

MPPCによる結晶シンチレーターの の読み出し光量測定

- MPPC光検出器の基礎特性測定
- 結晶シンチレータ+MPPCによる ^{137}Cs の γ 線検出

奈良女子大学

高エネルギー物理学研究室 4回生

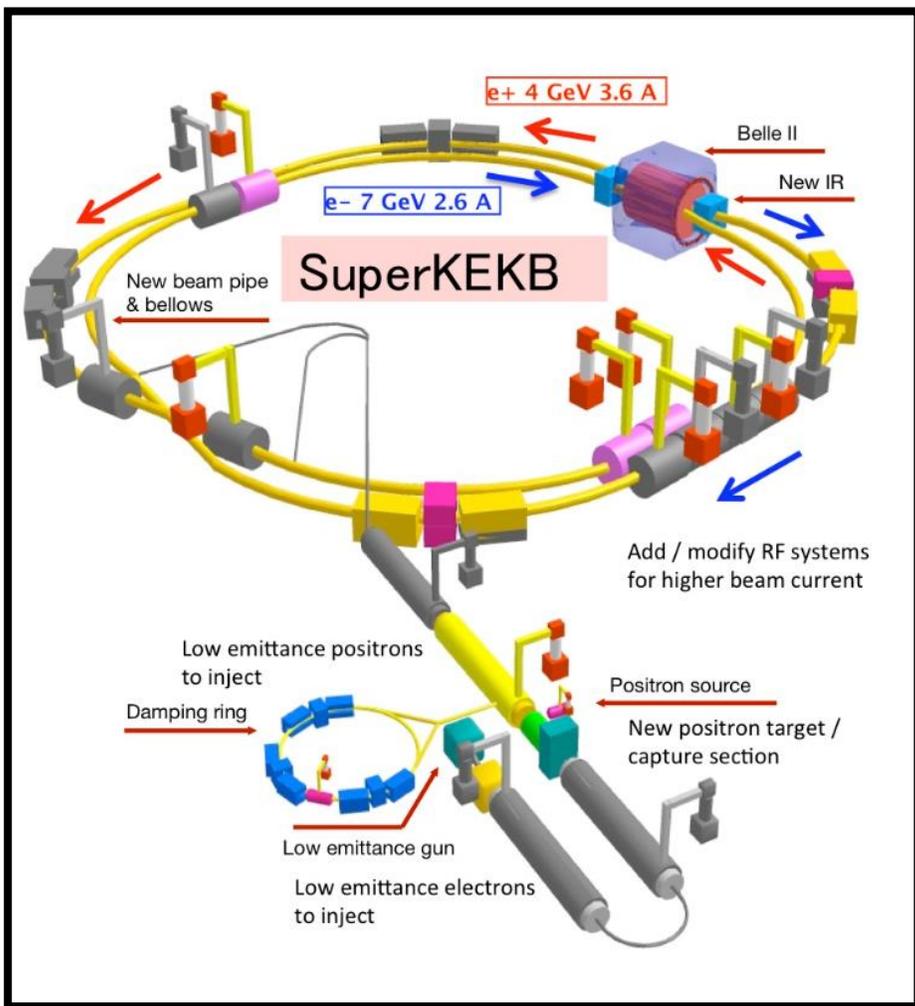
岡田 伊織

2023年3月3日

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 実験方法
4. 実験結果
5. まとめ、考察

SuperKEKB加速器



- SuperKEKB加速器は電子(7GeV)と陽電子(4GeV)を衝突させる、衝突型円形加速器
- 極めて多くのB中間子と反B中間子対を生成する目的を持つ
- 衝突点に設置されたBelle II 測定器が衝突によっておこる反応をとらえる

Belle II 測定器

【崩壊点位置検出器】

粒子の通過位置

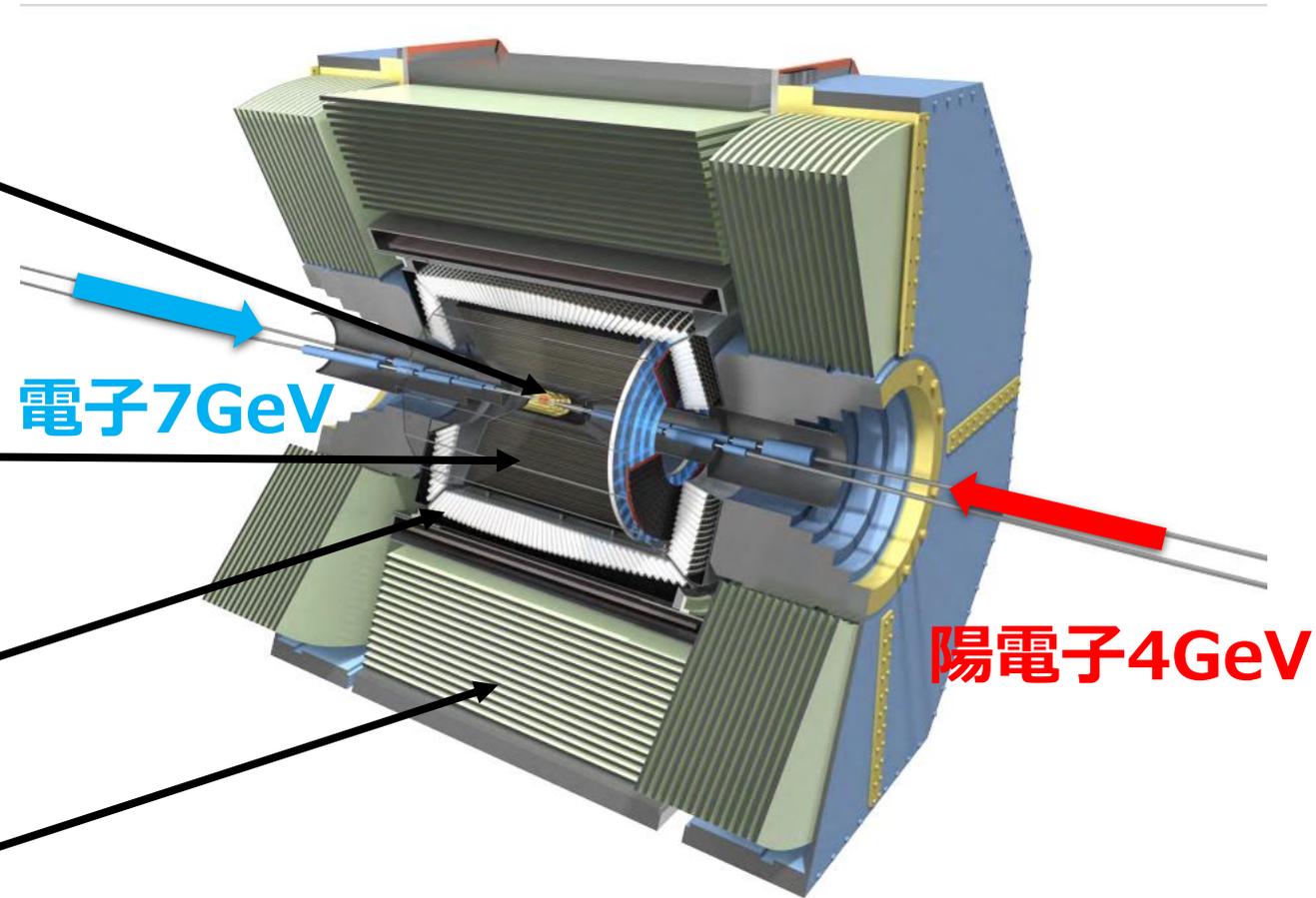
【中央飛跡検出器】

粒子の通り道の測定、粒子の種類識別

【電磁カロリメータ】

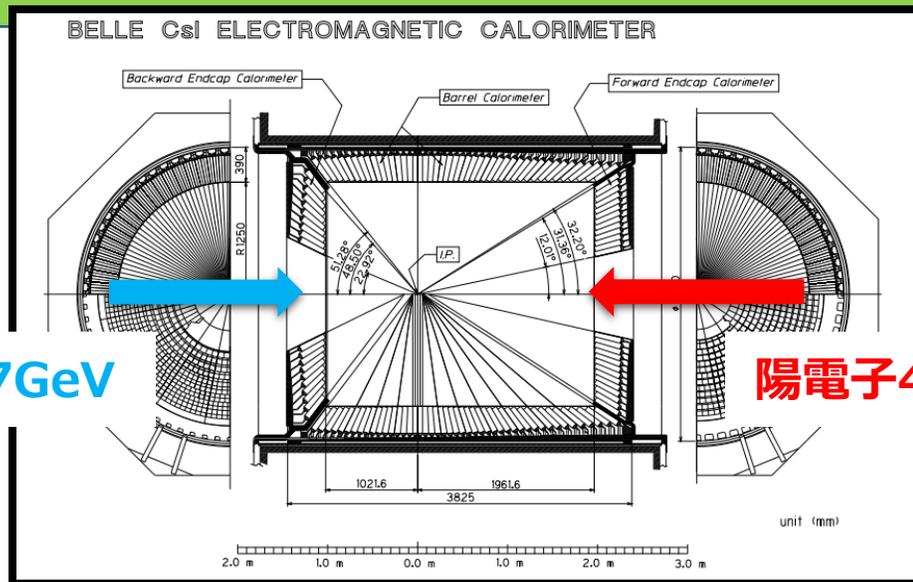
電磁シャワーを利用して γ 線や電子のエネルギー損失測定

【 μ 粒子・中性K中間子検出器】



引用元:[BelleIIsmall \(belle2.org\)](http://BelleIIsmall.belle2.org)

電磁カロリメータ



電子7GeV

陽電子4GeV

CsI(Tl)結晶
…8736本

結晶1本あたり
…断面積:約6cm×6cm
長さ:30cm
の塔状の形

引用元:[Lol_detector.pdf \(kek.jp\)](http://Lol_detector.pdf(kek.jp))

【結晶シンチレータとは】

粒子が入射してエネルギー損失を起こした時に
蛍光を発する物質

→CsI(Tl)

【半導体ピクセル検出器とは】

光を検知すると電気信号を出す光センサー

→PIN-PD

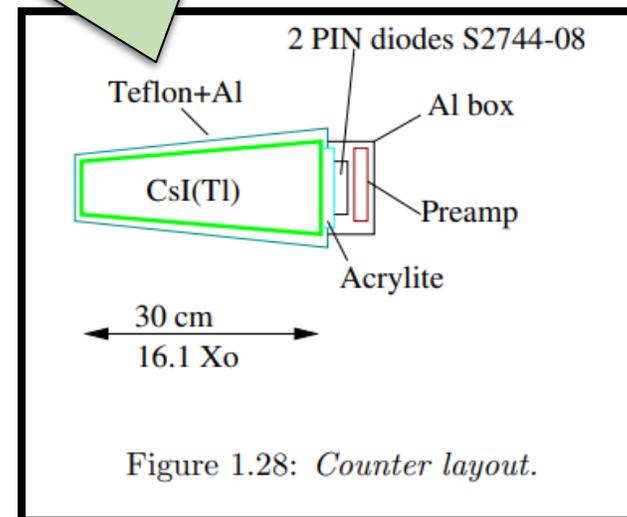


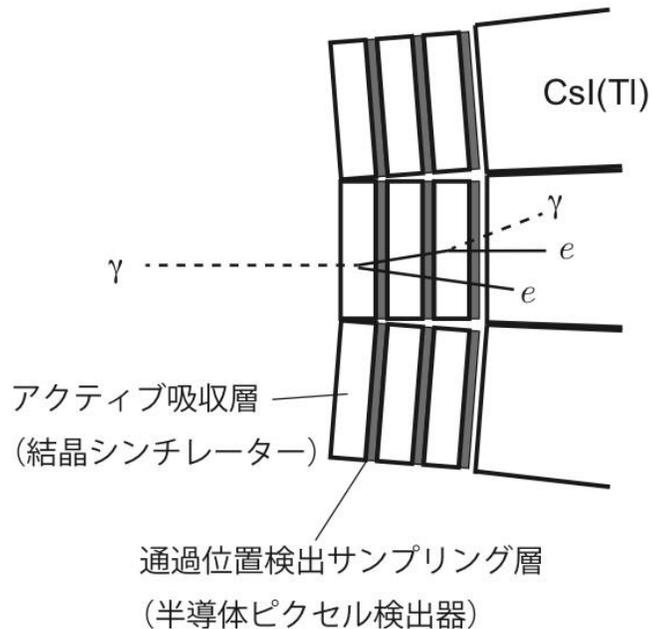
Figure 1.28: Counter layout.

引用元:[Lol_detector.pdf \(kek.jp\)](http://Lol_detector.pdf(kek.jp))

プリシャワー検出器

プリシャワー検出器とは既存のCsI(Tl)結晶シンチレーターの直前に置くことを想定していて、アクティブ吸収層と通過位置検出サンプリング層を1層とするものを厚み方向に3層並べたもの

プリシャワー検出器の3つの役割



1. 既存のCsI(Tl)の前に重くて応答の速い検出器を置くことにより、ビームバックグラウンド粒子の多くがCsI(Tl)に届かず、パイルアップを低減する
2. 厚み方向の分割により、1層毎にシャワー中の電子・陽電子の通過位置が分かるため、 γ 線の到来方向が分かる
3. 厚みが3放射長程度のプリシャワー検出器を想定すると、大半のエネルギーを失う。そのエネルギー損失を測定機能を持たせるために結晶シンチレーターを使用する

目次

1. 研究背景

2. 研究目的

3. 実験①、実験②

4. まとめ

研究目的

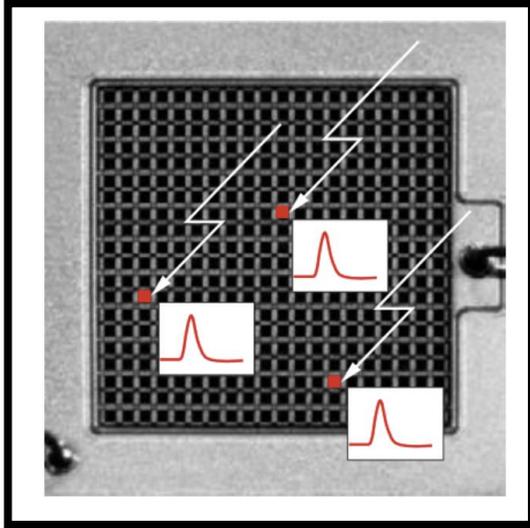
シンチレーターに光検出器を組み合わせたシンチレーションカウンターでの、入射した粒子のエネルギー損失により発生したシンチレーション光が光検出器の受光部に届く確率、集光効率には以下の要素で変化する

【様々な要因の例】 シンチレーターの屈折率や透明度表面の平滑性、該当する波長における反射材の反射率、光検出器の受光部面積や取り付け位置など

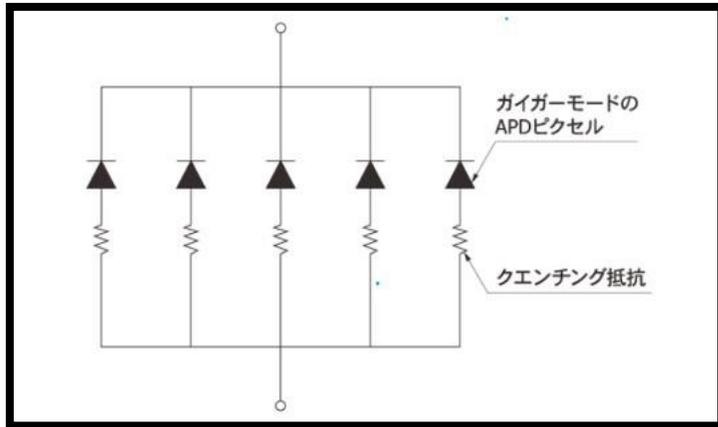


フォトンカウンティング能力のある光半導体検出器である浜松ホトニクス社製MPPCを使用して、BGOおよびFast-LGSOシンチレーターの読み出し光量を測定した

MPPC(Multi Pixel Photon Counter)



引用元:[MPPC \(SiPM\)・SPAD | 浜松ホトニクス \(hamamatsu.com\)](#)



引用元:[MPPC \(SiPM\)・SPAD | 浜松ホトニクス \(hamamatsu.com\)](#)

MPPCとは

- SiPMと呼ばれるデバイスの一種
- 基板の目に切ったピクセル1つずつが独立したガイガーモードAPDであるフォトカウンティングデバイス

<特徴>

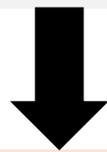
- 低電圧で動作し、高増倍率で低ノイズ、磁場の影響を受けない…など

<動作原理>

- 多数のAPDピクセルが並列に接続
- APDはガイガーモードで動作
- 各ピクセルの出力の和で光子数を測定

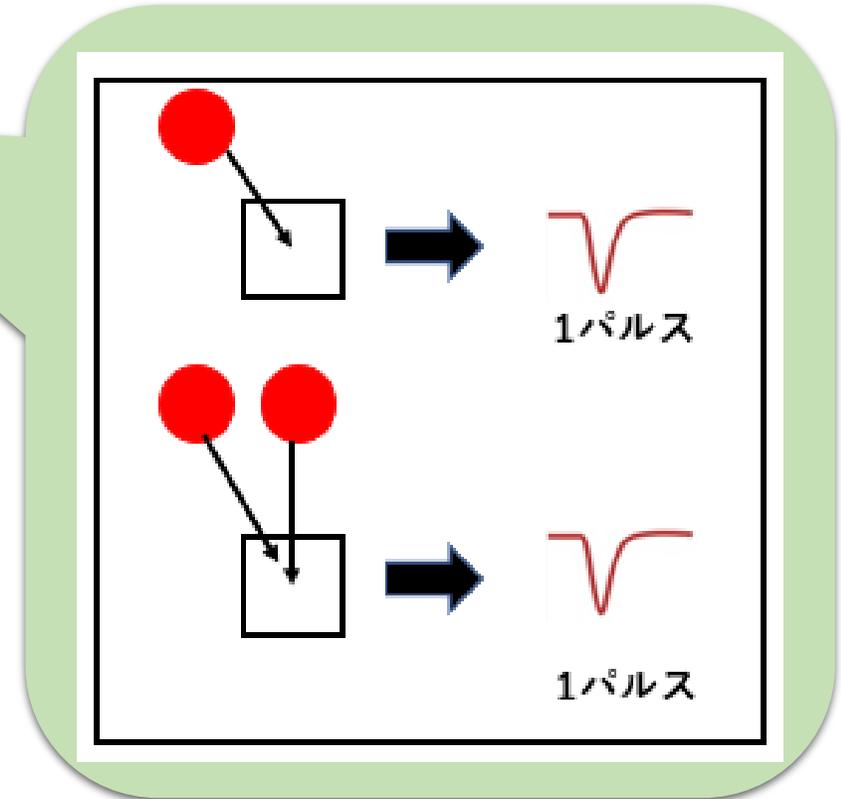
<MPPCのピクセルの特徴>

- 各ピクセルからの出力パルス数は必ず1つ
→ピクセルに光子が複数個入射した場合も
出力パルスは1つ
- 入射光子数が全ピクセル数に対して
少ない場合、
「入射光子数」 = 「反応したピクセル数」

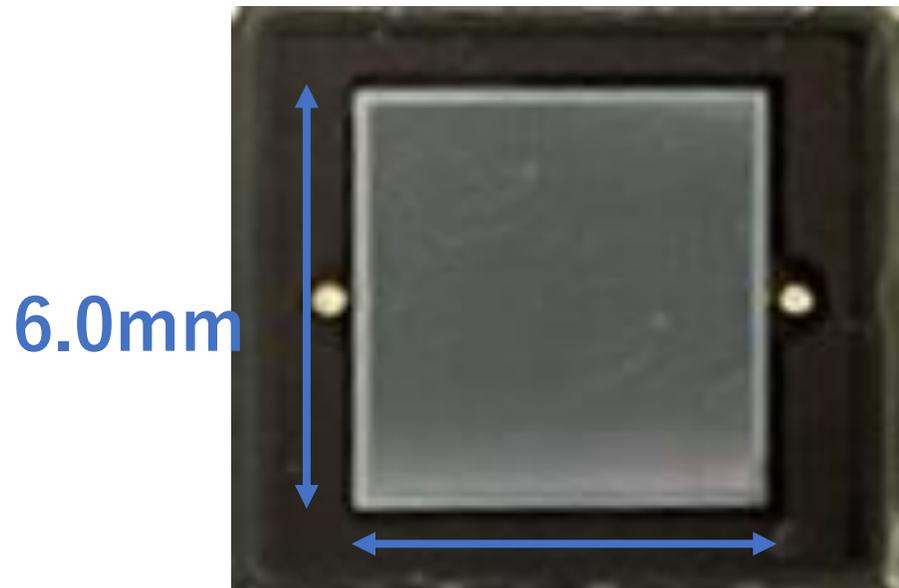
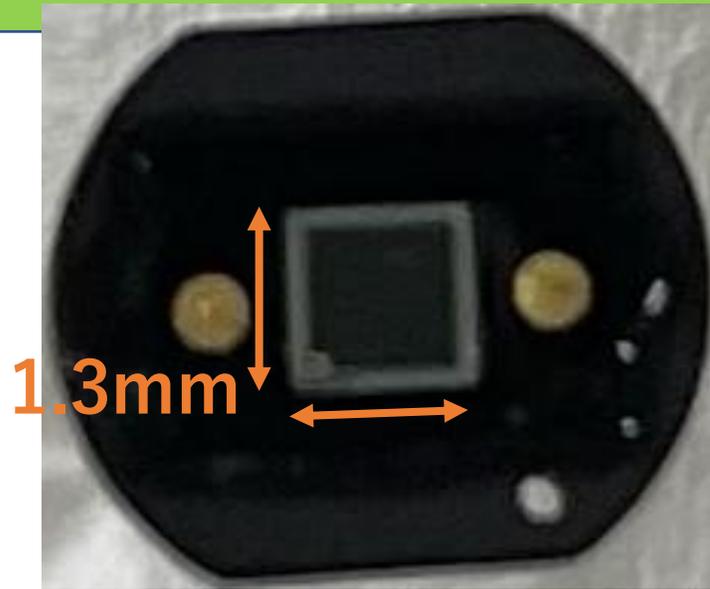


入射光子数が全ピクセルに対して多い場合、
「入射光子数」 \neq 「反応したピクセル数」

結果については、入射光子数 = 反応したピクセル数となる条件が成り立っているか考察する。



<使用したMPPC>



型番	S13360-1375CS	S13360-6050CS
ピクセル数	285	14400
有効受光面サイズ (mm ²)	1.3×1.3	6.0×6.0
ピクセルピッチ (μm)	75	50
開口率 (%)	82	74
最大感度波長 (nm)	450	
降伏電圧 (V)	51.01(at 25°C)	51.69(at 25°C)
増倍率	4.0×10 ⁶	1.7×10 ⁶

電子雪崩の形成が
可能になる電圧

目次

1. 研究背景

2. 研究目的

3. 実験①、実験②

4. まとめ

① MPPC光検出器の基礎特性測定

- ・ 電圧を変化させてMPPCの特性である増倍率を調べる
- ・ MPPC1mm角と6mm角の入射光子数の絶対値を測定&推定

② 結晶シンチレータ+MPPCによる ^{137}Cs の γ 線を用いた 入射フォトン数の測定



- ・ シンチレータの発光でMPPCの受光面に入射する光子数
- ・ (減衰時間)
- ・ (エネルギー分解能)

