

# J-PARC muon g-2/EDM実験に向けた キッカー磁場中でのシリコンストリップ検出器の 動作試験および対策状況

2024/11/19  
新潟大学 矢村昂暉

# J-PARC muon g-2/EDM 実験

- J-PARC muon g - 2/EDM 実験ではミューオンの異常磁気モーメント(g-2)と電気双極子モーメント(EDM)を独立な手法で精密に測定する。

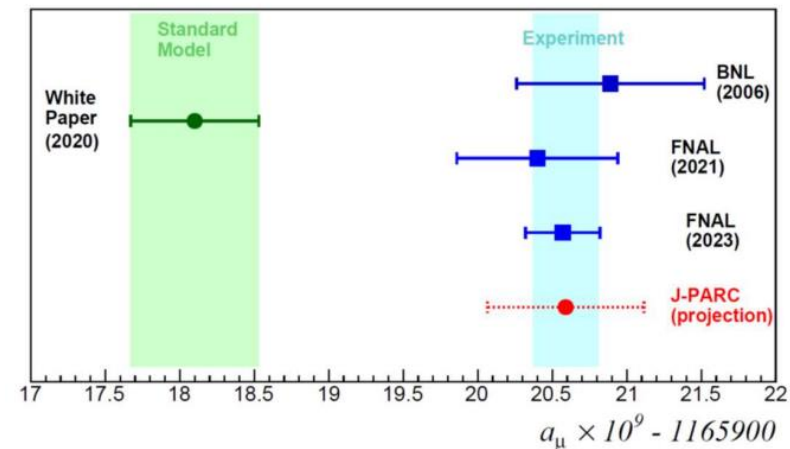
## 先行・進行中の結果

g-2 0.54 ppm@BNL  
0.20 ppm@FNAL  
EDM  $< 1.8 \times 10^{-19} e \cdot cm$   
@FNAL



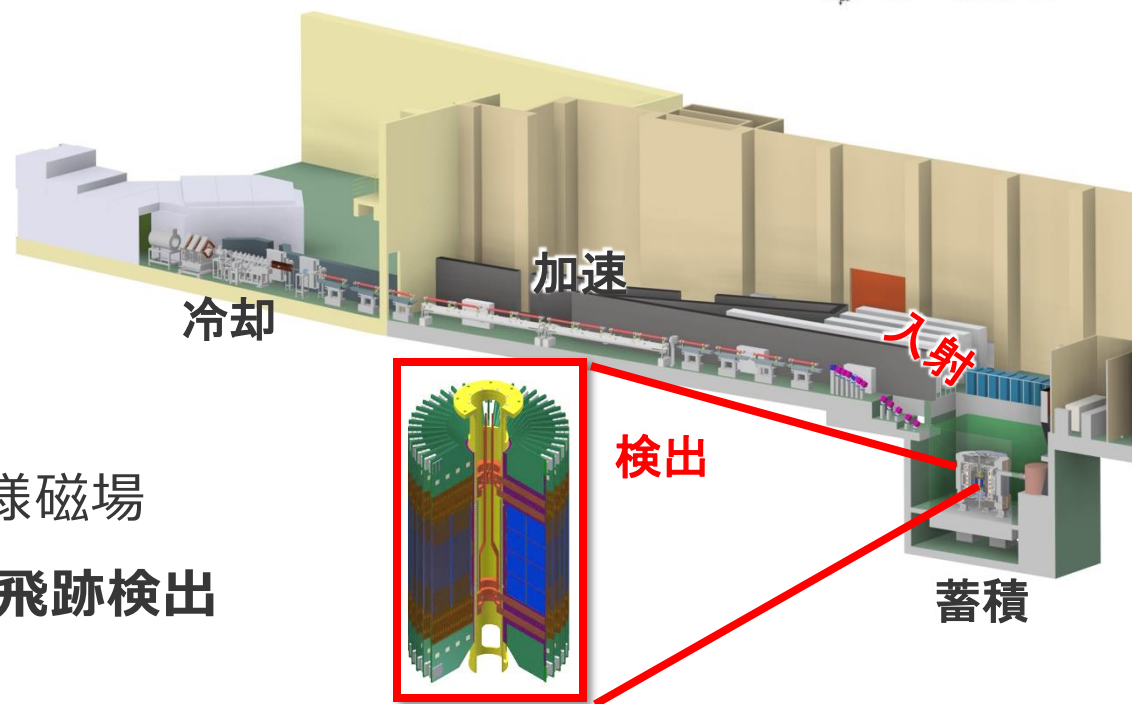
## 目標

g-2 0.45ppm→010ppm  
EDM  $10^{-21} e \cdot cm$



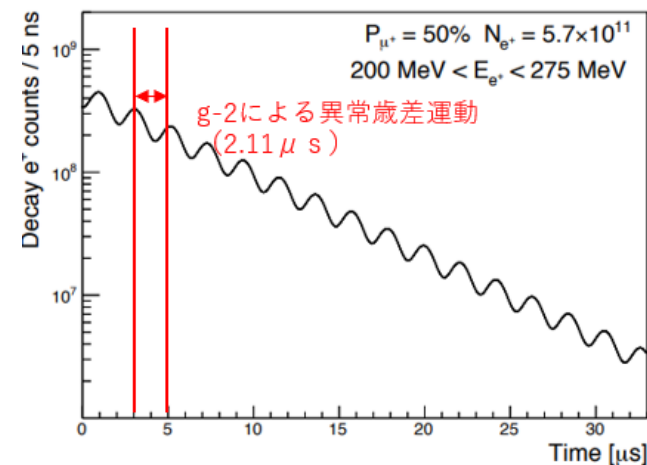
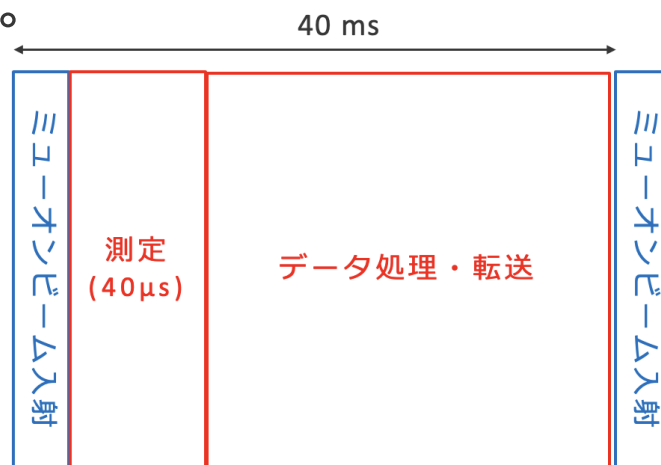
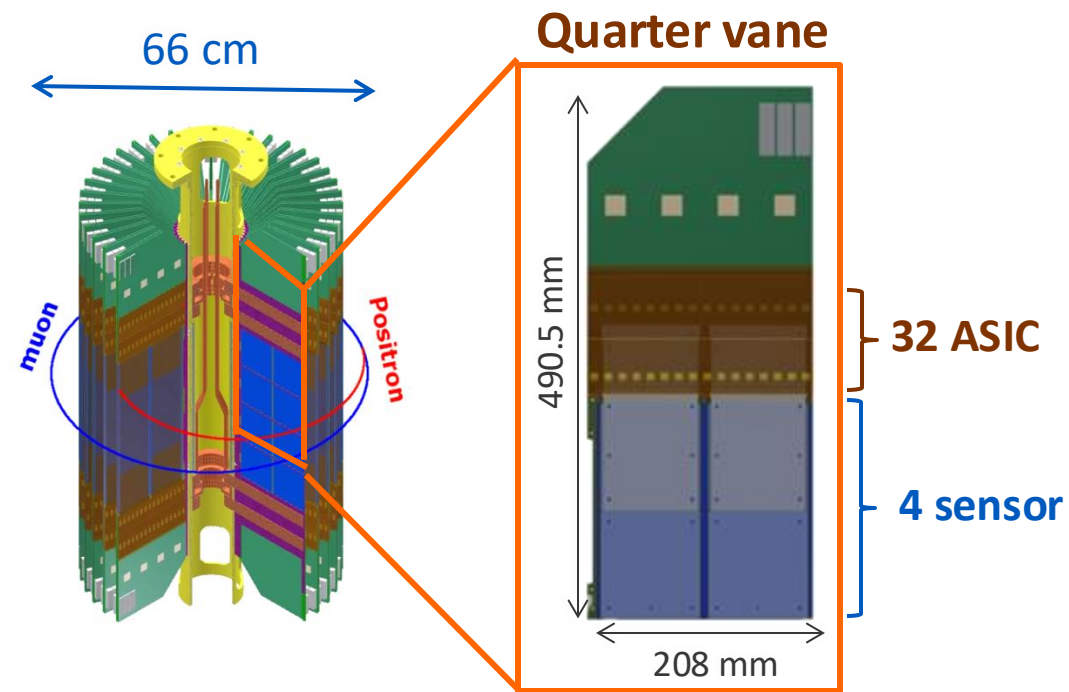
## 特徴

