

LHC-ALICE実験 FoCal検出器のための 電荷増幅器の開発と測定

奈良女子大学 高エネルギー物理学研究室

高村舞

2024/3/5

目次

- 研究背景
- 研究目的
- 電荷増幅器の製作
- 測定方法
- 結果
- まとめ

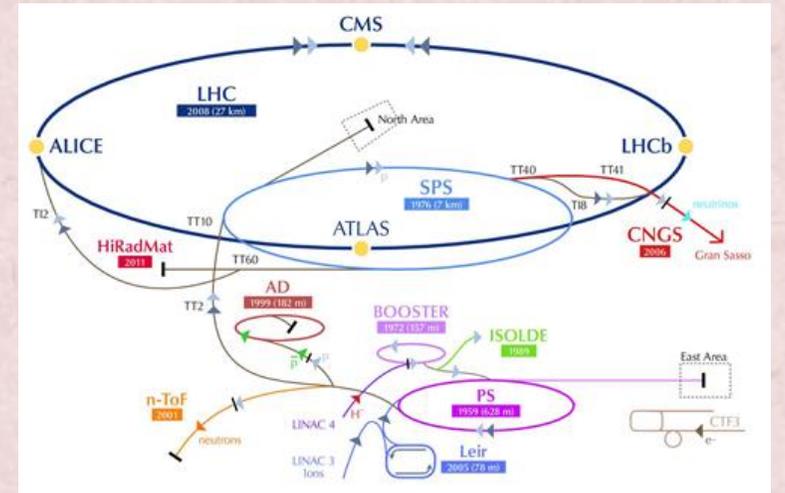
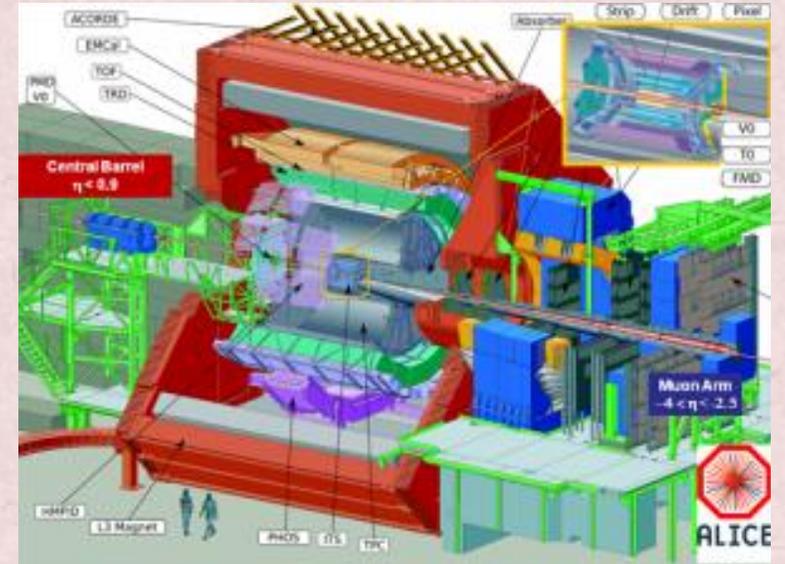
研究背景

LHC-ALICE実験

- LHC(Large Hadron Collider)
欧州共同原子核研究機構(CERN)に建設された
世界最大のハドロン衝突型加速器
- ALICE実験(A Large Ion Collider)
LHCの中で唯一重イオン衝突に特化した実験
QGPの生成・解明を目的としている

衝突核子とエネルギー

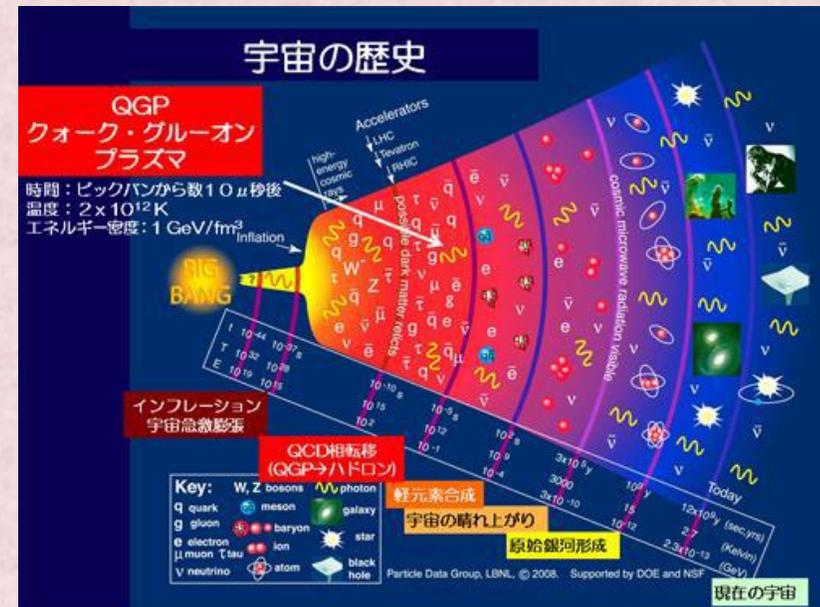
陽子-陽子(13TeV)・鉛-鉛(8TeV)



クォークグルーオンプラズマ(QGP)

- 宇宙誕生直後(数10us後)に存在したとされる状態
- 通常強い相互作用によって核子内に閉じ込められているクォークやグルーオンが超高温・高密度状態になると解放される状態

QGPの解明が宇宙
起源の解明になる



QGPの早期熱平衡問題

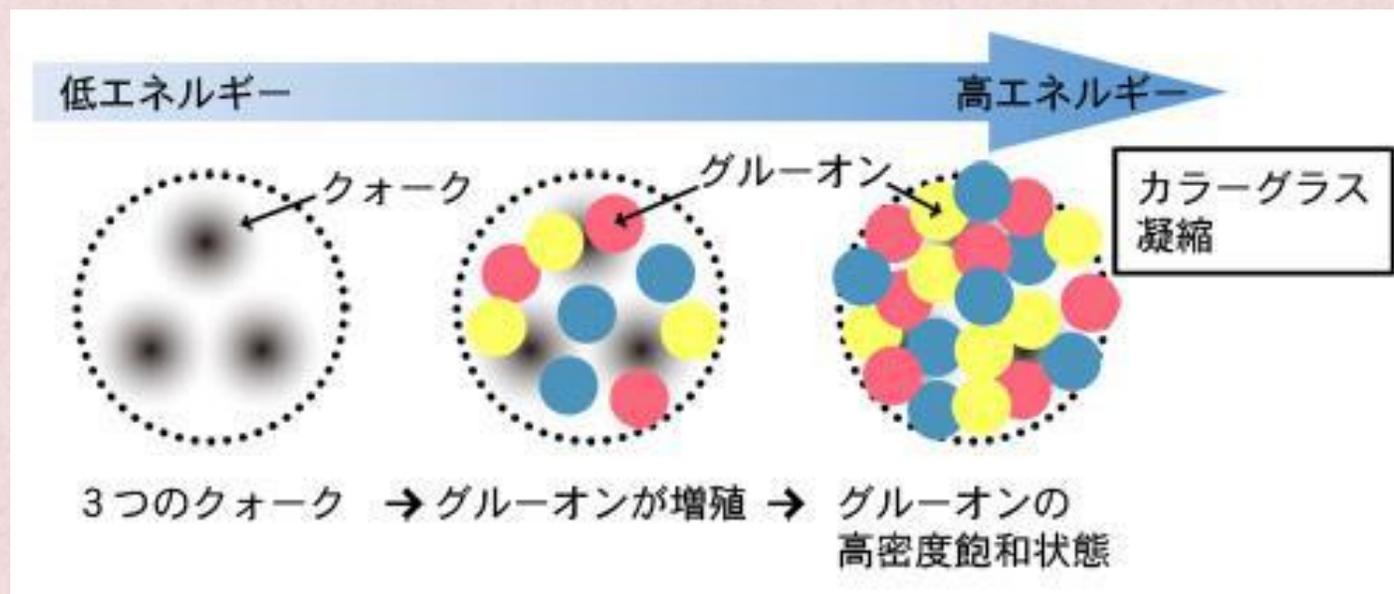
QGPは熱平衡化までにかかる時間が理論値よりも短いことが分かっている



これを説明する有力候補がカラーガラス凝縮(CGC)である

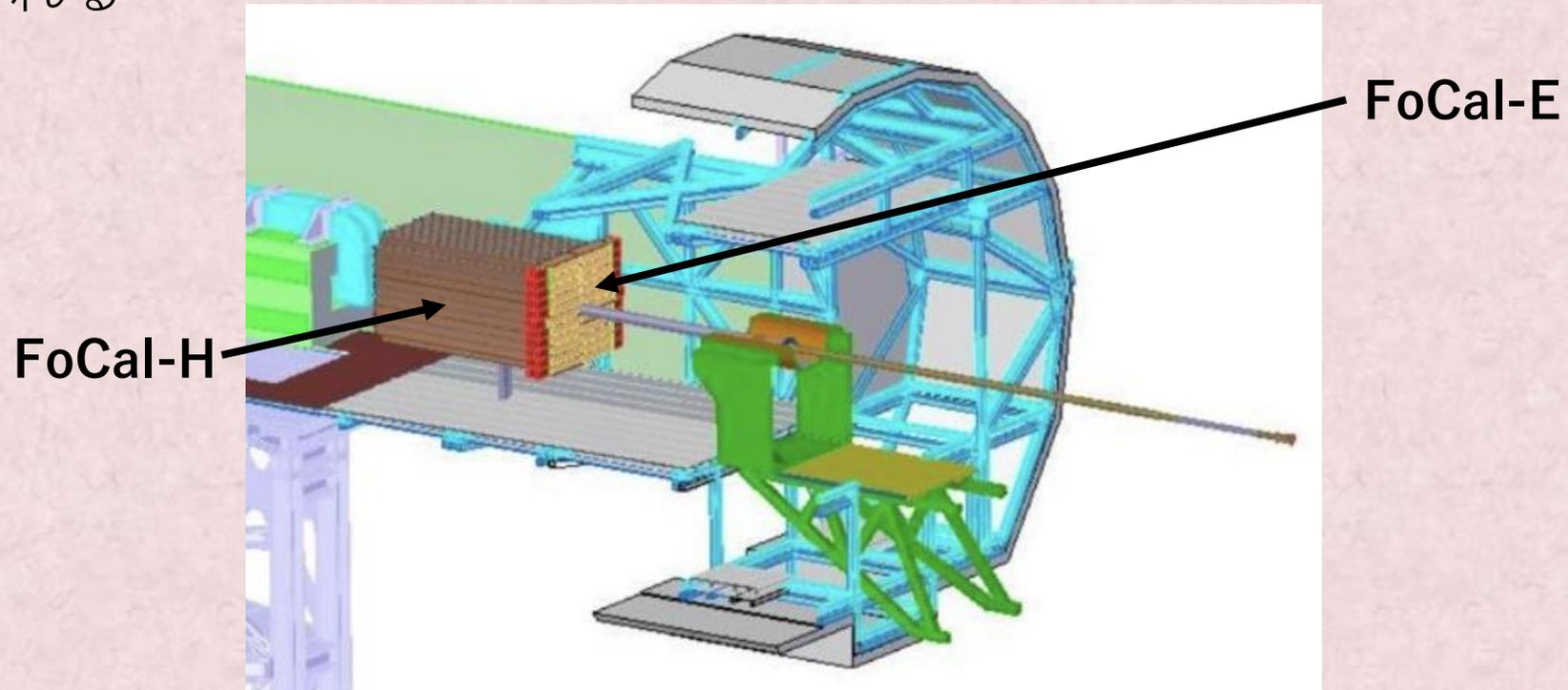
カラーガラス凝縮(CGC)

