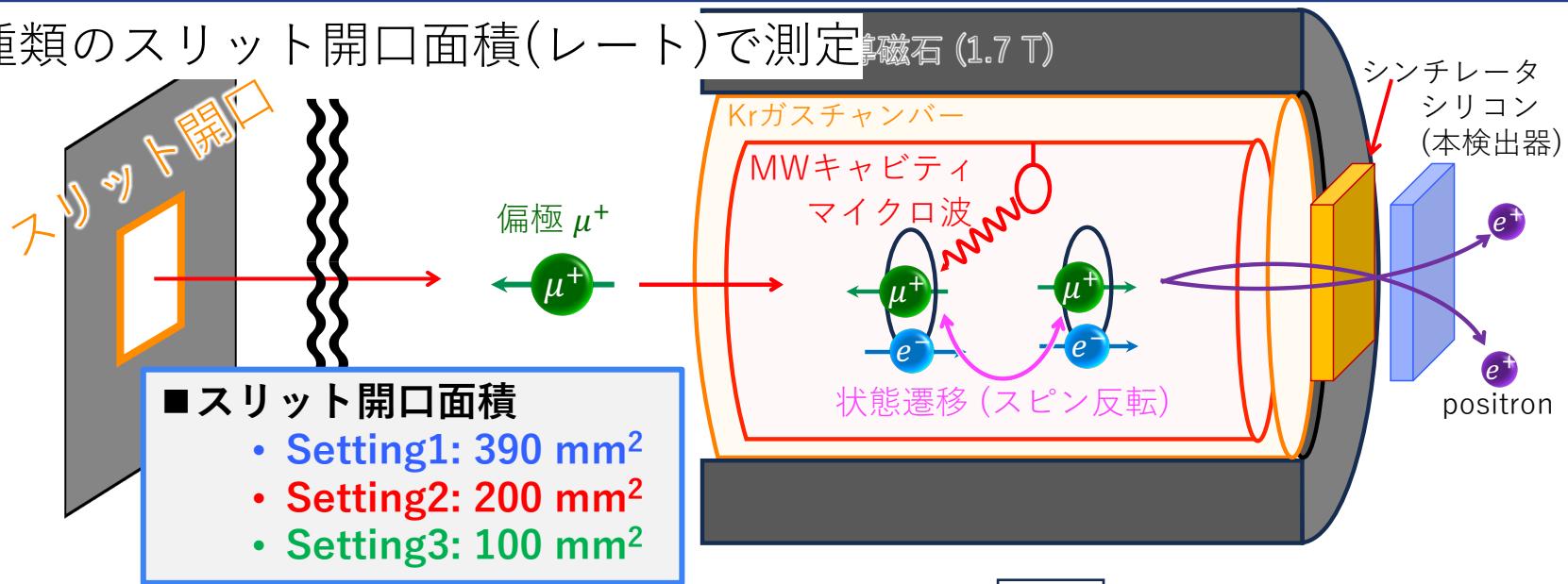
- 磁場環境: 1.7 T  $\leftrightarrow$   $g - 2$ 本番: 3.0 T
- 検出器環境: 1 atm  $\leftrightarrow$   $g - 2$ 本番:  $\sim 0.1$  atm
- レート:  $\sim 10$  MHz/ch  $\leftrightarrow$   $g - 2$ 本番:  $\sim 1$  MHz/ch
  - 最大で本実験の約10倍のレートがMuSEUMの結果から予想される
  - 本検出器は約10倍細分化されており、**実効レート  $\sim 1/10$  に低減可能**
    - レート耐性の向上 (予想パイルアップ確率 $\sim 20\% => \sim 5\%$ )

	シンチレータ (現状)	シリコンストリップ (本検出器)
面積	24 cm $\times$ 24 cm	20 cm $\times$ 20 cm (4枚)
サンプリング間隔	1 ns	$\xrightarrow{\times 5}$ 5 ns
パルス幅	50~100 ns	$\sim 100$ ns
チャンネル数	576 ch	4084 ch (4枚)
1 chあたりの面積	100 mm <sup>2</sup> (10 mm角)	$\xrightarrow{\times 1/10}$ 約10 mm <sup>2</sup> (50 mm $\times$ 0.2 mm)
予想最大レート	0(100)MHz/ch	$\xrightarrow{\times 1/10}$ 0(10)MHz/ch
予想パイルアップ	20~100%	5~60%

