

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

2/21

- 0. タイトル
- 1. 背景 (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: 0.12ppm の精度 (FNAL)
- 標準理論とのずれは解決?

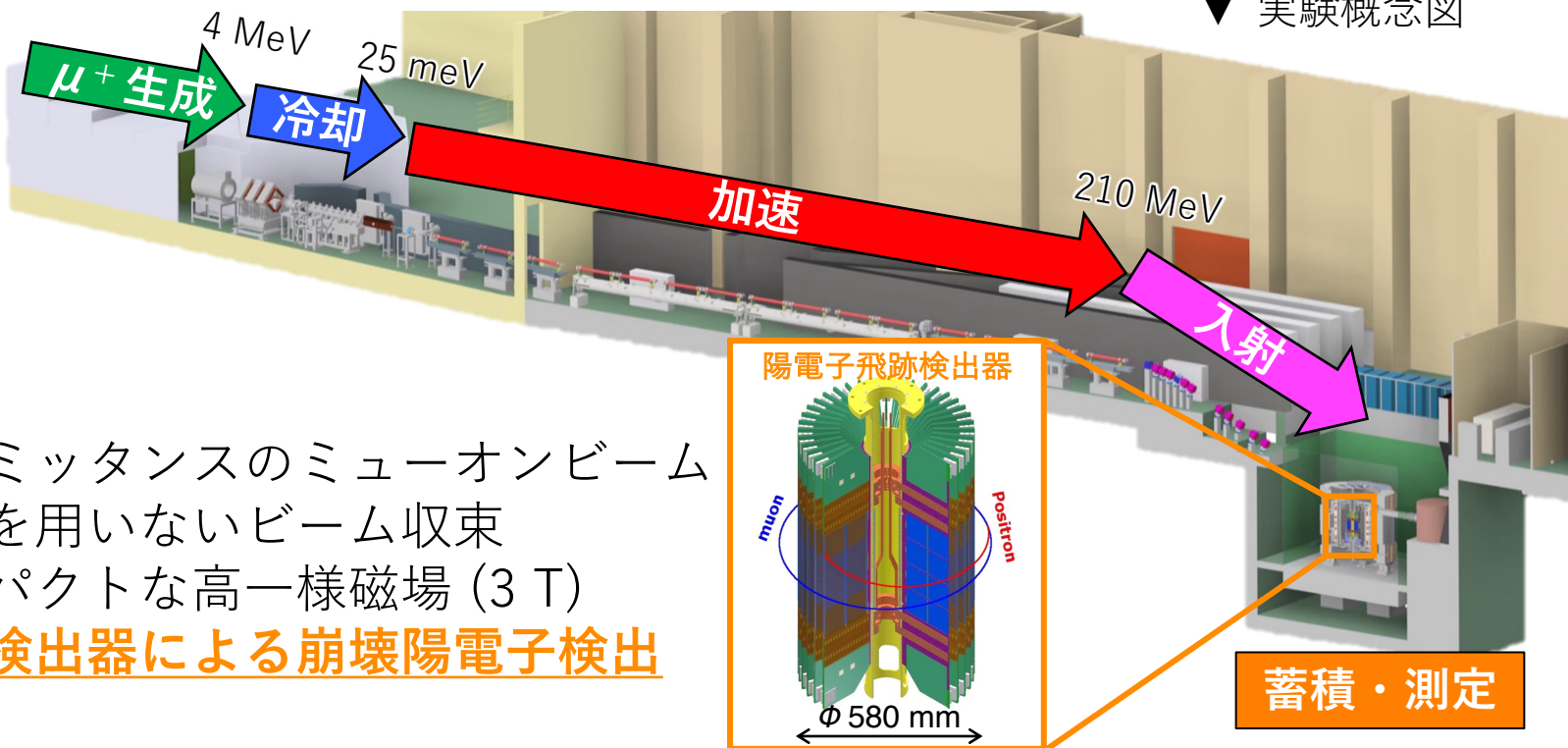
➤ 目標精度0.14ppmで独立の検証

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: $\sim 10^{-19}$ e·cm >> 理論予測値: $\sim 10^{-38}$

➤ 目標精度: 10^{-21} e·cm

▼ 実験概念図



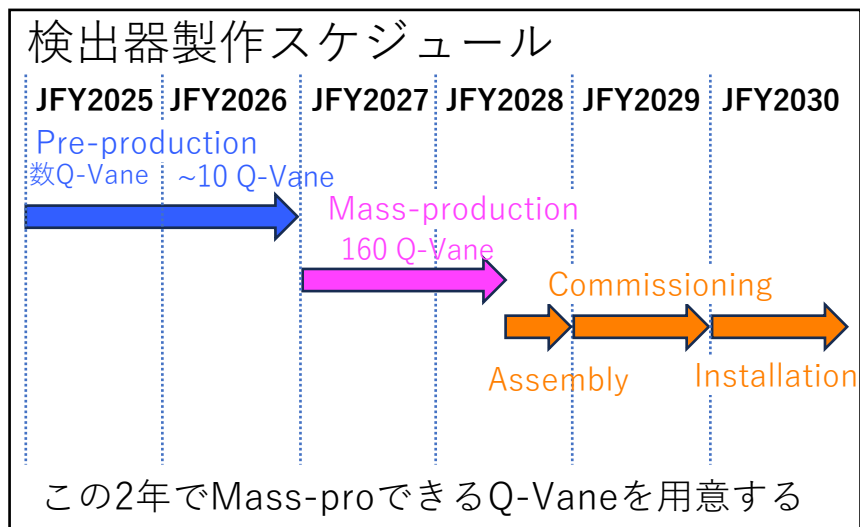
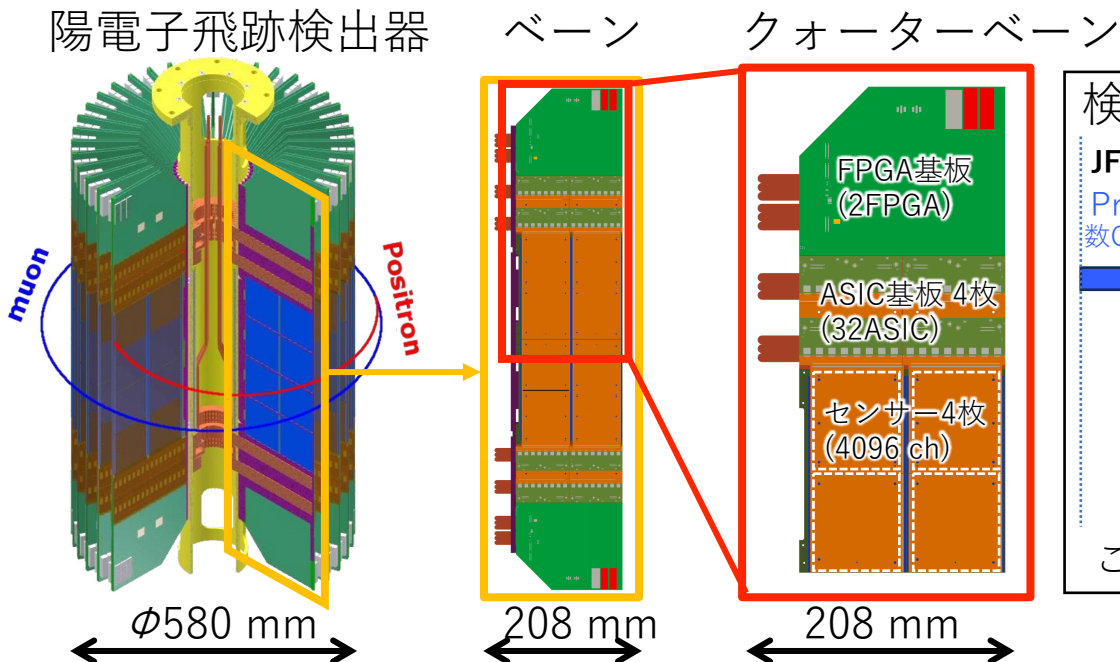
特徴

- 低エミッタンスのミュオンビーム
- 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

4/21

- 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(クォーターベーン×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**



