

電子ビーム電流測定用 FCTの開発と性能評価

京都大学理学部 伊東康作

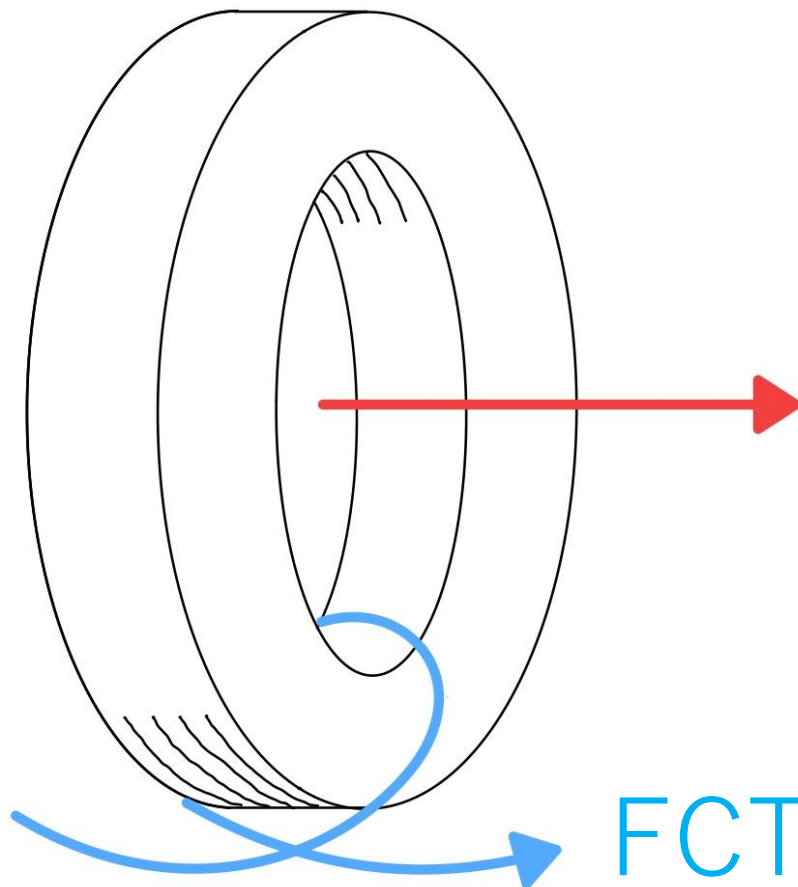
1. 研究の概要
2. FCTの原理
3. 事前実験
4. 制作
5. ノイズとシールドディング
6. 性能評価
7. まとめ

1. 研究の概要

コイルの巻き数等を替える事前実験の後、FCTを手作りで制作し、ノイズ対策を施してから、実験室のダミー電流と京大化研電子線型加速器KELの0° ビームラインでFCTの性能を調べた。パルス幅約1 μ s、ピーク電流約10mAのビームをターゲットとした。

FCT (Fast Current Transformer)

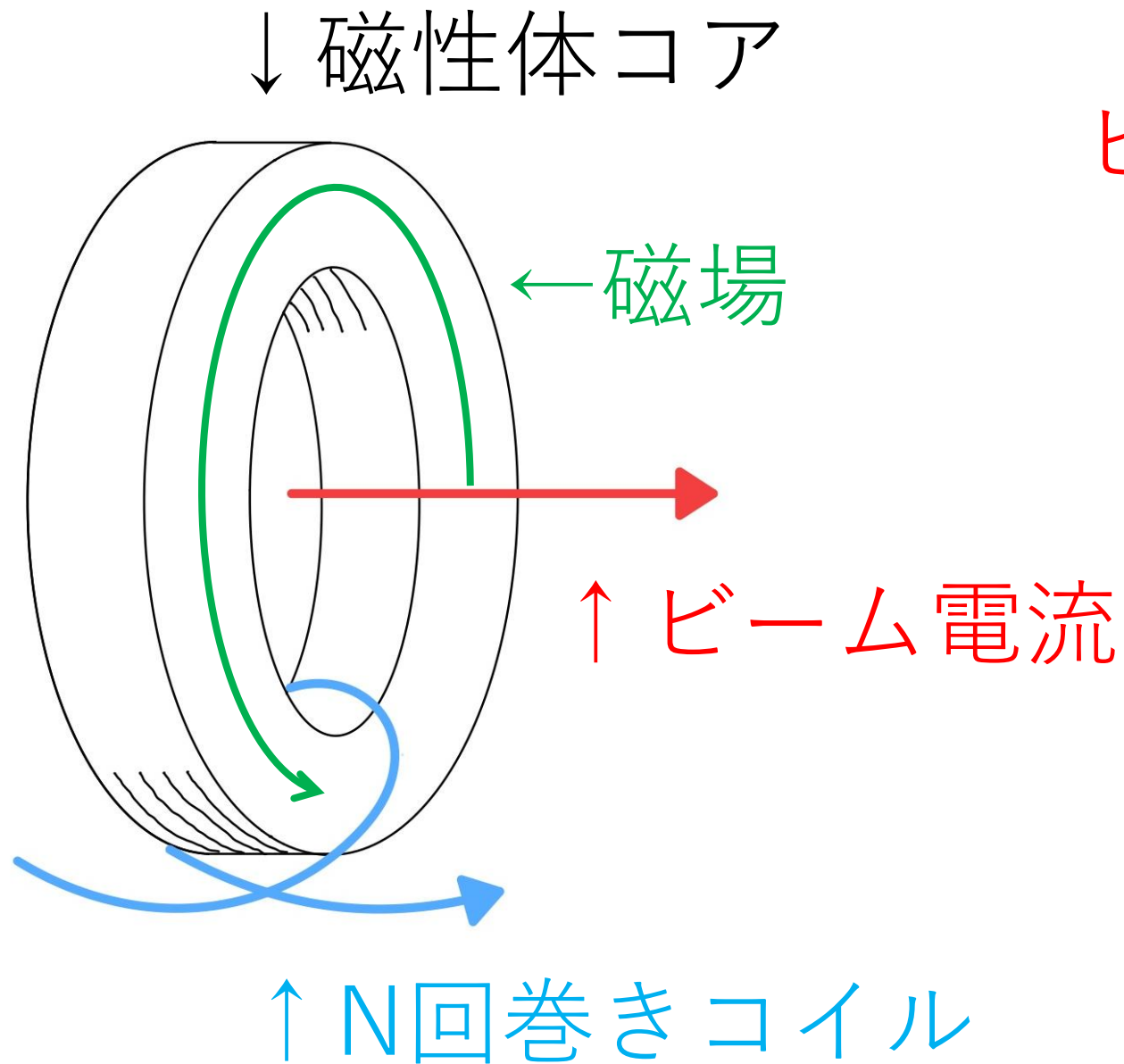
加速器のビームの電流と電荷
を非接触で測る



ビーム電流

FCTの出力

2. FCTの原理



ビーム電流 (パルス波)

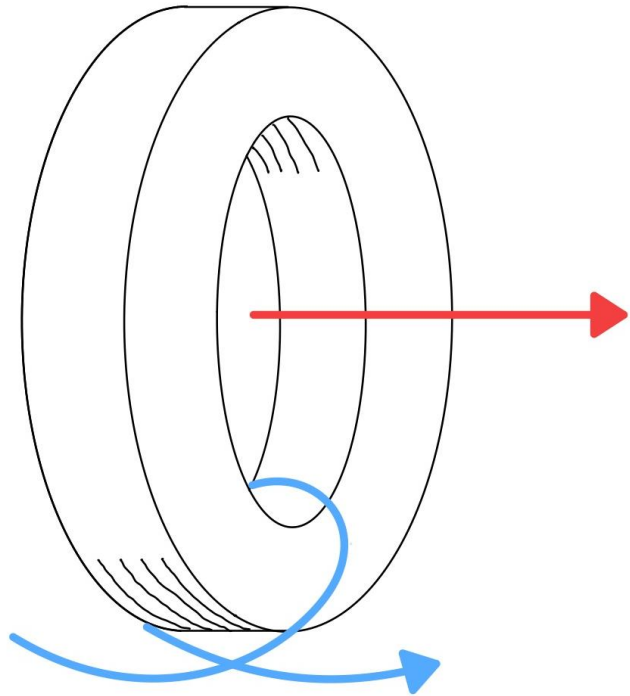


コアを通る磁場



コイルに起電力

2. FCTの原理



$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{j}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}$$

← 変位電流 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
はビームが光速に近い
いので無視できる



$$L \frac{dI_{\text{coil}}}{dt} + RI_{\text{coil}} = \frac{L}{N} \frac{dI_{\text{beam}}}{dt}$$

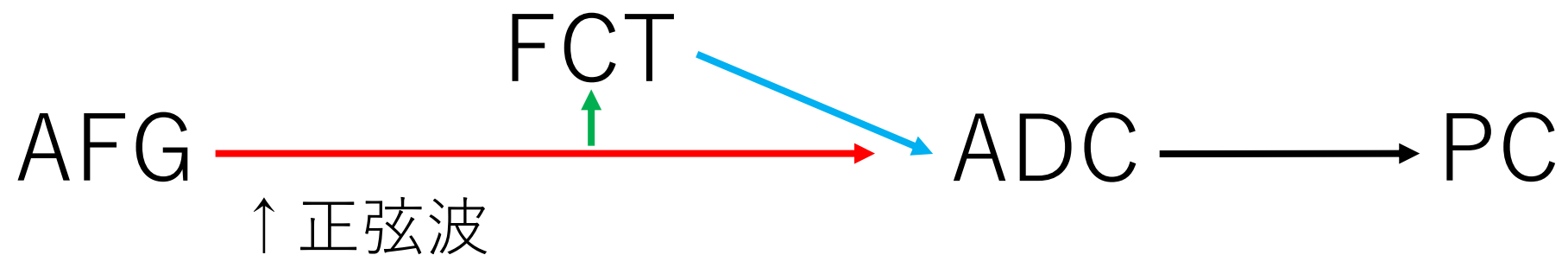
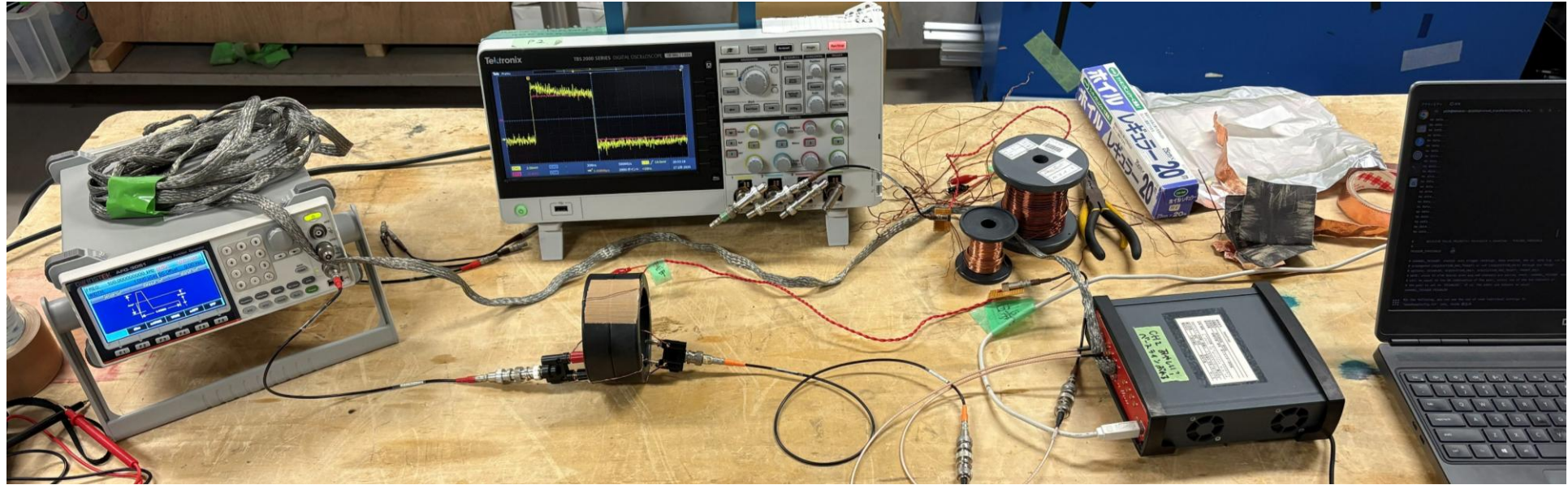
(一次のハイパス
フィルタ)