$g - 2$ 実験 → 高磁場高レート環境下での検出器動作の保証  
 MuSEUM実験 → レート耐性の向上、パイルアップ確率の低減

# ビーム試験セットアップ

3種類のスリット開口面積(レート)で測定



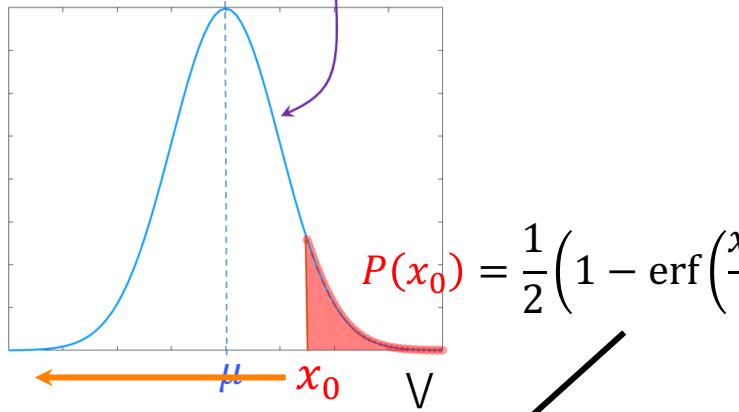
- チラーを用いて冷却水で冷却
- 冷却システムは検出器と絶縁

# ノイズ評価: S-curve scan

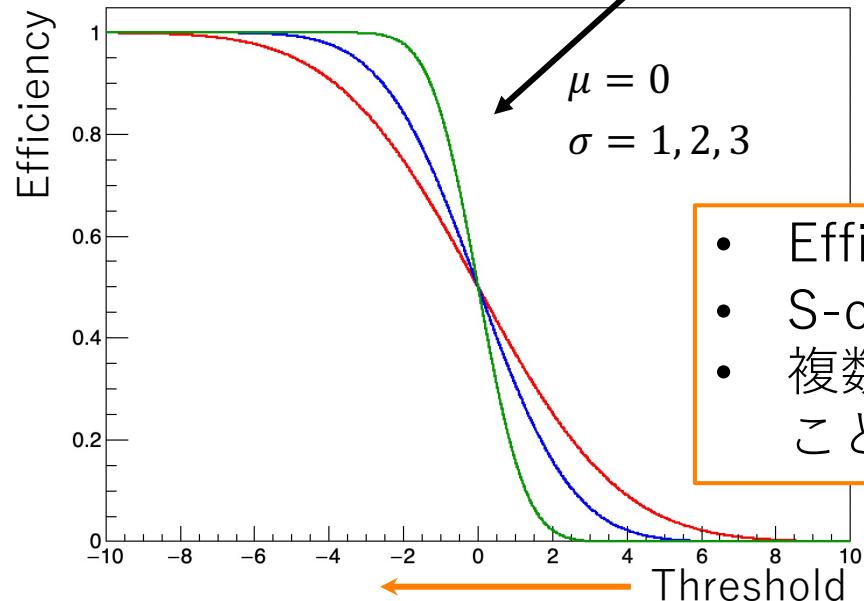
シグナル+ノイズ電圧がガウシアン分布だと仮定

- 閾値スキャンするとEfficiencyがS-curveになる

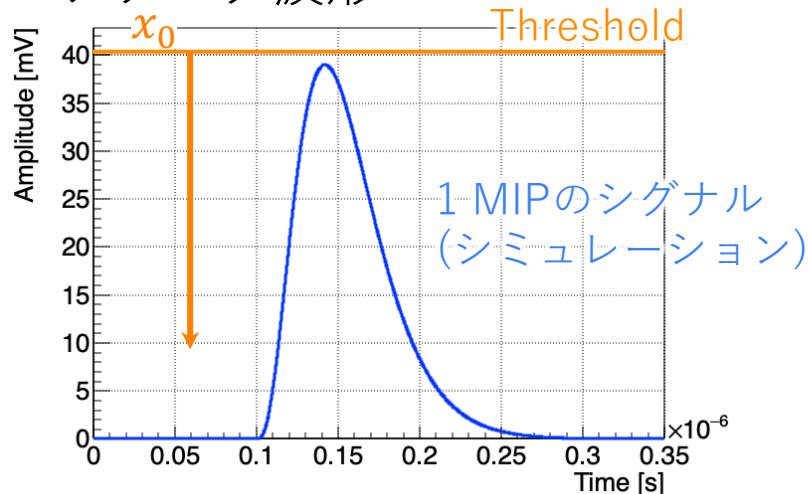
$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



$$P(x_0) = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x_0 - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right)$$



- アナログ波形



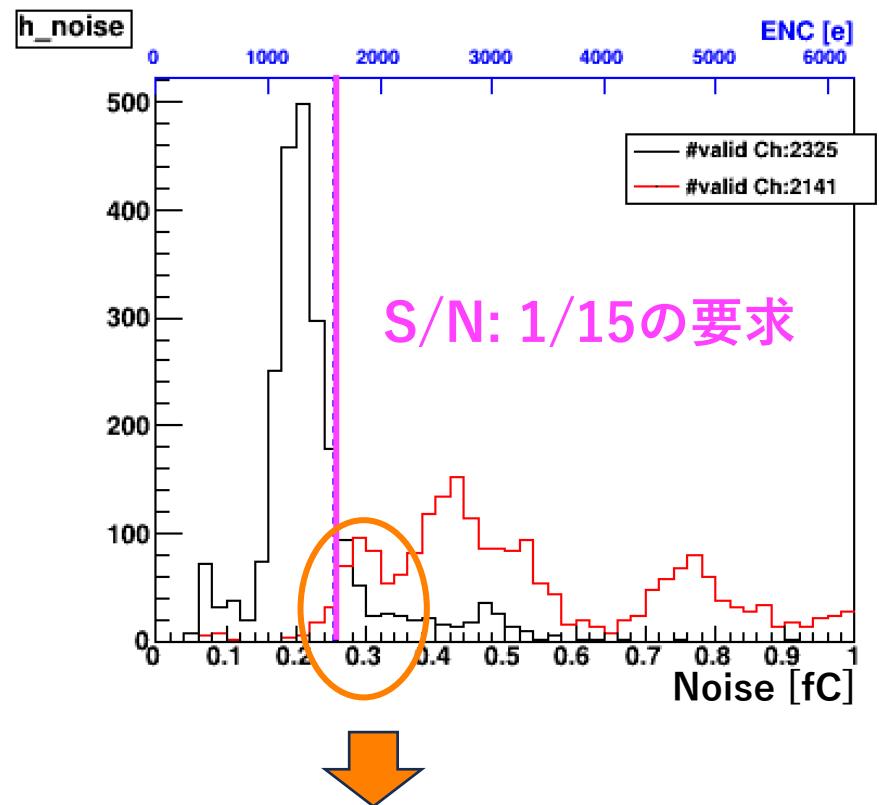
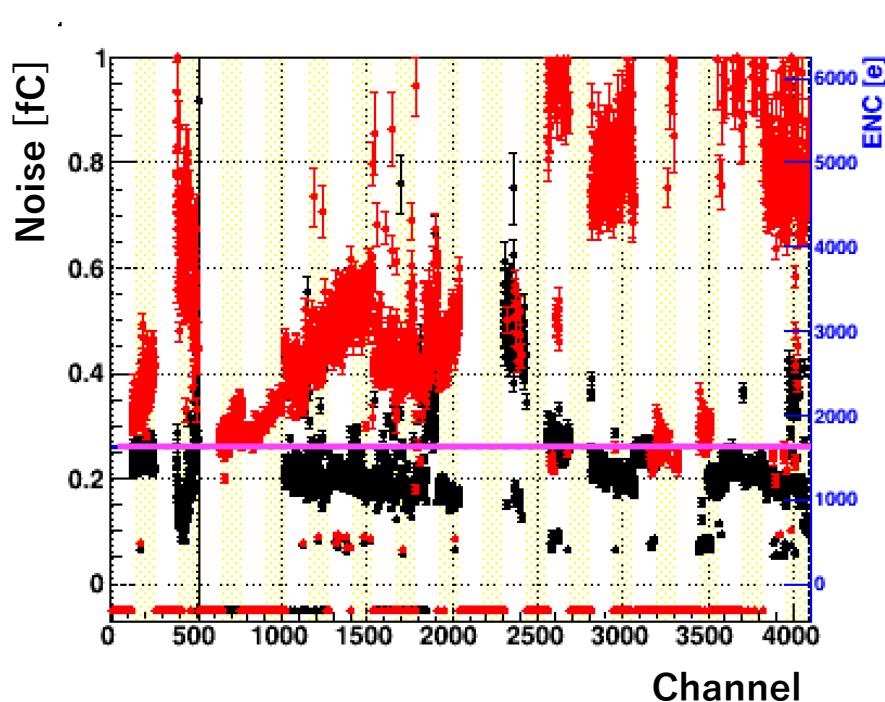
$$\text{Efficiency} = \text{Detected Hit} / \text{True Hit}$$

- Efficiency 50%での閾値が平均値
- S-curveの傾き具合でノイズの大きさ $\sigma$ を評価
- 複数の大きさの異なるテストパルスを用いることでオフセット、ゲインも評価している