- エネルギーが高くなるとグルーオンが増殖し、高密度で飽和した状態になることで現れる物質状態
- この高密度で飽和した状態の原子核衝突は熱平衡化までの時間が短いと考えられている
- QGPを生成するための衝突直前状態とされている



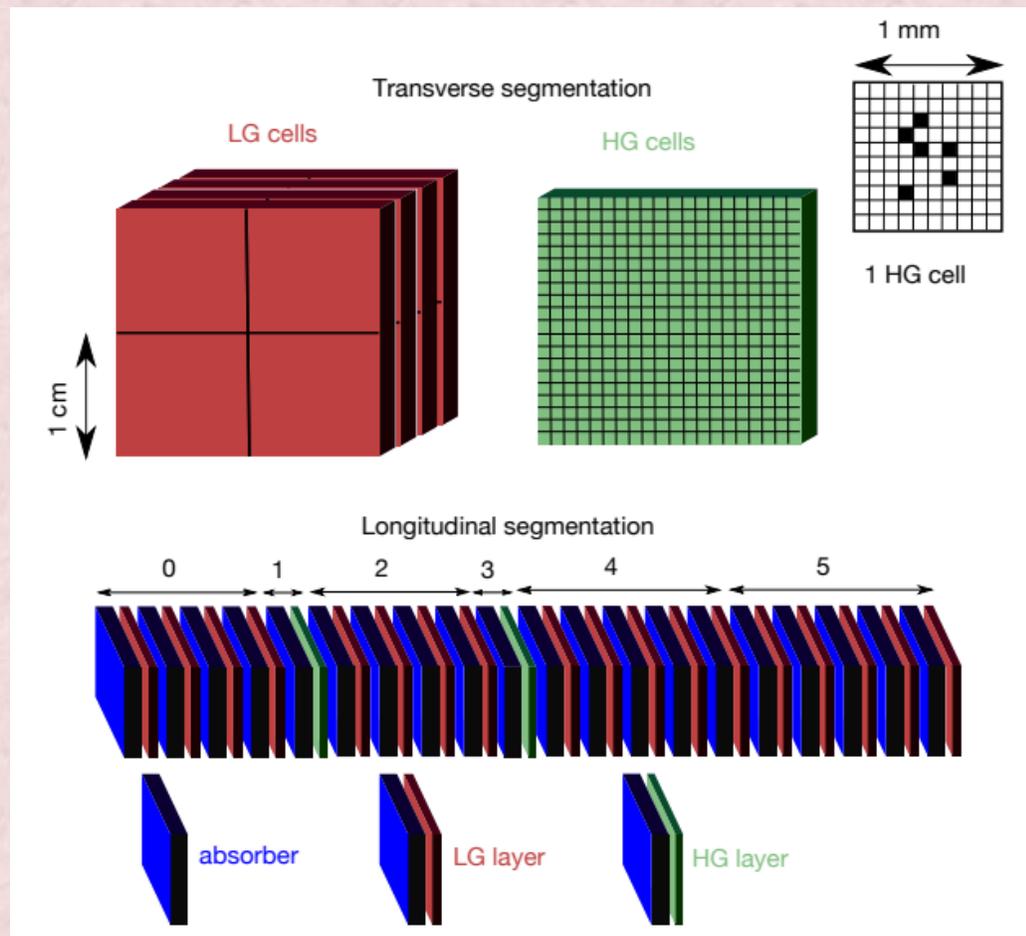
FoCal(Forward Calorimeter)

- CGCに感度が高い前方方向の直接光子を測定するための検出器
- LHC-ALICE実験に導入する計画が立てられている
- 直接光子を測定するためのFoCal-Eとハドロンを測定するためのFocal-Hで構成される



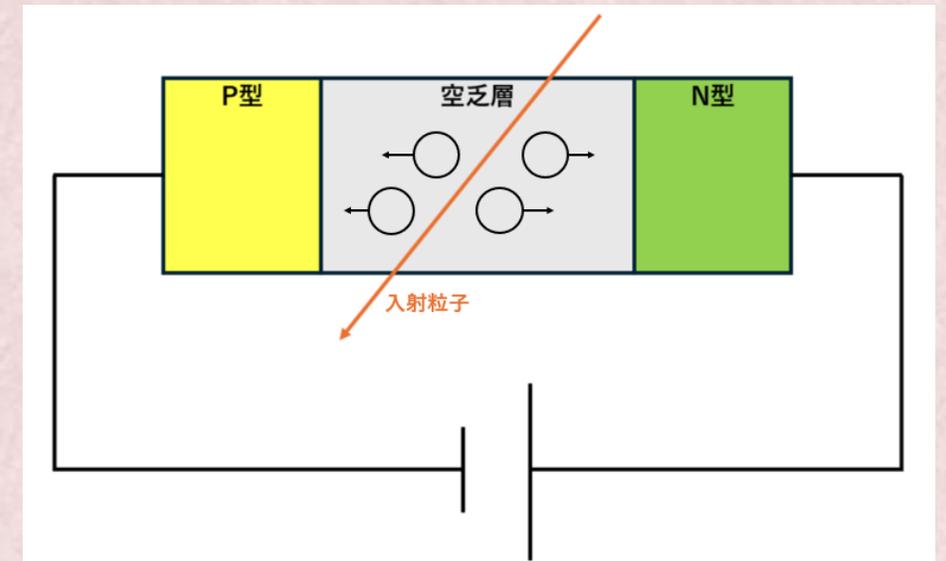
FoCal-Eの構造

- 検出層(Si)と吸収層(W)が20層ずつ並んでいる
- 検出層 (Si) は、高い位置分解能を持つHGL (High Granularity Layer)とエネルギー測定を行うLGL (LOW Granularity Layer) の2種類
- 吸収層 (W) で入射した粒子を電磁シャワーにしている



半導体検出器

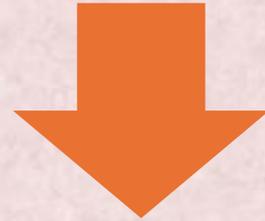
- 接合面では電子がp型、ホールがn型に広がり、接合部付近では電氣的に中性な部分が広がる。(空乏層)
- 空乏層に粒子が入射するとホール・電子対ができ
電子はn型、ホールはp型に引き寄せられる
- 両端の電極に粒子が到達するとパルスが発生する
- 半導体検出器では逆向きに電圧をかけて空乏層を広げ検出効率を上げている



研究目的

目的

- FoCal検出器で使用されているSi sensorの性能が中性子被曝の前後でどのように変化するかを評価したい
→中性子被曝したSi chipと被曝していないSi chipにLEDを照射して違いをみる。



- Si chipからの微小な電流を積算して電圧値に変換する電荷増幅器を製作する

手順

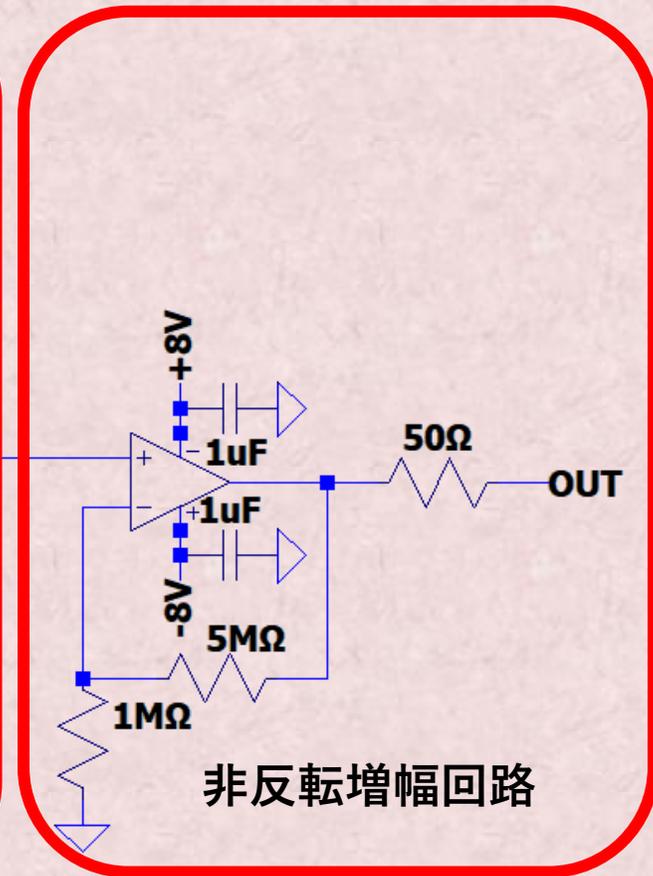
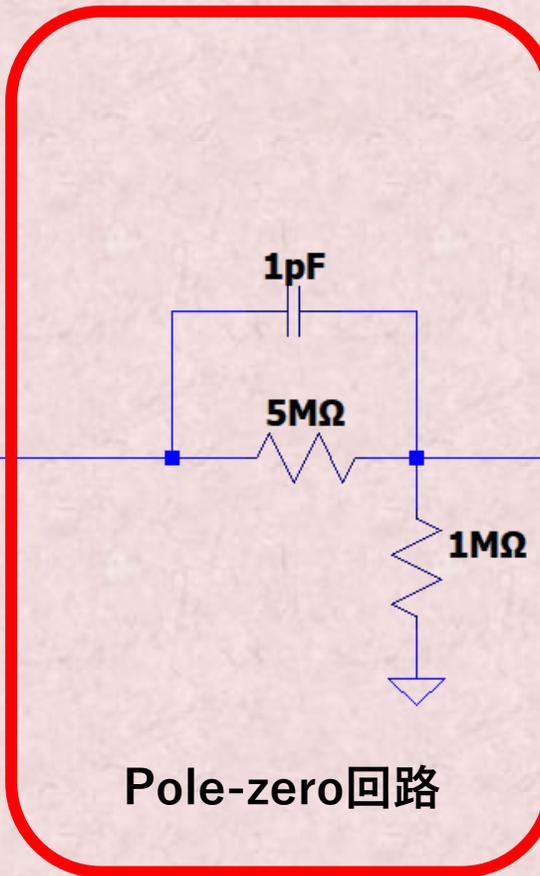
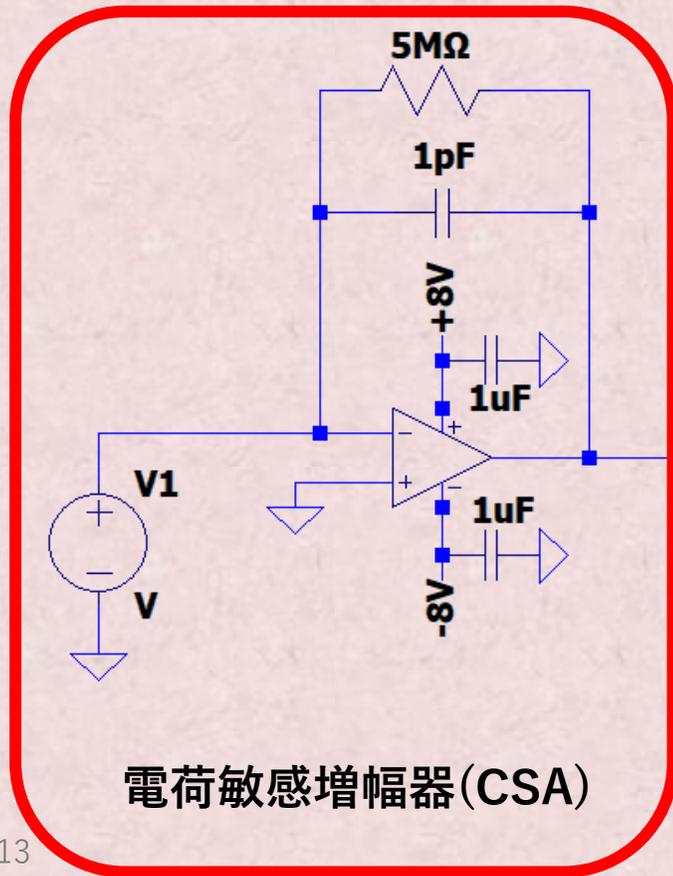
1. 微小な電流を積算して電圧値に変換する電荷増幅器の製作
2. 中性子被曝していないSi chipにLEDを照射し、Si chipからの信号を電荷増幅器で増幅し測定できるか確認する