MuSEUM実験

5/21

■ Mu超微細構造 (MuHFS) 測定

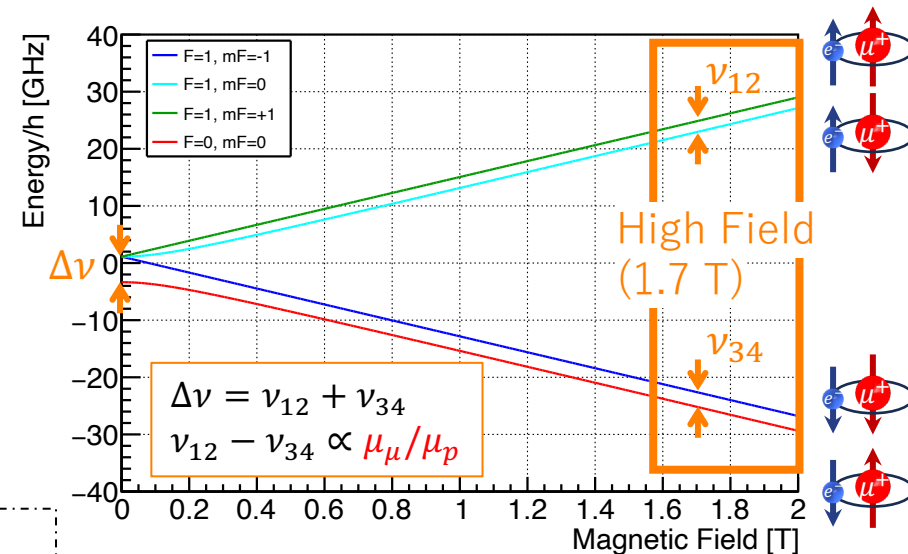
- 4 463 302 765(**53**) Hz (**12ppb**)
 - Stat. 51 Hz, Sys. 17 Hz
- W. Liu et al., Phys. Rev. Lett. 82 711 (1999)*

■ 高磁場MuSEUM実験の目標

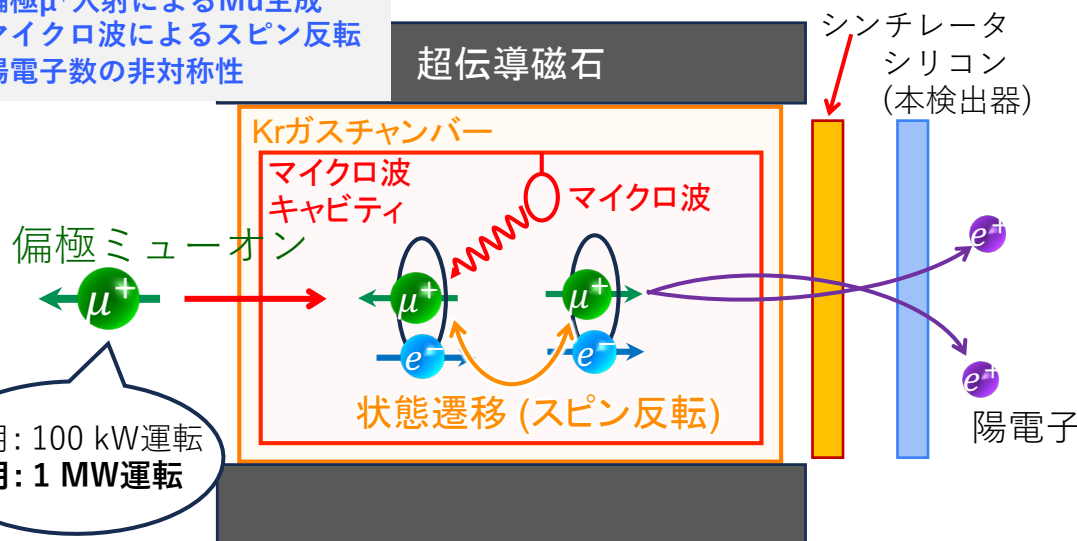
- \sim (**8**) Hz (\sim **2ppb**)
- Stat. \sim 5 Hz, Sys. \sim 7 Hz

ミュオン $g-2$ の値

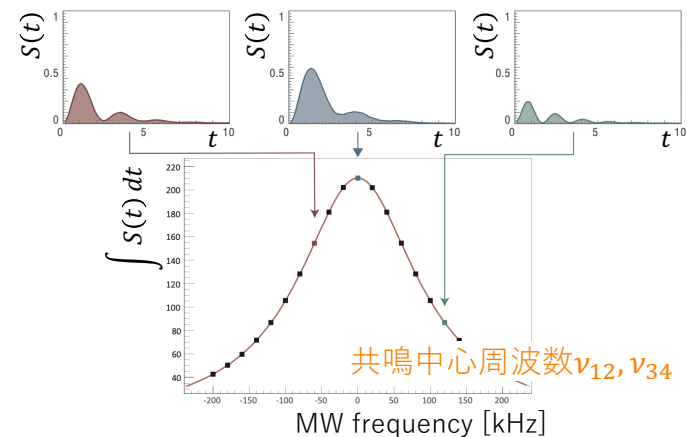
$$\frac{g-2}{2} = \frac{\omega_a/\omega_p}{\mu_\mu/\mu_p - \omega_a/\omega_p}$$



- ① 偏極 μ^+ 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



$$S(t) = \frac{N_{on} - N_{off}}{N_{off}} \quad N_{on/off}: \text{MWがON/OFFの時の} e^+ \text{数}$$



MuSEUM実験への応用

6/21

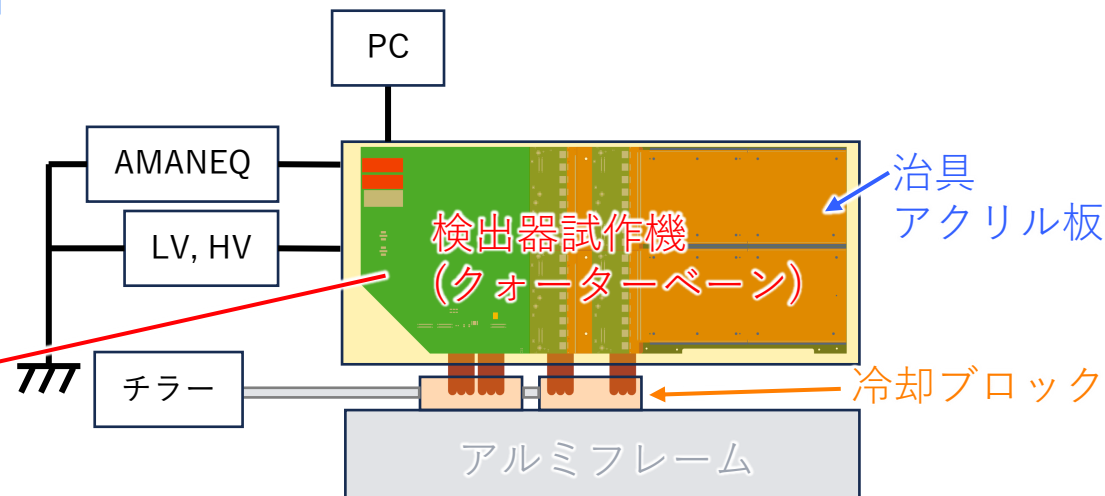
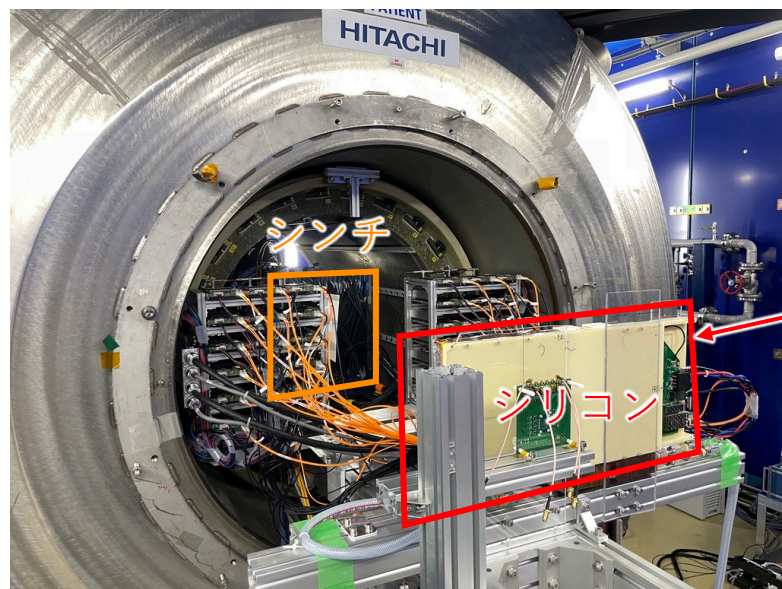
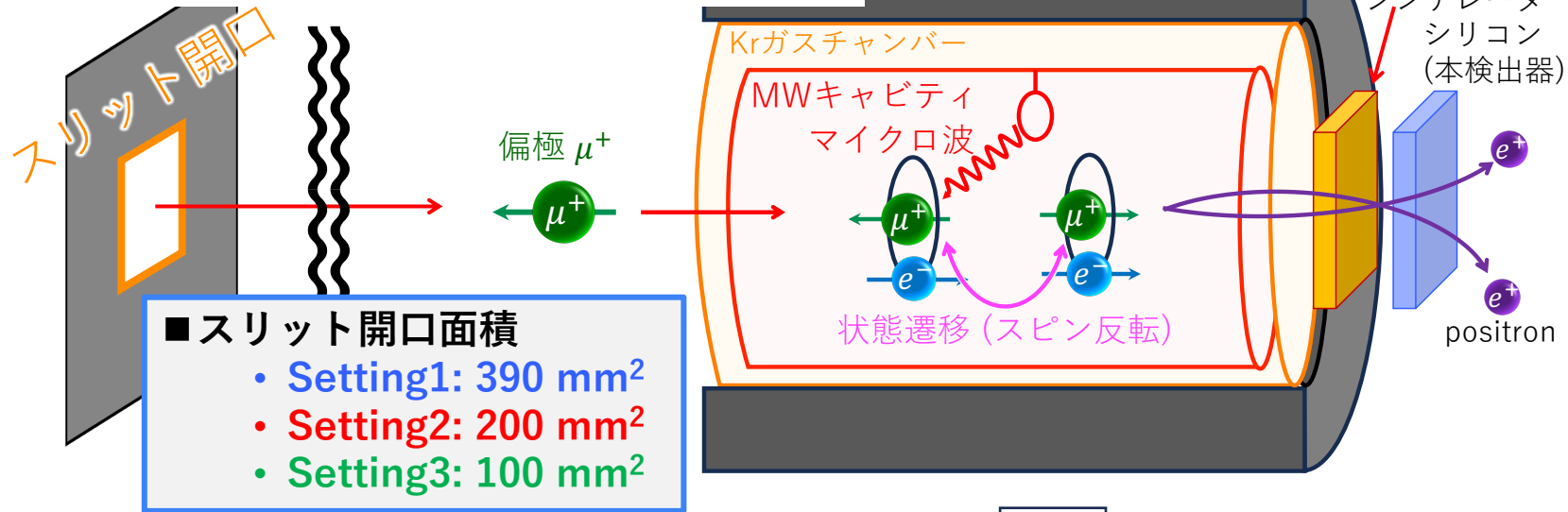
- 磁場環境: 1.7 T \Leftrightarrow $g - 2$ 本番: 3.0 T
- 検出器環境: 1 atm \Leftrightarrow $g - 2$ 本番: ~ 0.1 atm
- レート: ~ 10 MHz/ch \Leftrightarrow $g - 2$ 本番: ~ 1 MHz/ch
 - 最大で本実験の約10倍のレートがMuSEUMの結果から予想される
 - 本検出器は約10倍細分化されており、**実効レート $\sim 1/10$ に低減可能**
 - レート耐性の向上 (予想パイルアップ確率 $\sim 20\% \Rightarrow \sim 5\%$)