- 低エミッタンスのミューオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いない収束
- コンパクトなMRI型ソレノイド磁石による高一様磁場
- シリコンストリップ検出器による崩壊陽電子の飛跡検出



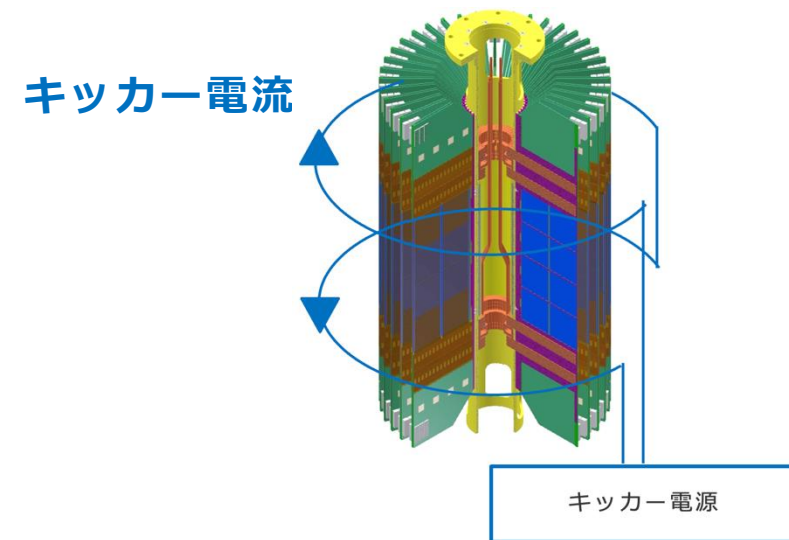
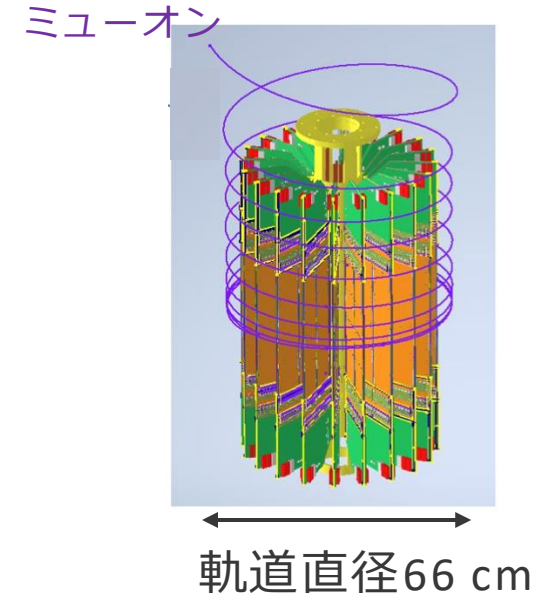
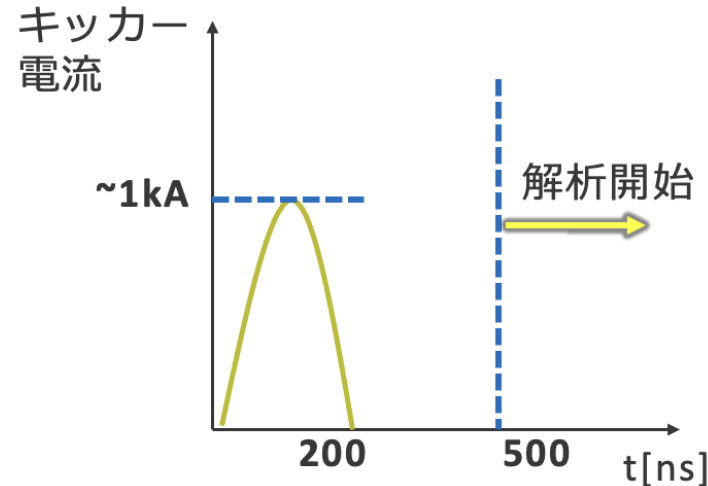
# シリコンストリップ検出器

- ミューオン崩壊で生じる陽電子の飛跡をシリコンストリップ検出器で測定する。
- 40枚の検出モジュールを放射状に配置。
- 最大6個/nsの頻度で発生するミューオン崩壊事象を捉えるため、高レート耐性が要求される。
- ミューオンビームが40 ms 間隔で入射。  
40  $\mu$ s 間測定して、次のビームが来るまでに、データ処理と転送を行う。
- 検出器は、コンパレータの出力を5ns間隔でサンプリングし記録する。



# キッカー磁場とシリコンストリップ検出器

- コンパクトな蓄積リングにミュオンを3次元的に入射する。
- キッカーコイルに瞬間的に電流(キッカー電流)を流し、動径方向の磁場(キッカー磁場)を生じさせ、ミュオンを蓄積平面内に留める。
- シリコンストリップ検出器はキッカーコイルの内側に設置する。
  - キッカーコイル動作直後(目標500 ns)からデータ解析を開始する。
  - g-2の測定にはヒットタイミングの測定が重要。
    - 測定期間( $\sim 40\mu\text{s}$ )中の検出器のヒットタイミングのずれへの要求: 0(ps)



# キッカーノイズ対策の方針

- キッカー磁場によるノイズがg-2の測定に影響を及ぼすため、対策する必要がある。
- キッカー側の対策
  - キッカー電源とコイルから発生するノイズの低減
- 検出器側の対策 → 今回の講演内容
  - キッカーによる影響を測定するためのセットアップの構築および測定手法の確立
  - グランディング・シールドイングによるキッカーノイズ対策の検討



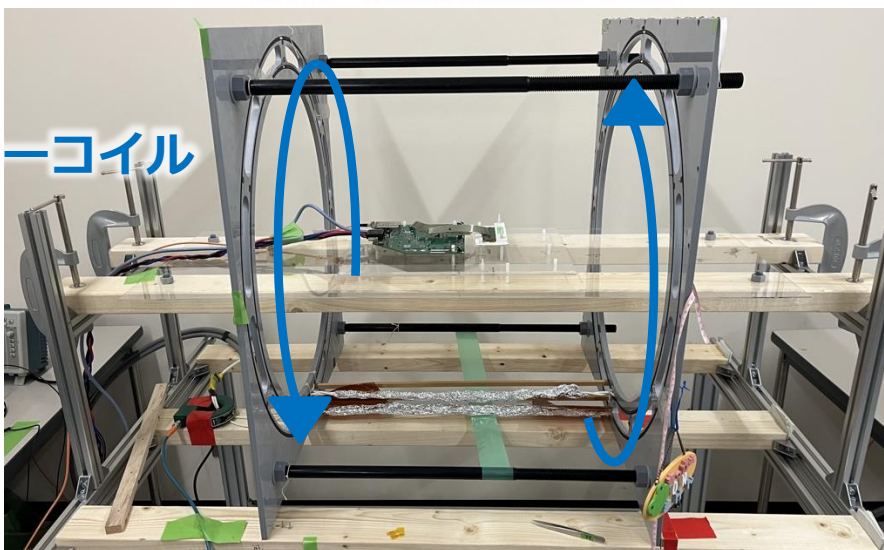
# 検出器の動作試験に使用している試作キッカーシステム

- 2種類のキッカーコイル・電源を用いて、検出器の動作試験を進めてきた。
- 試作キッカー2号機は本番相当の電流 (MAX1.5 kA)を流せる。

	試作キッカー初号機	試作キッカー2号機
最大キッカー電流	最大100 A	最大1.5 kA
スイッチング方式	サイラトロンスイッチ	磁気スイッチ
トリガー周波数	最大25 Hz	最大10 Hz
ジッタ(1 $\sigma$ )	< 3 ns	7 ns