電荷増幅器の製作

製作した回路図

- 製作した電荷増幅器の全体像は以下の通り
- オペアンプはTEXAS INSTRUMENTS社のLM6142を使用した

NIM信号

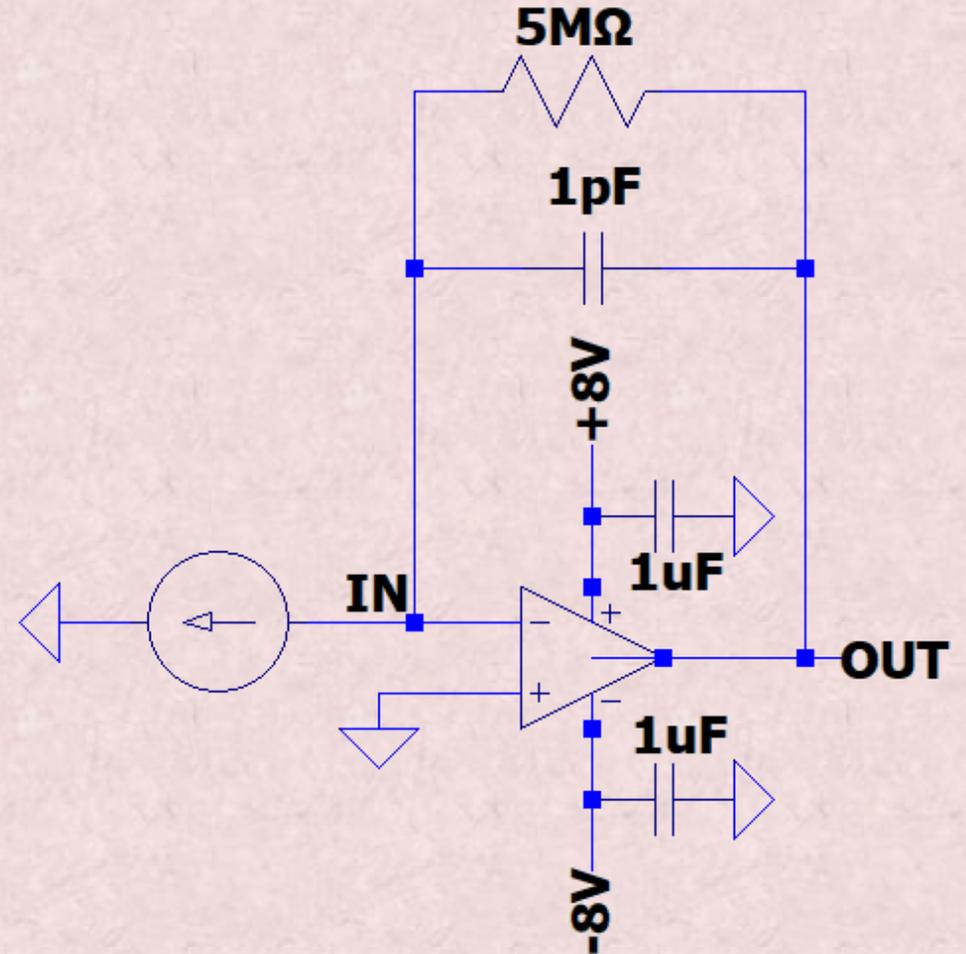


想定される出力波形

電荷敏感増幅器(CSA)

- センサーからの微小な電流信号を積分して測定可能な電圧値に変換する役割
- 時定数は抵抗とコンデンサーの積で決まる
- 今回は $1\text{pF} \times 5\text{Meg}\Omega = 5\text{usec}$ より、時定数は 5usec

