

J-PARC muon g-2/EDM実験： プロトタイプ検出器モジュールのノイズ評価

2023/11/21

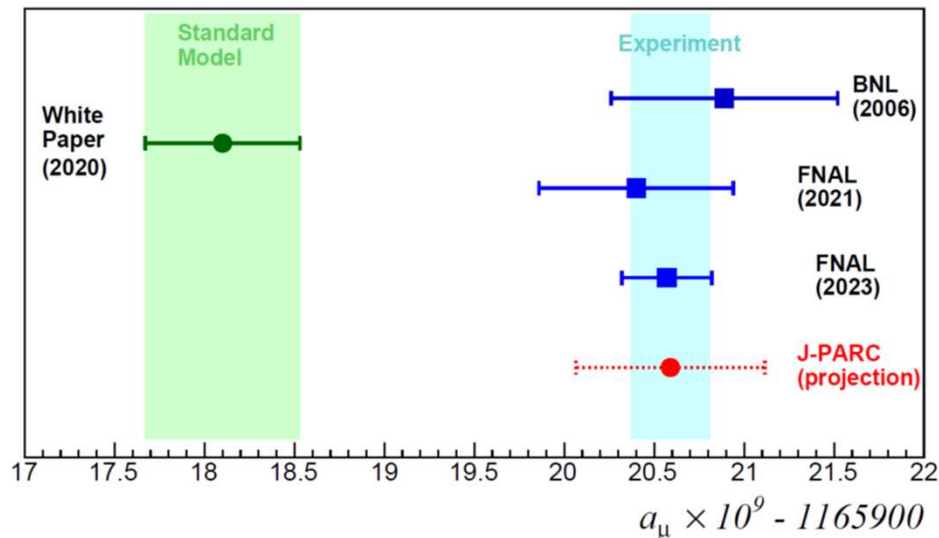
計測システム研究会

九州大学 修士2年 梅林 恵祐

J-PARC muon g-2/EDM 実験

J-PARC muon g-2/EDM 実験

既存の手法とは異なる方法で、ミュオンの異常磁気能率(g-2)と電気双極子能率(EDM)を測定する。(以下、TDRの要約論文) DOI: 10.1093/ptep/ptz030



J-PARC実験の特徴

- 低エミッタンスなミュオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
- コンパクトなMRI型ソレノイド磁石による高一様磁場
- 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

先行/進行中実験結果

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

J-PARC初期目標

g-2: 0.46ppm → 0.1ppm
EDM: $10^{-21} e \cdot cm$

最終目標

陽電子飛跡検出器

陽電子飛跡検出器 & ベーン

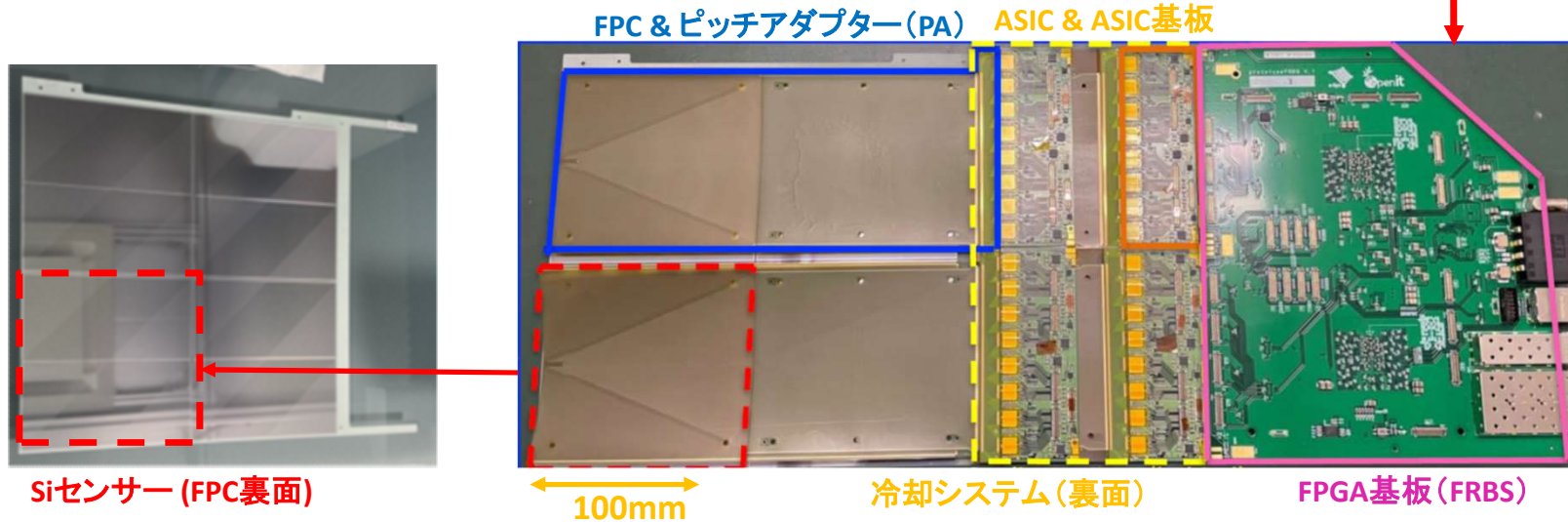
陽電子飛跡検出器は40のベーンからなる。

クォーターベーン(タイトル中の検出器モジュール)

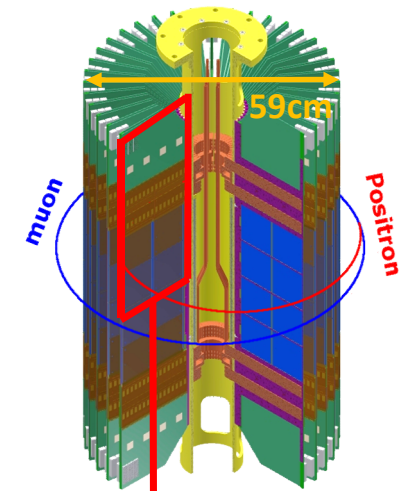
ベーンはそれぞれ4つのクォーターベーン(以降Q-vane)からなる。

Q-vaneは大量生産が予定されており、現在工程の確立を進めている。

クォーターベーン(Q-vane)