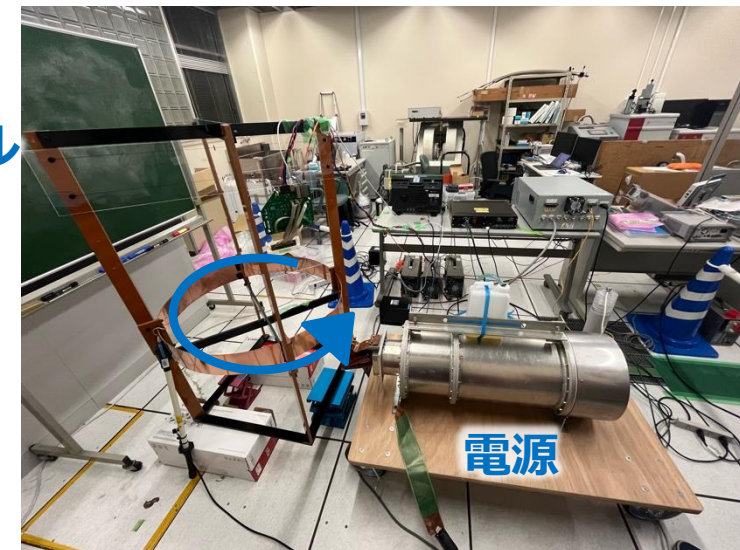
試作キッカー初号機

キッカーコイル

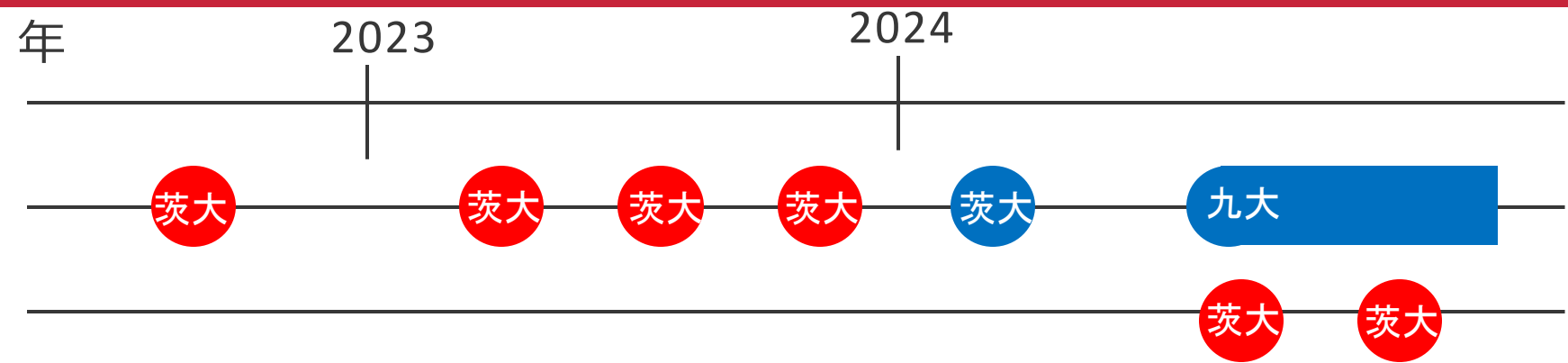


試作キッカー2号機

キッカーコイル

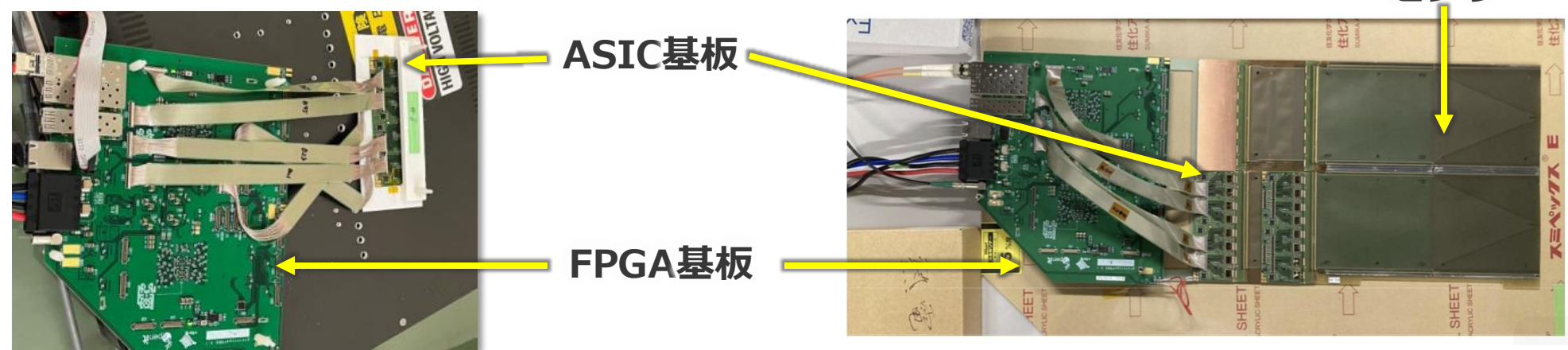


# キッカー磁場中での検出器の動作試験状況



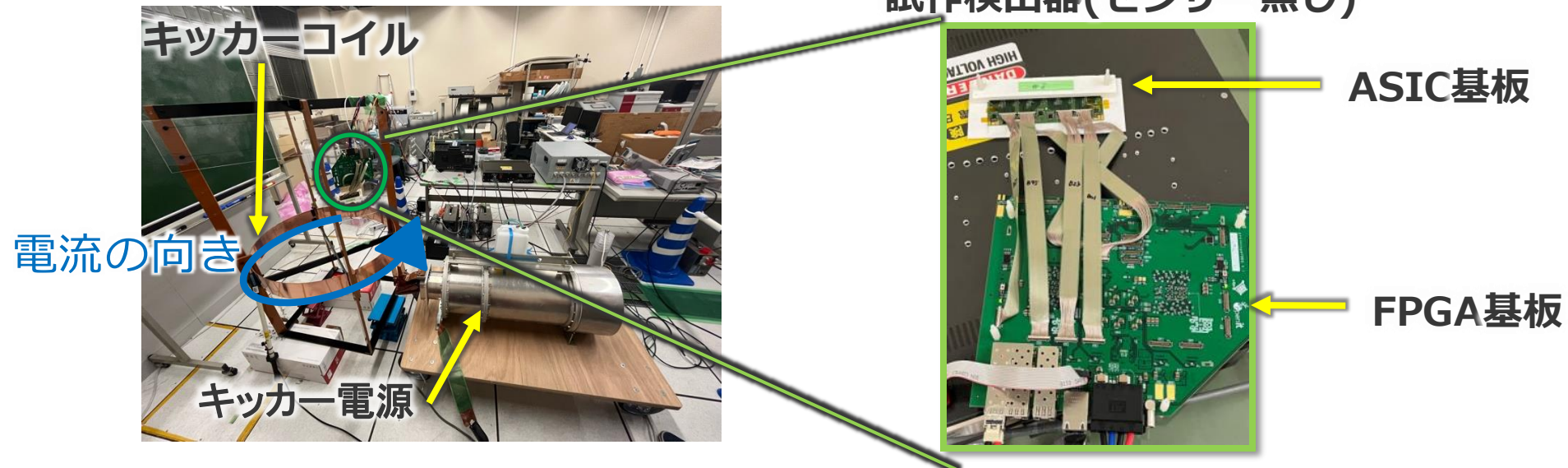
● 試作検出器(センサー無し)の動作試験  
(キッカーによる影響を測定するためのセットアップの構築および測定手法の確立)

● 試作検出器(センサー有り)の動作試験  
(グラウンディング・シールドイングによるキッカーノイズ対策の検討)



# 試作キッカー2号機中での検出器(センサー無し)の動作試験

- 本番の実験相当のキッカー電流が流せる試作キッカー2号機の中に検出器(センサー無し)を設置。
  - キッカーシステムと検出器システムを同期するセットアップを構築して、検出器の動作試験を行った。
  - 試作キッカー2号機の中で検出器が壊れないか
  - キッカー磁場発生直後の検出器への影響の理解(ノイズ、ヒットタイミングのずれ)