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
- 3. 実験①、実験②**
4. まとめ

概要①-1 電圧と増倍率の関係

1.3mm角MPPC



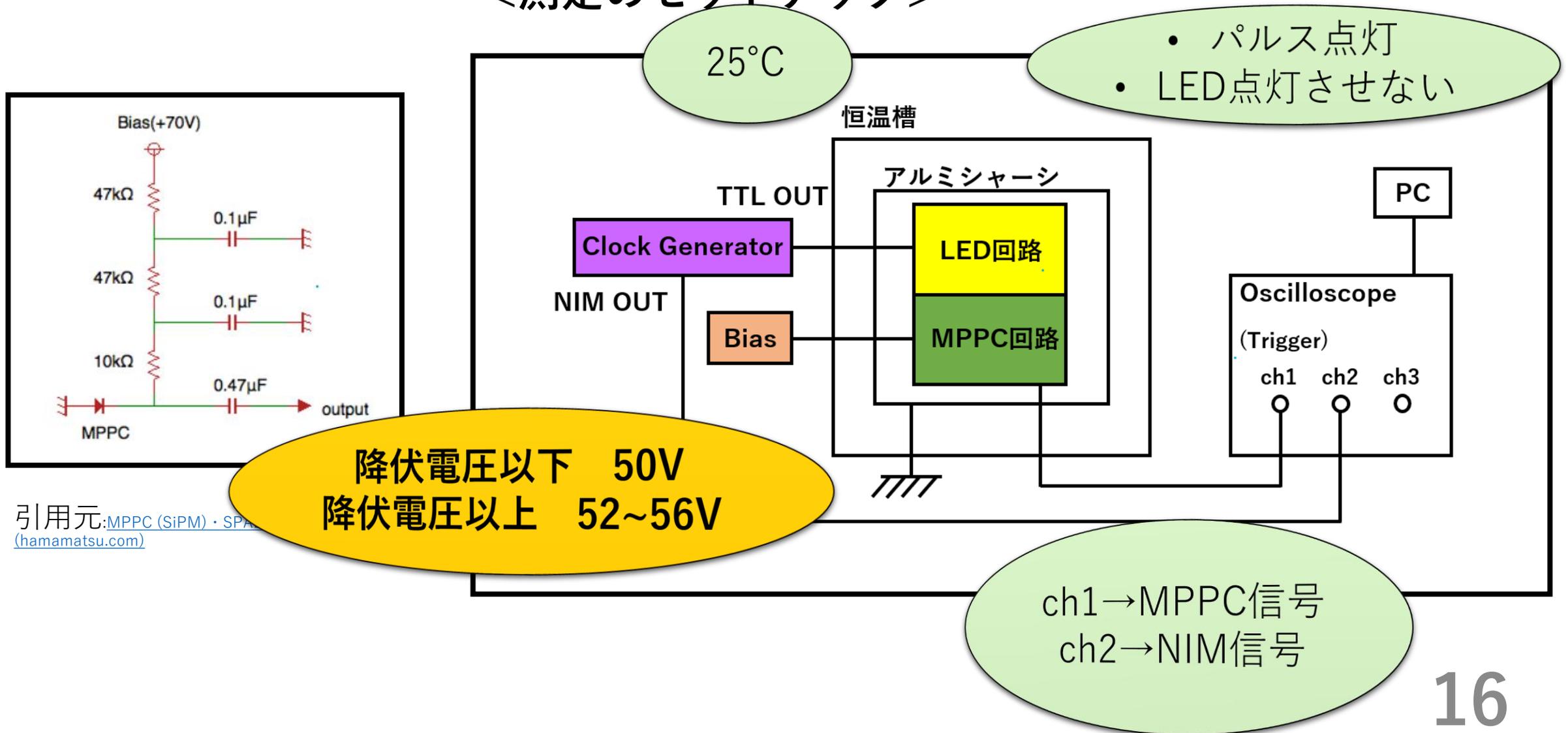
LEDをパルス点灯



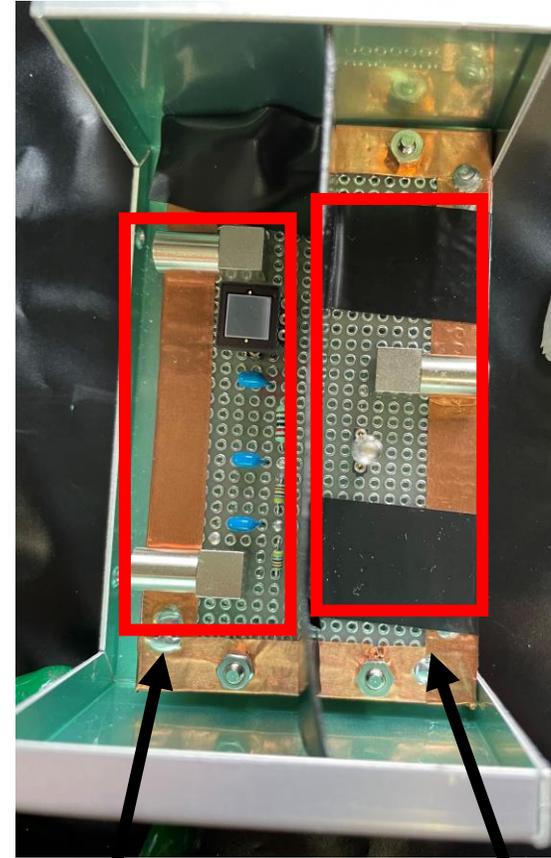
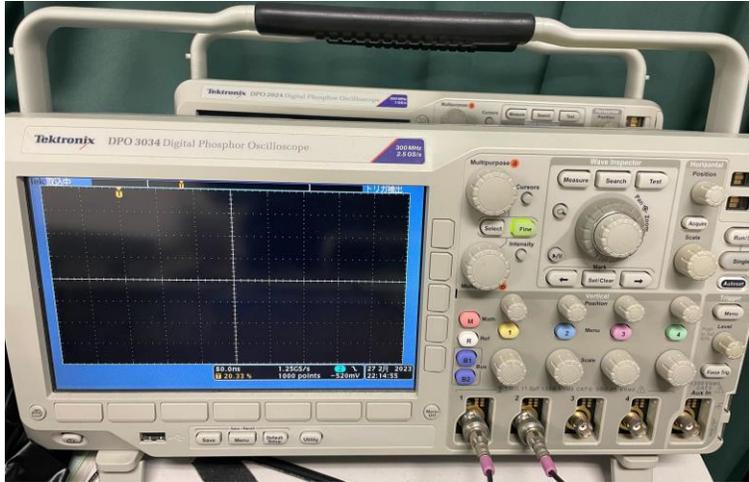
**MPPCの特性である増倍率を求め、
MPPCの性質と扱いに慣れる**

方法① 電圧と増倍率の関係(1.3mm角)

<測定のセットアップ>



方法① 電圧と増倍率の関係(1.3mm角)



MPPPC回路

LED回路



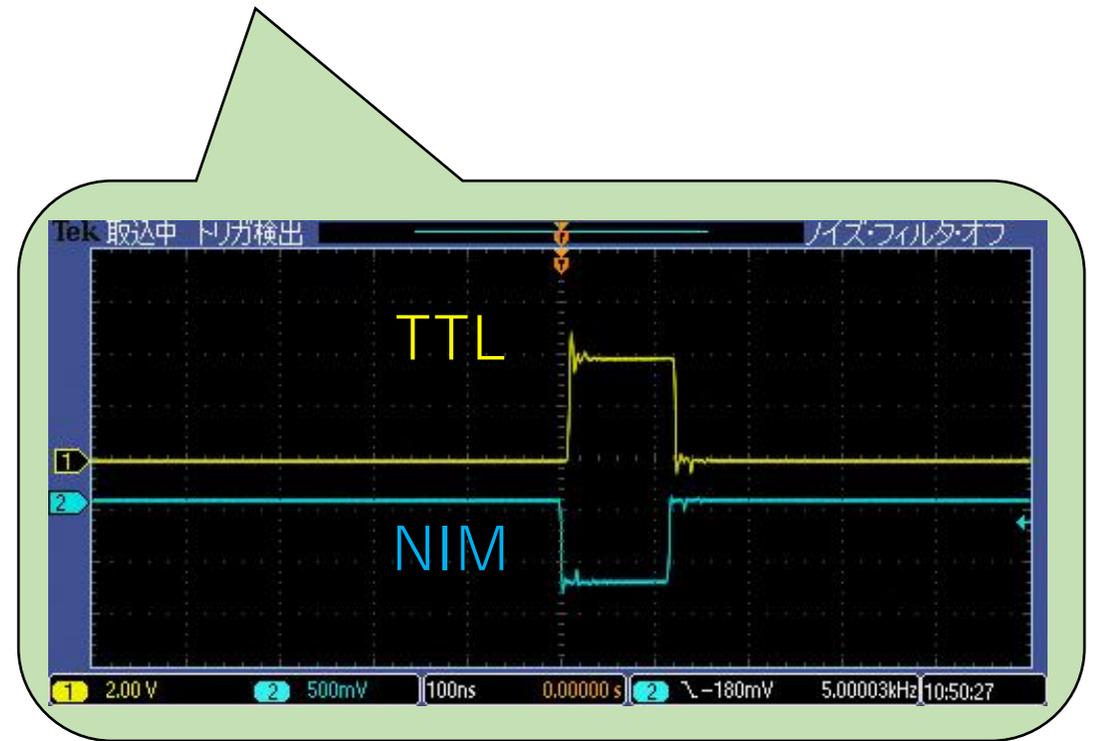
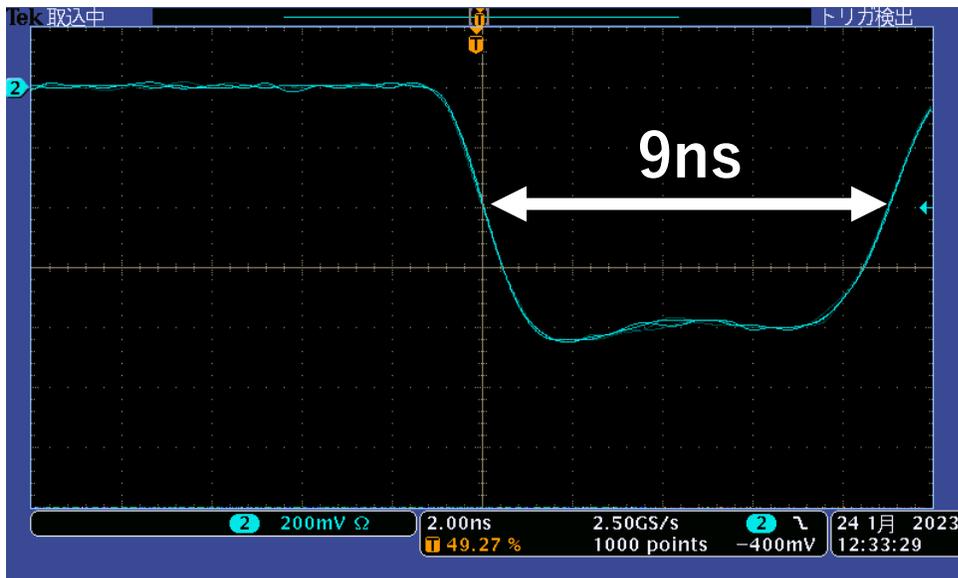
Clock Generatorの幅と周波数

<Clock Generator>

- クロック周期設計の論理回路が動作するときに複数の回路間でタイミングを合わせるために使用され、電圧が高い状態と低い状態を周期的にとる信号を出すモジュール

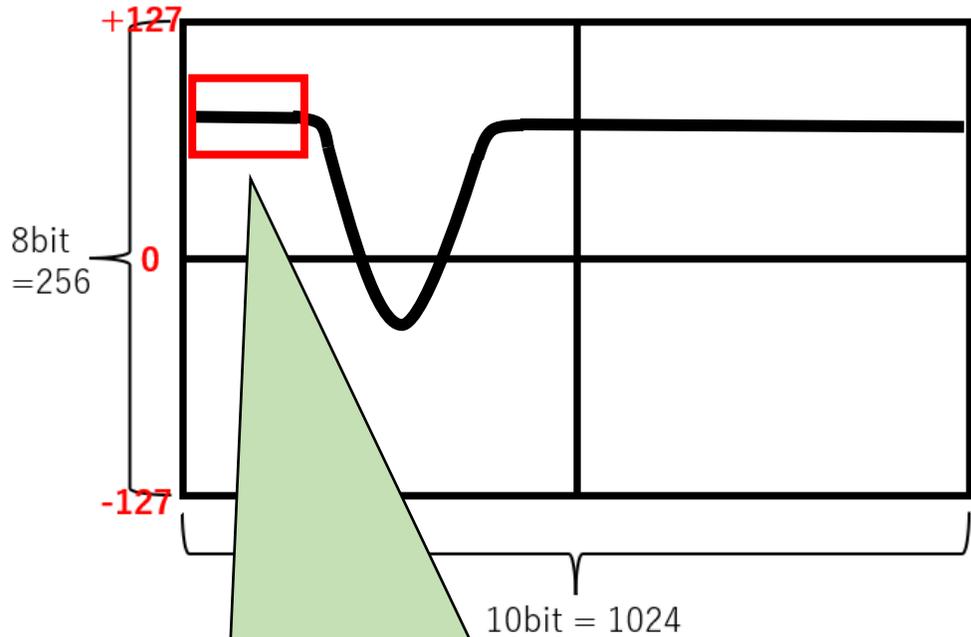


周波数 (Hz)	10
幅 (ns)	9



信号電荷分布の求め方 1

<オシロスコープの画面の様子>



- 横軸のデータを**1000点**ブロックでデータ転送される
- 赤い部分=信号パルス立ち上がり以前のデータの平均値をゼロ点とする

信号電荷はアナログ値(電圧)からデジタルオシロスコープによりデジタル化(8ビット整数に変換)したデータを積分して得る。

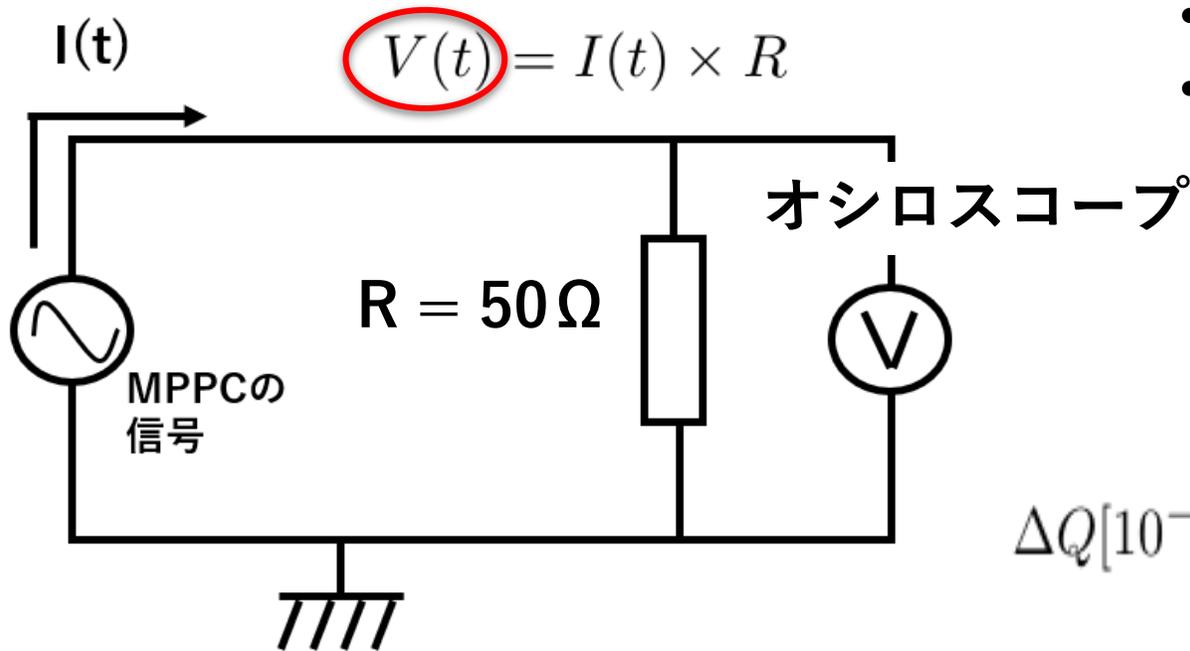
V_{ped} をゼロ点の平均値とすると、信号のデータとゼロ点の差は $V_i - V_{ped} = \Delta V_i$

縦軸 : 5mV/div
横軸 : 80ns/div

$$\begin{aligned} Q &= \sum_i \Delta Q_i \\ &= \sum_i I_i \times \Delta t \\ &= \sum_i \frac{\Delta V_i}{R} \times \Delta t \end{aligned}$$

信号電荷分布の求め方 2

<信号見る時の等価回路>



縦軸 : 5mV/div
横軸 : 80ns/div

- 8bit整数値 × 電圧/256 = ΔV
- 1000点ブロックの時間間隔 = Δt
- レモケーブルの特性インピーダンスが50Ω
→ オシロスコープの終端抵抗も50Ω

$$\Delta Q = \frac{\Delta V \times \Delta t}{R}$$

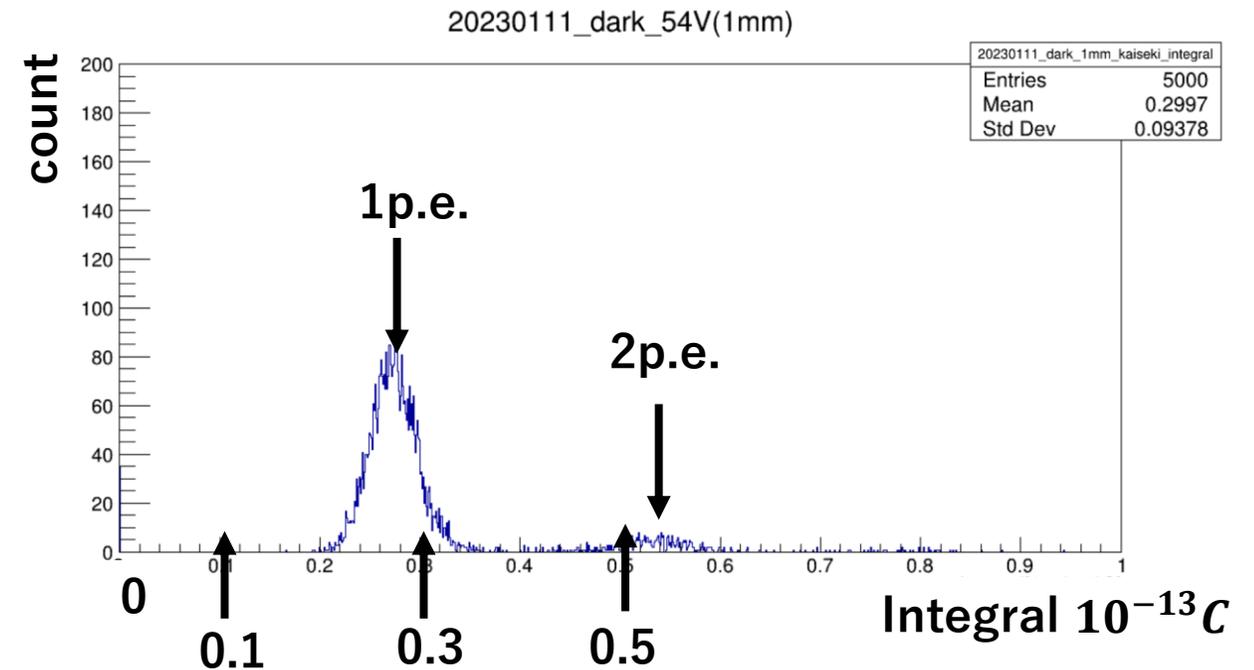
$$\Delta Q [10^{-13} \text{C}] = \frac{\text{整数値} \times \frac{5[\text{mV/div}] \times 8[\text{div}]}{256} \times \frac{80[\text{ns/div}] \times 10[\text{div}]}{1000}}{50[\Omega]}$$

$$= \frac{\text{整数値} \times \frac{5 \times 8}{256} [\text{mV}] \times \frac{80 \times 10 \times 10}{1000} [10^{-10} \text{s}]}{50[\Omega]}$$

結果① ダークパルス(1.3mm)

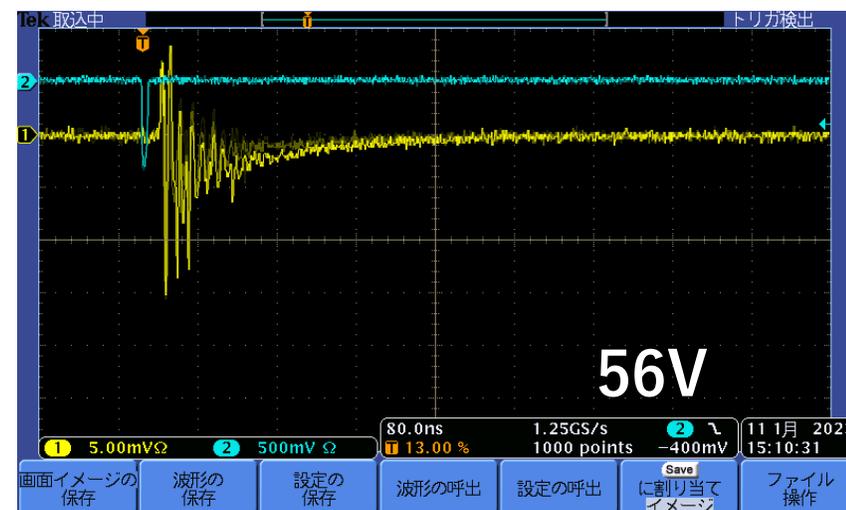
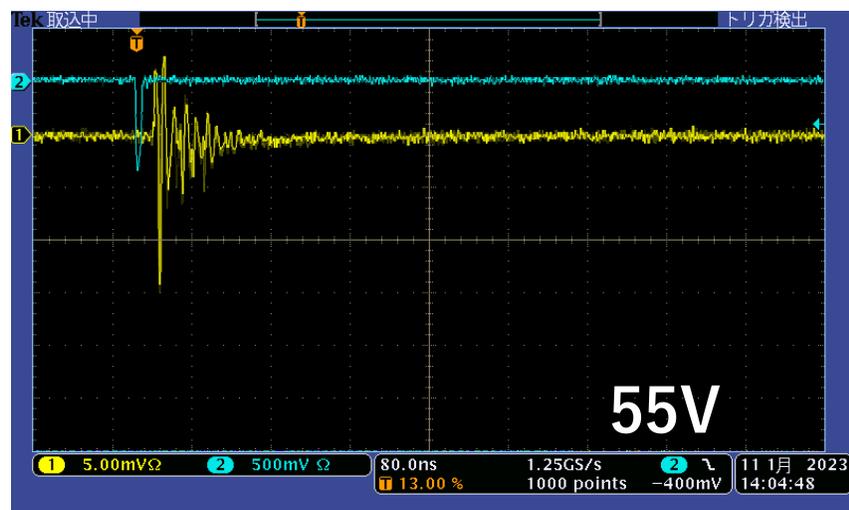
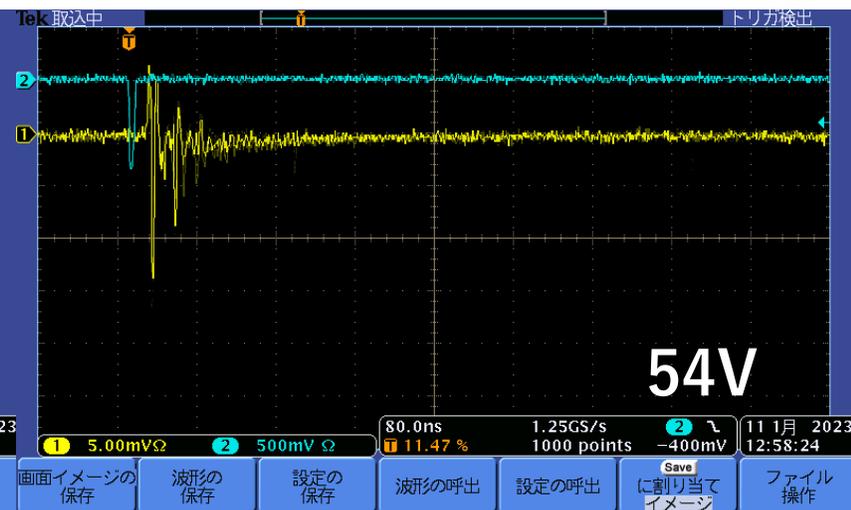
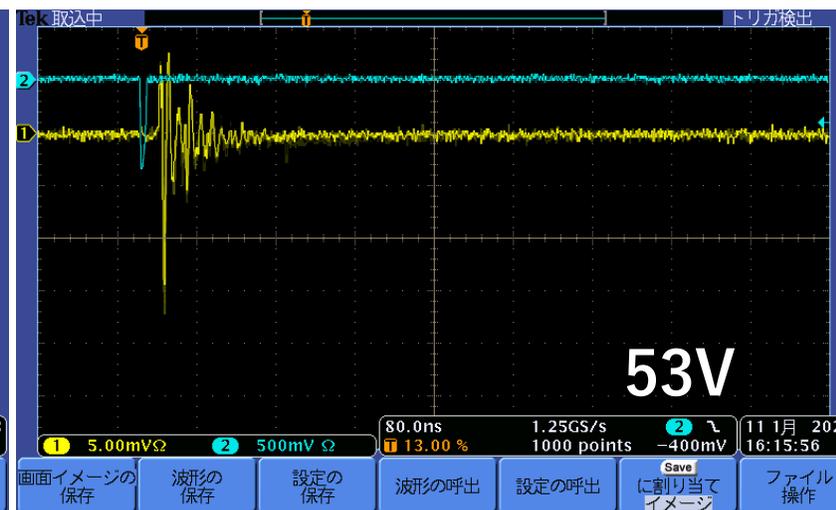
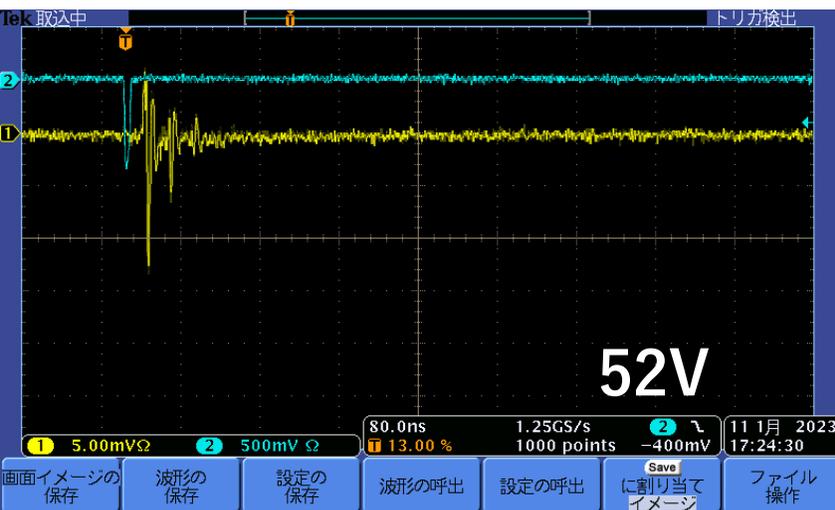
<ダークパルス>

