

LHC-ALICE実験高度化に向け 電磁カロリメータ開発に向けた p型シリコンセンサーの 性能評価と動作確認

2022年度卒論発表 高エネルギー物理学研究室

奈良女子大学 物理学コース

佐々木優花

2023/3/3

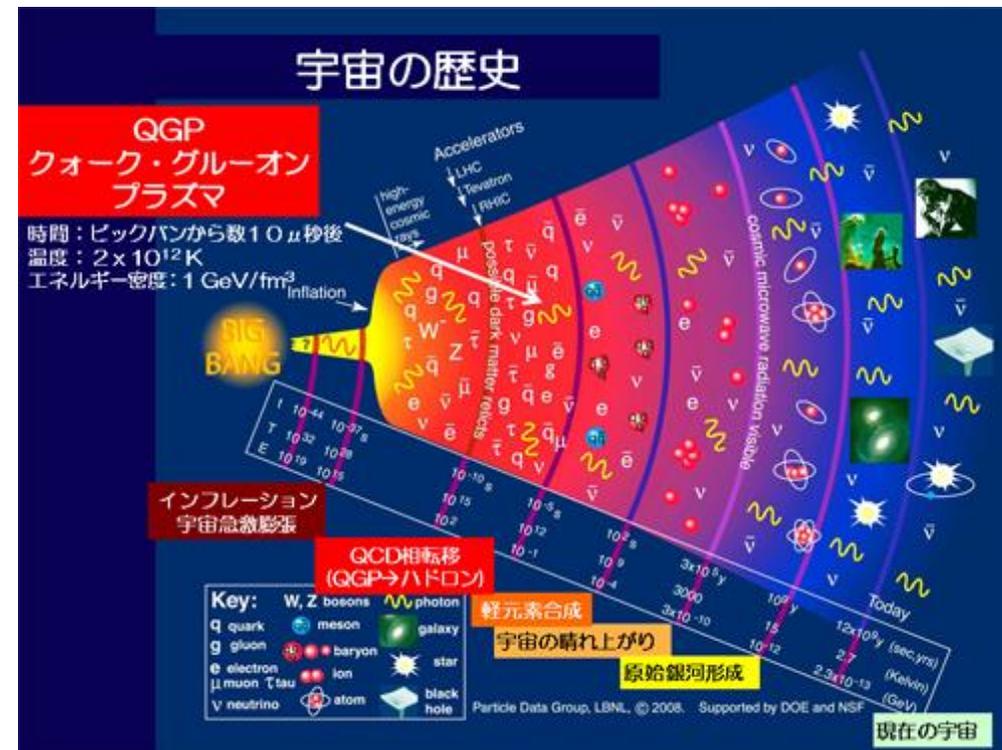
目次

- 研究背景
- 研究目的
- 測定方法
- 結果
- まとめと今後の課題

研究背景

クォーク・グルーオンプラズマ(QGP)

- 宇宙が誕生してから数 10μ 秒後に存在したとされる。
 - 通常、強い相互作用により核子内に閉じ込められているクォークやグルーオン(パートン)が超高温・高密度状態になると解放される状態。
- QGPの解明が宇宙の起源解明に繋がる



LHC-ALICE実験

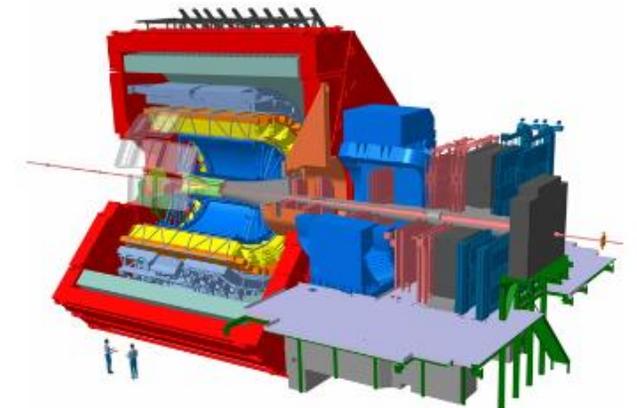
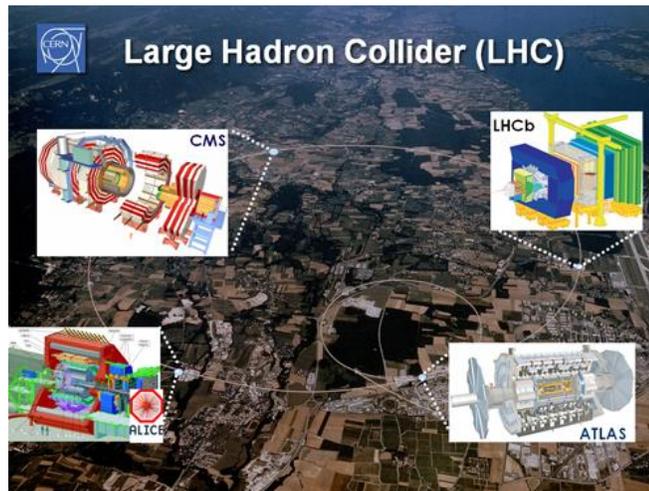
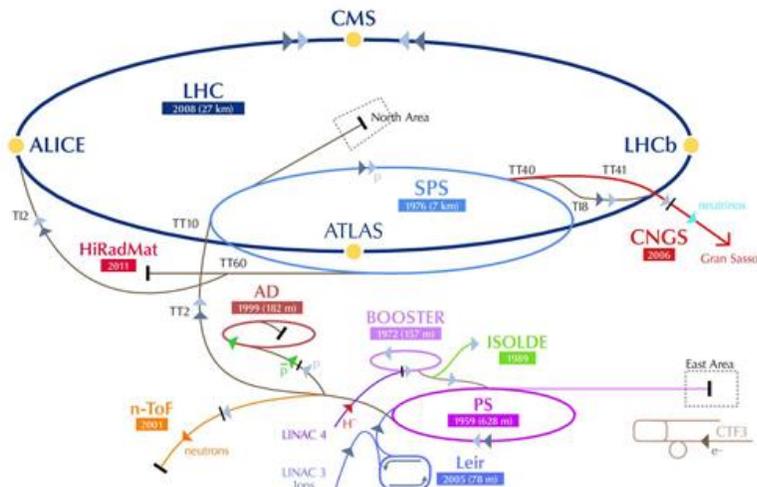
- LHC(Large Hadron Collider)

→欧州原子核研究機構(CERN)により設置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 Experiment)

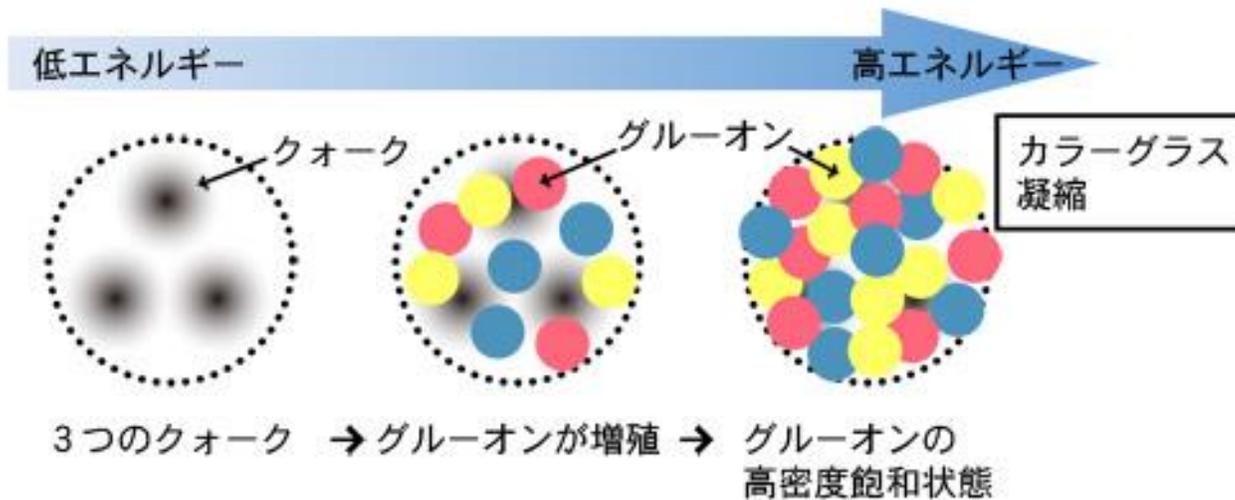
→LHCで行われている実験のうちの1つ

→重イオンを加速し衝突させてQGPを生成し、その性質の解明を目的とする



カラーガラス凝縮 (CGC)

- 陽子・中性子はクォーク3つで構成され、そのクォークはグルーオンの強い相互作用によりハドロン内に閉じ込められている。
- 高エネルギー状態でグルーオンが増殖し、高密度で飽和状態になる
- QGPを生成するための衝突直前の状態として提唱されている。

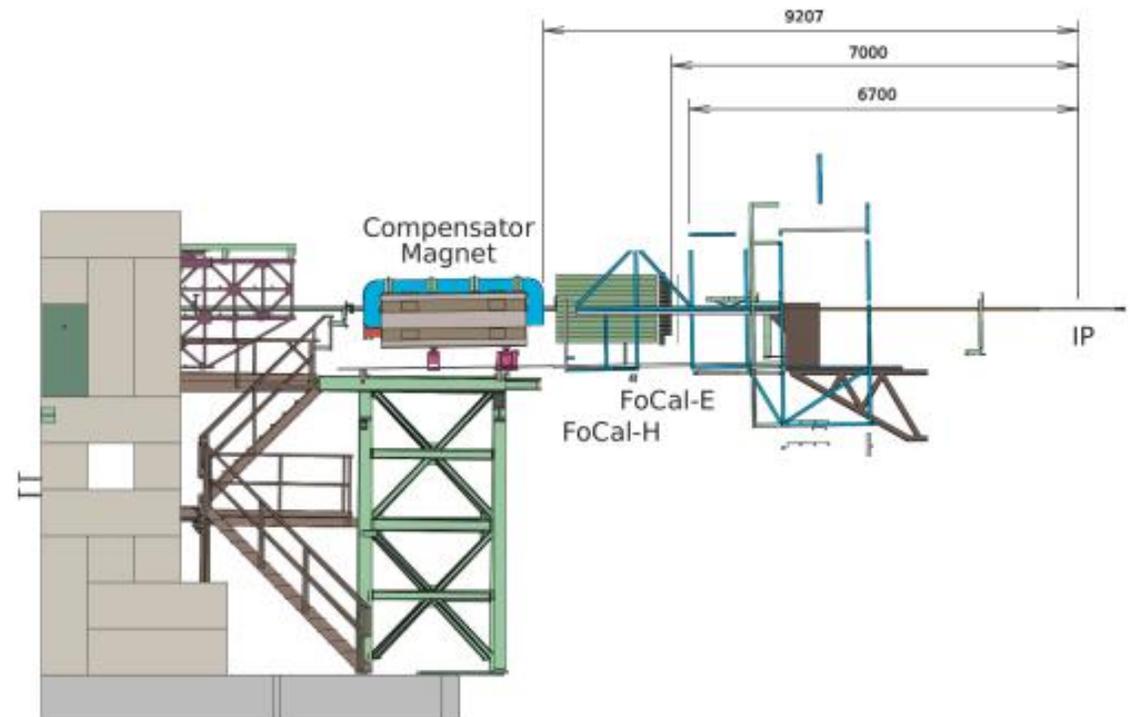


引用：LHC実験でビッグバンが見えたのか？

<https://www2.kek.jp/ja/news/highlights/2010/CGC.html>

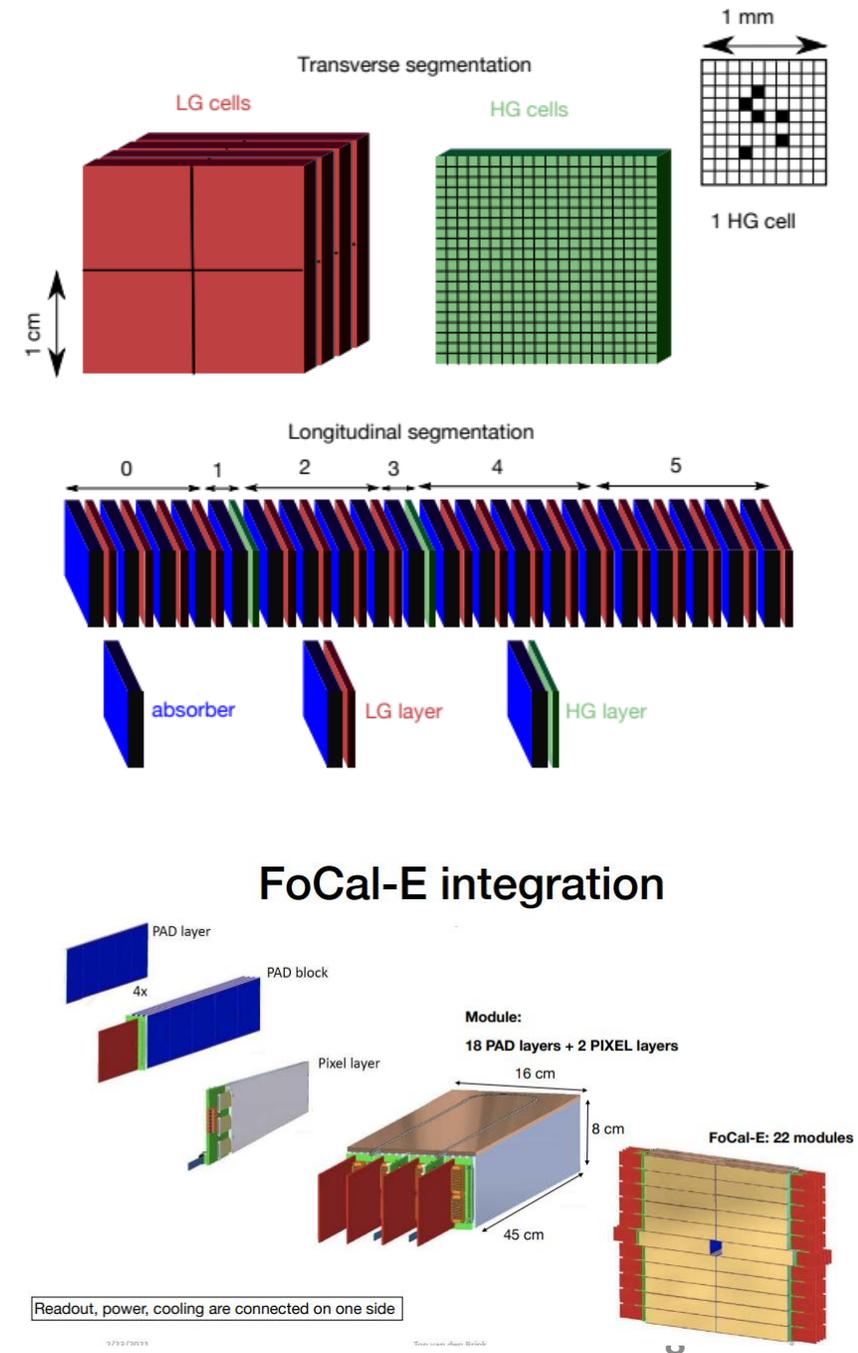
FoCal(Forward Calorimeter)

- 衝突直前の状態にあるとされる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
- CGCについて解明するためLHC-ALICE実験に導入する計画が立てられている。
- 光子のエネルギーを測定するためのFoCal-Eとハドロンのエネルギーを測定するためのFoCal-Hで構成される。



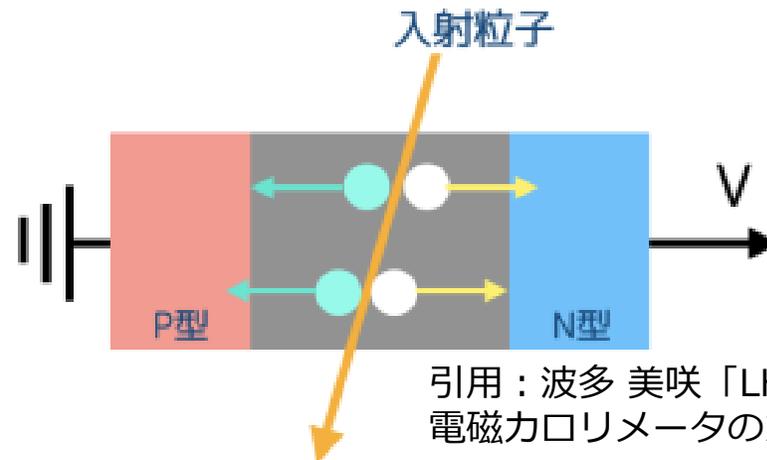
FoCal-Eの構造

- 検出層と吸収層が20層ずつ並べられる。
- 検出層(Si)は高い位置分解能を持つHGLとエネルギー測定を行うLGL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エネルギーを落としやすくする
- LGLは1cm×1cmのSiセンサーを8×9個 (Single PADと呼んでいる)並べそれを5枚並べることで1層を構成する。
- 日本では筑波大学、奈良女子大学などがFoCal-E LGLの開発を進めている。



PN接合

- p型半導体とn型半導体を1つの半導体に接合したもの
- 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と電子が出てきて電子はn型、ホールはp型に引き寄せられる。
- 両端の電極にそれらが到達するとパルスが発生→入射粒子の損失エネルギーに対応
- 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。



←半導体検出器の仕組み

引用：波多 美咲「LHC-ALICE実験の高度化に向けた シリコン電磁カロリメータのための シリコンセンサーの性能評価」

FoCalで用いられる半導体検出器について

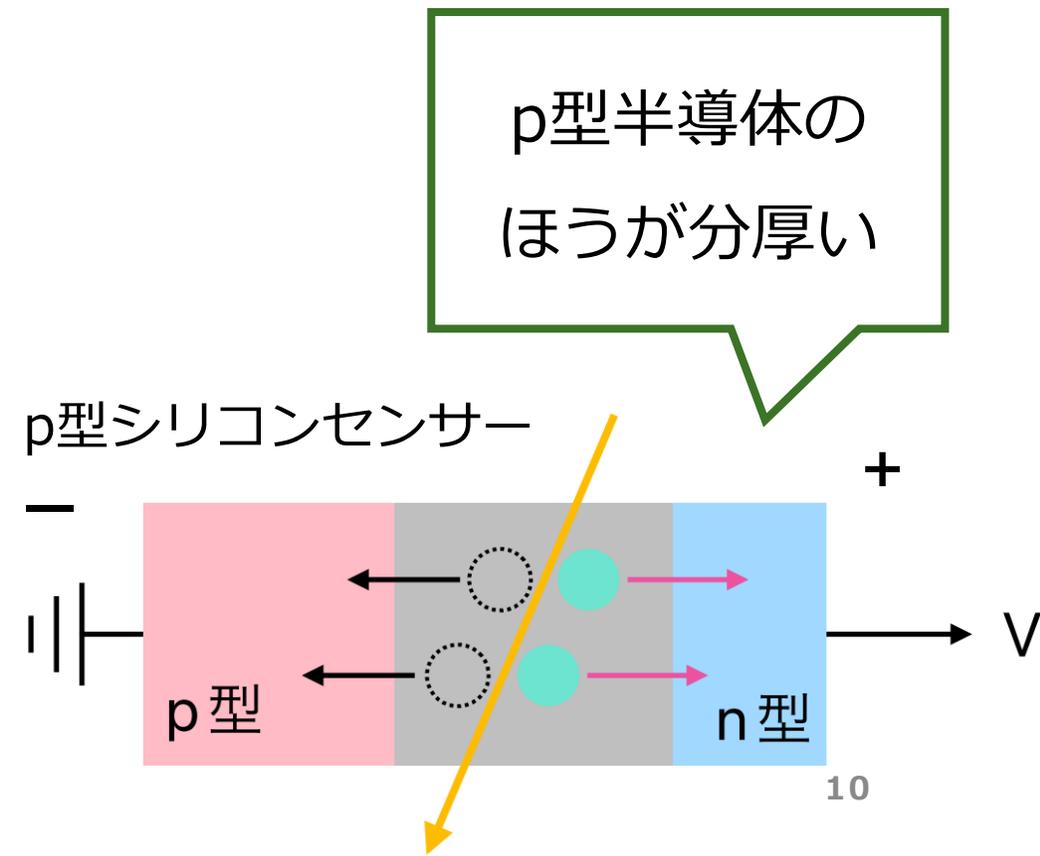
放射線耐性が高いp型センサーを使用

先行研究より…

- p型とn型センサーに同じ電圧をかけるとp型のほうが電流値が高い。
- 光子を入射する測定では印加電圧依存性からp型のほうが収集電荷量が高い。

→ p型センサーについて

中性子照射前後で調べる



研究目的

目的

- FoCal検出器で用いられるp型Si chipについて性能評価を行う。
 - Si chip本体の温度依存性
 - 中性子を照射する前後でのI-V特性を比較
(照射前について先行研究を用いる)
 - 中性子を照射する前後でのLEDを照射したときの比較

測定内容

1. Si chip本体の温度依存性によるI-V特性

実際の測定でHGCRROCという読み出しシステムによる熱の影響を受けSi chipの周辺温度が変化(先行研究より約50℃まで上昇)