$$V_{out} = -\frac{1}{C} \int Idt \times e^{\frac{t}{CR}}$$

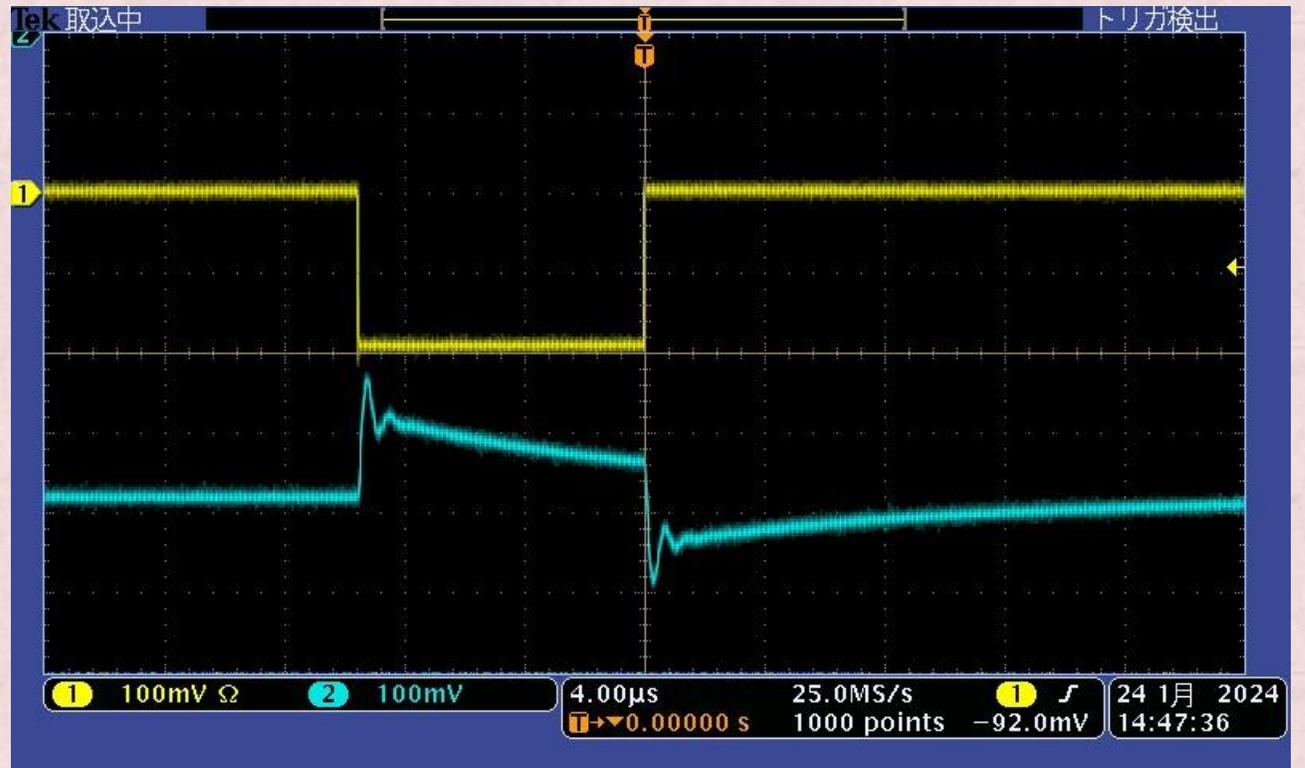


CSA結果

黄色：入力

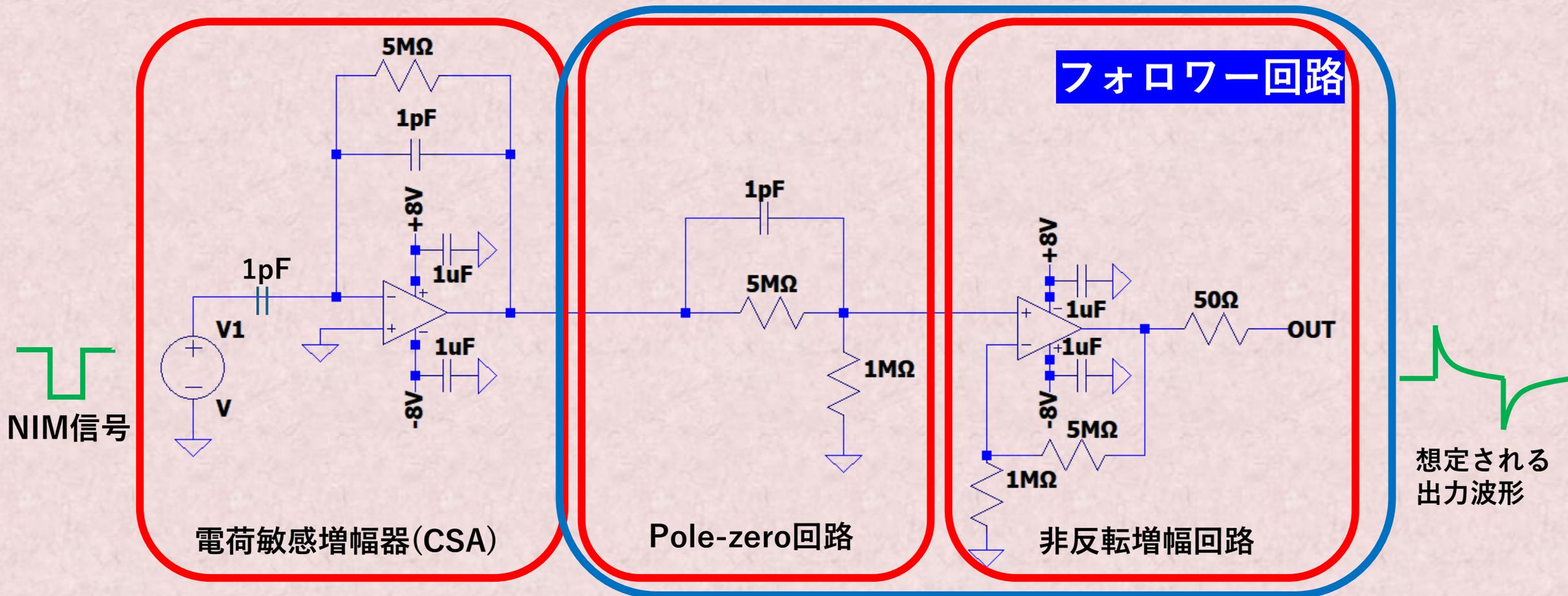
水色：出力

- 受け手側(オシロスコープ)のインピーダンスは $1\text{M}\Omega$



出力インピーダンスが $1\text{M}\Omega$ と高くなっているなのでインピーダンスを下げるために
フォロワー回路を製作する

フォロワー回路



青線で囲んだフォロワー回路を製作する

Pole-zero回路

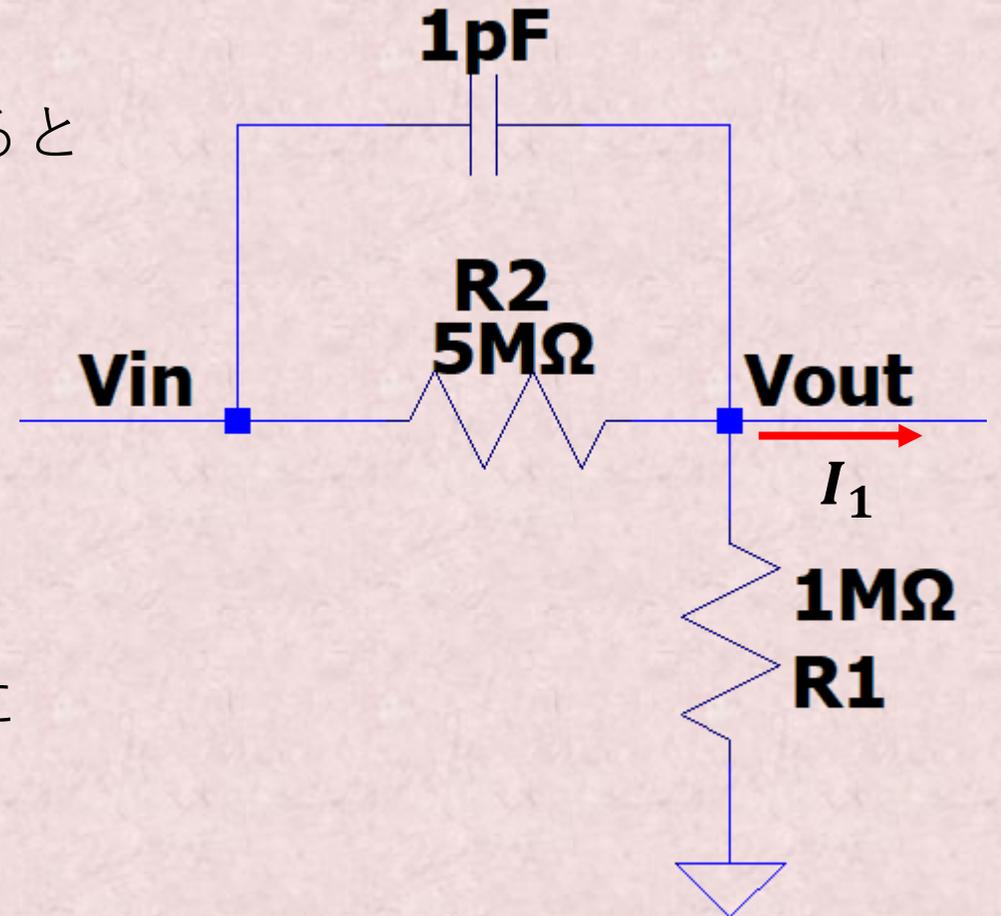
- 時定数を変更するための回路
- 右図における合成インピーダンスを Z_1 とすると

$$e^{-\frac{t}{CR} \cdot \frac{CR}{CR+Z_1}} = e^{-\frac{t}{CR+Z_1}}$$

$$I_1 = \frac{V_{in}}{(R_1 + R_2)}$$

$$V_{out} = R_1 \cdot I_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in}$$

- 今回 $V_{out} = \frac{1}{6} V_{in}$ より、出力電圧が入力電圧に対して $\frac{1}{6}$ になる



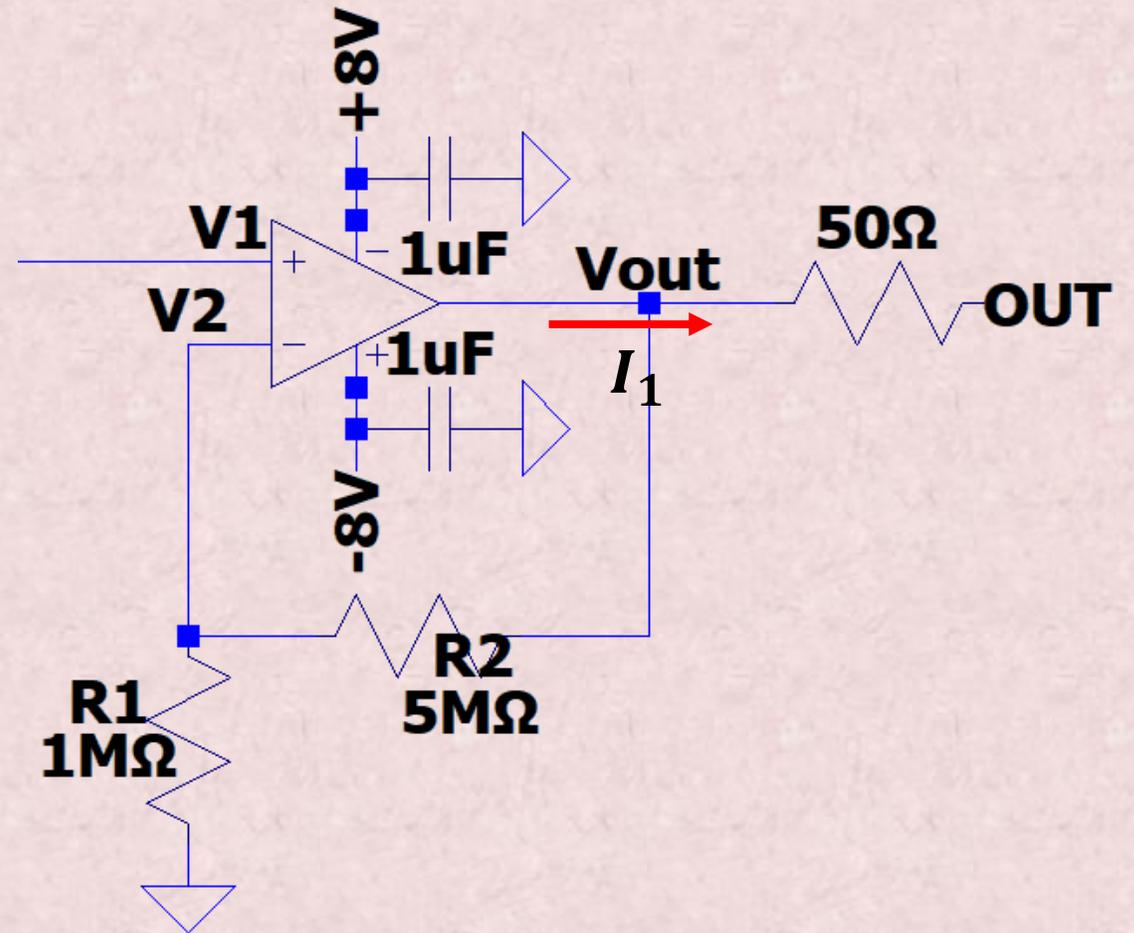
非反転増幅回路

- 電圧を増幅させる役割
- オペアンプの+端子と-端子では電位差が生じないようにしている ($V_1 = V_2$)

$$I_1 = \frac{V_2}{R_1} = \frac{V_1}{R_1}$$

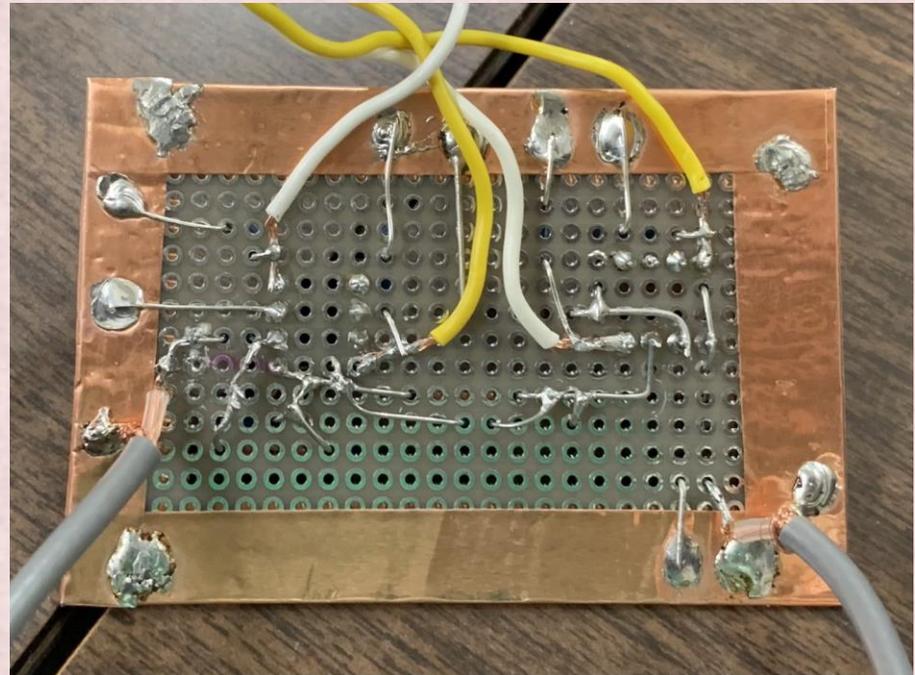
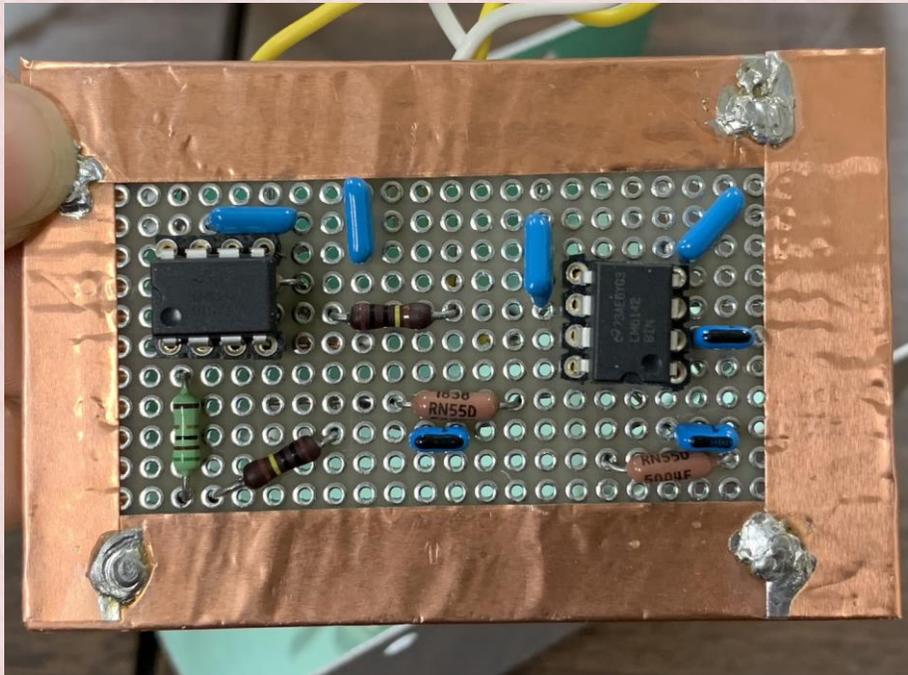
$$V_{out} = (R_1 + R_2) \cdot I_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1$$