暗黒環境下で室温に半導体を置いているため熱励起による電子正孔対が発生し、それがガイガーモードで増幅され、信号パルスとして検出されるもの



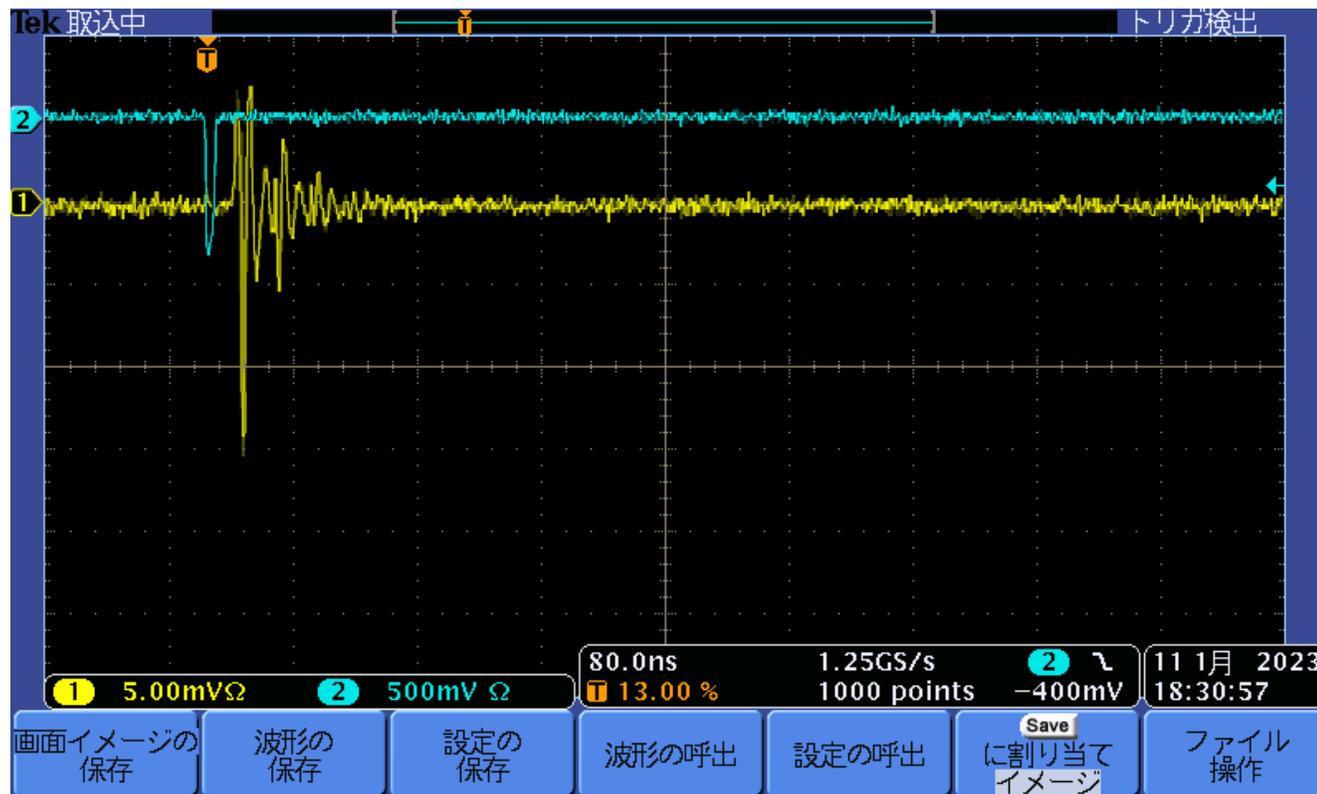
結果① LED点灯時の波形の様子

<降伏電圧以上 52V~56V>



結果① 電圧と増倍率の関係(1.3mm角)

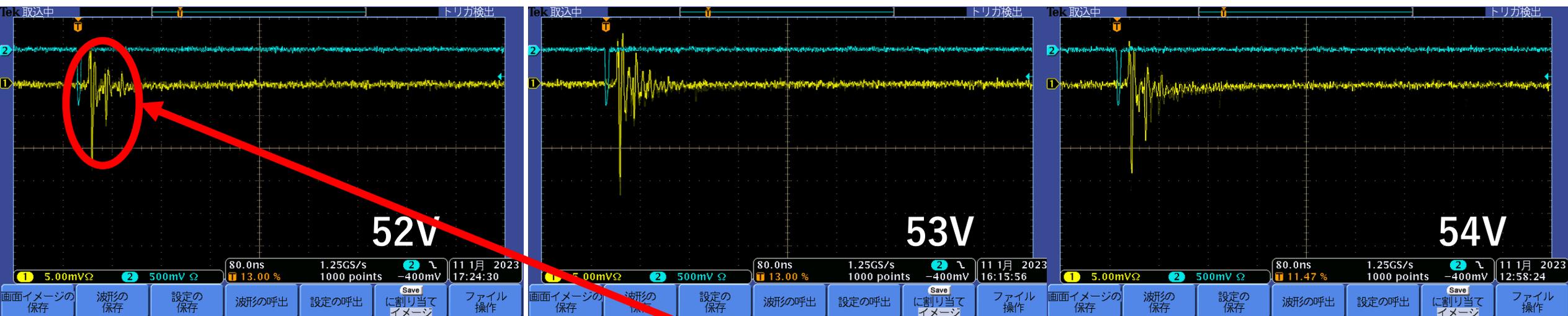
<降伏電圧以下 50V>



降伏電圧以下=電子雪崩形成起きない電圧
LEDを点灯させるパルスの影響が見える

結果① LED点灯時の波形の様子

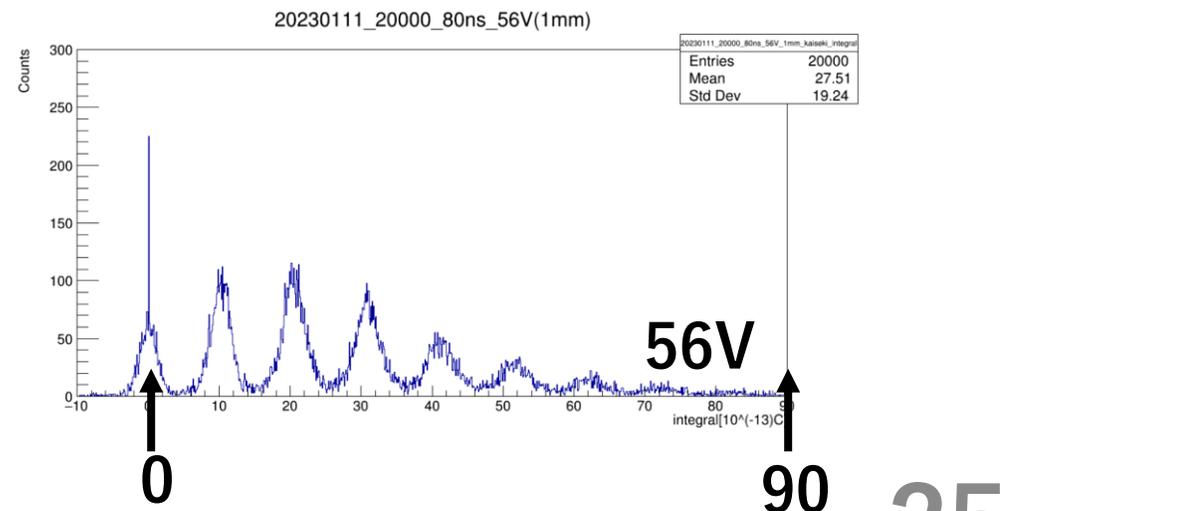
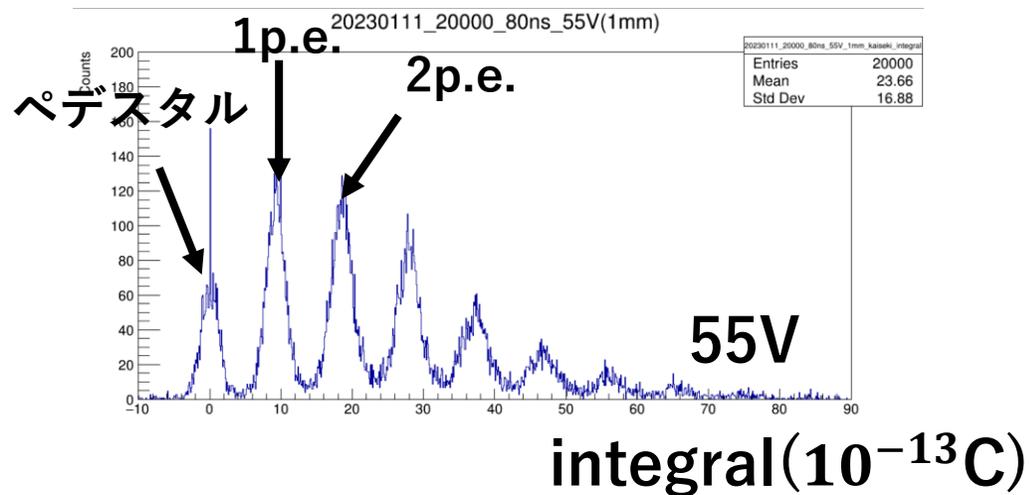
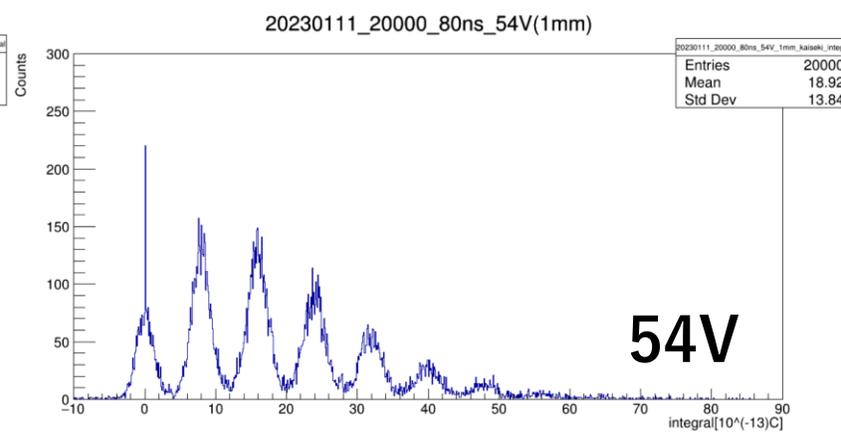
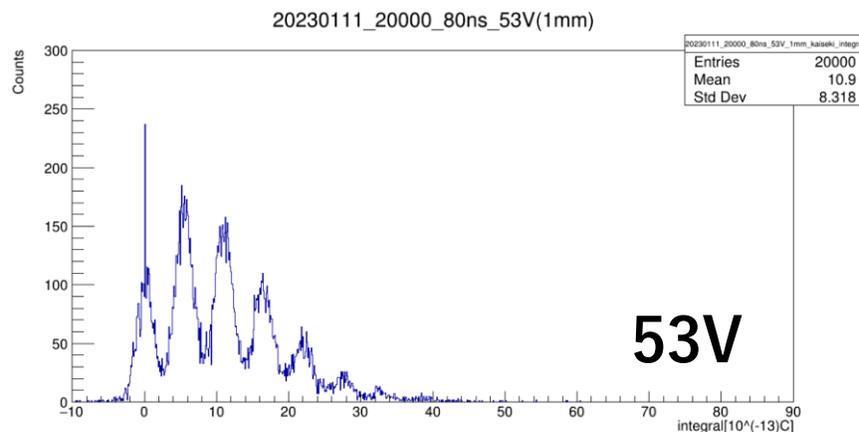
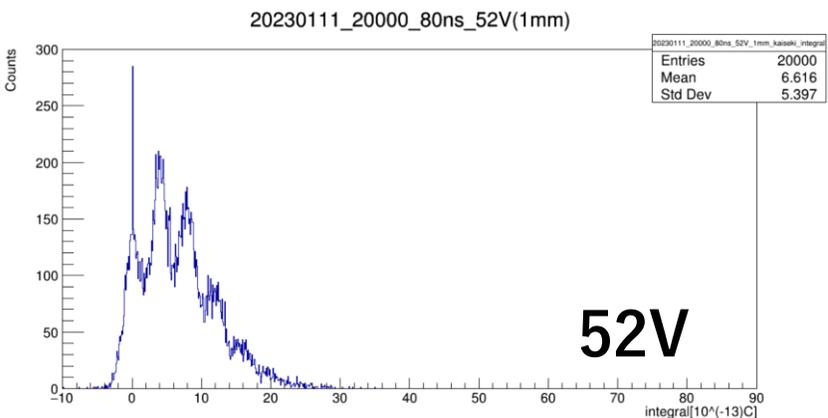
<降伏電圧以上 52V~56V>



降伏電圧を上回る電圧をかけても、LEDを点灯させるパルスの影響が大きく見え、MPPCのが信号が分かりにくい
→積算して信号電荷の分布で見してみる。

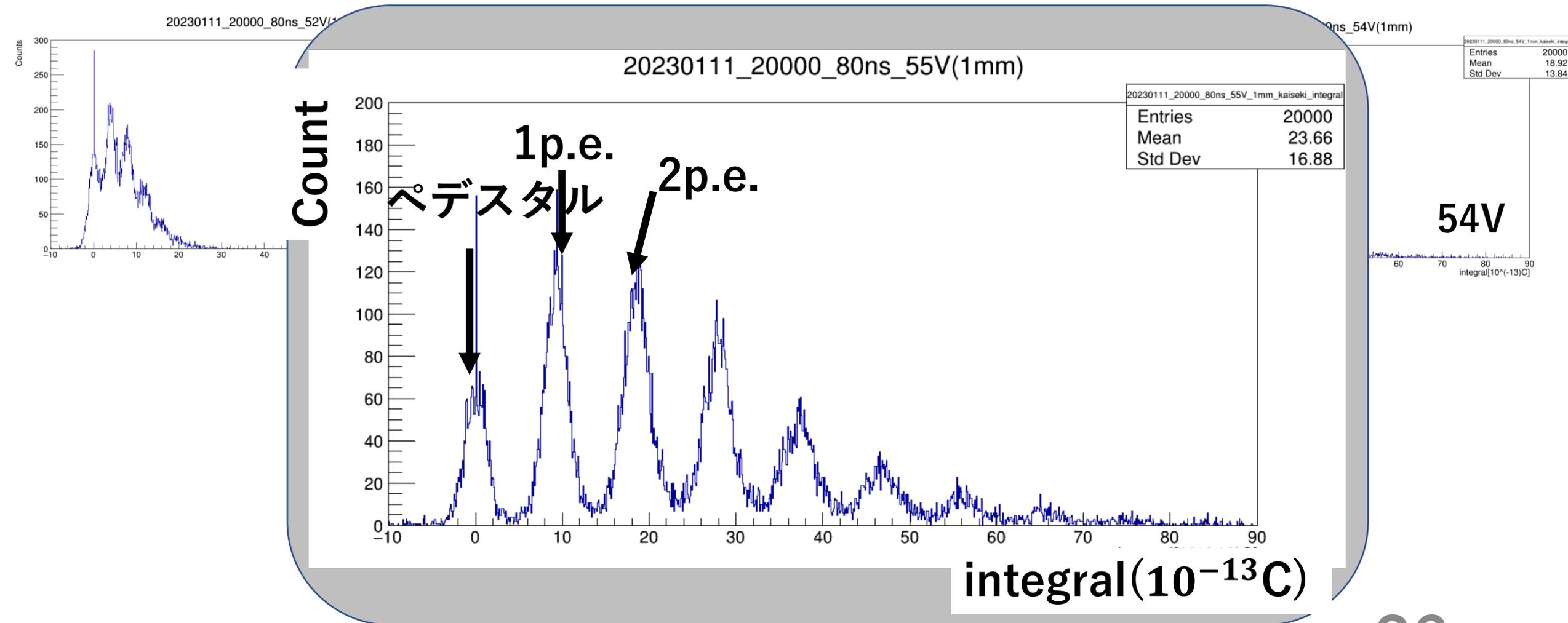
結果① LED点灯時の信号電荷分布の様子

<52V~56V> 横軸：integral(10^{-13} C)、縦軸：イベント数



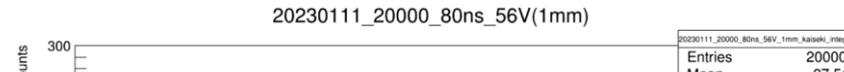
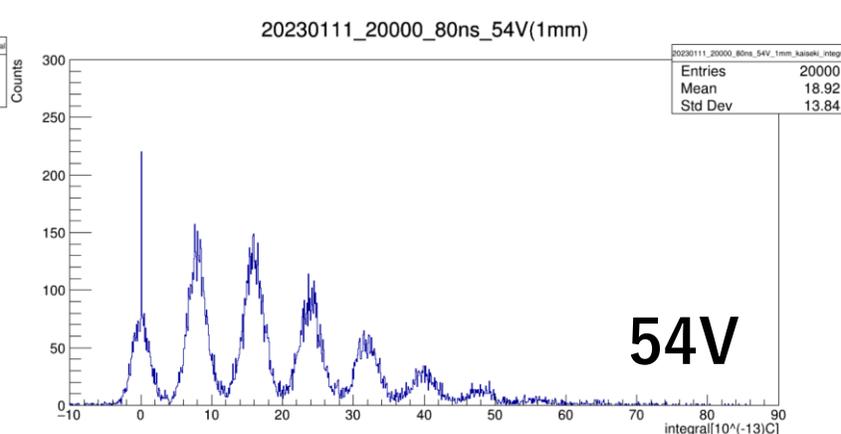
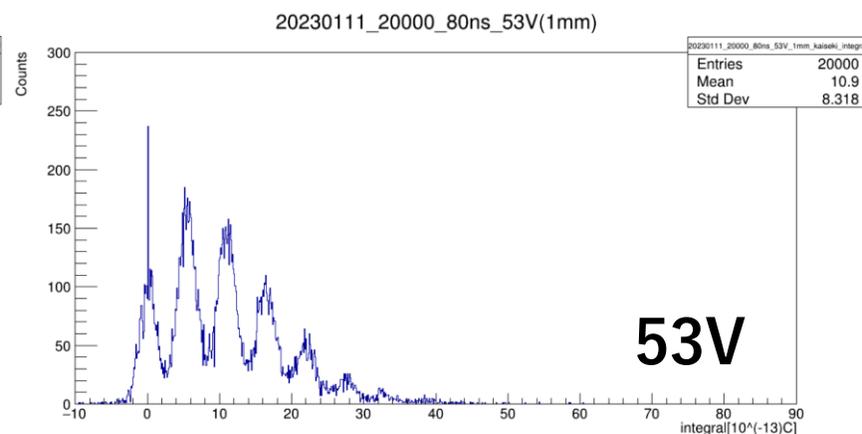
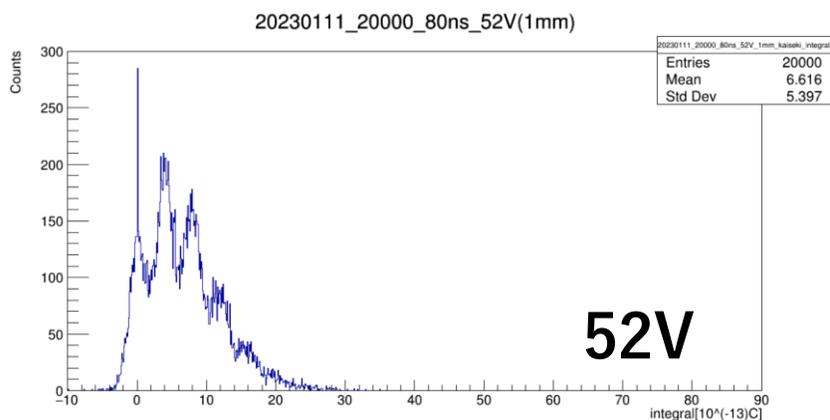
結果① LED点灯時の信号電荷分布の様子

<52V~56V> 横軸：integral(10^{-13} C)、縦軸：イベント数



結果① LED点灯時の信号電荷分布の様子

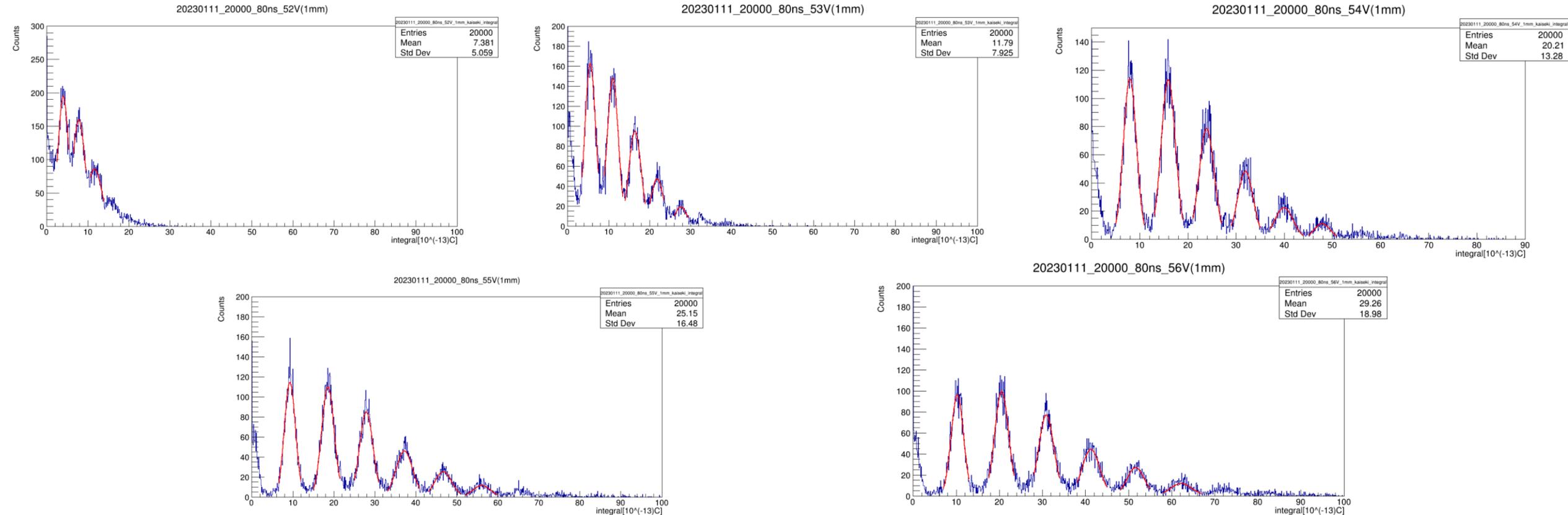
<52V~56V> 横軸：integral(10^{-13} C)、縦軸：イベント数