	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	5 ns
パルス幅	50 \sim 100 ns	~ 100 ns
チャンネル数	576 ch	4084 ch (4枚)
1 chあたりの面積	100 mm ² (10 mm角)	約10 mm ² (50 mm \times 0.2 mm)
予想最大レート	O(100)MHz/ch	O(10)MHz/ch
予想パイルアップ	20 \sim 100%	5 \sim 60%

$g - 2$ 実験 \rightarrow 高磁場高レート環境下での検出器動作の保証
MuSEUM実験 \rightarrow 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

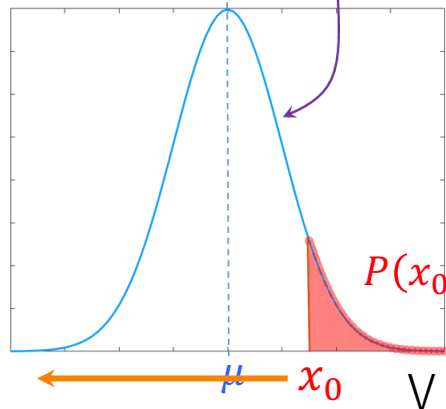
ノイズ評価: S-curve scan

8/21

シグナル+ノイズ電圧がガウシアン分布だと仮定

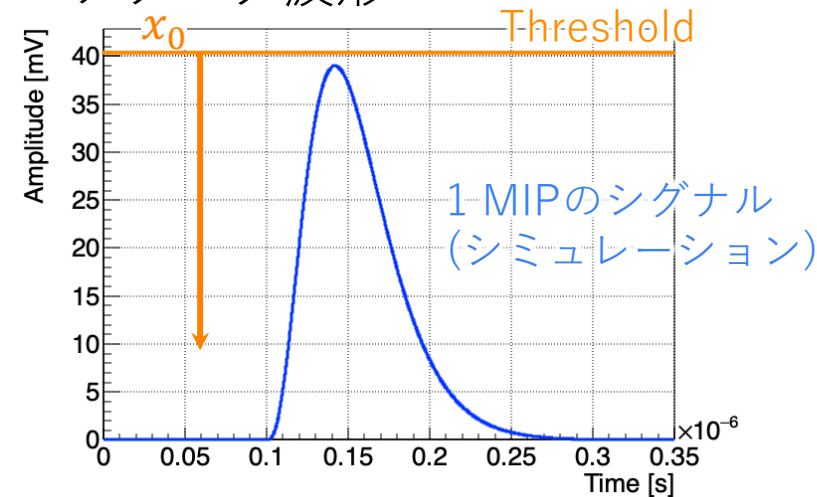
- 閾値スキャンするとEfficiencyがS-curveになる

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

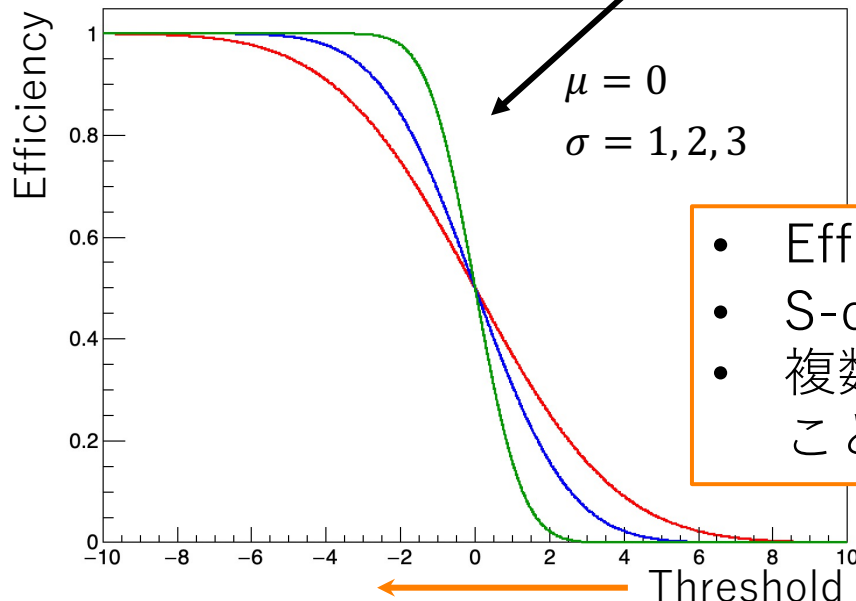


$$P(x_0) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_0 - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right)$$