3. 事前実験

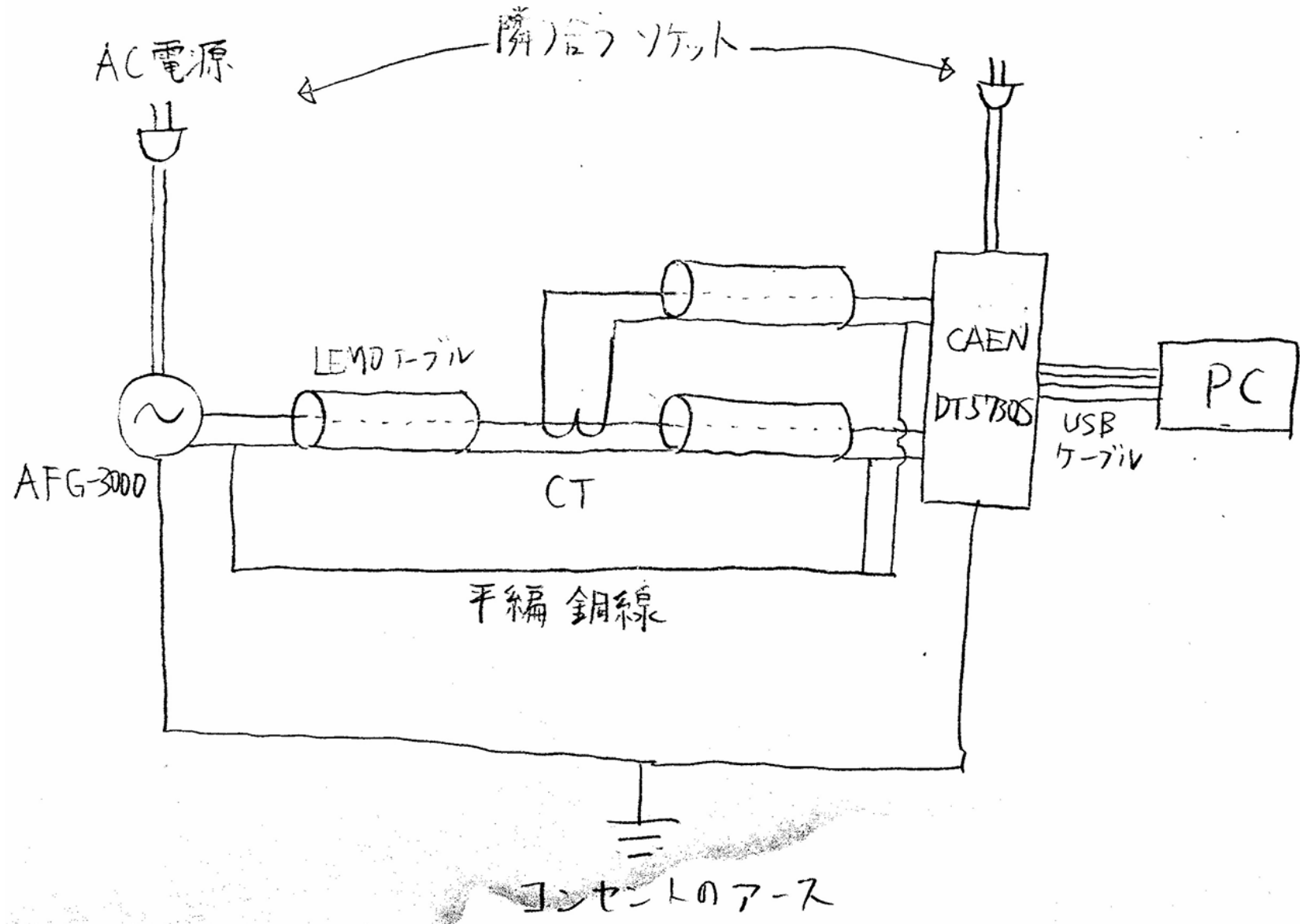
正弦波のダミー電流をFCTに通して、
コイルの巻き数などによる
周波数特性の違いを調べる

3. 事前実験

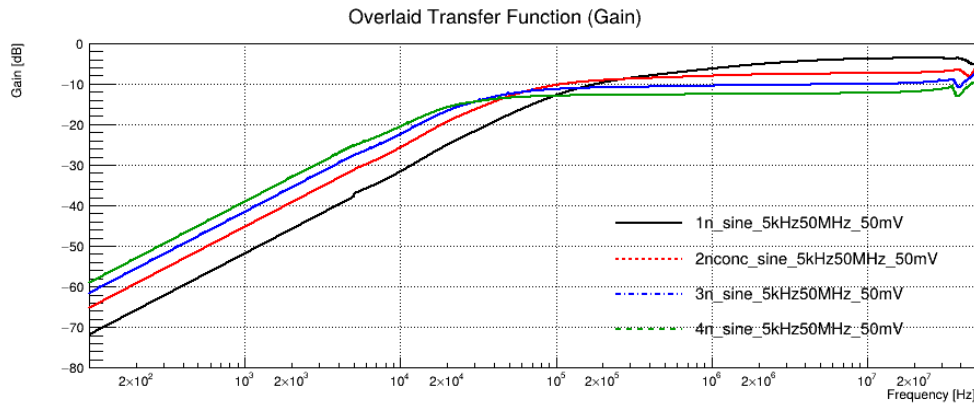
正弦波のダミー電流とFCTの出力を比較



3. 事前実験

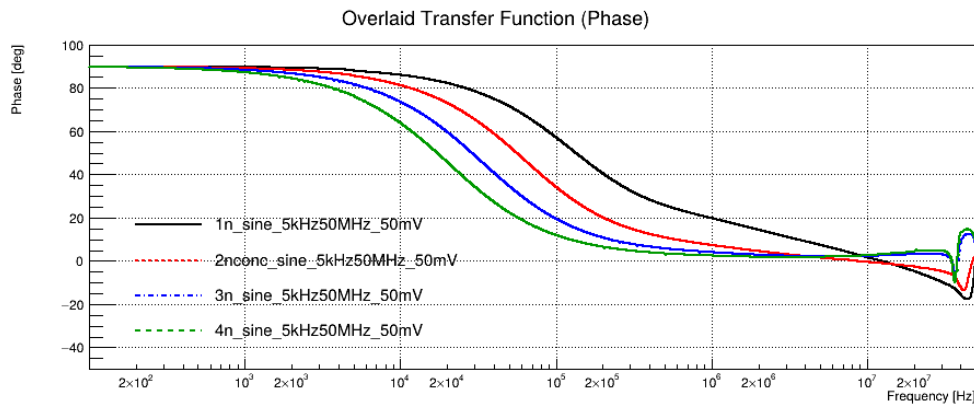


3. 事前実験



← ゲイン G

← ボード線図
(伝達関数 H)