陽電子飛跡検出器

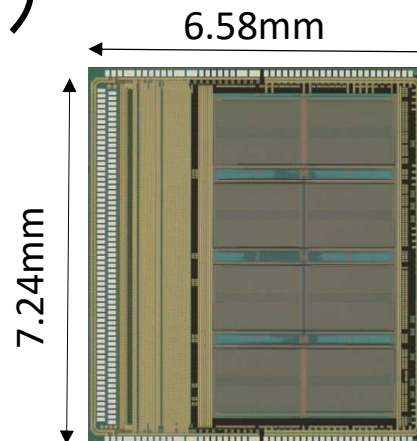


読み出しASIC (SliT128D)

本実験用に読み出しASICを開発

□主な仕様

- SilTerra 180 nm CMOS technology
- 128ch/チップ
- 8192バッファ/ch
- 5nsサンプリング



量産版(SliT128D)チップ

性能の要求値

	Requirement
Peaking time	< 75 ns
Pulse width at 1 MIP	< 100 ns
Dynamic range	> 4 MIP
ENC	< 1,600 e^- @ $C_{det} = 30$ pF
Time walk (0.5-3.0 MIP)	< 1 ns
Jitter at 0.5 MIP	< 5 ns
Power consumption	0.64 W/chip

↓SliT128Cの実測値

Measurement
64.2 ns ^a
74.5 ns
> 7.8 MIP
$1547 \pm 75 e^-$ @ $C_{det} = 33$ pF
0.38 ± 0.16 ns
4.8 ± 0.2 ns
0.30 W/chip

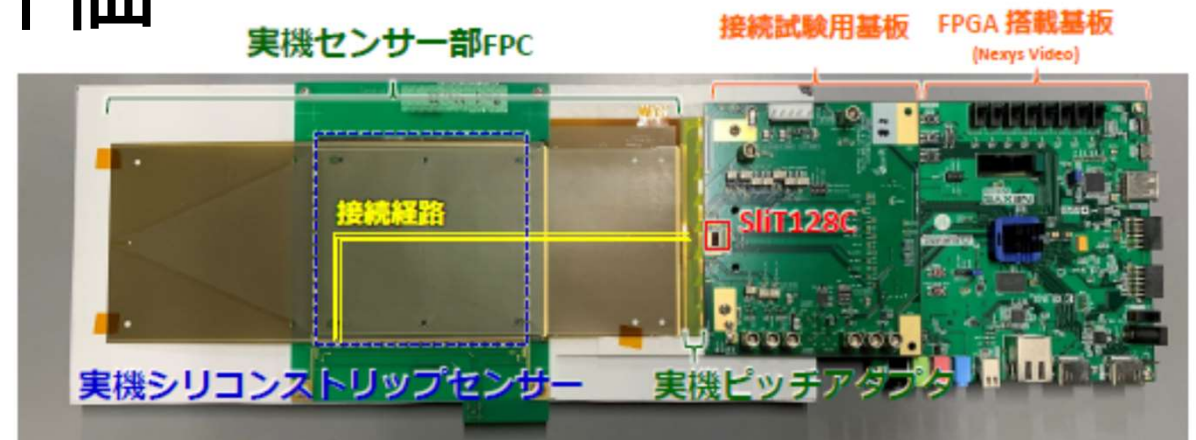
試作機でのノイズ評価

↓単一ASIC読み出し回路試作機

Q-vaneと同じ読み出し経路でSiI128CとSiセンサーを接続してノイズ評価を行った。

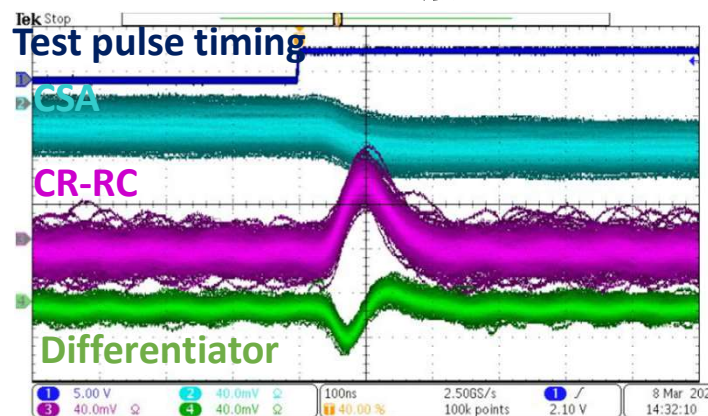
～結果～

- GNDと接続した金属箔でシールドすることでノイズが十分に落ちることを確認した。
- シールド有だとノイズは要求値を満たした。

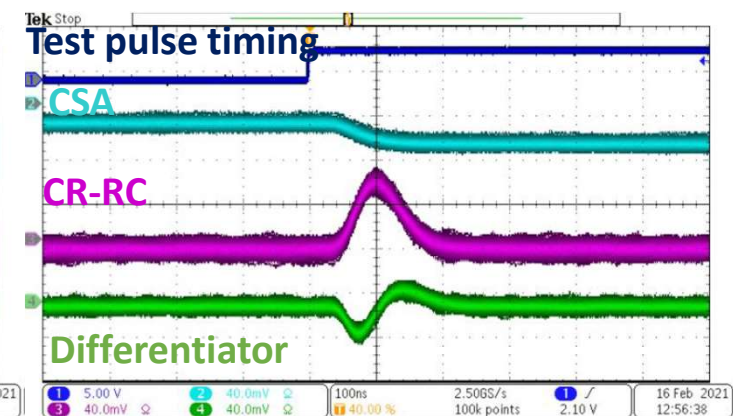


試作機にアルミ箔を被せた

シールド無



シールド有



ノイズの要求に関する評価の経緯

これまでに行った読み出しASICのノイズ評価

□ ASIC単体での評価

(Siセンサーを模した)コンデンサと繋いだ状態のASICのノイズを評価 → Clear:4ページ
Siセンサーと繋いだ単一のASICのノイズを評価 → シールド有でClear:5ページ