- 信号電荷分布で見ると、検出フォトン数に応じた離散的な分布を確認できる
- 電圧が上がるにつれて二つのピーク間の大きさが大きくなる

ガウスFit

横軸：integral(10^{-13}C)、縦軸：イベント数



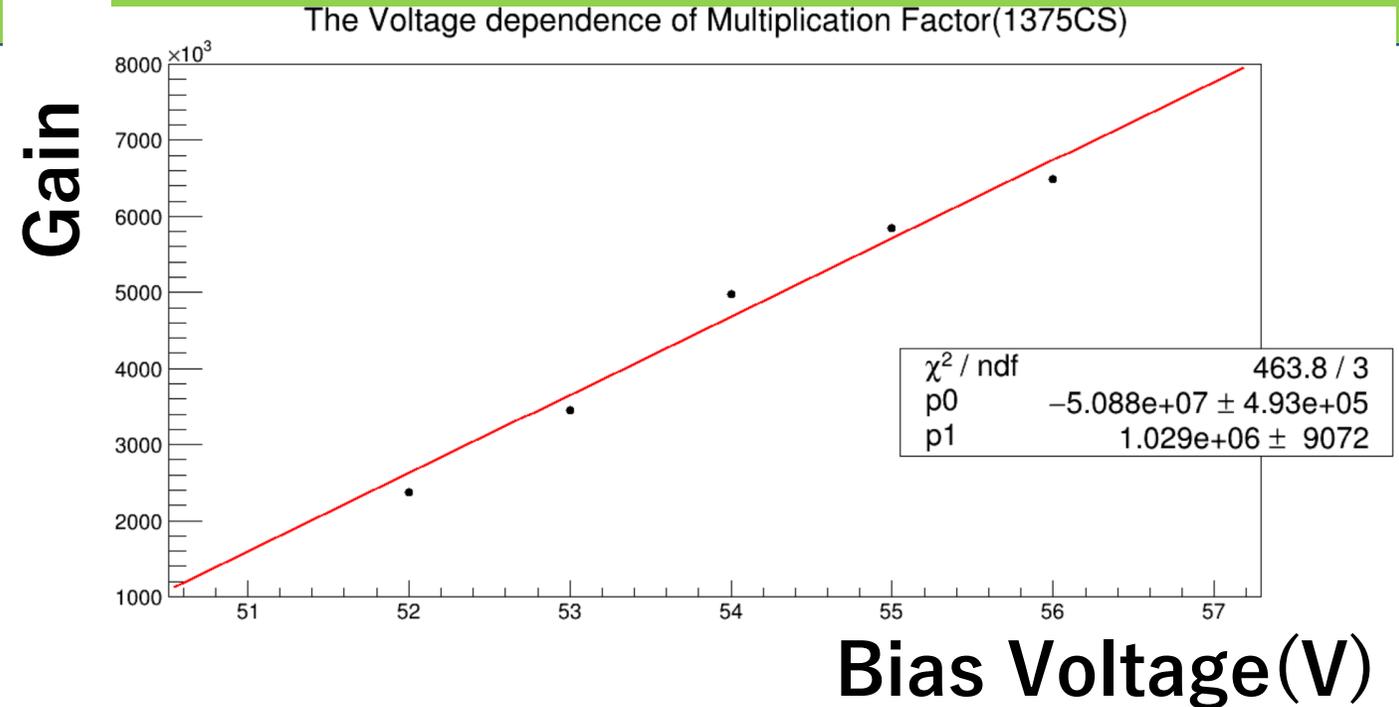
分布のピーク値を知るために、ガウス分布でFitする

結果① 電圧と増倍率の関係(1.3mm角)

<増倍率の計算結果>

$$\text{増倍率} = \frac{\text{2つのピークの電荷量の差}}{\text{電荷素量}}$$

電圧(V)	増倍率(10^6)
52	2.4
53	3.4
54	4.9
55	5.8
56	6.5



- カタログ(25°C、54V)の増倍率 4.0×10^6 と近い値をとる
- 電圧を上げるとほぼ直線的に増倍率が上昇する

計算方法① 検出フォトン数の平均値

<計算方法>

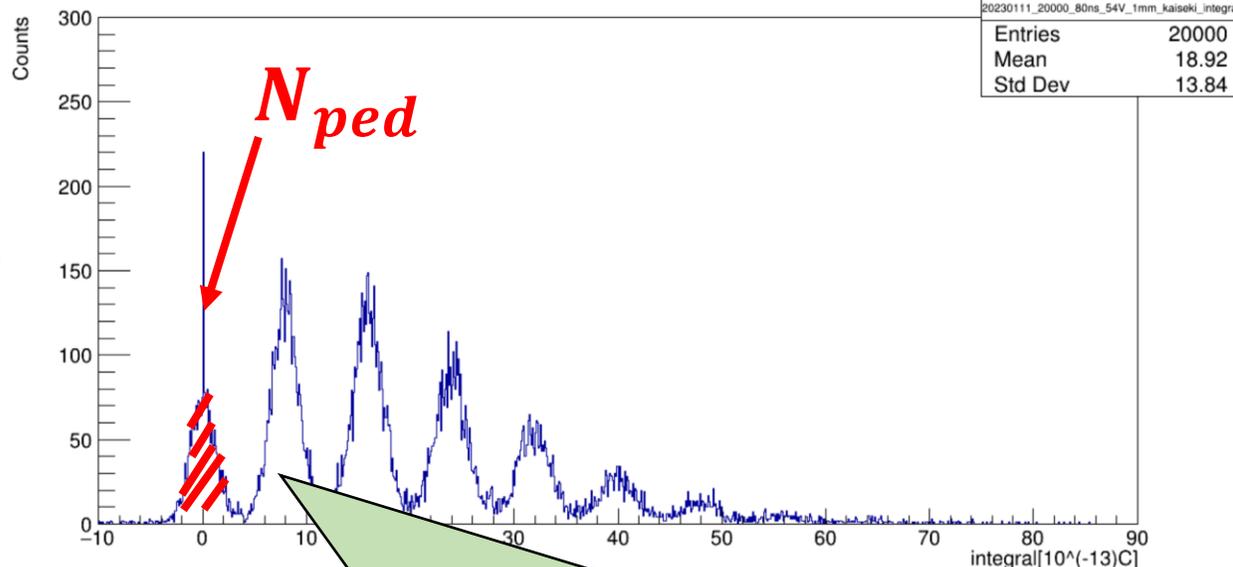
信号電荷分布が離散的なグラフならば、
MPPCの検出フォトン数を平均値にもつ
ポアソン分布に従う

$$P(k) = \frac{\mu^k e^{-\mu}}{k!}$$

$$P(0) = e^{-\mu} = \frac{N_{ped}}{N_{tot}}$$

$$\mu = -\ln(P(0))$$

$$= -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right)$$



N_{ped} : パルス光計測時の 0p.e.イベント数
 N_{tot} : パルス光計測時の全イベント数

$$\text{検出フォトン数 (平均)} = -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right)$$

離散的な信号電荷分布から
検出フォトン数の平均値が分かる

計算結果① 1.3mm角の検出フォトン数(平均)

(a)
 検出フォトン数(平均) = $-\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right)$

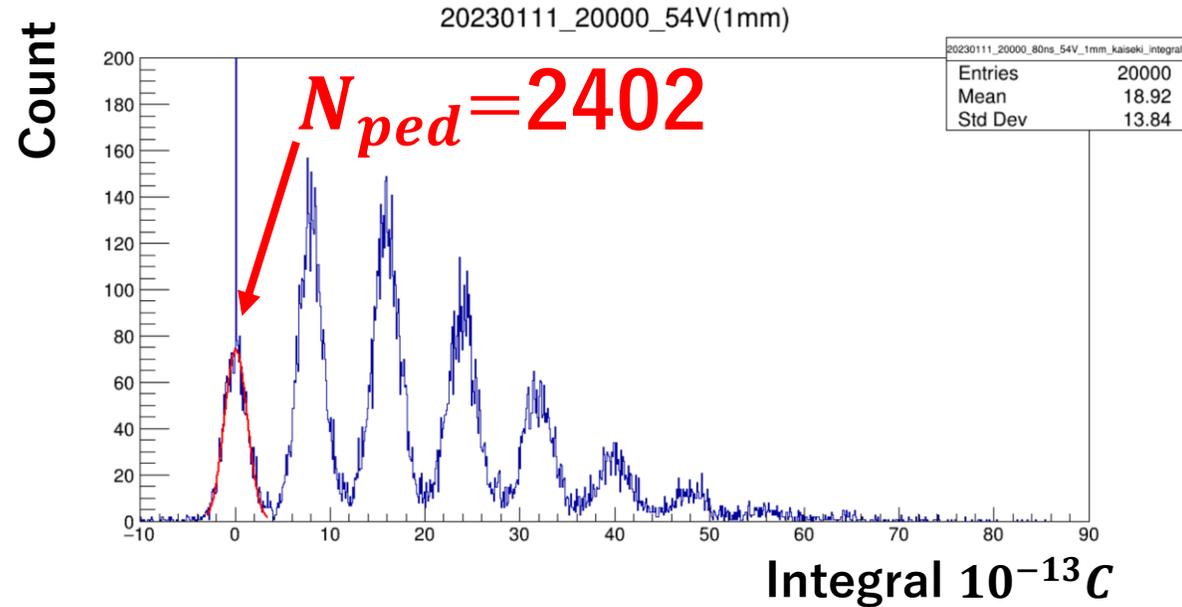
検出効率(Photon Detection Efficiency : PDE)

1.3mm角 50%

幅 : 9 ns
 周波数 : 10Hz

(b)
 $PDE = \frac{\text{検出フォトン平均数}}{\text{入射フォトン数}}$

- ① (a)にNpedとNtotに代入
 →検出フォトン数の平均を求める
- ② 1.3mm角のPDE50%を(b)に代入
 →入射フォトン数を求める



	検出フォトン数(平均値)	入射フォトン数(平均値)
1.3mm角	① 2.12	② 4.24

概要①-2 6.0mm角における入射光子数

離散的なグラフ

1. 1.3mm角MPPC + LED点灯

LEDを光らせるための
クロックジェネレータ

幅 (ns)	6
周波数 (Hz)	10



検出光子数(平均)から入射光子数

離散的なグラフでない

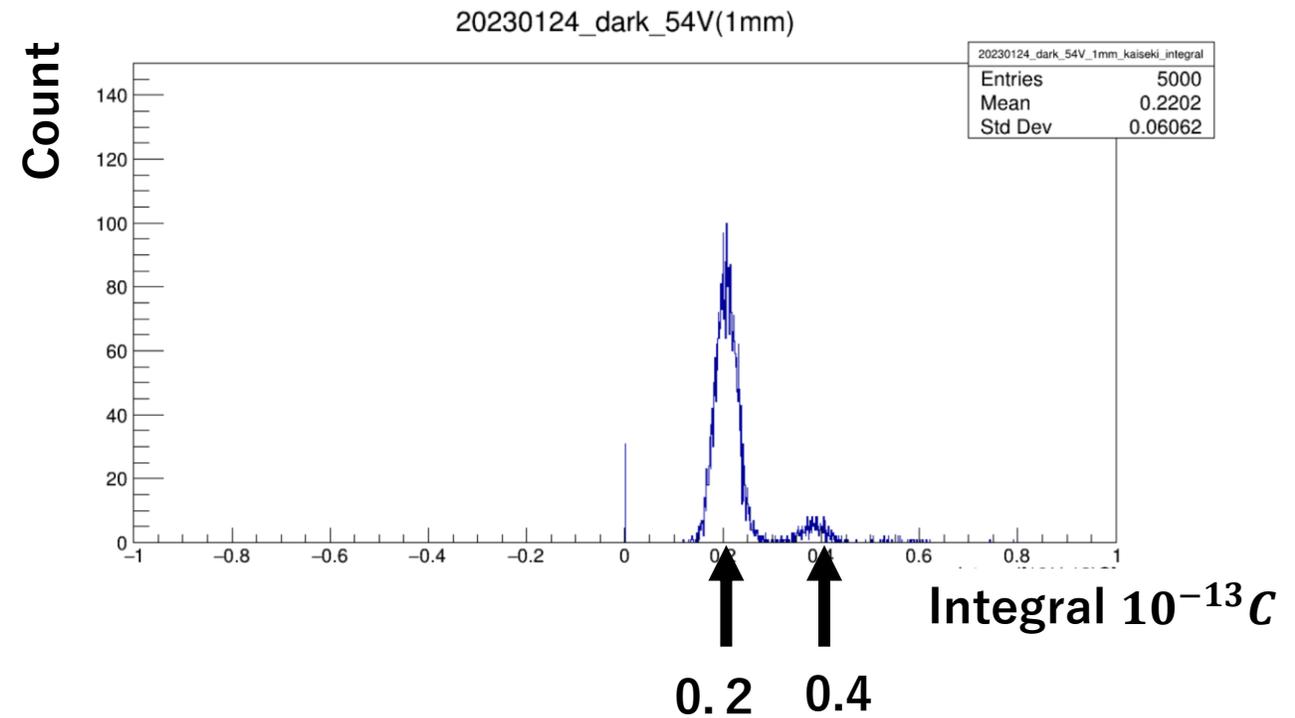
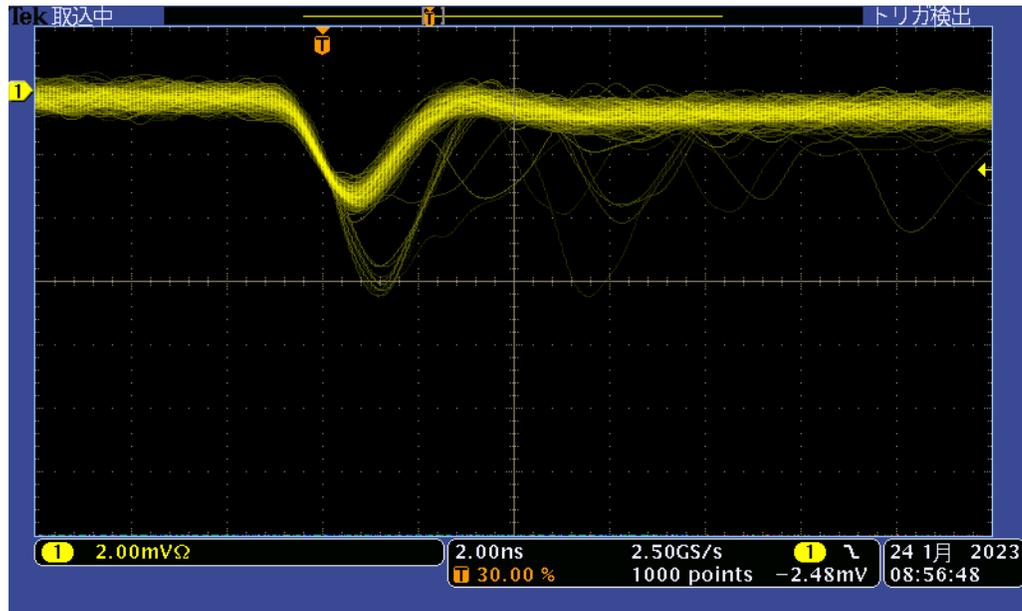
2. 6.0mm角MPPC + LED点灯(上と同条件)



入射光子数から検出光子数(平均)

結果① 1.3mm角のダークパルス

<暗黒環境下>

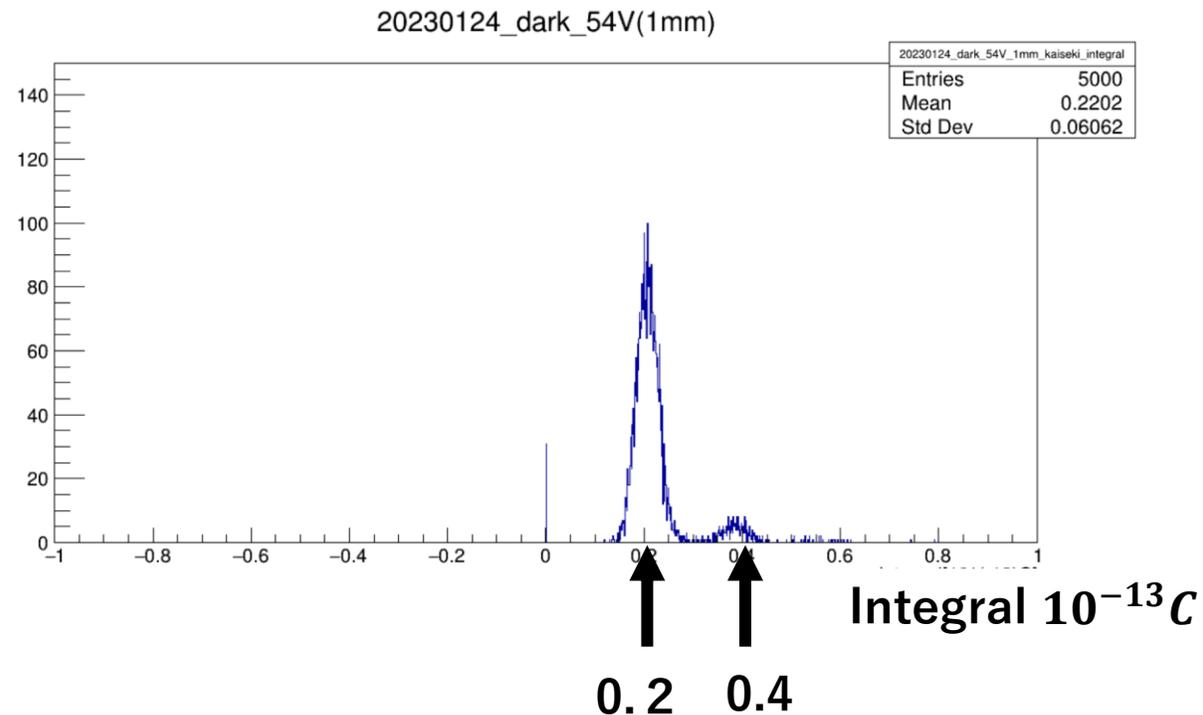
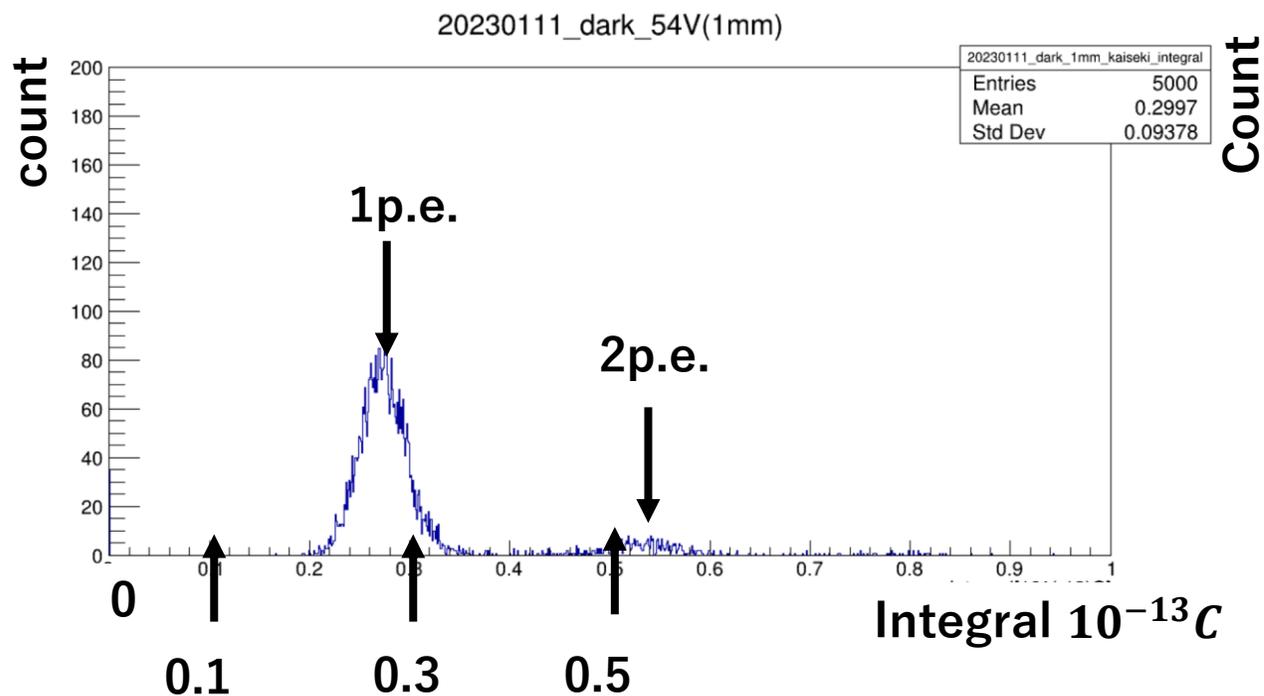


結果① 1.3mm角のダークパルス

<暗黒環境下>

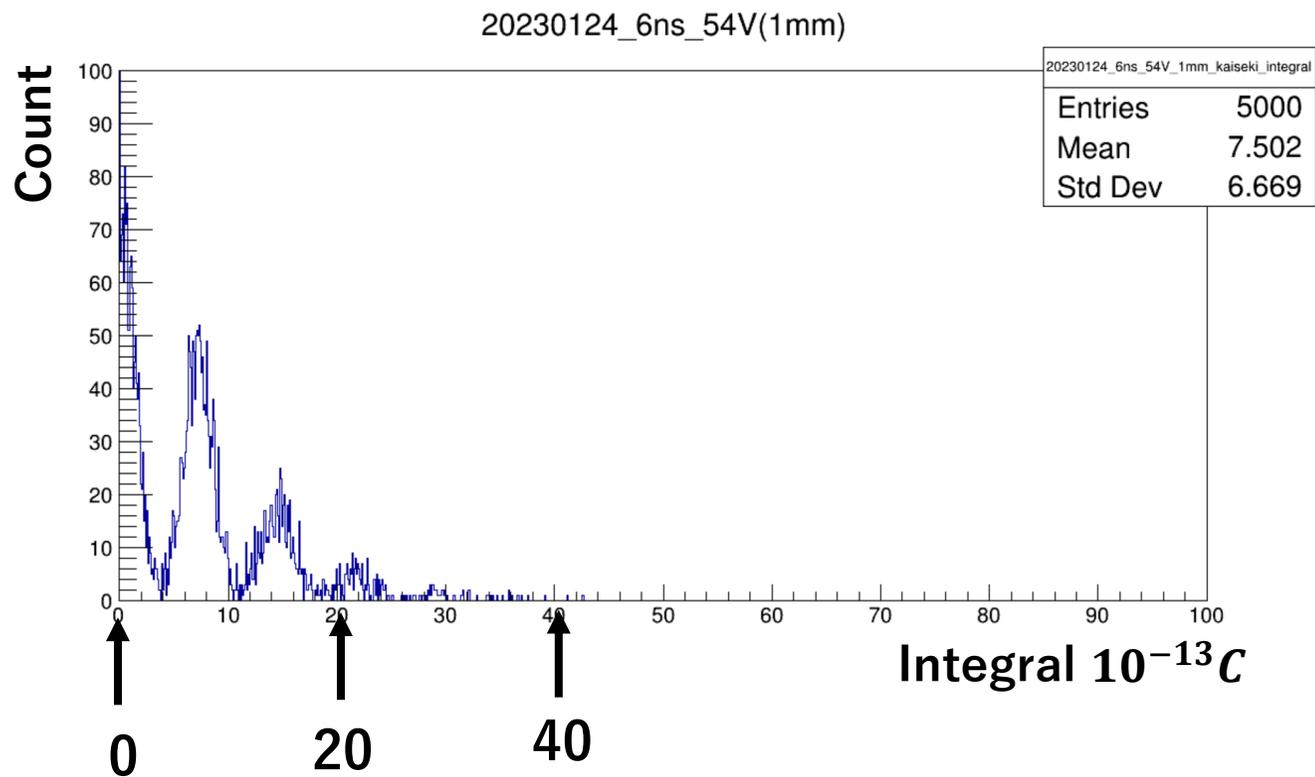
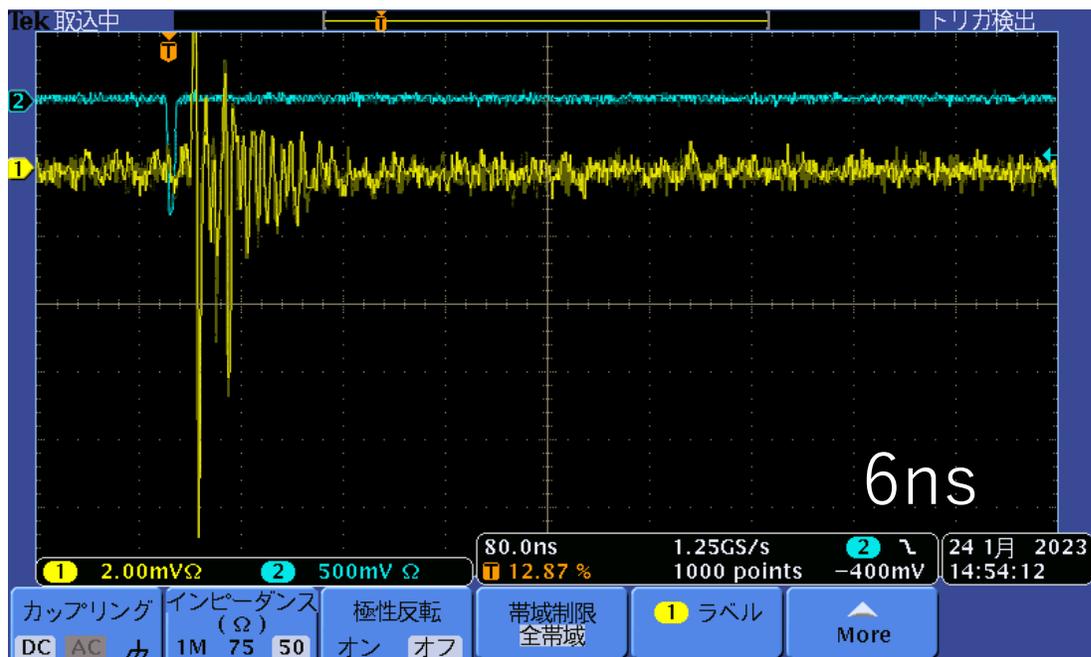
幅：6ns
周波数：10Hz