→Si chipの周辺温度を50℃で一定に保ち、Si chip本体の温度を考慮するため測定

2. 中性子照射前後のI-V特性について

実際の測定で印加電圧を行う、衝突直後放射線がSiセンサー照射される可能性

→流れる電流について中性子照射前後での違いを比較

3. LED照射について

→直接光子測定のためにSi chip使用される

→中性子照射前後で反応の違い

→光の強度での違い

→印加する電圧の違い

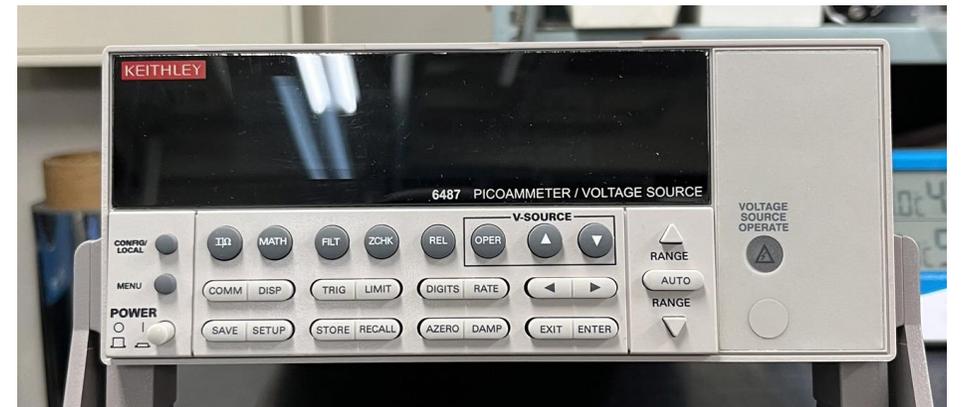
測定方法

I-V特性について

(1)温度依存性、(2)中性子照射前後

I-V特性 - 使用した装置

- 恒温槽
 - 設定温度：-25~95℃
- ピコアンメータ/電圧源
 - 最大電圧値：500V

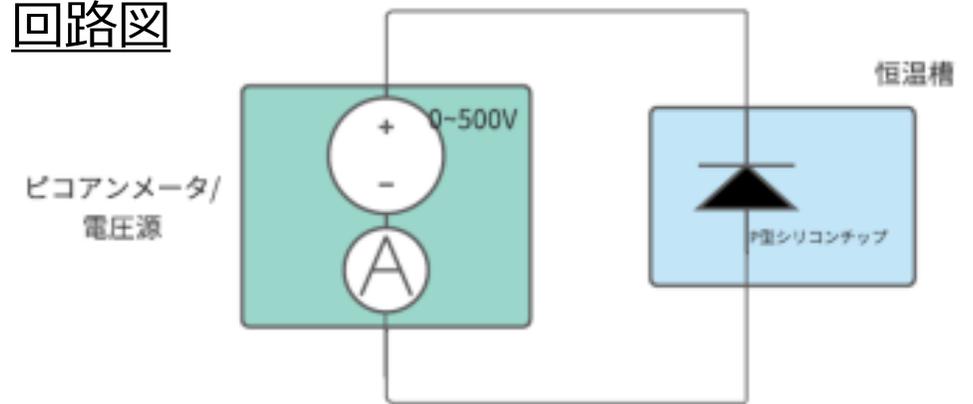


I-V特性 - セットアップ

- 恒温槽で周辺温度を一定に保ち、ピコアンメータでp型シリコンチップに電圧を逆向きに印加して測定。
 - 恒温槽
 - 常に50℃一定で設定
(1, 2℃設定温度とずれが生じるため別の温度計も使用)
 - ピコアンメータ/電圧源
 - 0~500Vまで測定可能
→5V刻みで10回ずつ測定

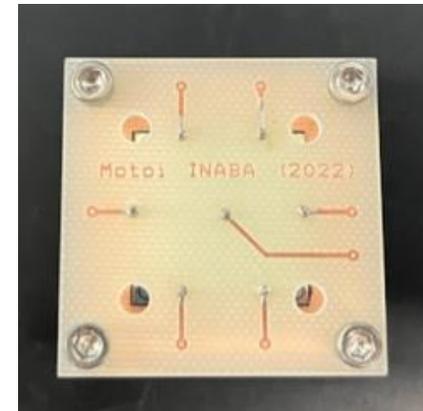
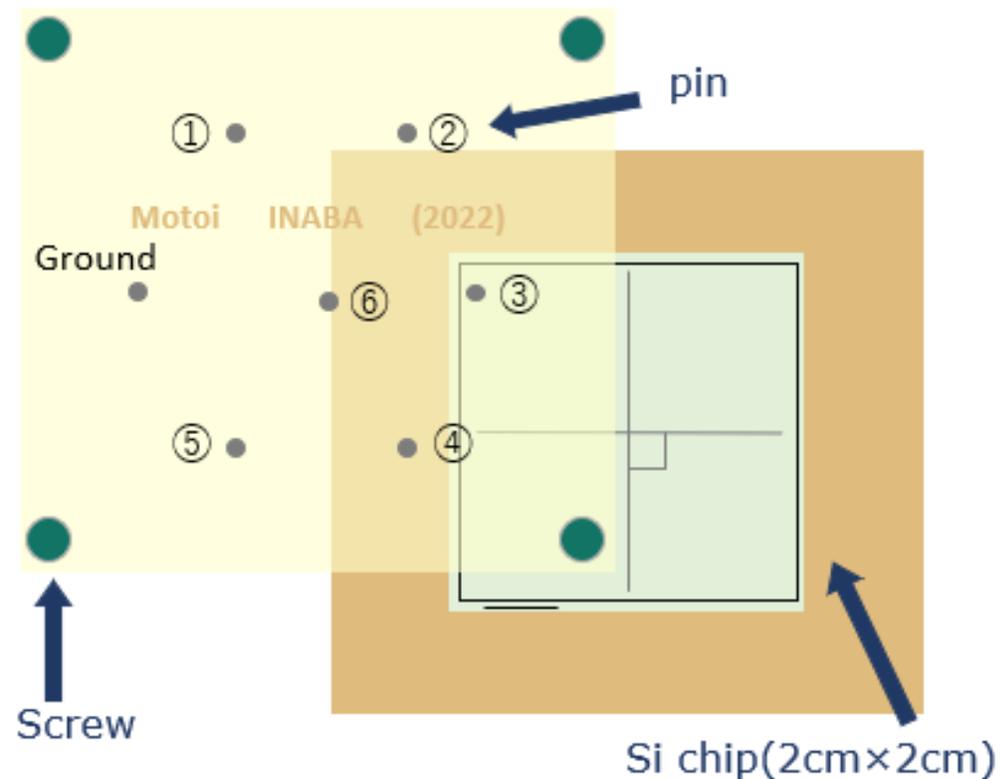
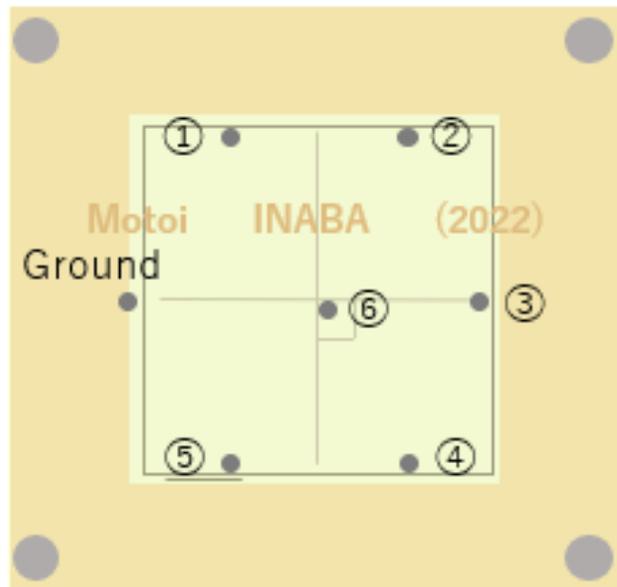


回路図



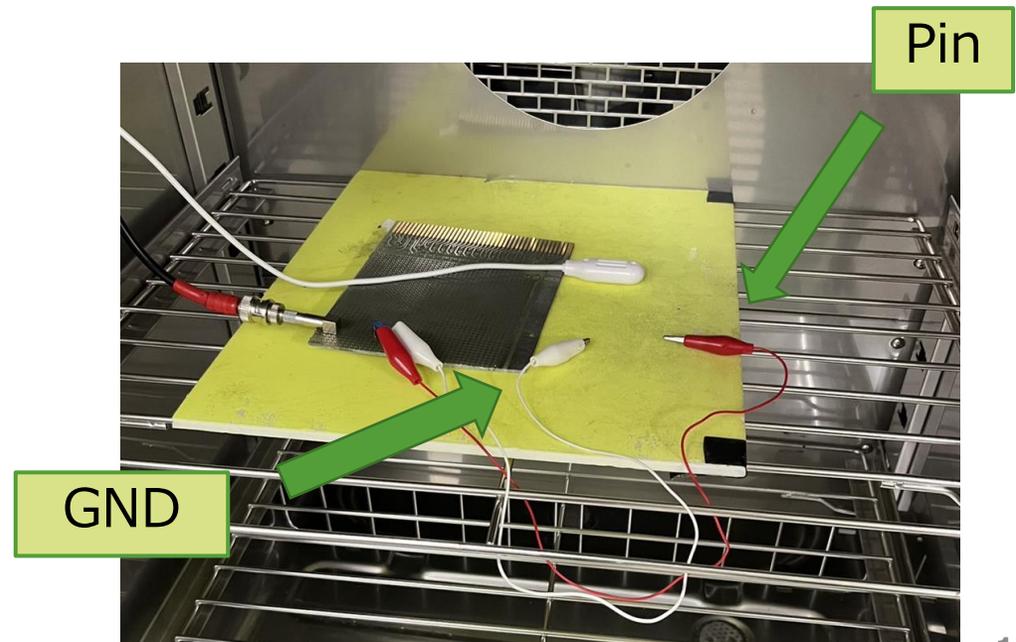
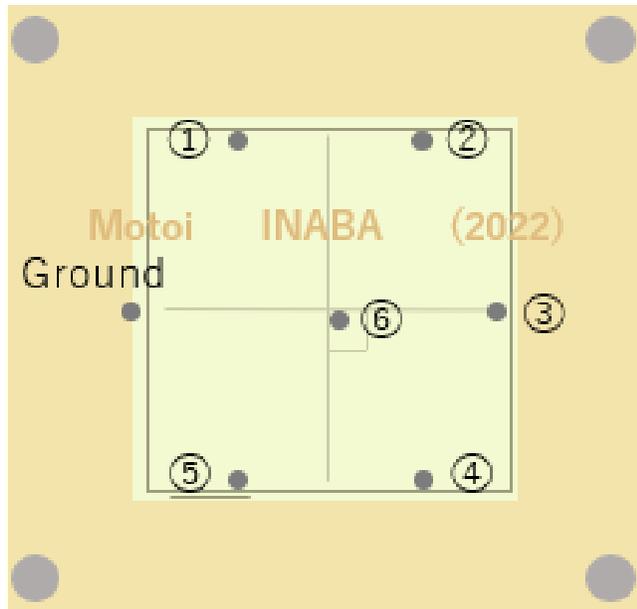
I-V特性 – 使用したSi chip

- 2cm×2cmのSi chip使用(中性子照射後)
 - ピンが7本ついた治具にセットされており1つはGND、残りの6つはSi chipにつながっている。



I-V特性 – 使用したSi chip

- 2cm×2cmのSi chip使用(中性子照射後)
 - 恒温槽の中にピコアンメータにつながったグリップが2つあるので片方をGND,もう片方をピン①~⑥につなげて測定。



測定方法

I-V特性について

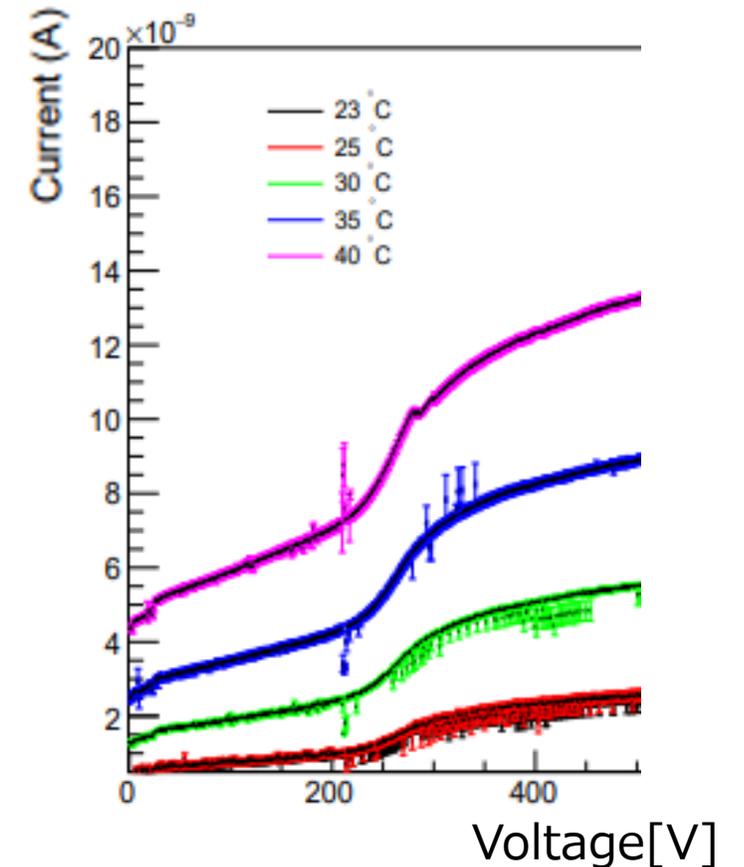
(1)温度依存性

I-V特性 - 温度依存性

- 恒温槽
常に50℃で設定
- 別の温度計が安定してからの経過時間
0,5…分と5分刻みで待ってから測定を行う

先行研究の結果(中性子照射前、温度依存性)
周辺の温度が上昇するにつれ電流値が上昇する

p型、中性子照射前



引用：榎本真隆

「LHC-ALICE実験 超前方領域光子測定用電磁カロリメータ開発に向けたP型シリコンセンサの性能評価」

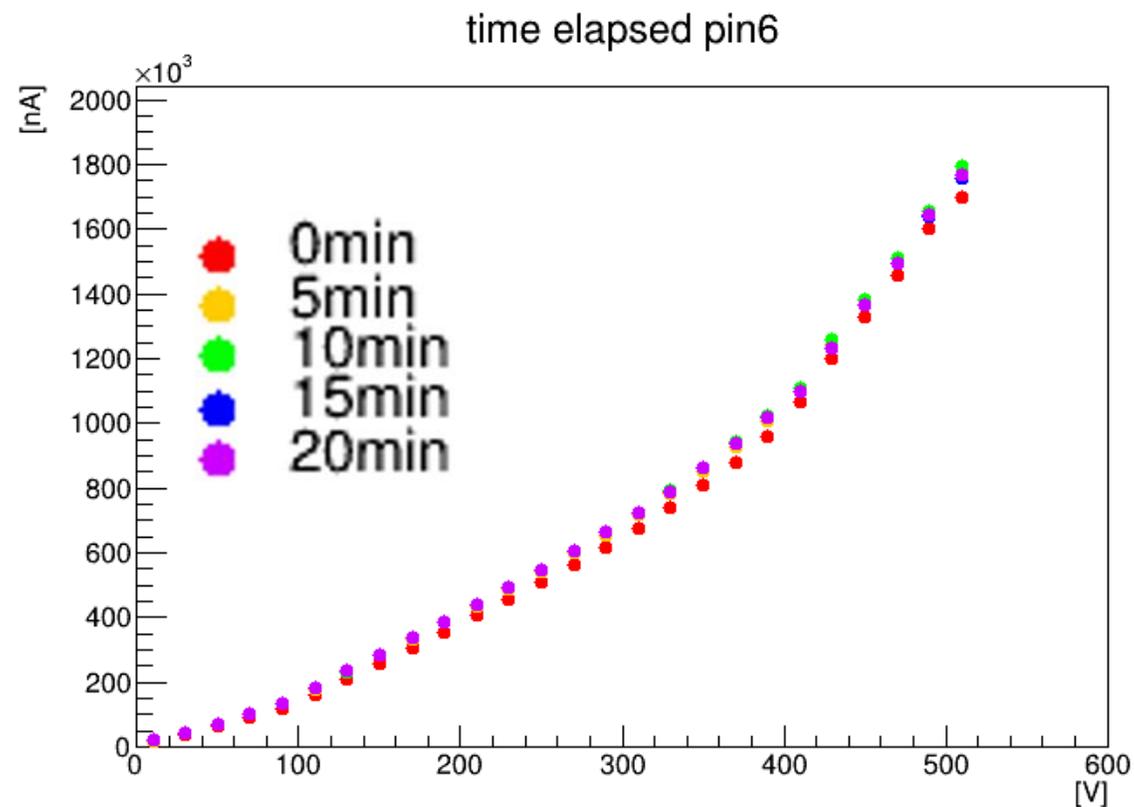
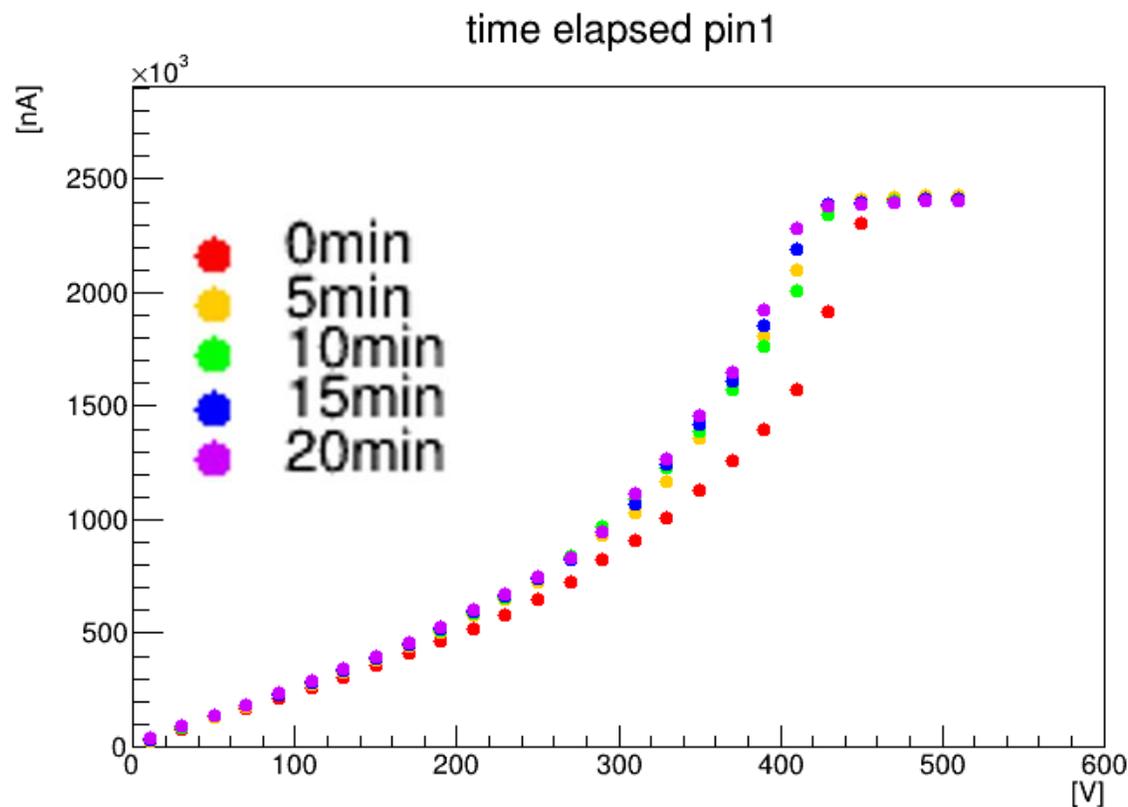
測定結果

I-V特性について

1. I-V特性 - 温度依存性

縦軸：電流値[nA]

横軸：電圧値[V]



- 最低でも10分待てばSi chip本体の温度が安定する。
- pin1から続けて測定、温度変化は測定開始から一番最初に測定したpinでのみ見ることができる。

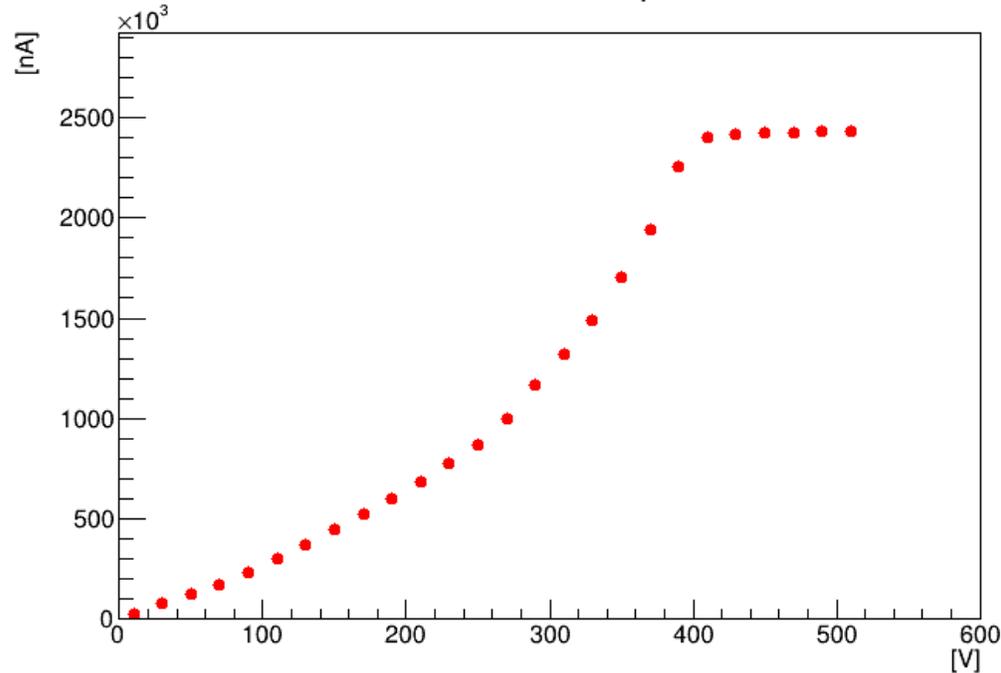
2. I-V特性 – 中性子照射前後

縦軸：電流値[nA]

横軸：電圧値[V]