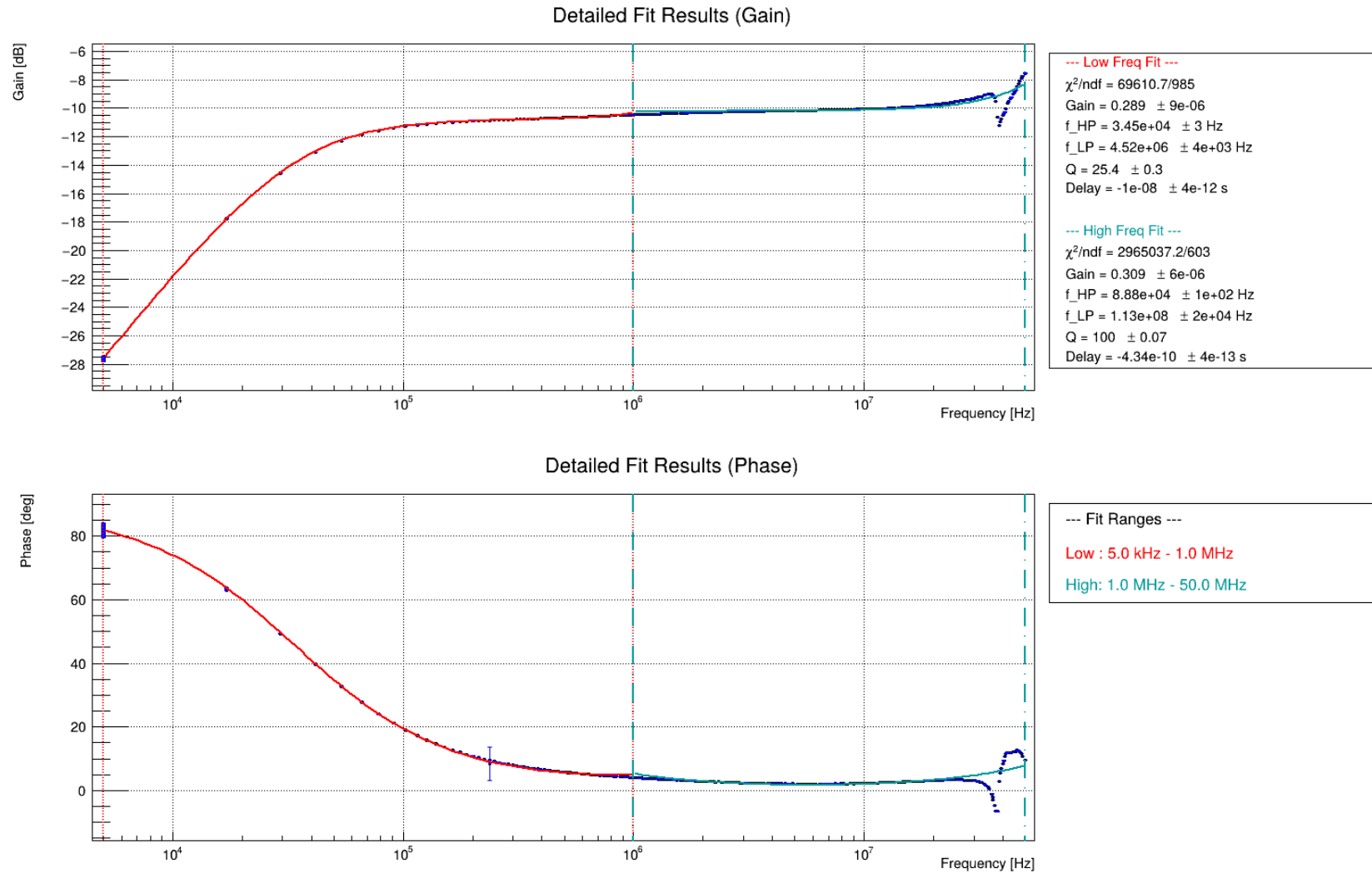
← 位相差 P

$$H(\omega) = G(\omega)e^{iP(\omega)}$$

$$I_{\text{coil}}(\omega) = H(\omega)I_{\text{beam}}(\omega)$$

フーリエ変換後のセンサーの応答

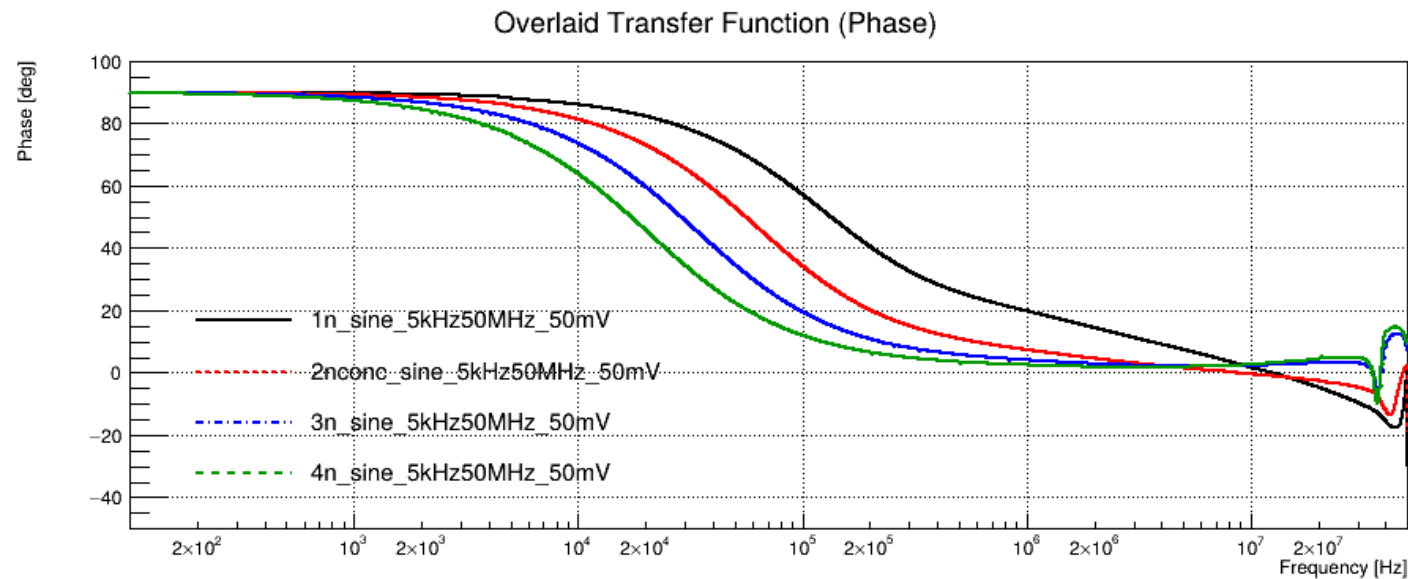
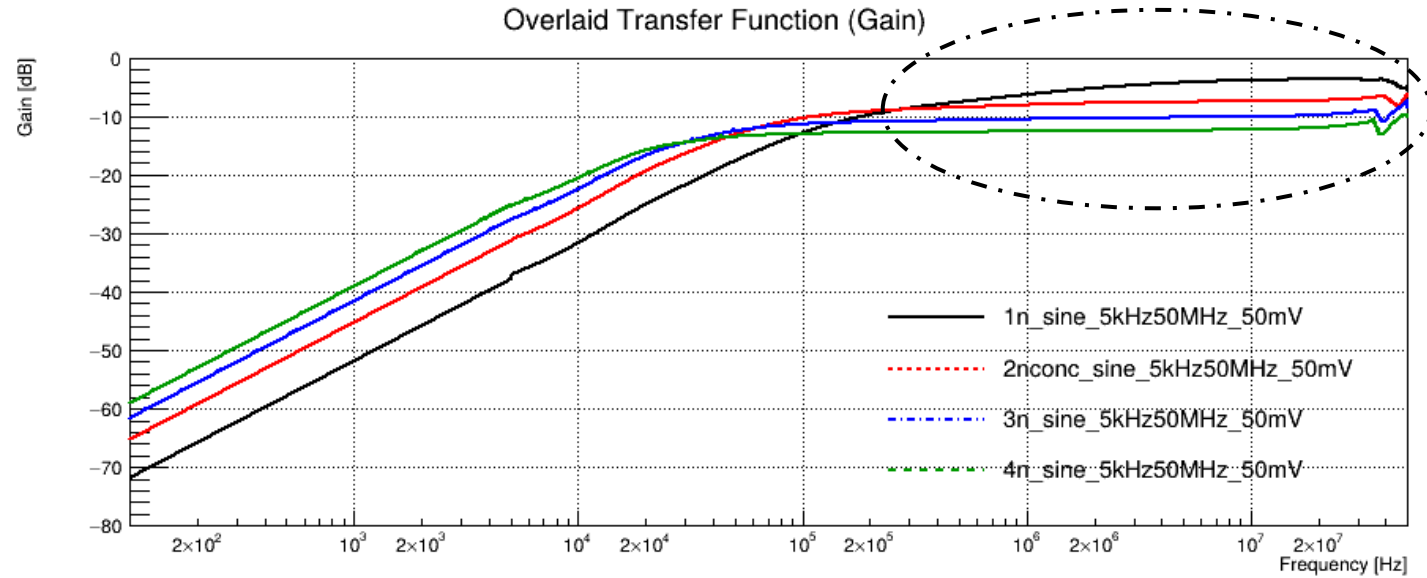
3. 事前実験



高周波と低周波
に分け、
適当なBPFで
フィッティング

$$\text{BPF} = 1^{\text{st}}\text{-order HPF} * 2^{\text{nd}}\text{-order LPF}$$

3. 事前実験



結果

巻き数が少ないとき
磁束の漏れにより、
ゲインが巻き数に反
比例する関係が崩れ
る

3. 事前実験

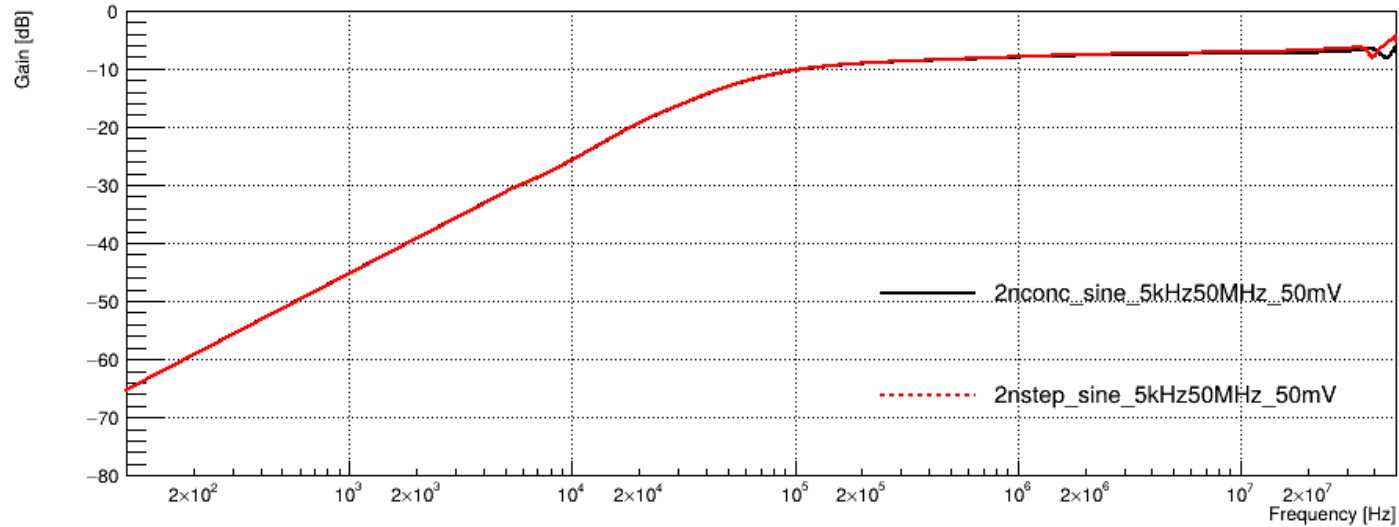
巻き数を増やすと、
HPFの時定数が伸びるかわりに、
ゲインが減る
(トレードオフ)