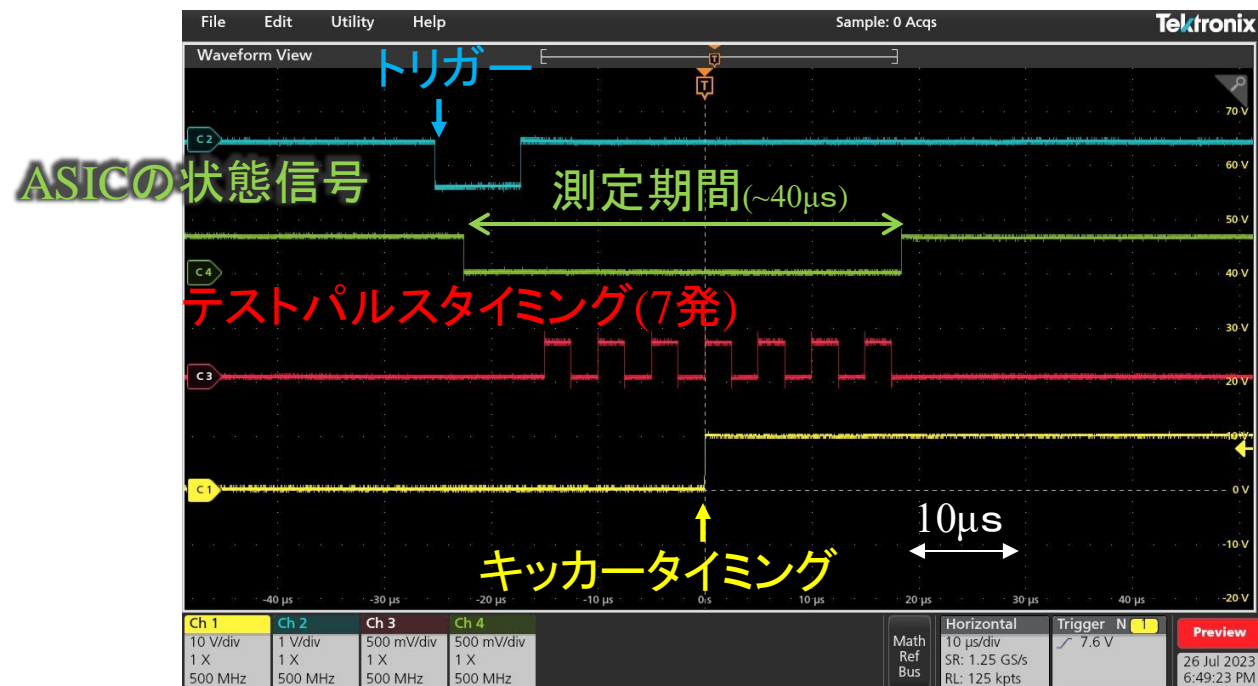
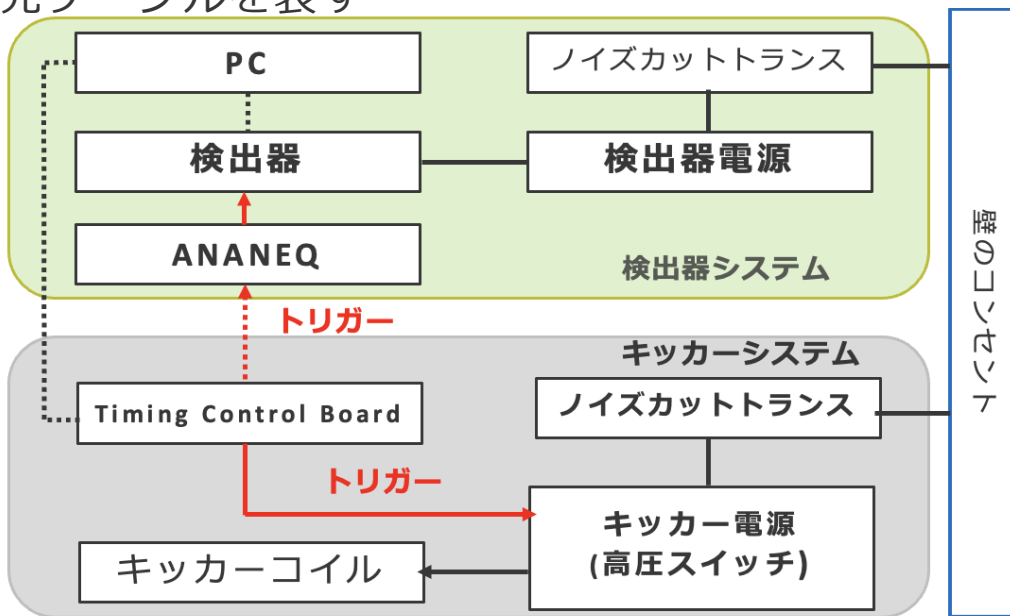




# 検出器とキッカーのタイミングの制御

- キッカーからの電氣的な影響を避けるために、キッカーと検出器のシステムを電氣的に分離したうえで、同期する必要がある。
- Timing Control Board (トリガー源) から検出器システムとキッカーシステムにトリガーを送り、両システムを同期する。
  - トリガー出力の遅延量(5 ns刻み)を変更することで、キッカーのタイミングを調整する。

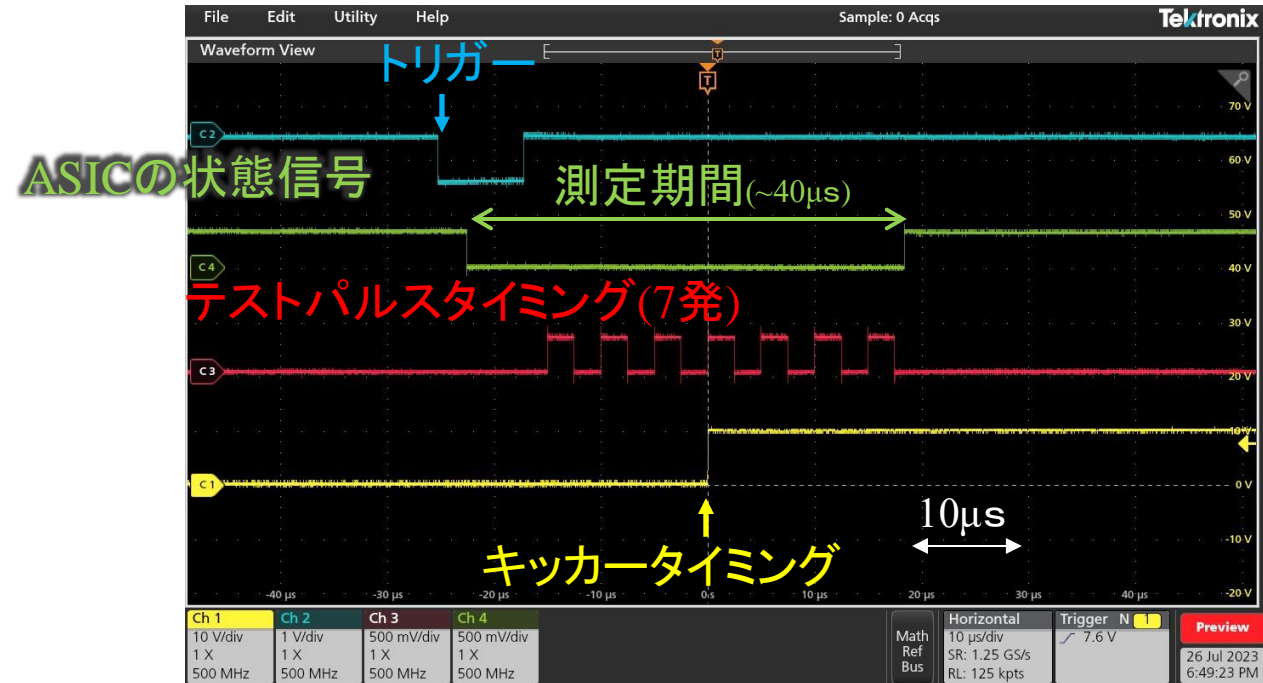
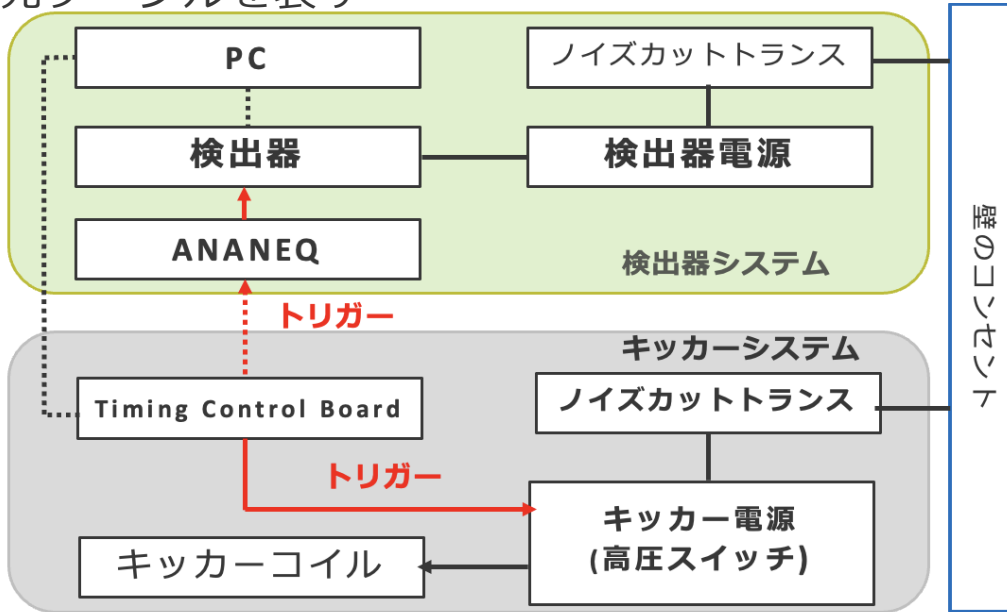
点線は光ケーブルを表す



# 検出器とキッカーのタイミングの制御

- ANANEQとTiming control board は光ケーブルで接続し、CDCM(Clock-duty-cycle-modulation)を用いてクロックを分配している。
- ノイズカットトランスを用いてキッカーと検出器のシステムのグラウンドを分離。
- キッカーと検出器のシステムを電氣的に分離したうえで、同期するセットアップが構築できた。

点線は光ケーブルを表す



# キッカーノイズによる検出器のヒットタイミングのずれの評価方法

- キッカー磁場発生からの経過時間ごとに、ヒットタイミングのずれを評価した。
  1. 5  $\mu\text{s}$  間隔でテストパルスを入射する。
  2. キッカーの発生前後のテストパルス間隔を測定して、ヒットタイミングのずれを評価する。
  3. キッカーの発生タイミングをスキャンして、測定を繰り返す。

