

Belle II 実験 ARICH 検出器アップグレード のための信号読み出しASICの性能評価

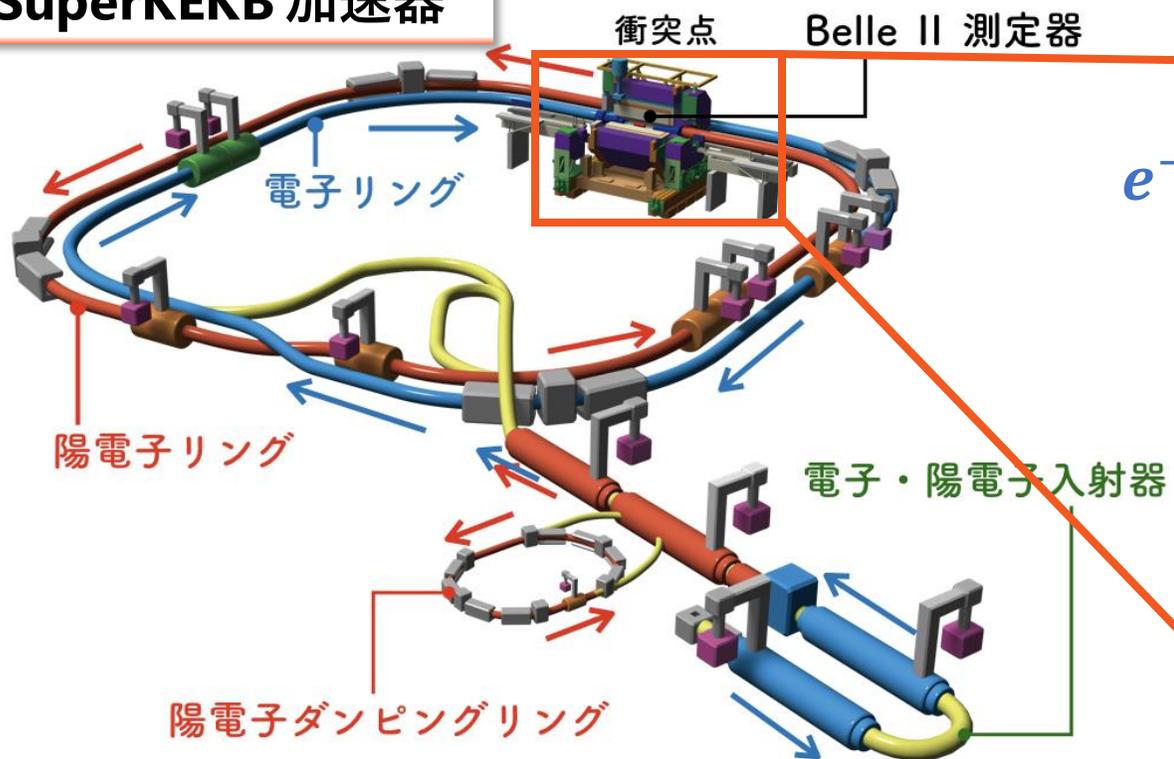
黒川俊輔^A, 角野秀一^A, 汲田哲郎^A, 住吉孝行^A, 本橋完太^A, 岩城彩希^A, 西田昌平^{C,D,H},
足立一郎^{C,D}, 高力孝^C, 松岡広大^{C,D,G}, 宇野健太^{C,D}, 庄子正剛^C, Yun-Tsung Lai^C, Eiasha Waheed^C,
飯嶋徹^G, 岩田修一^{A,I}, 河合秀幸^E, 川崎健夫^B, 金道玄樹^{D,K}, 田端誠^E, 今野智之^{A,B}, 小川了^F,
庄司桃香^F, 清野義敬^{J,H}, 遊佐洋右^H, 他 Belle II ARICH グループ

都立大^A, 北里大^B, KEK^C, 総研大^D, 千葉大^E, 東邦大^F, 名古屋大^G, 新潟大^H,
都立産業技術高専^I, 富山高専^J, バージニア工科大^K

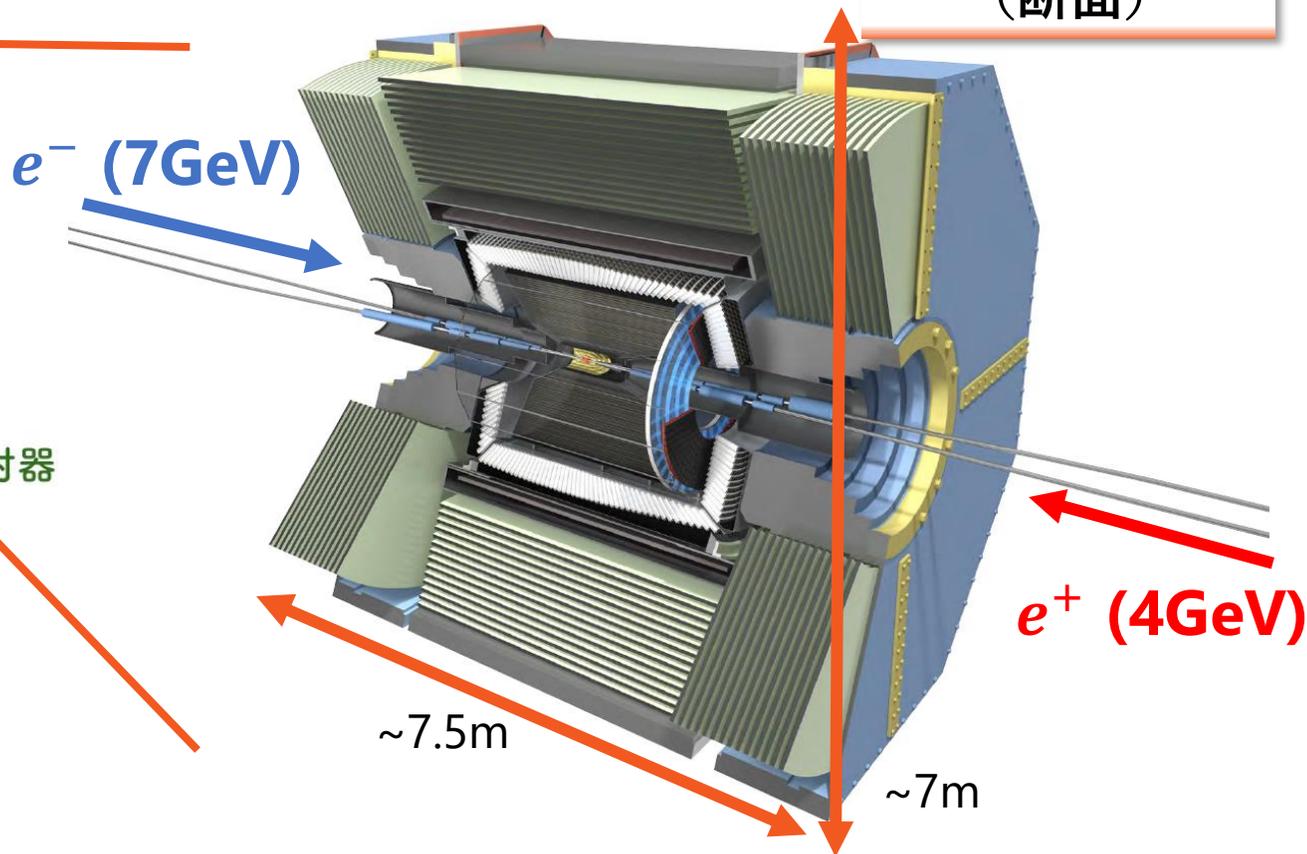
Belle II 実験

- 電子・陽電子加速器によるB-Factory実験 (2019年~) @KEKつくば
 - LS1終了、2024-01-29よりRun2開始

SuperKEKB 加速器



Belle II 測定器 (断面)

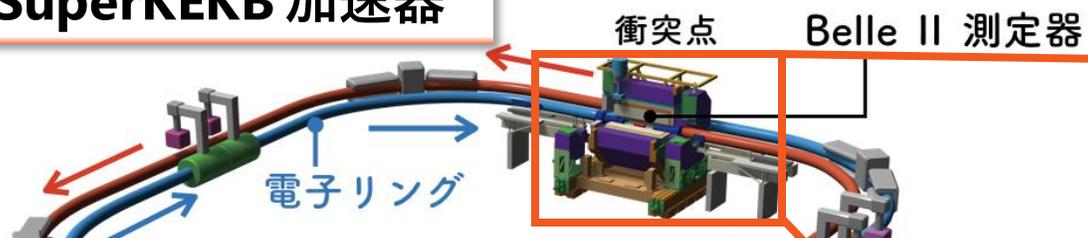


Belle II 実験

■ 電子・陽電子加速器によるB-Factory実験 (2019年~) @KEKつくば

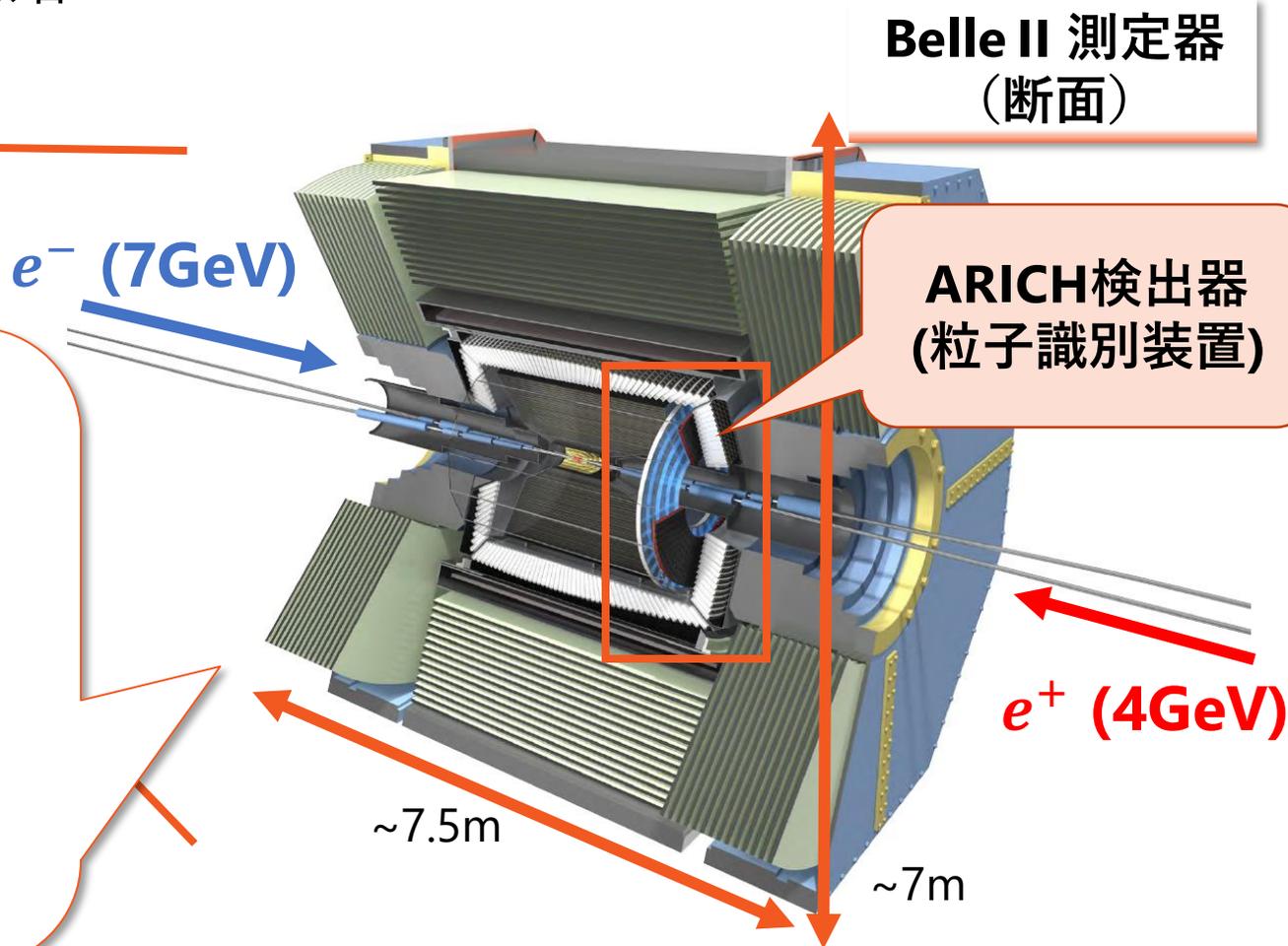
● LS1終了、2024-01-29よりRun2開始

SuperKEKB 加速器



■ Belle IIを構成する検出器

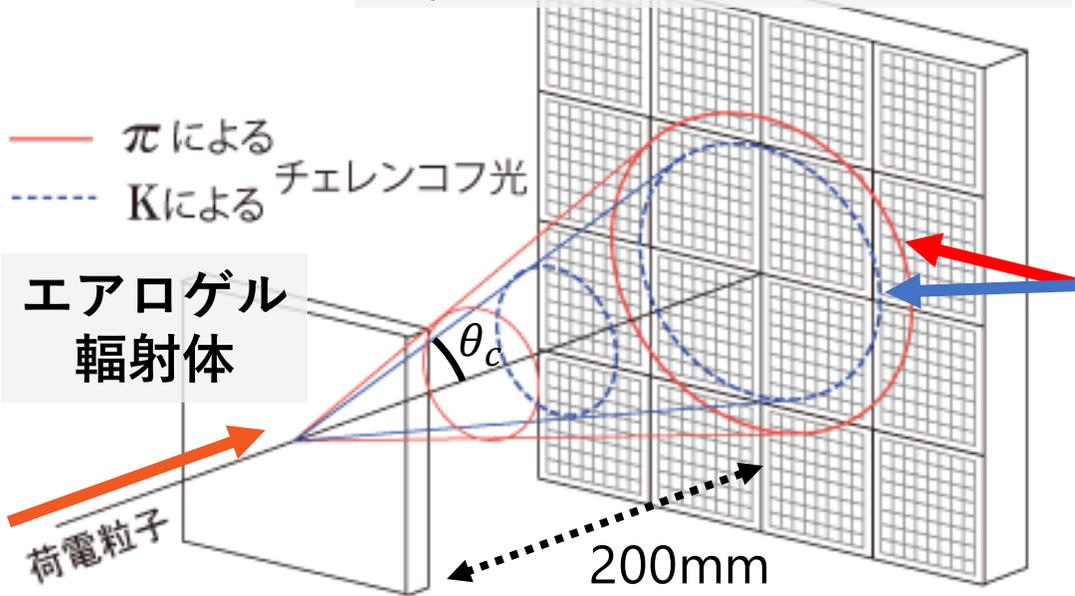
- CDC (中央飛跡検出器)
- KLM (K_L^0 /ミューオン検出器)
- ECL (電磁カロリメーター)
- TOPカウンター
- SVD (シリコンバーテックス検出器)
- PXD (ピクセル検出器)
- **ARICH (エアロゲルRICHカウンター)**