今回行った読み出しASICのノイズ評価

□ Q-vaneプロトタイプでの評価: **New!**

Q-vaneプロトタイプを製作してASICのノイズを評価。

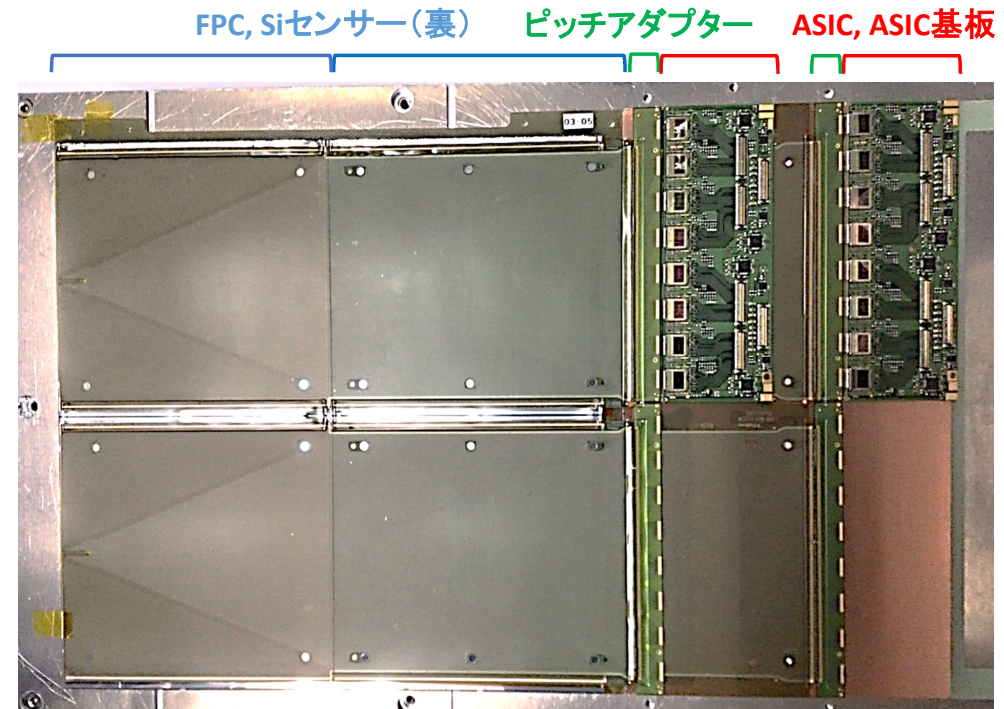
- 複数のASICを実装。
- 単一ASIC試験から電氣的な接続を改善。

Q-vaneプロトタイプの製作時から説明 → 次ページから

Q-vaneプロトタイプ製作

量産工程の確認とノイズ評価を目的にQ-vaneプロトタイプを製作した。
(今回のノイズ評価にはこのプロトタイプを使用)

- 各コンポーネント(ASIC、ASIC基板、ピッチアダプター、FPC、Siセンサー)間はワイヤーボンディングで電氣的に接続した。
- ワイヤー保護のため一部のワイヤーは紫外線硬化樹脂を用いて封止した。



ワイヤーボンディング

量産用ボンダー(KEK) →

量産用のボンダーを用いてワイヤーボンディングを行った。

- ・ プルテスターを用いてワイヤー破断時の強度を測定。
- ・ ボンダーのパラメーター(Power, Force)を調整しワイヤーの強度を最適化。
- ・ 失敗したワイヤーは除去、再ボンドで処置。

Power: 超音波の強さ
Force: 押す力の強さ

以前Q-vaneプロトタイプをつくったとき、大量に失敗した。

～以前の結果(全体)～

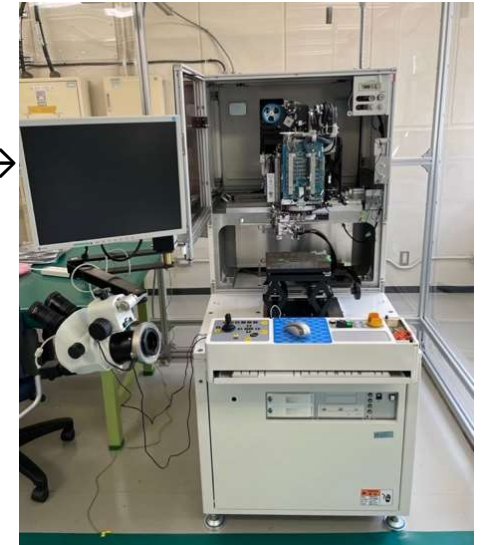
- ワイヤーの本数: 各コンポーネント間4096ch
- 失敗率(処置後): ~20%
- 強度: ~6.0gf

失敗箇所は九州大学のサブボンダーで修正した。

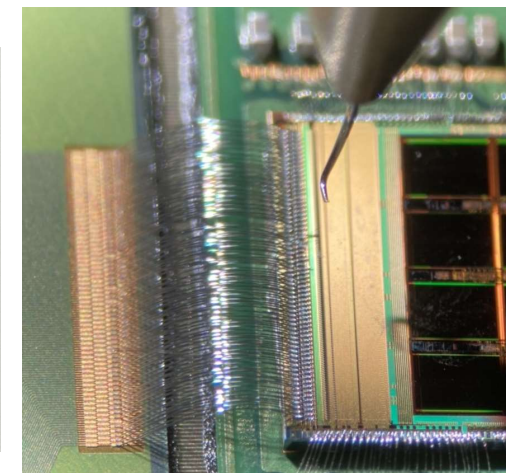
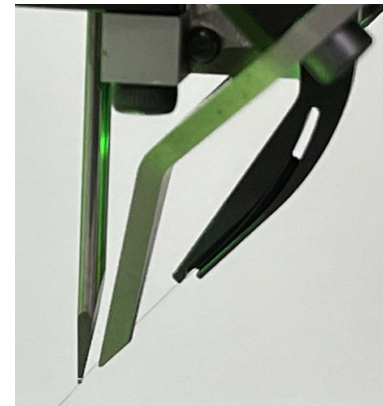
確認した問題