- アナログ波形



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



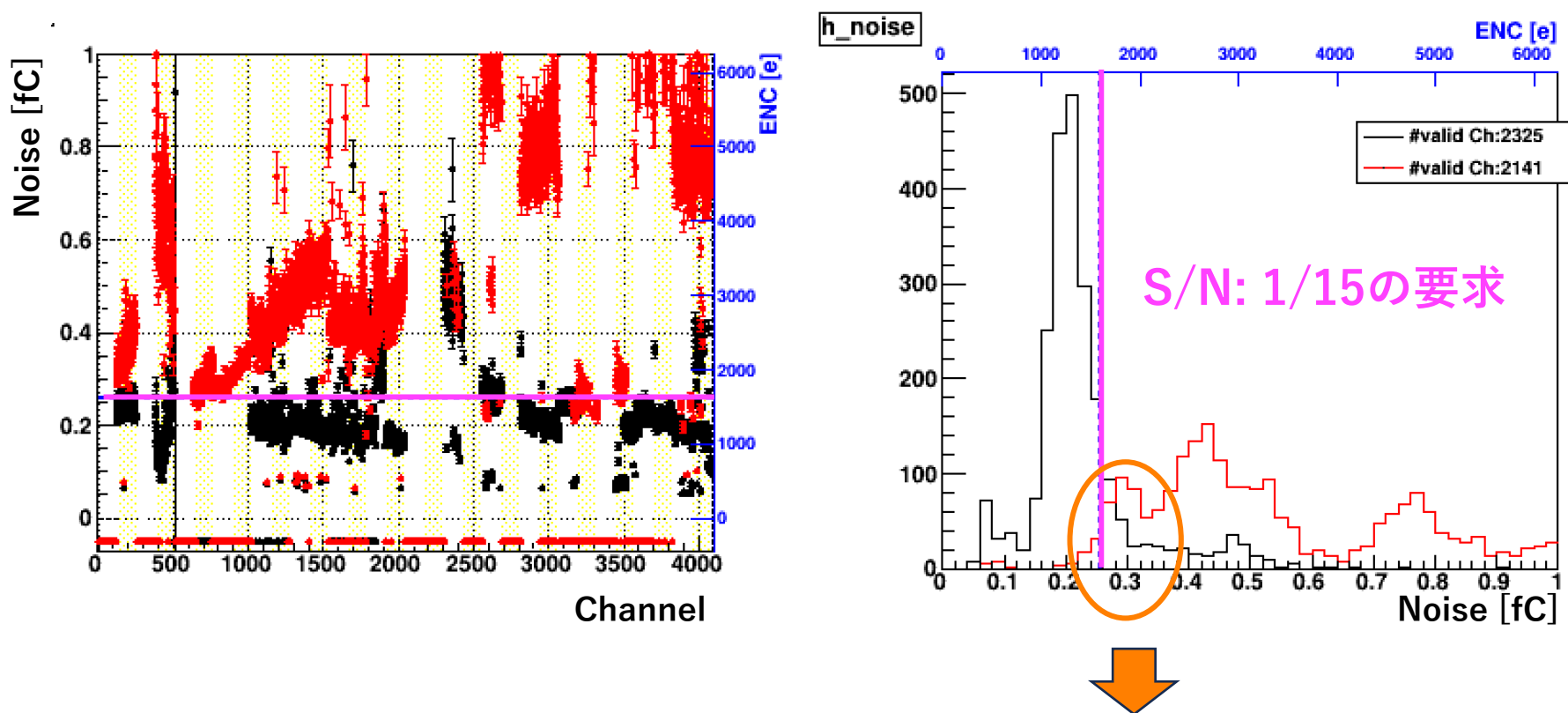
- Efficiency 50%での閾値が平均値
- S-curveの傾き具合でノイズの大きさ σ を評価
- 複数の大きさの異なるテストパルスを用いることでオフセット、ゲインも評価している

試験環境におけるノイズ評価

9/21

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

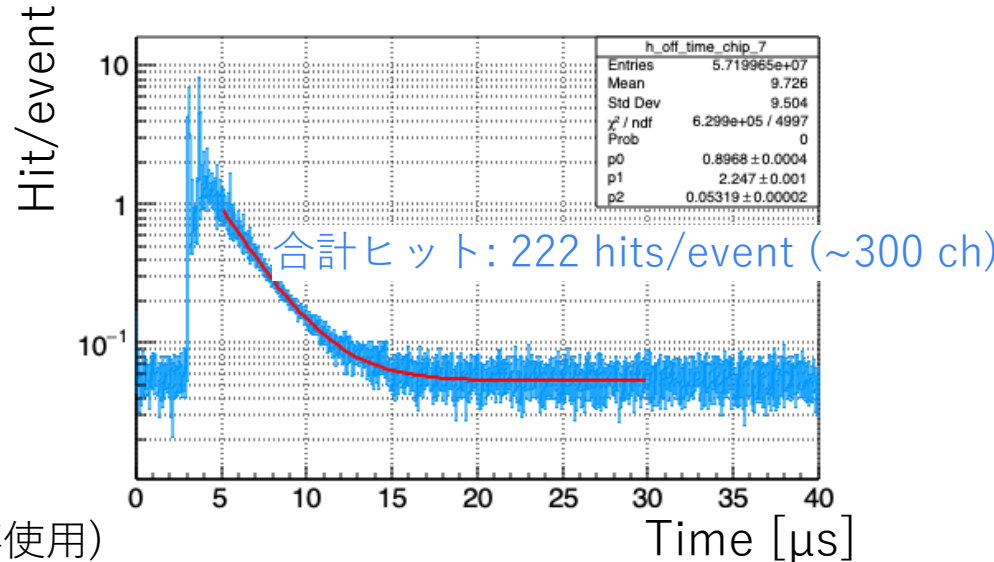
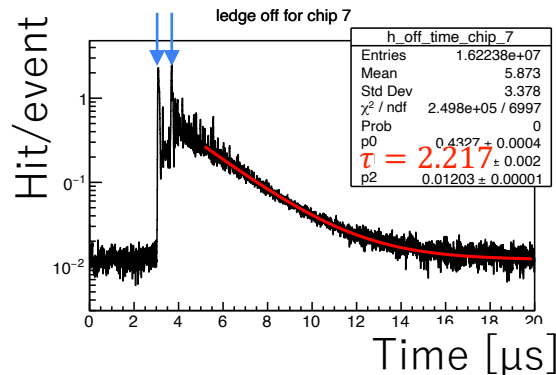
時間構造とレートの確認

10/21

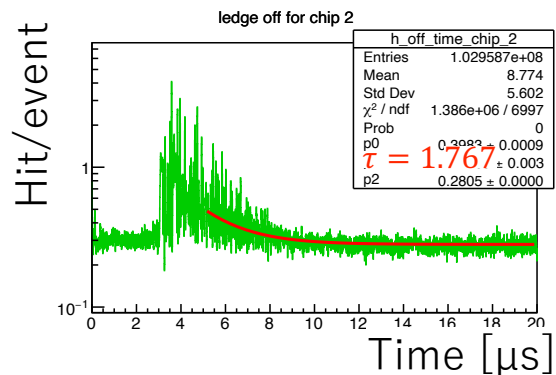
■ ビームパルス同期の時間構造（スリット開口は最大）を確認

- 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 $\sim 2.2 \mu\text{s}$ 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

11/21

■ 3種類の異なるスリット開口面積

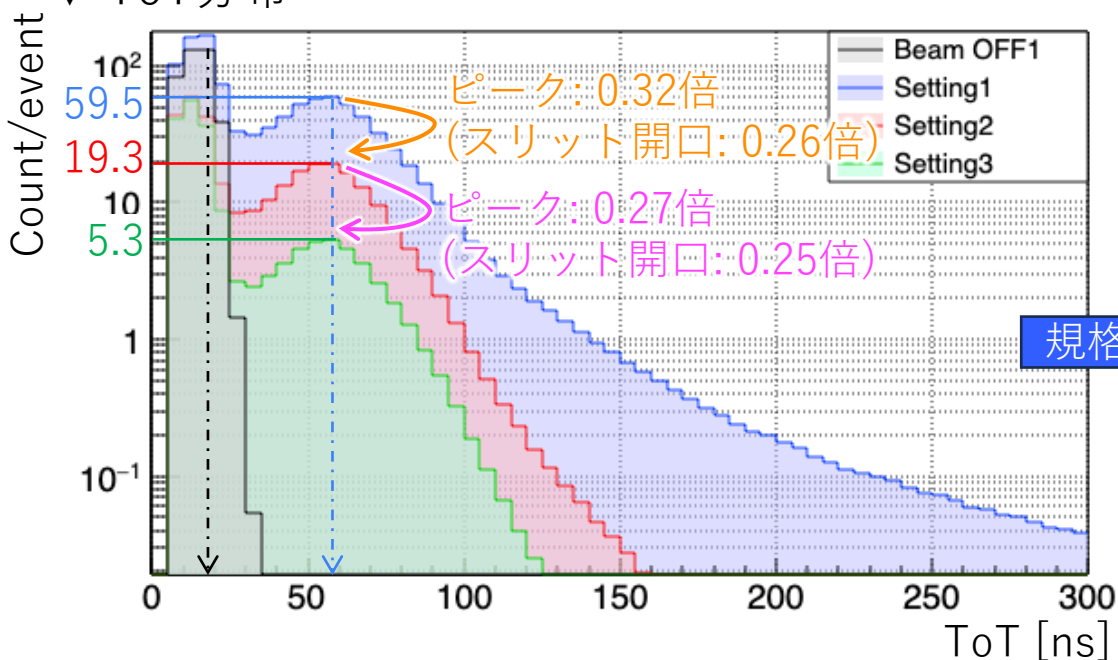
- **Setting1**: 0.14 m^2 (390 mm角)
- **Setting2**: 0.04 m^2 (200 mm角)
- **Setting3**: 0.01 m^2 (100 mm角)
- **Beam OFF** (例: Setting1) => ノイズ