また、巻き数を減らしすぎると、
磁束が漏れ出してゲインが減る

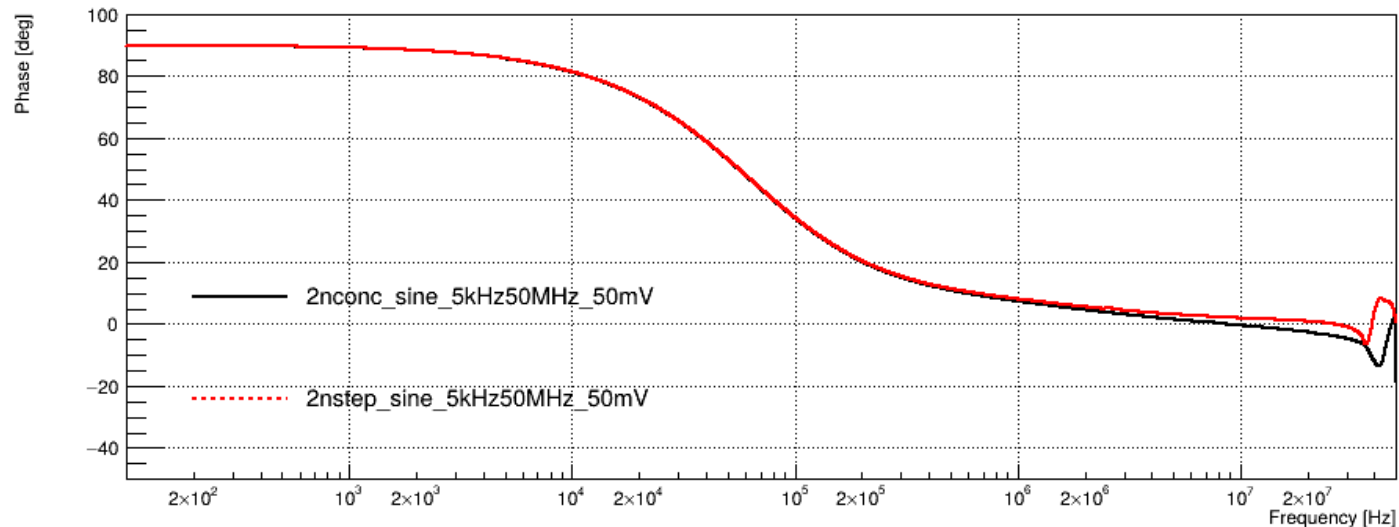
 2回巻きを採用

3. 事前実験

Overlaid Transfer Function (Gain)



Overlaid Transfer Function (Phase)



コイル2回巻きを
集中巻きと
ステップ巻きは
このグラフでは
それほど差はない

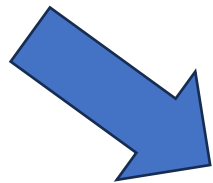
ステップ巻きを採用

4. 制作



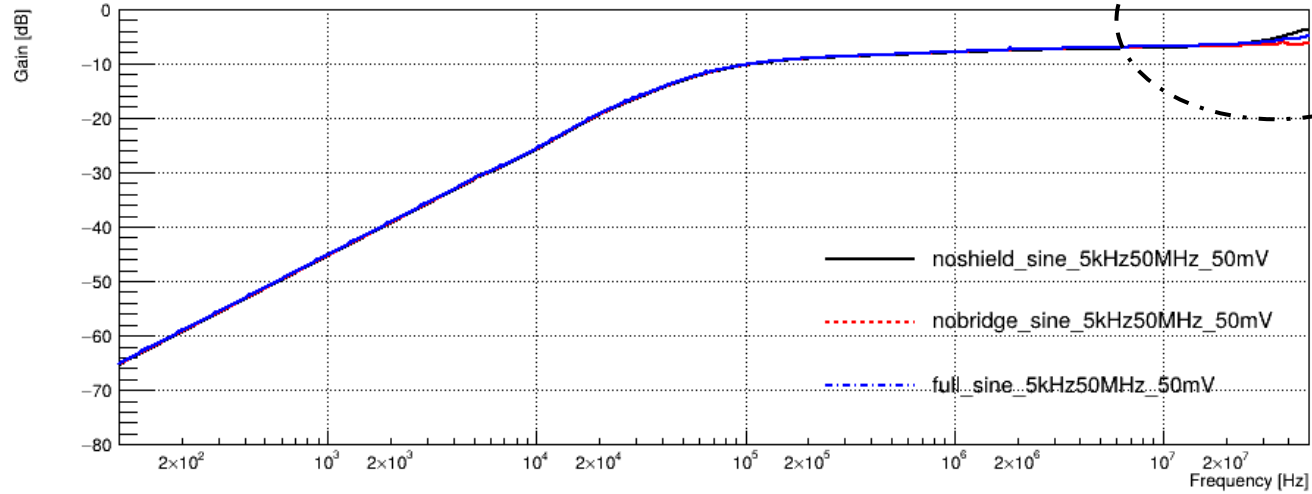
コイルを1周巻いて
180° 同軸ケーブルで
移動してから
もう1周巻く↓

2回ステップ巻き

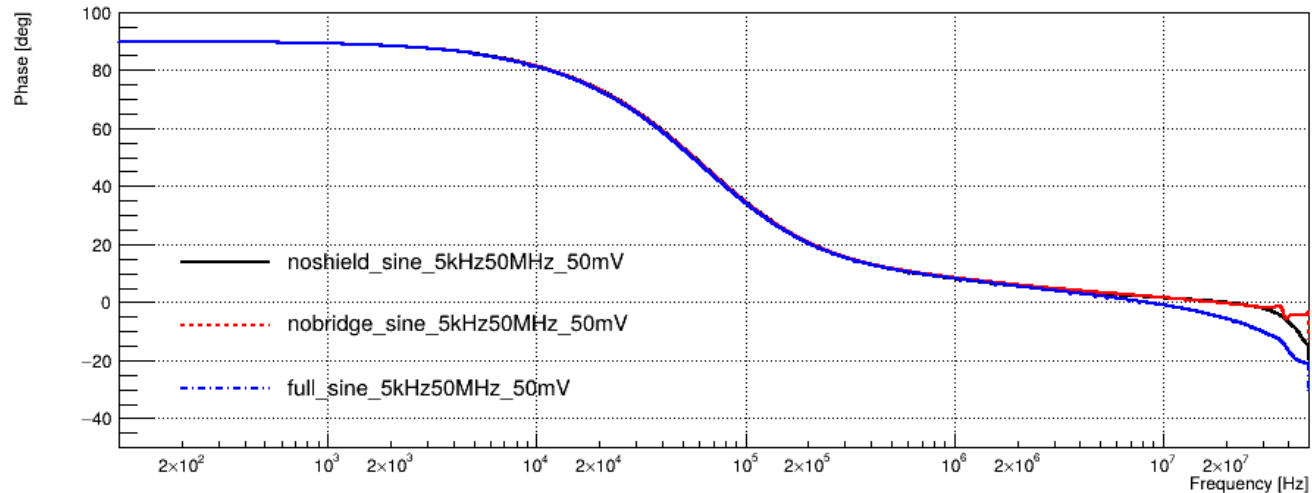


4. 制作

Overlaid Transfer Function (Gain)



Overlaid Transfer Function (Phase)



静電シールドの
浮遊容量により、
高周波のゲインが
落ちた

5. ノイズとシールドディング

支配的なノイズ源は、
クライストロンが発する電磁波

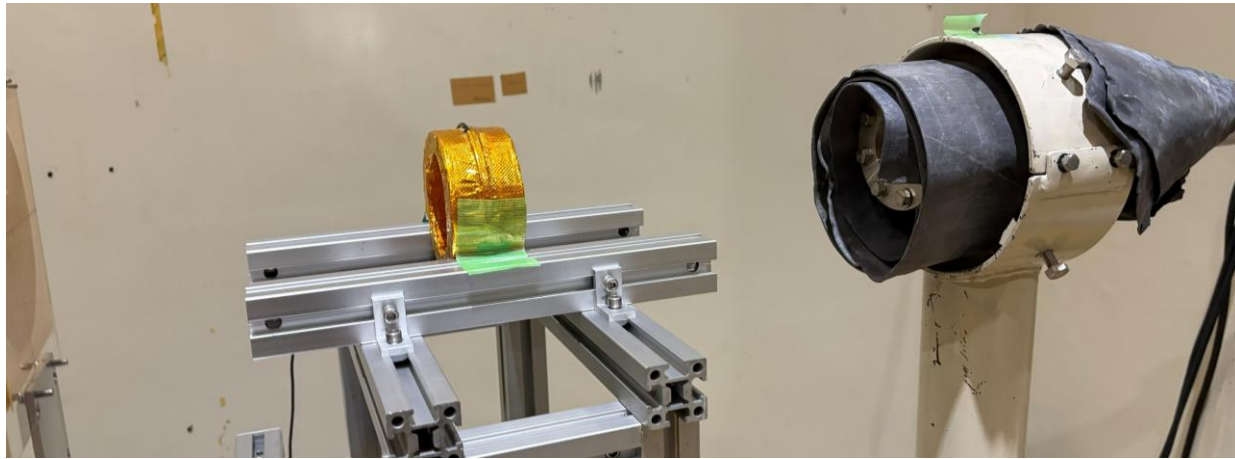


作成したシールドは3つ

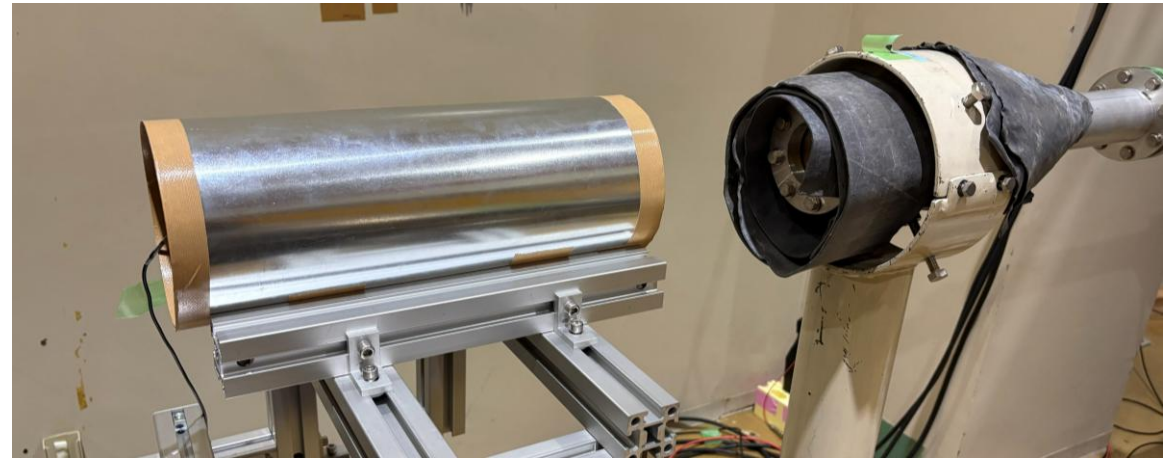
- FCTを覆う銅箔の静電シールド（終始外さない）
- 同軸ケーブルをさらにアルミホイルで静電シールド
- FCTを鉄の筒に入れ磁気シールド