ARICH 検出器 (Aerogel Ring Imaging Cherenkov Counter)

■ 粒子識別原理

光検出器HAPD
(Hybrid Avalanche Photo-Detector)



放射角 θ_c が異なる

$$\cos \theta_c = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np}$$

m : 粒子の質量

p : 運動量 (測定値)

n : 屈折率 (既知)

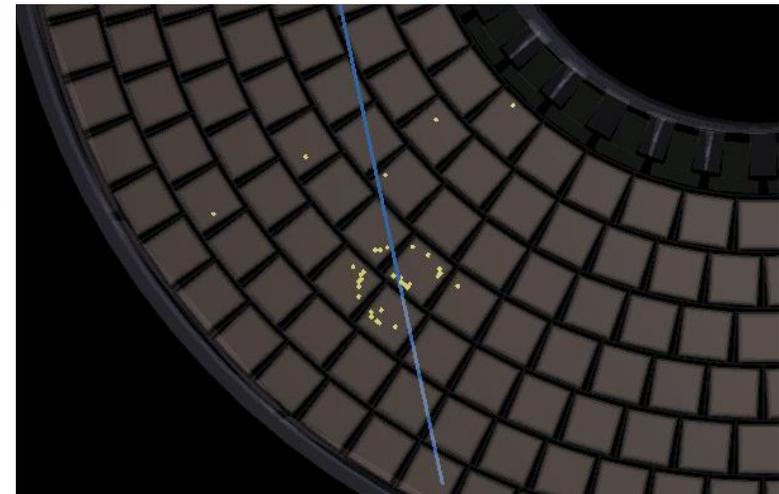
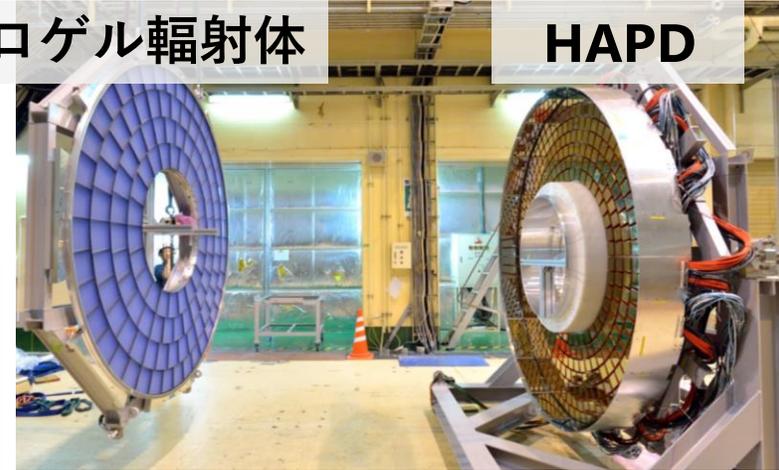
→ 荷電 K 中間子と
荷電 π 中間子を識別

荷電粒子がエアロゲル中の光速を超えて通過時にチェレンコフ光が放出

光検出器で光子を検出
→ 1光子検出が要件

エアロゲル放射体

HAPD

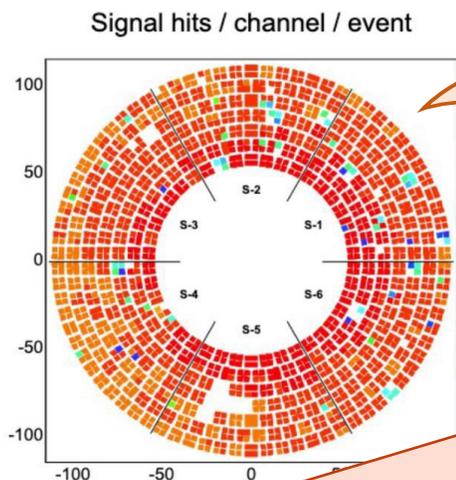


宇宙線による
チェレンコフリングの様子

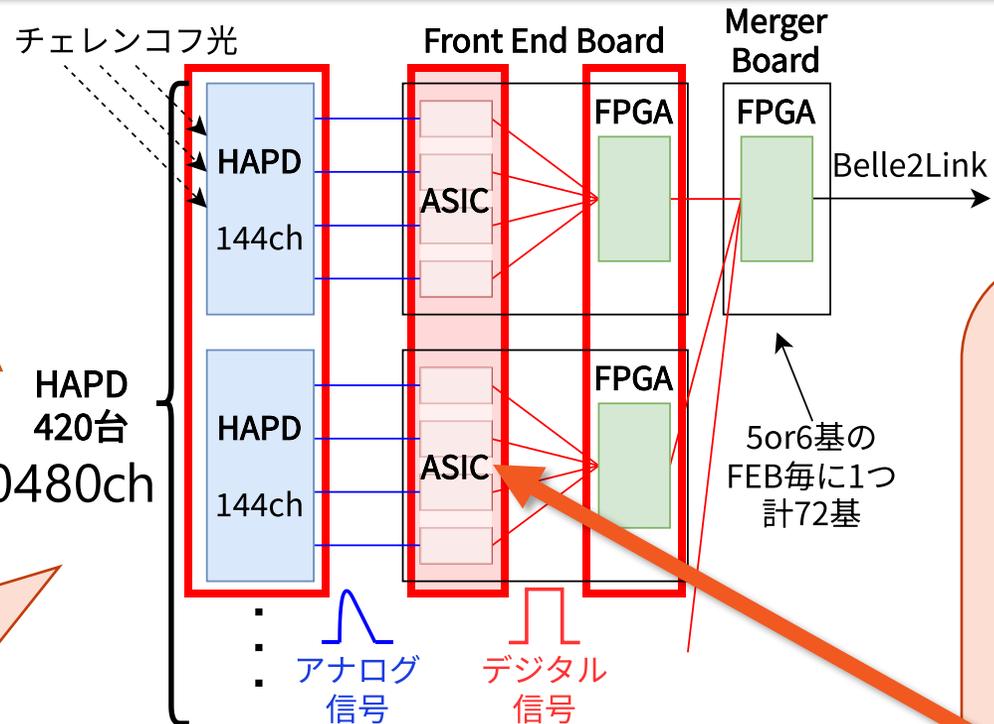
ARICHのアップグレード

■ 光検出器の置換

ARICHの現行構成



HAPD 420台
全60480ch



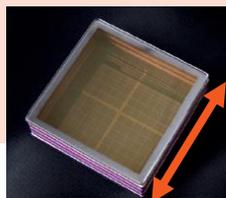
【本研究】

MPPCによる多チャンネル
同時読み出しの
セットアップを構築



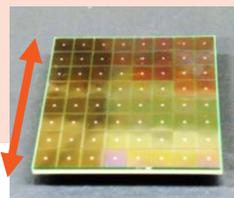
MPPC向けASICの開発

HAPD : 生産終了、10年以上の運用に向け置換検討 (2030年以降)



144ch
73mm

現行 : **HAPD**
(**H**ybrid **A**valanche **P**hoto-**D**etector)

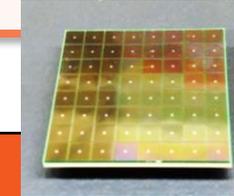
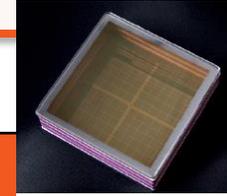


64ch
25.8mm

候補 : **MPPC**
(**M**ulti-**P**ixel **P**hoton **C**ounter)

ARICHのアップグレード

■ HAPDとMPPCの比較

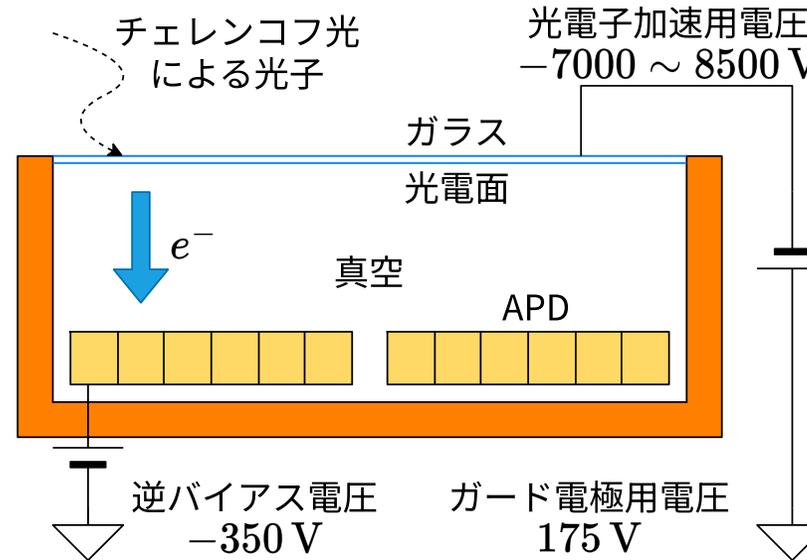


現行：HAPD（生産終了）

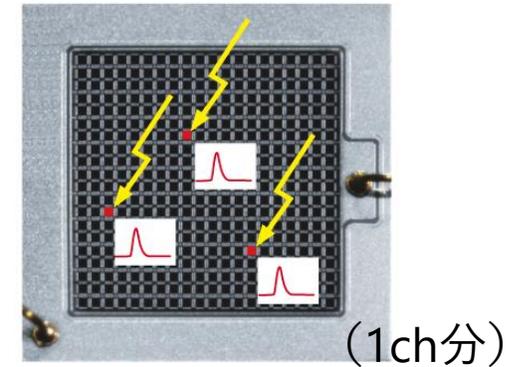
候補：MPPC

原理

加速による増幅(1700倍)とアバランシェ増幅(40倍)



APDをブレイクダウン電圧以上で動作させる



https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html

(1ch分)

光子検出効率	~19%	50%
増倍率	5.6×10^4	良好 4.0×10^6
動作電圧	200 ~ 400 V, -7000 ~ -8000 V	56 V
ダークカウントレート	~0 cps	悪化 ~ 1 Mcps
放射線耐性	△ (10年の運用に耐えるよう設計)	×