ビーム測定

差分: シグナル

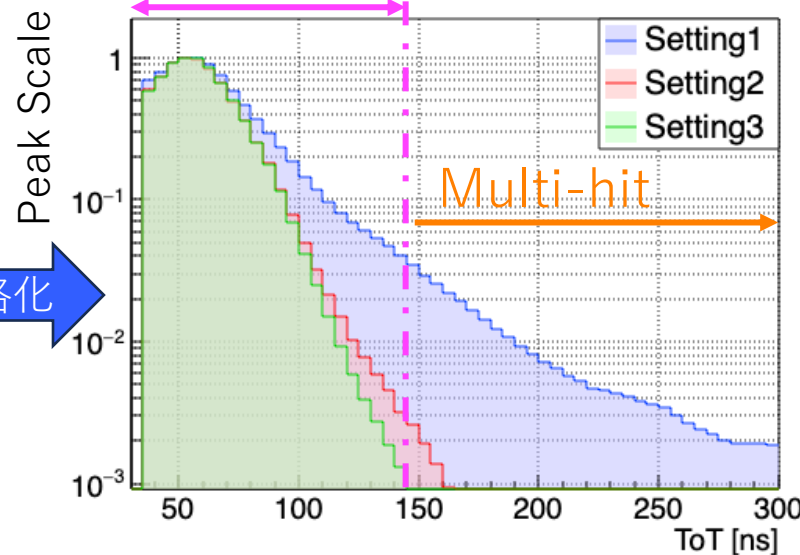
➤ レートはスリット開口に比例

▼ ToT分布



規格化

Single hit < 125 ns (シミュレーション)