幅：9ns
周波数：10Hz



結果① 1.3mm角

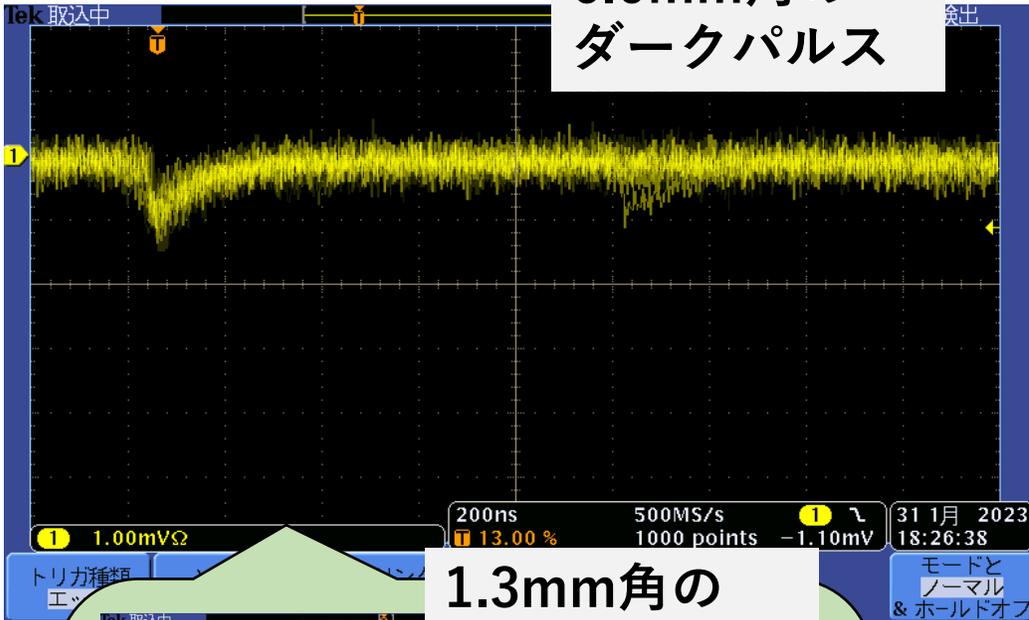
<LED点灯時>



結果① 6.0mm角のダークパルス

<暗黒環境下>

6.0mm角の
ダークパルス

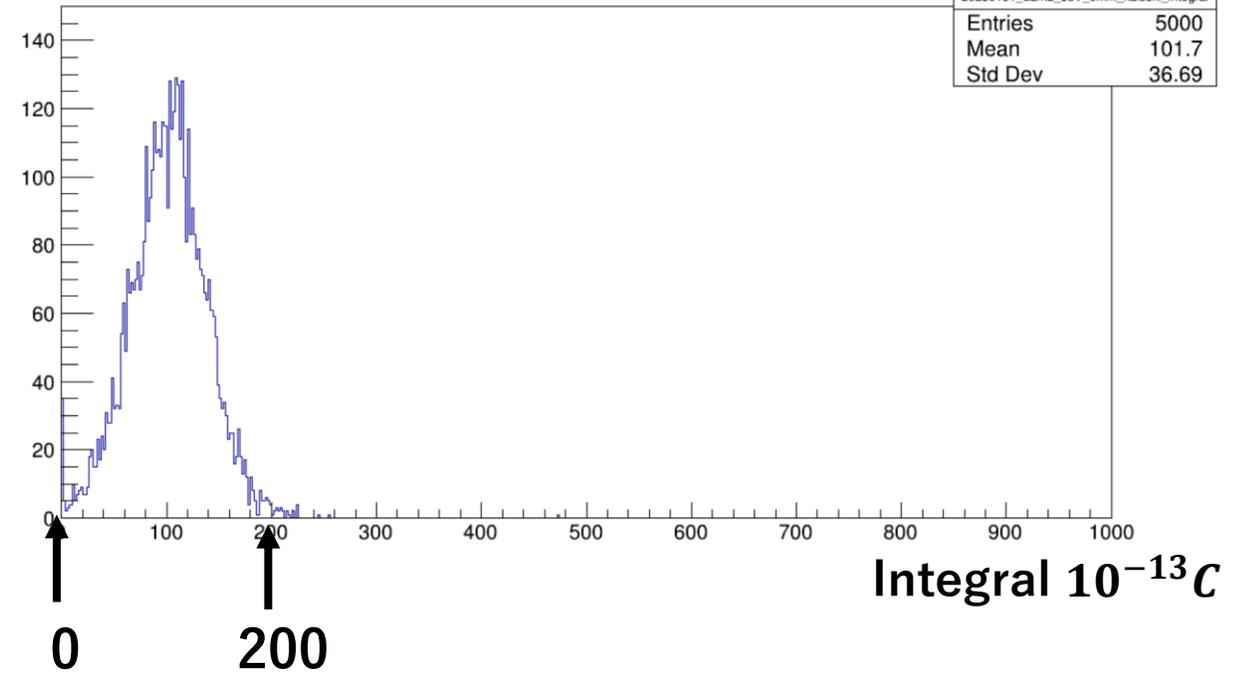


1.3mm角の
ダークパルス



20230131_dark2_55V(6mm)

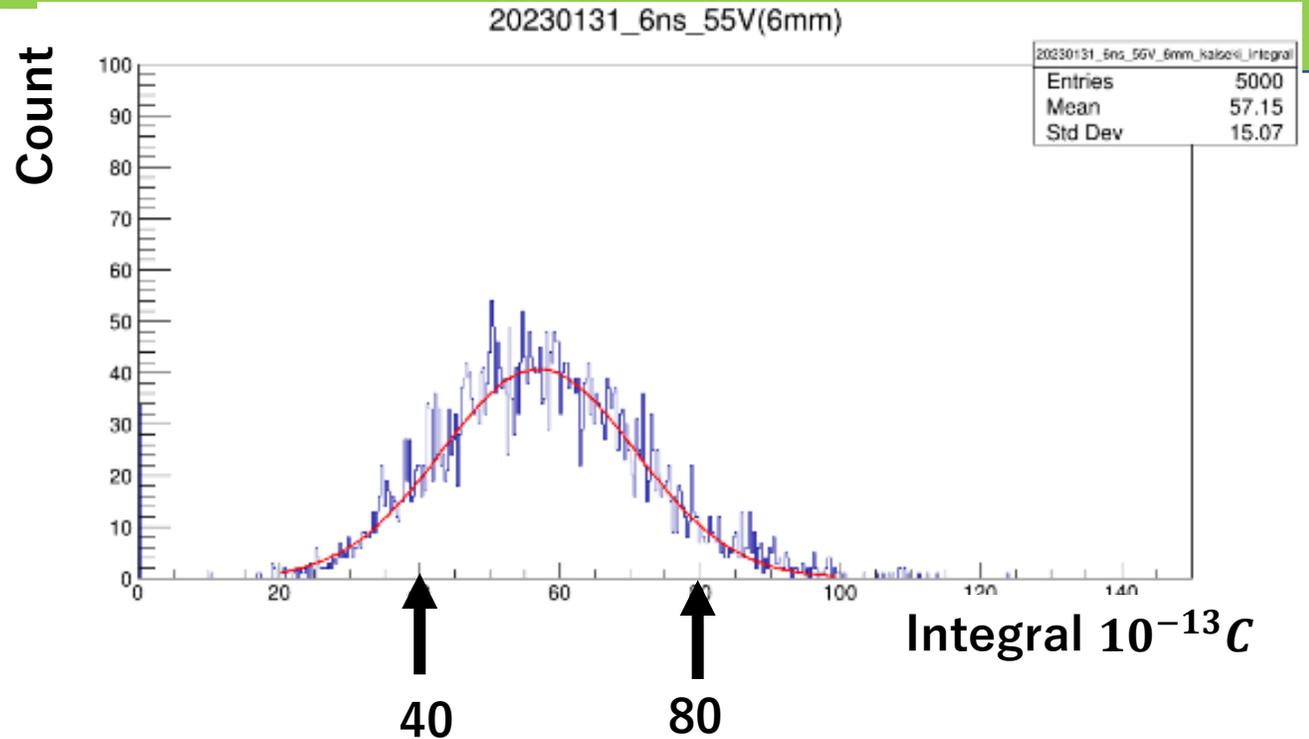
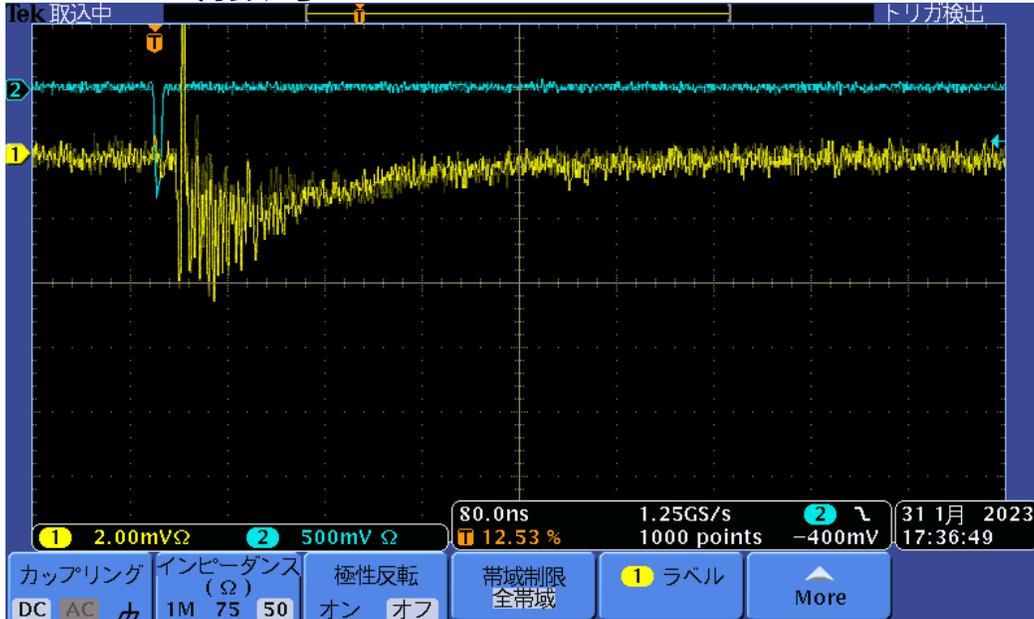
Count



- ピクセル($50\mu m$ 角)が1.3mm角のピクセル($75\mu m$ 角)より小さく、増幅率が小さいためか離散的な信号電荷分布にはならなかった。

結果① 6.0mm角

<LED点灯>



```
FCN=274.738 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 69 CALLS
EDM=5.36212e-12 STRATEGY= 1 ER
E
EXT PARAMETER STEP
NO. NAME VALUE ERROR SIZE
1 Constant 4.06628e+01 7.53545e-01 4.82599e-03
2 Mean 5.69667e+01 2.10261e-01 1.69733e-03
3 Sigma 1.38570e+01 1.67373e-01 2.55875e-05
:-) chi2/dof = 1.09023
```

有感領域の面積と光子検出効率から

→1.3mm角の入射光子数(平均)を用いて
6.0mm角の入射光子数(平均)を計算して
みる。

結果① 1.3mm角の入射光子数

(a) 検出光子数 (平均) = $-\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right)$

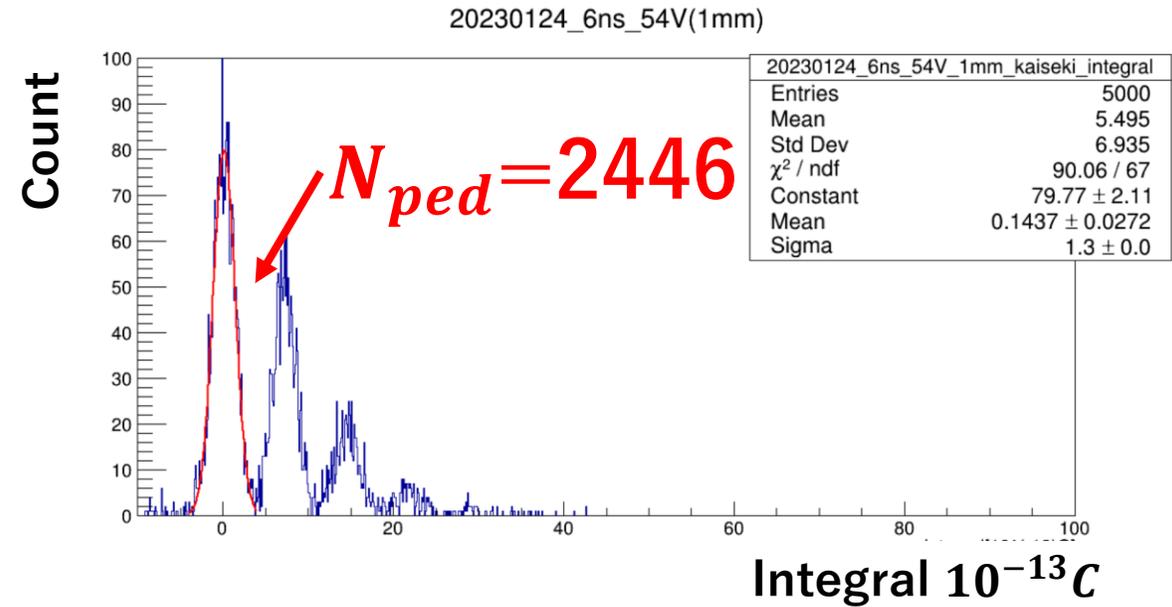
検出効率(Photon Detection Efficiency : PDE)

1.3mm角	50%
6.0mm角	40%

幅 : 6ns
周波数 : 10Hz

(b) $PDE = \frac{\text{検出光子平均数}}{\text{入射光子数}}$

- ① (a)にNpedとNtotに代入
→検出光子数の平均を求める
- ② 1.3mm角のPDE50%を(b)に代入
→入射光子数を求める



	検出光子数(平均値)	入射光子数(平均値)
1.3mm角	① 0.71	② 1.43

結果① 6.0mm角の入射光子数

(a)

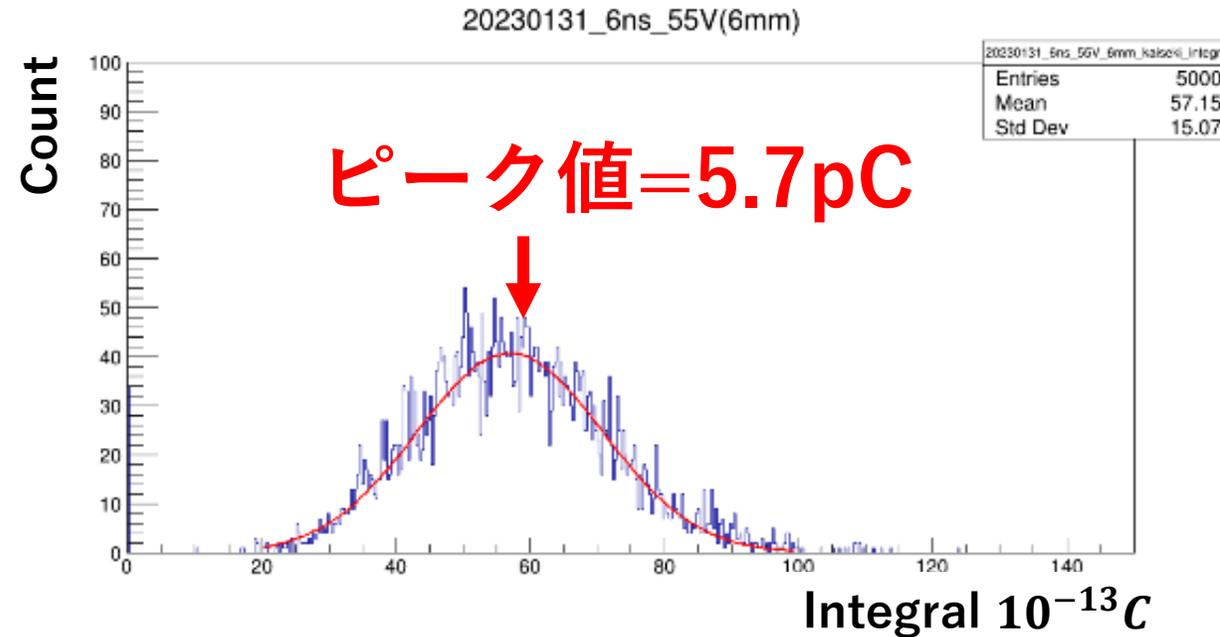
$$PDE = \frac{\text{検出光子平均数}}{\text{入射光子数}}$$

検出効率(Photon Detection Efficiency : PDE)

1.3mm角 50%
6.0mm角 40%

幅 : 6ns
周波数 : 10Hz

- ① 1.3mm角と6.0mm角の面積比
→入射光子数を求める
- ② 6.0mm角のPDE40%を(a)に代入
→検出光子数を求める



	検出光子数(平均値)	入射光子数(平均値)
6.0mm角	② 10.98	① 27.46

結果① 6.0mm角の入射光子数

幅：6ns
周波数：10Hz

検出効率(Photon Detection Efficiency : PDE)

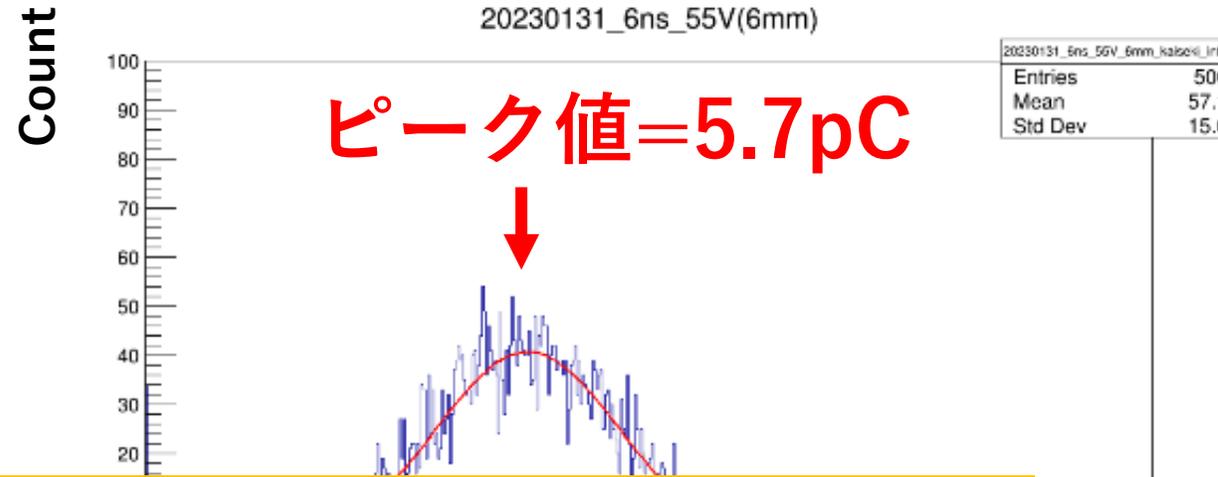
1.3mm角 50%
6.0mm角 40%

(a)

$$\text{検出光子数 (平均)} = -\ln \left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}} \right)$$

(b)

$$PDE = \frac{\text{検出光子平均数}}{\text{入射光子数}}$$



- ① (a)にNpedとNtotに代入
→検出光子数の平均を求める

- ② 1.3mm角、6.0mm角の検出効率
→入射光子数(平均)を求める

Clock Generator(幅6ns、周波数10Hz)のパルス信号によるLED点灯

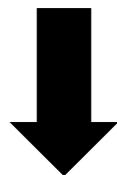
→入射光子数(平均) 1.3mm角 1.43個
6.0mm角 27.46個

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 実験①、**実験②**
4. まとめ

概要② シンチレータにおける光量測定

- 6.0mm角MPPC + **BGO** + 137Cs
- 6.0mm角MPPC + **FastLGSO** + 137Cs

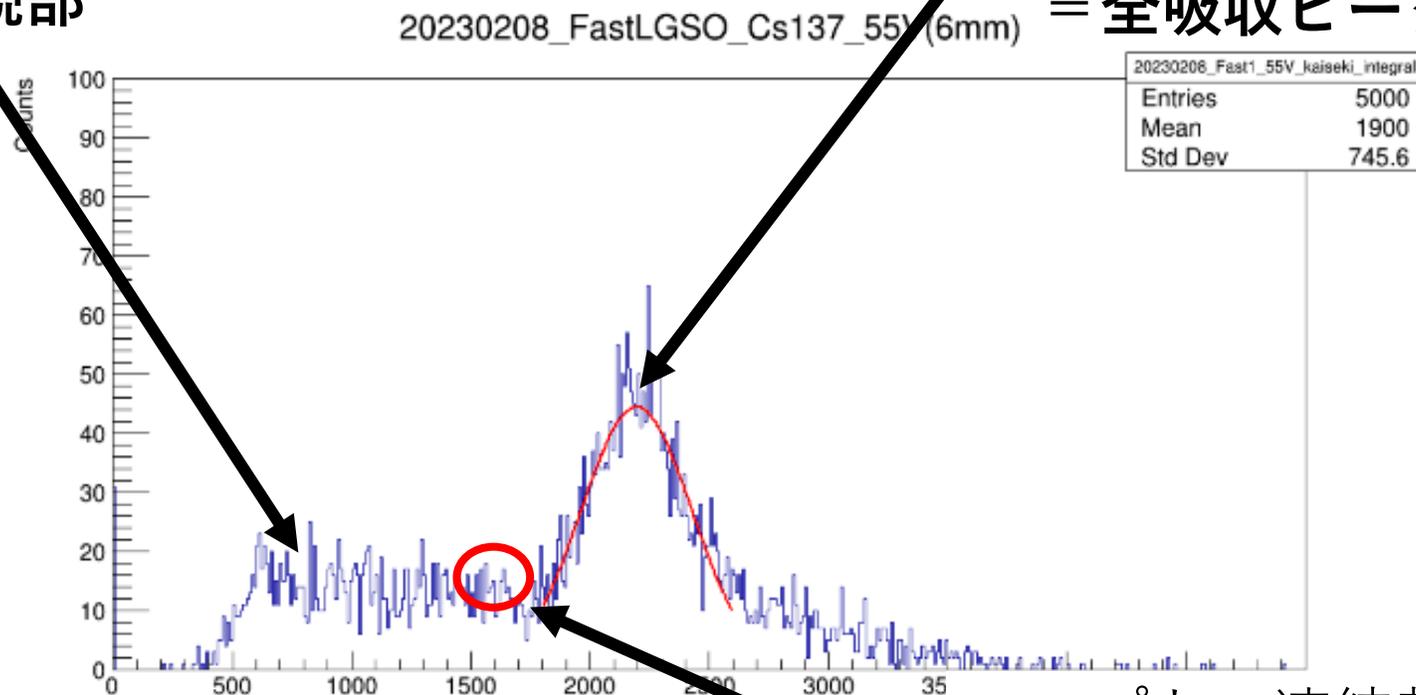


1. 信号電荷分布のピーク値の比較
2. BGOとFastLGSOの検出フォトン数(平均)