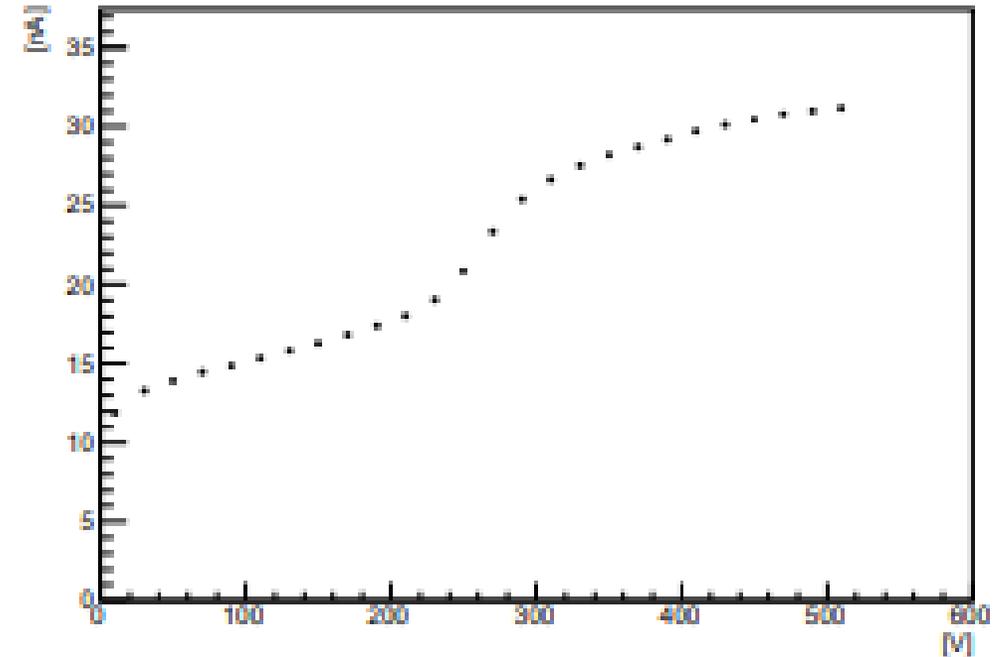
中性子を当てた後のI-V特性

I-V 2022/05/20 pin1



中性子を当てる前のI-V特性

I-V 19T1_2



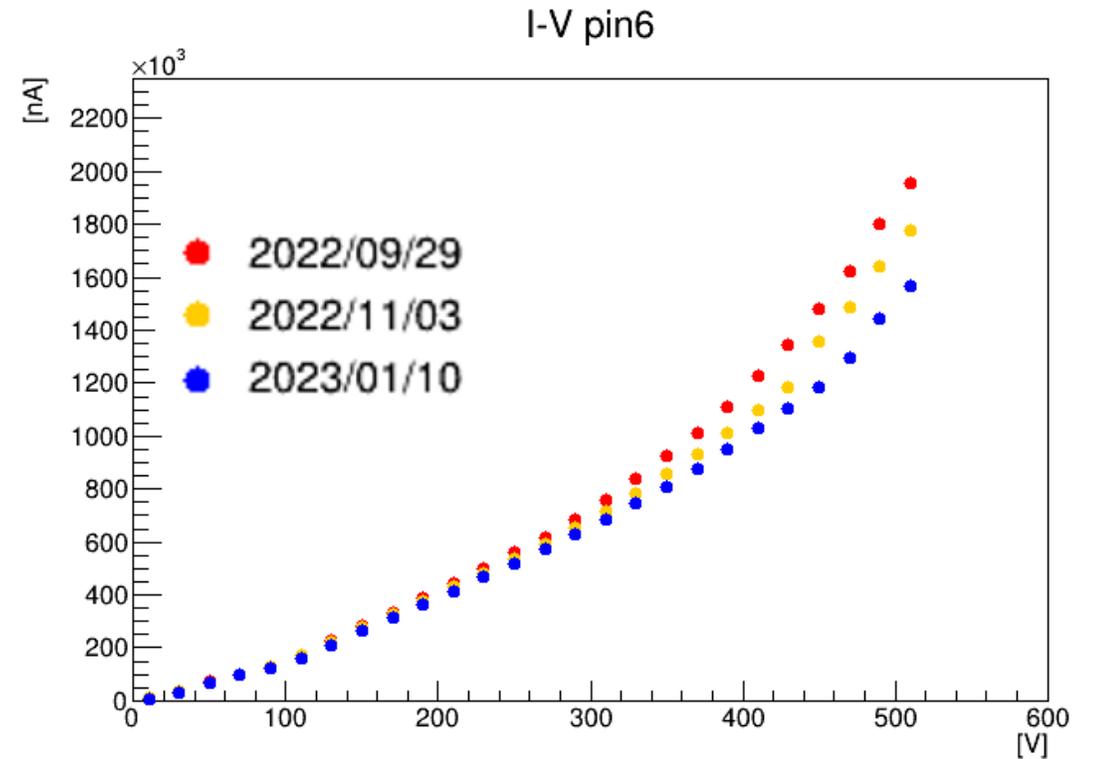
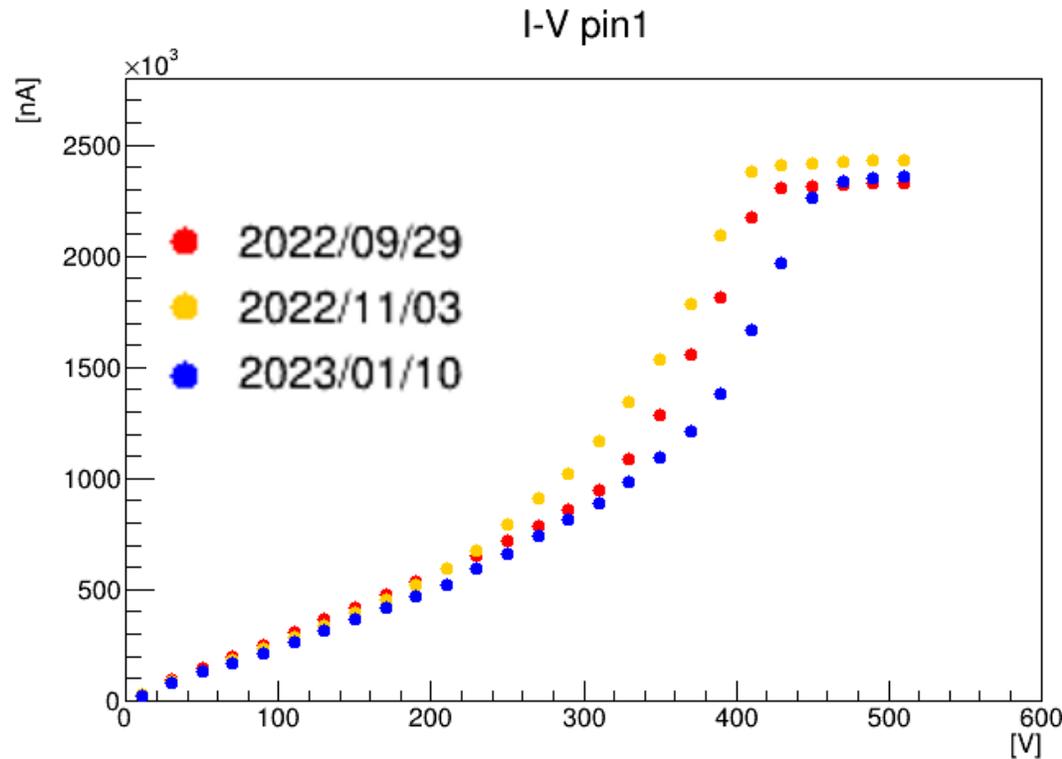
- 先行研究から中性子照射前後で約 10^5 倍ほど電流値が違う。
- ピコアンメータは2.5mAまでしか測定できない。

引用：波多 美咲「LHC-ALICE実験の高度化に向けたシリコン電磁カロリメータのためのシリコンセンサーの性能評価」

2. I-V特性 – 中性子照射後

縦軸：電流値[nA]

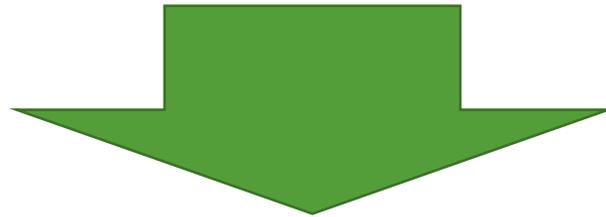
横軸：電圧値[V]



- 全体的に日数が経過するにつれ電流値が減少している。
- 印加電圧が高い場所では自己発熱の影響で電流値が上昇するときがある。

2. I-V特性 – 自己発熱

- 先行研究よりSi chipに高い電圧をかけると自己発熱により、Si chip本体の温度が上昇する
- 印加電圧について150Vまでは自己発熱による影響がない

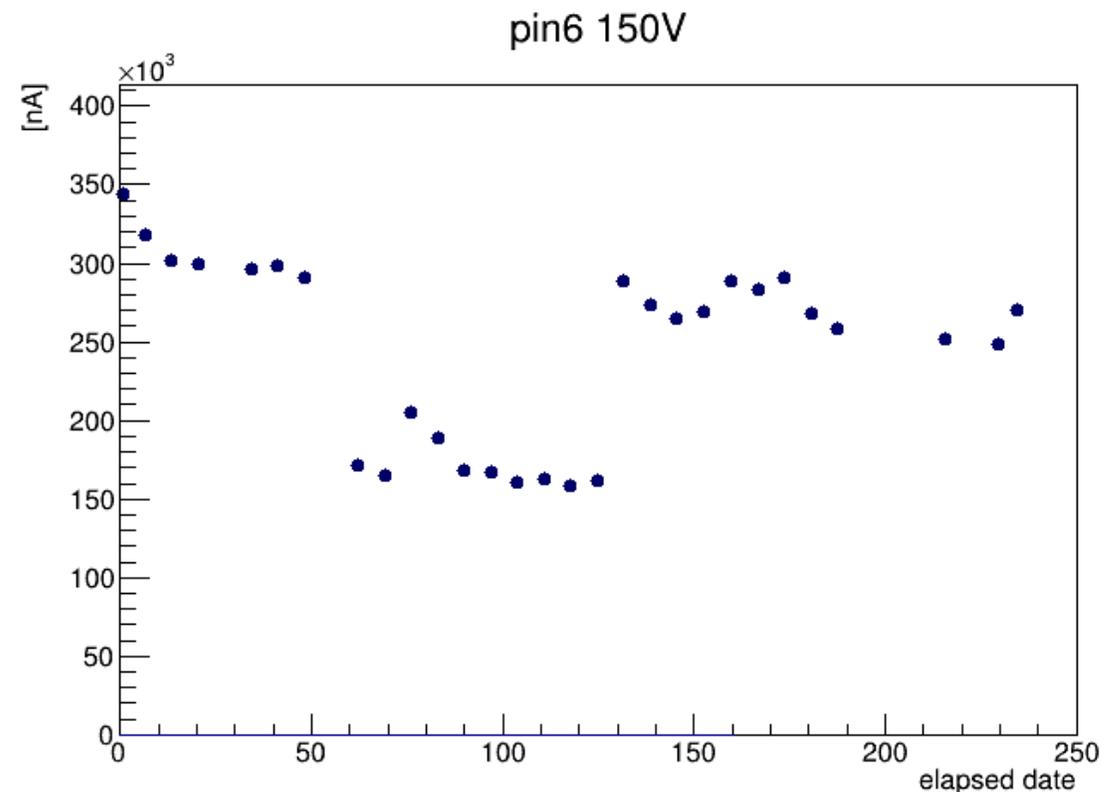
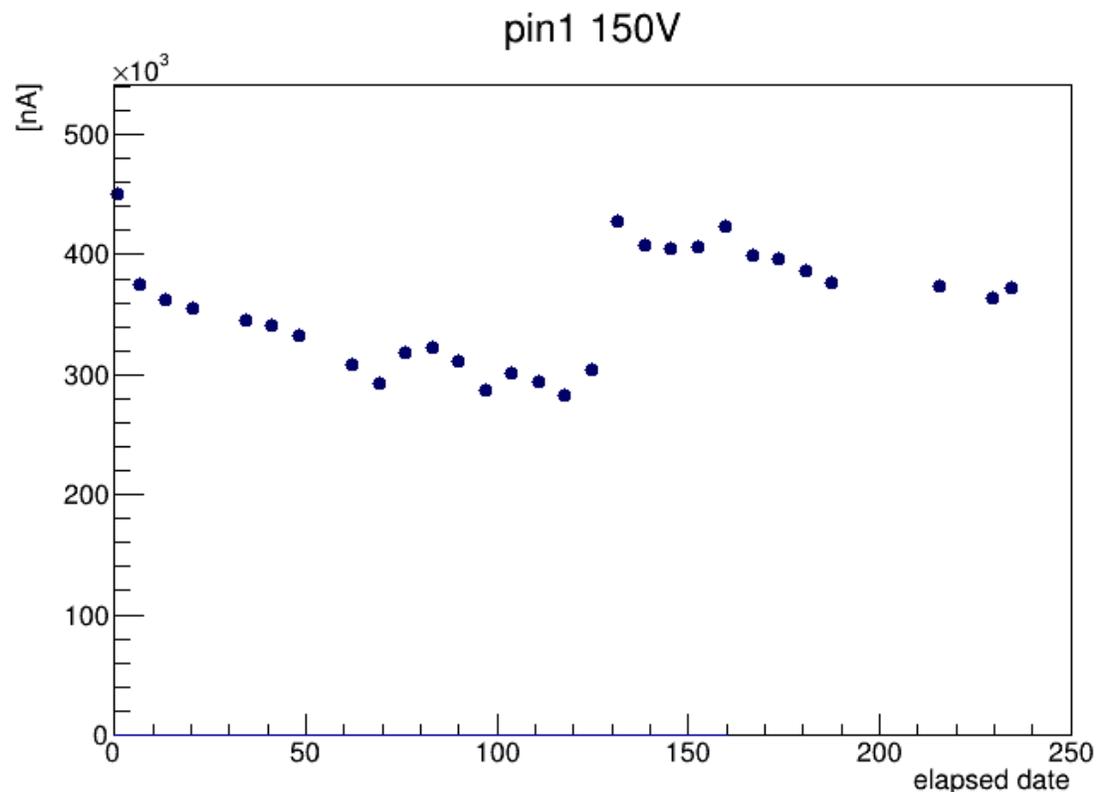


電圧が150Vのときでの経過日数について比較

2. I-V特性 - 自己発熱

縦軸：電流値[nA]

横軸：経過日数



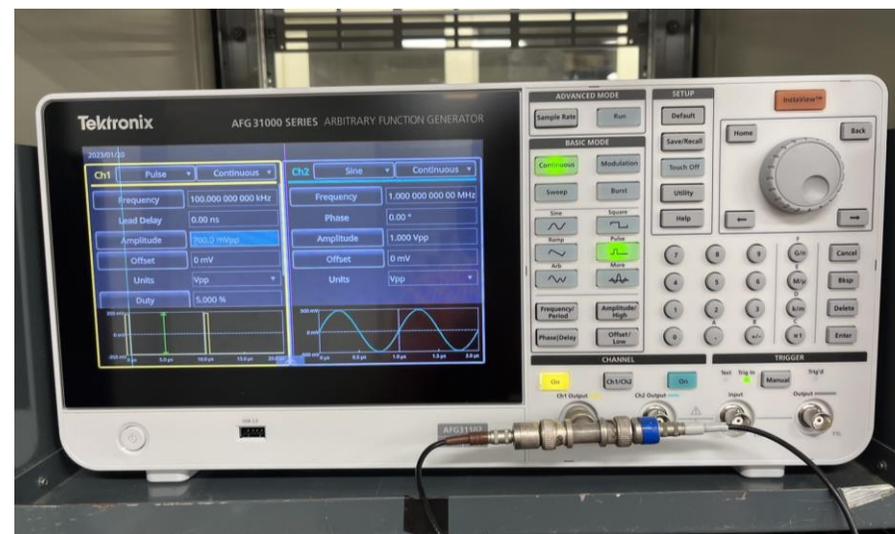
- すべてのpinで安定して電流値が減少している
- 今はすべてのpinで安定している。
- 130日前後で急に上昇
→Si chip本体の温度依存性について考慮したため結果として上昇

測定方法

(3)LED照射について

LED照射 – 使用した装置

- Function Generator
 - LEDの光強度を設定
500mV~10Vまで設定
- 電圧設定装置
 - Si chipに印加する電圧設定
0~500Vまで設定



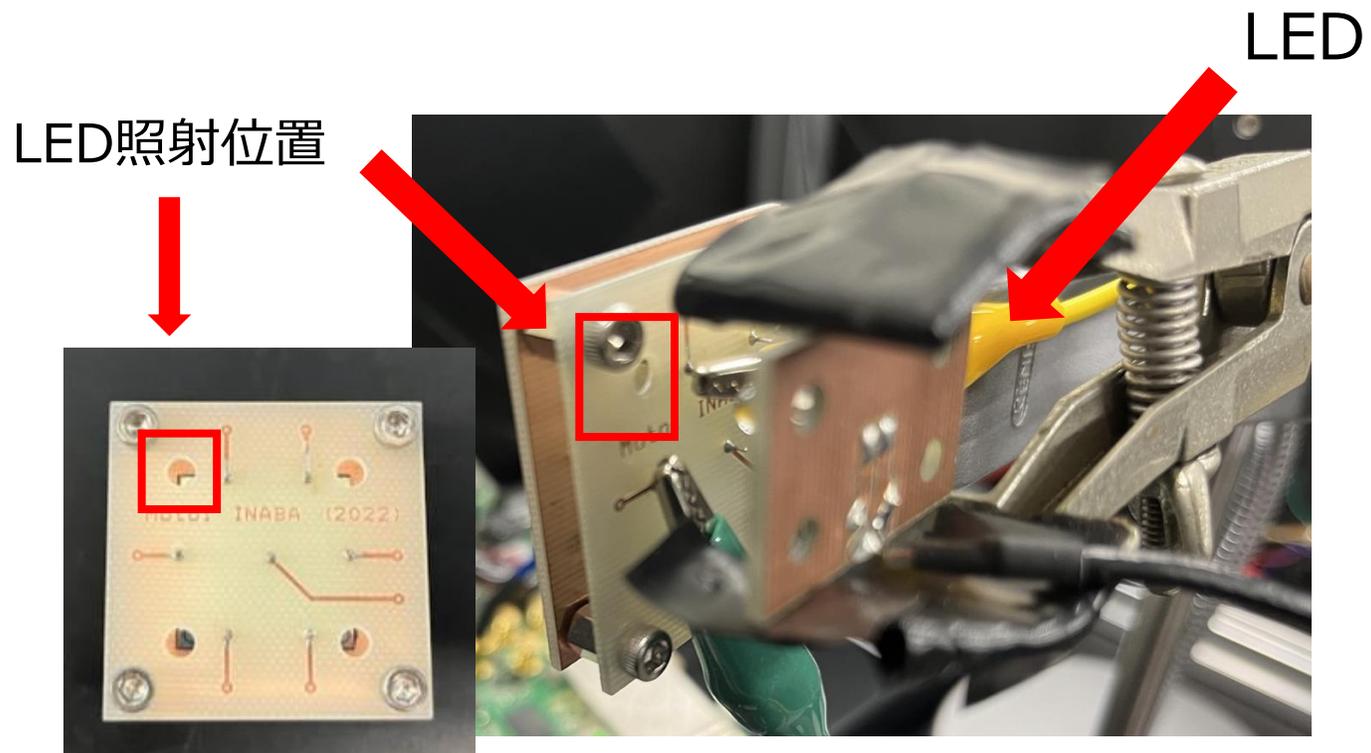
LED照射 – 使用したSi chip

- 中性子照射前(写真なし)