目次

■ Belle II 実験

- ARICH 検出器のアップグレード

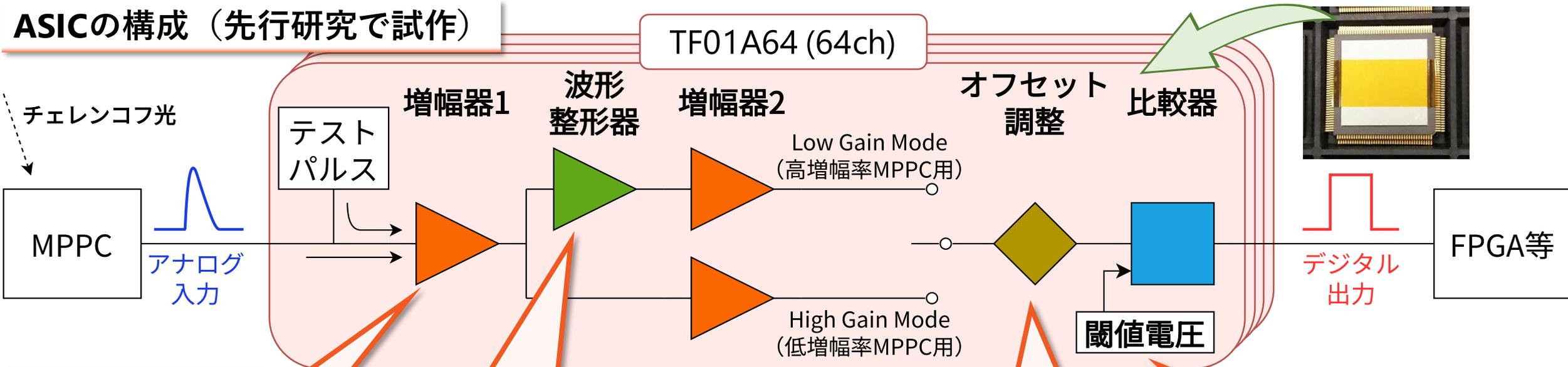
■ MPPC向け信号読み出し用集積回路 “TF01A64” の性能評価

- “TF01A64” の概要
- テストパルス・MPPC信号を用いた評価
- TF01を利用した読み出し系の検証
- ダークパルス分離性能

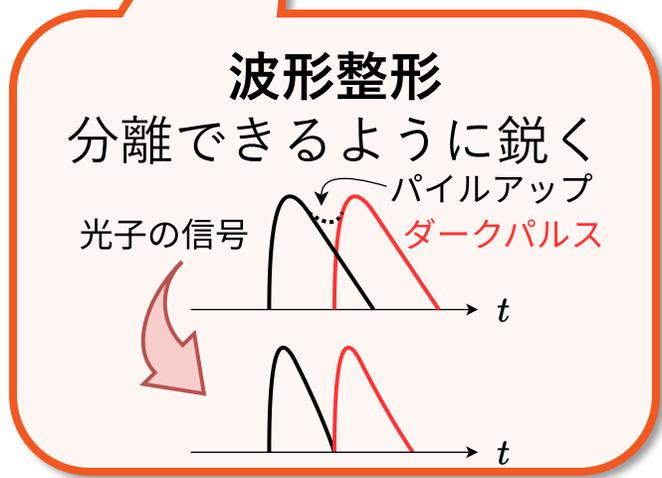


MPPC向けASIC “TF01A64”の概要

ASICの構成 (先行研究で試作)



要求性能・設計



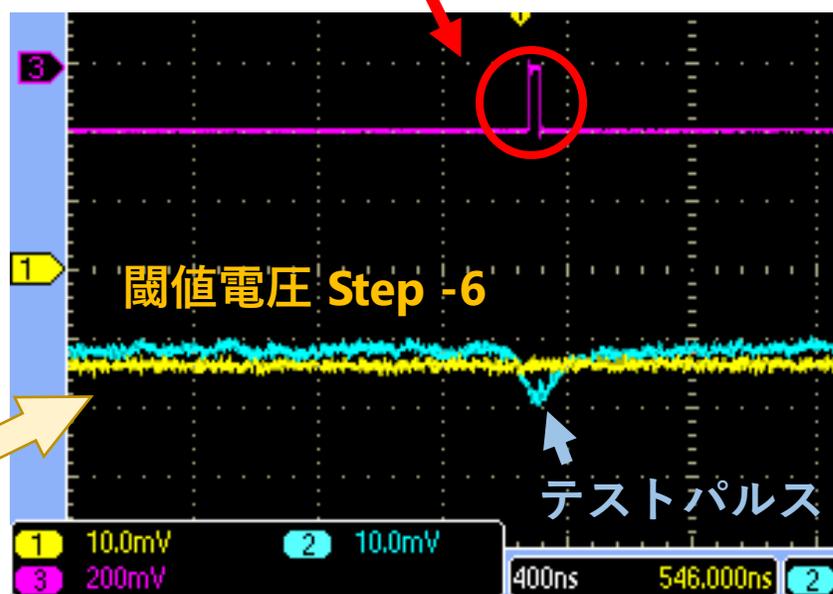
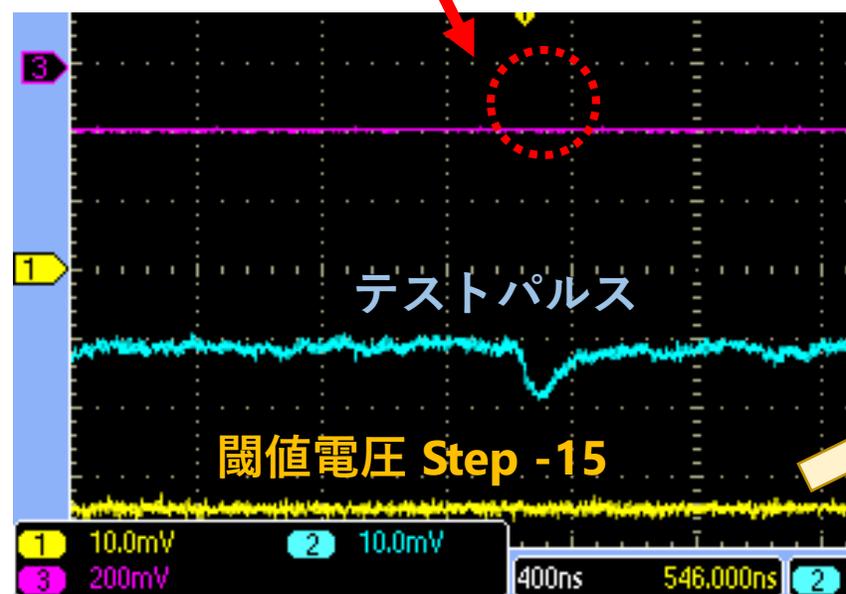
閾値調整による光子識別

■ 1光子信号の識別

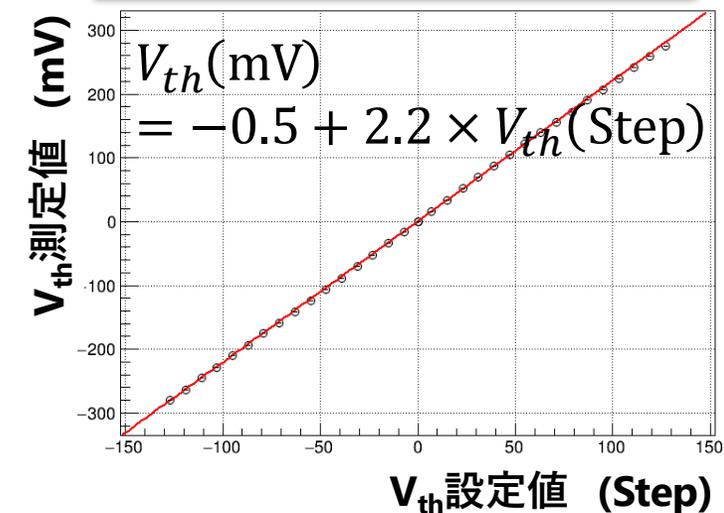
- 閾値電圧 V_{th} の調整 (256段階) によって行う

デジタル出力なし

デジタル信号の出力を確認



閾値電圧の変化



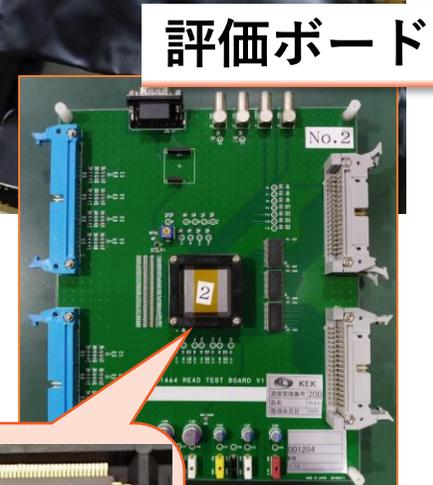
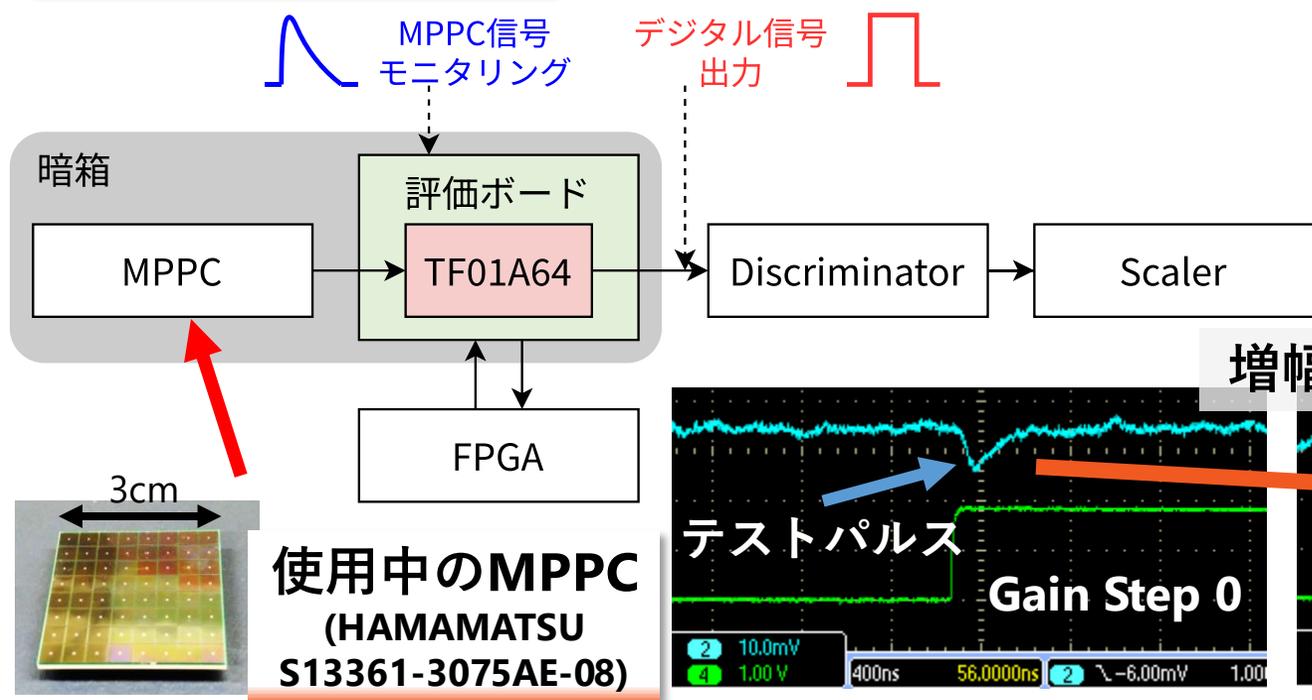
十分な変化量と線形性を確認済