実験② ピークについて

コンプトン散乱により物質内の電子の弾き飛ばされる角度が様々なので、電子に与えるエネルギーは連続的なピーク
= **コンプトン連続部**

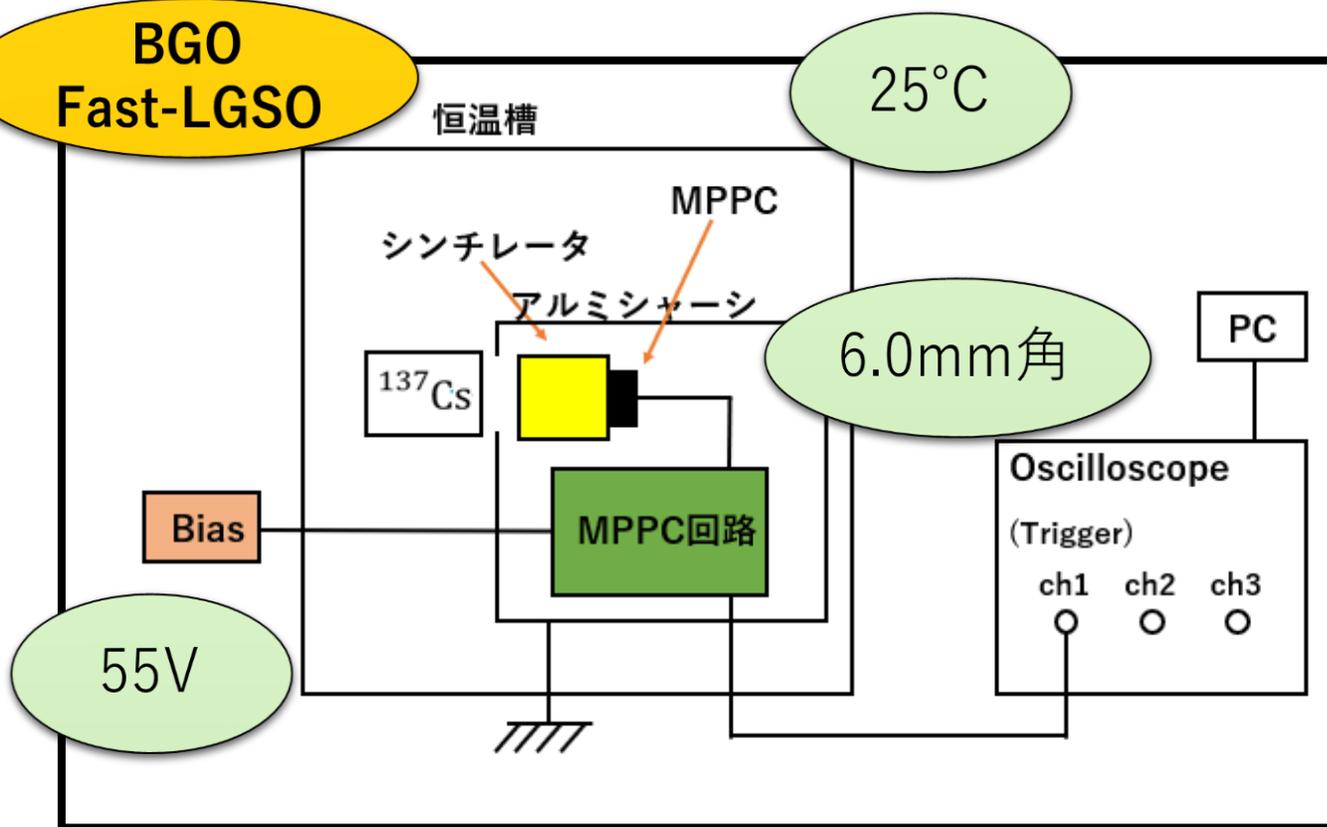
光電効果(全てのエネルギーを物質内の電子に与えて止まる)によるピーク
= **全吸収ピーク**



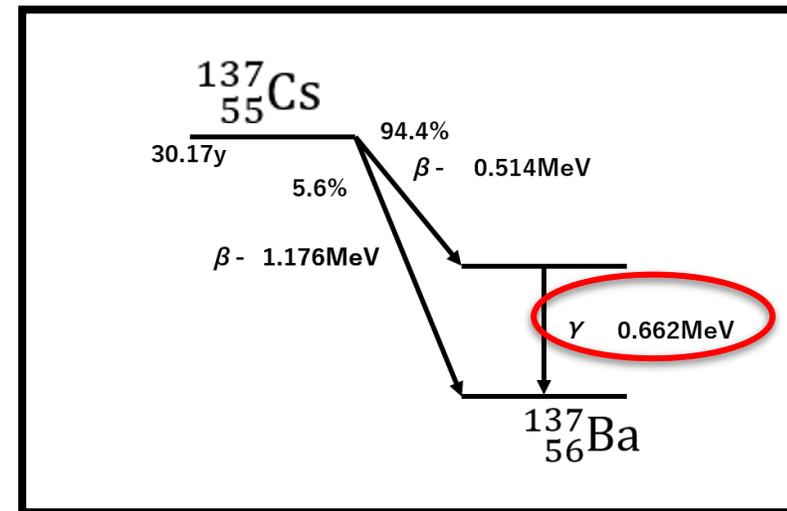
コンプトン連続部の最も高い領域で散乱角が180度 = **コンプトンエッジ**

方法②

<測定のセットアップ>



<セシウム137の崩壊図>

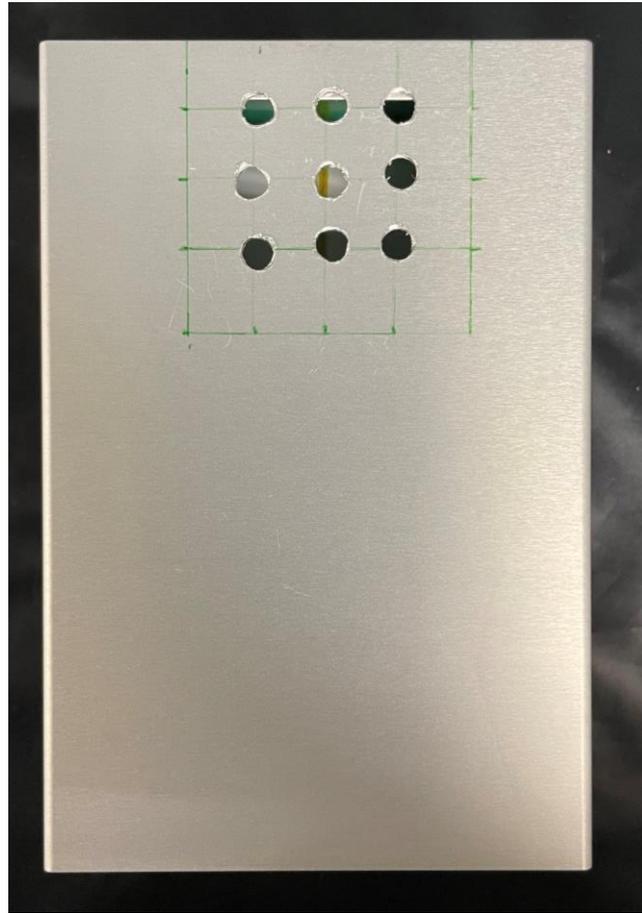
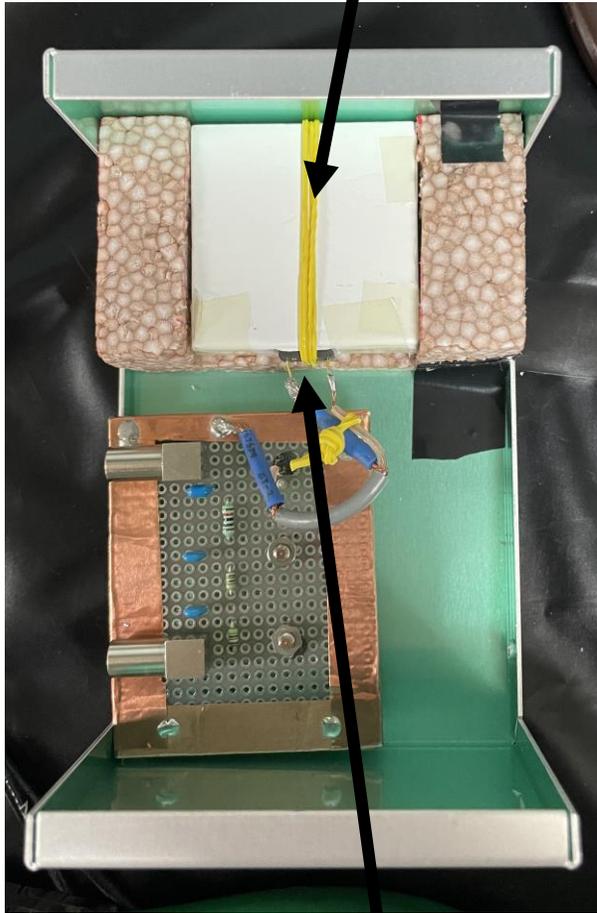


<シンチレータ>

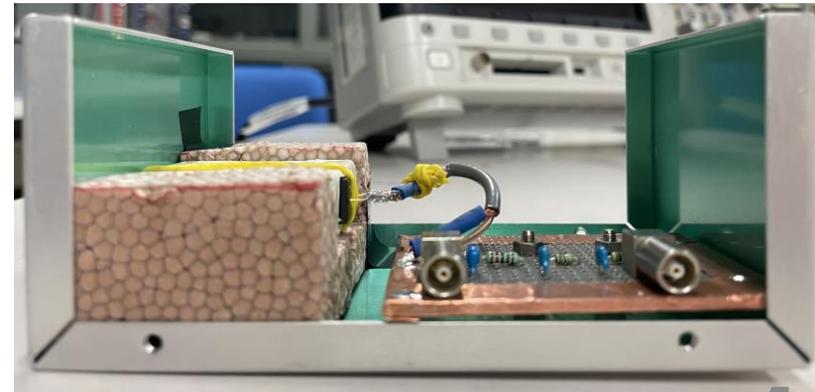
	BGO	Fast-LGSO
質量密度(g/(cm ³))	7.13	7.3
減衰時間(ns)	300	30-35
エネルギー分解能	20%	8-10%
発光量(光電子数/MeV)	6300	24000

方法②

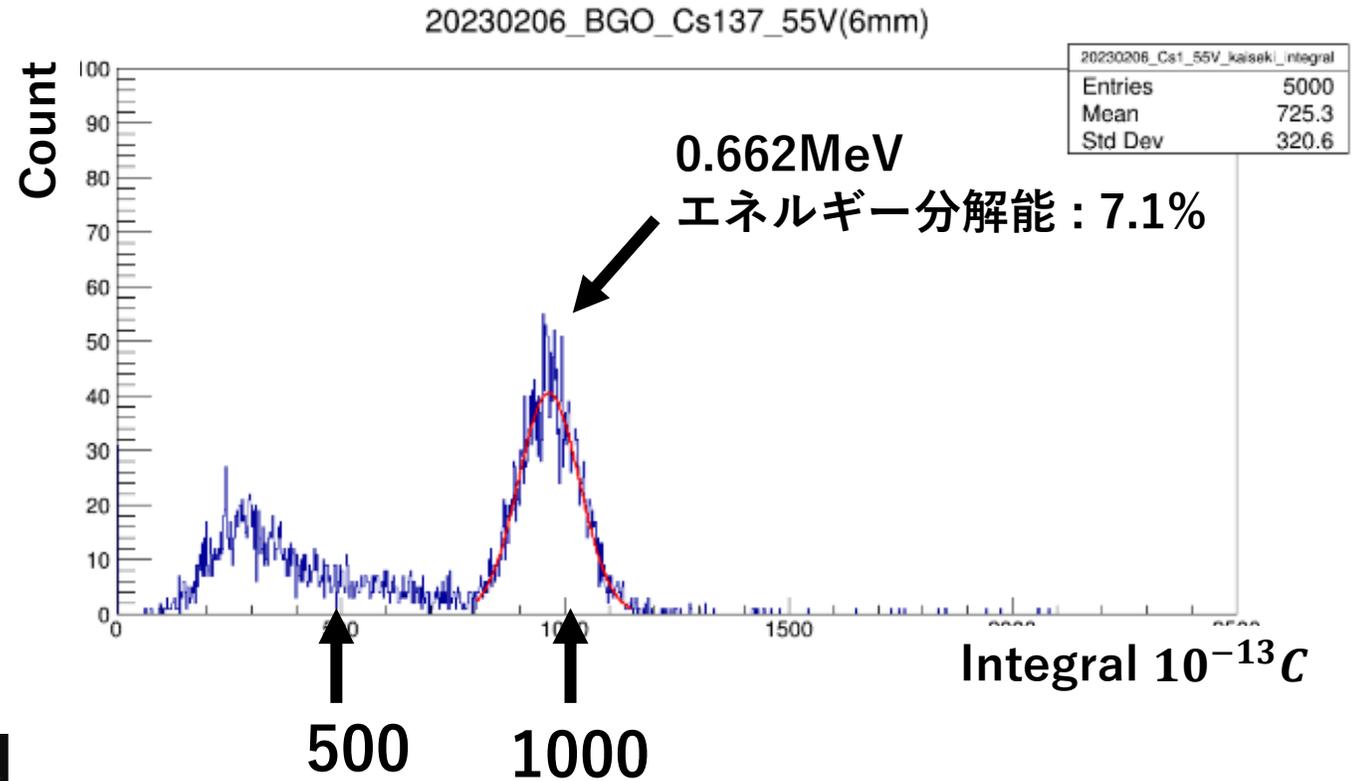
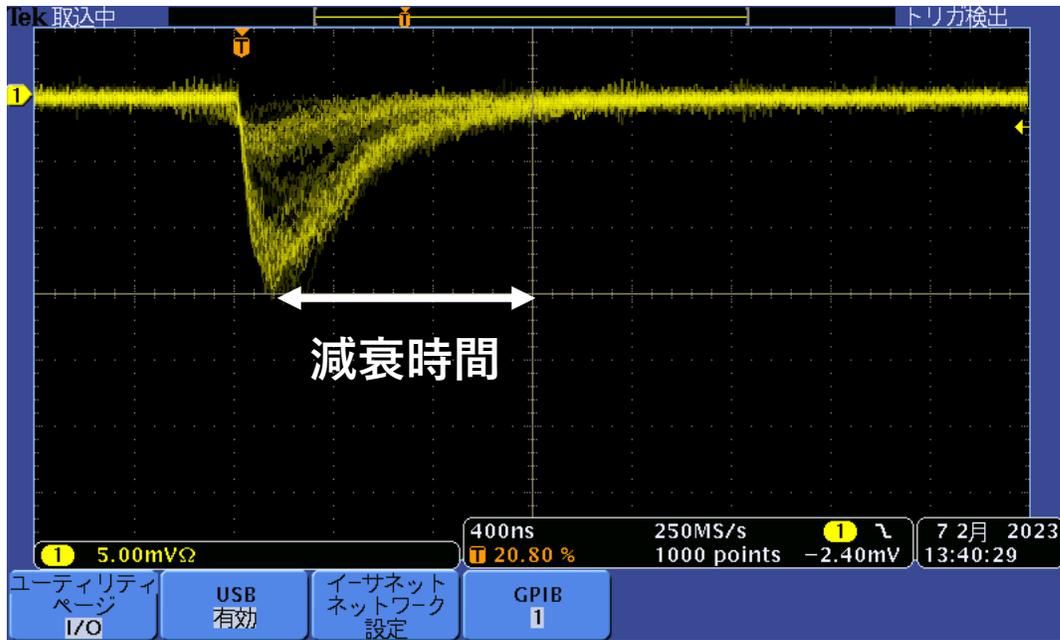
結晶シンチレータ (BGO or FastLGSO)
テフロンシート GoreTex (反射材) で包む



6mm角のMPPC



結果② BGO

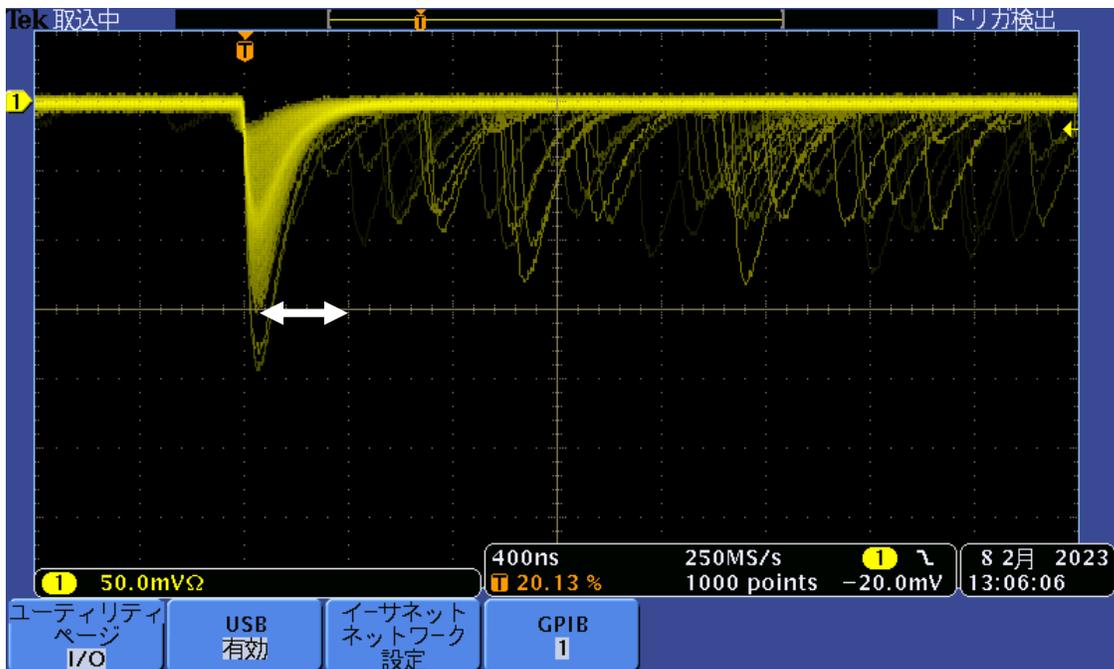


```

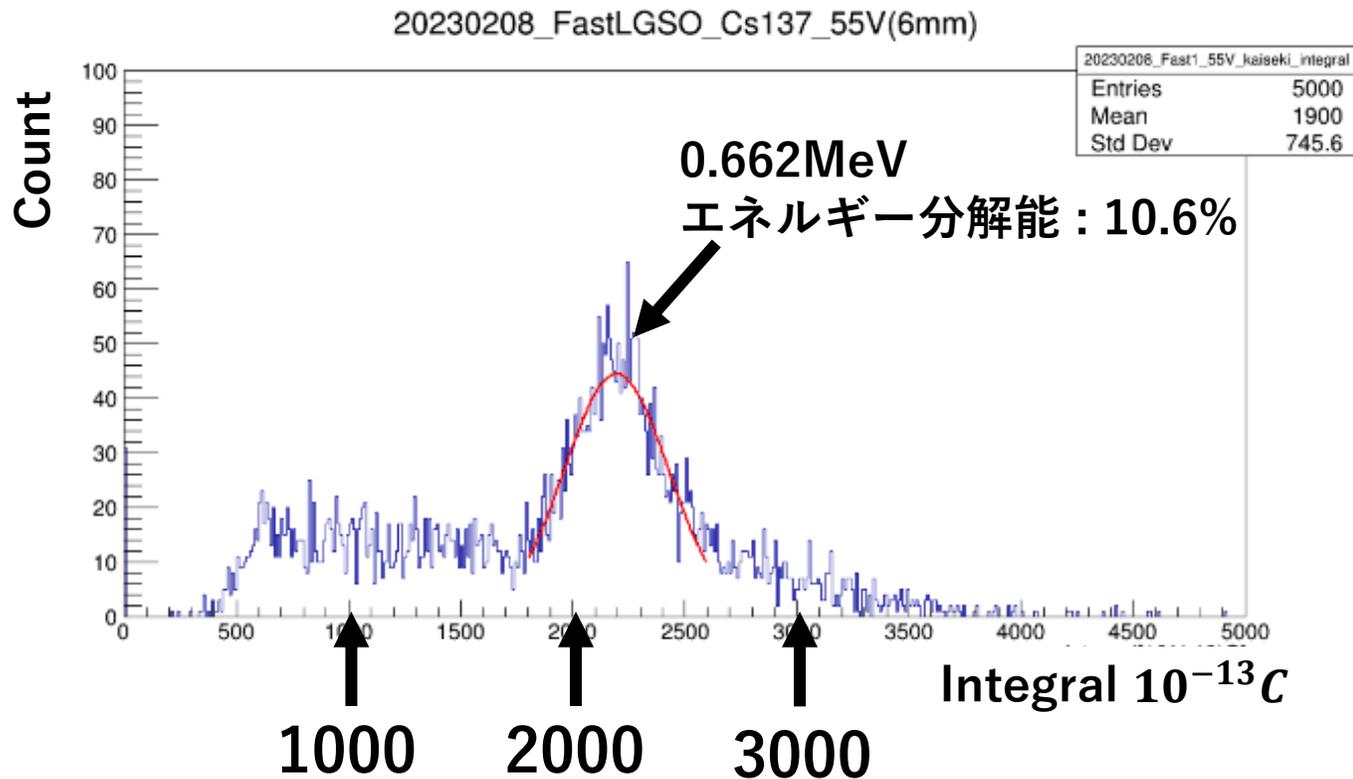
FCN=135.57 FROM MIGRAD   STATUS=CONVERGED   72 CALLS   73 TOTAL
EDM=1.27697e-10   STRATEGY= 1   ERROR MATRIX ACCURAT
E
EXT  PARAMETER
NO.  NAME      VALUE      ERROR      STEP      FIRST
   1  Constant  4.04922e+01  9.89977e-01  4.42751e-03  1.68806e-05
   2  Mean      9.63882e+02  1.35858e+00  7.72332e-03  3.81339e-07
   3  Sigma     6.78168e+01  1.11815e+00  2.47220e-05  3.53085e-03
:-) chi2/dof = 0.989565
    
```

減衰時間 約960ns
光電ピーク値 96.4pC

結果② FastLGSOの場合



```
FCN=90.8693 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 78 CALLS 79 TOTAL
EDM=3.18764e-09 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURAT
E
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 Constant 4.4489e+01 1.28315e+00 4.27372e-03 7.94871e-05
2 Mean 2.19404e+03 5.89196e+00 2.75544e-02 4.78288e-06
3 Sigma 2.32500e+02 7.15741e+00 3.81849e-05 7.80286e-03
:-) chi2/dof = 1.18012
```



減衰時間 約400ns
光電ピーク値 219.4pC

結果② 電荷量から光子数の比較

	LED点灯	BGO	FastLGSO
電荷量(pC)	5.7	96.4	219.4
光子数(平均値)	27.5	465.1	1058

0.662keVの γ 線

- 6.0mm角MPPCの入射光子数
BGO → 703 入射光子数/MeV
FastLGSO → 1598 入射光子数/MeV
- 全ピクセル数(14400個)に対して入射光子数(700~1600個)は一桁少ない(同一ピクセルへの複数光子入射の影響は心配しなくてもよいだろう)。