1cm×1cmのSi chip

- 中性子照射後

2cm×2cmのSi chip

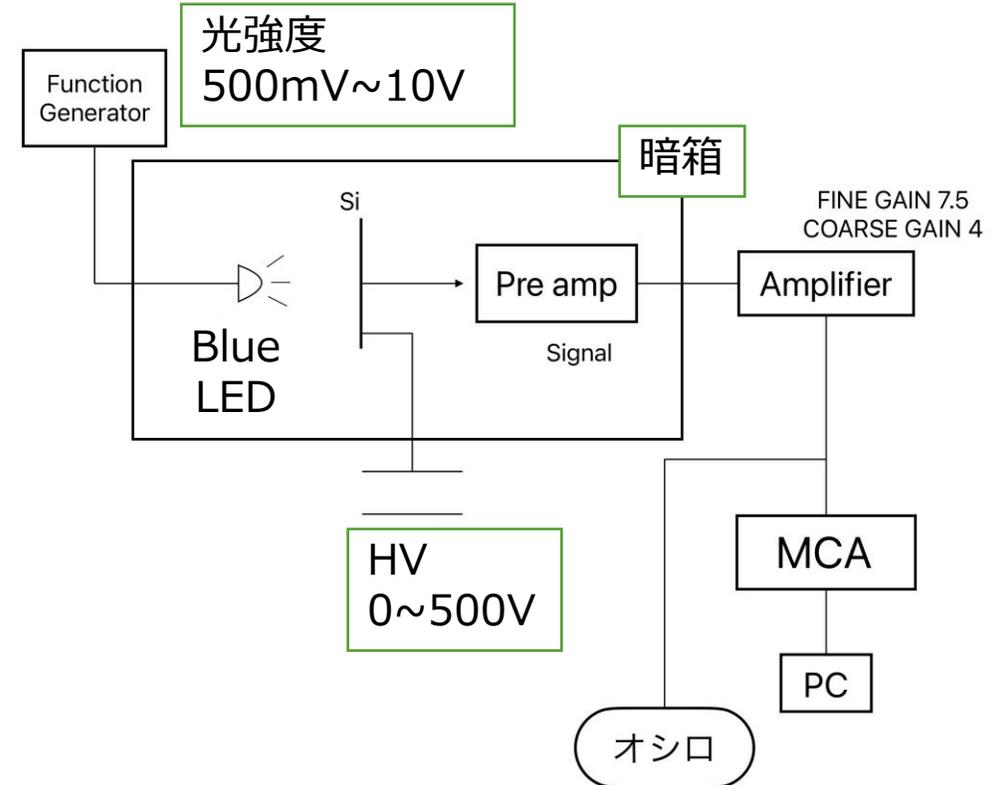


LEDの照射位置はグリップをつなげたpinにつながっているSi chipに照射するようにセットしている。

Si chip – LED照射 セットアップ

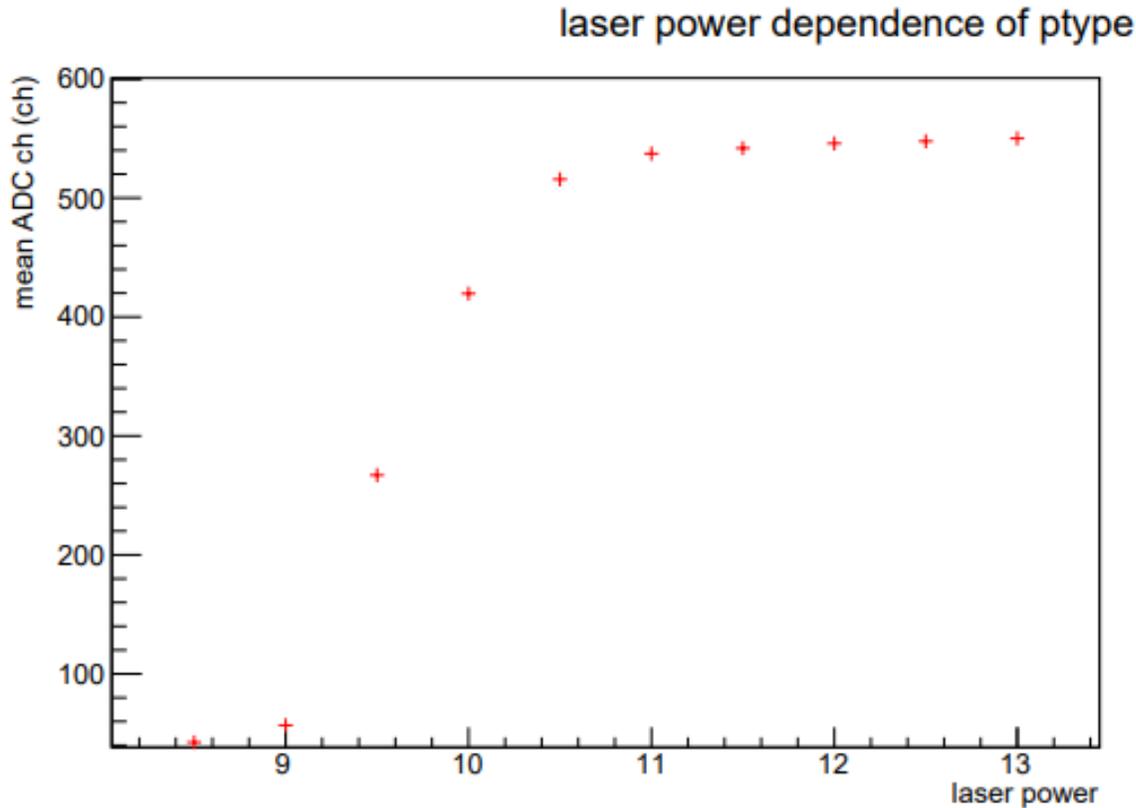
- Si chip照射には青LEDを使用
- 測定で用いたパラメータ
光強度→500mV~10V
HV→0~500V
- 測定時間は1分間
- LEDを1分間照射し続けMCAから出力される収集電荷量に対応したADC値を測定

回路図



LED照射 – 先行研究 – 光強度依存性

レーザーを用いたp型Siセンサー測定



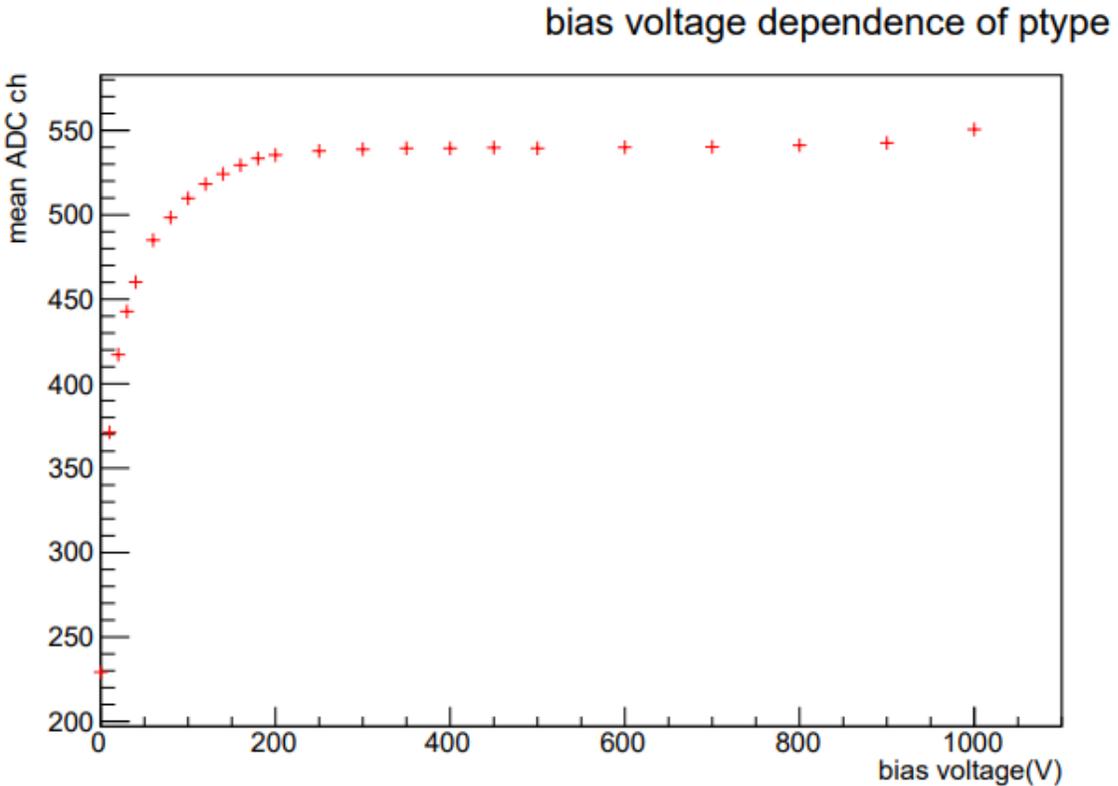
レーザーを用いた場合について
先行研究から光強度がある一定の
9.0~10.5でのみ線形性が見られる

引用：麻谷有輝

「LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ開発
に向けた p 型シリコンセンサーの動的特性の測定」

LED照射 – 先行研究 – 印加電圧依存性

レーザーを用いたp型Siセンサー測定



印加電圧が200V以降、
収集電荷量が一定になる。

引用：麻谷有輝

「LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ開発
に向けた p 型シリコンセンサーの動的特性の測定」

測定結果

(3)LED照射について

測定結果

(3)LED照射について

中性子照射後

LED照射 - 中性子照射後

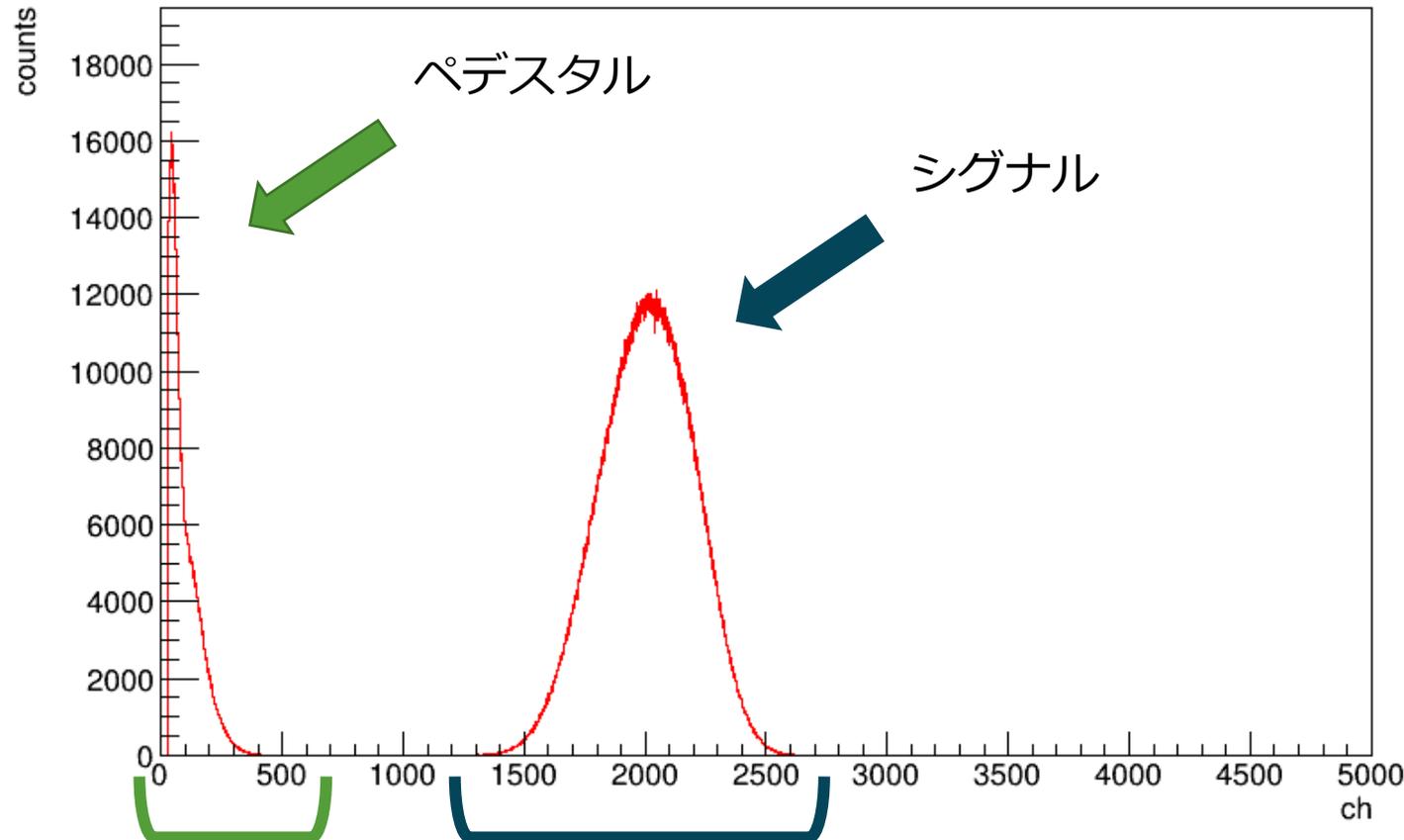
印加電圧：100V

光量：9V

縦軸：count数

横軸：channel

HV_100V, amplitude_9V



横軸は照射して収集される電荷量に対応したADC値がchannelで表される。

今回は、使用したパラメータのときの収集電荷量を知りたい

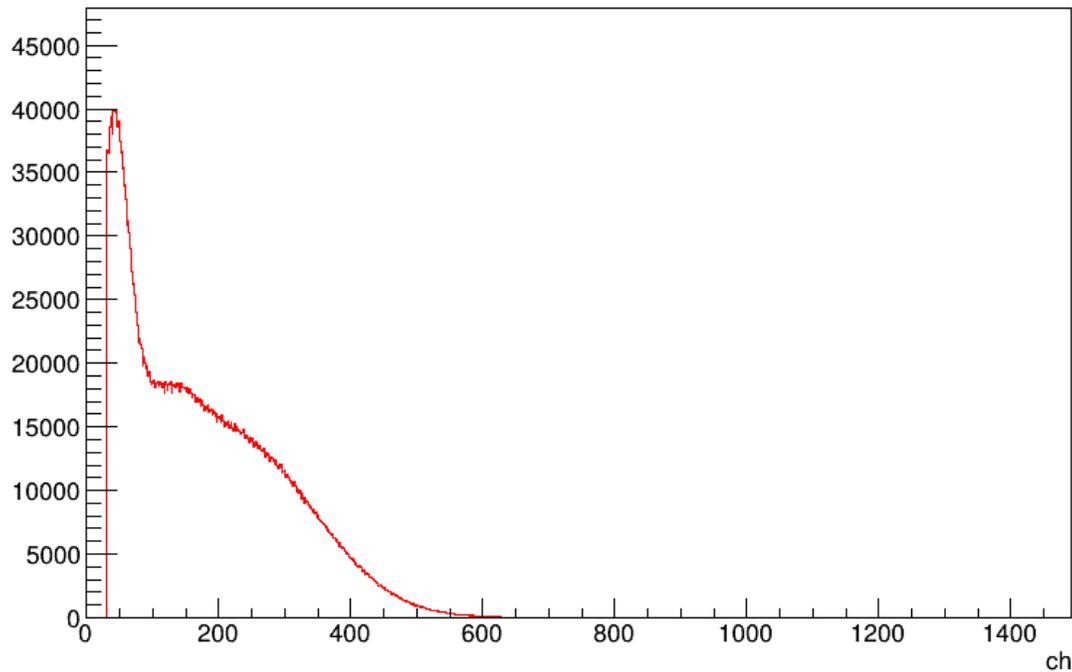
LED照射 - 中性子照射後

光強度依存性

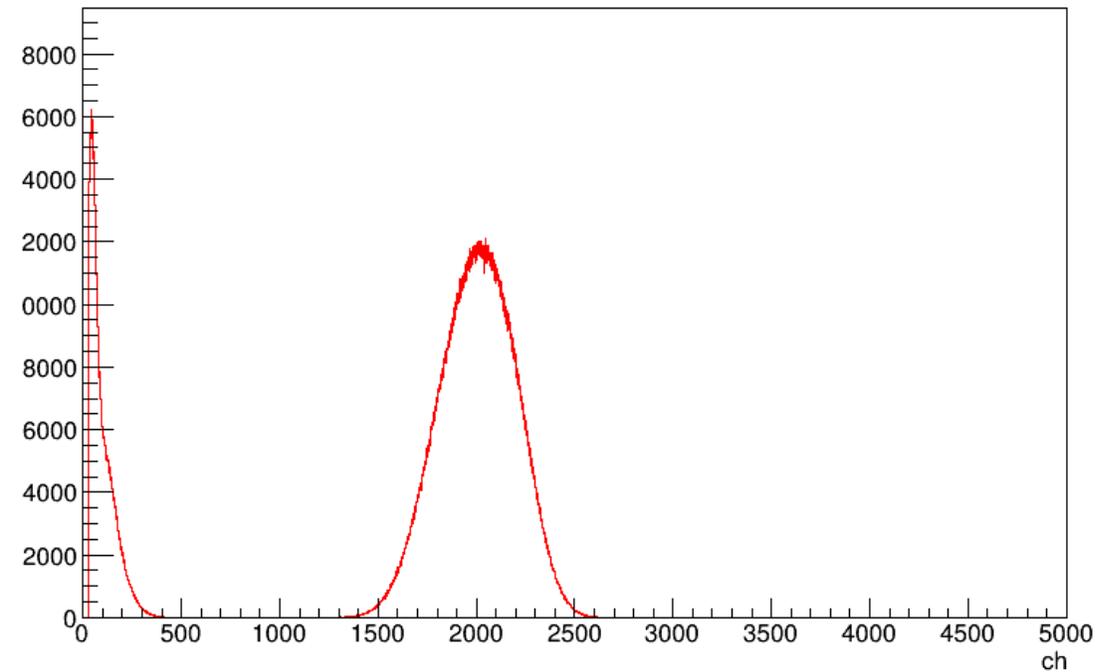
縦軸：count数

横軸：channel

HV_100V, amplitude_500mV



HV_100V, amplitude_9V



LEDの光量が少ない時(500mV)では収集電荷量も少なくなるため、
ペDESTAL部分とシグナル部分が重なる。

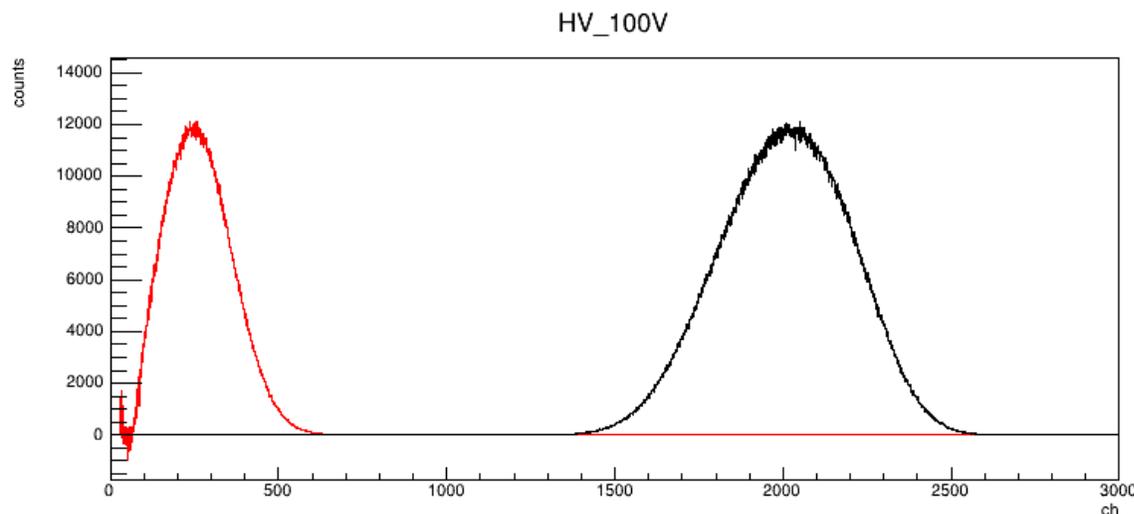
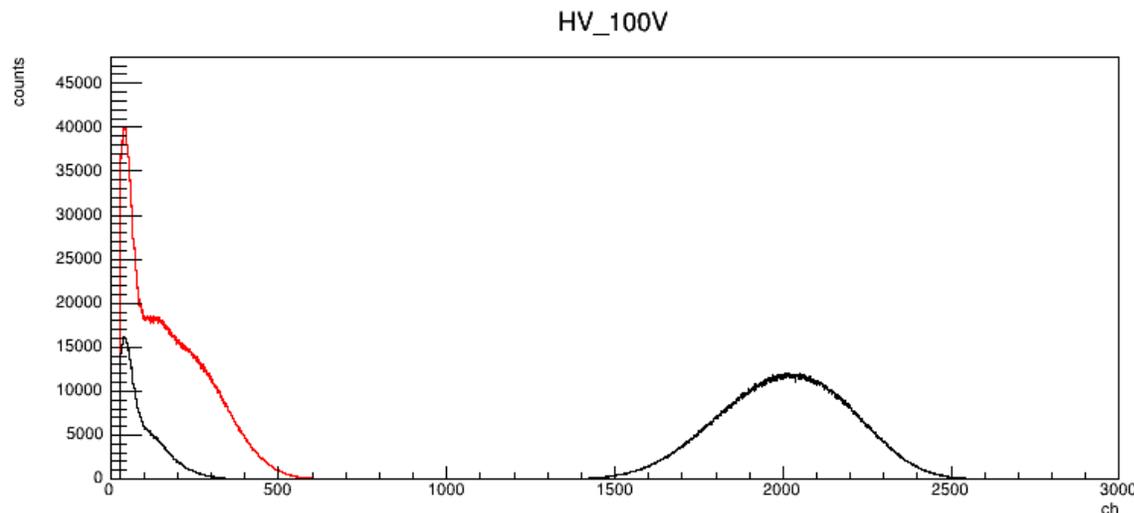
→光量が少ない時のペDESTAL部分を取り除く必要がある。