テストパルス・MPPC信号を用いた性能評価

■ 評価項目

- **Gain** (4段階) 調整機能
- **Offset** (256段階) 調整機能
- 1光子信号の **S/N** 比

測定セットアップ

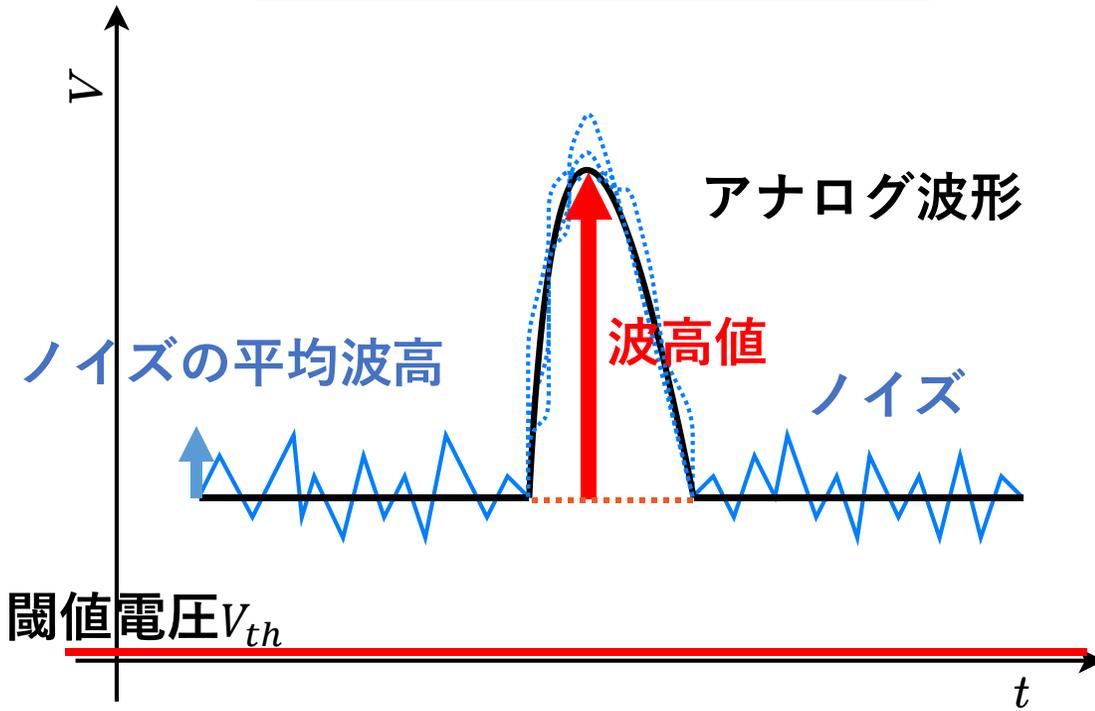


評価手法：Threshold Scan

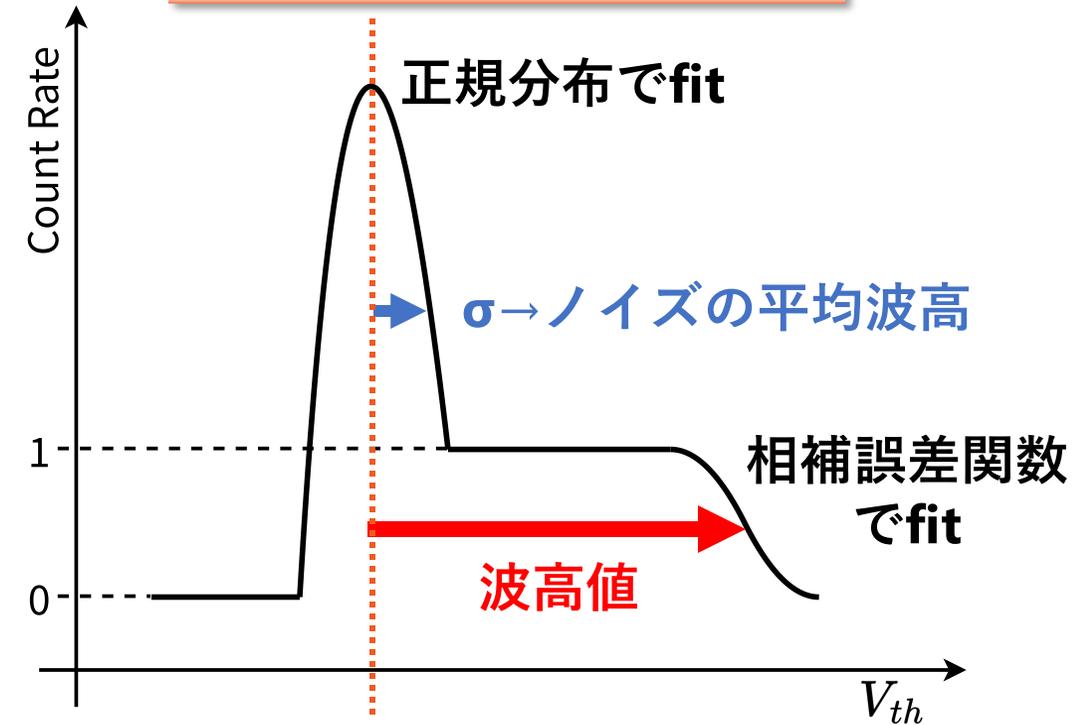
■ 波高値・ノイズの定量化：Threshold Scan

- ASICから出力したデジタル信号をスケーラでカウント
- 閾値電圧 V_{th} の変化に伴うカウント数の変化から波高値を探る手法

入力信号の波形

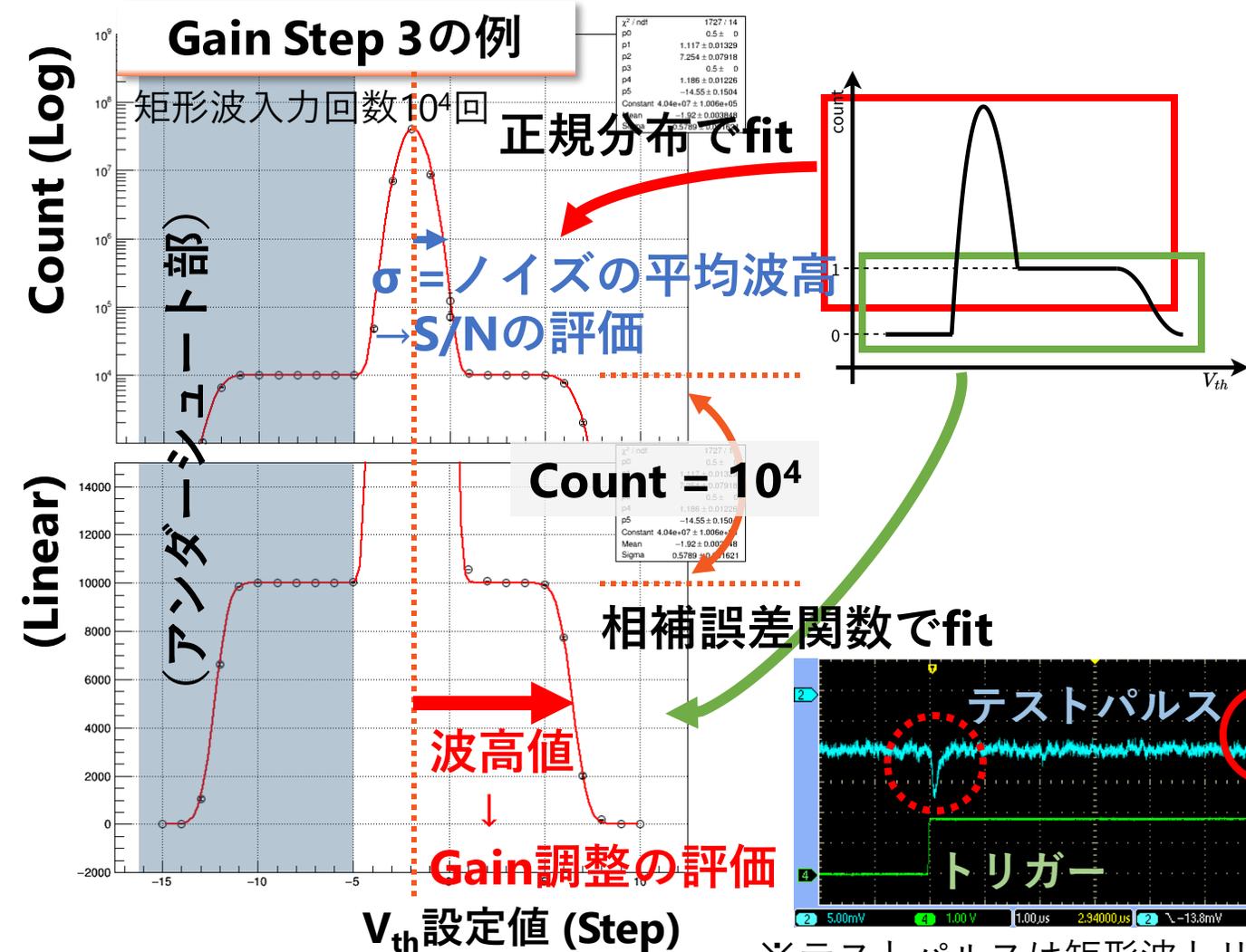


デジタル化後のカウント数

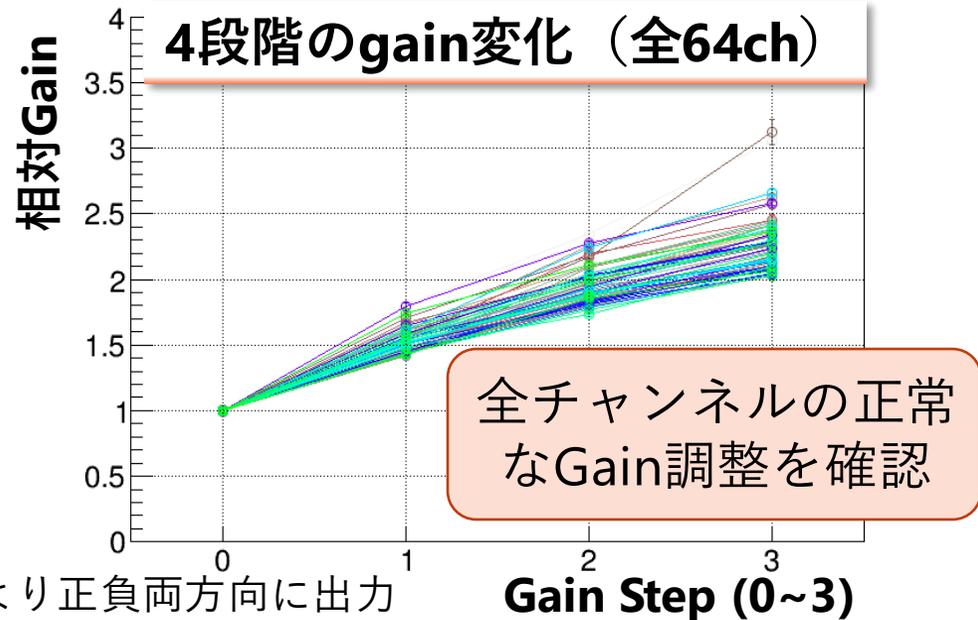
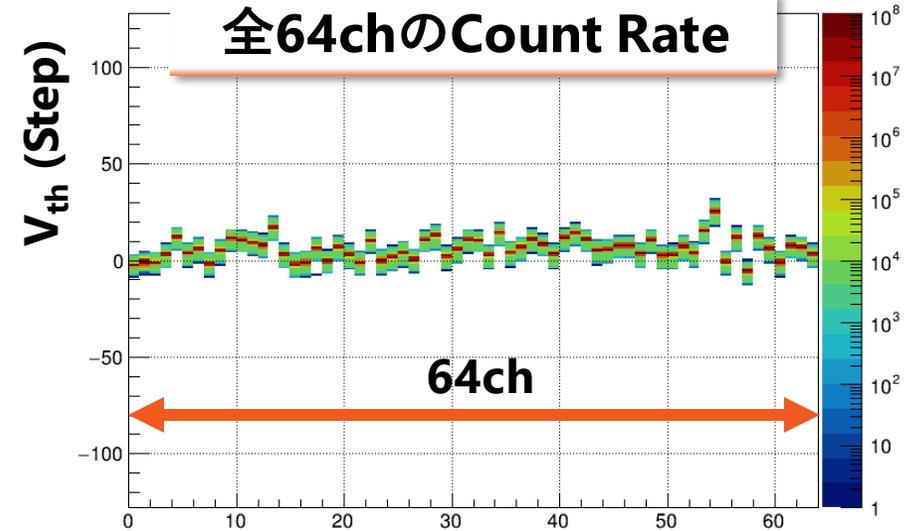