- ・ ボンドツールからワイヤーが頻繁に抜ける。
- ・ ワイヤーの強度が安定しない。
- ・ ワイヤーの強度とパラメータの関係に場所依存性がある。

2023/11/21



↓ボンドツール



↑プルテスター

ワイヤーボンディング

ワイヤーがボンドツールから頻繁に抜ける問題に着目し、Forceを大幅に下げて広い範囲でPower scanを行った。

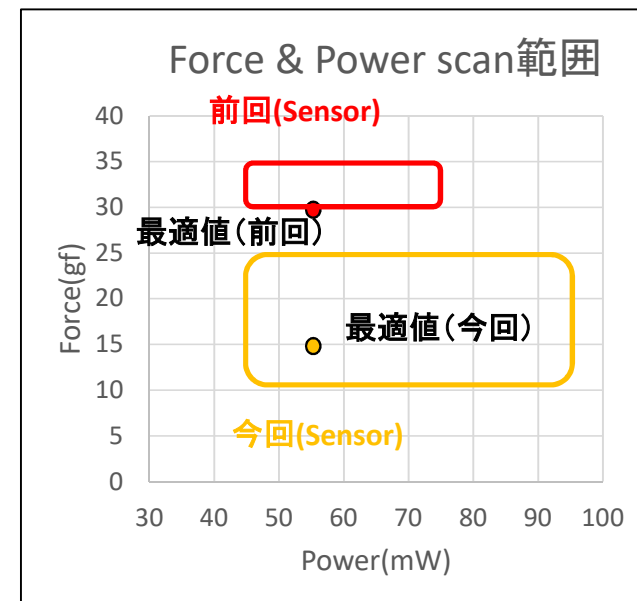
~今回の結果~

ワイヤー本数: 各コンポーネント間2048ch

失敗率(処置後): ~1.5%

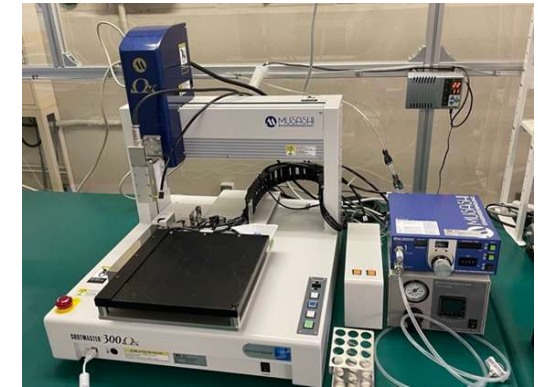
ワイヤー強度: ~8.5gf

- ワイヤーの強度が大幅に向上した。
 - ボンド成功率が大幅に向上した。
 - ワイヤー強度の場所依存性も見えなくなった。
- ✓ ノイズ評価用実機として十分な成功率。
- ✓ 現状、磁場中でワイヤーが破断するといったことは起きていない。



ワイヤー封止

塗布ロボットを用いて紫外線硬化樹脂を塗布しワイヤーを封止した。

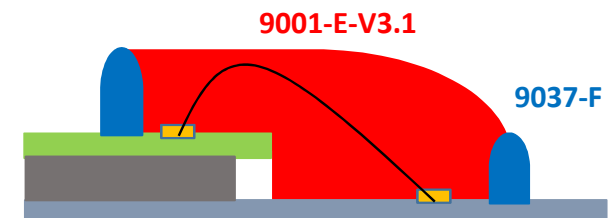


↑塗布ロボット

封止剤(紫外線硬化樹脂)

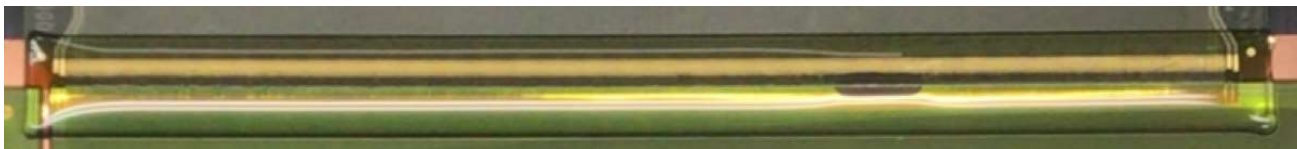
- Dymax9001-E-V3.1:粘度低 → ワイヤー周辺を覆う
- Dymax9037-F:粘度高 → V3.1が広がらないようにダムを作る

ワイヤー封止断面図



封止箇所:FPC-ピッチアダプター間、FPC-Siセンサー間

- ワイヤー周辺が十分に封止剤で保護されている。



↑FPC-ピッチアダプター間の封止

ノイズ評価の目的

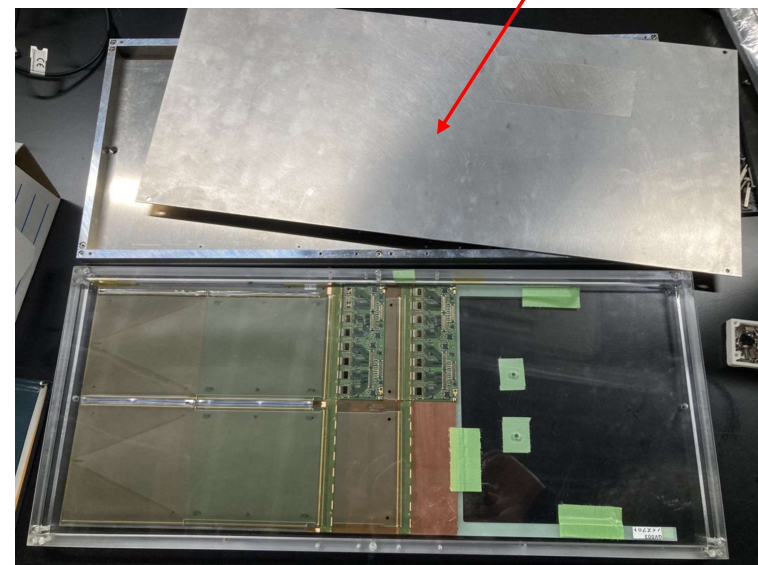
目的

- Q-vaneスケールでのノイズの評価。
 - ノイズが要求値以下であるか確認する。
- 追加でシールドの検討をするために必要。
- 最適なGroundingを検討する。