LED照射 – 中性子照射後

縦軸：count数

横軸：channel

ペDESTAL部分 カット方法



上：光強度500mV(赤)、9V(黒)
下：ペDESTAL部分をカットした

ペDESTALとシグナルが分離している
光強度のペDESTAL部分を使用

10Vでは光が強すぎるため今回は使用
しなかった

ペDESTAL最大値

500mV->40000

9V->16000

→約2.5倍

$(500\text{mV_pedestal}) - (9\text{V_pedestal}) \times 2.5$

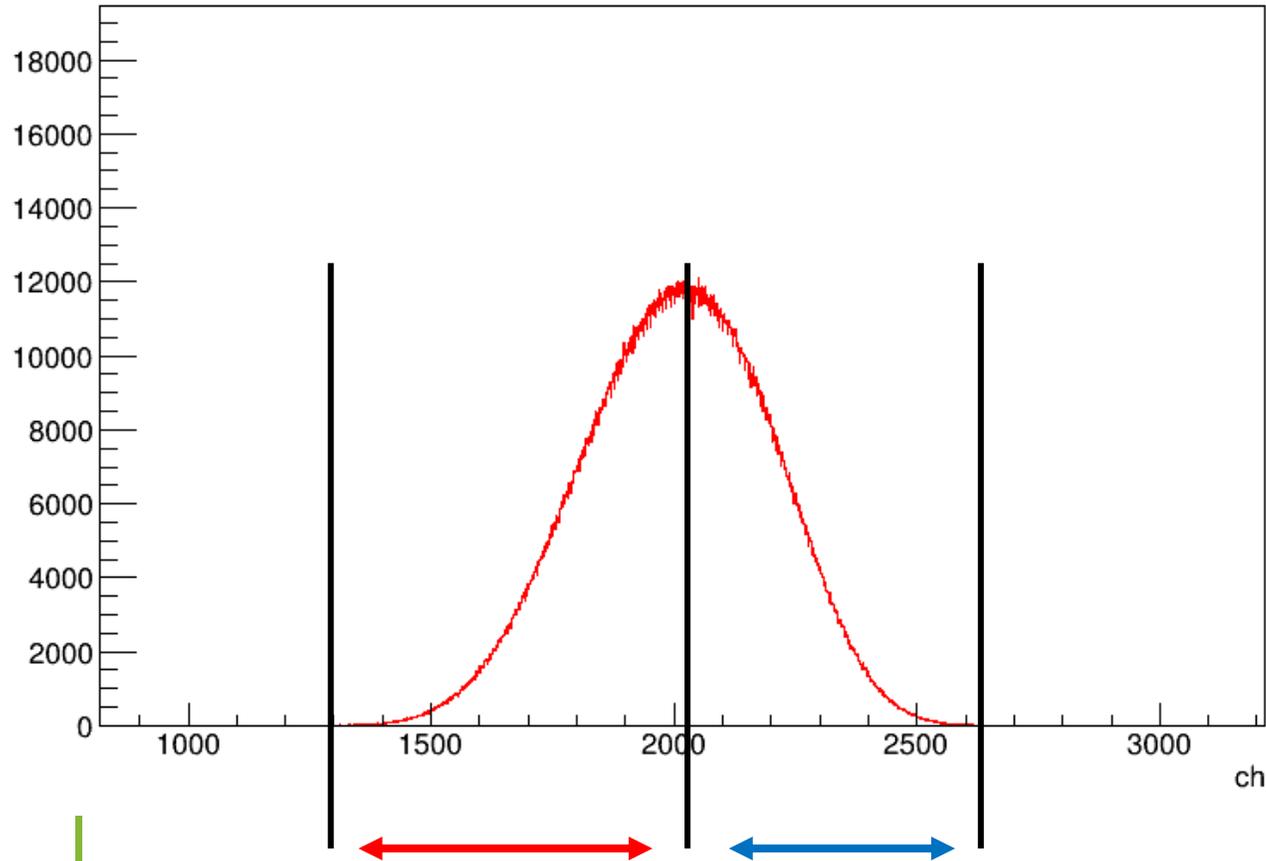
LED照射 - 中性子照射後

縦軸：count数

横軸：channel

ch_mean ADC値の取得方法

HV_100V, amplitude_9V



1分間LED照射し続けるため少し揺らぎが生じ、左右で膨らみ方が違う。

→中央値をch_meanとして扱う

LED照射 – 光強度依存性

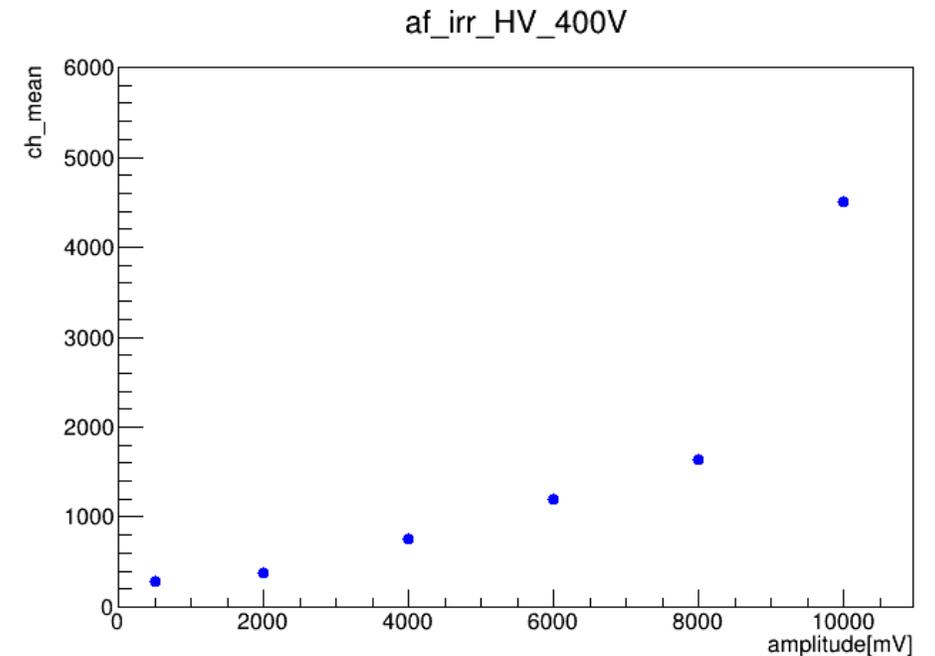
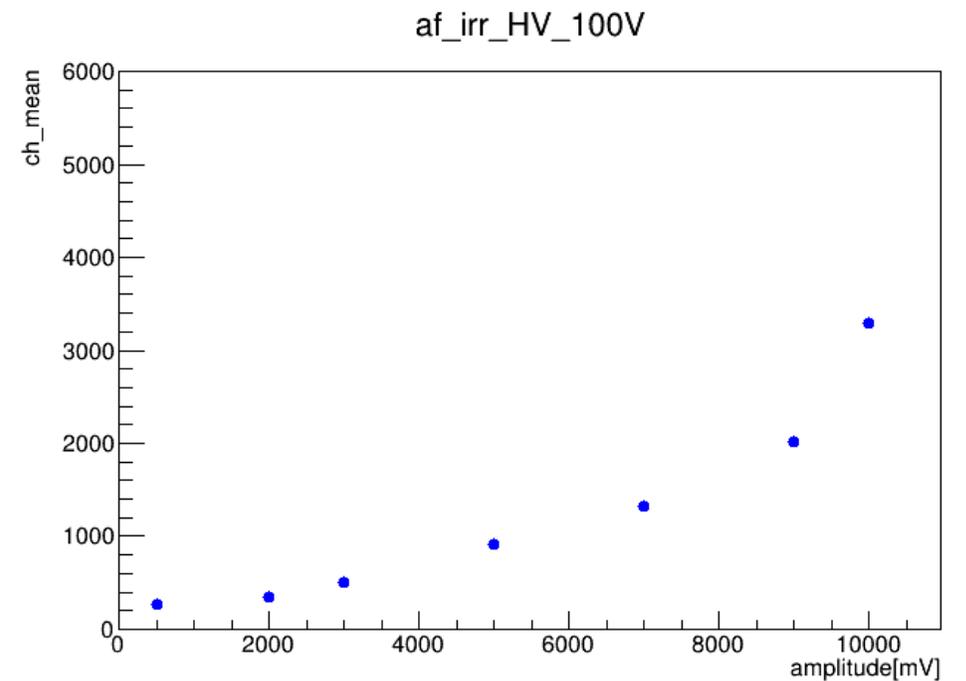
縦軸：ch_mean 収集電荷量

横軸：光強度[V]

- Siセンサーにあてる光量と出てくる電荷量について線形が見られるはず…



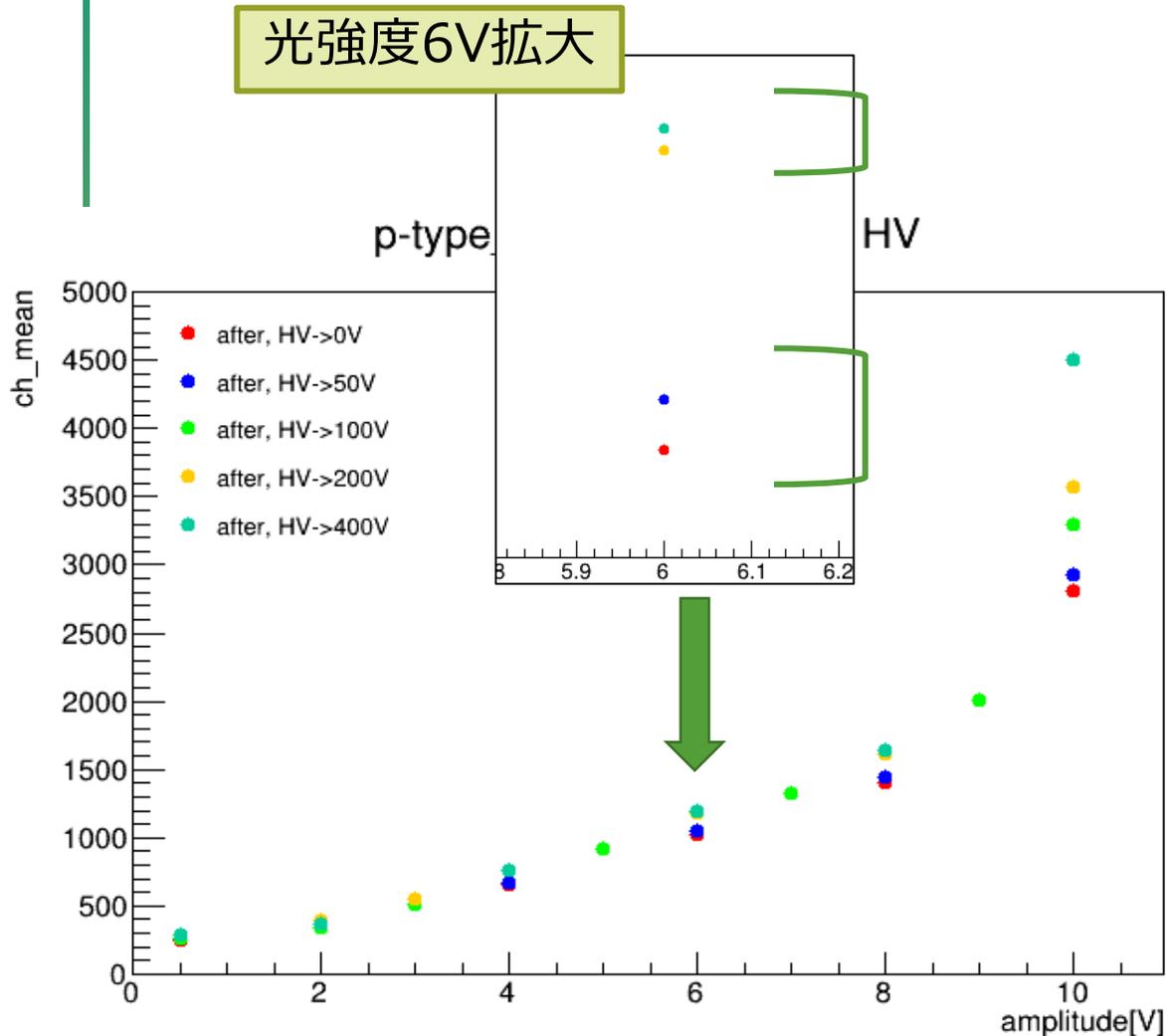
- 収集される電荷量の光強度依存性について比較すると光強度3~9Vのあたりで線形性が見える。
- 光強度が10Vのとき、印加電圧が大きくなるにつれ、跳ね上がり方が大きい



LED照射 – 光強度依存性

縦軸：ch_mean 収集電荷量

横軸：光強度, amplitude[V]



印加電圧が0,50Vと200,400V
で分かれている

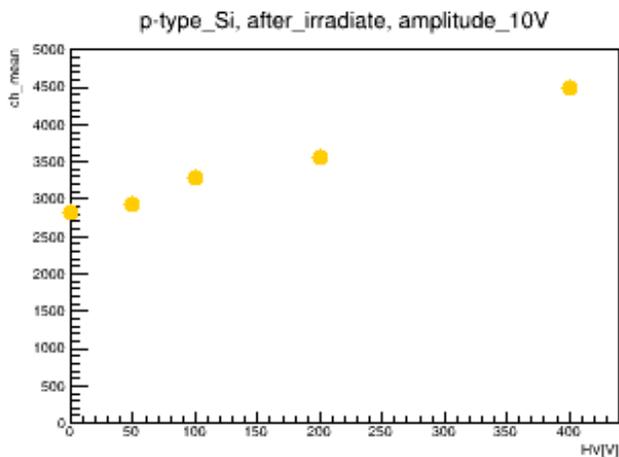
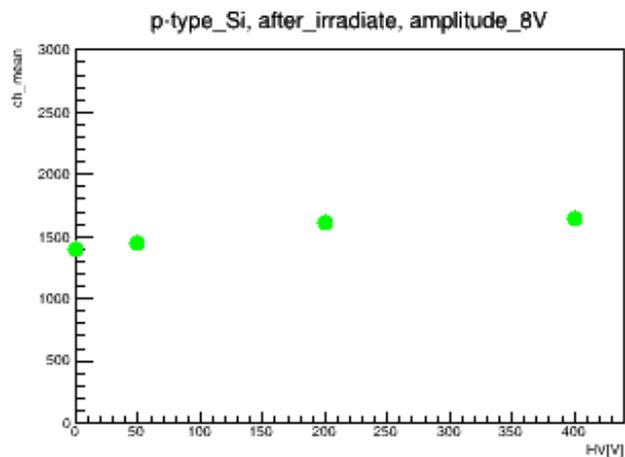
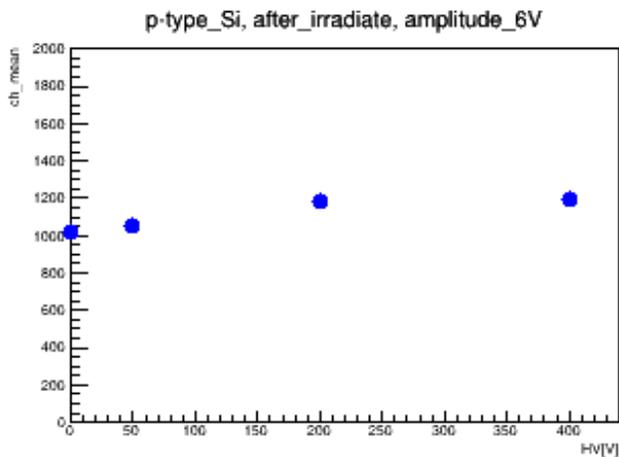
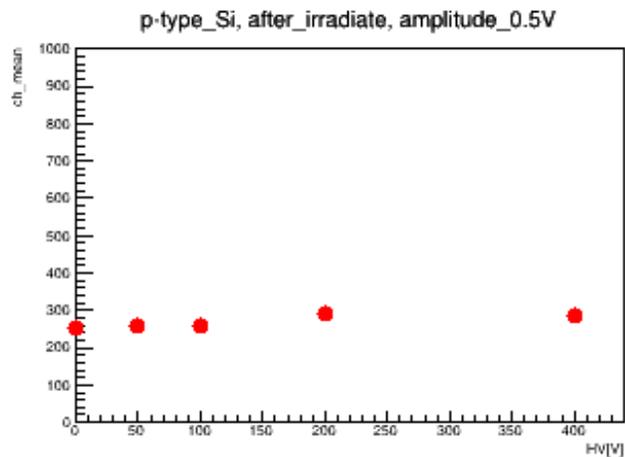
50Vと200Vの間がかなり差が
見られる。

→各光強度での印加電圧に
ついて詳しく調べる。

LED照射 - 印加電圧依存性

縦軸：ch_mean収集電荷量

横軸：印加電圧[V]