- $V_{out} = 6V_1$ より、出力電圧は入力電圧に対して6倍になる。
- 今回フォロワー回路で電圧値を増幅することが目的ではないので、Pole-zero回路と組み合わせて電圧値を元に戻している。



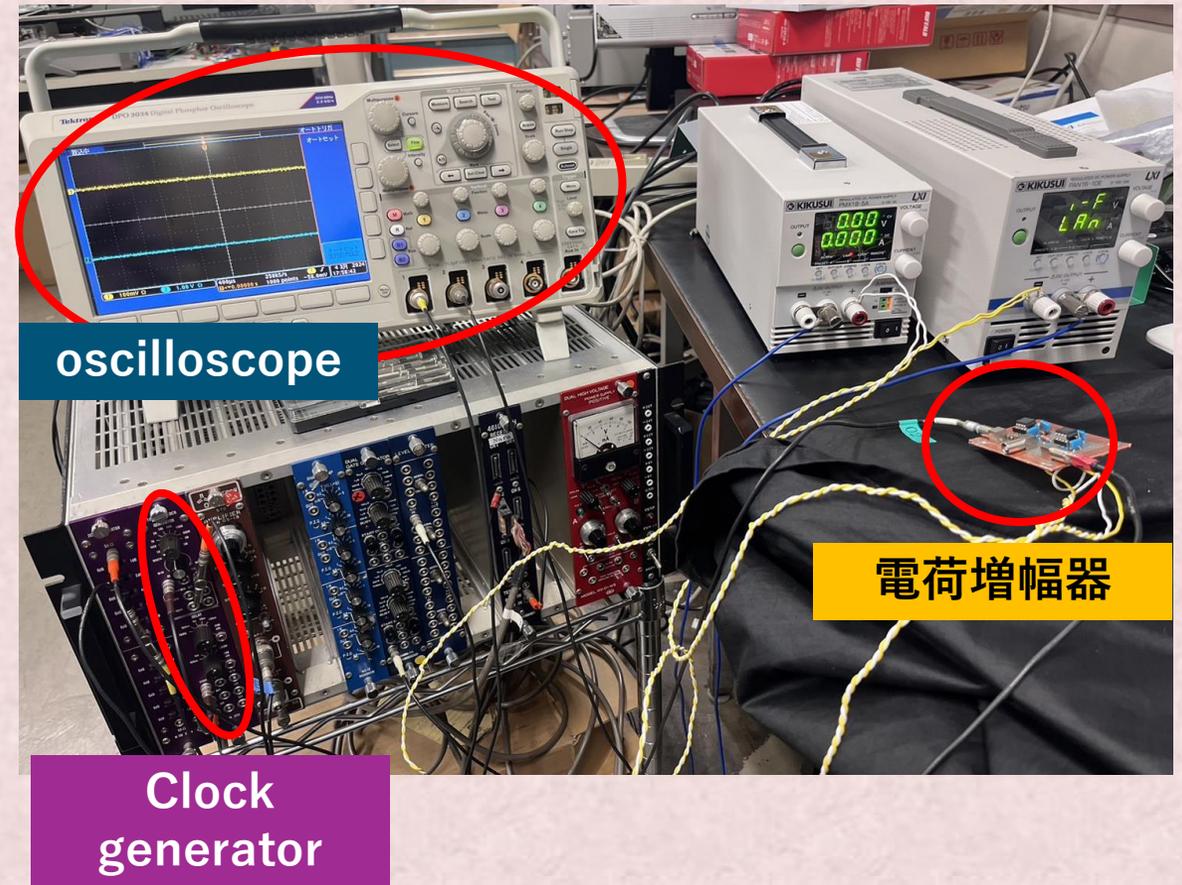
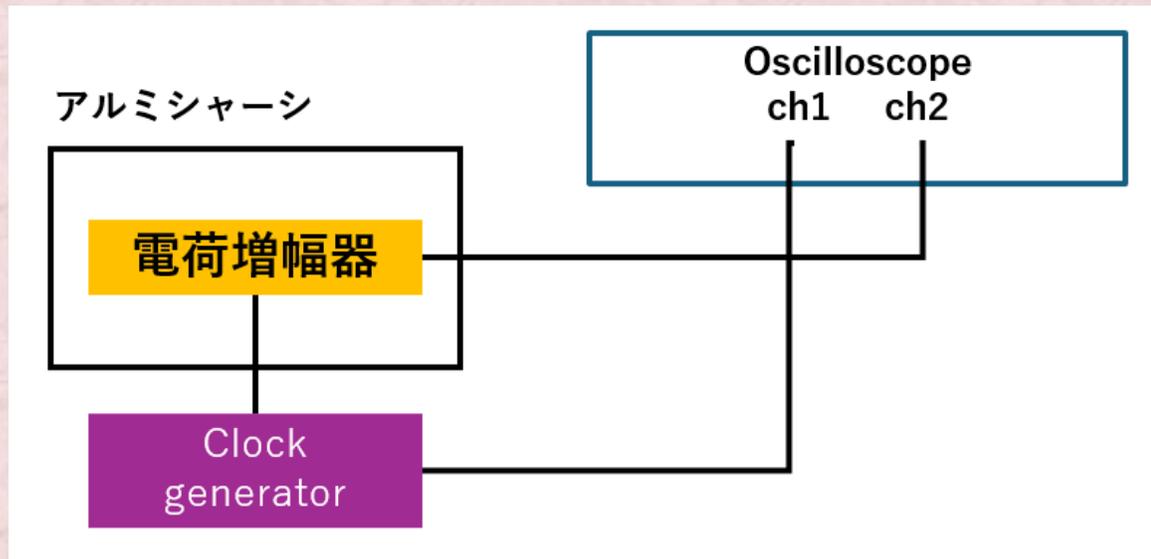
電荷増幅器