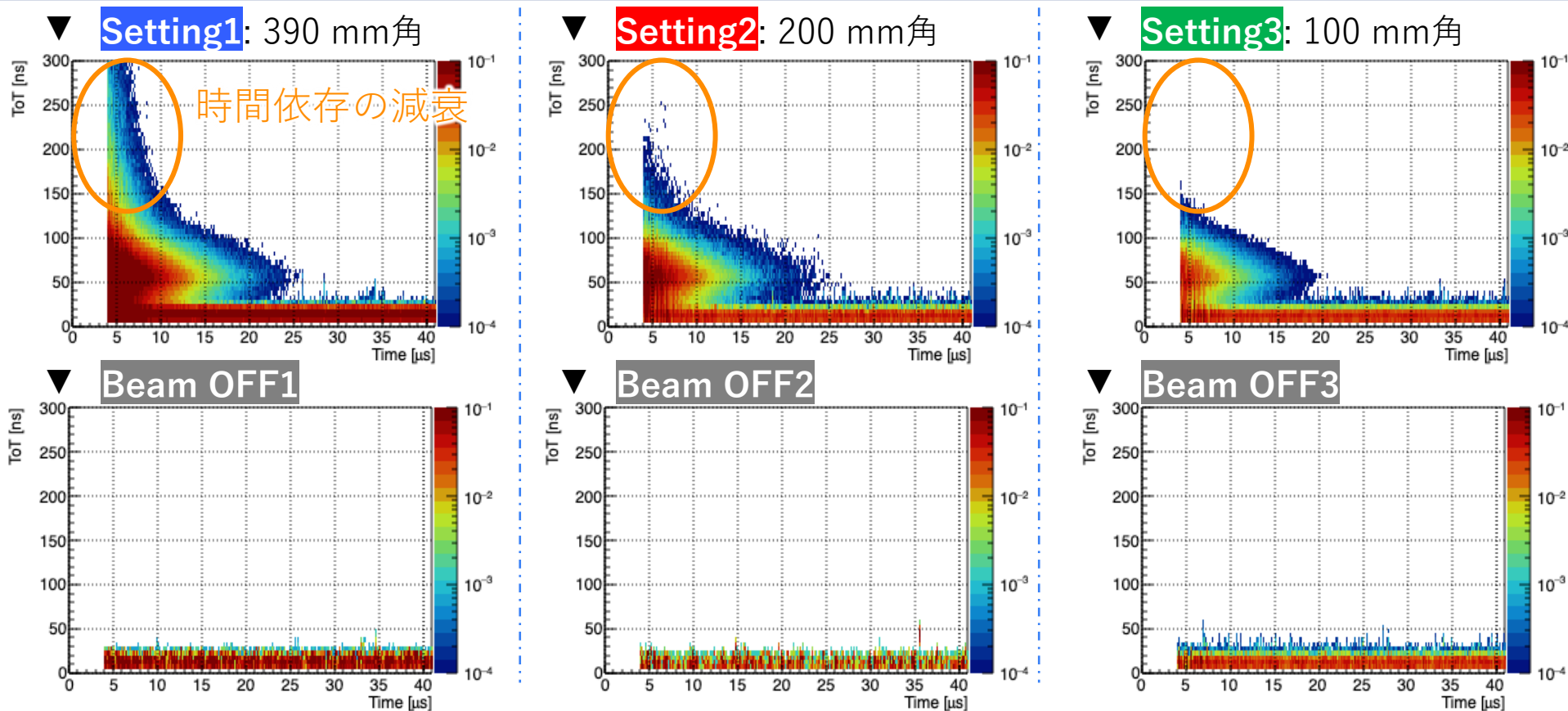


➤ ノイズのピークToT = 10 ns

➤ シグナルのピークToT = 60 ns = 1 MIPと同等

ToTの時間構造

12/21



■ 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

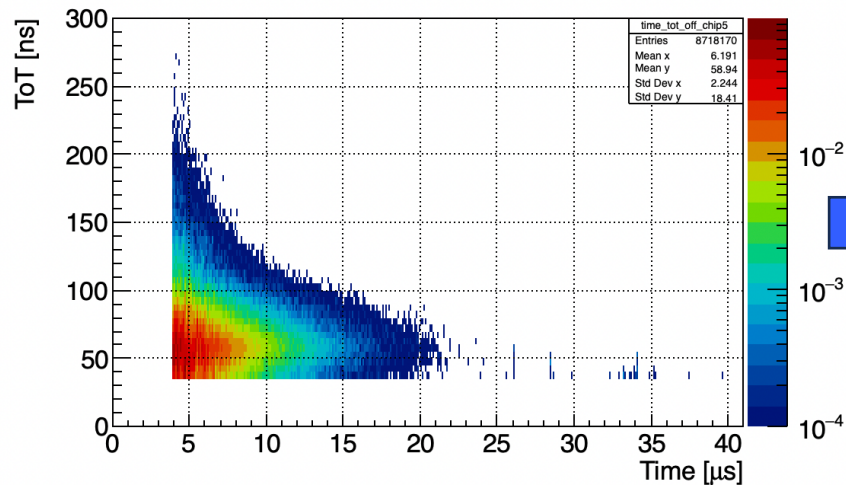
■ Beam OFF

- 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

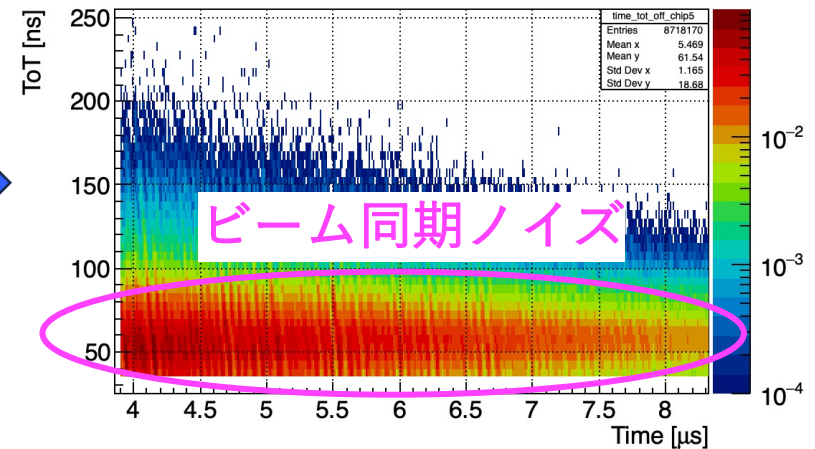
ビーム試験における課題

13/21

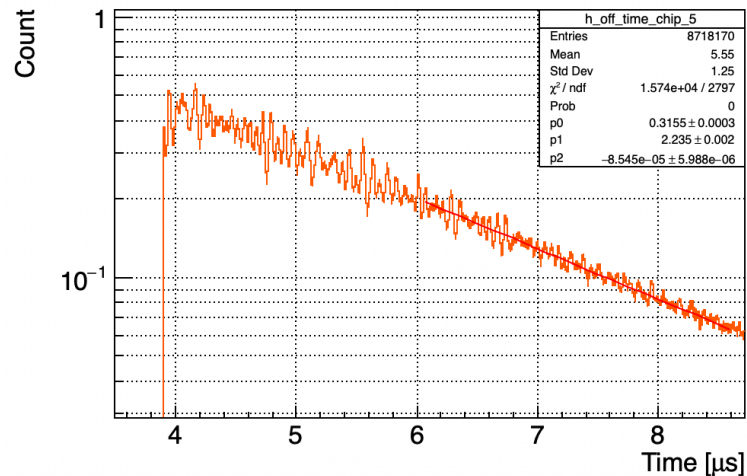
Time vs. ToT ※ノイズの少ないchです



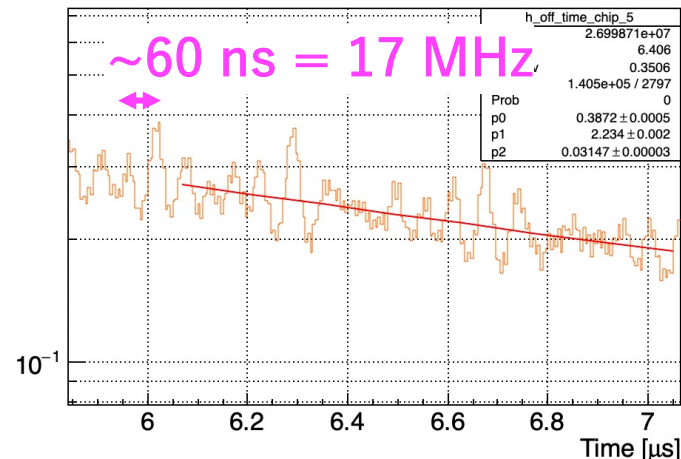
拡大



Time Spectrum



拡大



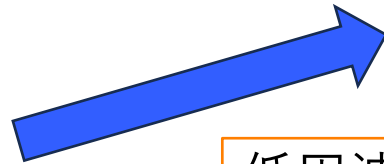
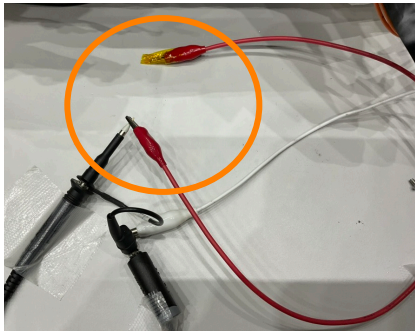
ToT 30 ns でcutしてもノイズが存在
➤ ノイズ低減が必須

プローブによるMLFノイズ測定

14/21

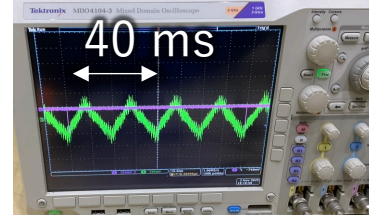
低周波成分: プローブの振動

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)

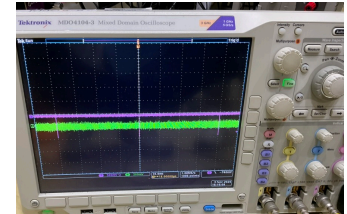


低周波成分
→ プローブの振動由来

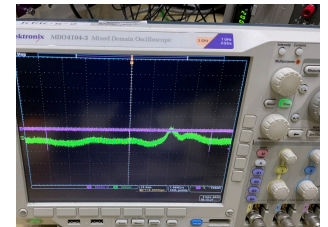
机上 (50 Hz)



床



床 + 足踏み



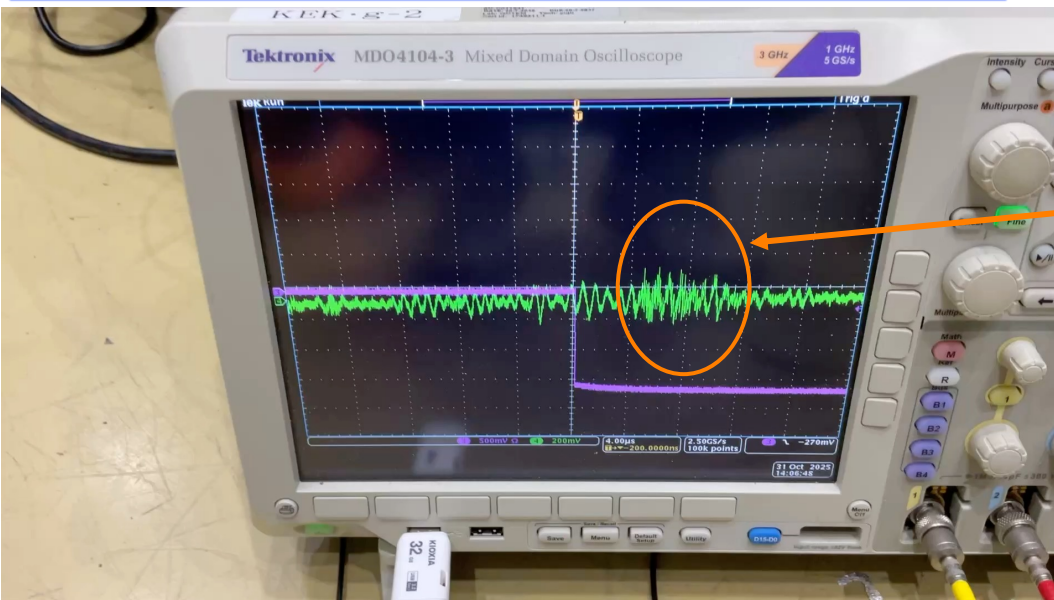
高周波成分: ビーム同期と非同期

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)



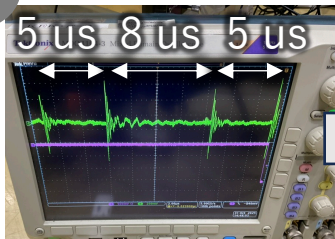
ノイズの種類とノイズ源

15/21

低周波成分: プローブの振動 (前ページ)

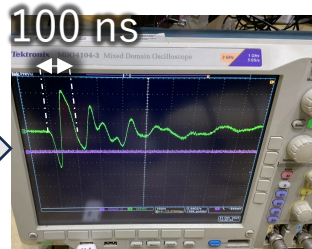
2種類のビーム非同期ノイズ (ノイズ源不明, 時間変化する)

1



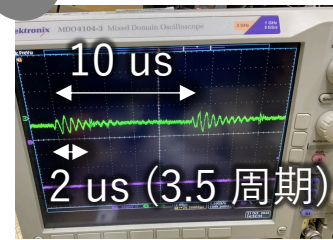
繰り返し構造

拡大



~10 MHz

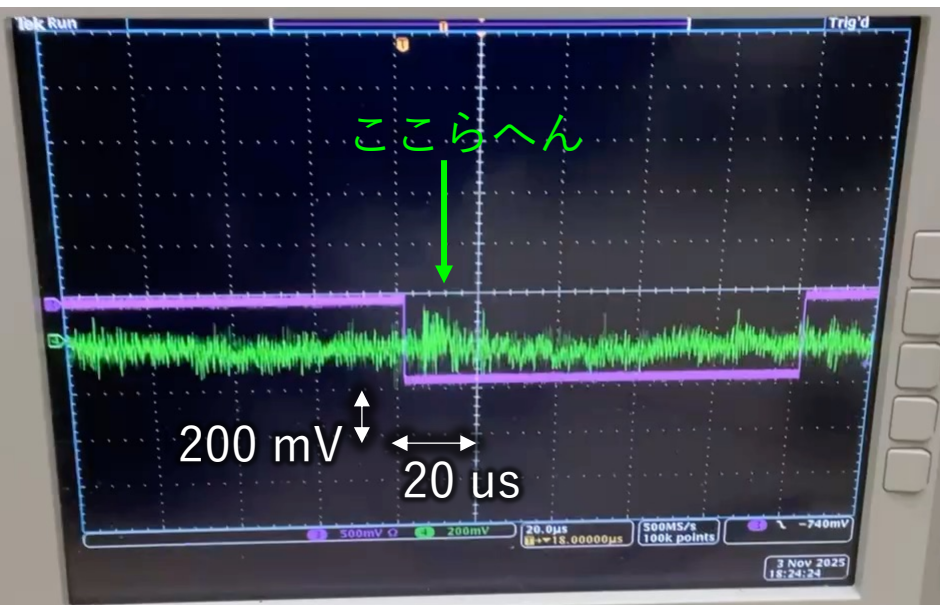
2



1.8 MHz

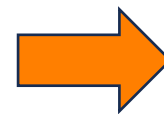
10 us 間隔で2つのみ

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



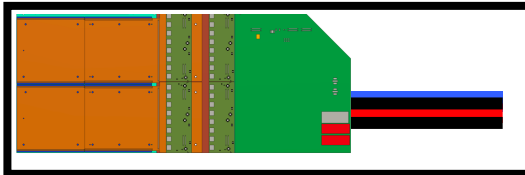
同期ノイズの原因
電磁ノイズ

(プローブではGNDに落とした
アルミシールドで低減可能)