5. ノイズとシールディング

結果的に、シールドディングは不十分だったが、どの程度効果があったのか評価したい。

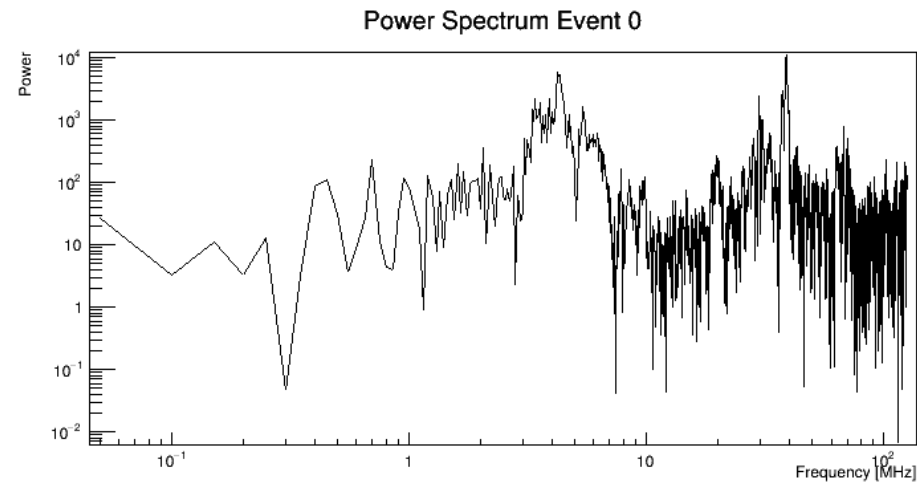
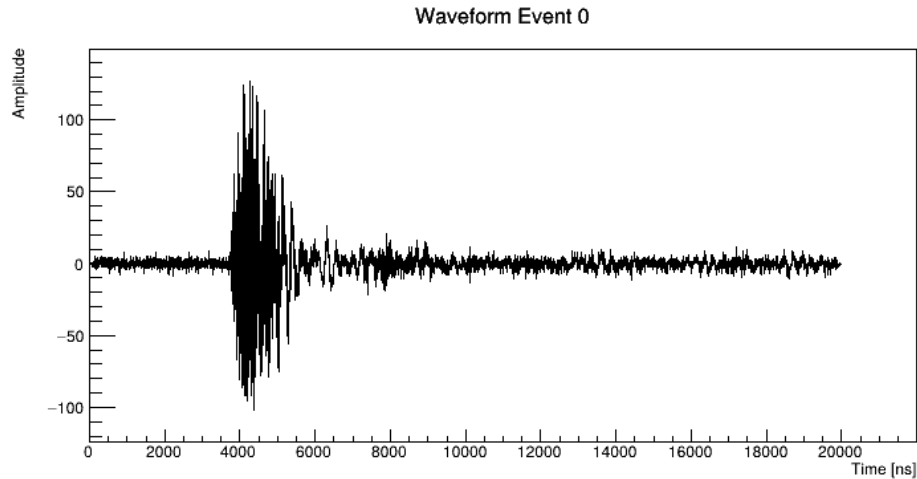


鉄筒なし



鉄筒（長）

5. ノイズとシールドディング



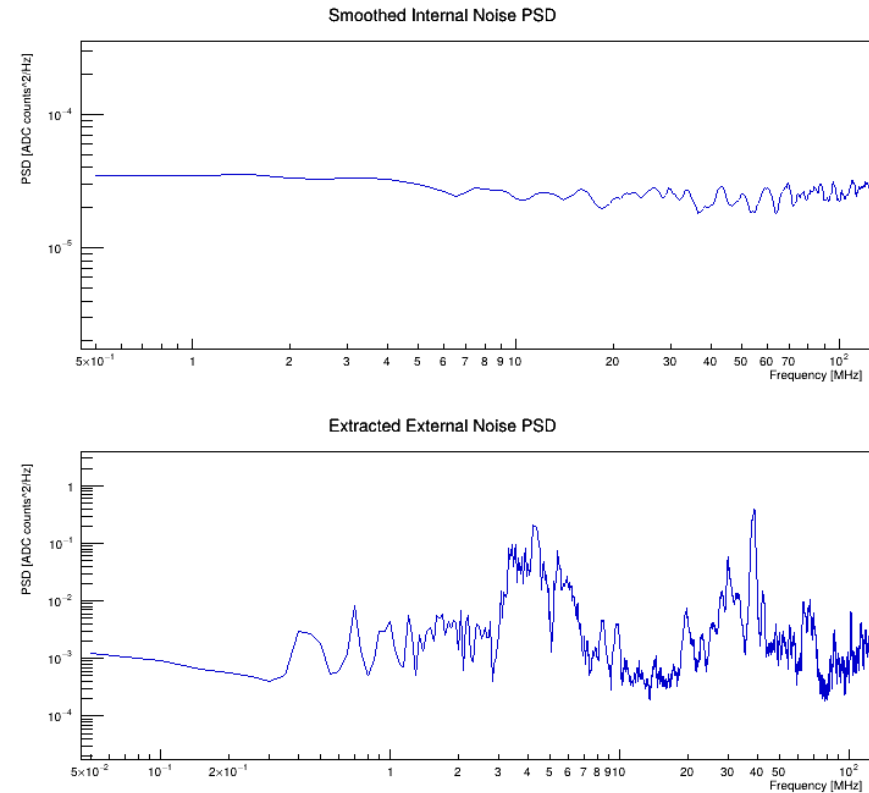
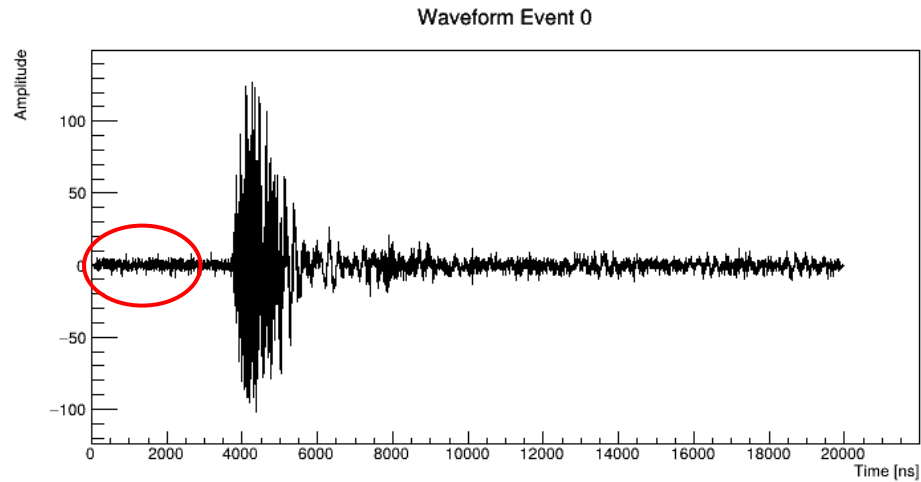
ノイズ源の出力が変化したため、
シールドをつけ外しする
単純な比較はできない



FFTと規格化

裸のFCTでのクライストロンのノイズ

5. ノイズとシールドディング

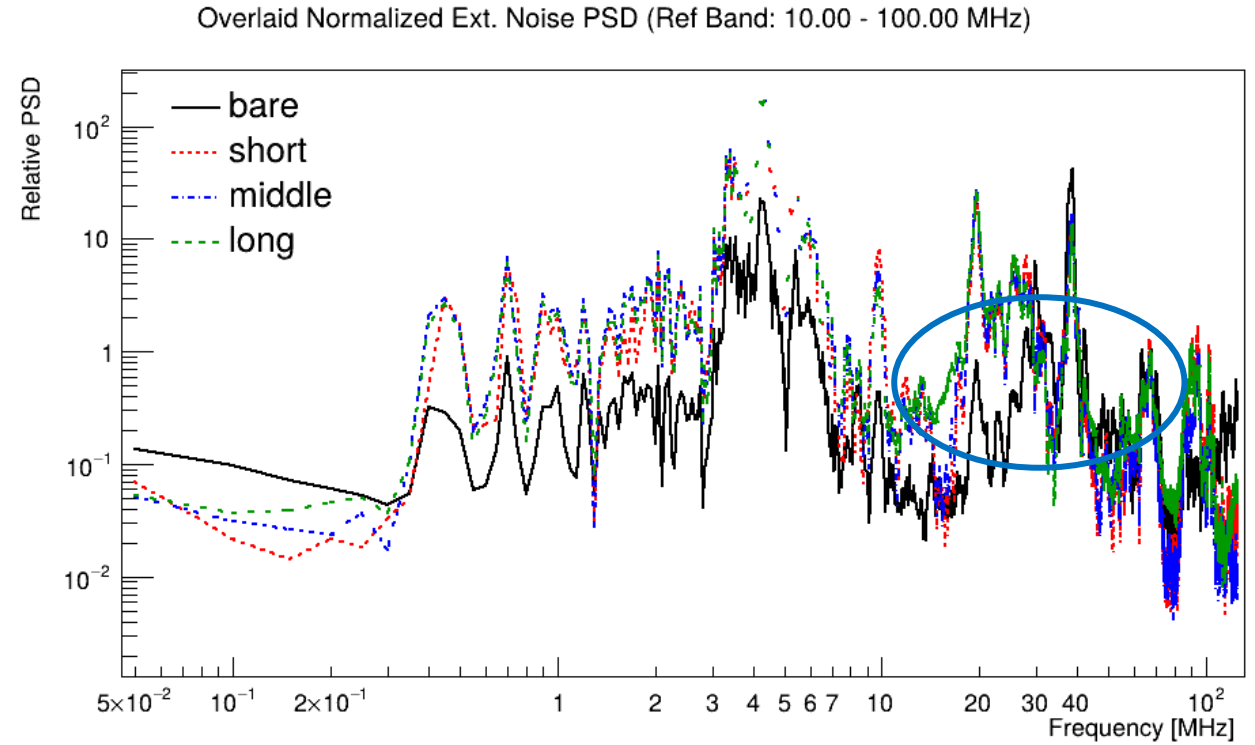
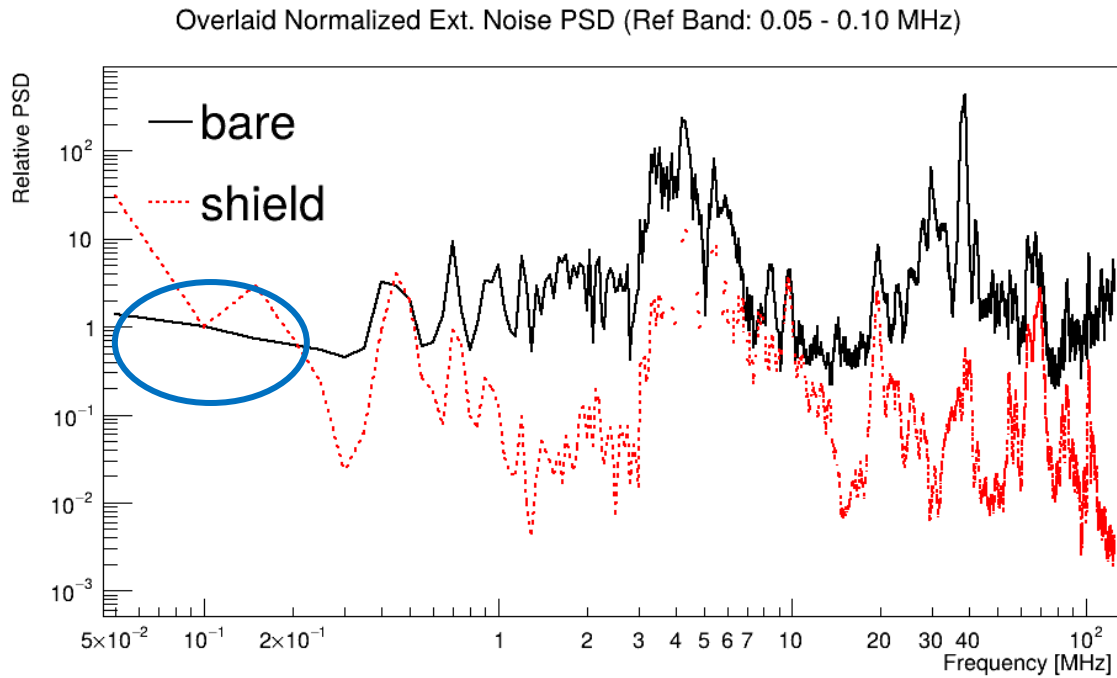