- 基板の完成写真
- アルミシャーシに入れて出力を確認する



全体像

- セットアップの全体像



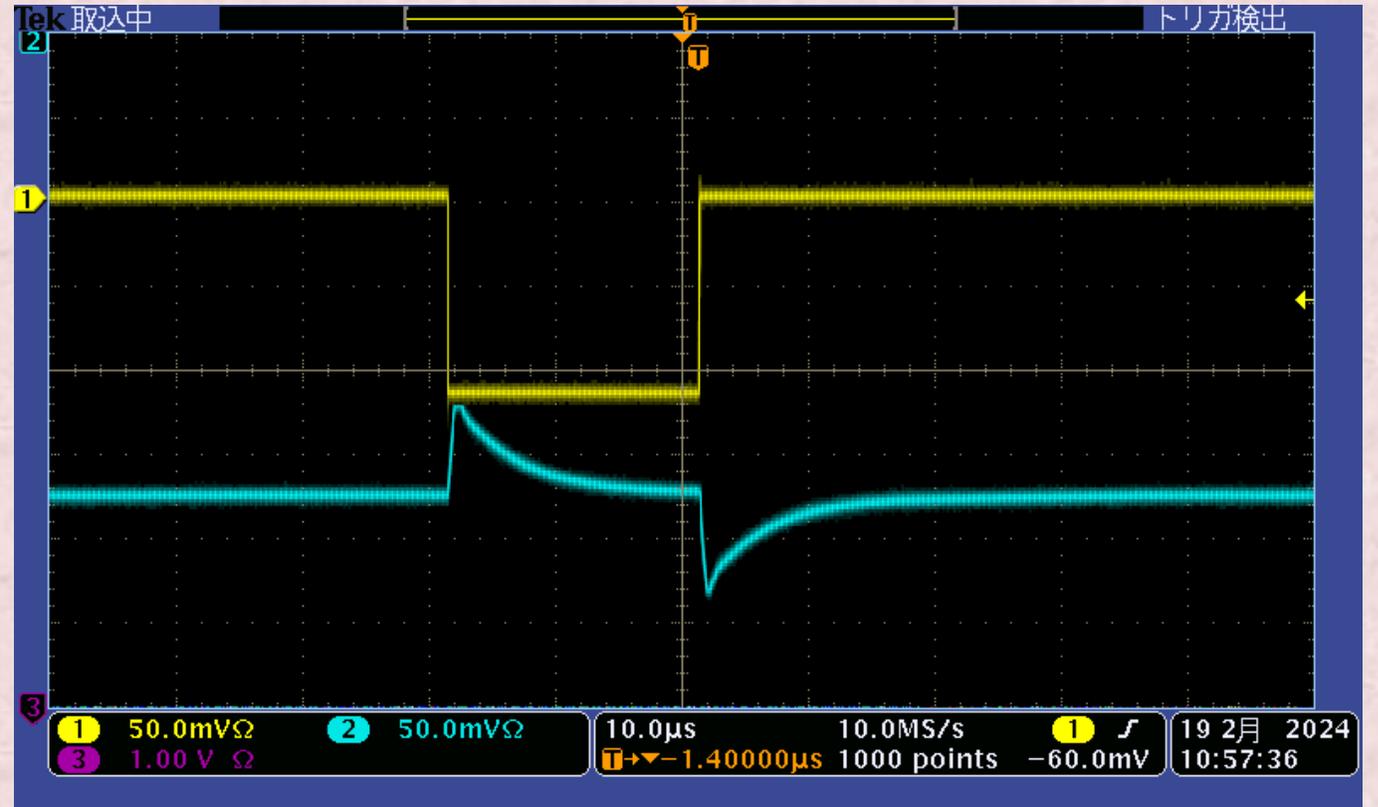
全体の結果

黄色：入力

水色：電荷増幅器からの出力

受け手側(オシロスコープ)の

インピーダンスは 50Ω に設定している

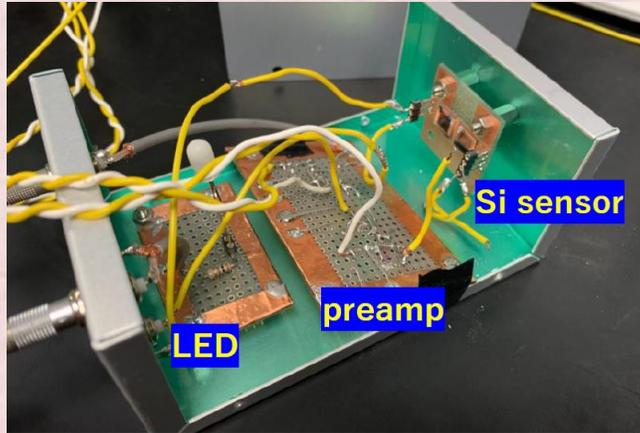


時定数が5usec、インピーダンス 50Ω でうまく出力が確認できた。

→測定を行う

測定方法

測定に用いた装置①



n型Si chip : 6 × 6mm
LED
電荷増幅器



電源装置: オペアンプ
に電圧をかける



左: Clock generator

LEDにTTL信号を送る

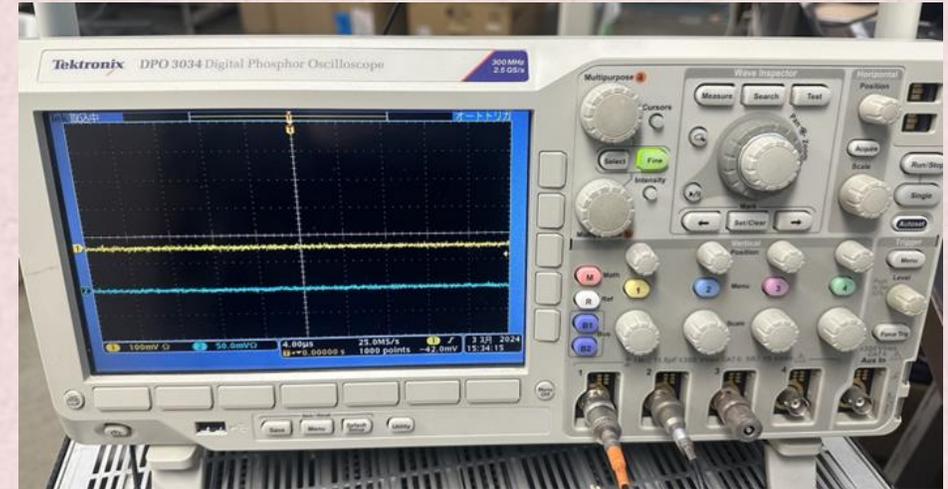
右: shaper

信号を増幅したり、
減衰時間を変化させることができる

測定に用いた装置②



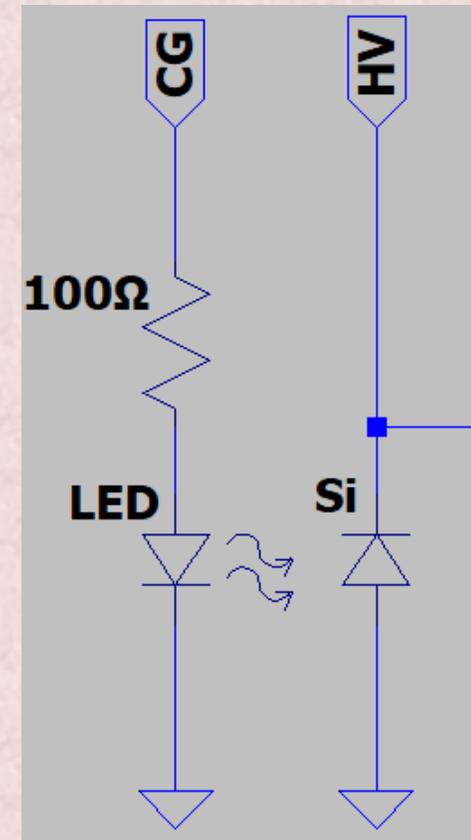
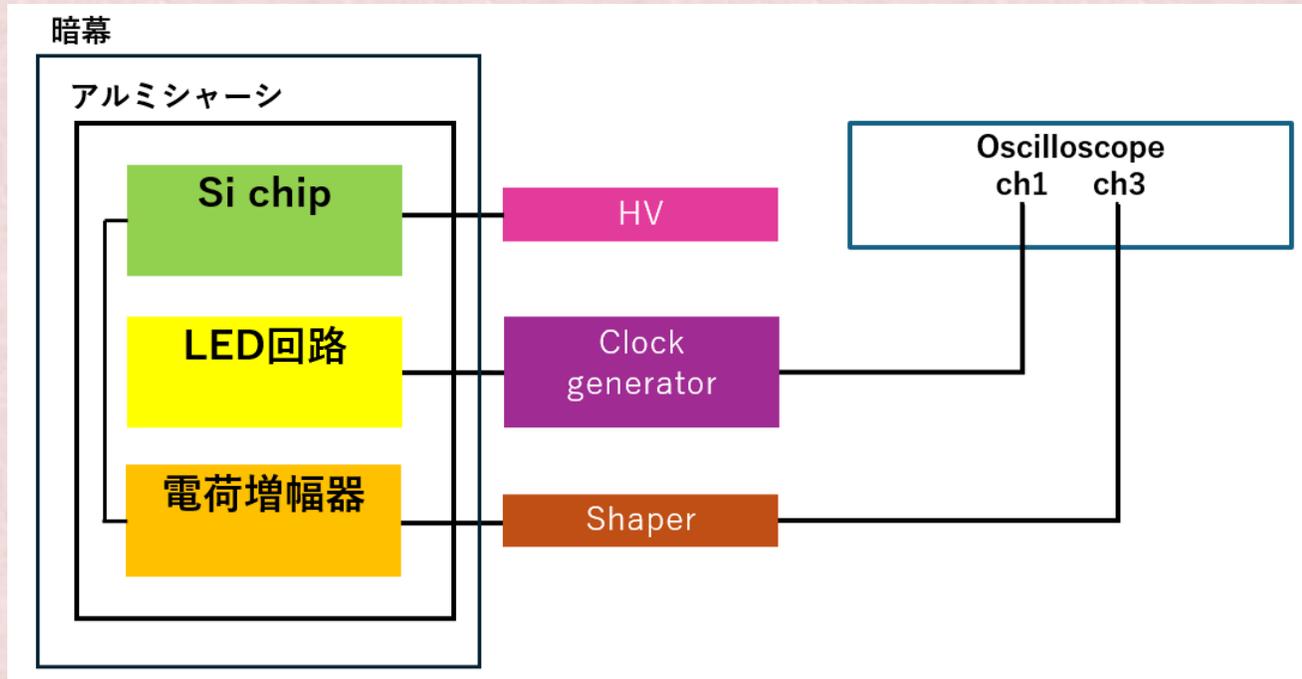
ピコアンメーター…Si chip に高電圧をかける
50V、電流リミットは200nAに設定