先行研究より印加電圧が200Vから値が一定

光強度10V以外では印加電圧が200Vと400Vで値が同じになった。

200Vと400Vの間をもう少し詳しく調べる必要がある。

測定結果

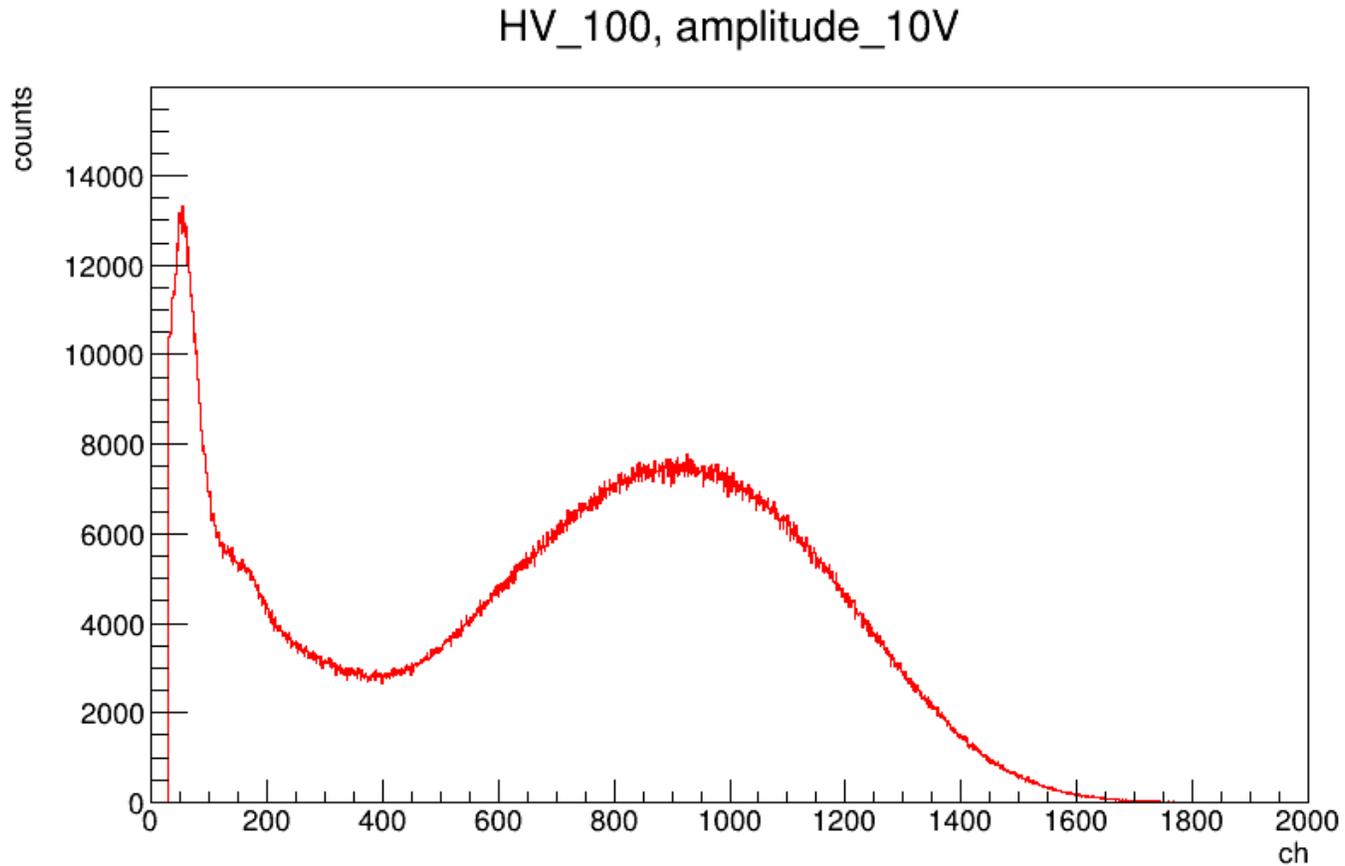
(3)LED照射について

中性子照射前

LED照射 - 中性子照射前

縦軸：count数

横軸：channel



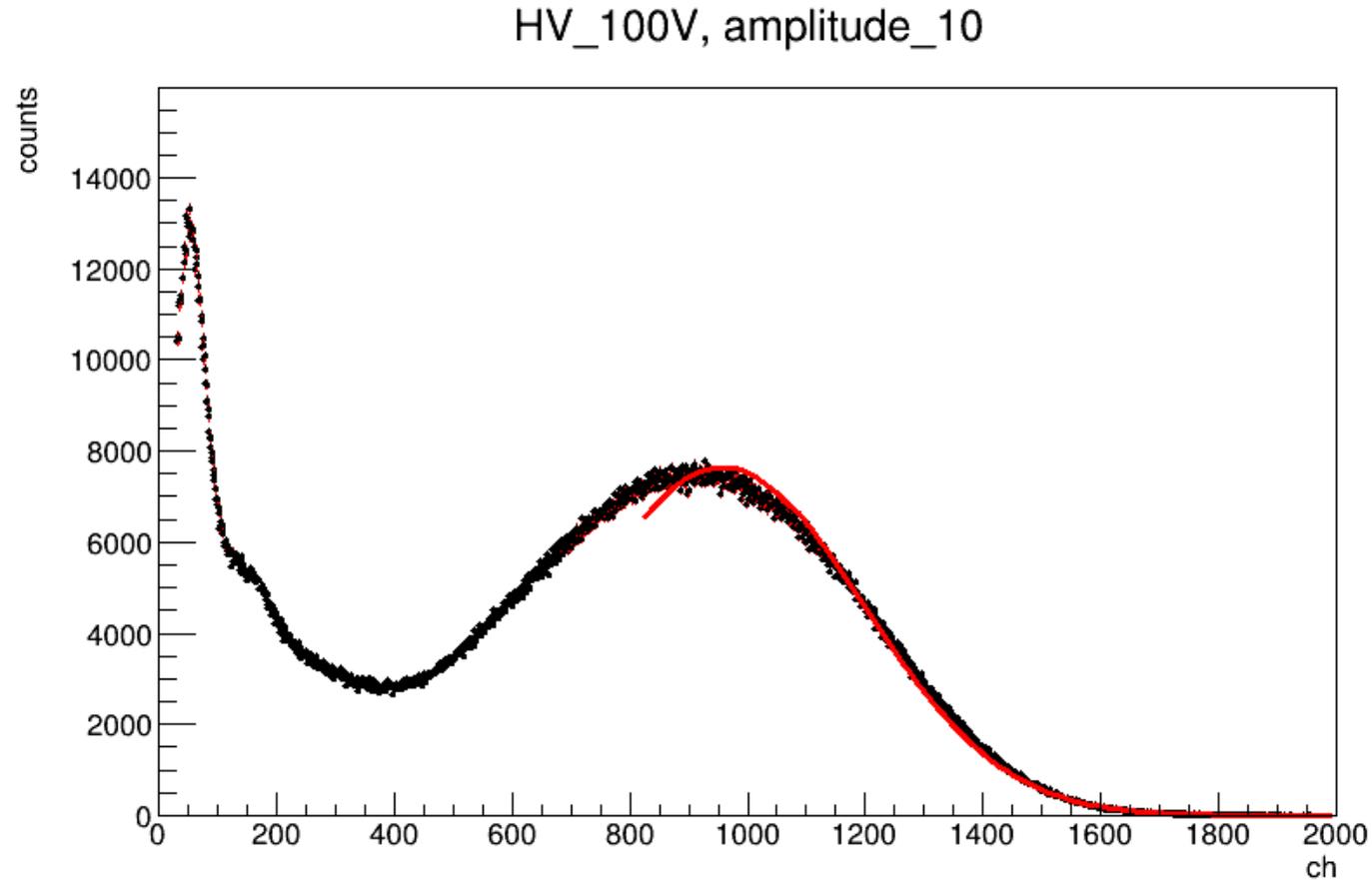
中性子照射前では光強度が一番強い10VでもペDESTAL部分と重なる。

→

LED照射 - 中性子照射前

縦軸：count数

横軸：channel



中性子照射前では光強度が一番強い10VでもペDESTAL部分と重なる。

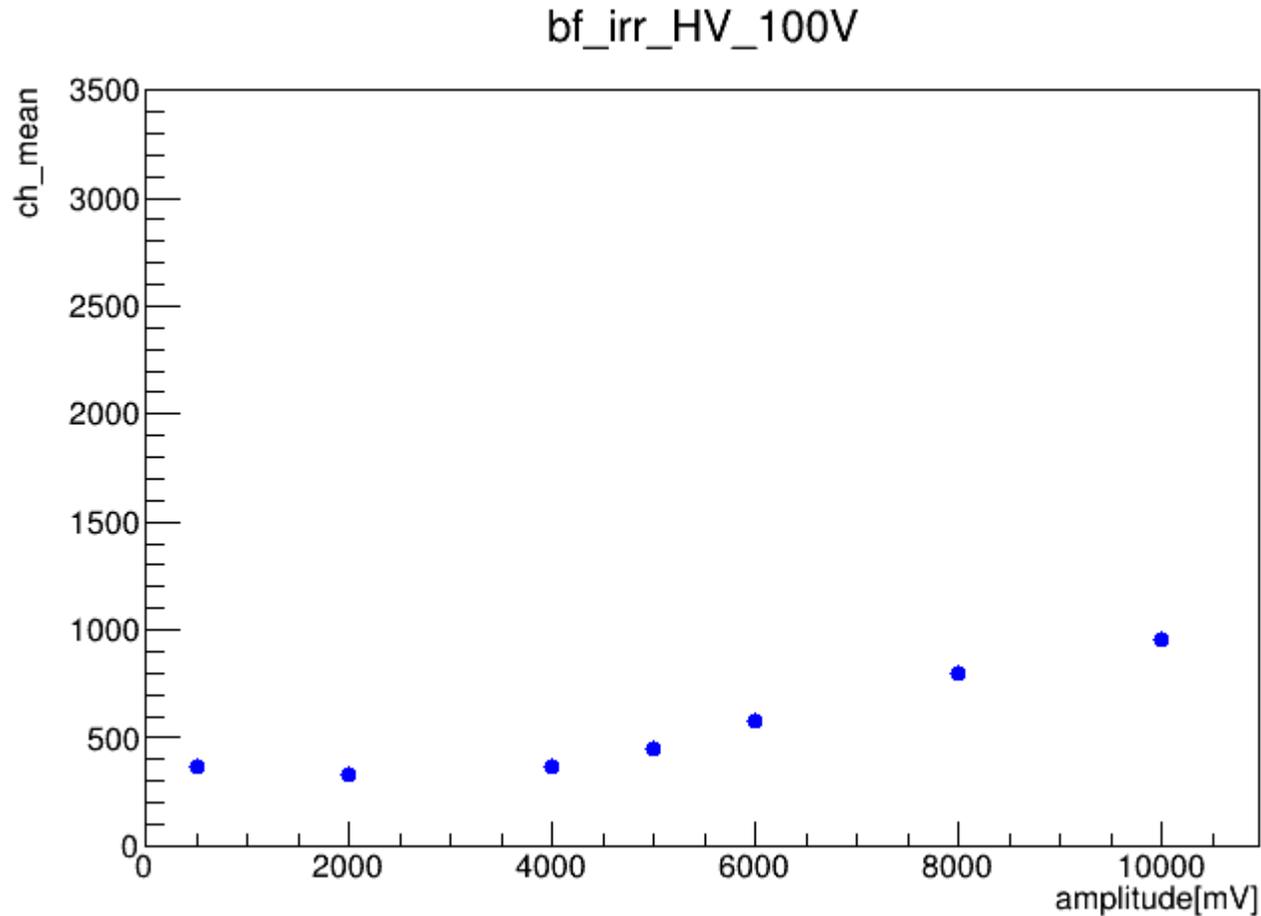
→右側のみガウスフィットさせ
meanを収集電荷量のch_mean
として取得する。

LED照射 - 中性子照射前

縦軸：ch_mean 収集電荷量

横軸：光強度,amplitude[mV]

光強度依存性

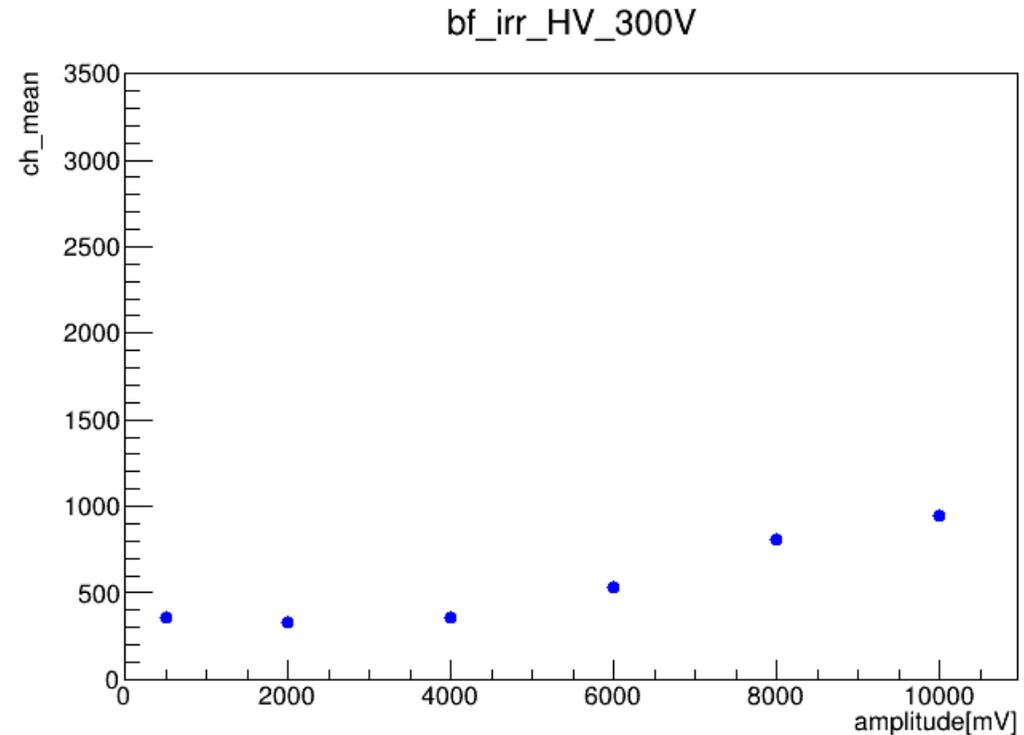
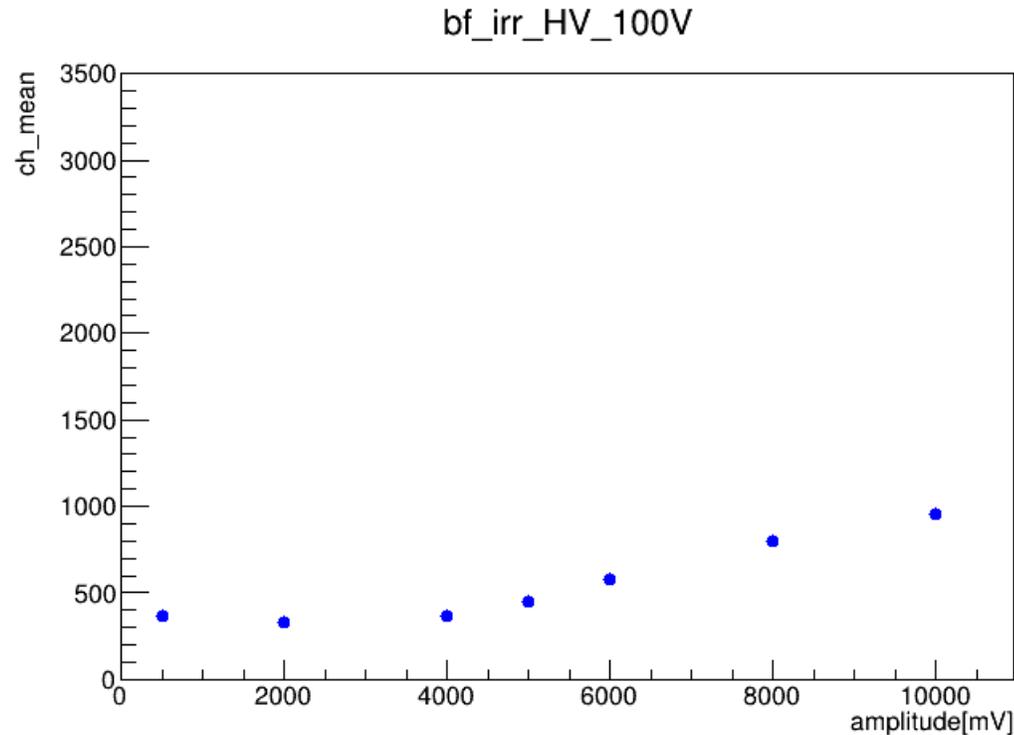


4~8Vと照射後よりも狭い範囲で線形性が見られる。

LED照射 - 中性子照射前

縦軸：ch_mean 収集電荷量

横軸：光強度,amplitude[mV]



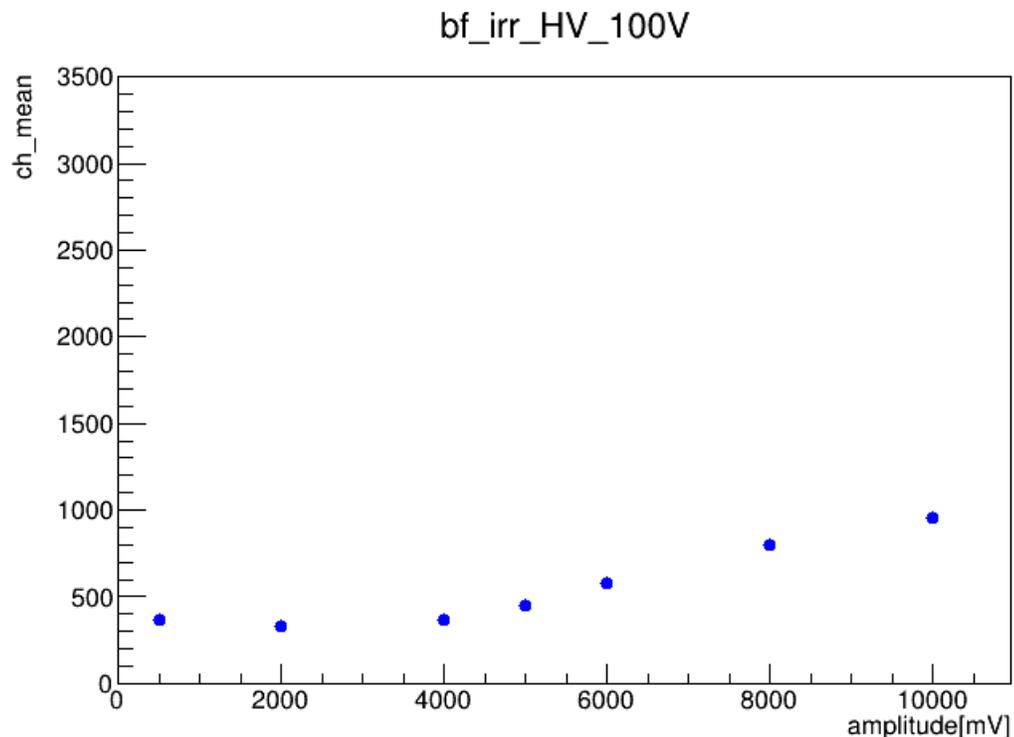
中性子照射後と比べ、印加電圧による光強度依存性は中性子照射前ではあまり変化は見られない。

LED照射 - 中性子照射前後

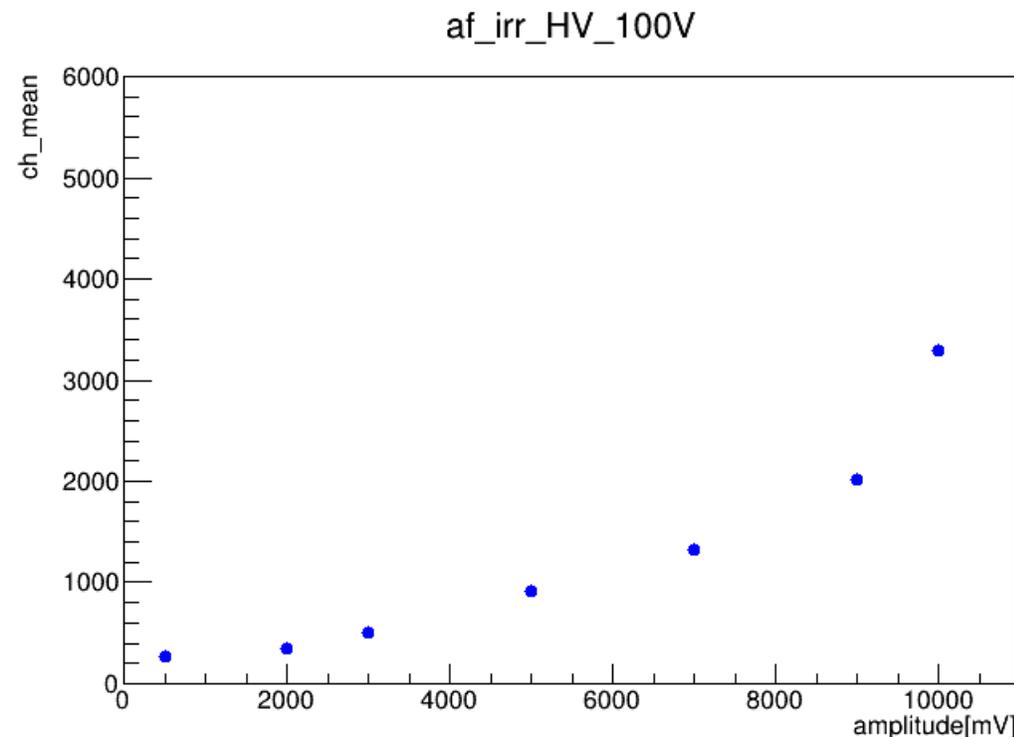
縦軸：ch_mean 収集電荷量

横軸：光強度,amplitude[mV]

照射前



照射後



中性子照射前では光強度が強くなるにつれ収集電荷量の上がり方が緩やかになり安定していくのに対し、照射後ではより多くの電荷を発生し収集している。

まとめと今後の課題

まとめ

- I-V特性について
 - 中性子照射前後で電流値が約 10^5 倍ほど違う。
 - 別で設置してある温度計の温度が安定してから最低でも10分待てばSi chip本体の温度が一定になりI-V特性の温度依存性による影響がないことがわかった。
 - 中性子照射してから日数が経過するほど電流値が減少してきており、今はすべてのpinにおいて安定している。

まとめ

- LED照射について
 - 中性子照射後
 - 光強度が3~9Vのとき収集電荷量との関係で線形性を示す。
 - 線形性が見られる範囲で印加電圧が200V以降、収集電荷量が一定になる。
 - 中性子照射前
 - 照射後と比べ収集される電荷量が少ない。
 - 印加電圧による依存性は見られなかった。

今後の課題

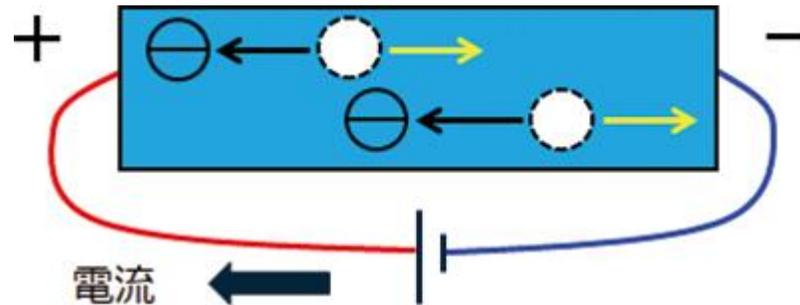
- LED照射の中性子照射後について、印加電圧依存性で、特に高い電圧をかけた時の依存性について詳しく調べる必要がある。

ご清聴ありがとうございました

Back Up

p型半導体

- 真性半導体(Si)にホウ素(B)やインジウム(In)などを不純物として加えたもの。
→電子が1個不足、正孔(ホール)となる
- 電圧をかけるとホールが電子と入れ替わりマイナス(-)に向かい結果として電子が+から放出され電流が流れる。



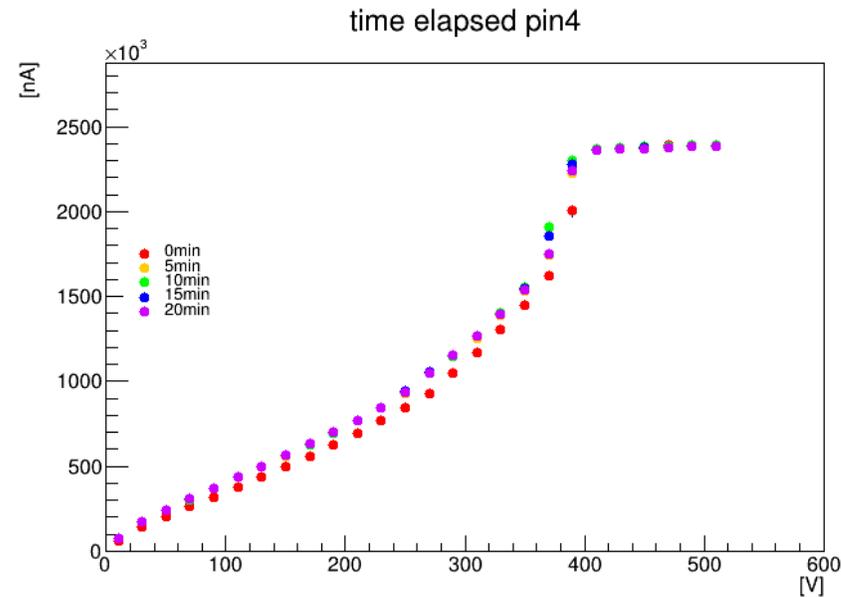
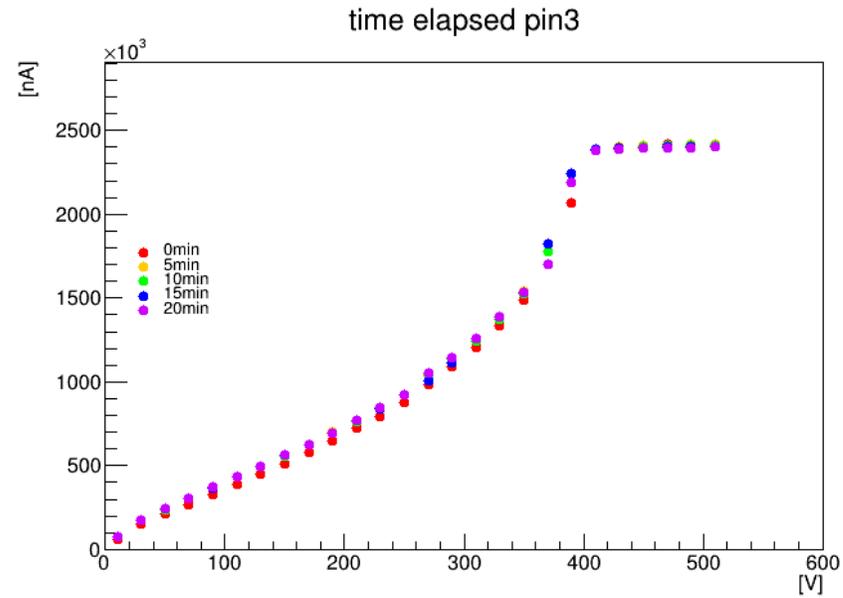
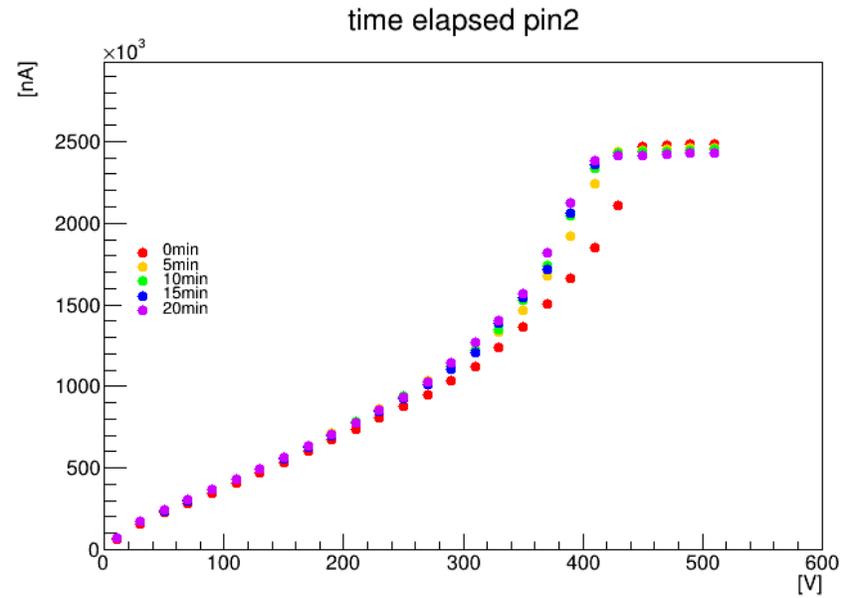
引用：新電元工業株式会社「n型半導体、p型半導体とは」

https://www.shindengen.co.jp/products/semi/column/basic/semi/rectifying_action.html