# 試験環境におけるノイズ評価

セットアップを組んだところノイズが増加した

- 実験室(黒)と ビーム試験環境(赤)
- ~2000/4096 ch動いていたものが、~300 chしか使えない状態に



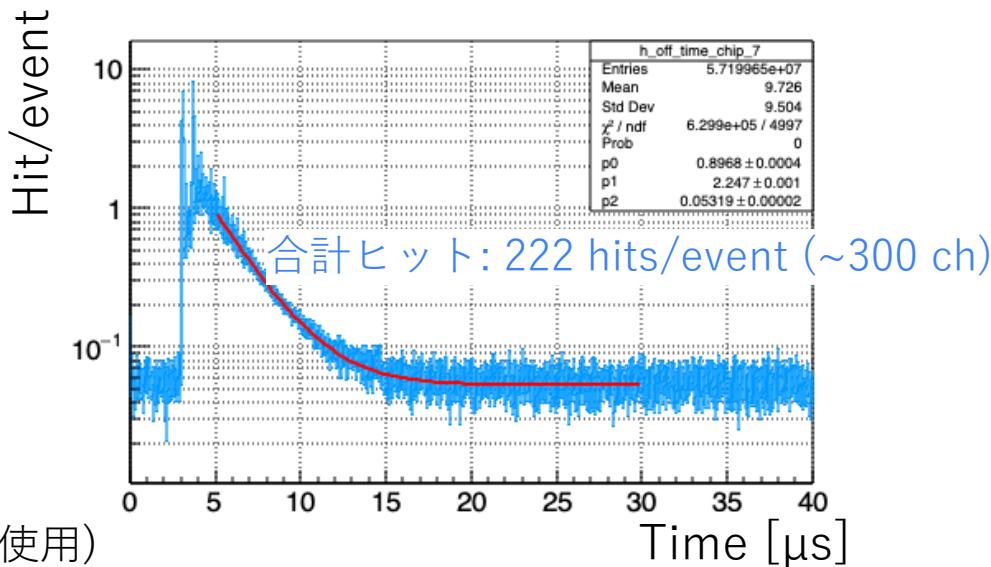
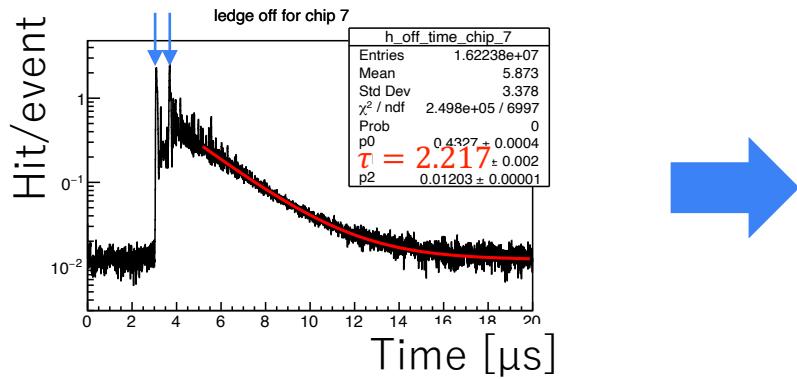
この後のスライドの解析結果は ノイズの小さいch を使用

- ビーム試験後にノイズ調査を実施

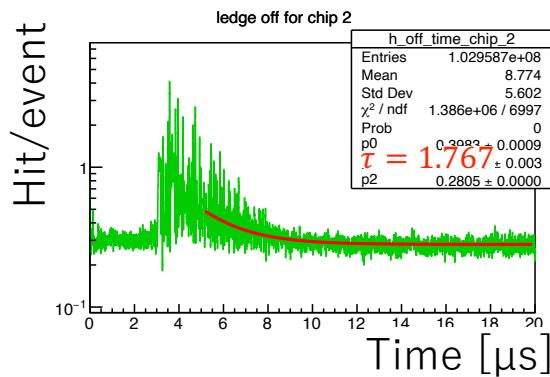
# 時間構造とレートの確認

- ビームパルス同期の時間構造 (スリット開口は最大) を確認
  - ビーム時間構造に起因するダブルパルス
  - ミューオンの寿命~2.2 μsの指数関数的減衰

▼ 確認できた (~300 ch: 解析に使用)



▼ 確認できない (残り~2000 ch: 解析には不使用)



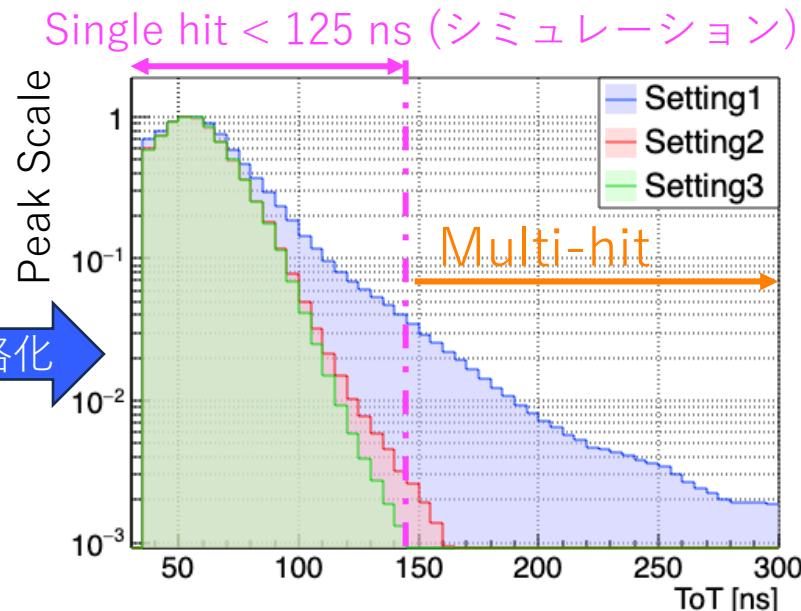
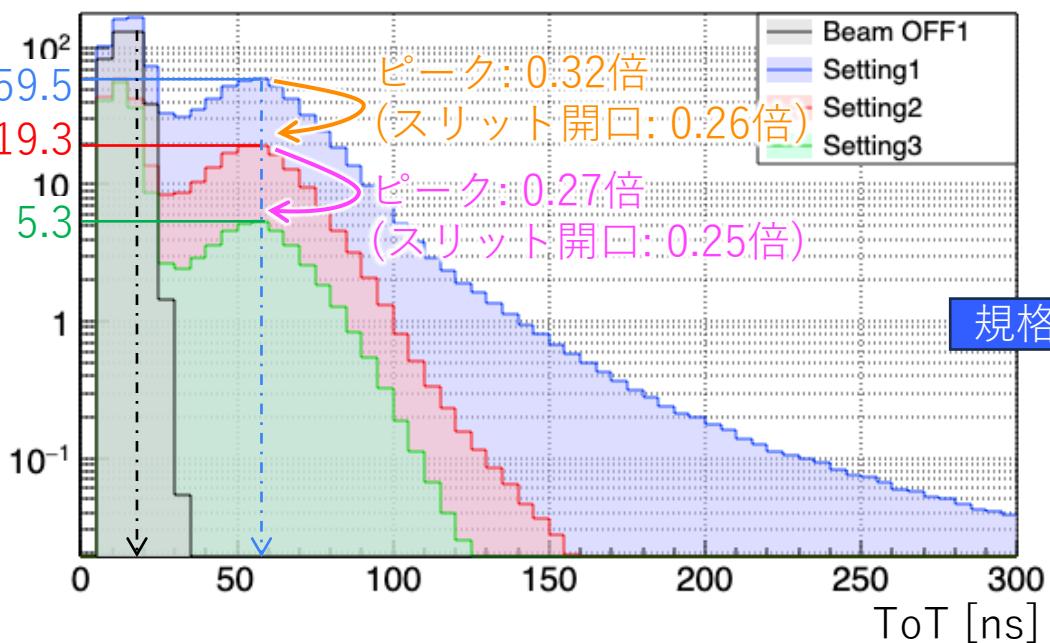
- 瞬間的な最大レート: 1 MHz/strip
  - 本実験の予想最大レートと同じ桁で正常に動作した
  - ビーム由来の信号が確認できた ASICはS-curve scanのノイズも比較的小さかった