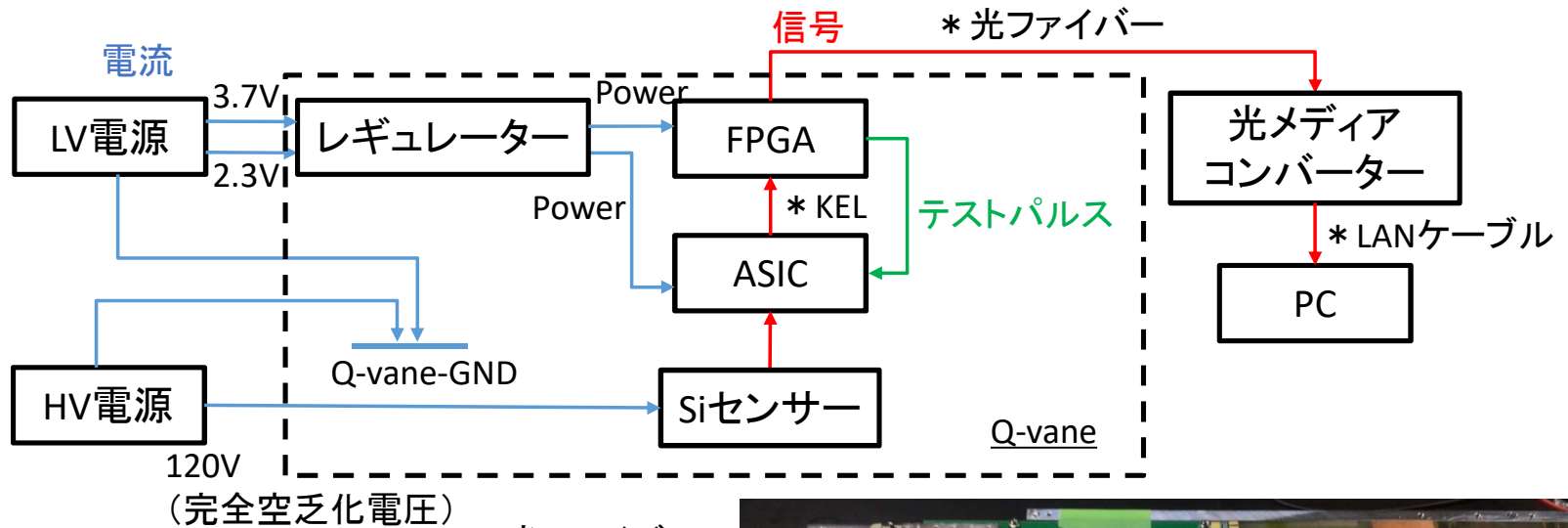
～ノイズ要求値～

1MIPの信号が来たときの電子数(24000e)
に対してS/N=15以下($<1600e=0.256fC$)を
満たすように設定。

シールド(アルミ板)



ノイズ評価回路



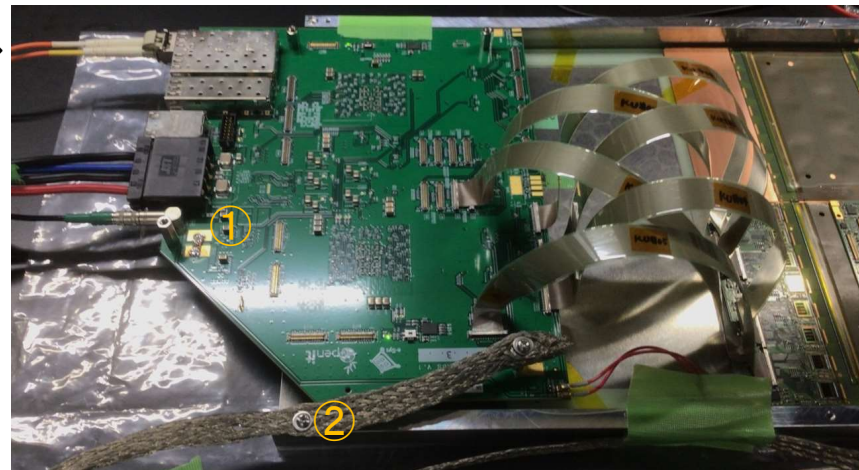
これまでの試験結果でノイズが減った
GroundingでQ-vaneプロトタイプでもノイズ
が減ったので以下2つを採用した。