オシロスコープ…入力波形と出力波形を
確認する

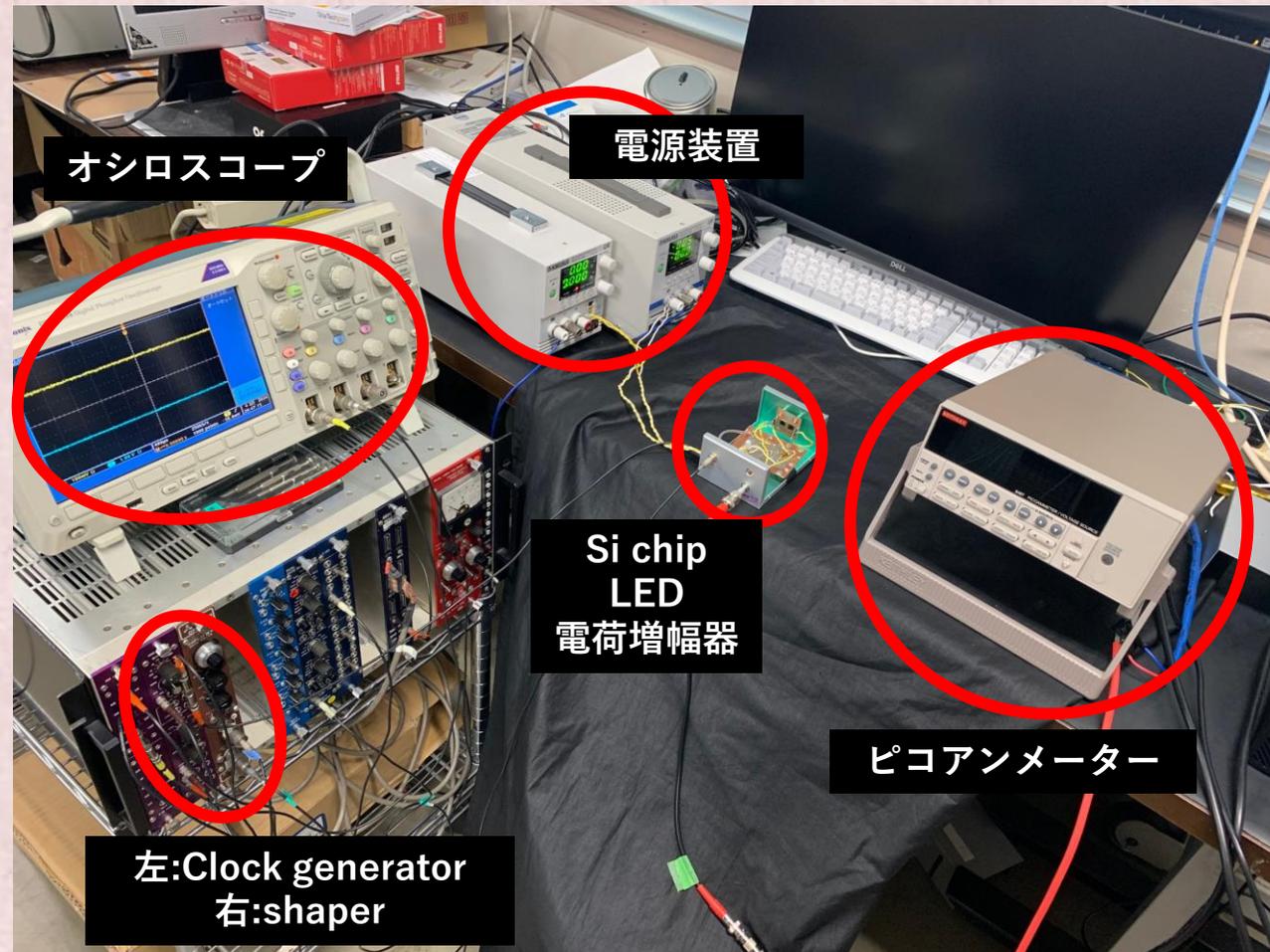
セットアップと手順

- 中性子照射前のSi chip にピコアンメーターで逆バイアスをかけ、オシロスコープで出力を確認する
- 出力が確認できれば測定を行う



全体像

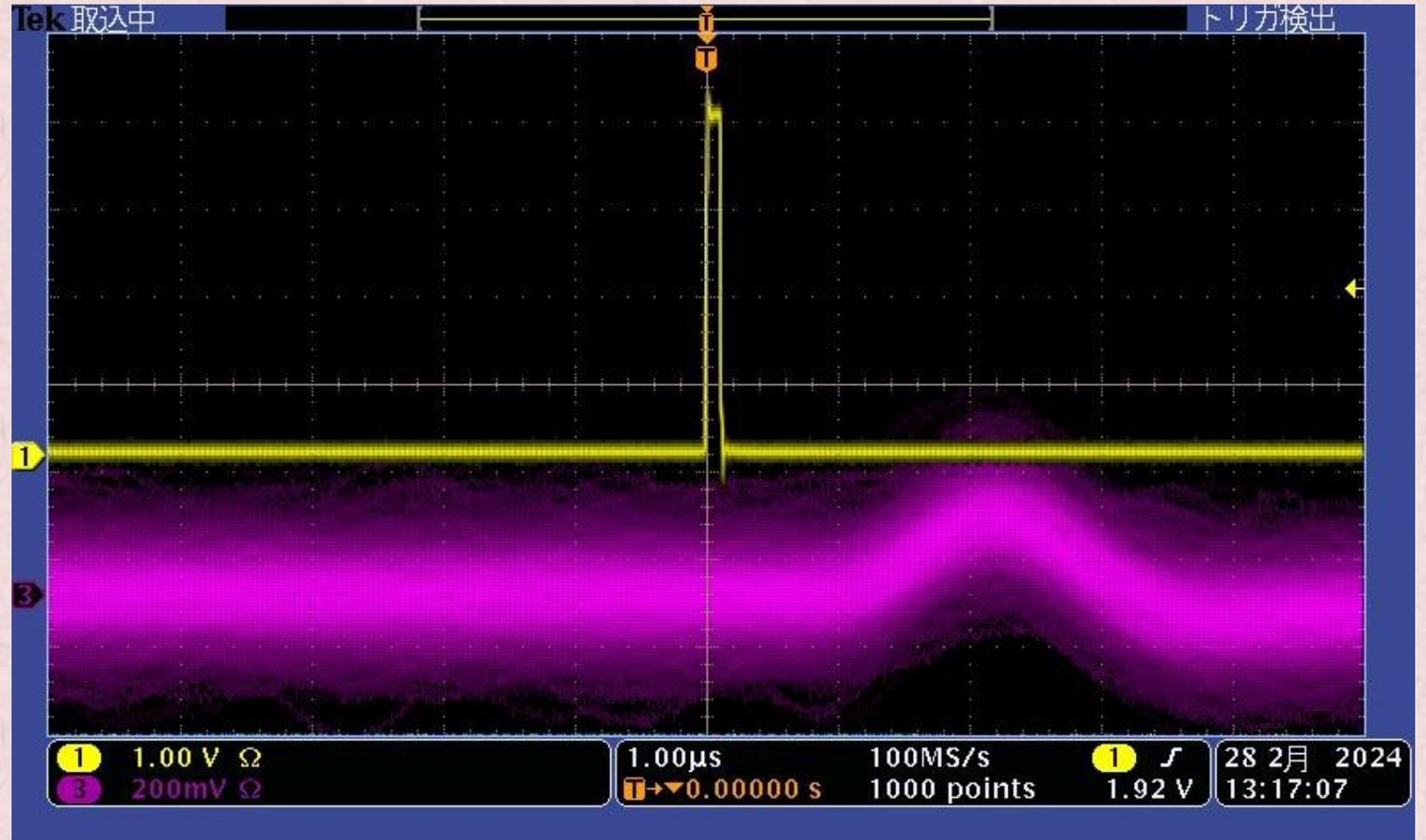
- セットアップの全体像



測定結果

結果

黄色：LEDに入力したTTL信号
赤色：Si chip→電荷増幅器
からの出力



センサーからの信号がオシロスコープで確認できた
→ノイズが多い

まとめと今後の課題

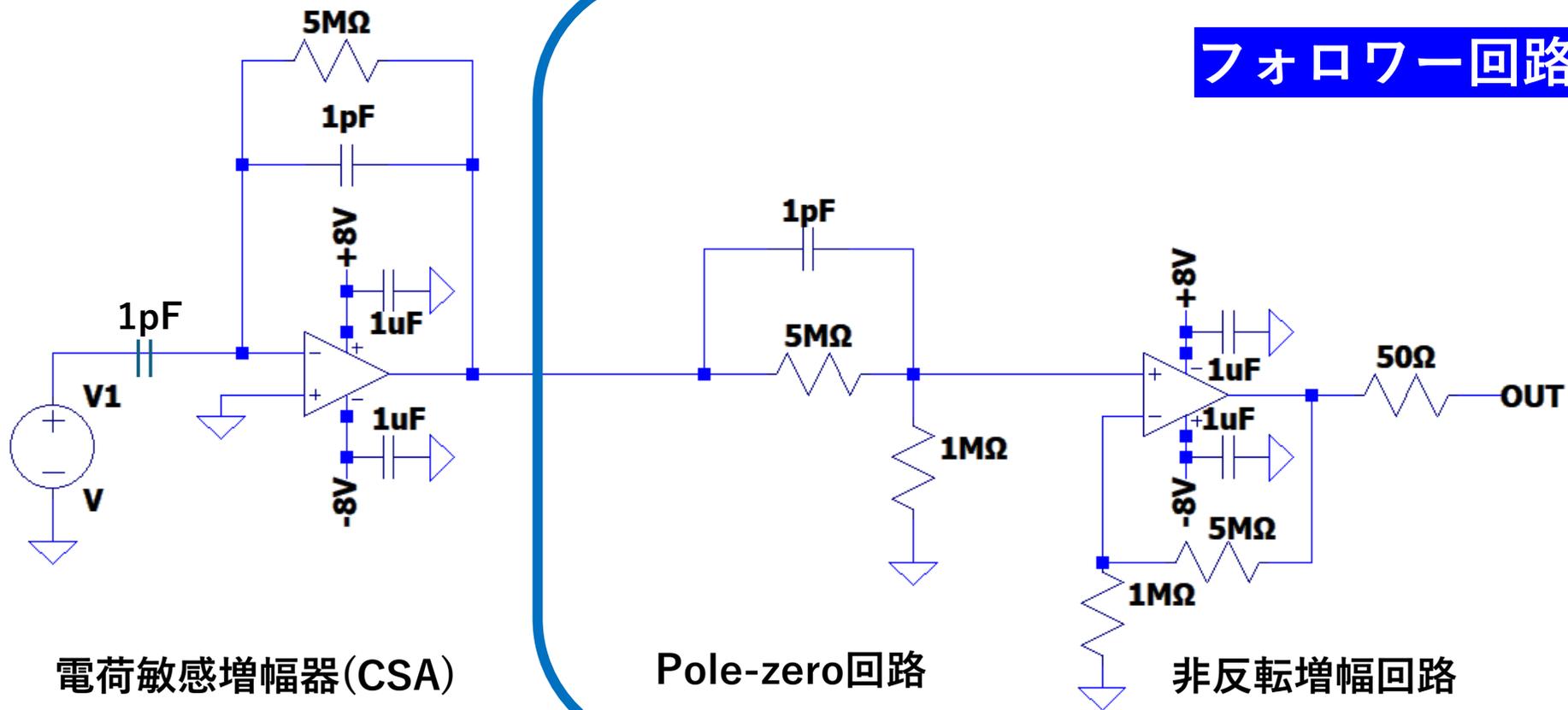
まとめ

- 電荷増幅器の製作
→インピーダンスコントロールに成功し、想定通りの波形が確認できた
- Si chipからの信号読み出し
→オシロスコープで確認できた

今後の課題

- 出力波形が不安定なので電荷増幅器の修復を行う
- また、データ解析の際に信号がノイズに埋もれないようにノイズを軽減する
- 中性子被曝後のSi chipでも同様のセットアップを用いて信号を測定し中性子被曝前のSi chipと比較を行う

Back up

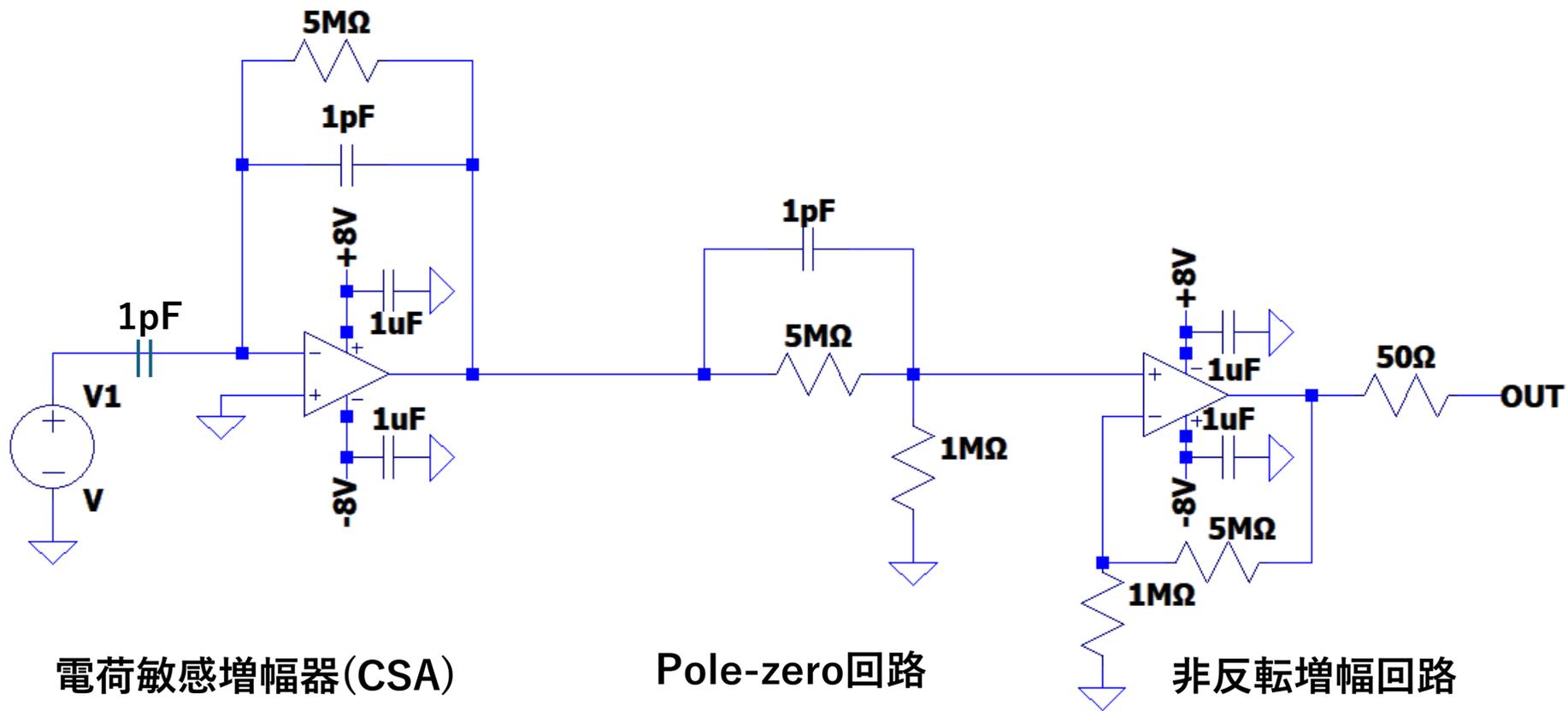


フォロワー回路

電荷敏感増幅器(CSA)

Pole-zero回路

非反転増幅回路



カラーグラス凝縮(CGC)補足

- 衝突後のダイナミクスや早期熱平衡化の有力な候補→荷電粒子と磁場とのフィードバックで生じるプラズマ不安定性。
- 同様の不安定性は CGC 初期条件でも発現する。
- まず衝突軸方向に高強度カラー電磁場(CGC)が形成され、その背景場の効果でラピディティ依存の揺らぎが不安定性を生じ、結果として系の運動量分布を等方的にしCGC、熱化を早めるというものである。