テストパルスを用いたgain調整の評価

Threshold Scanの結果

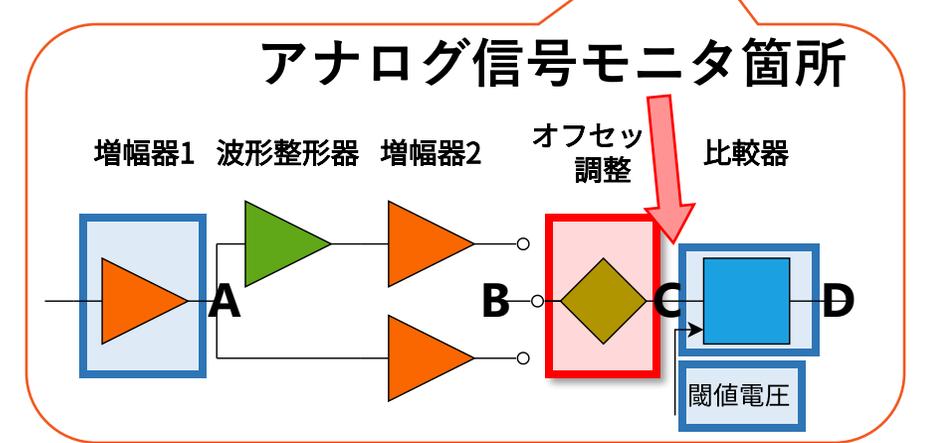
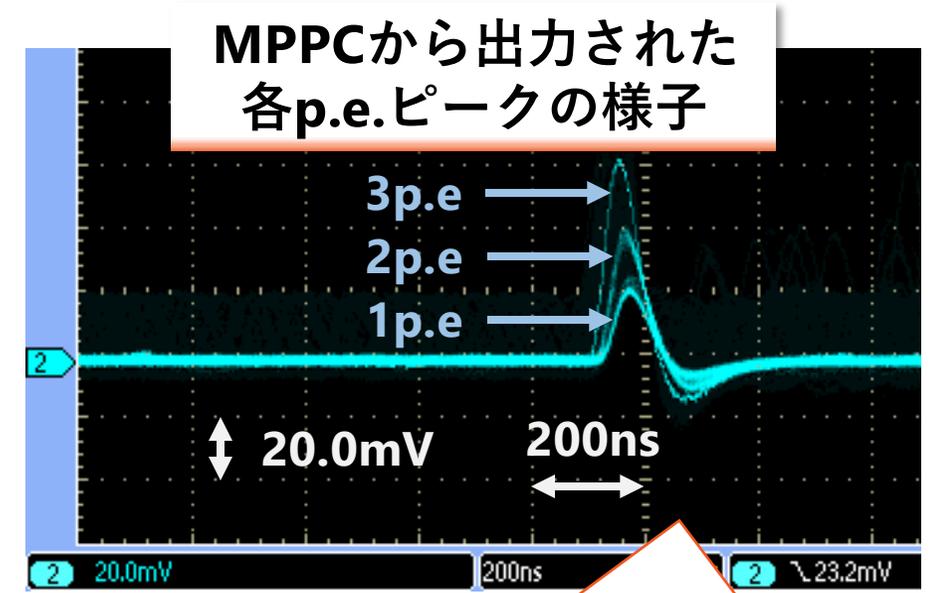
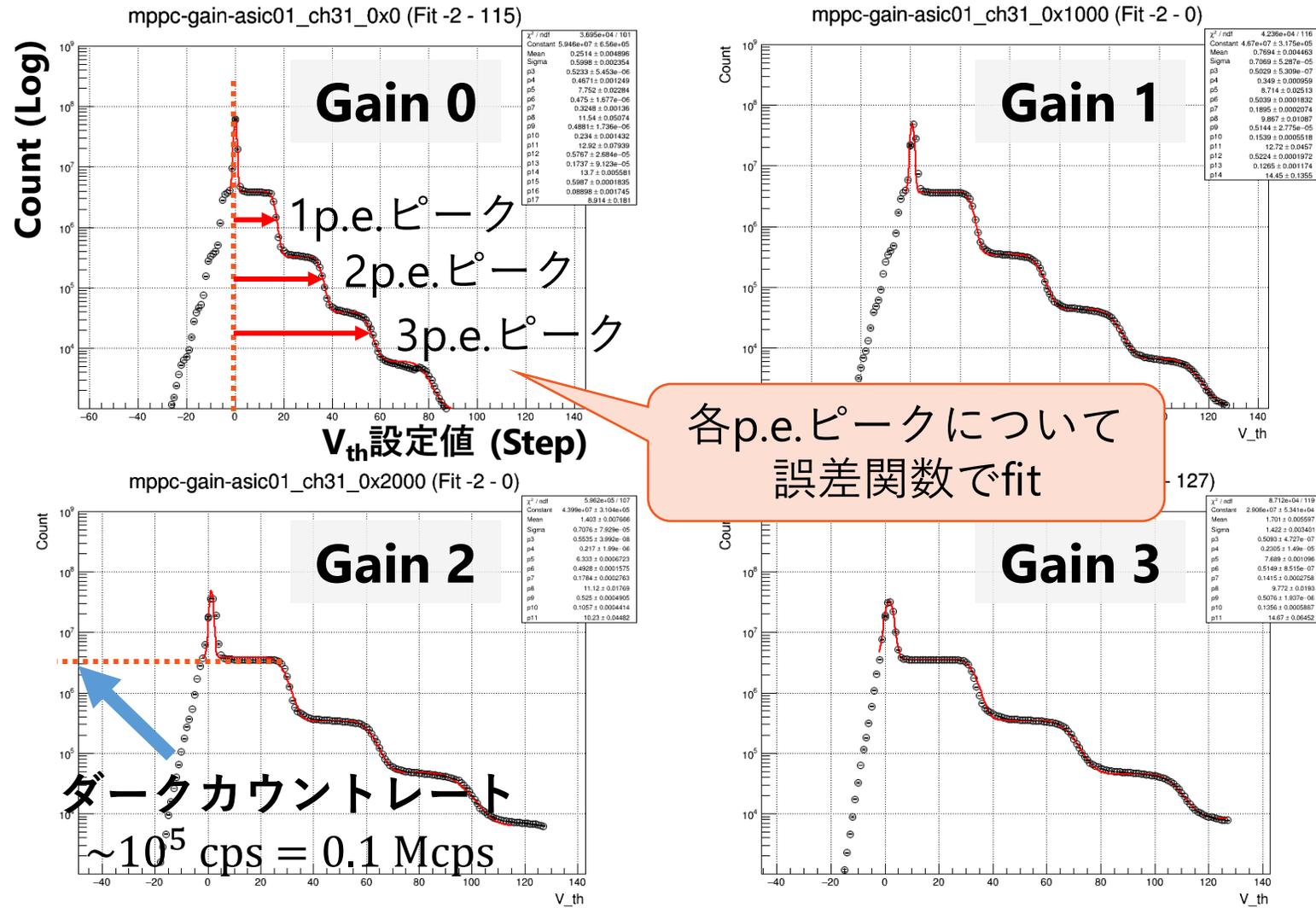


※テストパルスは矩形波トリガーにより正負両方向に出力



MPPC (ダークパルス) を用いた評価

■ 暗箱内でMPPCに光を入射せず、ダークパルスで測定



Gain調整機能・S/N比

Gain Step毎の相対gain (Gain 0を1とした)

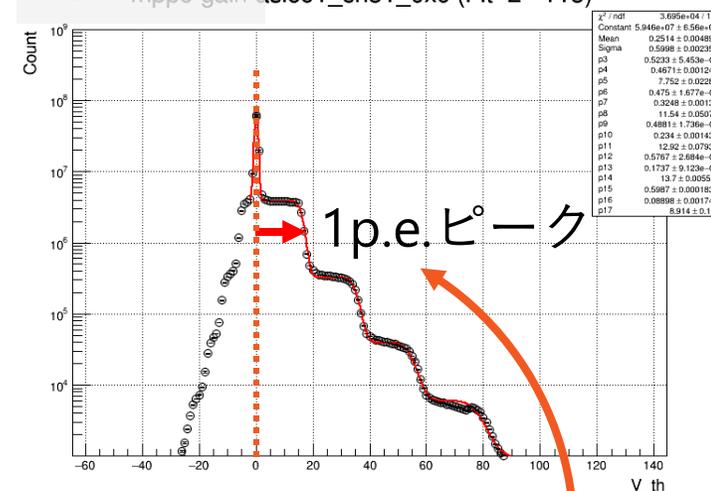
	MPPC 1p.e. (ch26のみ)	シミュレーション (先行研究)
Gain 0	1	1
Gain 1	1.45	1.62
Gain 2	1.75	2.03
Gain 3	1.93	2.34

S/N比

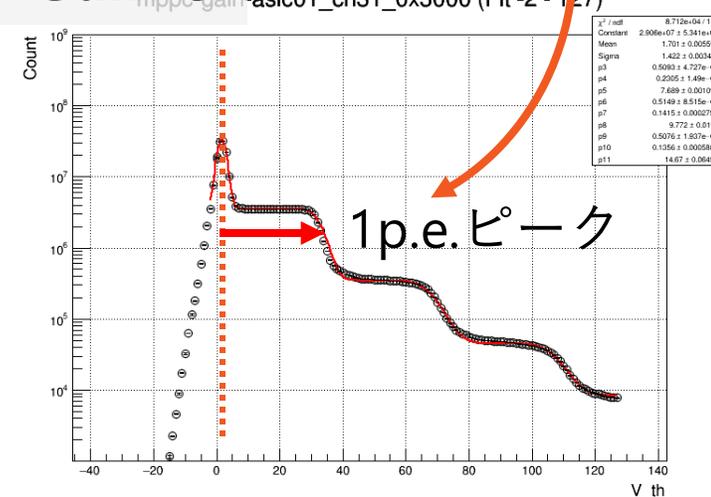
- 十分にノイズを分離できることを確認

	MPPC 1p.e. (ch26のみ)	シミュレーション (先行研究)
Gain 0	27	22
Gain 1	23	27
Gain 2	21	29
Gain 3	22	31

Gain 0



Gain 3



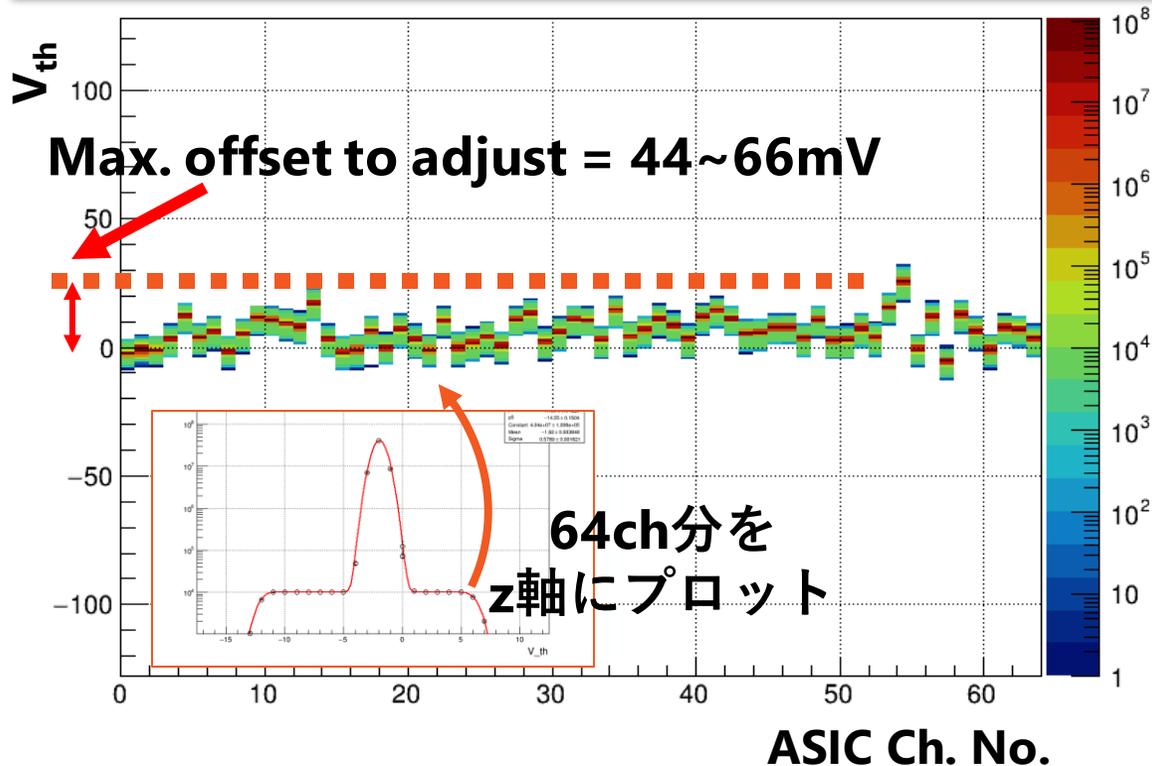
Gainの比較

Offset調整機能

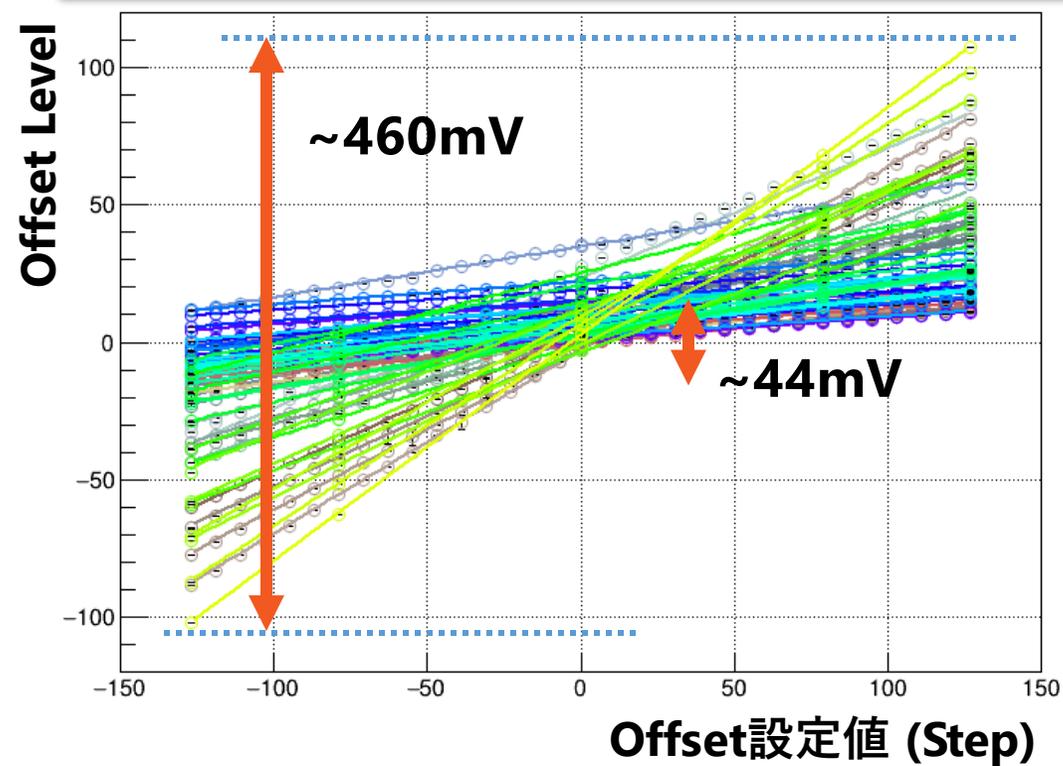
■ Offset調整機能 (256段階)

- 全64chに共通の V_{th} を適用するための機能。
- 一部のchのoffset変化量は十分ではないことが判明。他のサンプルも要測定。

64ch Count Rate (Gain Step = 0)



64ch Offset変化 (Linear Fit)