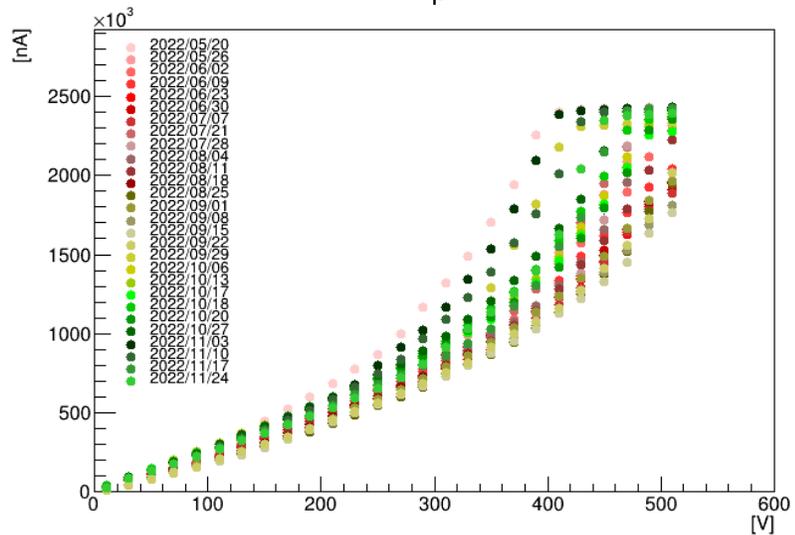
I-V特性

I-V特性 - Si chip本体の温度依存性

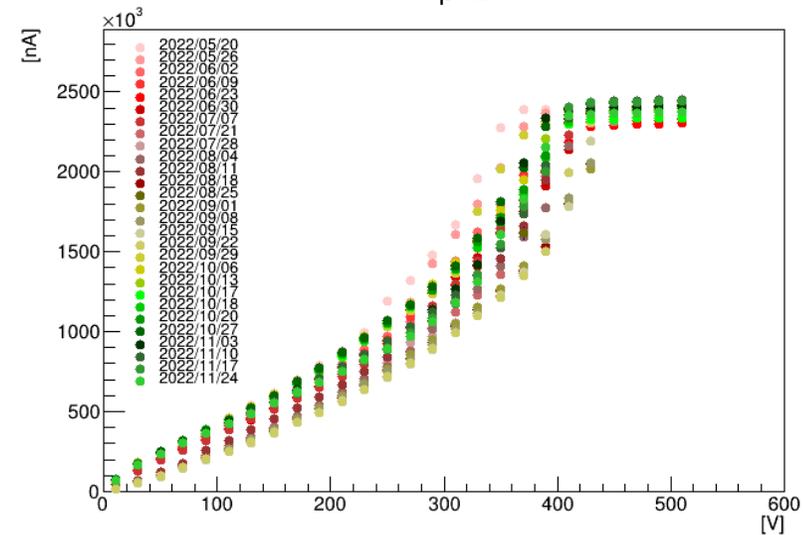


I-V特性 - 測定開始から

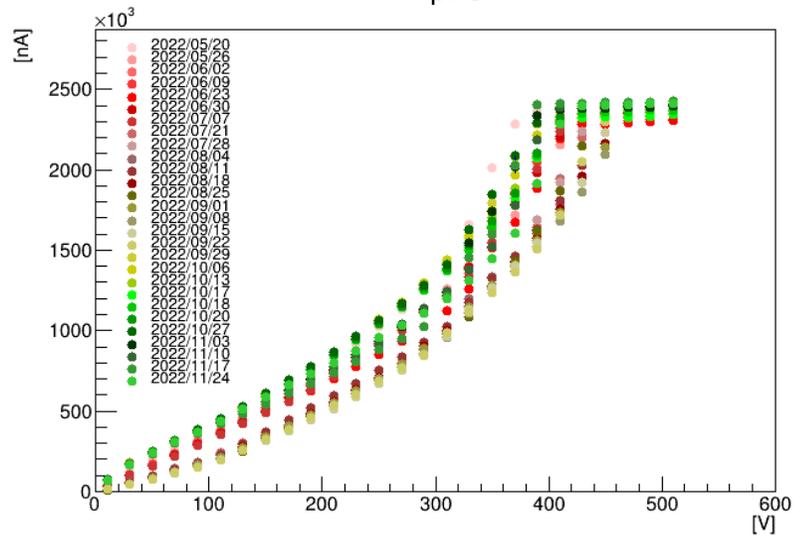
I-V pin1



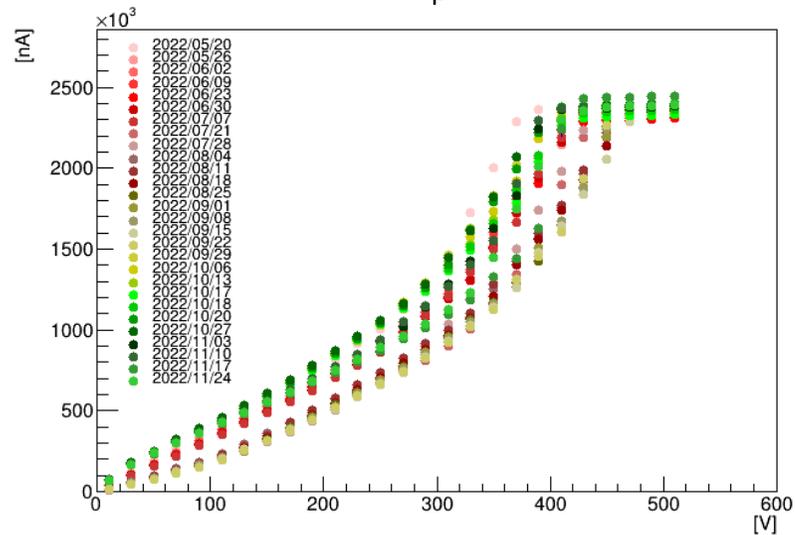
I-V pin2



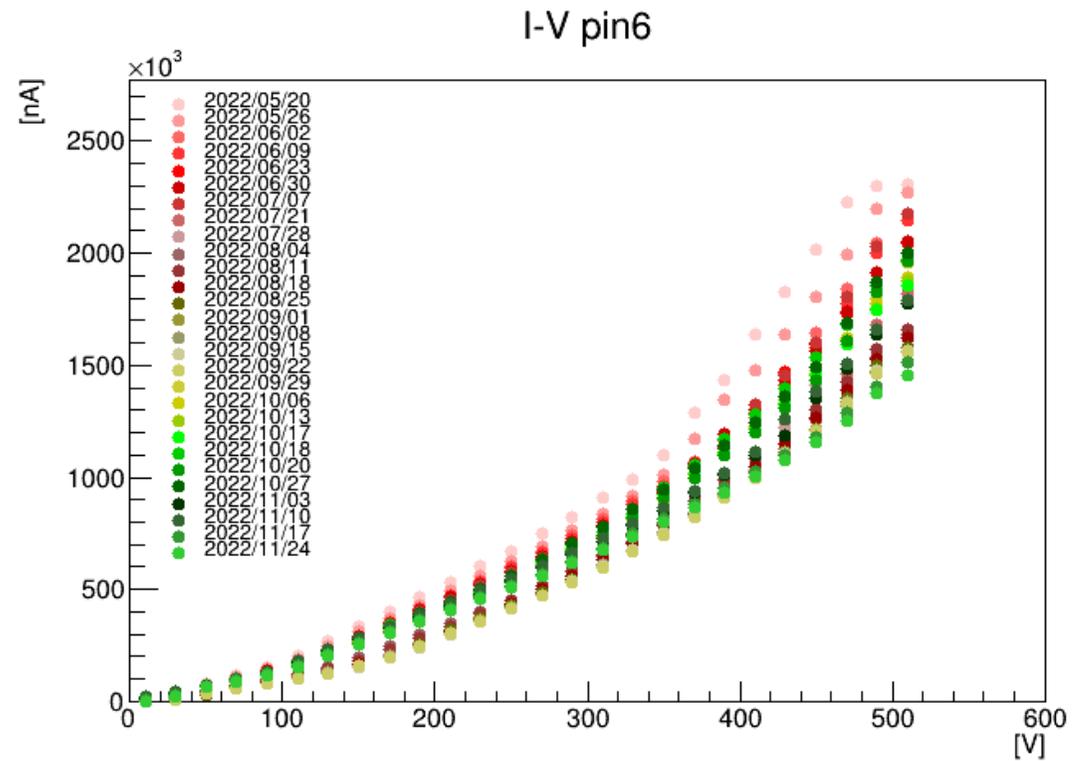
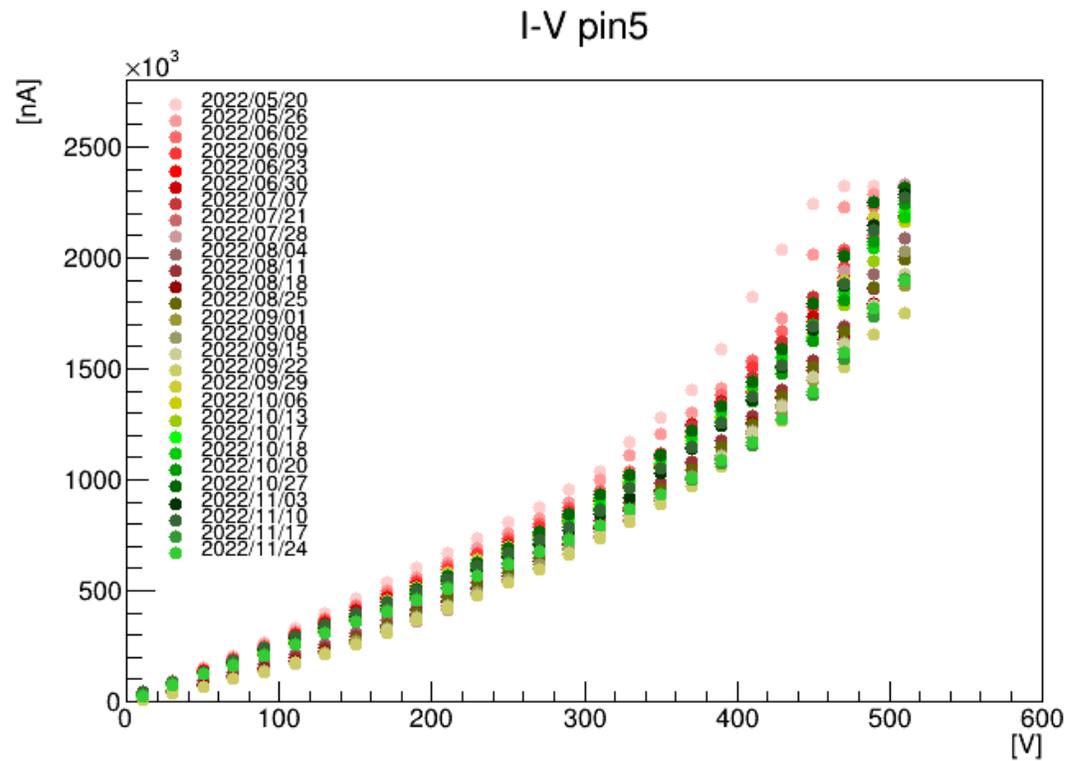
I-V pin3



I-V pin4

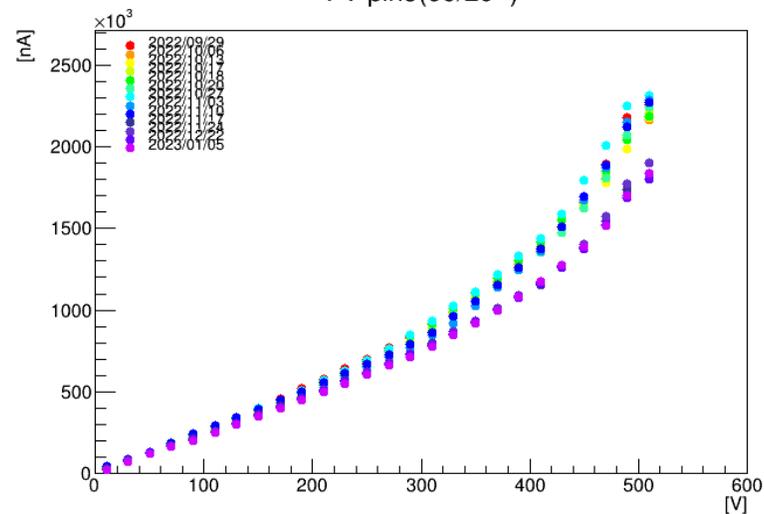


I-V特性 - 測定開始から

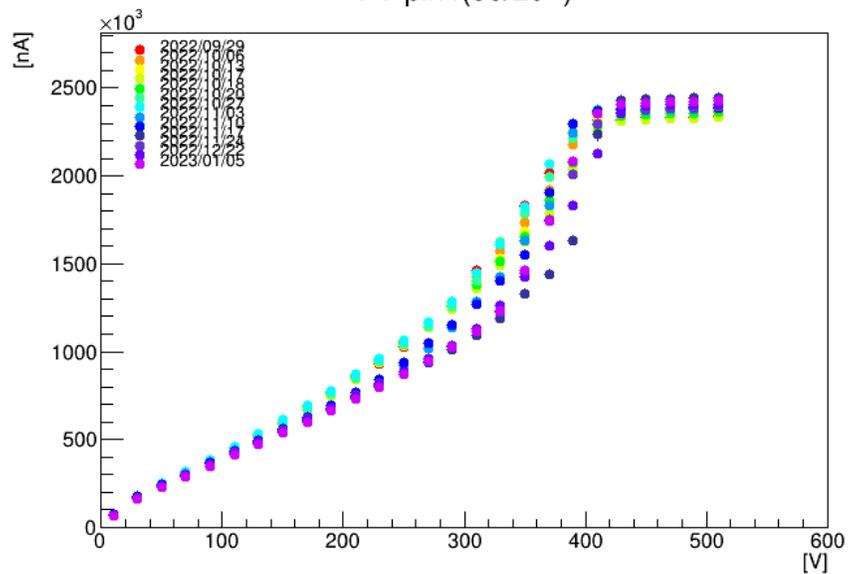


I-V特性 - 10分待ってから

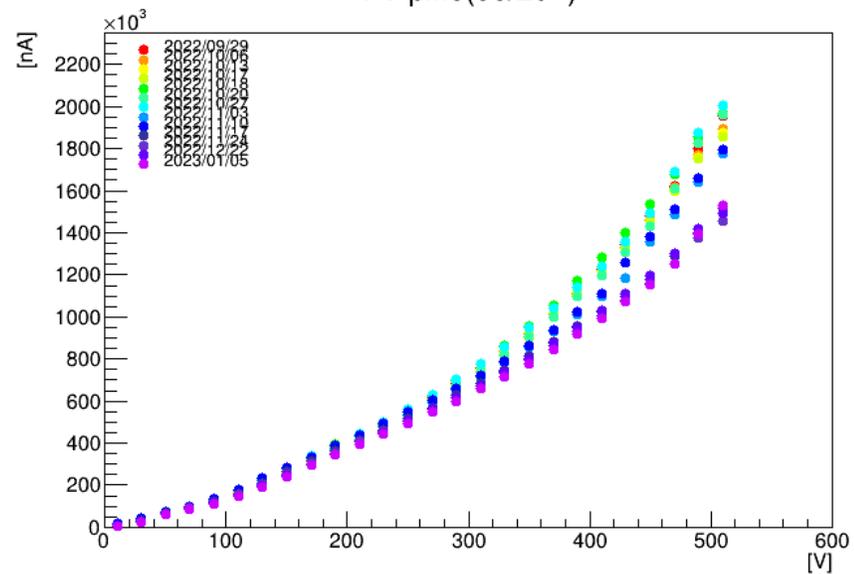
I-V pin5(09/29~)



I-V pin4(09/29~)



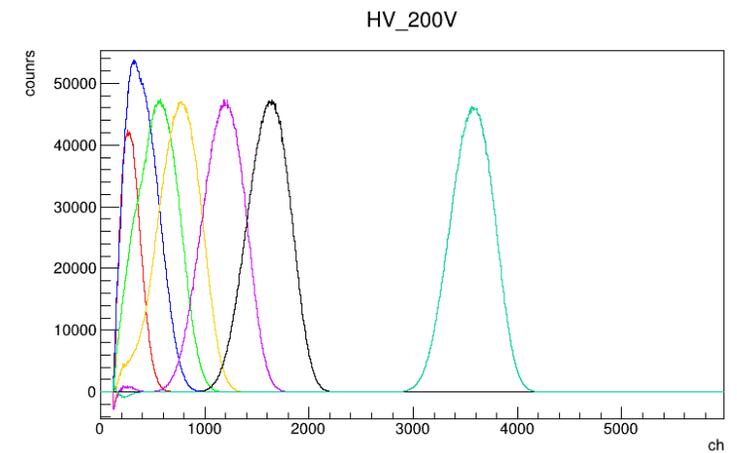
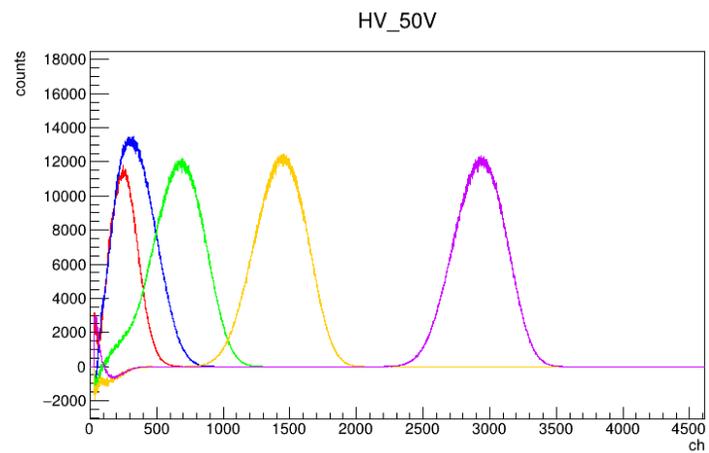
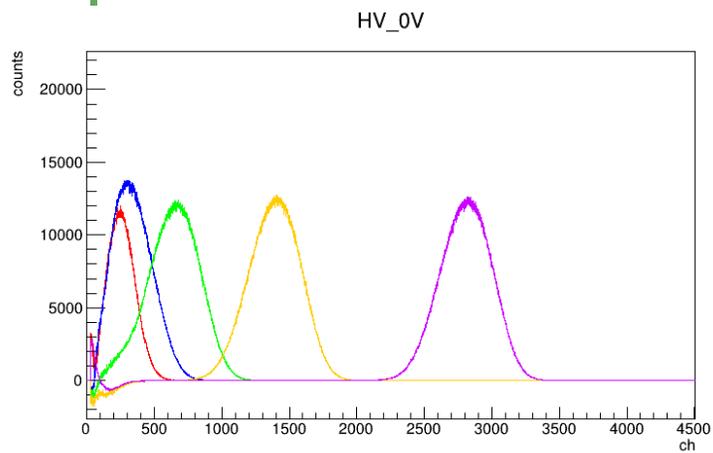
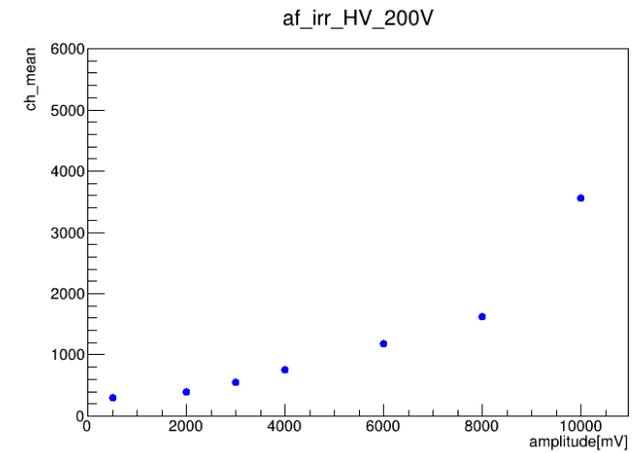
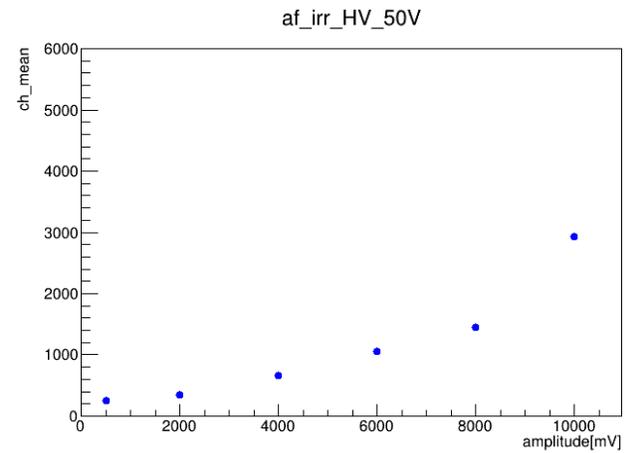
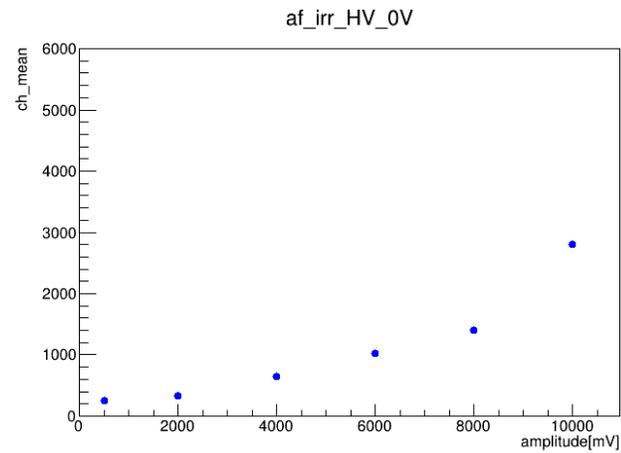
I-V pin6(09/29~)