# シグナルとノイズの分類

- 3種類の異なるスリット開口面積

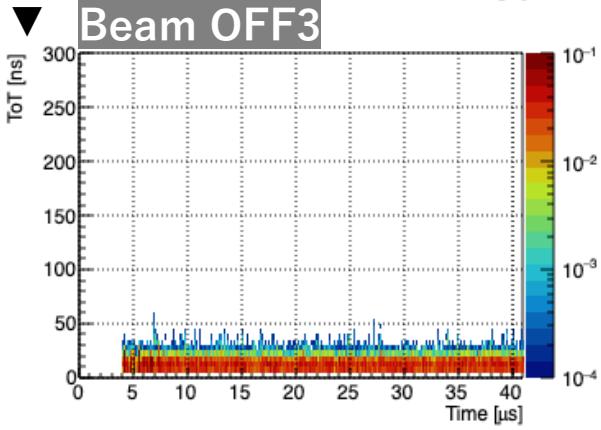
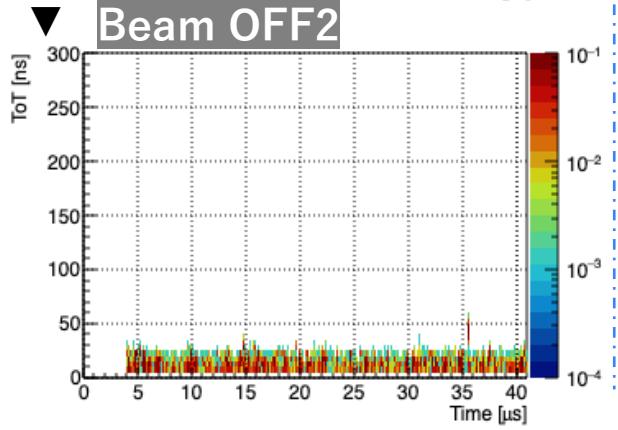
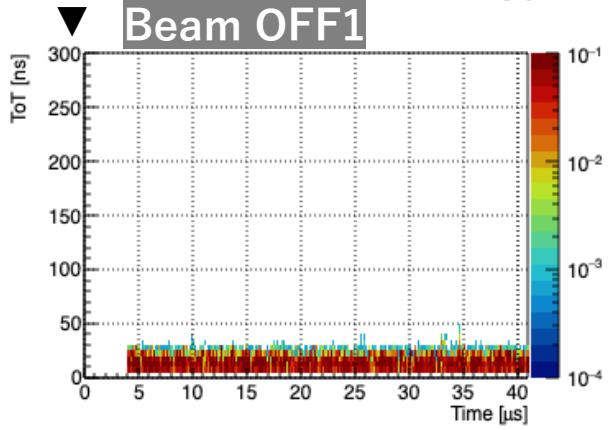
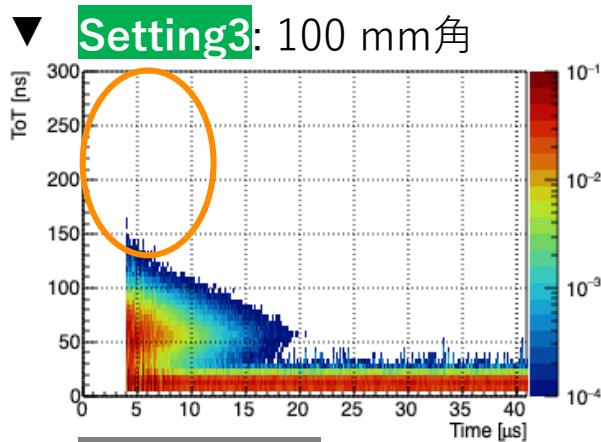
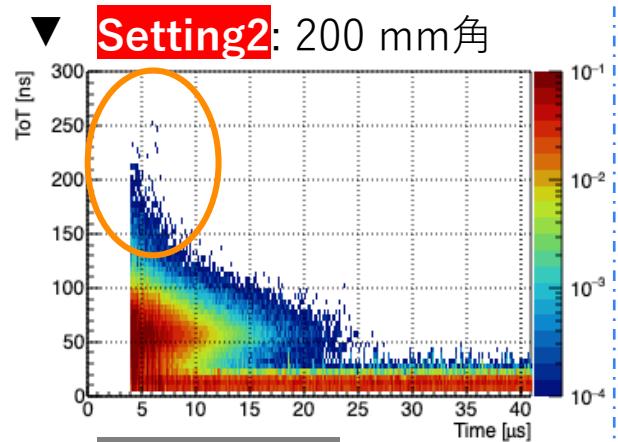
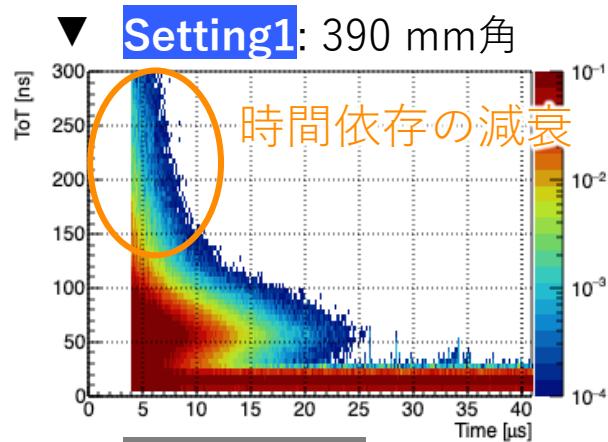
- Setting1:  $0.14 \text{ m}^2$  (390 mm角)
  - Setting2:  $0.04 \text{ m}^2$  (200 mm角)
  - Setting3:  $0.01 \text{ m}^2$  (100 mm角)
  - Beam OFF (例: Setting1) => ノイズ
- ビーム測定 差分: シグナル  
➤ レートはスリット開口に比例

## ▼ ToT分布



- ノイズのピークToT = 10 ns
- シグナルのピークToT = 60 ns = 1 MIPと同等

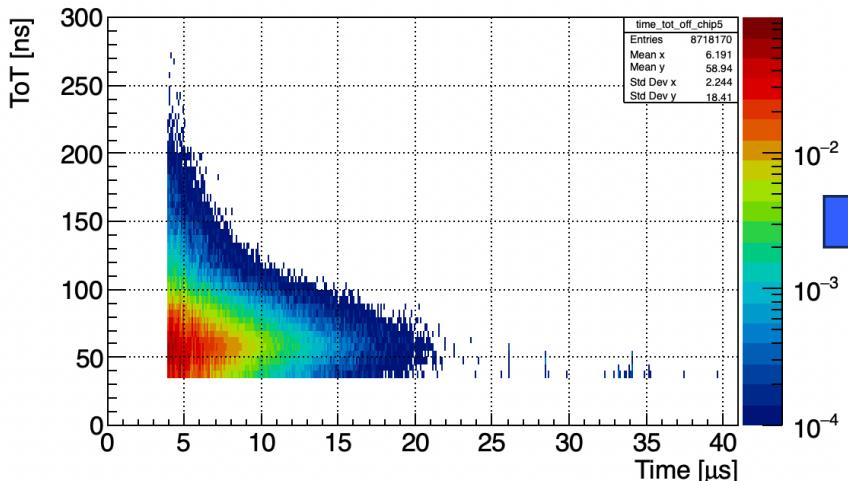
# ToTの時間構造



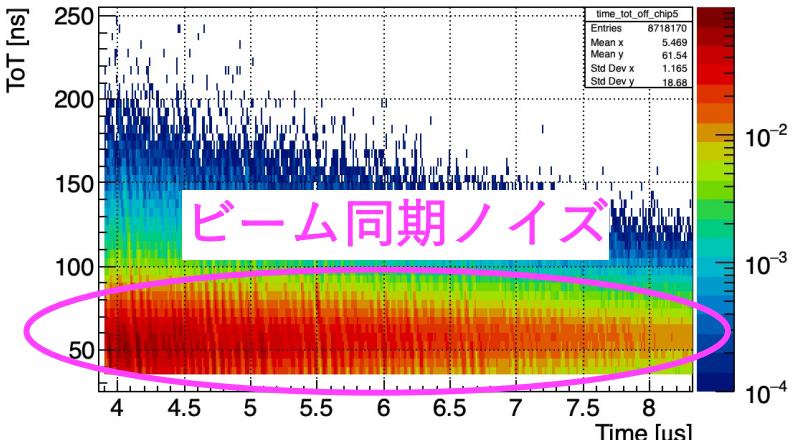
- **ToT > 125 ns: パイルアップ (シングルヒットのToTは最大~125 ns)**
  - 時間構造あり → ミューオン崩壊陽電子
- **Beam OFF**
  - 時間構造がない → ノイズ
  - セットアップ、時間によってノイズレベルが変化している