- ① FPGAとASICとSensorのGNDを導通
(以降Q-vane-GND)
- ② Q-vane-GNDとシールドを導通

2023/11/21

光ファイバー→

LV電源→
HV電源→

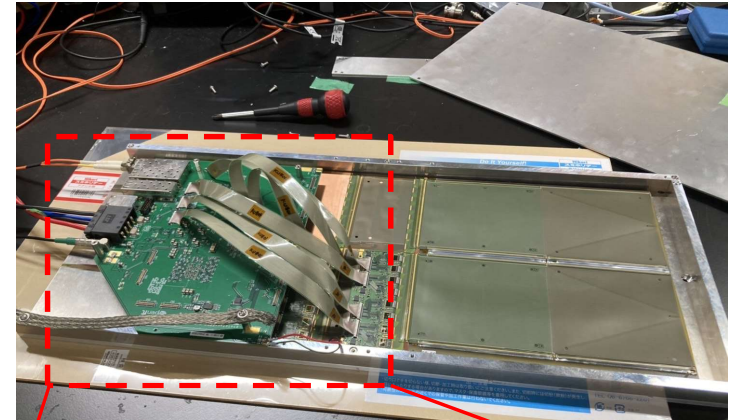


各種セットアップ

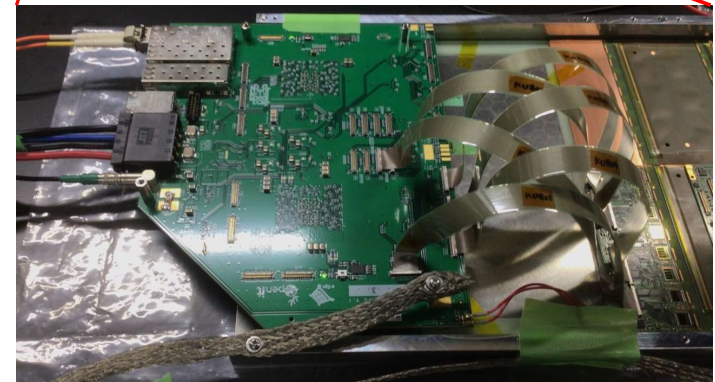
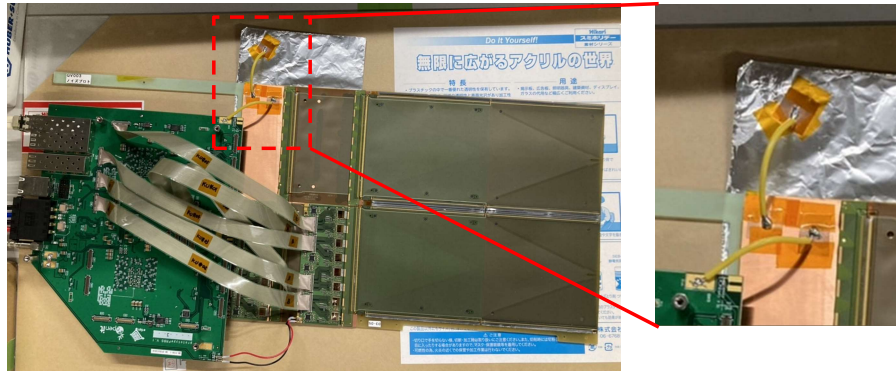
基本的なセットアップ(シールド×、冷却板導通×)



シールド検討(シールド○、冷却板導通×)



Grounding検討(シールド×、冷却板導通○)



Sカーブスキャン

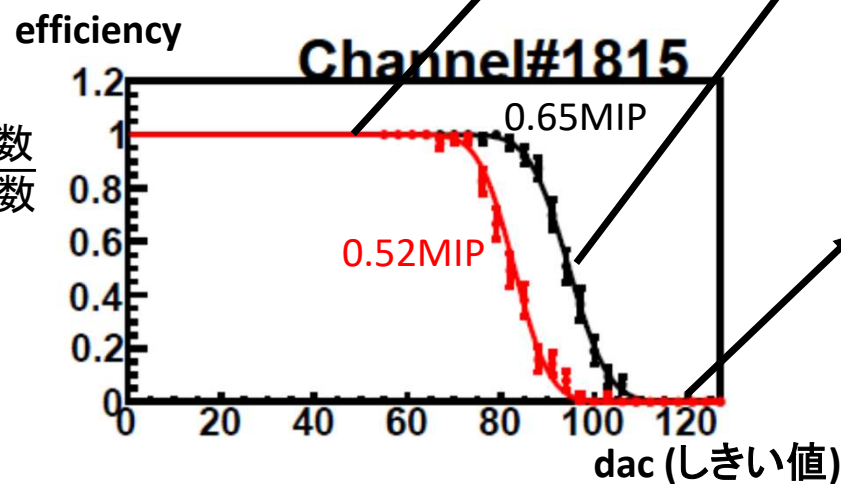
2種類の大きさの違うテストパルスを7回ずつ入力し、しきい値(dac)を変えていくことでノイズの大きさを推測する。

テストパルス

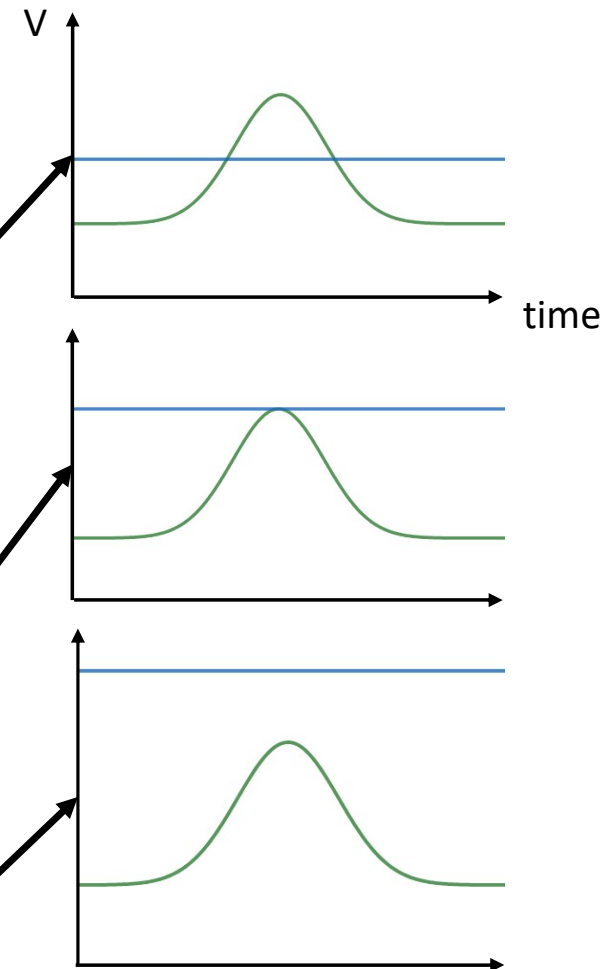
- 大きさ: 0.65MIP, 0.52MIP

Trigger rate : 5Hz

$$\text{efficiency} = \frac{\text{しきい値を超えた回数}}{\text{テストパルス入力回数}}$$



テストパルス & しきい値

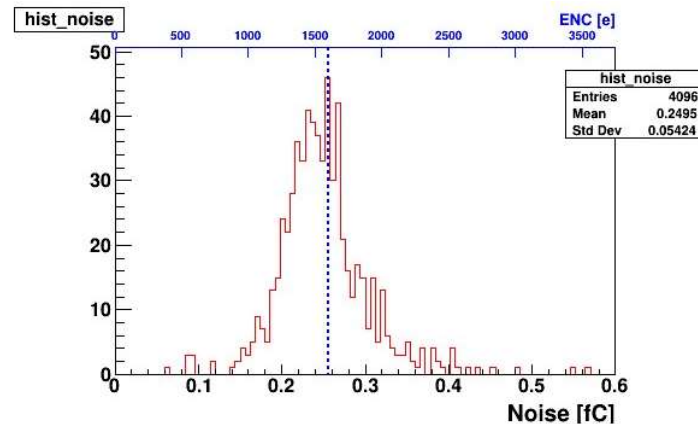


ノイズ評価結果(シールド有無)