## 評価に使用する変数

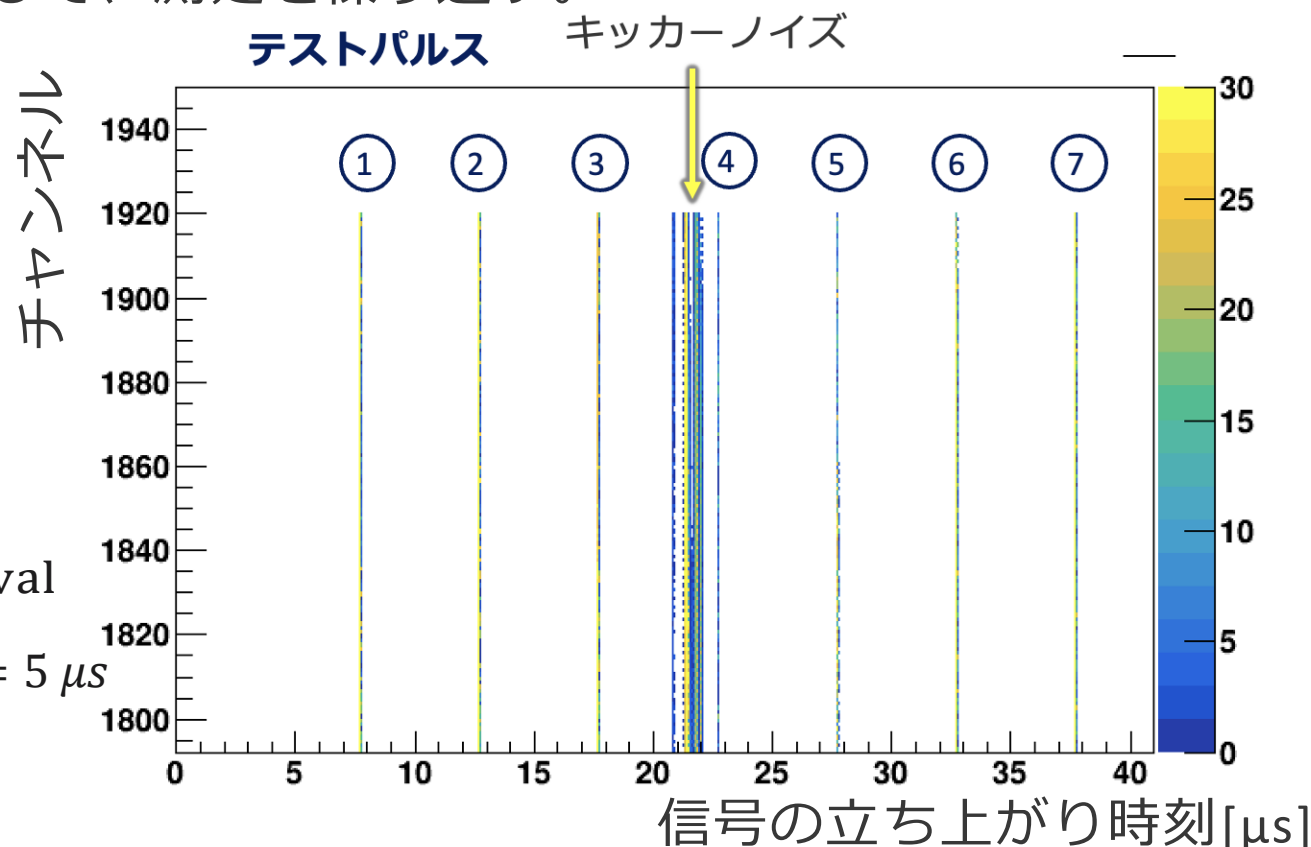
- キッカータイミングからの経過時間

$$T_{\text{hit-kicker}} = T_{\text{hit}} - T_{\text{kicker}}$$

- キッカーによるヒットタイミングのずれ

$$\Delta T = T_{\text{hit}} - T_{\text{prev-hit}} - T_{\text{interval}}$$

$$T_{\text{interval}} = 5 \mu\text{s}$$



# キッカーノイズによる検出器のヒットタイミングのずれの評価方法

- キッカー磁場発生からの経過時間ごとに、ヒットタイミングのずれを評価した。
  1. 5  $\mu\text{s}$  間隔でテストパルスを入射する。
  2. キッカーの発生前後のテストパルス間隔を測定して、ヒットタイミングのずれを評価する。
  3. キッカーの発生タイミングをスキャンして、測定を繰り返す。