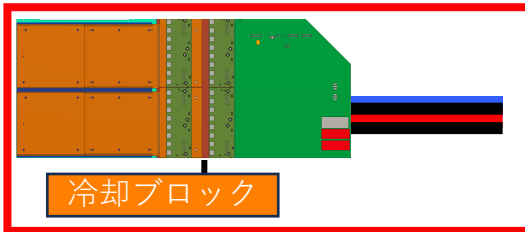
エリア内外の結果まとめ

16/21

エリア外

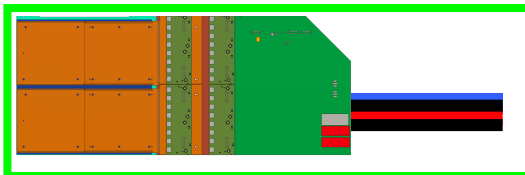


基準

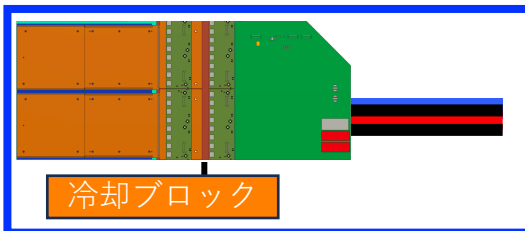


前半ch: ほぼ変化なし
後半ch: 増加

エリア内



前半ch: ほぼ変化なし
後半ch: ほぼ変化なし

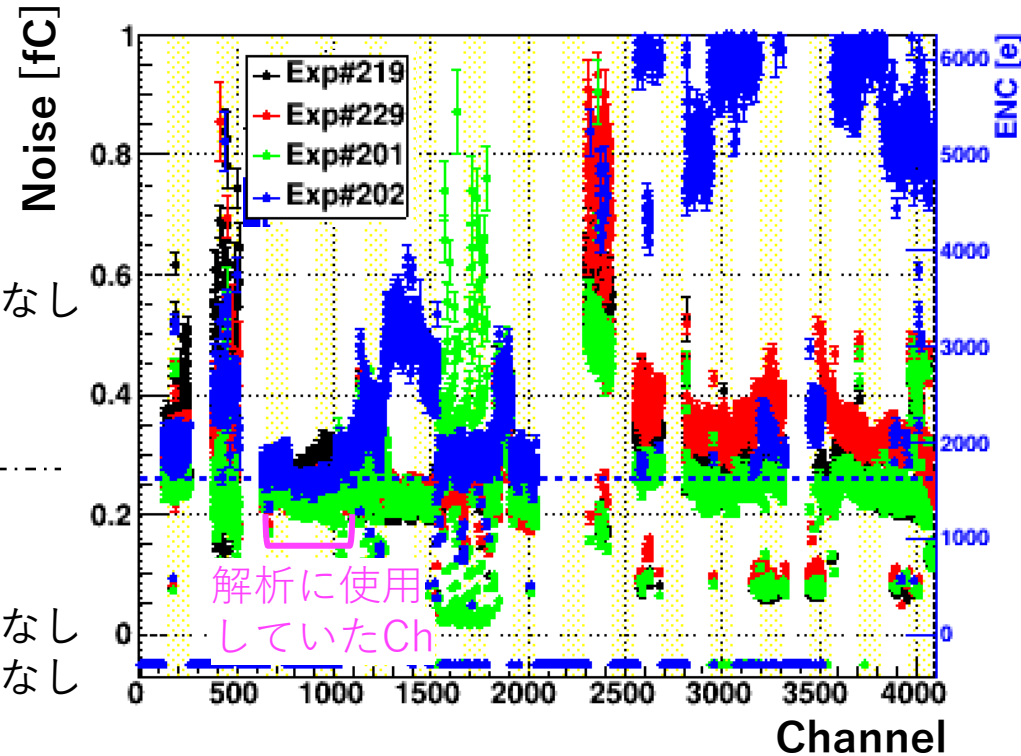


前半ch: 一部増加
後半ch: 増加 (画面外)

- 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

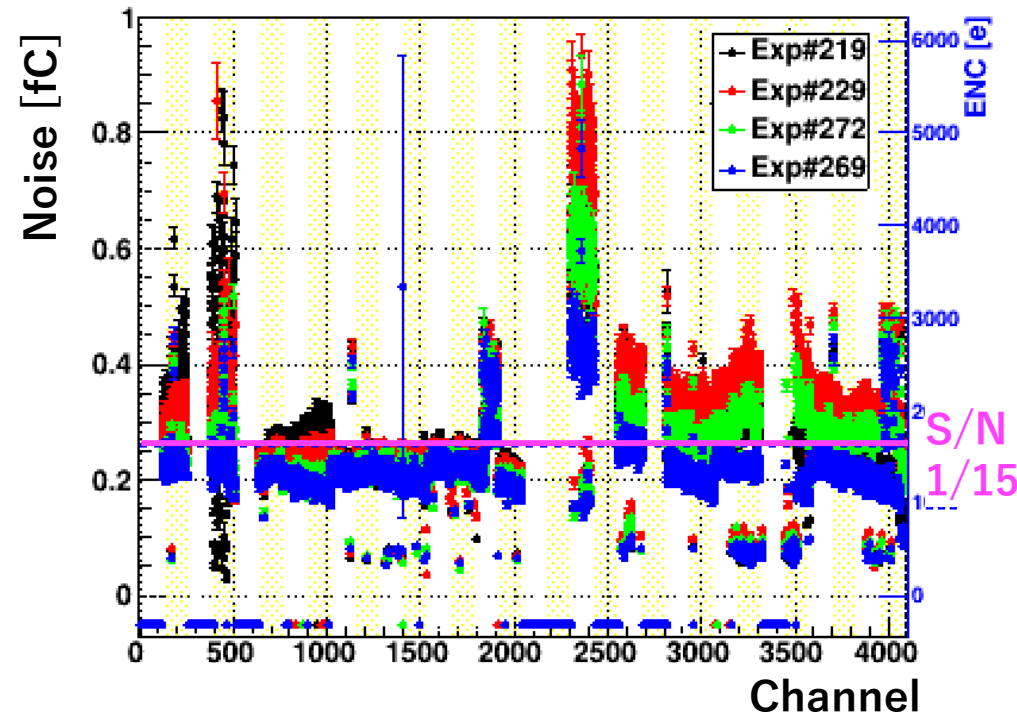
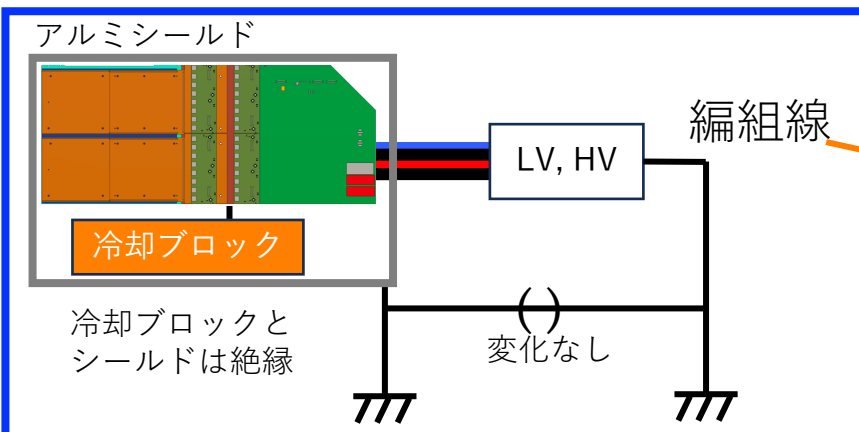
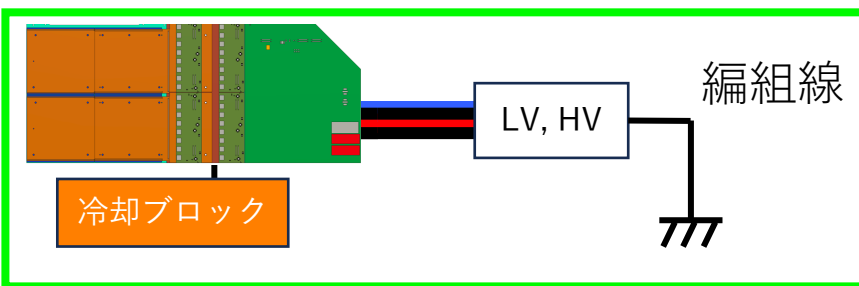
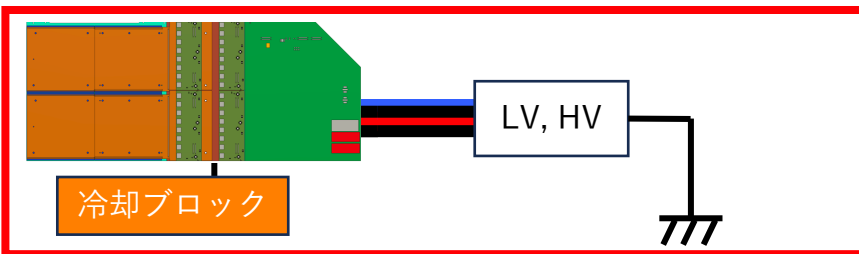
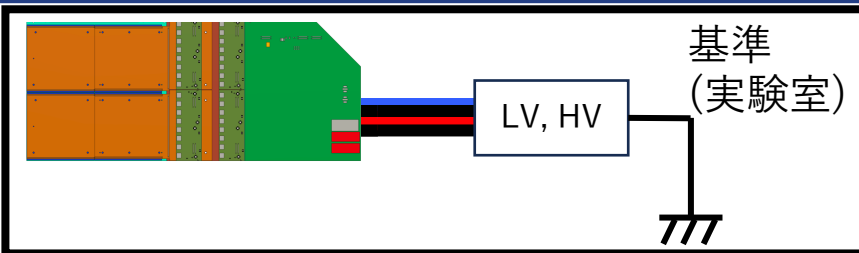
■ 調査項目(何かしら効果あったもの○)