内

外

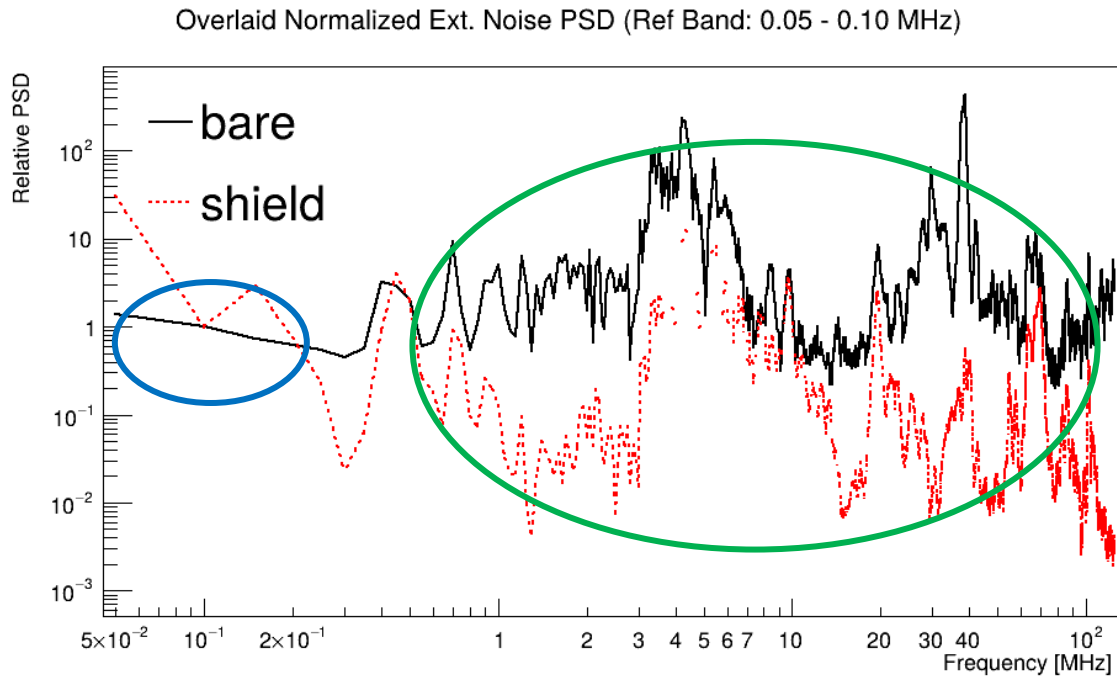
外来ノイズのない時間を使い、
外部ノイズと内部ノイズを分離

5. ノイズとシールドディング

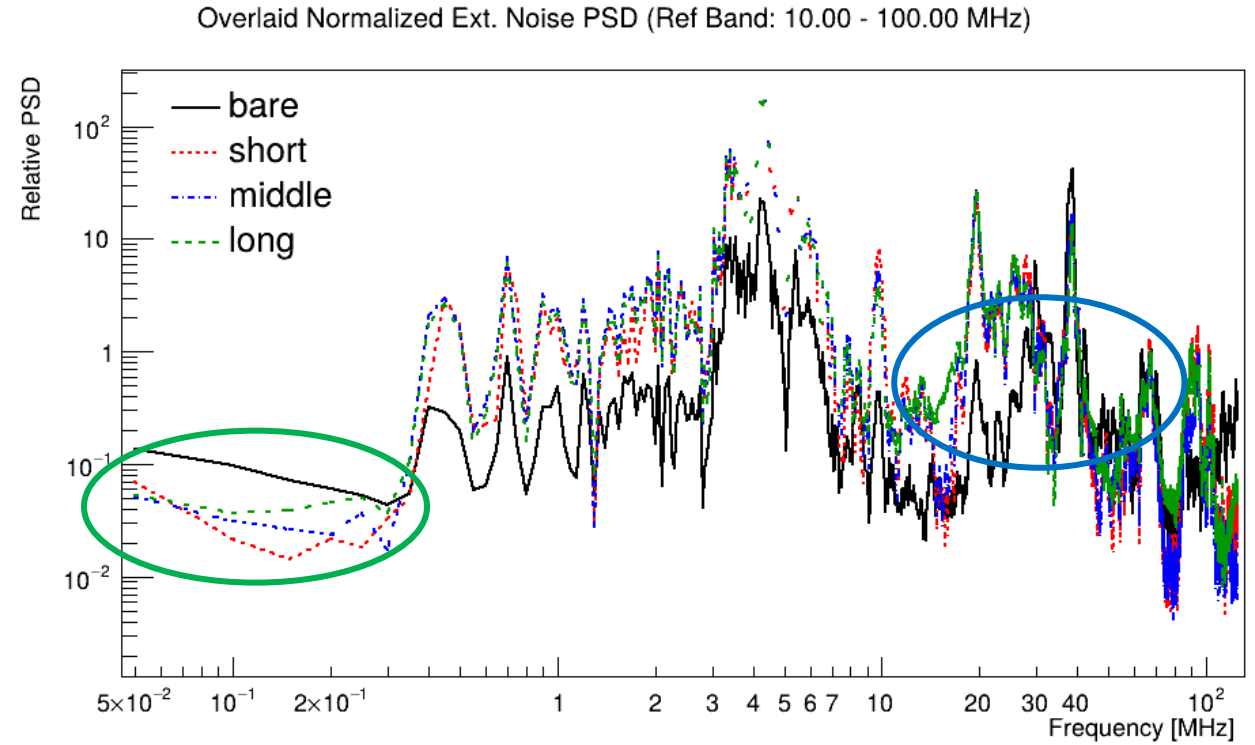


静電・磁気シールドはそれぞれ低・高のノイズを
素通しするはずなので、そこを基準に
シールドの効果を確認する

5. ノイズとシールドディング



静電シールド
効果あり



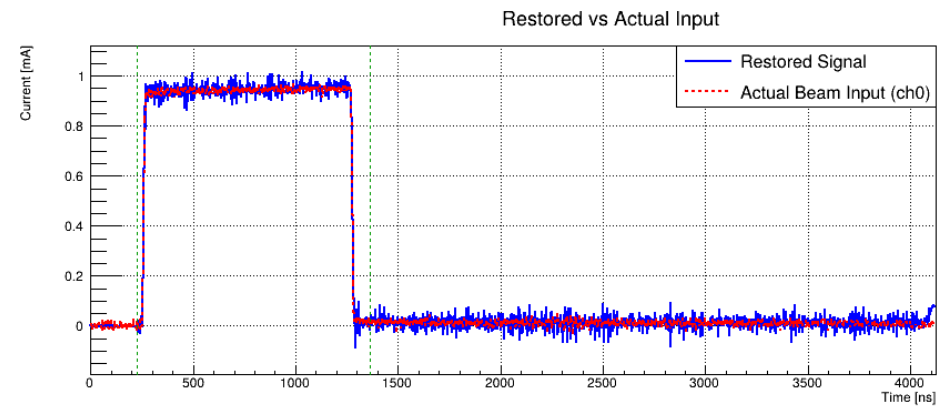
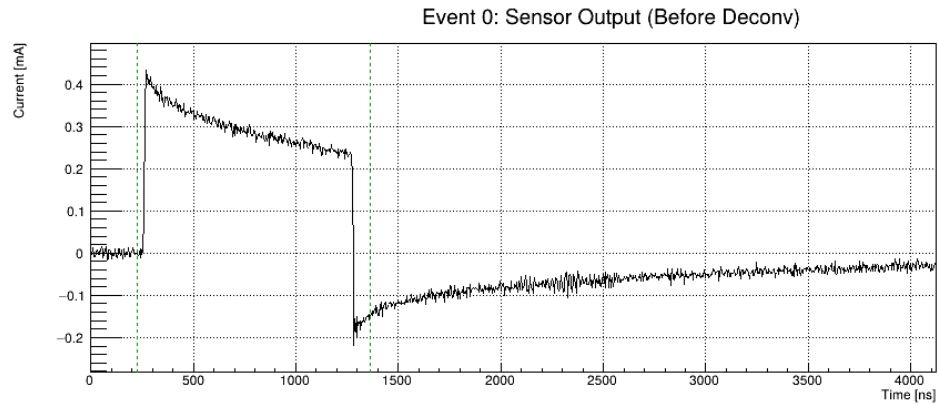
磁気シールド
効果あり？