## 評価に使用する変数

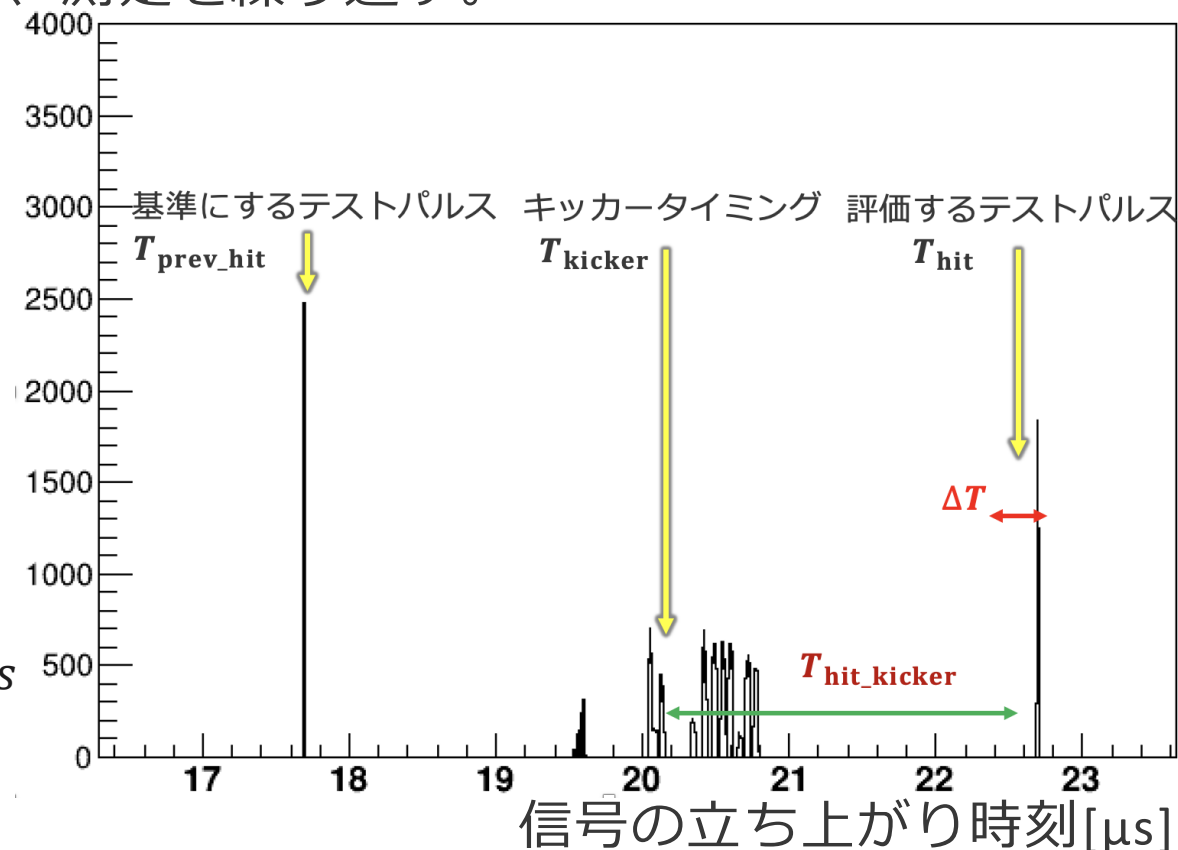
- キッカータイミングからの経過時間

$$T_{\text{hit-kicker}} = T_{\text{hit}} - T_{\text{kicker}}$$

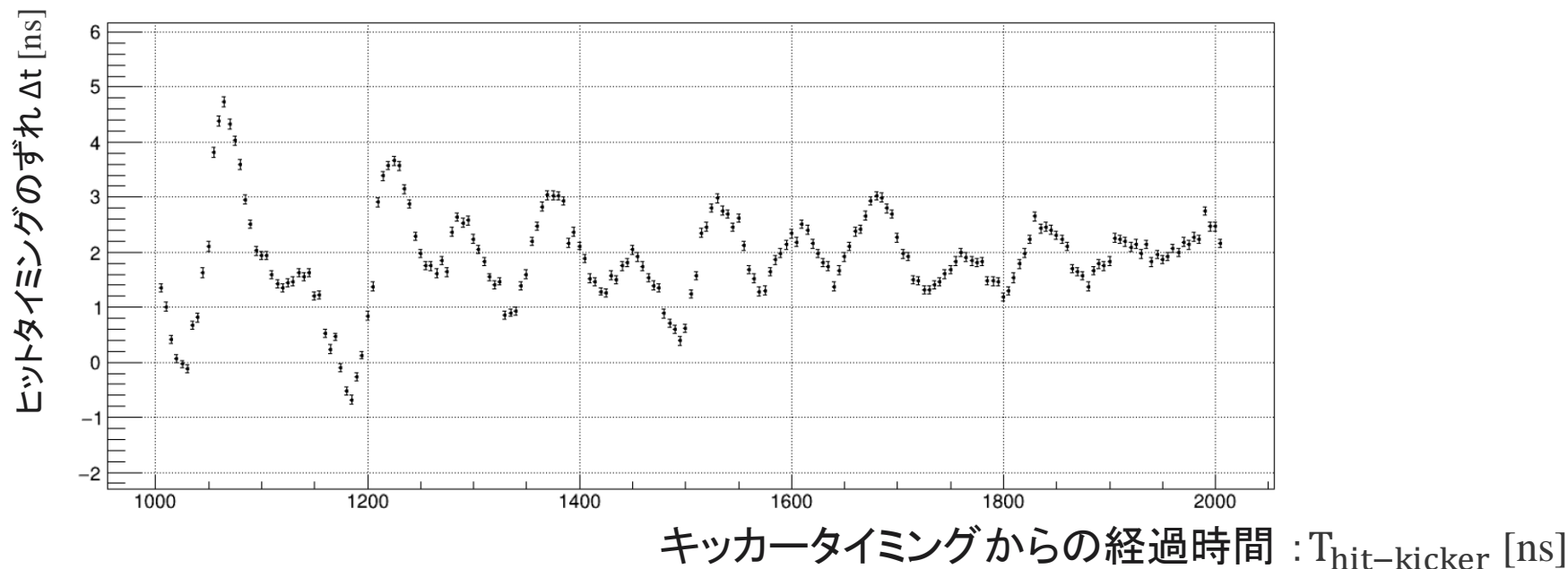
- キッカーによるヒットタイミングのずれ

$$\Delta T = T_{\text{hit}} - T_{\text{prev-hit}} - T_{\text{interval}}$$

$$T_{\text{interval}} = 5 \mu\text{s}$$



# キッカーノイズによる検出器のヒットタイミングのずれの測定結果

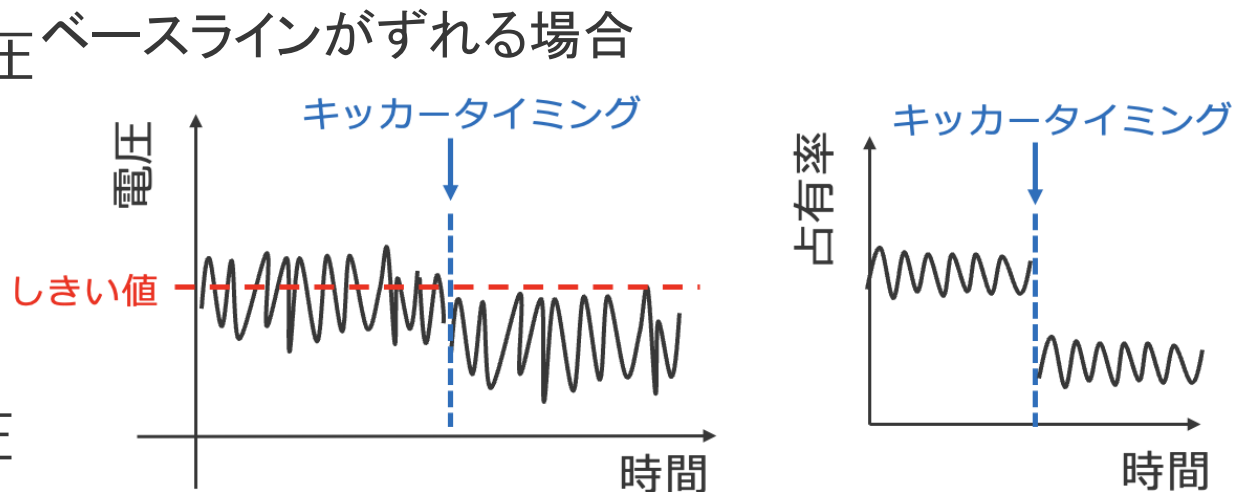


- キッカー磁場発生後の経過時間ごとにヒットタイミングのずれを評価した結果、周期的な変動が見られ、最大約5 nsのずれが見える。
- キッカー磁場によるヒットタイミングのずれを測定する方法を確立した。
- 物理解析に使うためには、ヒットタイミングのずれをpsオーダで理解するためには必要があるためヒットタイミングのずれる原因を追求する。



# ヒットタイミングがずれる原因の追求

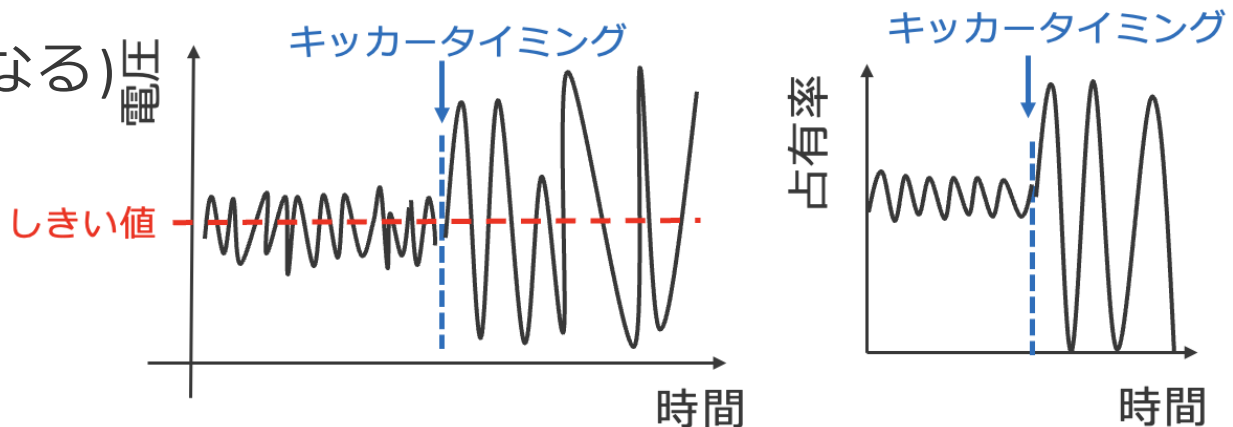
- キッカーによりASIC内のベースライン電圧が変動し、その結果、ヒットタイミングが変化していると予想される。



- 占有率(コンパレータがHigh になっている割合) から、ベースライン電圧の変動を調べて、ヒットタイミングとの関係を確認する。

ベースラインの揺らぎが大きくなった場合

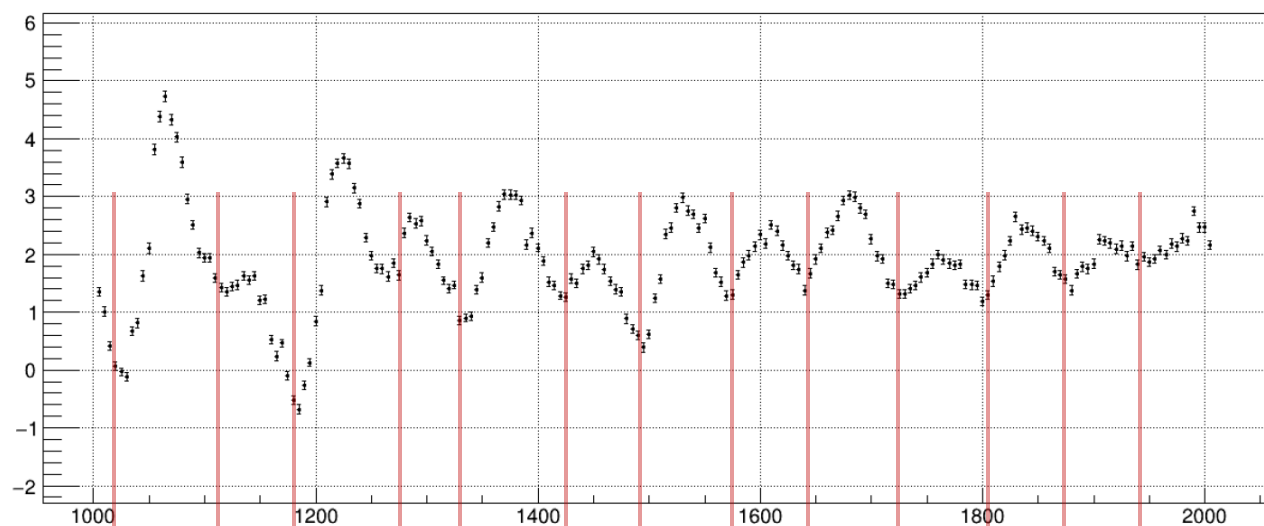
- ベースラインが下がる(=しきい値が高くなる) と、ヒットタイミングが遅くなる。
  - 占有率が下がると、 $\Delta T$ が大きくなる。