～結果～

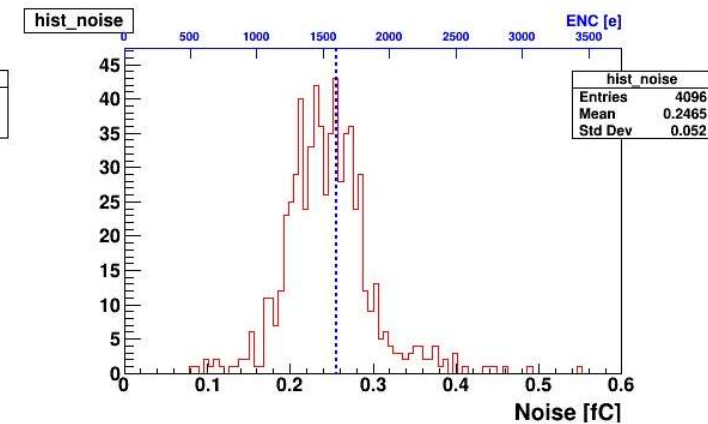
- シールドの有無でノイズの大きさは優意に変化しなかった。(先行評価の結果と異なっている。)
- シールド有無どちらでもノイズ平均は要求値(0.256fC)を下回っている。
- 先行評価との結果の違いは電氣的に接続されていないFPCやPAが原因だと推測。
- 実験室の結果からはシールドは無くても良いと言える。