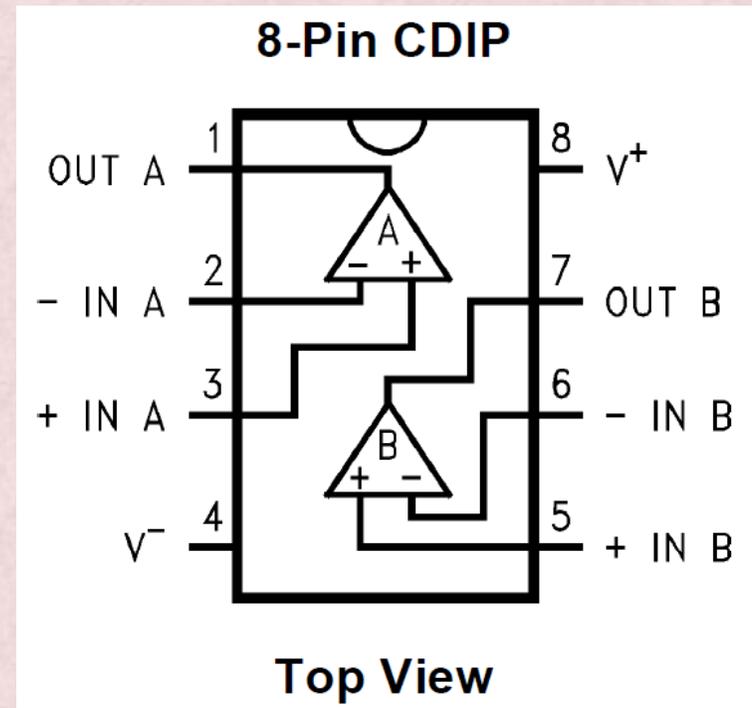
オペアンプ

- 使用したオペアンプはTEXAS INSTRUMENTS社のIm6142
- データシート [LM6142/LM6144 17MHz Rail-to-Rail Input-Output Operational Amplifiers \(jp\)](#)

特長

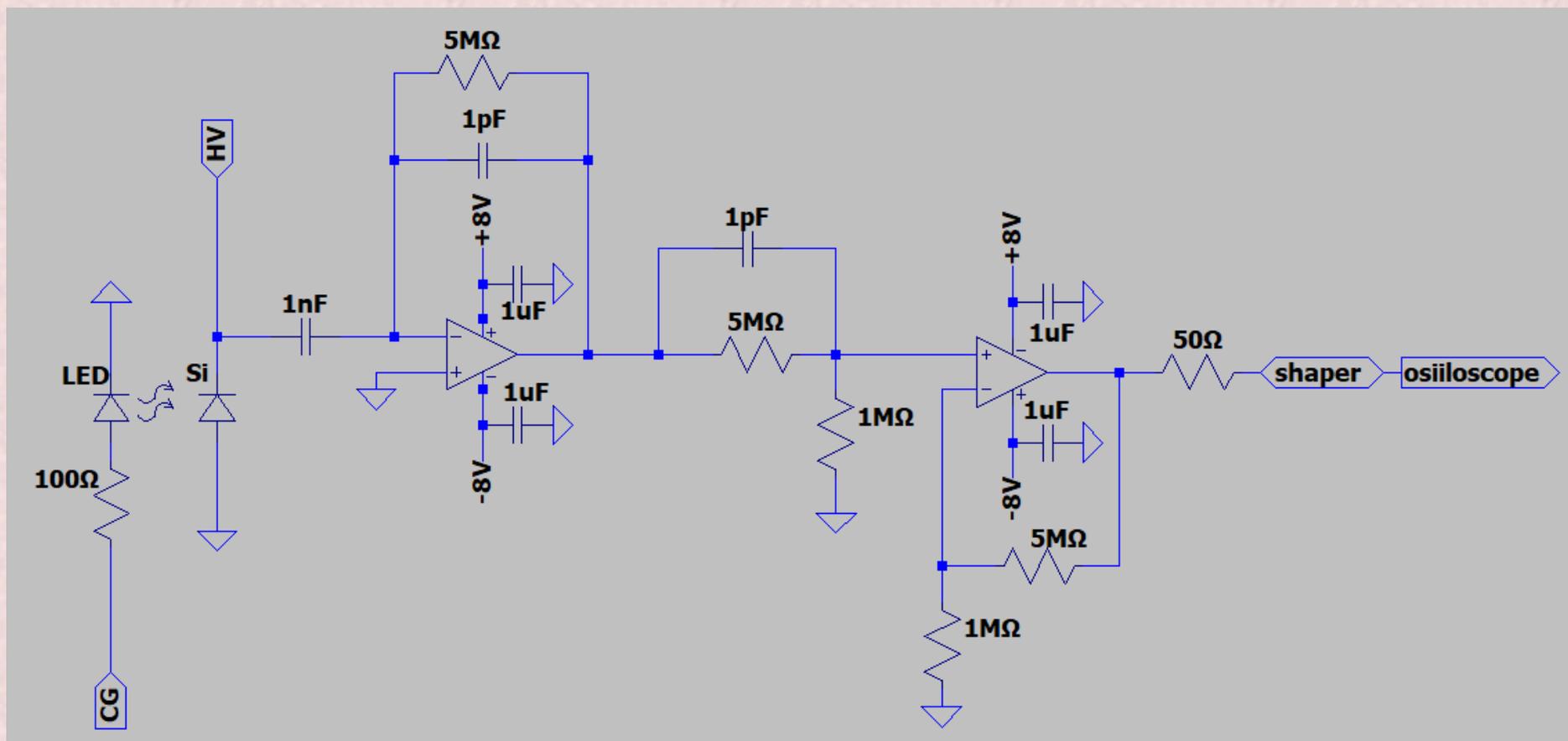
特記のない限り、 $V_S = 5V(\text{Typ})$ にて適用。

- 電源電圧までフルスイングの入力 CMVR $-0.25V \sim +5.25V$
- 電源電圧までフルスイングの出力振幅 $0.005V \sim 4.995V$
- 広利得・帯域幅積 $17\text{MHz}@50\text{kHz}(\text{Typ})$
- スルーレート
小信号 : $5V/\mu s$
大信号 : $30V/\mu s$
- 低消費電流 $650\mu A/\text{アンプ}$
- 広電源電圧範囲 $1.8V \sim 24V$
- CMRR 107dB
- 利得 $108\text{dB}(R_L = 10k)$
- PSRR 87dB



全体の回路図

- セットアップ

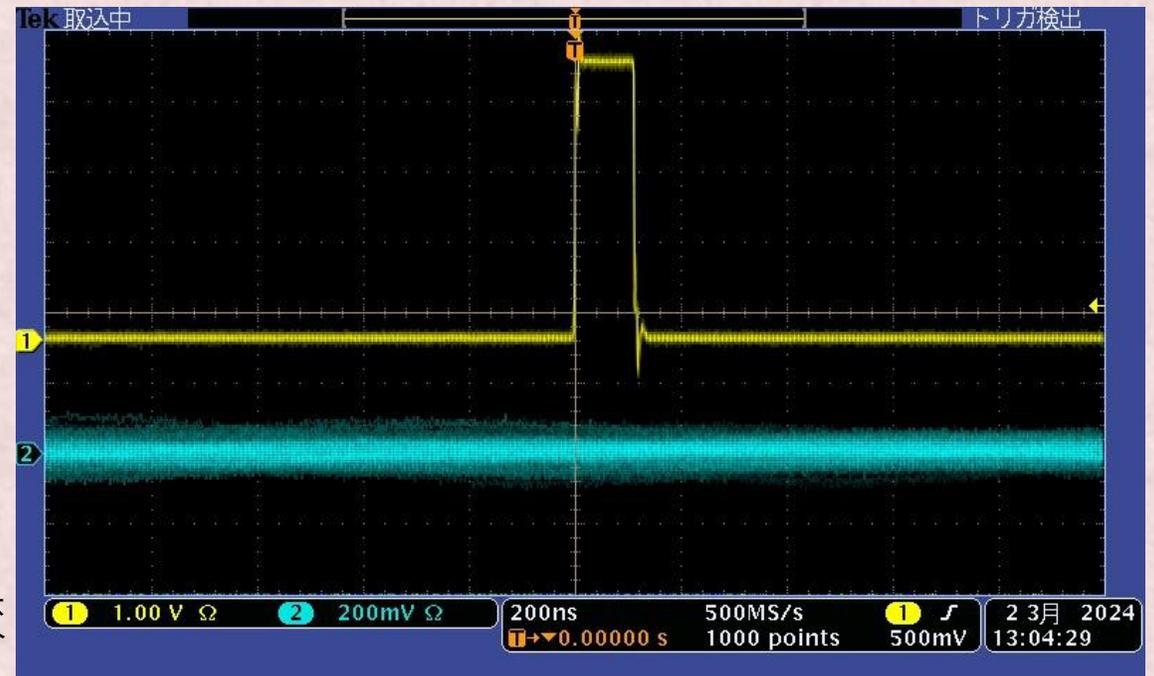


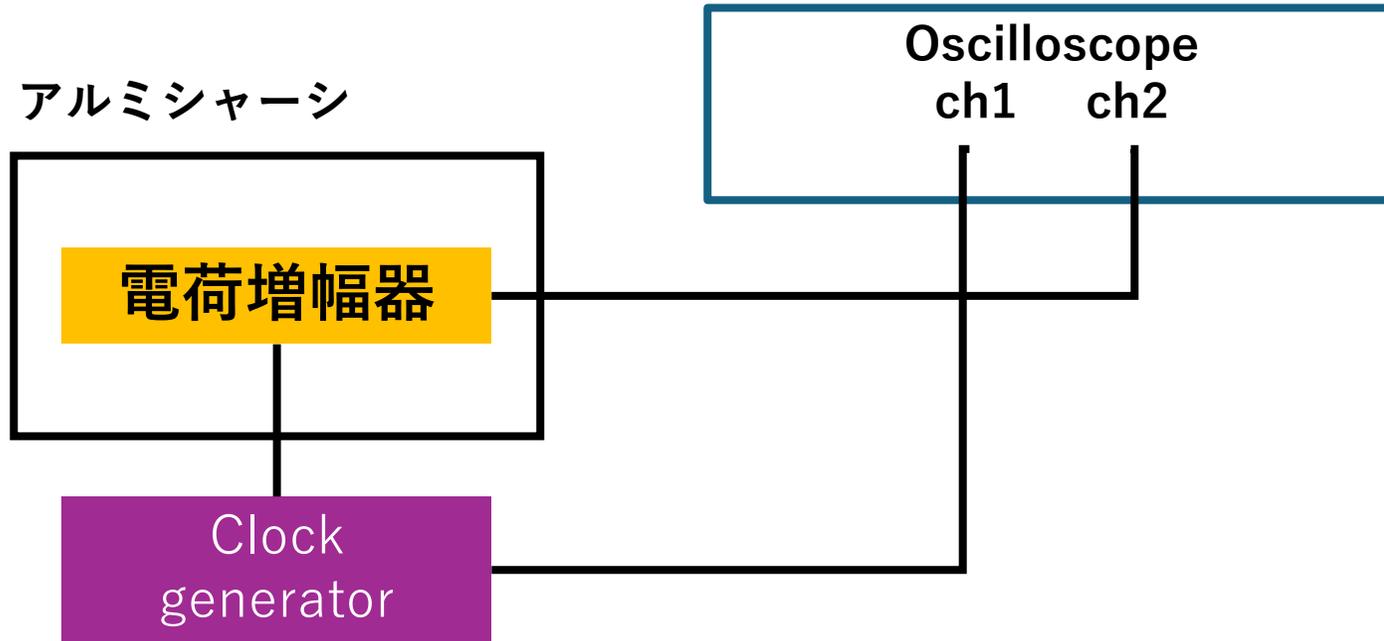
今後の課題

黄色：LEDに入力したTTL信号

水色：Si chip→電荷増幅器からの出力

- 図のように出力波形が不安定なので電荷増幅器の修復を行う
- また、データ解析の際に信号がノイズに埋もれないようにノイズを軽減する
- 中性子被爆後のSi chipでも同様のセットアップを用いて信号を測定し中性子被爆前のSi chipと比較を行う





暗幕