# ビーム試験における課題

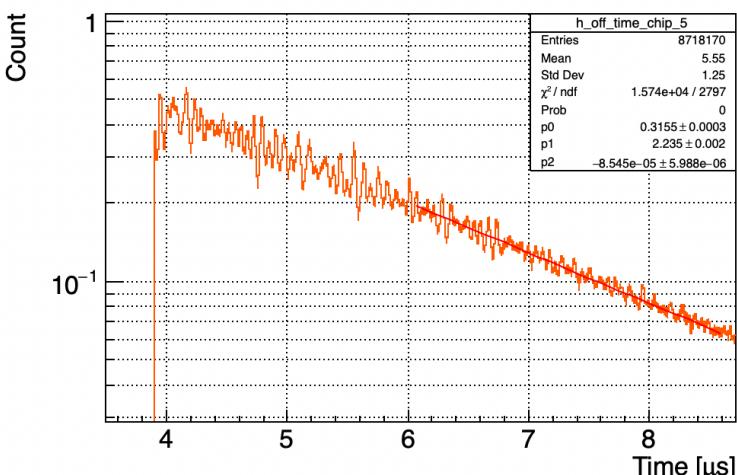
## Time vs. ToT ※ノイズの少ないchです



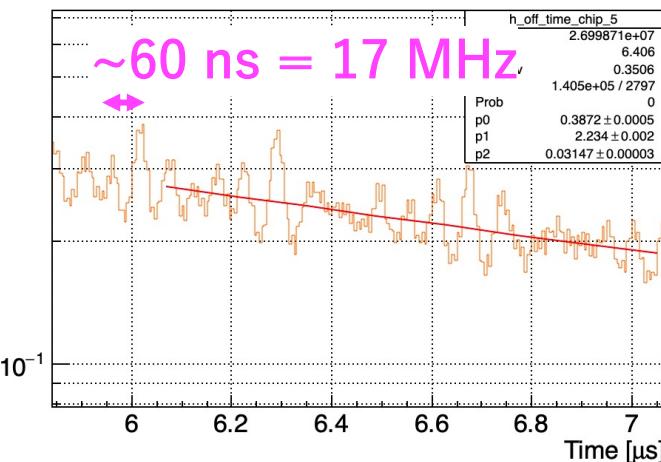
拡大



## Time Spectrum



拡大

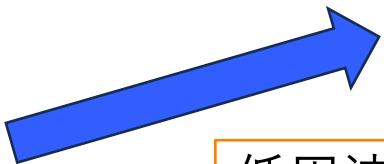
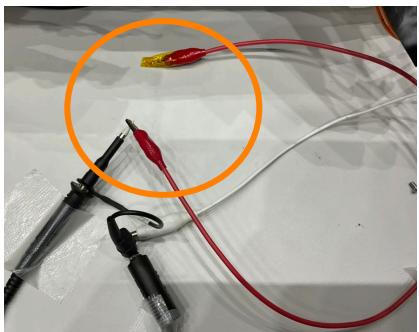


ToT 30 ns でcutしてもノイズが存在  
➤ ノイズ低減が必須

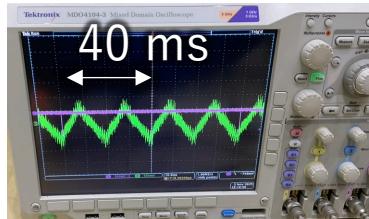
# プローブによるMLFノイズ測定

## 低周波成分: プローブの振動

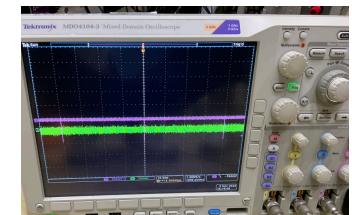
プローブ+金属でノイズの波形が確認できた  
(ビームトリガー同期でオシロで確認)



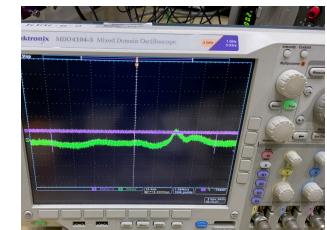
机上 (50 Hz)



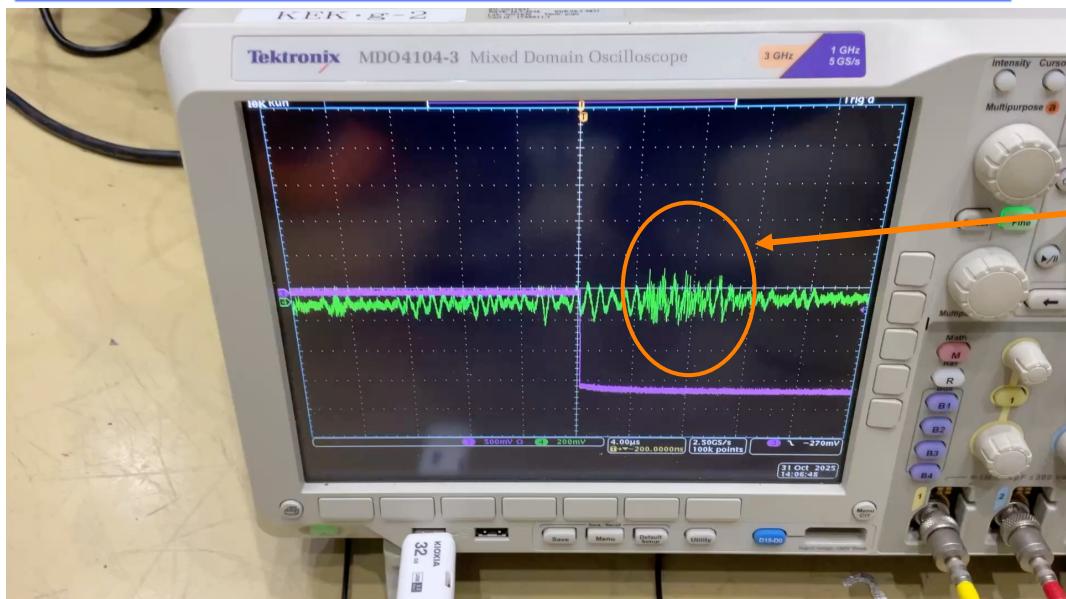
床



床 + 足踏み



## 高周波成分: ビーム同期と非同期



拡大すると、

- ビーム同期ノイズ
- 非同期ノイズ

が確認できた

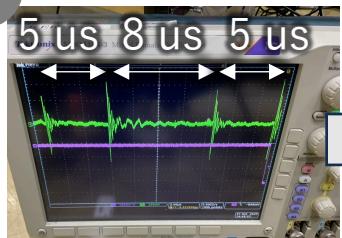
(冷却板、冷却ブロックでも同様)