シールド有
ノイズ



ノイズ平均: 0.2495fC
標準偏差: 0.0542fC

シールド無
ノイズ



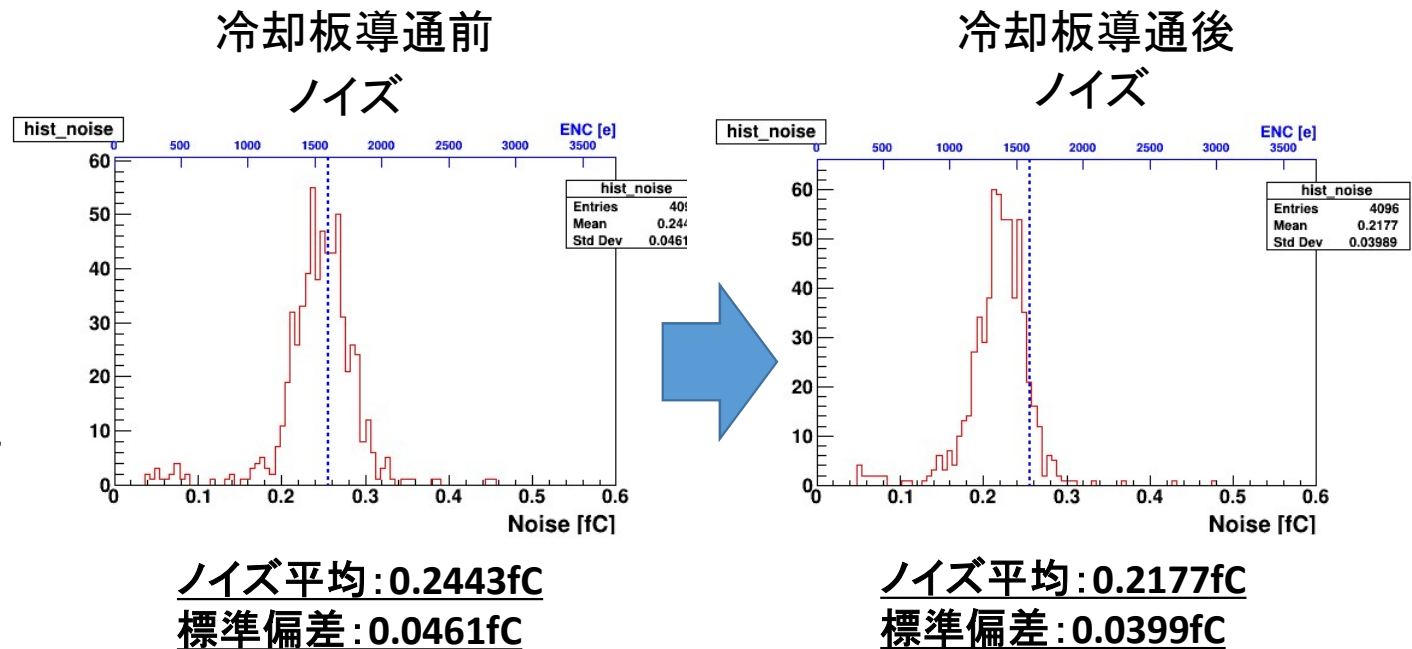
ノイズ平均: 0.2465fC
標準偏差: 0.052fC

ノイズ評価結果（冷却板導通前後、シールド無）

～結果～

➤ 冷却板をFRBS-GNDと導通することでノイズが下がった。

- Q-vane-GNDと冷却板は導通した方が良い。
- 本番では冷却板はむき出しではないので導通方法を検討する必要がある。



現在行っている内容

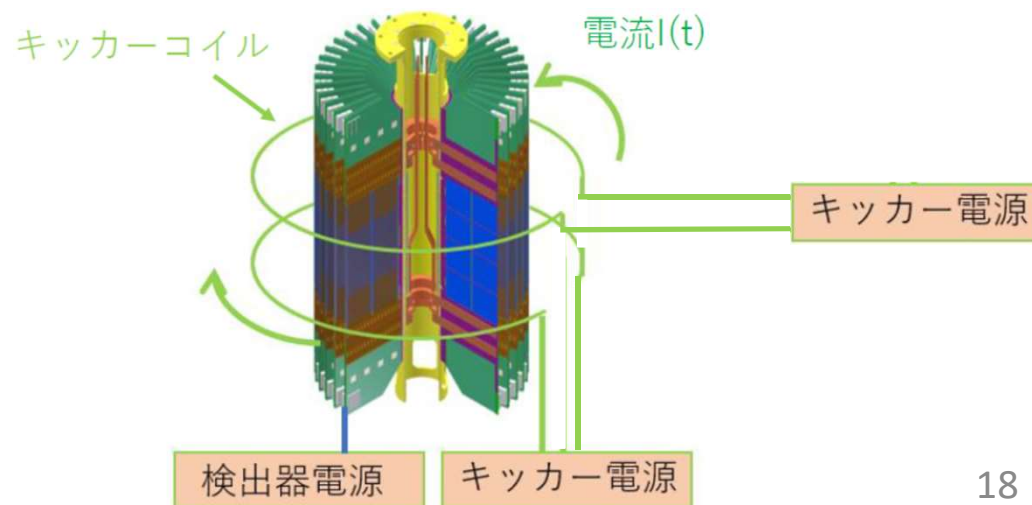
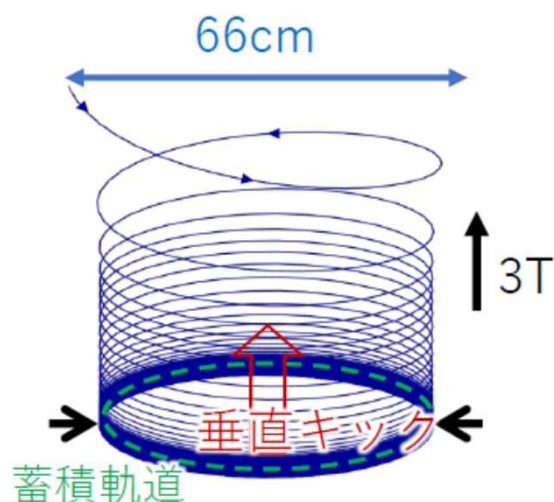
キッカー磁場と検出器

- コンパクトな領域に入射ミュオンを留める
 - 検出器と磁場が近い
 - ミュオンの運動量が小さく、寿命が短い
- 以上の3点から強力なパルス磁場をかける必要がある。(パルス幅: 100ns, 電流: 1000A)

実験本番では...

3次元的に入射されたミュオンを、キッカーコイルに瞬間的に電流を流すことで磁場を発生させ、蓄積平面内に留める。

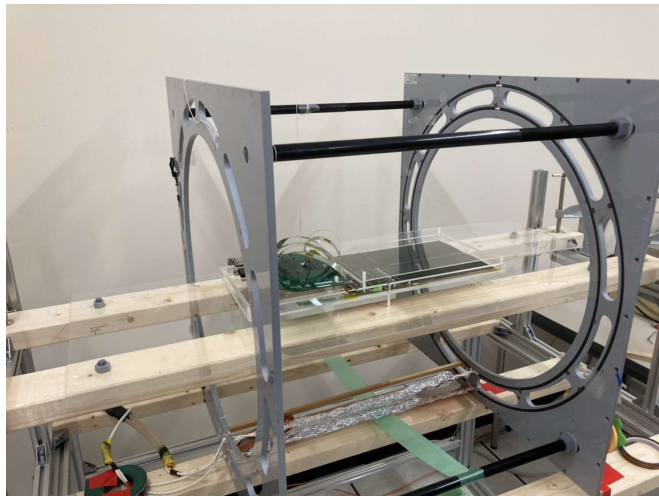
- 検出器はキッカーコイル内に設置するためキッカー磁場環境下でのノイズを評価する必要がある。



試作キッカーコイルとセットアップ

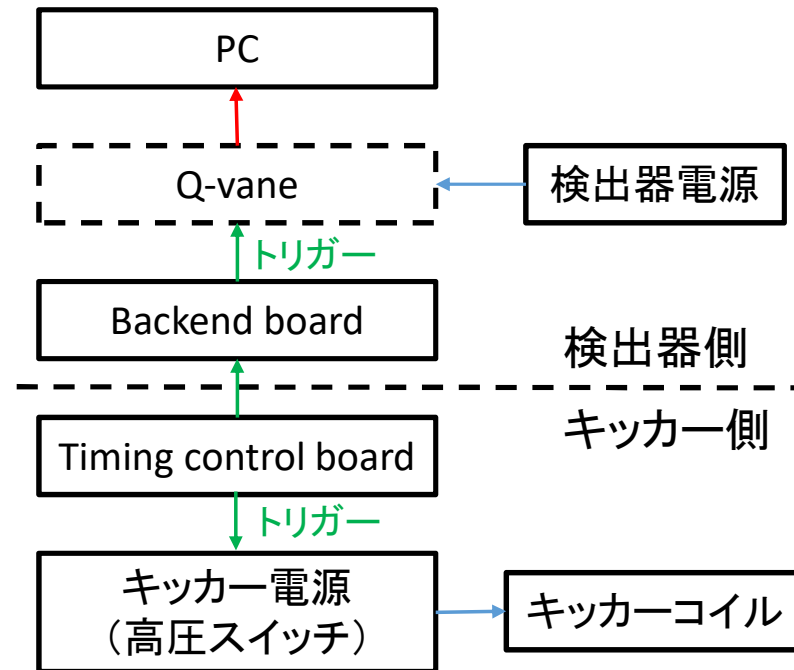
試作キッカーコイル内にQ-vaneプロトタイプを設置してノイズを評価した。

- ・ 試作キッカーコイルで発生する磁場は本番の1/10の程度



↑ 試作キッカーコイルとQ-vaneプロトタイプ

➡ 結果は解析中



まとめ

～結果～

- ・ シールドの有無でノイズの大きさは優位に変化しなかった。
- ・ ノイズ平均は要求値(0.256fC)以下である。
- ・ 冷却板のGroundingによってノイズが低減する。

結論

- ・ 実験室の結果からシールドは無くても良いと言える。
- ・ Q-Vane-GNDと冷却板は導通する。 ← 導通の方法は別途検討

展望

- ・ キッカー磁場環境下でのシールドの必要性を検証する必要がある。 ← 解析中

Appendix

キッカー磁場中での評価内容

①キッカー磁場無でのSカーブスキャン

- ・ Sカーブスキャンの結果をもとに各chのしきい値を設定。

②あるしきい値で1MIPテストパルスを7本入力し、特定のタイミングでキッカー磁場をかけてヒットマップを生成。

- ・ しきい値の大きさを変化させて測定。
- ・ キッカーコイル電流(磁場の強さ)を変化させて測定。
- ・ シールド有無で測定。

シールド(アルミホイル:20 μ m厚)→