5. ノイズとシールドディング

シールドの効果は一部確認できたが
全体的にシールドの厚さが不十分だったと考え
られる

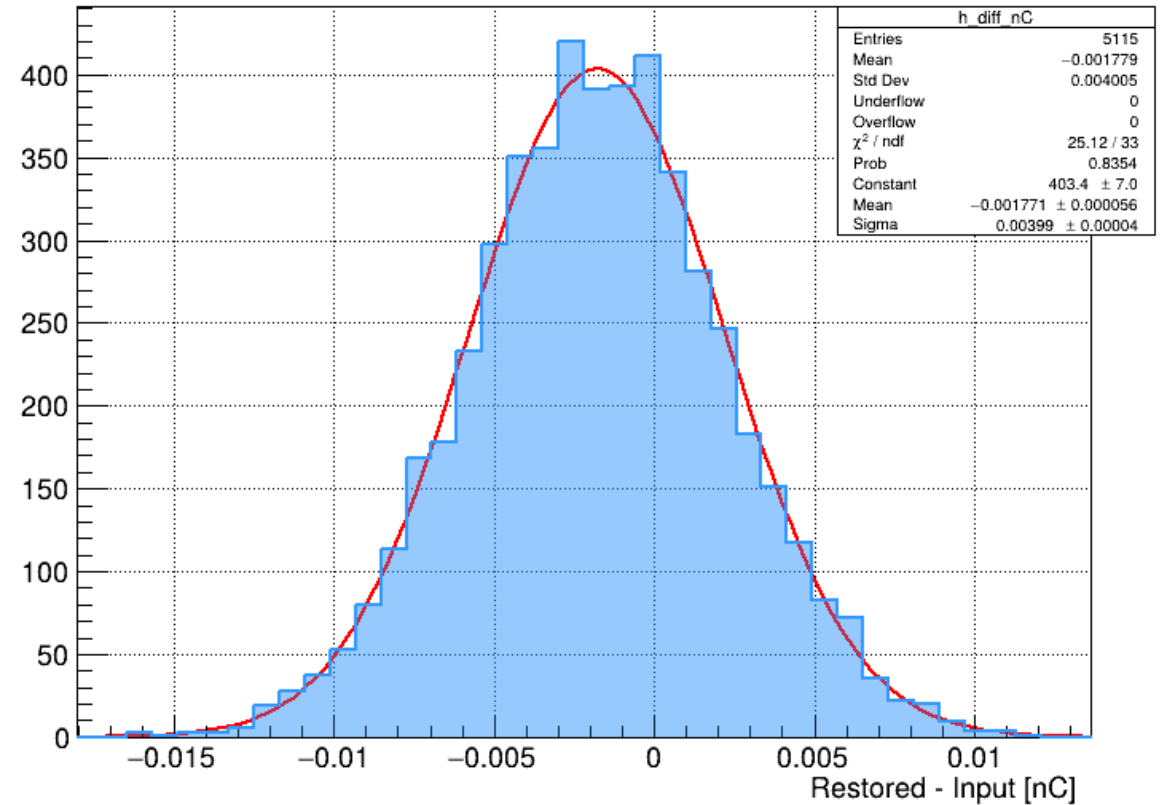
しかし、クライストロンのノイズがほぼ消えてから
ビームのパルスが来るというタイミングであったため、
クライストロンのノイズは測定の邪魔をあまりしな
かった

6. 性能評価



Integration Result:
Restored: 0.9624 nC
Input (ch0): 0.9579 nC
Diff: 0.0045 nC

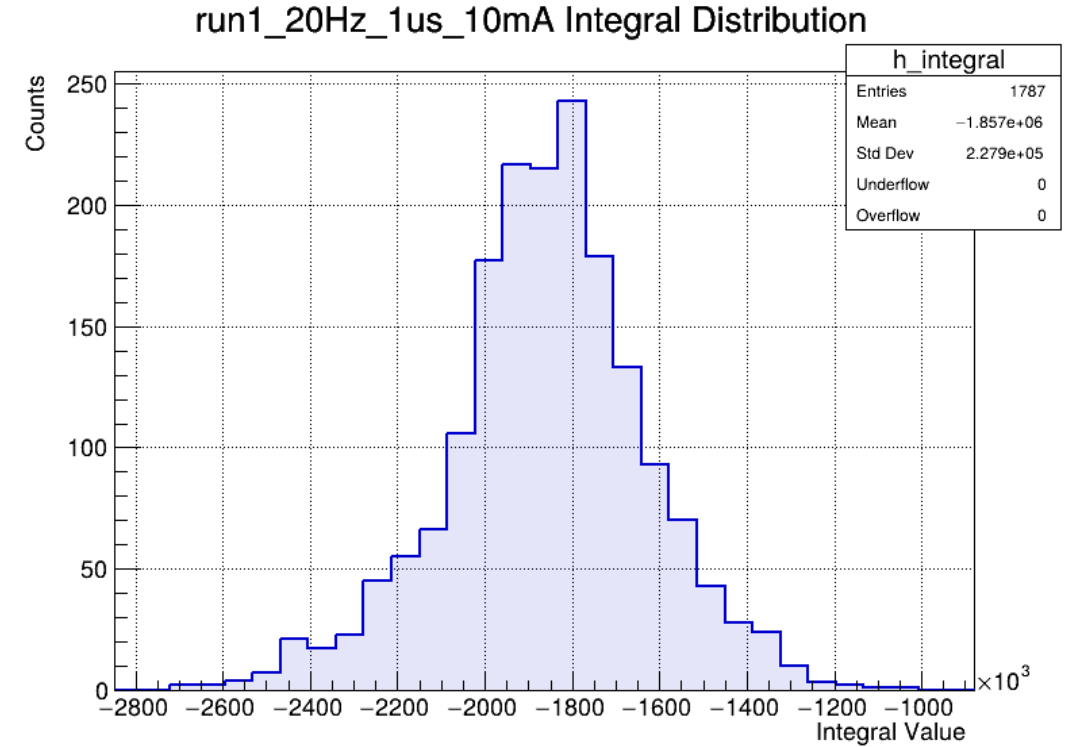
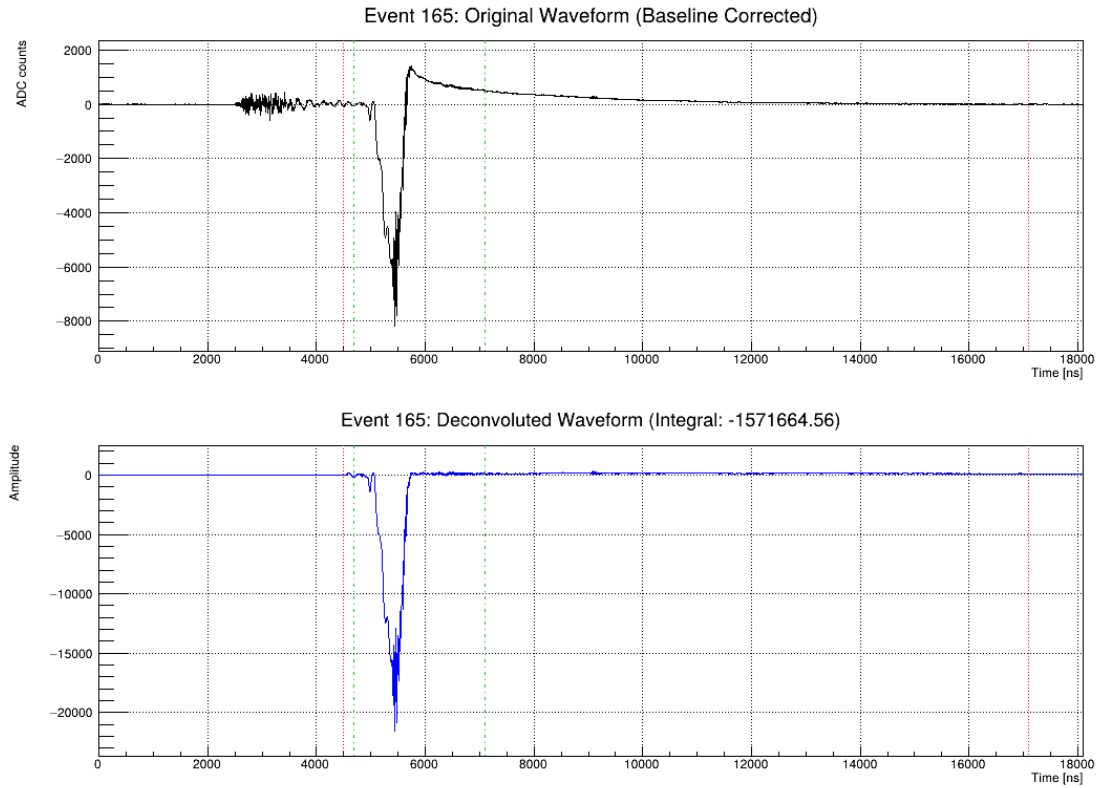
full_pulse_1us_50mV Integral Difference



実験室でダミー信号を測定した際の分解能は
0.004nC

6. 性能評価

電子ビーム

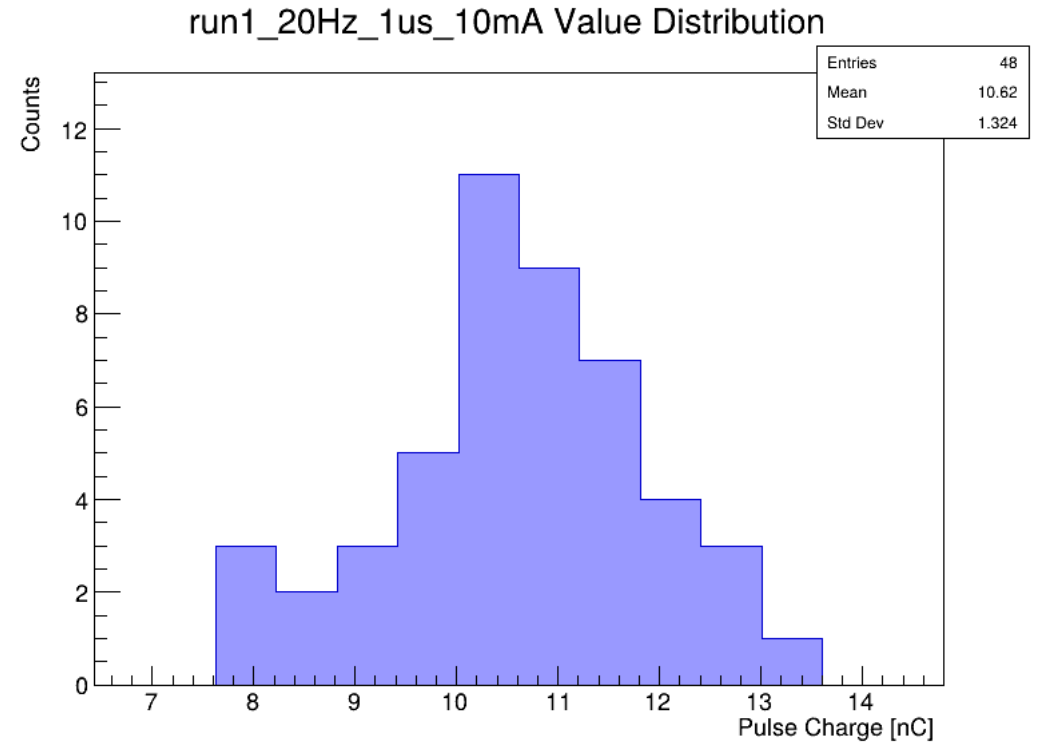


出力波形
復元したビーム波形

バンチ電荷の分布
(FCTでの値)