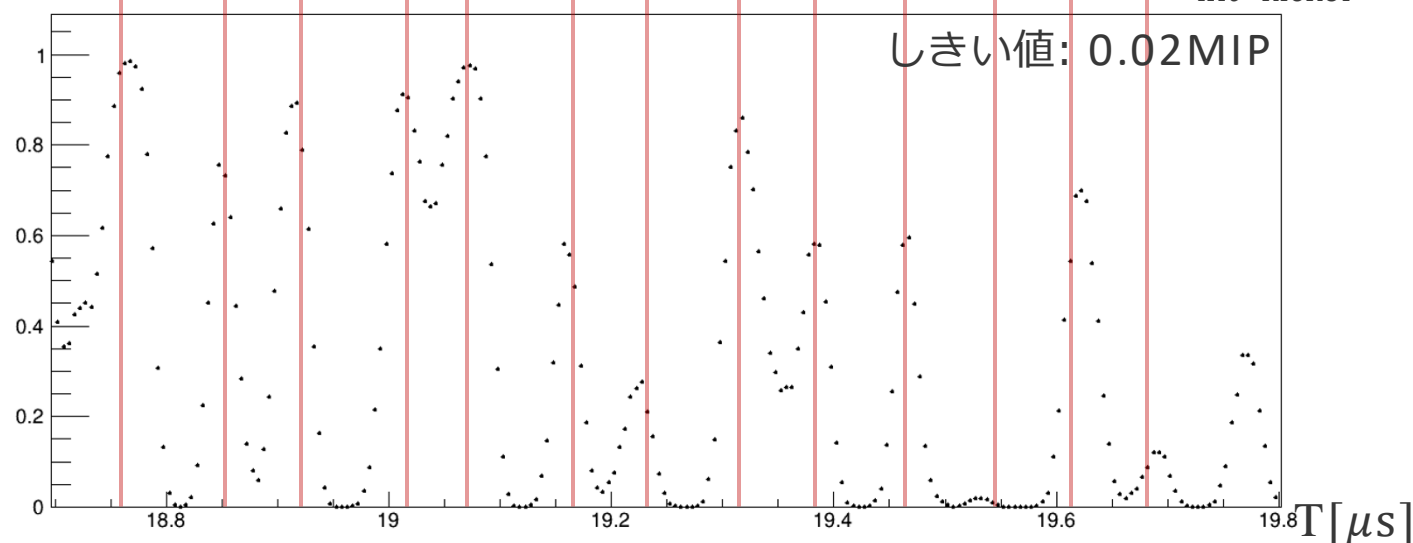
# ヒットタイミングのずれとベースライン電圧の変動の関係

- ヒットタイミングのずれとベースライン電圧の変動の関係を調べた。
- ヒットタイミングのずれが大きく(小さく)なると、占有率が下(上)がっていることが確認できる。
- 現在ヒットタイミングのずれとベースラインの変動の関係を定量的に調べている。

ヒットタイミングのずれ  $\Delta t$  [ns]

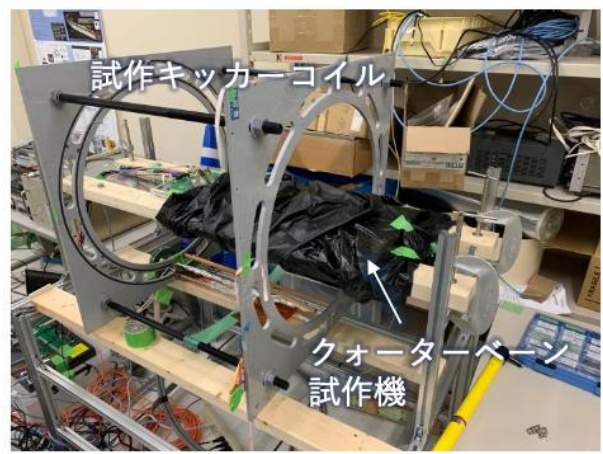


占有率

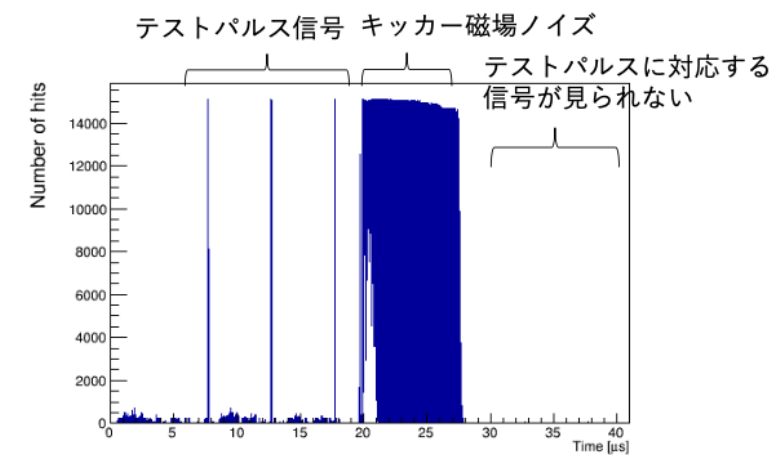


# 試作キッカー初号機中での検出器(センサー有り)の動作試験

- 本番の1/10の最大電流 (100 A)を流すことが可能な試作キッカー初号機の中に検出器(センサー有り)を設置して動作試験を行った。 @九州大学実験室
- キッカーノイズを観測後にヒット信号が一切なくなる現象が発生した。
  - ノイズも消失。
  - 次のパルス(25 Hz周期)ではまた最初の信号は見える。
  - ベータ線源を用いた実信号でも同様の現象を確認した。



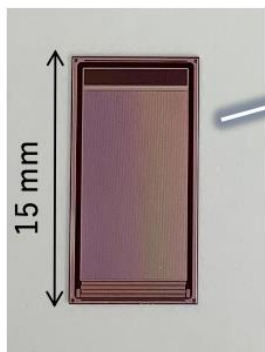
パルス磁場環境試験の様子



キッカーコイル内で測定したヒットデータの時間分布

# キッカー直後の信号消失の原因

- 小さいシリコンストリップセンサーを接続したASIC評価基板を用いて信号消失の原因を調査
  - アナログ波形をモニタして調査した。
- 信号消失の原因はASICプリアンプの電位の飽和によることが判明した。
  - プリアンプ電位は飽和後、 $\sim 1$  ms程度の時間をかけて元の電位に戻る。
- グランディング・シールドディングによるキッカーノイズ対策を行う。

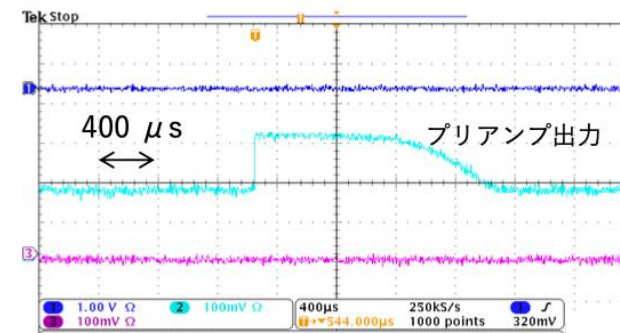
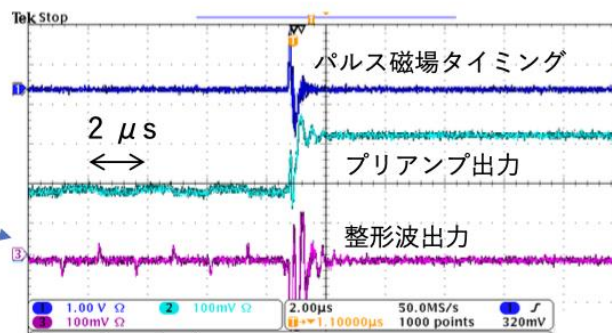


50  $\mu$ mピッチ、128チャンネルのストリップセンサー



小さいセンサーに接続したASIC評価基板

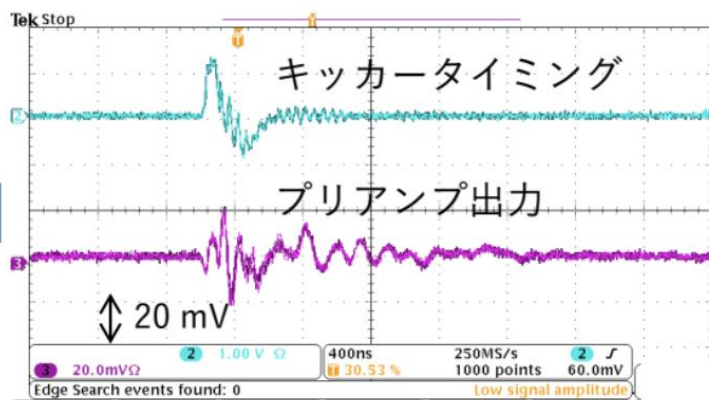
1 MIPのテストパルスを入力



ASIC評価試験基板で測定したアナログ波形

# グラウンディング・シールドングによるキッカーノイズの低減

- 電源やトリガー信号のグラウンド経路でキッカーからのノイズが流入しキッカーコイル外でも信号の消失が発生していた。
  - ノイズカットトランスの使用や光ケーブルによるキッカーシステムから絶縁によってキッカーコイル外では出力が飽和しない程度までには改善した。
- キッカーコイル内に入れると全体をアルミニウム箔で覆っても十分なシールド効果は得らず10 A (実験本番の1/100) で飽和をなくせる程度。