# ノイズの種類とノイズ源

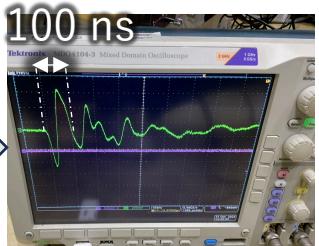
低周波成分: プローブの振動 (前ページ)

2種類のビーム非同期ノイズ (ノイズ源不明, 時間変化する)

1



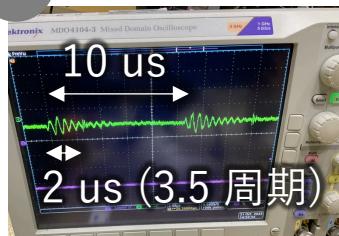
繰り返し構造



拡大

~10 MHz

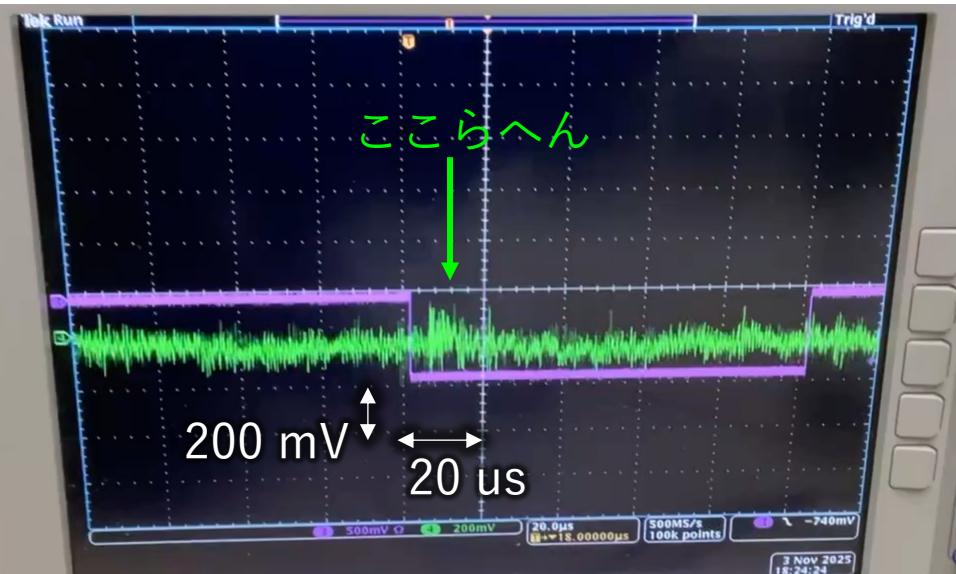
2



1.8 MHz

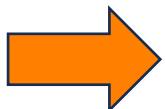
10 us間隔で2つのみ

## ビーム同期ノイズ



Sラインのキッカー → OFF

➤ 同期ノイズ消えた

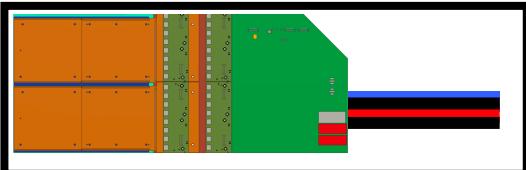


同期ノイズの原因  
電磁ノイズ

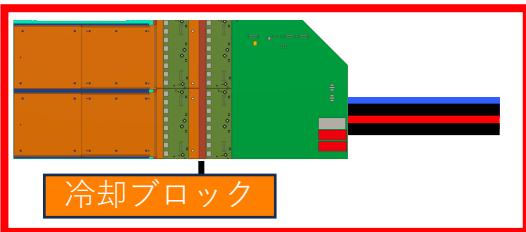
(プローブではGNDに落とした  
アルミシールドで低減可能)

# エリア内外の結果まとめ

## エリア外

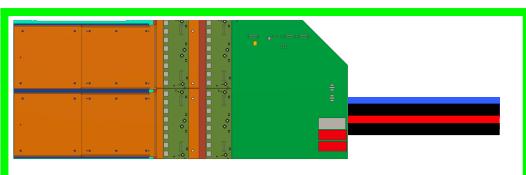


基準

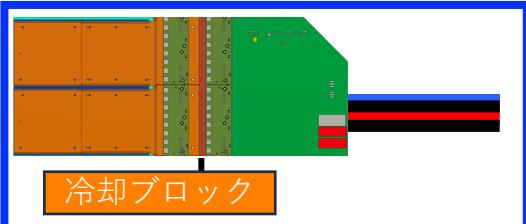


前半ch: ほぼ変化なし  
後半ch: 増加

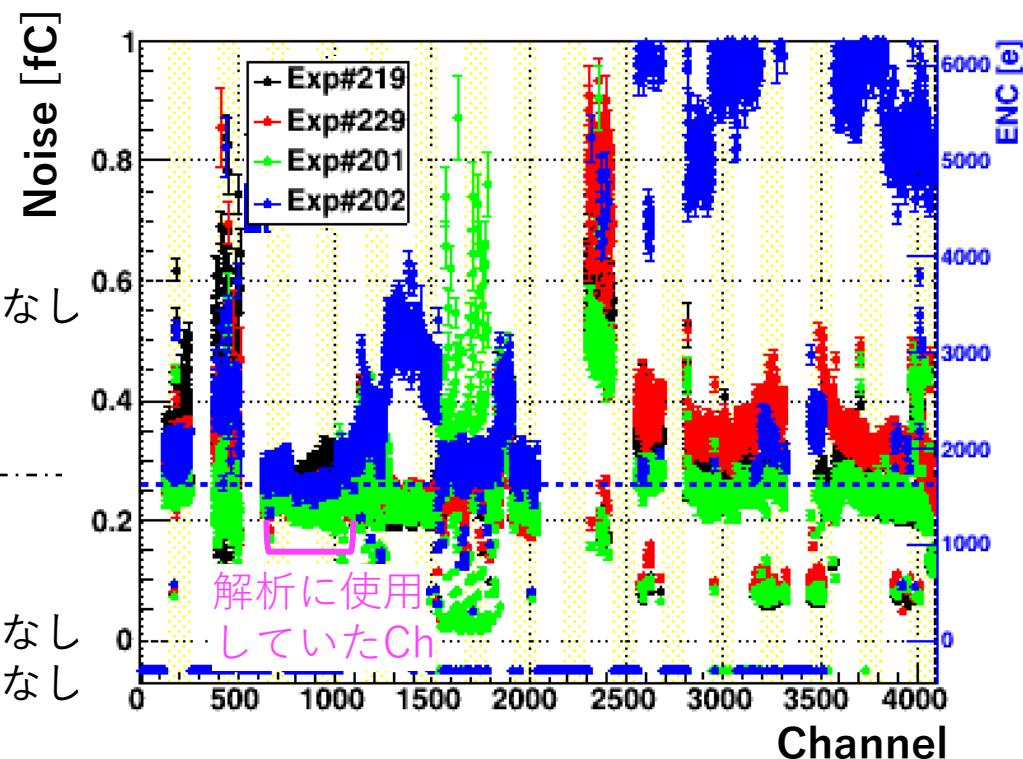
## エリア内



前半ch: ほぼ変化なし  
後半ch: ほぼ変化なし



前半ch: 一部増加  
後半ch: 増加(画面外)