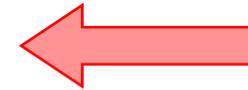
目次

■ Belle II 実験

- ARICH 検出器のアップグレード

■ MPPC向け信号読み出し用集積回路 “TF01A64” の性能評価

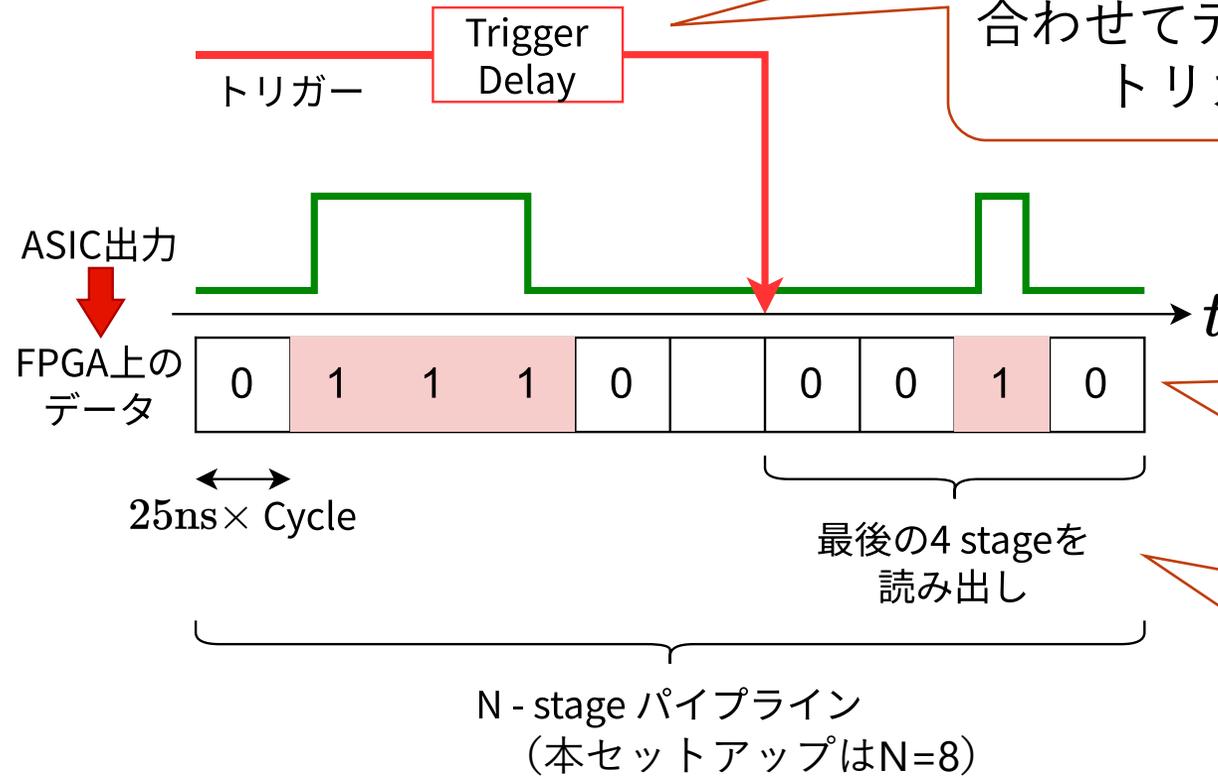
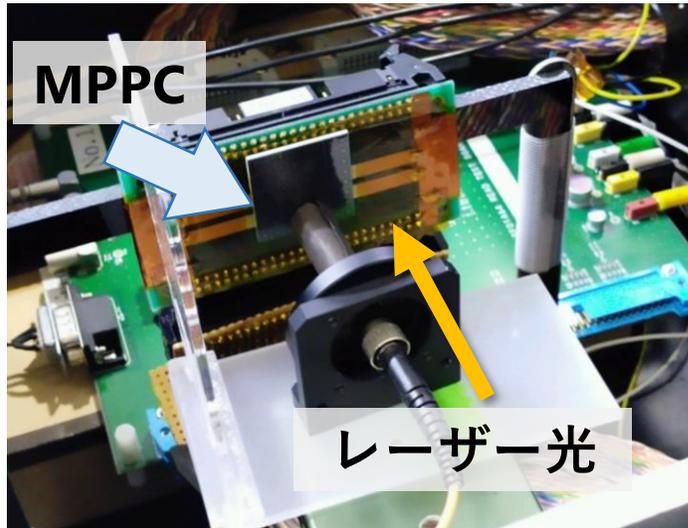
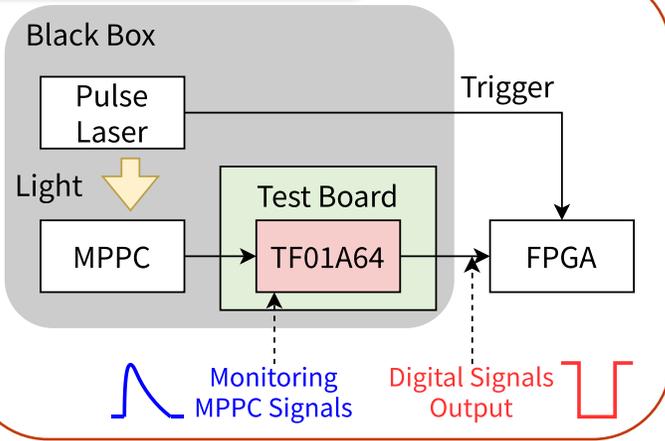
- “TF01A64” の概要
- テストパルス・MPPC信号を用いた評価
- TF01を利用した読み出し系の検証
- ダークパルス分離性能



TF01を利用した読み出し系の検証

■ ARICHのデータ収集系に適応

セットアップ



MPPCへの光の入射タイミングに合わせてデータを取り出すため、トリガーの遅延を調節

ASICからの信号をFPGAで一時的に保存

他の検出器からトリガーが来たときに取り出す

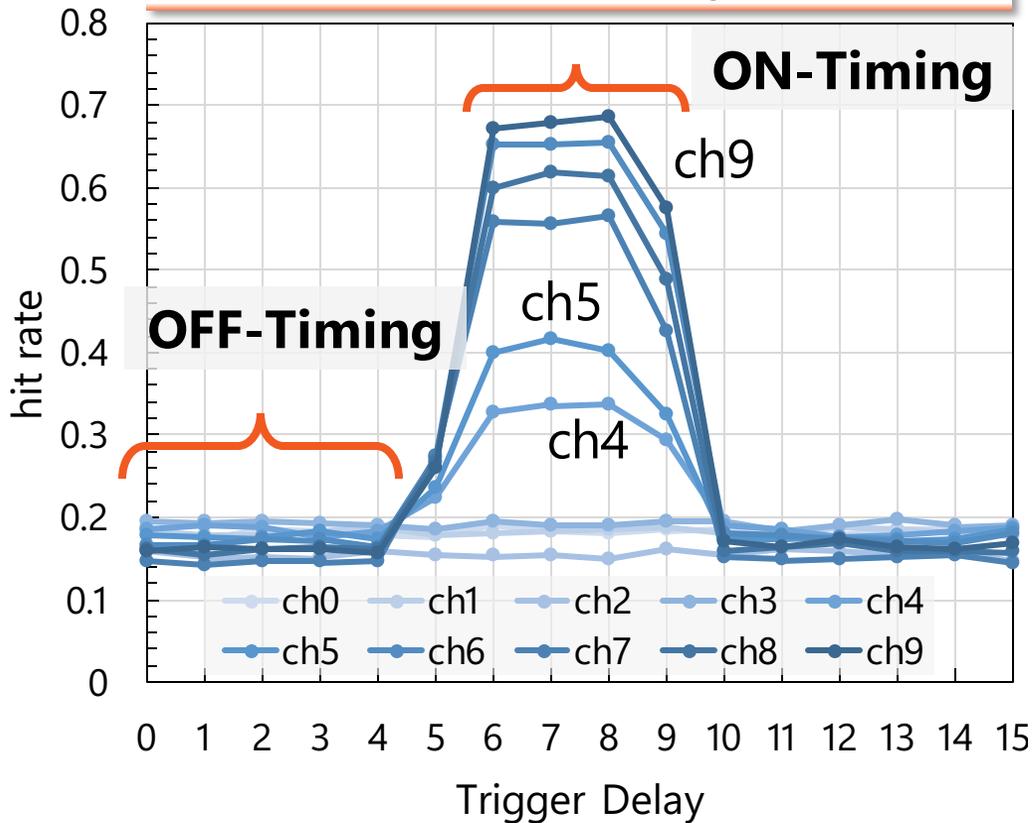
MPPCにパルスレーザー光を入射 (50kHz)、トリガーをFPGAボードで受け付け、offset調整も行い、同時に多チャンネルの信号を読み出してhit rate計測

レーザー光による読み出し系テスト

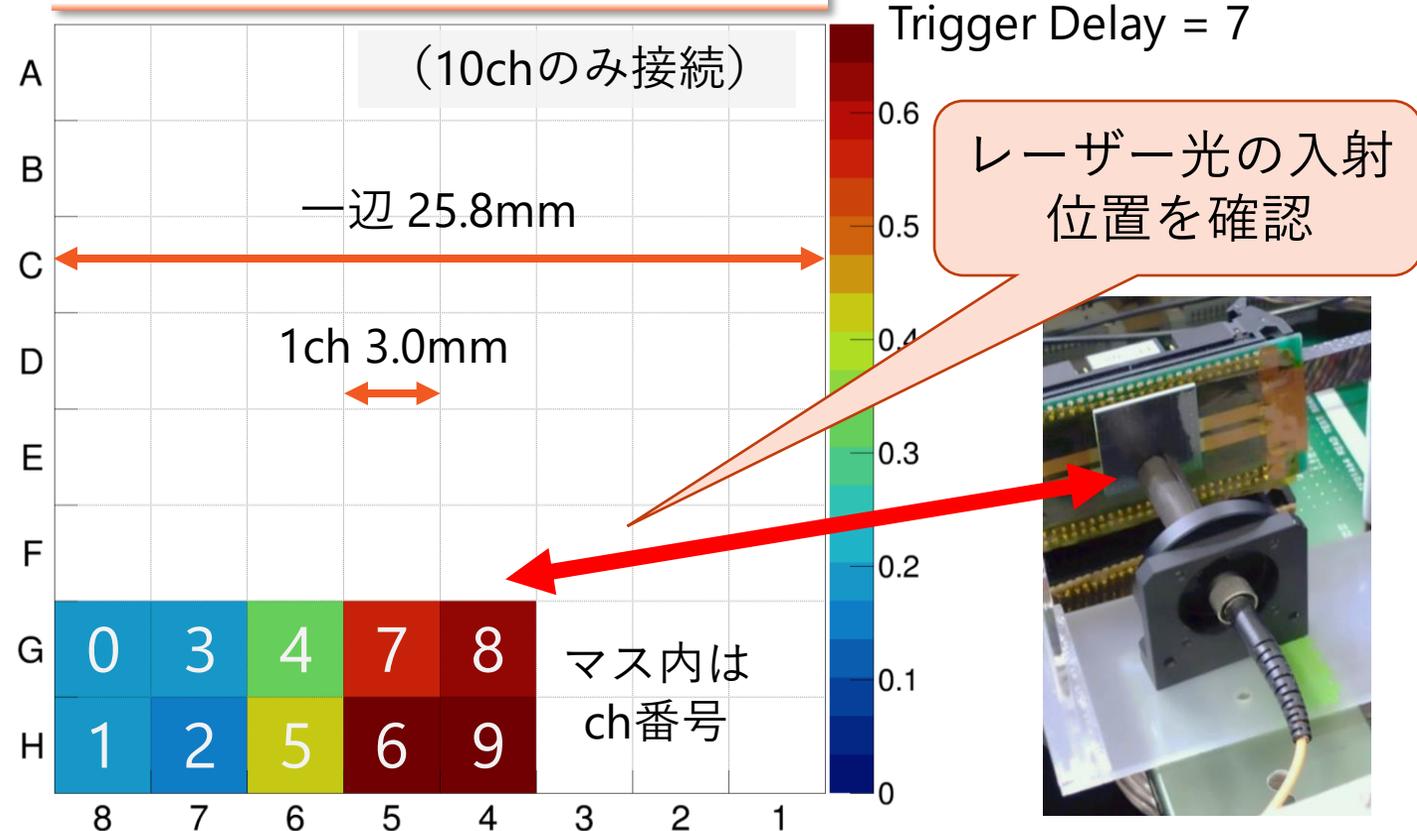
■ Hit Rate測定

- 直径2.5mmの光コネクタに直径8mm程度のカバー。光子数/パルス ≤ 5 に設定
- 光子検出の基本的なセットアップを確認。

10ch分のhit rate (Cycle = 5)



MPPCのhit rate分布



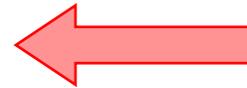
目次

■ Belle II 実験

- ARICH 検出器のアップグレード

■ MPPC向け信号読み出し用集積回路 “TF01A64” の性能評価

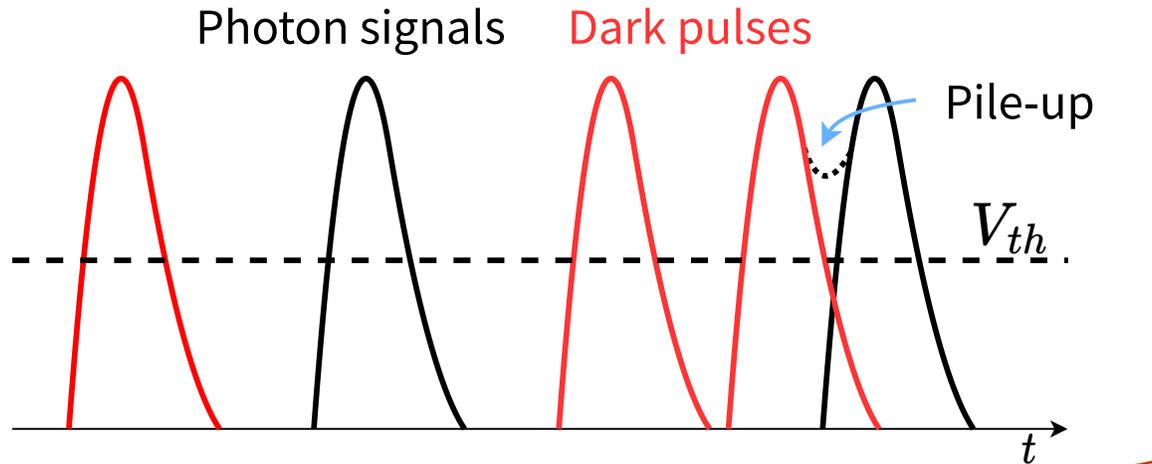
- “TF01A64” の概要
- テストパルス・MPPC信号を用いた評価
- TF01を利用した読み出し系の検証
- **ダークパルス分離性能**