- 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(△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(×)

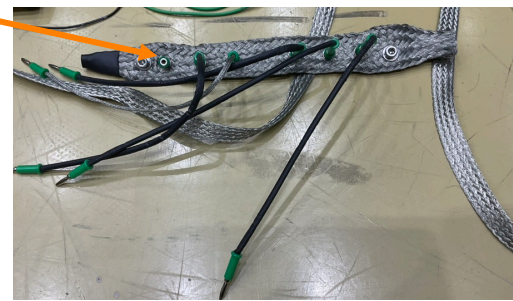
田中さん(電気回路の専門家)に聞いたのが結果的には一番効果があった(助言を試したら減った)

ノイズ低減手法 (エリア外)

18/21



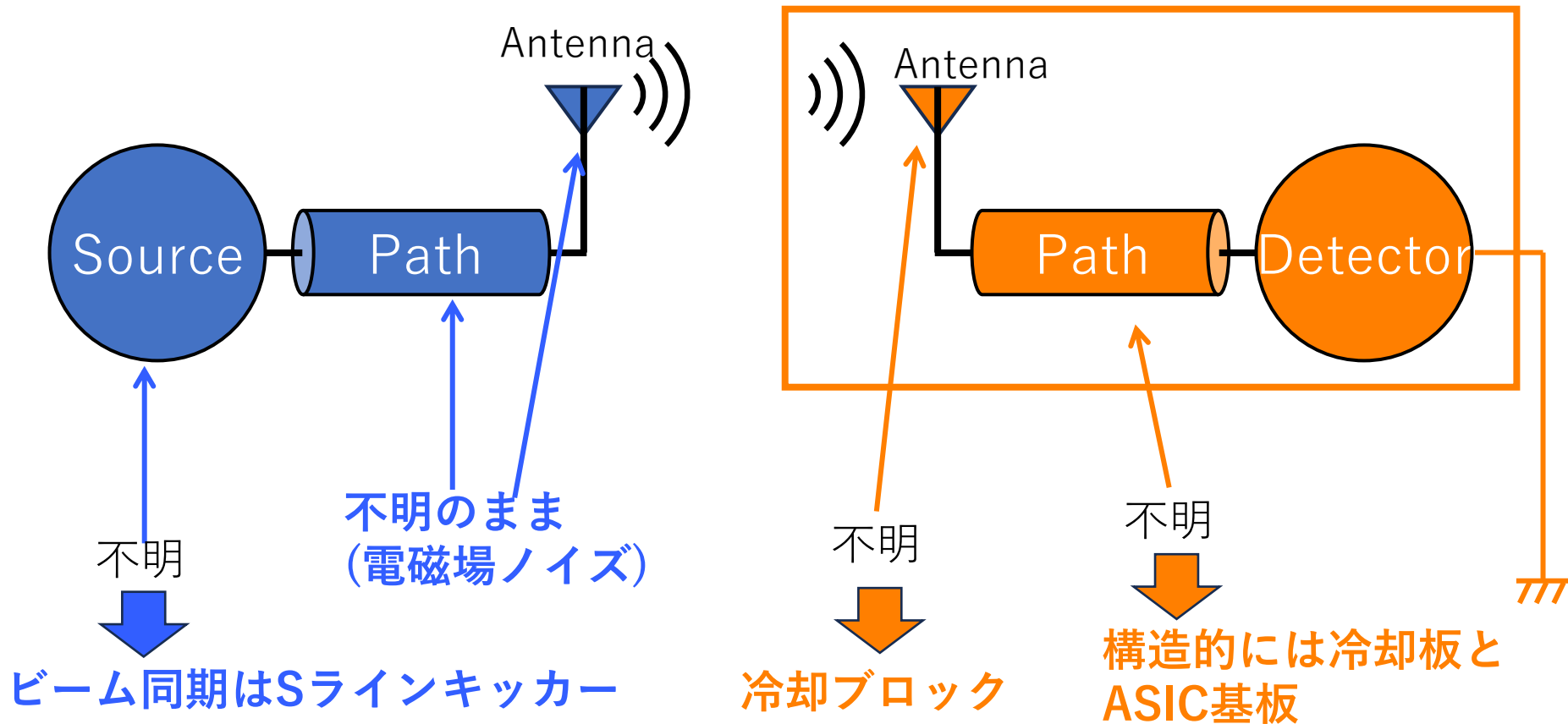
GND強化 + シールドによって
実験室レベルより改善



ノイズ調査のまとめ

19/21

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

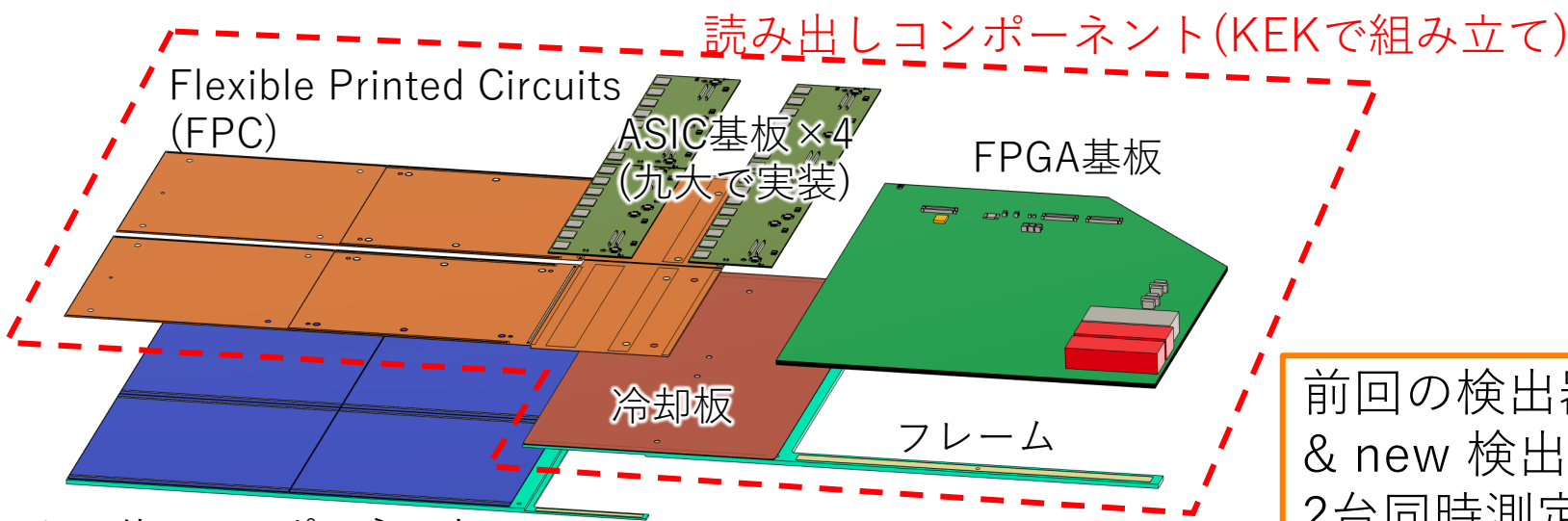
2026/01/29 MuSEUM ビームタイムにむけて

■ 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**



センサーコンポーネント
×4 (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は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