- 冷却ブロックがなければノイズは増加しない



冷却ブロックがアンテナの役割でノイズを拾っている

# ノイズ低減調査

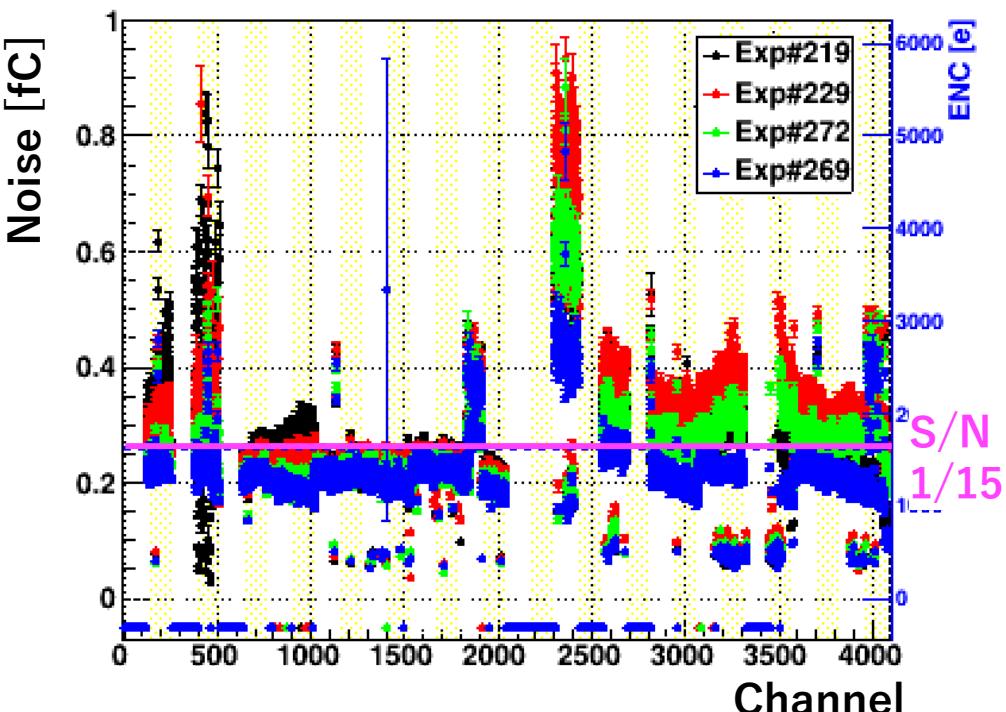
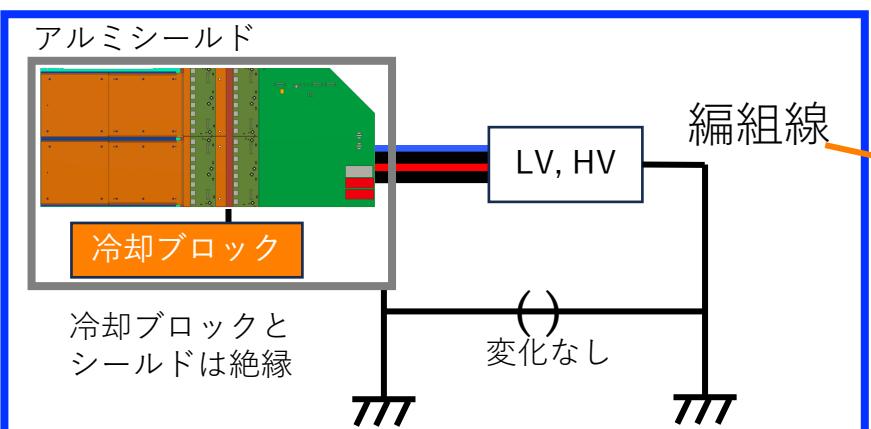
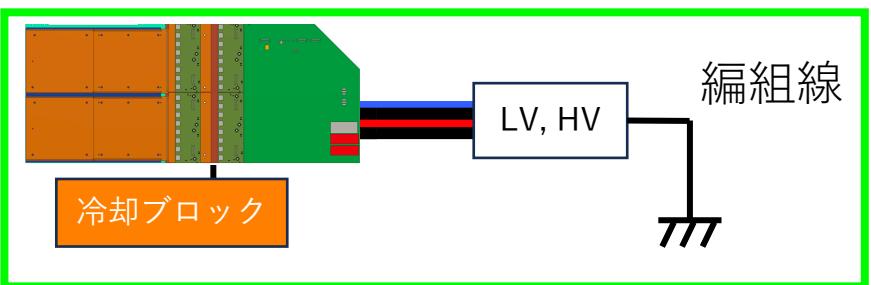
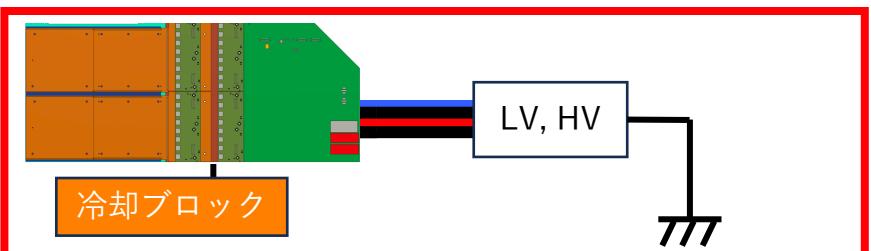
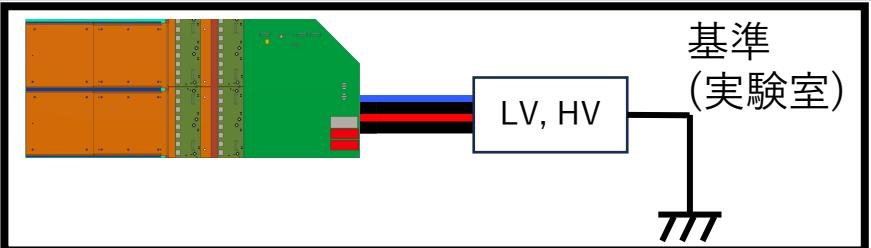
17/21

## ■ 調査項目(何かしら効果あったもの○)

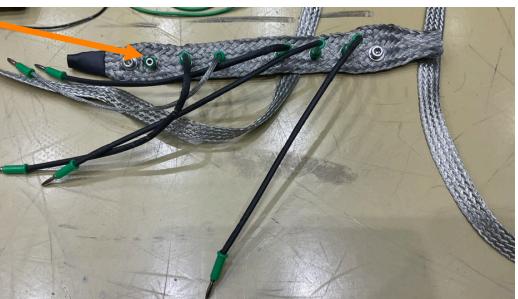
- 別検出器試験機による個体差調査 (× 系統的だった)
- 検出器シールドとGND接続 (○)
- 検出器のGNDを強化 (○)
- 検出器電源のGNDを強化 (○)
- 冷却ブロックをGND ( $\triangle$ GND接続が弱い可能性)
- 検出器に別GNDを使用 (×)
- 電源ケーブルをシールド (×)
- AMANEQとの接続の有無 (×)

田中さん(電気回路の専門家)に聞いたのが結果的には一番効果があった  
(助言を試したら減った)