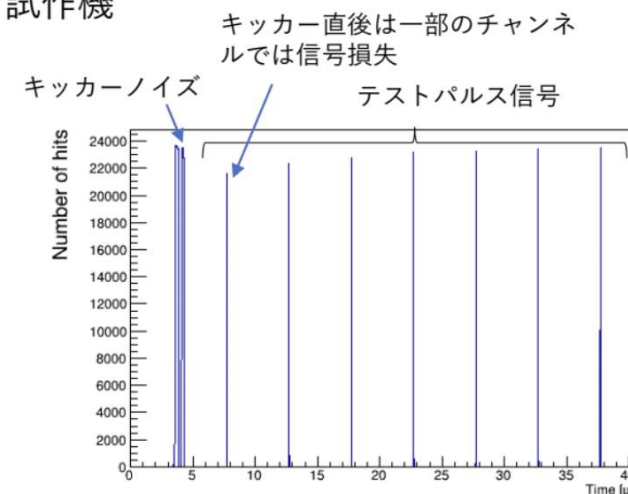


グラウンディングの分離後



アルミ箔で検出器をシールド

試作機

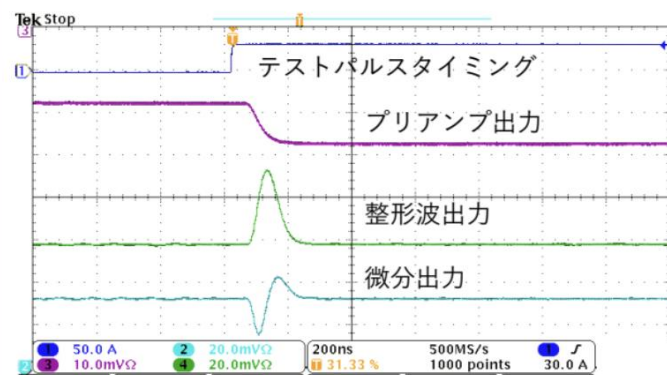


最大電流10 Aでキッカーコイル動作時のヒットデータ

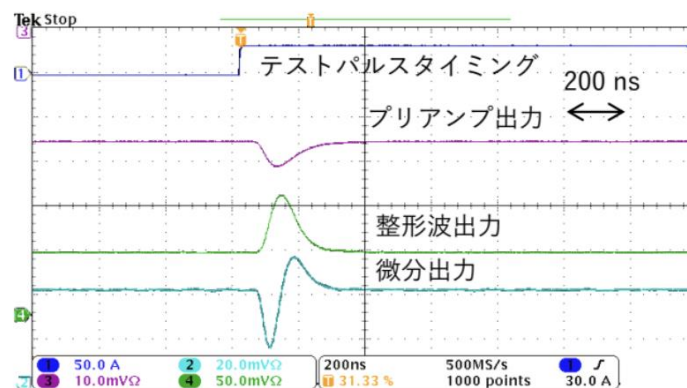


# 現在の有力なキッカー対策方法

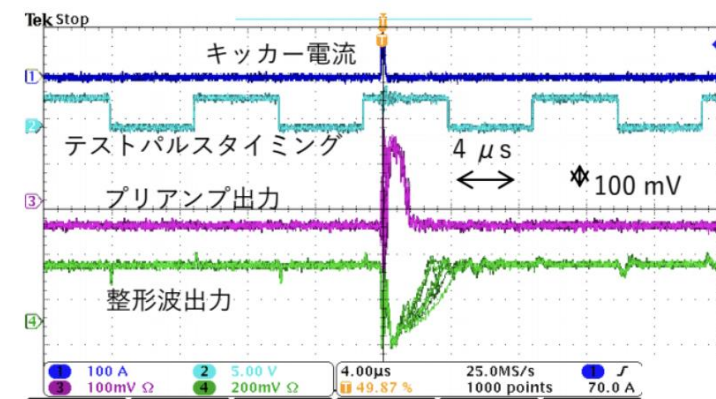
- プリアンプの時定数を短縮することで、飽和時間を短縮する。
- 通常の設定ではプリアンプの減衰の時定数は20  $\mu\text{s}$ 程度に設定している。
  - データ取得時間は40  $\mu\text{s}$ 。
  - この設定ではプリアンプの飽和が数100  $\mu\text{s}$ ~1 ms程度継続する。
- プリアンプの機能を残す場合時定数は最小100 ns程度までは下げることができる。
  - この設定ではダイナミックレンジの減少、タイムウォークの増大などの性能悪化が起こる。



通常設定時のアナログ出力波形



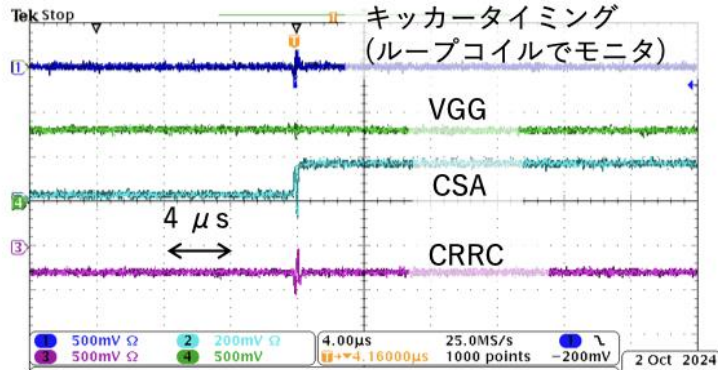
プリアンプ時定数を縮めた際のアナログ出力波形



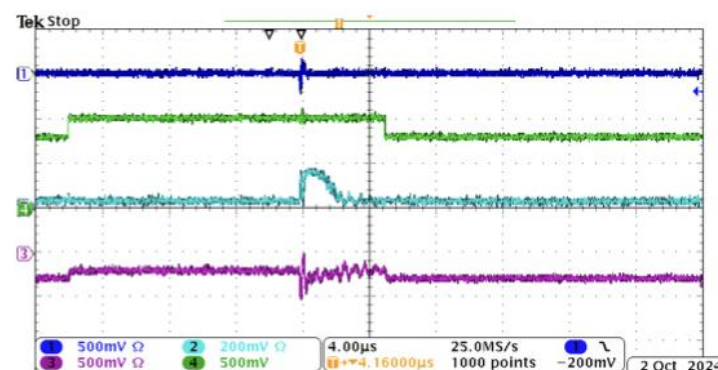
プリアンプ時定数を縮めた際のキッカー磁場環境下でのアナログ出力波形

# 現在の有力なキッカー対策方法

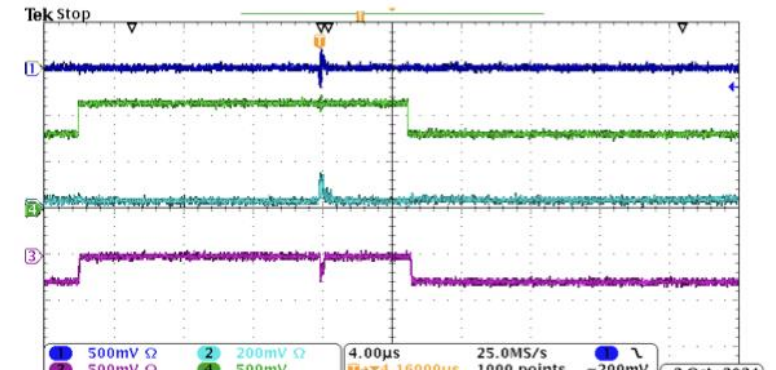
- キッカー発生前後のみ、プリアンプの時定数(バイアス電圧VGGで設定)を小さくして、プリアンプの飽和が無くなった後、プリアンプの時定数を戻す。
- ASIC評価基板ではキッカーによる飽和時間をほぼ0にすることに成功した。
  - キッカー発生後は通常の設定値に戻すため、性能の悪化はない。
- 今後の予定
  - キッカー2号機および検出器(センサーあり)を用いて、同様の効果が得られるか確認する。
  - VGG を時間的に変動させる機能を実機基板に追加する。



VGG High=860 mV



VGG High=1.060 V



VGG High=1.180 V

# まとめ

- J-PARC muon  $g - 2$ /EDM 実験ではミューオンの異常磁気モーメント( $g-2$ )と電気双極子モーメント(EDM)を独立な手法で精密に測定する。
- キッカー磁場によるノイズが $g-2$ の測定に影響を及ぼすため、対策する必要がある。
- 検出器(センサー無し) を用いた動作試験
  - キッカー磁場によるヒットタイミングのずれを確認する測定方法を確立した。
  - 検出器のヒットタイミングのずれとベースライン電圧の変動の関係を調べ、検出器内部の挙動の理解を深めている
- 検出器(センサー有り) を用いた動作試験
  - キッカーノイズ観測後に、プリアンプの飽和により、ヒット信号が一切なくなる現象が発生。
  - キッカーシステムとの絶縁、アルミニウム箔によるシールドは一定の改善はあるが、十分な効果が得られてない。
  - プリアンプの時定数を変動させる対策が有効→実機検出器への実装方法の検討を進めている。

# Backup