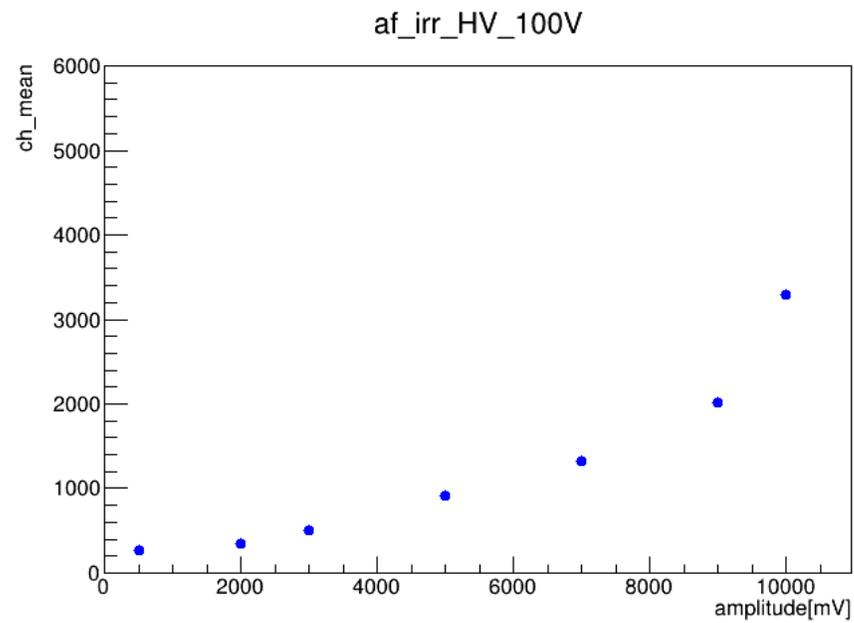


LED照射

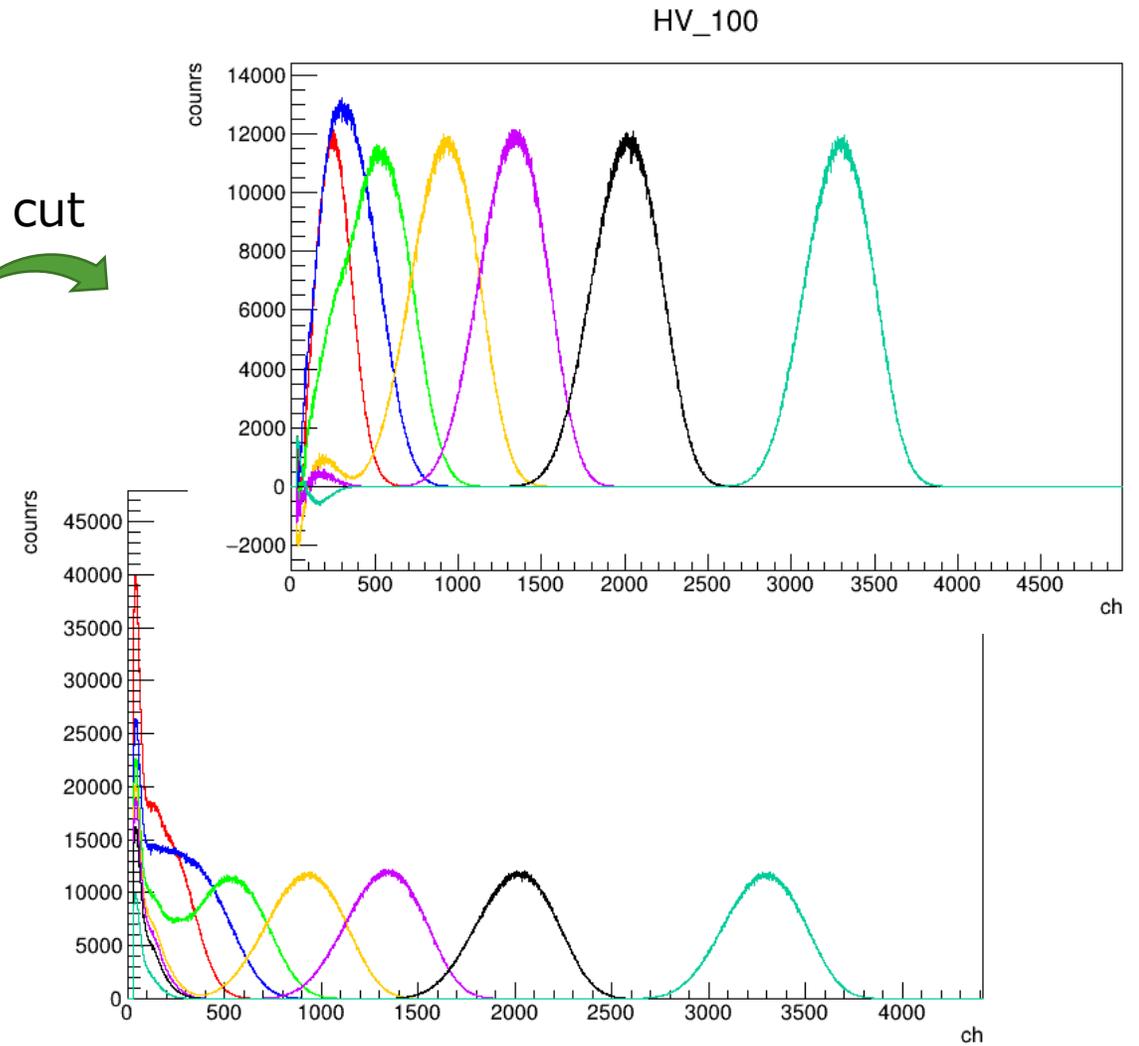
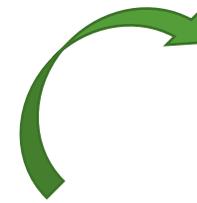
After irradiate



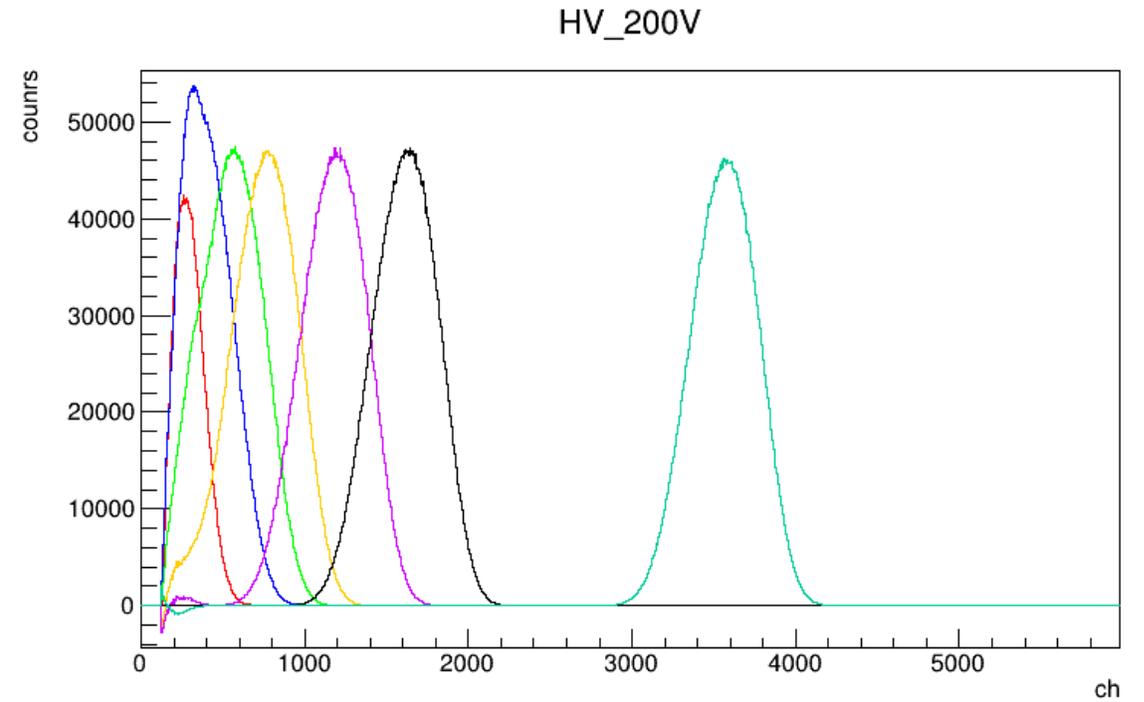
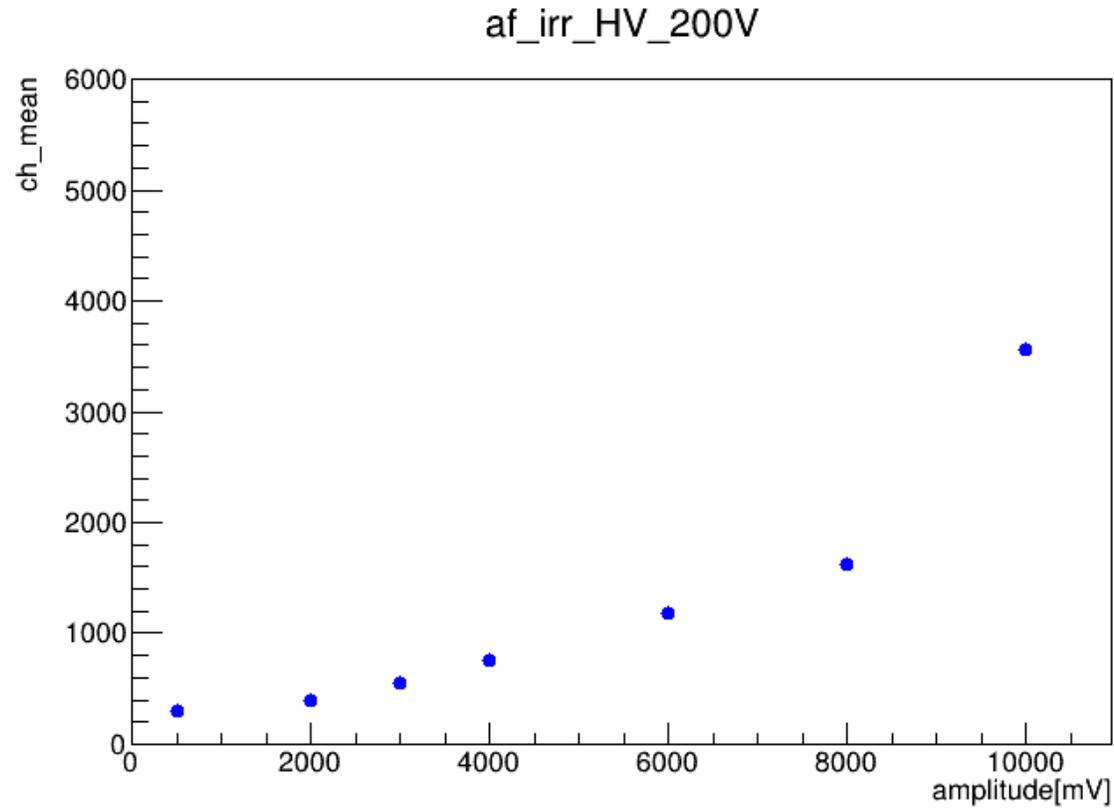
After irradiate 100V



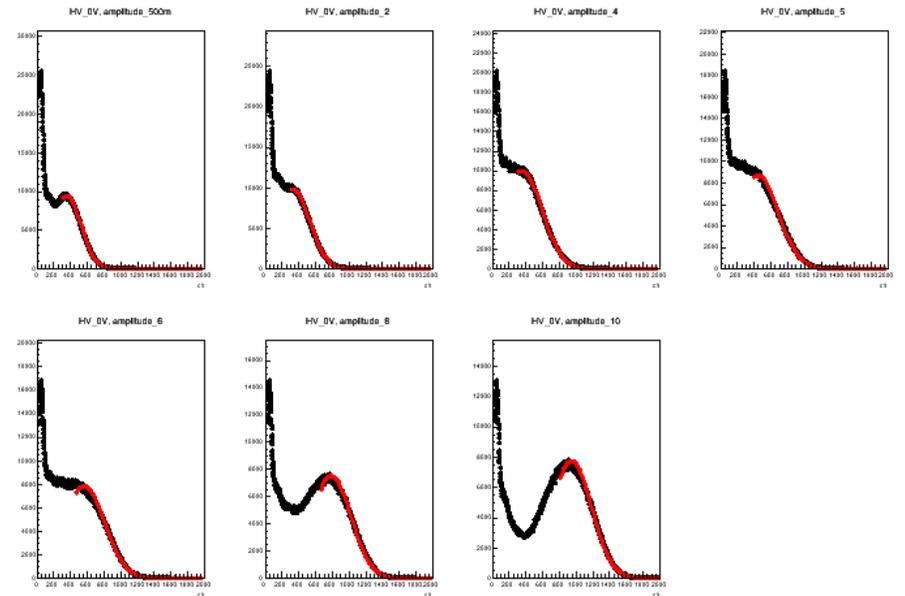
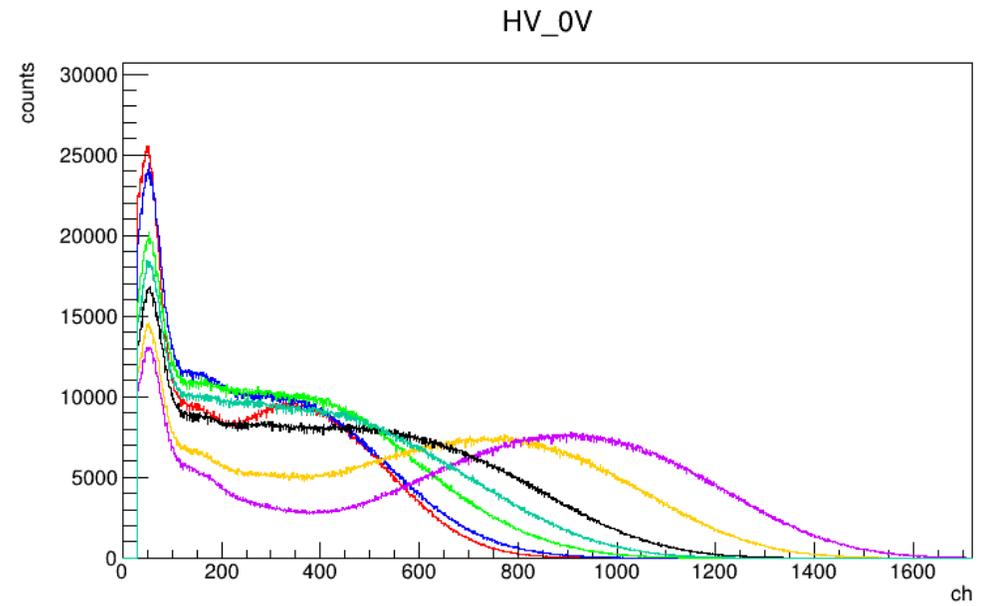
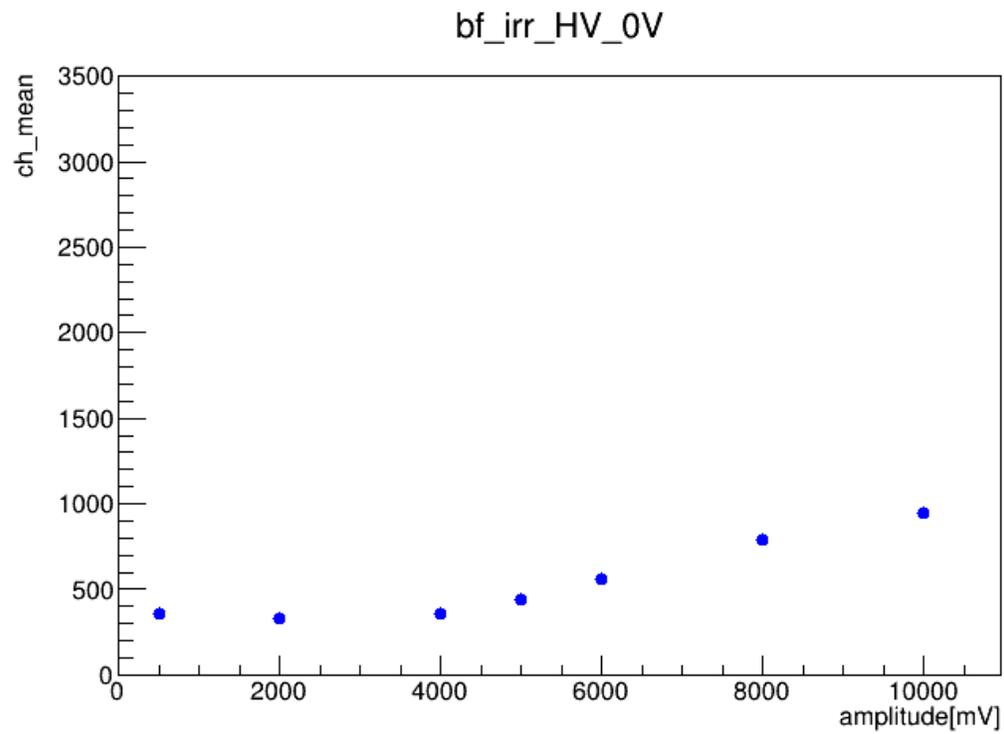
Pedestal cut



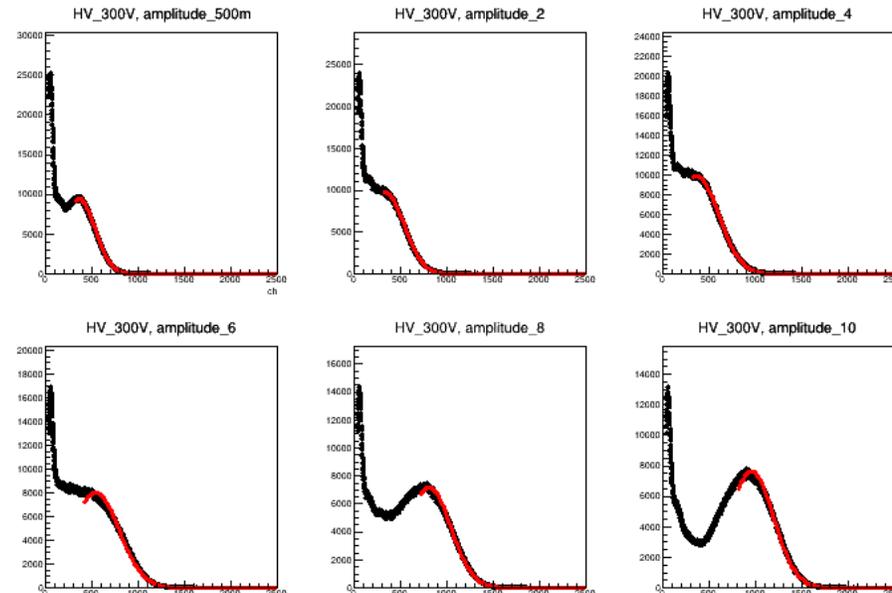
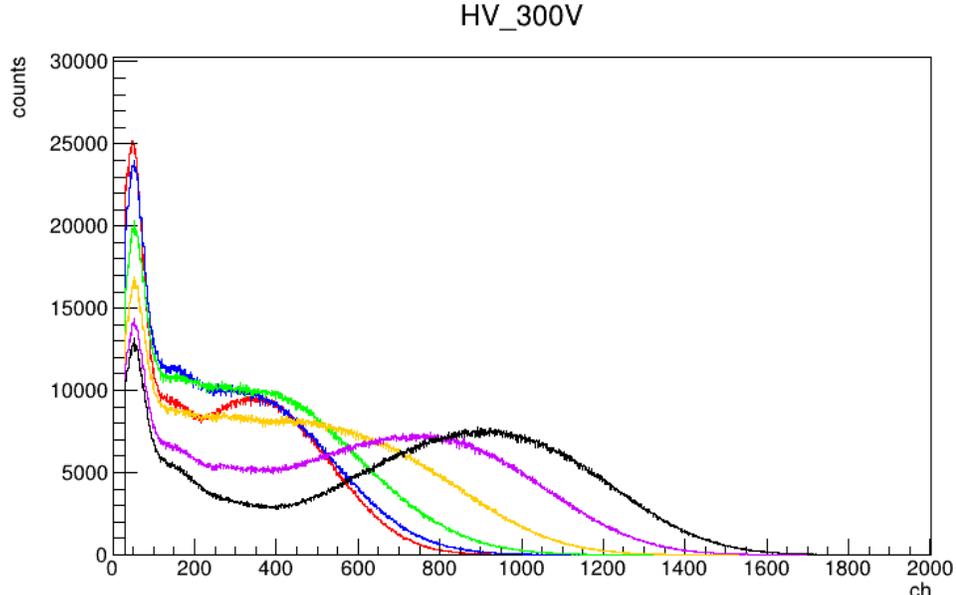
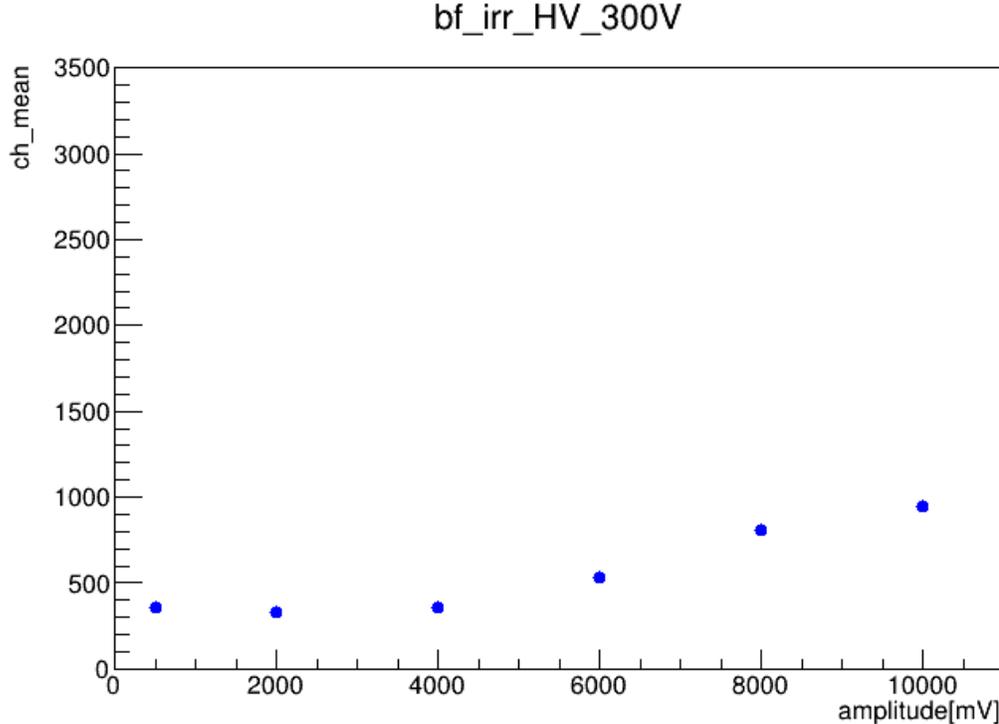
After irradiate 200V



Before irradiate



Before irradiate



Compare after, before irradiate