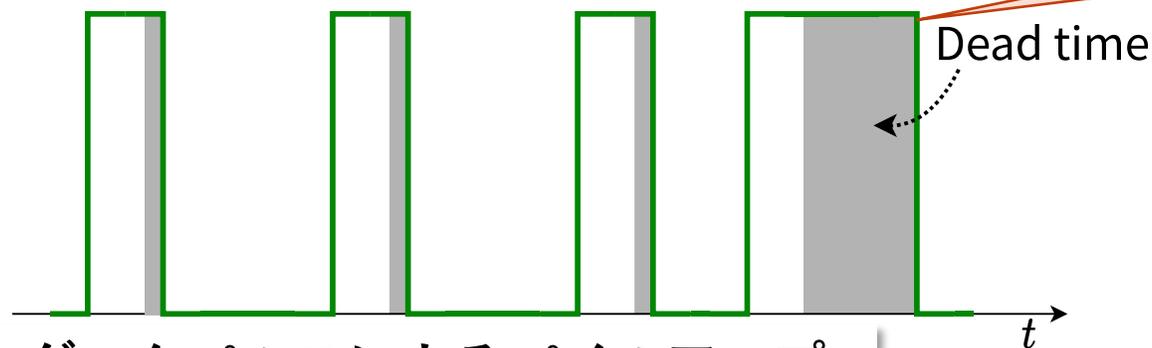
ダークパルス分離性能の評価

■ダークパルス

- MPPCから熱的に発生したキャリアによってランダムに発生する偽信号。
- 本物の信号と全く同じ形で区別不可能。



ダークパルスと分離できていない
(デジタル信号を一定幅にしたとき、
直後は不感時間=信号収集不能になる)



ダークパルスによるパイルアップ

MPPCは高ダークカウントレート
真の信号とできるだけ分離したい

ダークパルス分離性能のシミュレーション

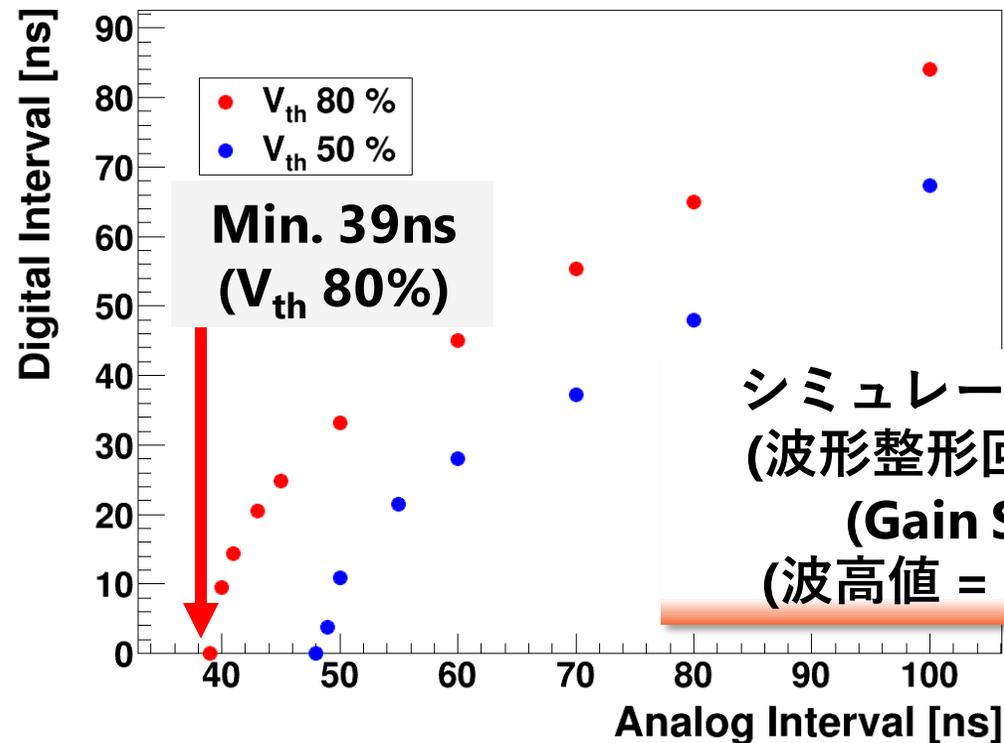
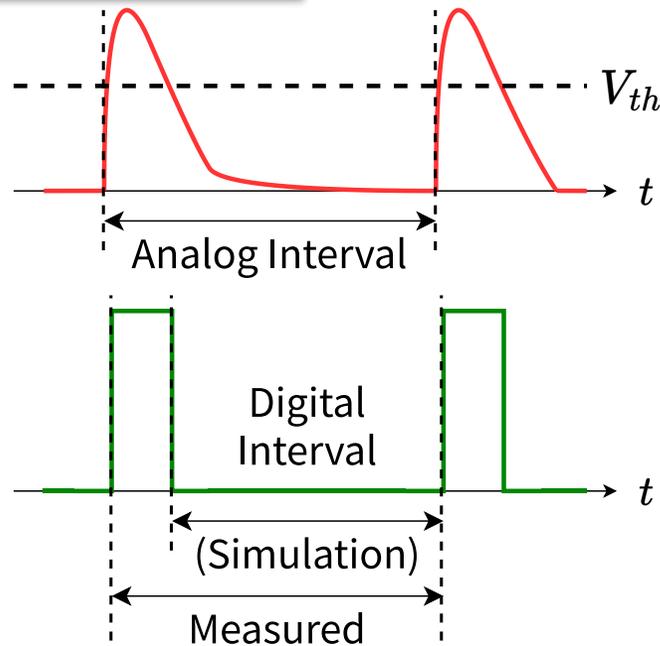
■ 不感時間の割合 D

- ダークカウントレート N [cps]、Digital Interval a [ns] とすると、
$$D \equiv N \times a$$

- $N = 1$ Mcps、 $a = 40$ ns のとき、 $D = 4\%$ → **4%の信号が失われる。**

➤ MPPCの高検出効率 (PDE) と、放射線耐性の悪化は未考慮。

信号間隔の定義



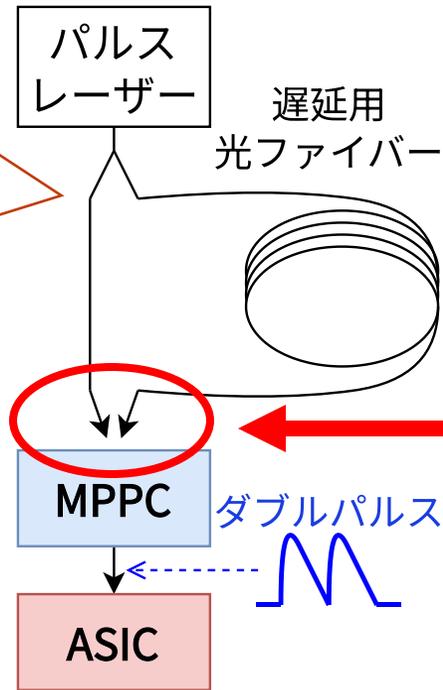
光によるダークパルス分離評価

■ 光ファイバーによるダブルパルスの生成

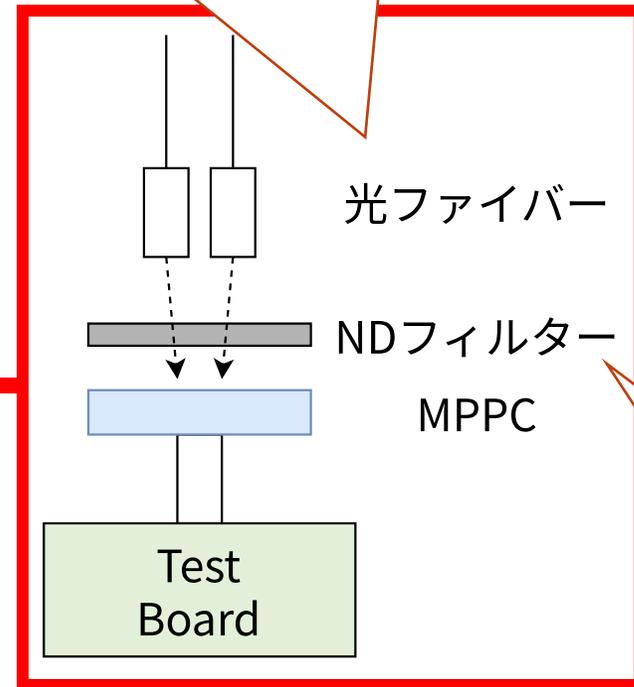
- 実際の近接ダークパルスと同様の状態を再現
- 波形整形回路が未装備のサンプルで検証。

セットアップ

分岐光ファイバー
(1入力2出力、
光量50:50)
([THORLABS TW470R5F1](#))



光量を増やし
ダブルパルスの出力確率を上げる



遅延用光ファイバー

NDフィルターを用い
MPPCに入射する光子数
を減らす



ダブルパルスによる不感時間の評価

■ 不感時間の割合 D の定義

$$D \equiv N \times a$$

■ 測定結果 ($V_{th} = (\text{波高}) \times 80\%$ のとき)

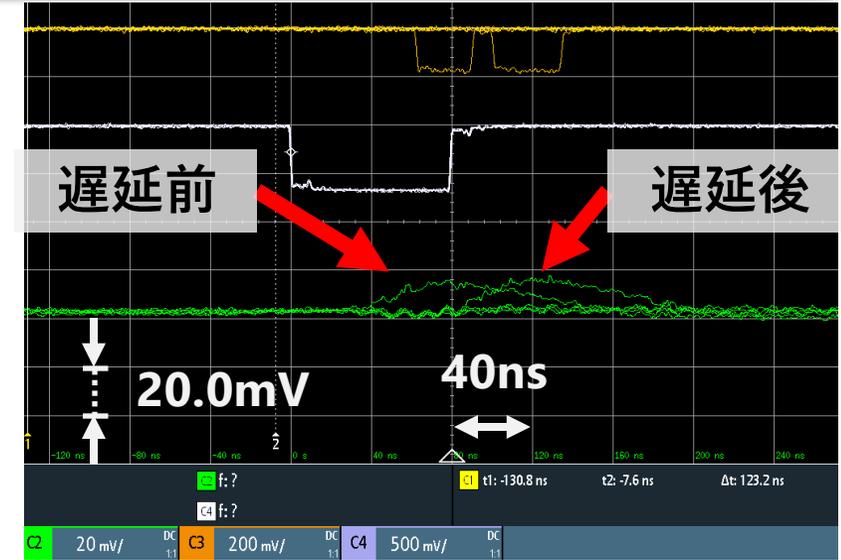
- (分離限界での digital interval) = $54.2 \pm 0.01 \text{ ns}$

- $N = 1 \text{ Mcps}$ とすると

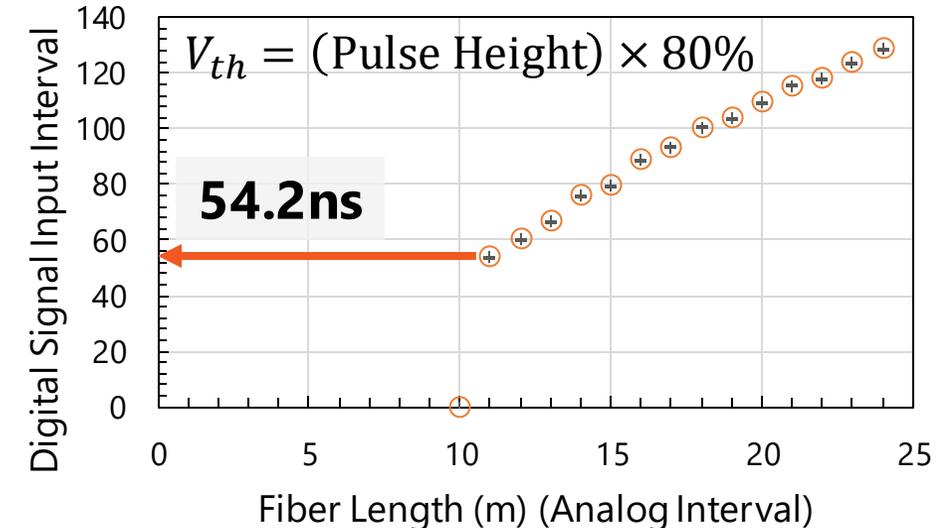
$$D_{V_{th}=80\%} = 1 \text{ Mcps} \times 54.2 \text{ ns} = \boxed{5\%}$$