6. 性能評価

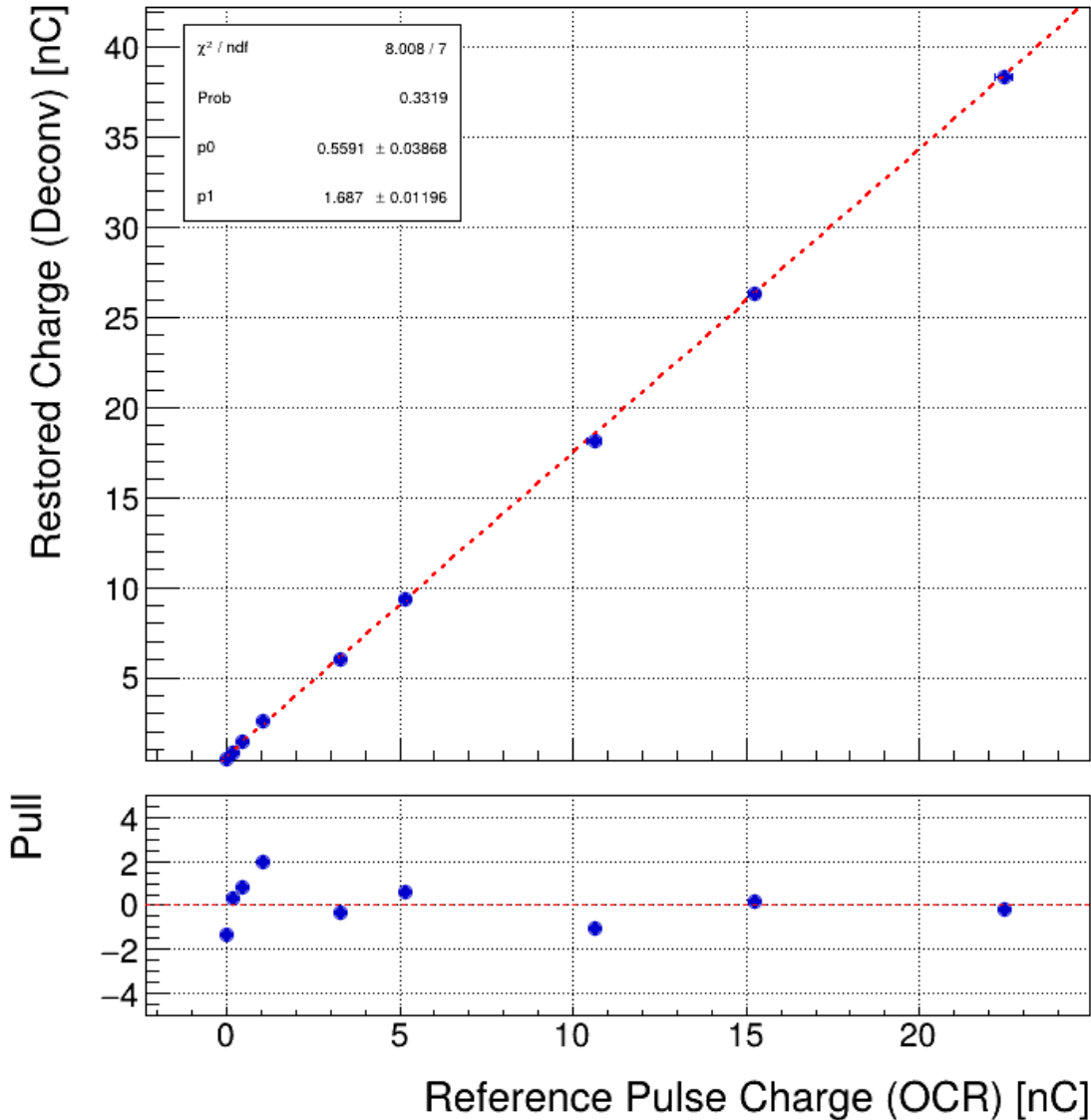
加速器のコンソール画面
(加速器の装備のCT)
Bergoz ICT-S-122
分解能はpCオーダー？



バンチ電荷の分布

6. 性能評価

Signal Correlation



加速器のCTと自作したFCT
を比べて、
線型フィッティング

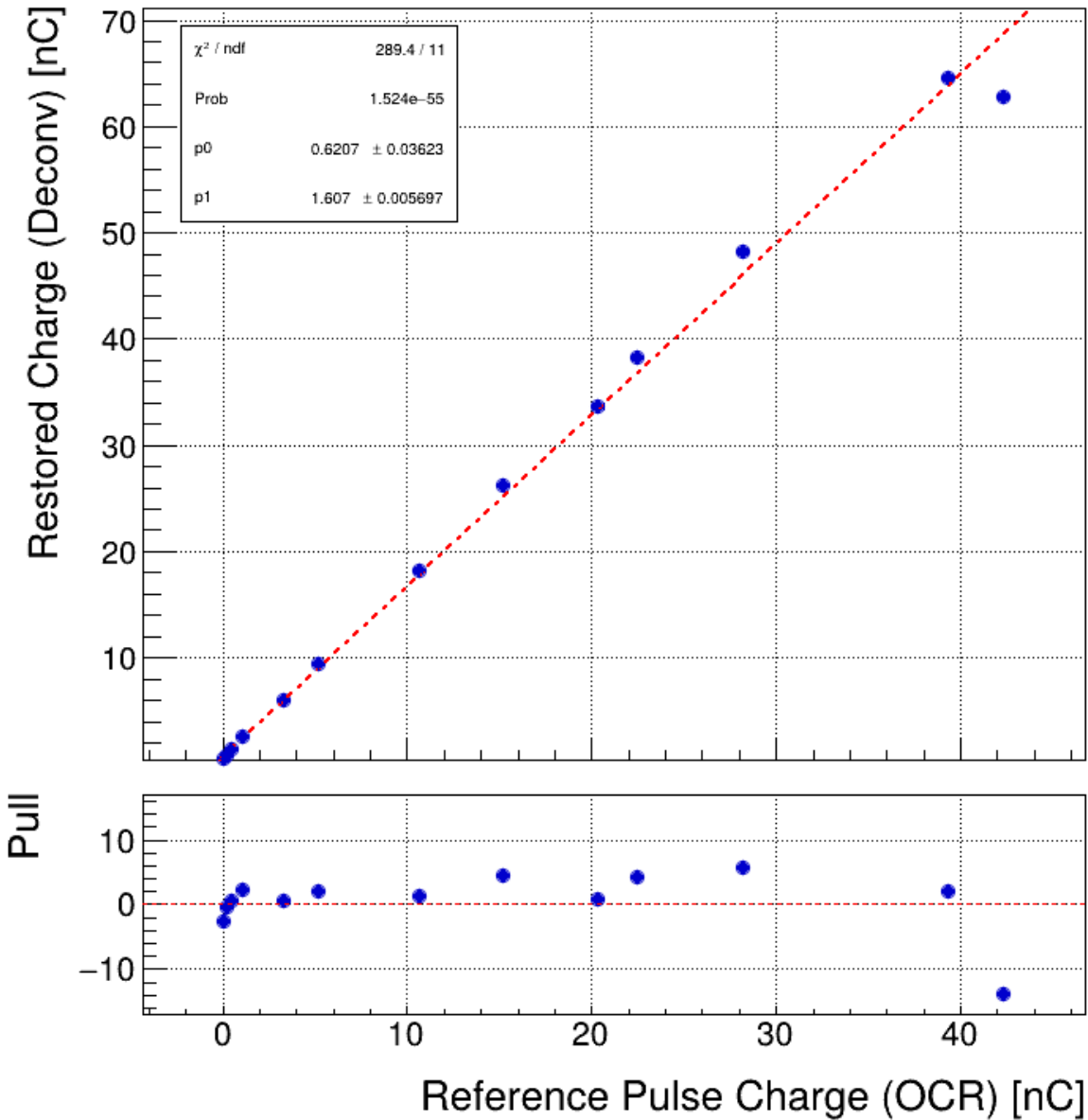


FCTの分解能：0.16nC

感度が1を超えている!?
オフセットが0.5nC

6. 性能評価

Signal Correlation



←すべてのラン

分解能が1.8nCに悪化

7. まとめ

- パルス幅約1 μ s、ピーク電流約10mAのビームの電荷を測定するFCTを制作した
- シールドディングが不十分であった
- 加速器においても、自作したFCTが機能することが確かめられた
- 加速器では、実験室よりも分解能が2桁悪くなった (0.004nC \rightarrow 0.16nC)

参考文献

- 外山 毅, "計測の基礎", 高エネルギー加速器セミナー OHO'20 (2020).
- 飛山 真理, "電子加速器のビームモニター概要 ～電氣的モニター～", 高エネルギー加速器セミナー OHO'08 (2008).
- N. Izumi, " Evaluation of a new detector for the T2K muon monitors ", Master's thesis, Tokyo University of Science (2021).

謝辞

本研究にご協力いただいた全ての皆様に感謝いたします。

特に、中家教授と木河助教、TAの大谷さんと青柳さんには多くの助言を賜り、大変お世話になりました。

また、京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センターの塚田准教授と頓宮様をはじめとする皆様には、実験装置の構築やビームタイムにおいて手厚いサポートをいただきました。

さらに、高エネルギー加速器研究機構の外山様には、実験装置に関してメールにて丁寧なご教示を賜りましたことを深く感謝いたします。