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 実験①、実験②
- 4. まとめ**

まとめ

1. Clock Generator(幅6ns、周波数10Hz)のパルス信号によるLED点灯
→入射フォトン数(平均)

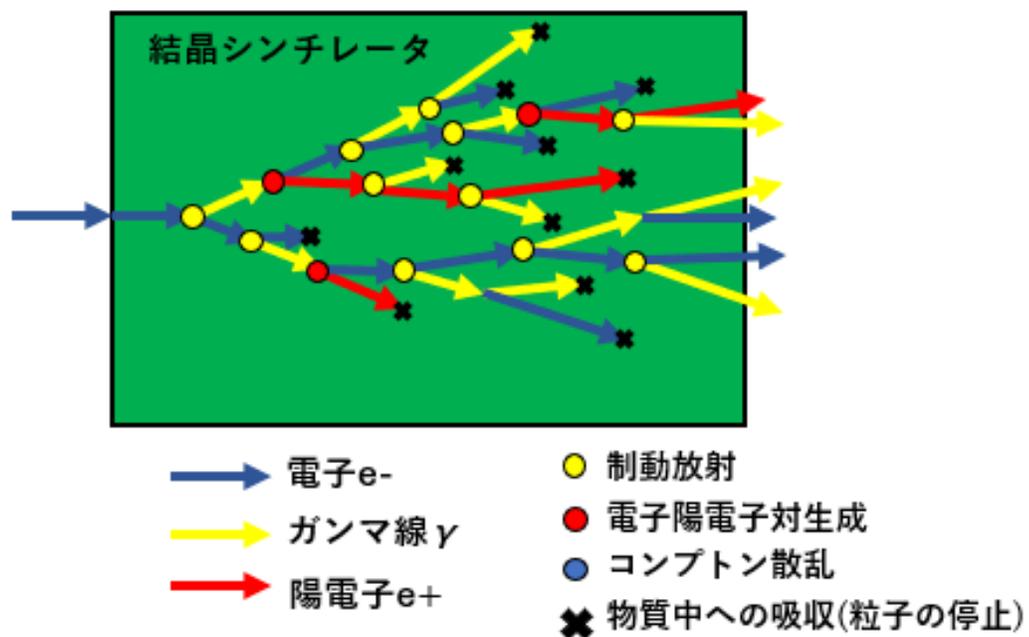
1.3mm角	1.43個
6.0mm角	27.46個
2. 6.0mm角MPPCの入射フォトン数

BGO	~700	フォトン/MeV
FastLGSO	~1600	フォトン/MeV
3. APDなど他の光検出器を使用する場合の基礎データを得た

メモ

電磁シャワー

電磁シャワーの概念図



電磁シャワーとは高エネルギーの電子やガンマ線が物質に入射し、対生成と制動放射が連鎖的に起こる反応

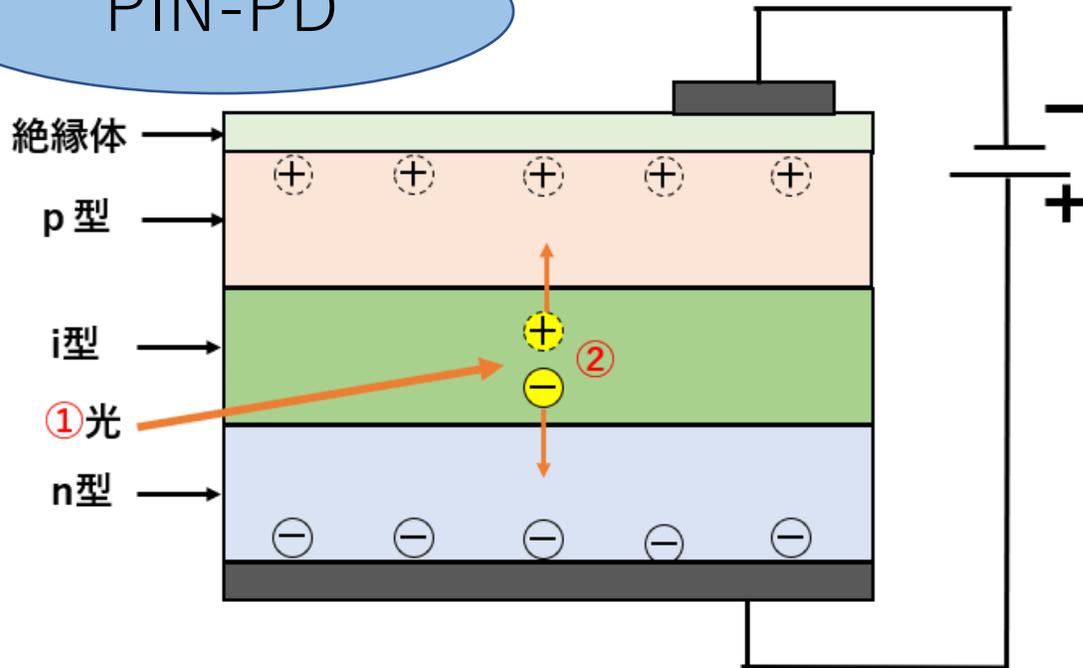
引用元:[SuperKEKB Pamphlet ver4.pdf](#)

光半導体について

半導体内部に強い電場を形成することでアバランシェ(電子雪崩)を形成し、信号を増幅させる機能を持つ半導体素子

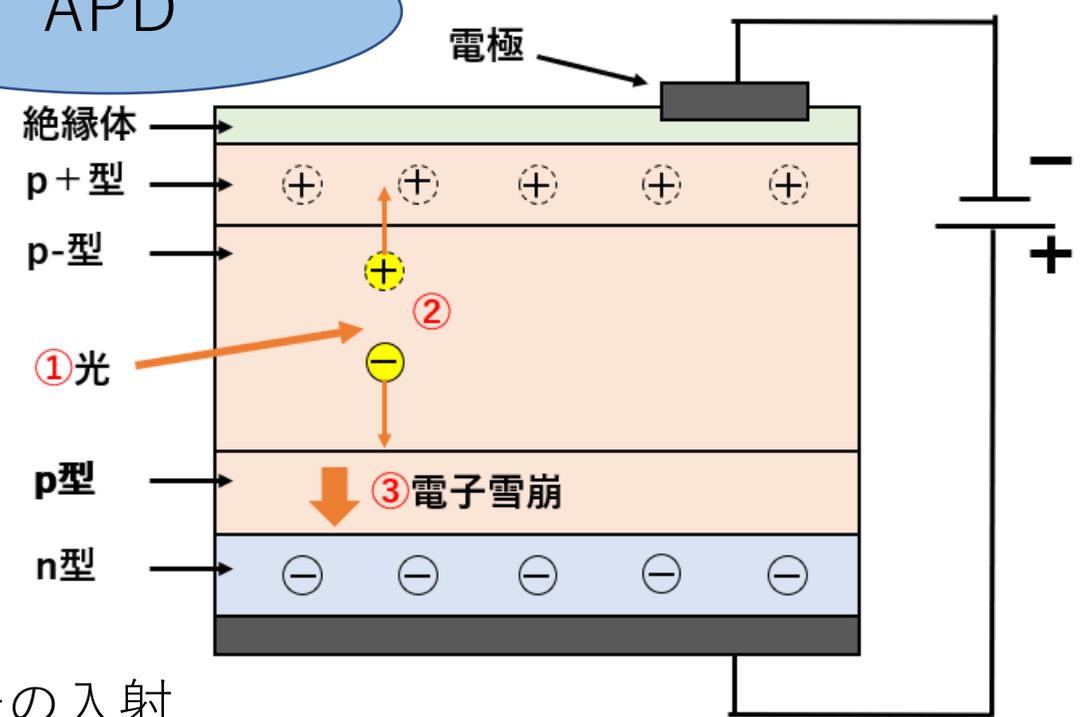
光半導体とは

PIN-PD



- ①光の入射
- ②電子正孔対が生じた後、電極側へそれぞれ移動する

APD



- ①光の入射
- ②電子正孔対が生じた後、電極側へそれぞれ移動する
- ③ p 型半導体の領域で電子雪崩が起きる

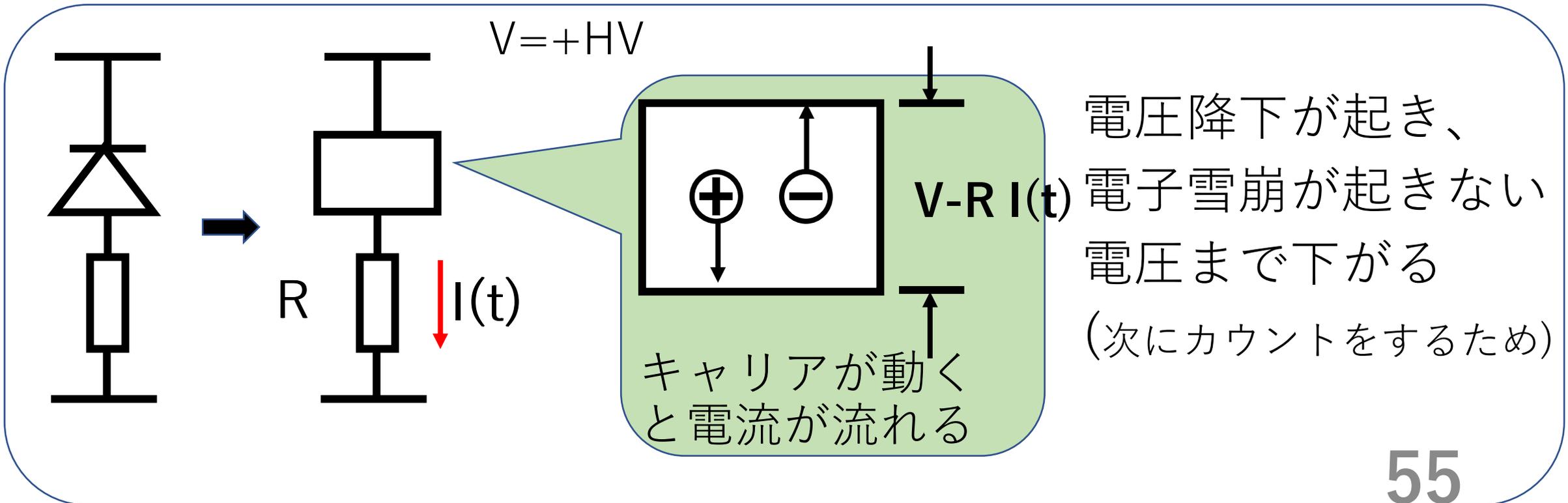
ガイガーモードとプロポーションナルモード

ガイガーモード

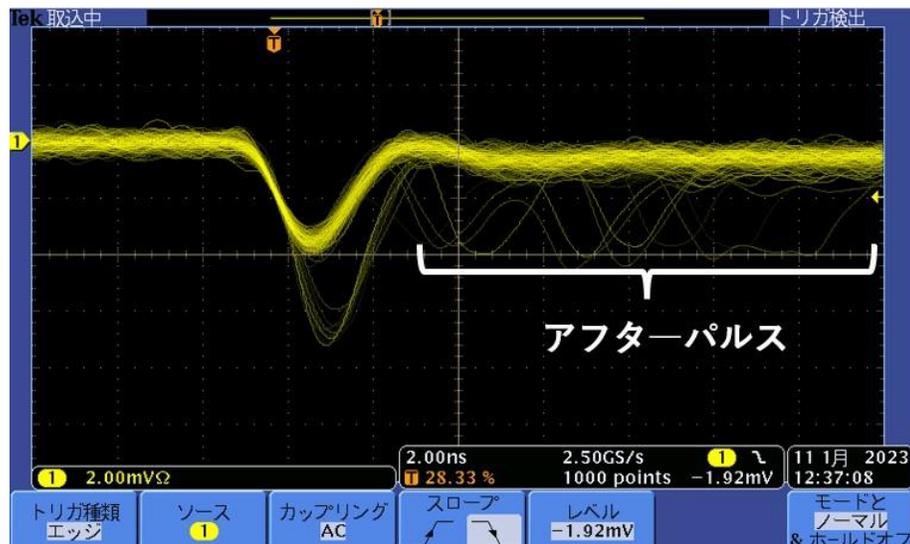
電子雪崩が全面に広がる
(局所的ではない)

プロポーションナル
モード

電子雪崩が局所的に形成
される



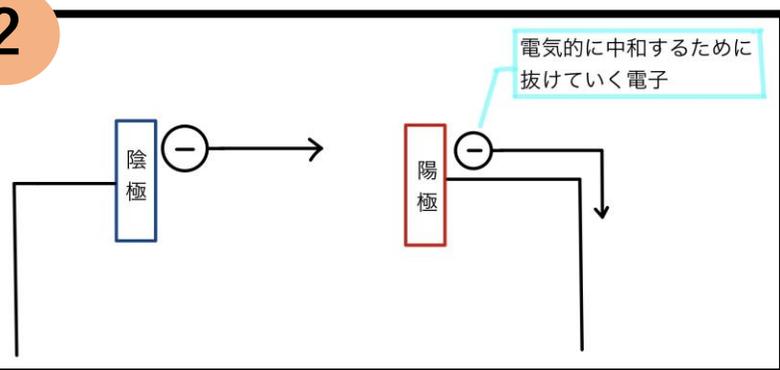
アフターパルス



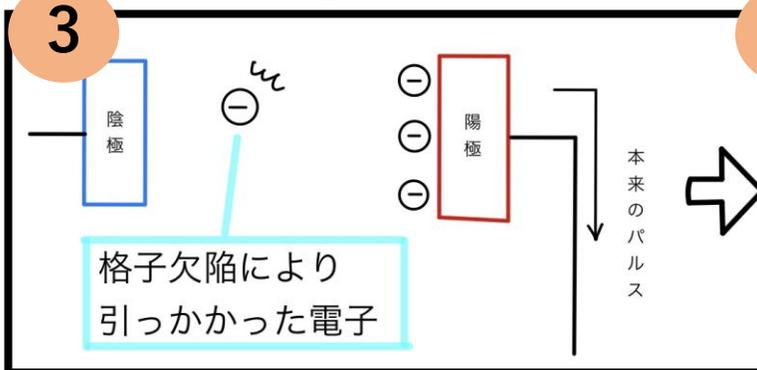
➤アフターパルスとは

1. 信号パルスの形成が起こる = ピクセル内で電子雪崩の生成が起こる
2. 通常の加速される電子は+極へ移動し、電気的に中和するために陽極の裏側の電子が抜けるので、この電流が信号パルスになる
3. 他の電子同様に加速して電極間を移動するはずだったが、固体内の格子欠陥により陽極にすぐに移動できずに、引っかかる電子がいる
4. 引っかかった電子が遅れて走り、陽極へ到着して信号を与える

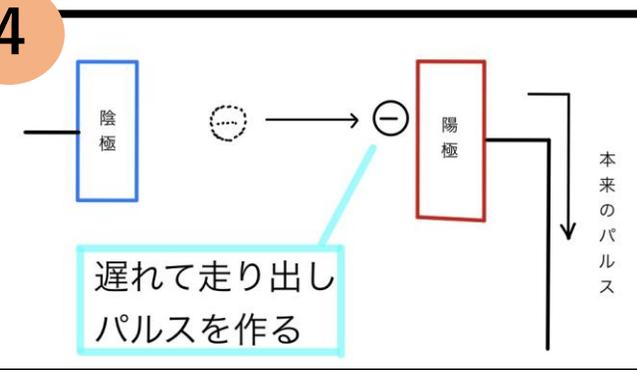
2



3



4

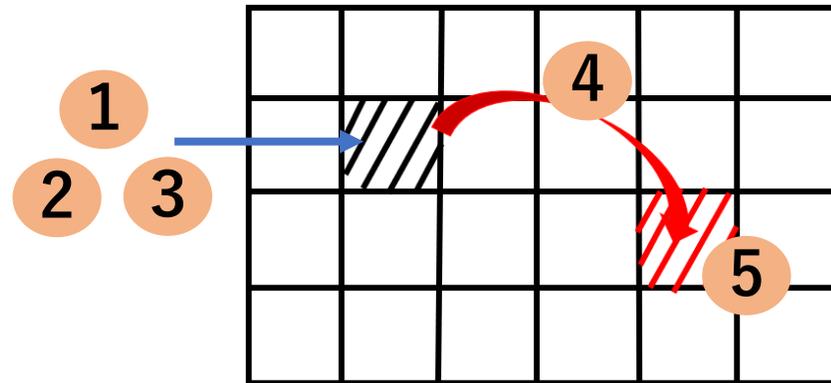


クロストーク



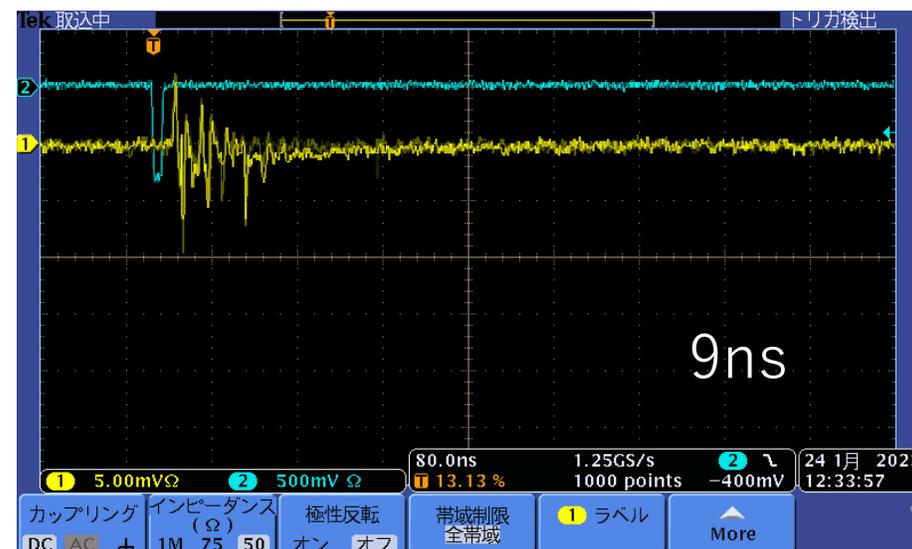
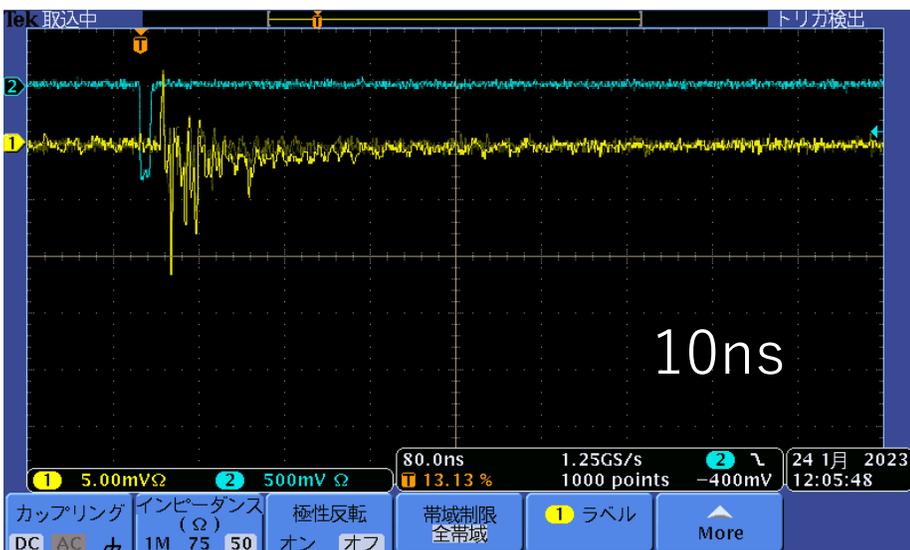
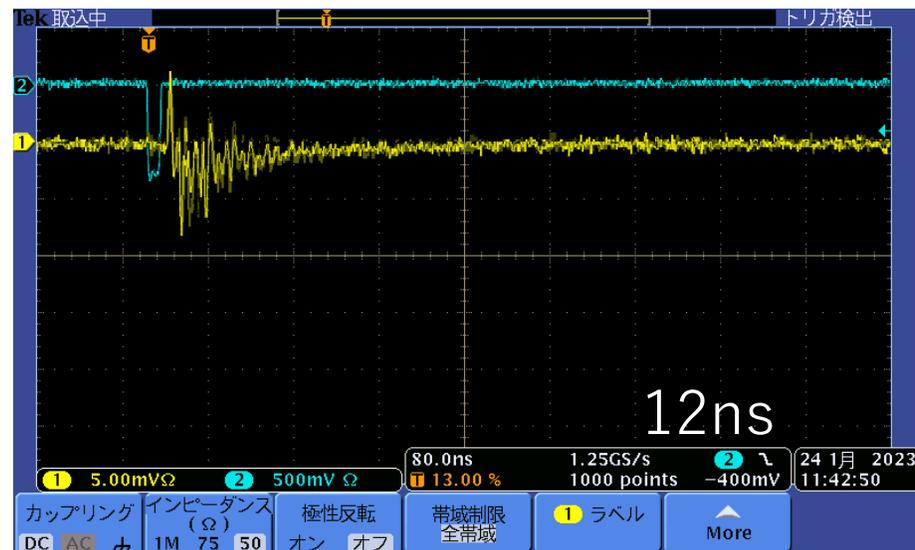
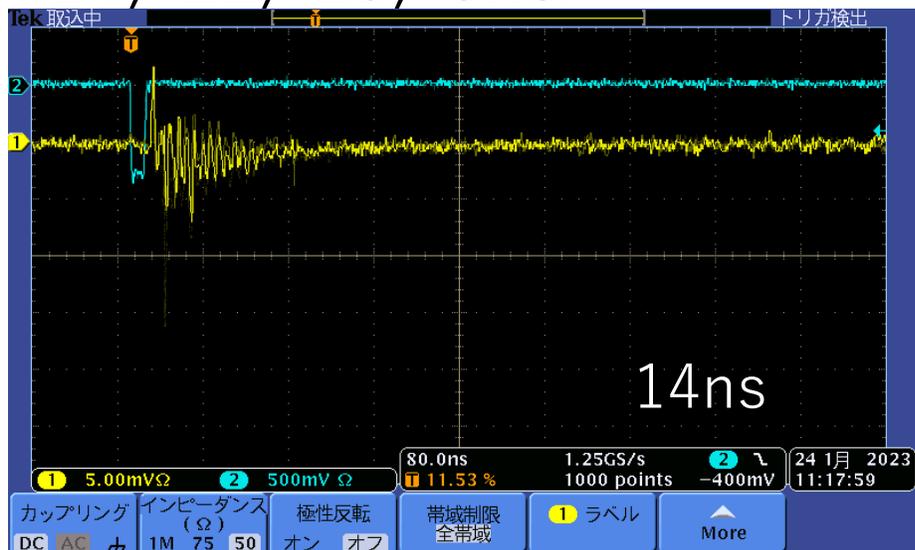
➤クロストークとは

1. 信号パルスの形成が起こる = ピクセル内で電子雪崩を形成する
2. 1によりその付近の電子を励起する
3. 励起状態の電子が自由電子または束縛の緩い電子を吸収することで励起状態から抜け出す
4. 3の結果、エネルギーの差分に対応する光子を放出する
5. 4の二次的な光子が別のピクセルで光電効果を起こす