# ノイズ低減手法(エリア外)

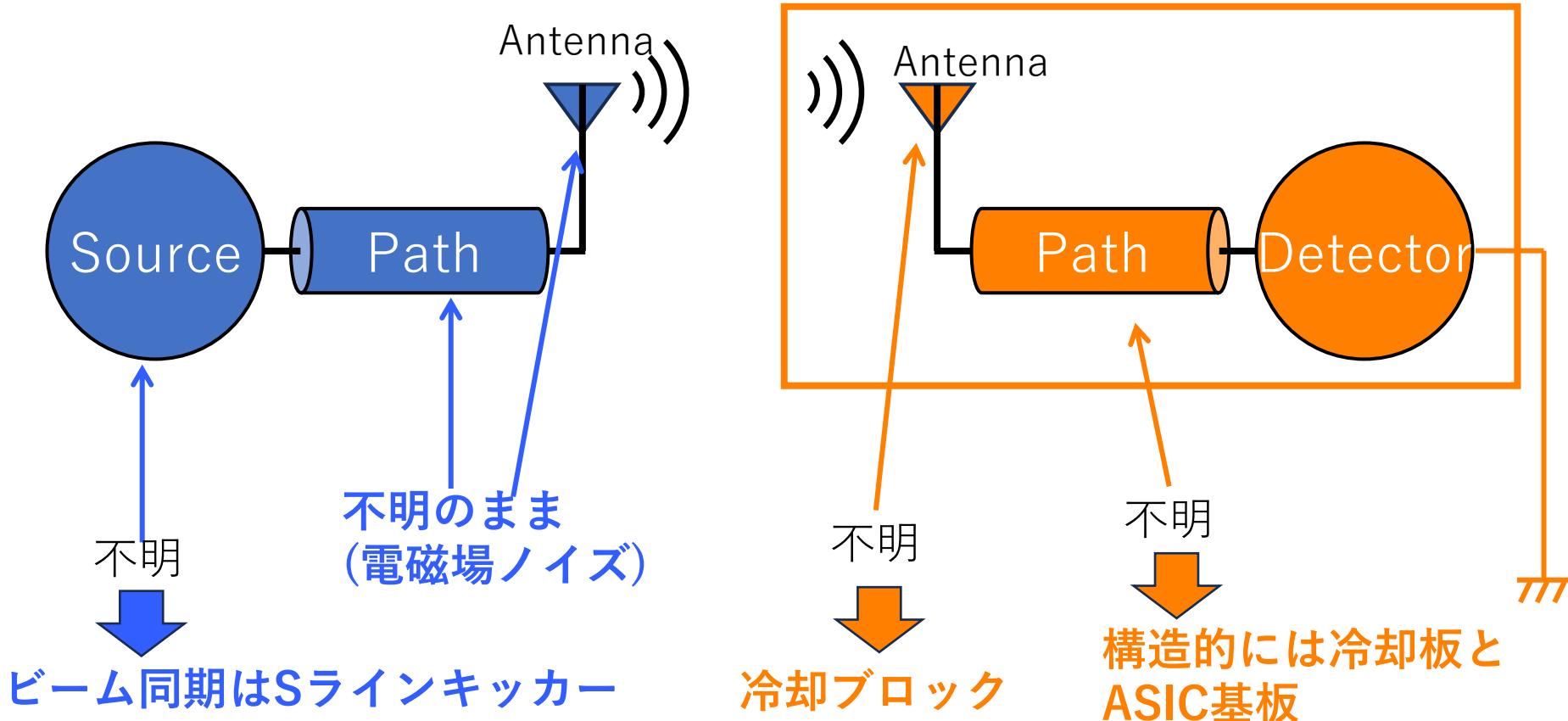


GND強化 + シールドによって  
実験室レベルより改善



# ノイズ調査のまとめ

## ノイズ源の特定と低減（実験室レベルまで）



GND強化 + シールドがノイズ低減に効果的

# 新しい検出器製作

2026/01/29 MuSEUM ビームタイムにむけて

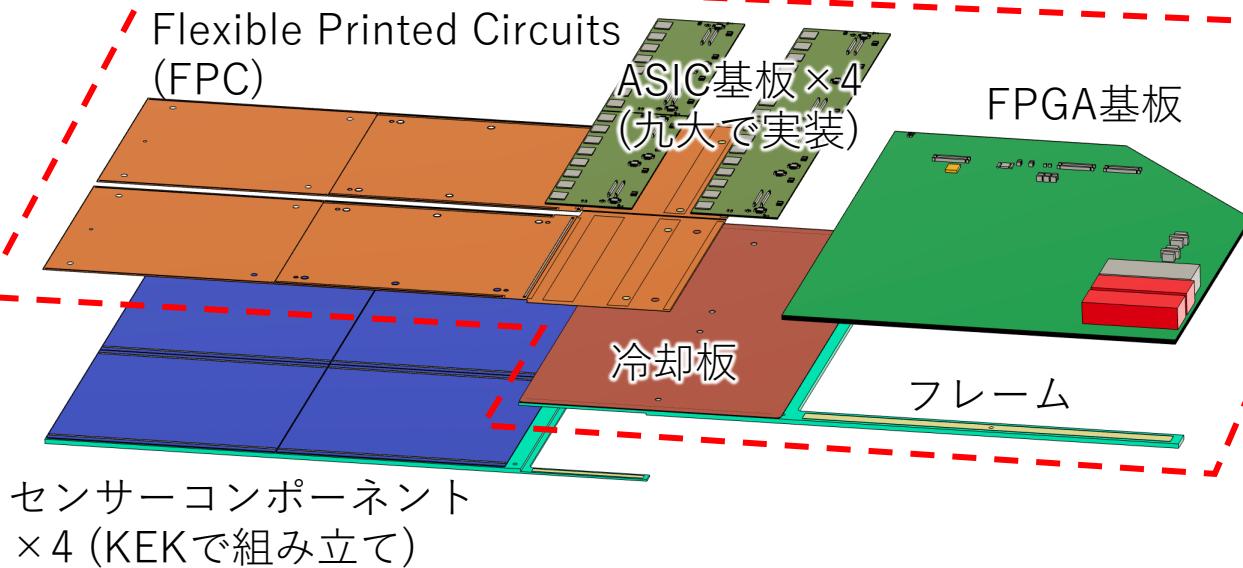
## ■ 要求

- (ほとんど)全てのchが動作する検出器
- センサーはZ測定方向 (これまでの試作機と同じ)

## ■ Q-Vane製作工程 (動作試験の猶予1ヶ月ほど)

1. 読み出しコンポーネント組み立て (KEK) → ~11/14
- 1-2. ASIC-FPC間ワイヤーボンディング (九大) → 12/8~
2. センサーコンポーネント組み立て (KEK) → 12/8~
3. Q-Vane組み立て+FPC-センサー間ワイヤーボンディング (KEK) → ~1/5

読み出しコンポーネント (KEKで組み立て)



前回の検出器試作機  
& new 検出器試作機で  
2台同時測定を目指す

# まとめ

21/21

- J-PARC muon  $g - 2$ /EDM実験に向けて検出器開発を進めている
- MuSEUM実験において初のQ-Vane試作機によるビーム試験
  - 300/4096 chで崩壊陽電子シグナルが得られた（ノイズが大きかった）
    - 最大レート:  $g - 2$ 本番想定最大レート～1 MHzでの動作を確認
  - ToT分布でシグナルとノイズを分類
    - シグナル: ToT = 60 nsの1MIPと同等のピークが得られた  
**(ToT > 125 ns: パイルアップ事象)**
    - ノイズ: ToT = 10 ns
- プローブによるノイズ原因調査
  - ビーム同期ノイズの原因是Sラインキッカーであることが判明
- ノイズ低減方法
  - 冷却ブロックがアンテナのような役割をしている
  - 検出器をシールドして、GNDを強化することでノイズ低減可能
- 今後の展望
  - 全chが機能する検出器を1台追加で製作する
  - ノイズ低減方法を実施し、2台同時にデータ取得を行う