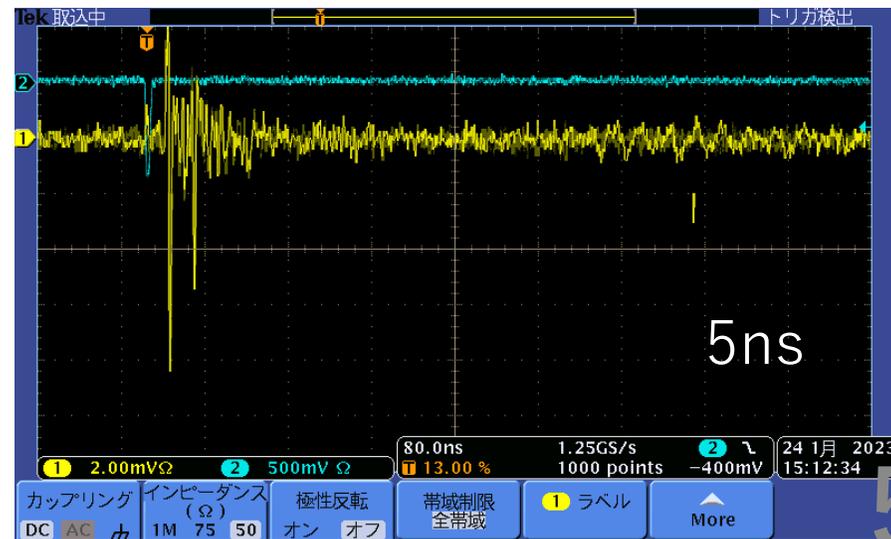
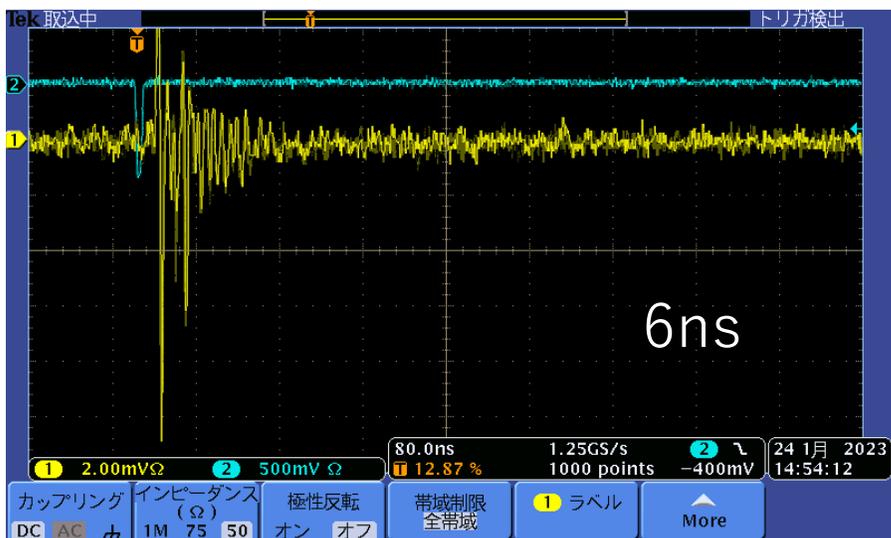
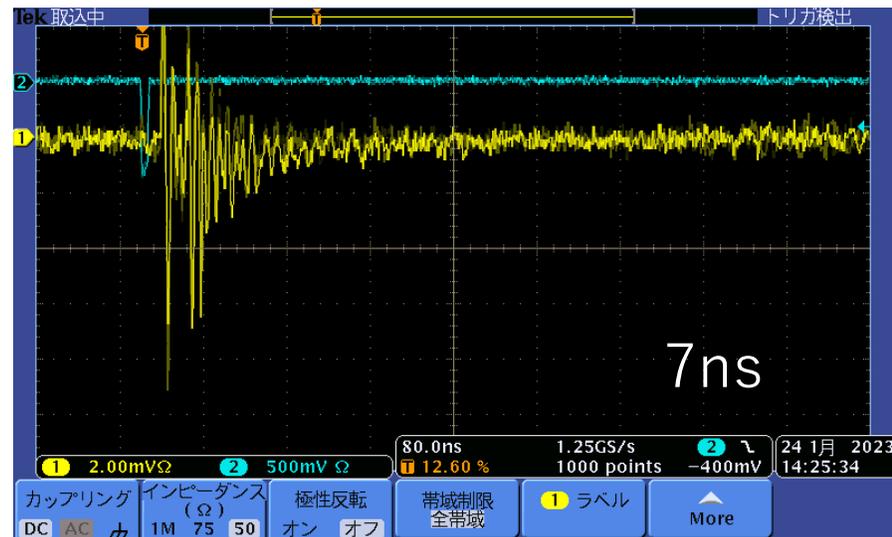
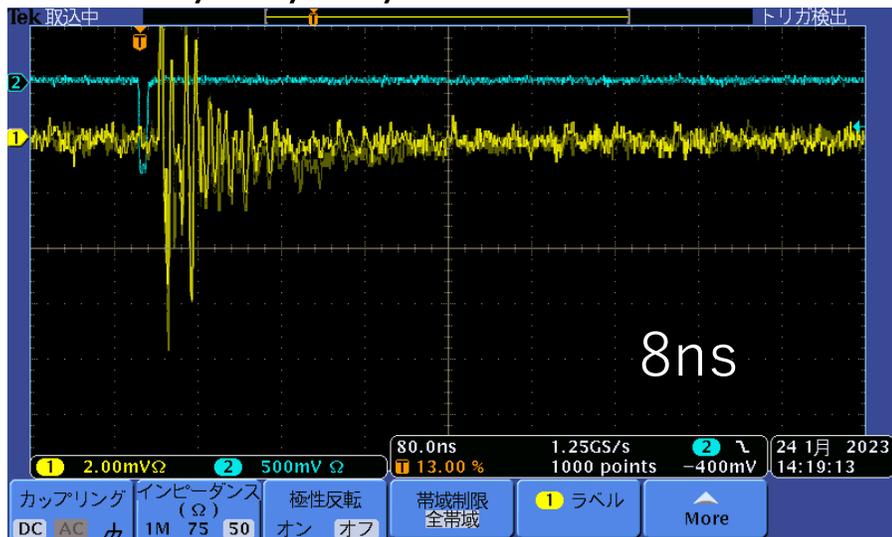
結果① 波形の様子(1.3mm角)

<幅 14, 12, 10, 9ns>



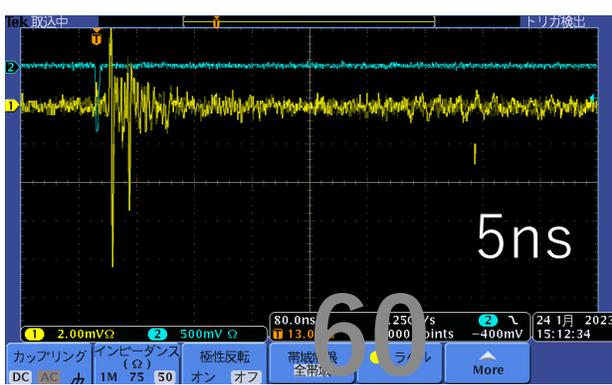
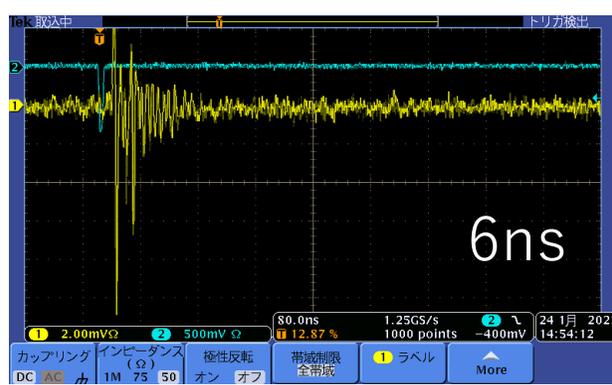
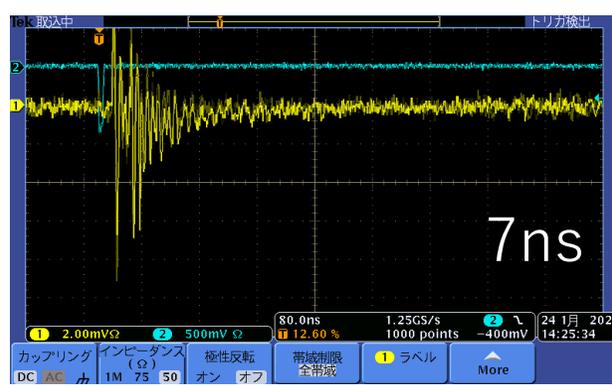
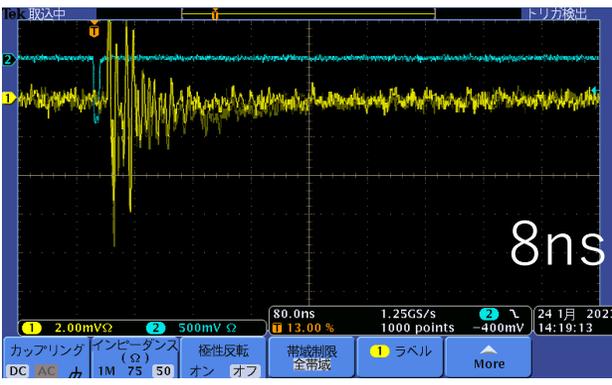
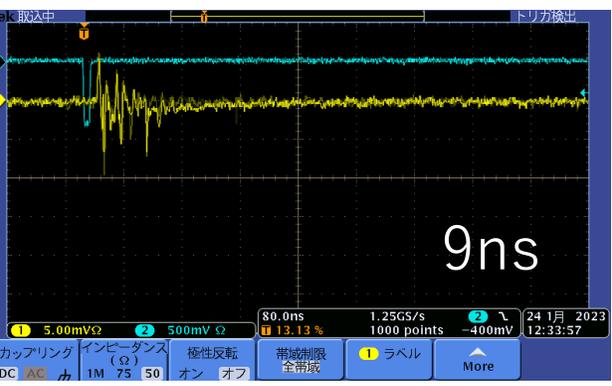
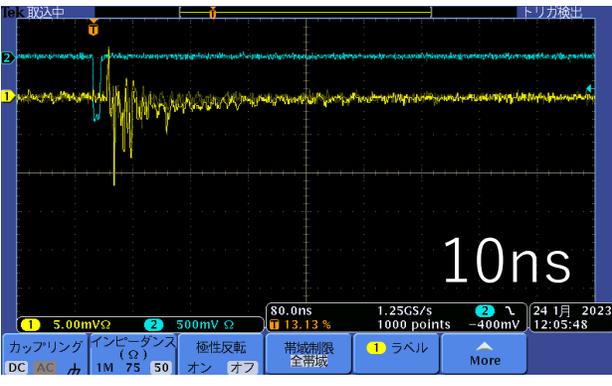
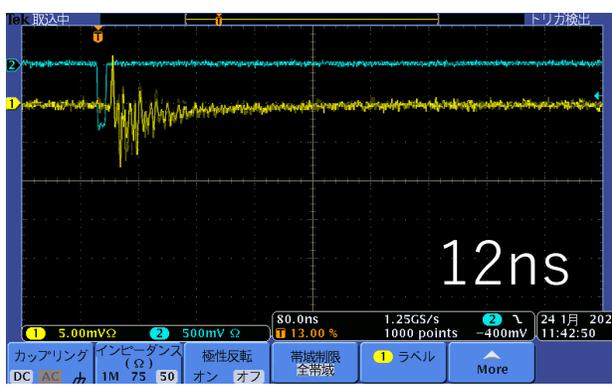
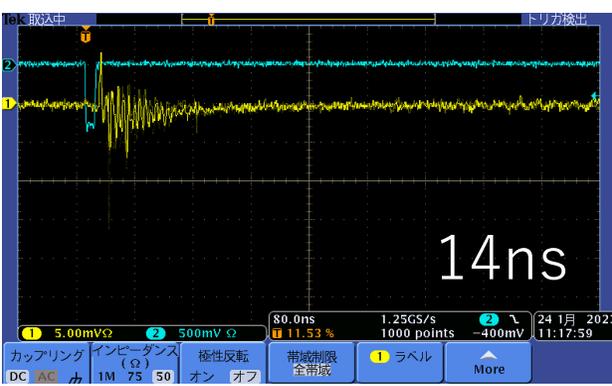
実験結果②-1 波形の様子(1.3mm角)

<幅 8, 7, 6, 5ns>



実験結果②-1 波形の様子(1.3mm角)

オシロスコープを観測するだけでは、電圧の波高の変化が見られないため、光子数推定は難しい

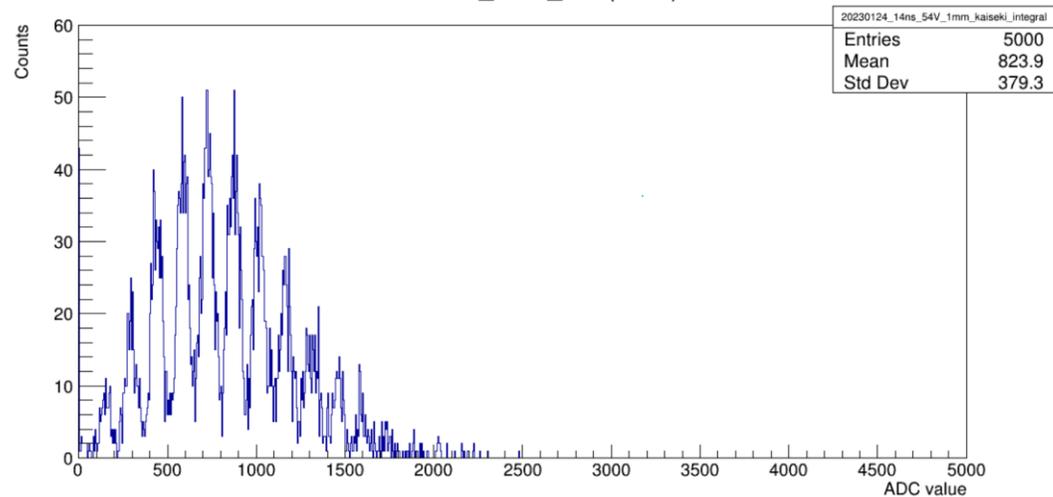


60

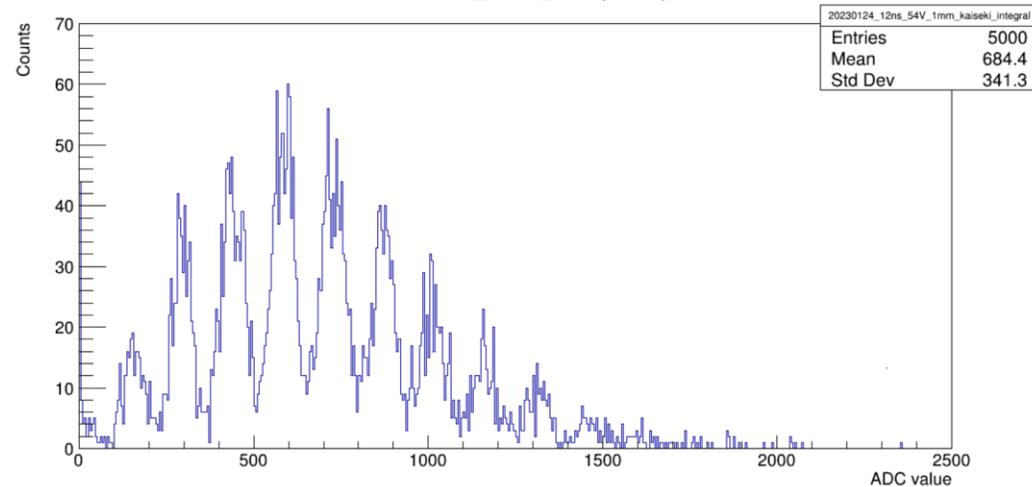
実験結果②-1 信号電荷分布の様子(1.3mm角)

<幅 14, 12, 10, 9ns>

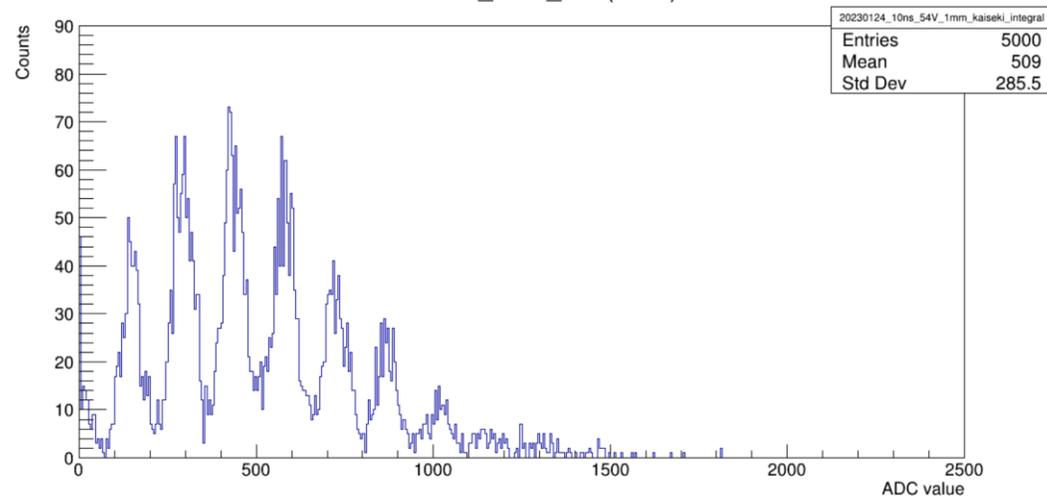
20230124_14ns_54V(1mm)



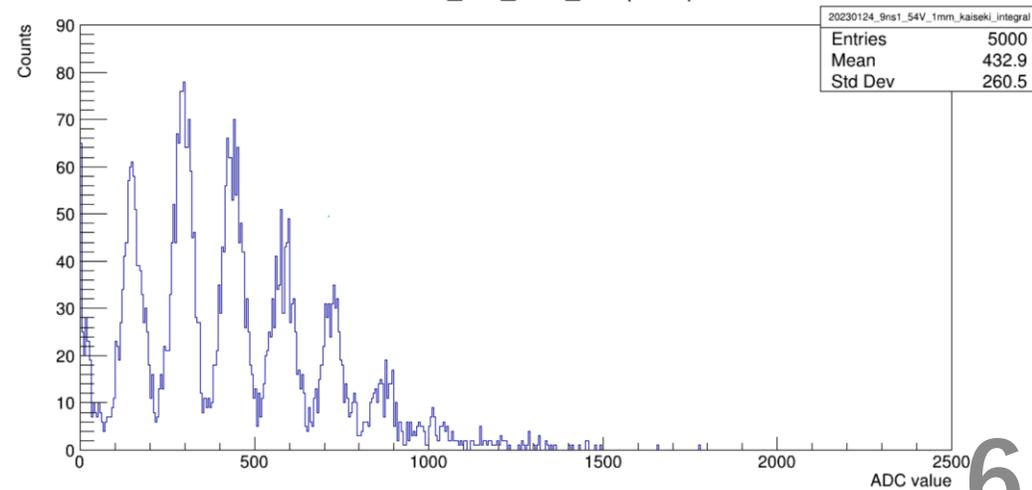
20230124_12ns_54V(1mm)



20230124_10ns_54V(1mm)



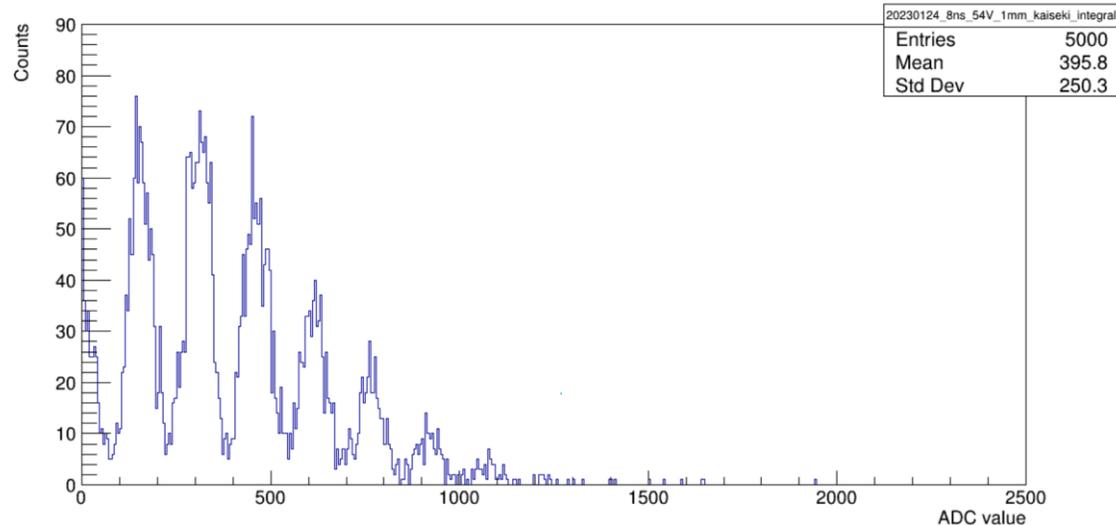
20230124_9ns_5mV_54V(1mm)



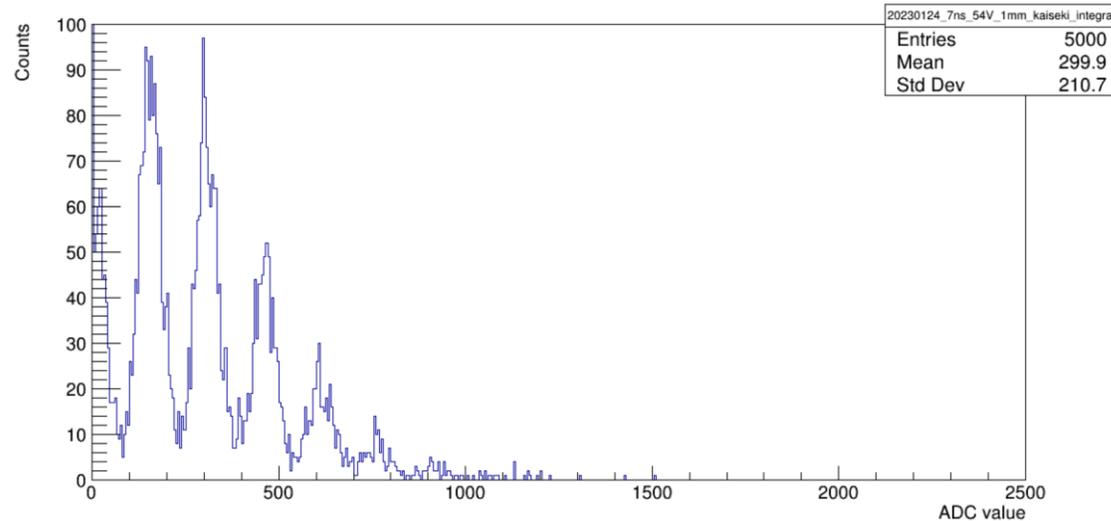
実験結果②-1 信号電荷分布で見た様子(1.3mm角)

<幅 8, 7, 6, 5ns>

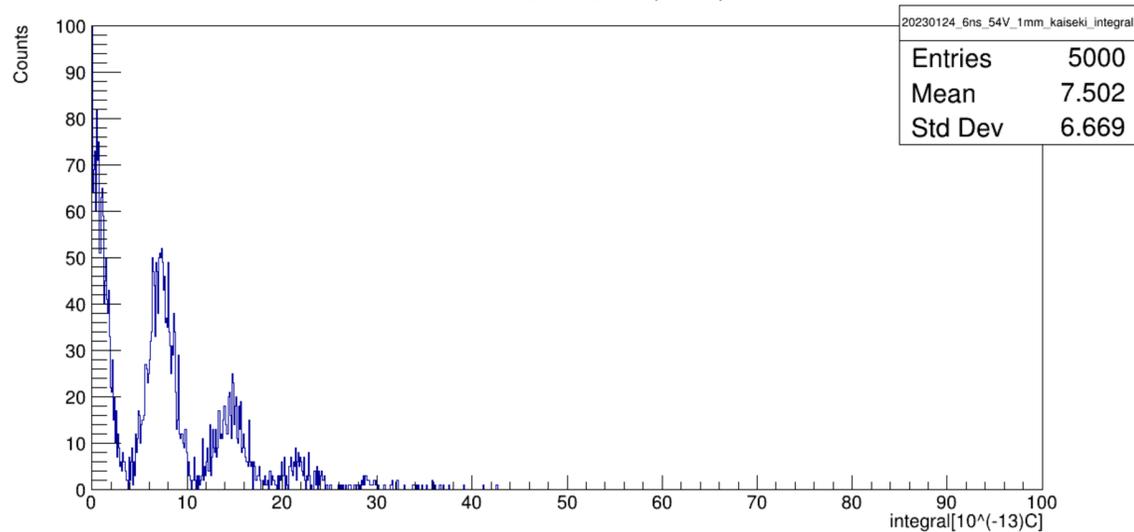
20230124_8ns_54V(1mm)



20230124_7ns_54V(1mm)



20230124_6ns_54V(1mm)



20230124_5ns_54V(1mm)