● 放射線損傷 (室温・10年間) 後

- $N = O(10^3) \text{ Mcps/ch}$ を見込む。(先行研究)
- 不感時間はより長くなると思われる。



Analog vs digital input interval



ダブルパルスを用いた評価手法を確認。
デジタル信号の幅を一定 (**20ns**) にする・波形整形回路を装備したサンプルでの測定が必要。

まとめ

- ARICHアップグレード用、MPPC向けのASIC “TF01A64”の性能評価
 - Gain及びS/Nの評価：1p.e.ピークgain step 0でのS/Nは27となり、十分なノイズ分離を確認
 - Offset調整機能：変化量が不足しているチャンネルが存在
 - MPPCとFPGAボードを接続し、レーザー光を入射して、同時多チャンネル読み出しのセットアップを確認
 - ダークパルス分離性能の評価が進行中。放射線損傷のないとき、不感時間の割合は $D < 5\%$ と見積もり
- 今後
 - 波形整形回路を装備したサンプルでの評価
 - ビームテストを見据え、同時に複数のMPPCを運用し、全てのチャンネルの信号を読み出すセットアップの構築
 - 中性子を照射したMPPCを用いたASICの性能評価
 - シミュレーションと、次期試作の検討

Appendix

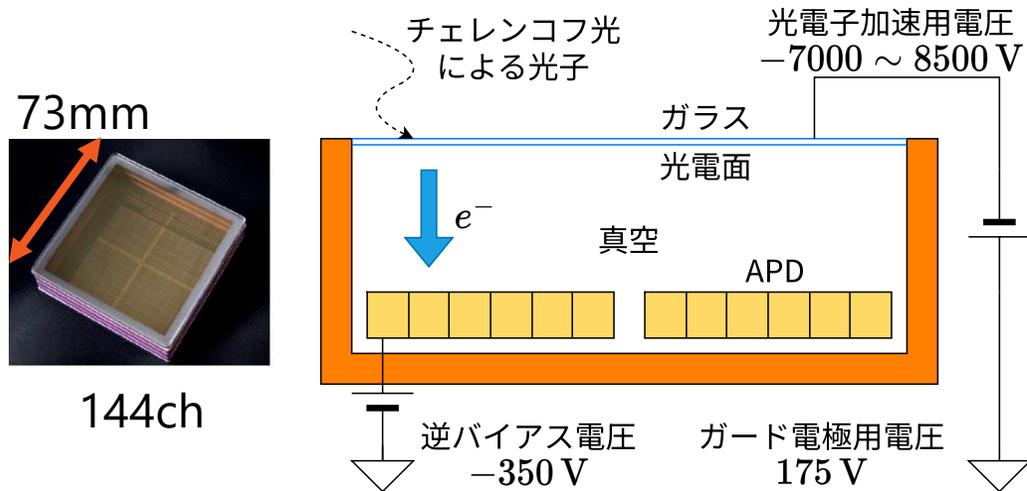
光検出器MPPC

■ 光検出器MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

- APD (Avalanche Photo Diode) をブレイクダウン電圧以上で動作させることで増倍率向上
- 位置精度、検出効率向上

HAPDの原理

APDピクセルに加速した光子が入射
加速による増幅 (1700倍) とアバランシェ増幅 (40倍) で $10^4 \sim 10^5$ 倍に

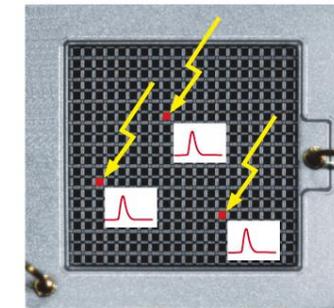


MPPCの原理

APDピクセルに光子が直接入射
 10^5 に増幅



MPPC (3075AE)



(1ch分)

https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html

ARICH MPPC関連タイムライン

ASIC

評価ボード

光検出器の選定

2018

MPPC特性の評価 (2018年-)

2019

回路設計・評価 (2018年10月～2019年10月)
- MPPC用ASICとしてのプロトタイプ
- MPPCを使った際のARICHのシステムを構築

2020

ASIC製作
- レイアウト設計
- チップ製作
(2019年12月～2020年10月)

回路図作成
(2020年6月～2020年8月)
ボード製作
(2020年8月～2020年11月)

MPPCの中性子照射試験
(2020年2月14日-16日)

2021

性能評価 (テストパルス) (~2022年3月)

2022

性能評価
- **テストパルス**
(2022年10月～)

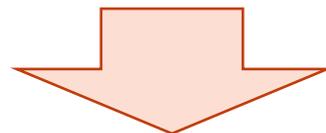
MPPCのアニーリング

2023

性能評価
- **MPPC接続、ダークパルス分離**
(2023年4月～)
- ASICのバグ修正

MPPCのアニーリング
- PDE測定(~2023年6月)

本研究



MPPCを用いたARICHセットアップの確立

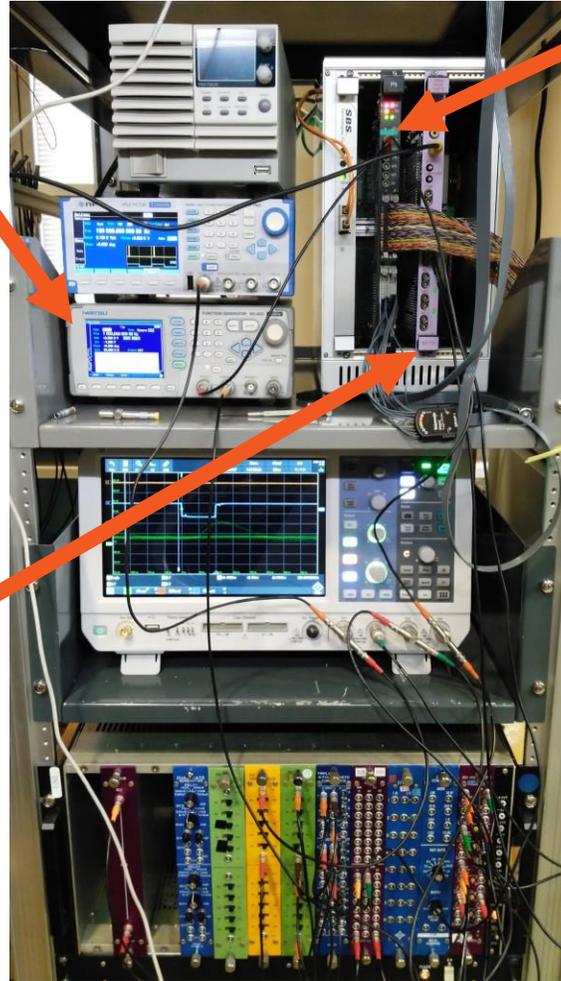
測定セットアップ

IWATSU SG-4321
(テストパルスのトリガー、**Scaler Inhibit**用)

PyVISAでトリガー自動化

Visual Scaler
RPV-100

PCで読み出し・Web APIを
介してスプレッドシートに
転記 (簡易モニタリング)



PTS
(VMEモジュールのFPGAボード、
元はBelle 実験のトリガー用ボード)

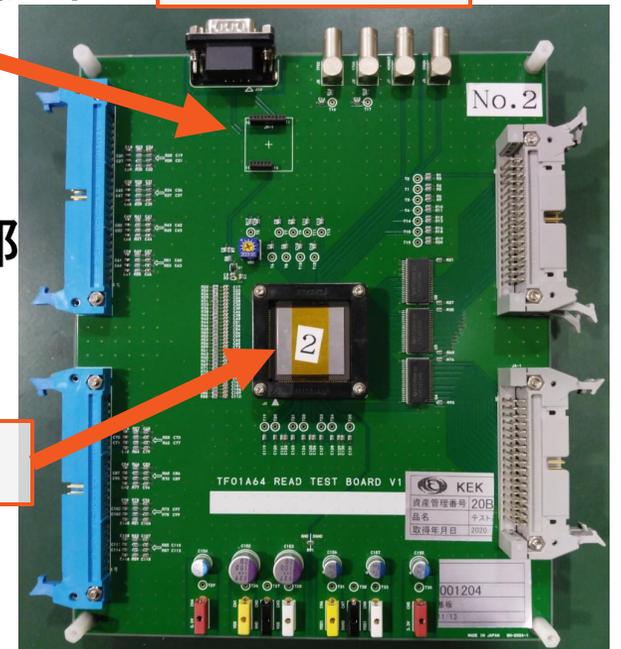
パラメータ書き込み・信号読み出し

MPPC用電源接続部

評価ボード

MPPC接続部

TF01A64



ASIC電源供給部

TF01A64用評価ボード

■ 評価ボード

- 先行研究で製作

MPPC駆動電源制御用コネクタ

MPPC駆動電源接続部

MPPC接続用コネクタ

- アナログ信号入力
- MPPCへ電源供給

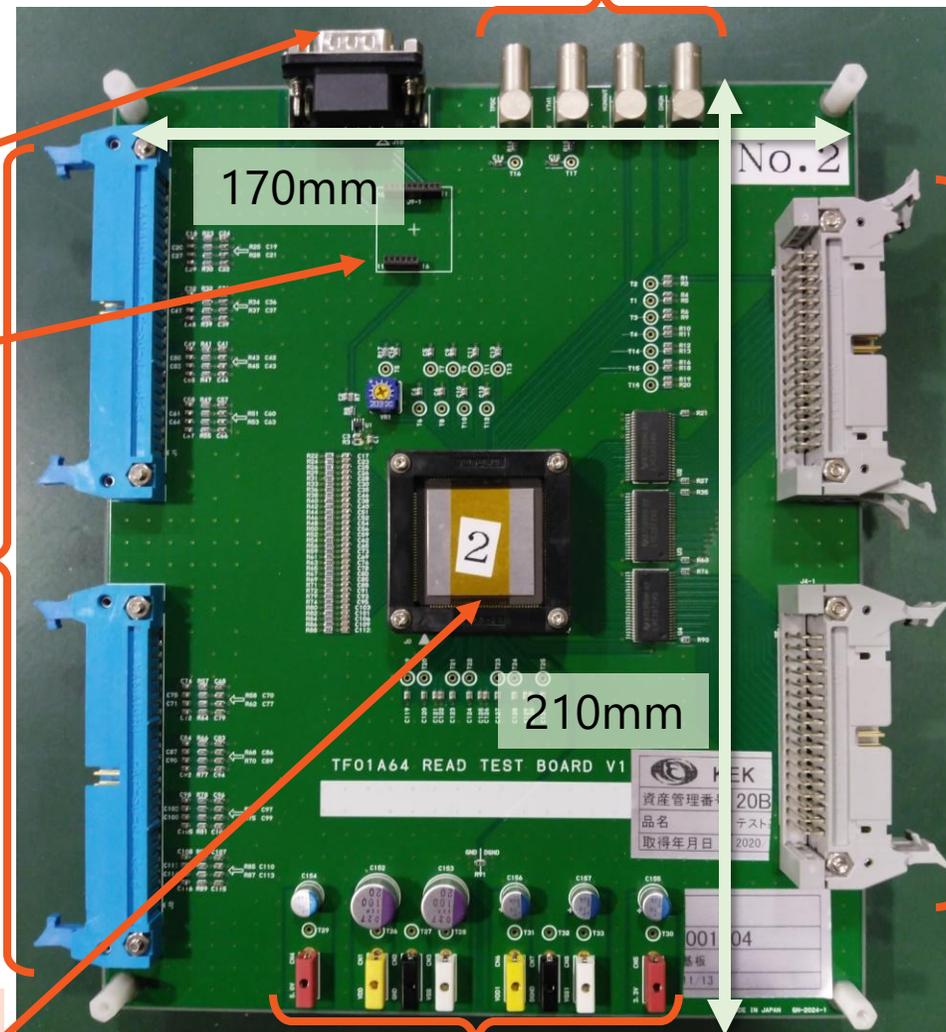
ASIC "TF01A64"

ASIC内部の信号モニタ用コネクタ

- VTH1(閾値電圧)
- TPDC(テストパルス振幅)
- MONOUT(アナログ信号)
- DMON(デジタル信号)

FPGA接続用コネクタ

- ASIC操作用パラメータ送信
- デジタル信号処理
- 多ch同時読み出し

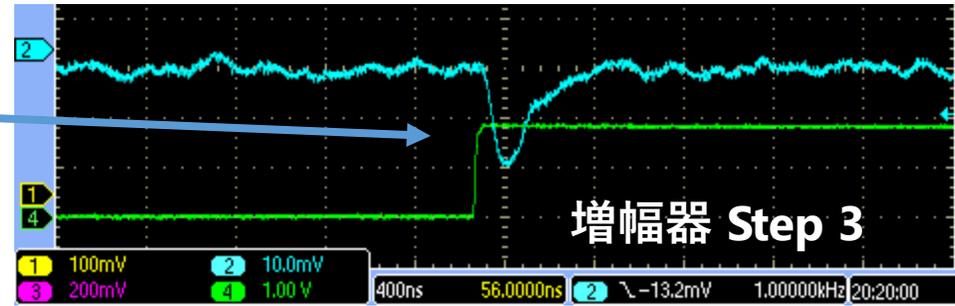
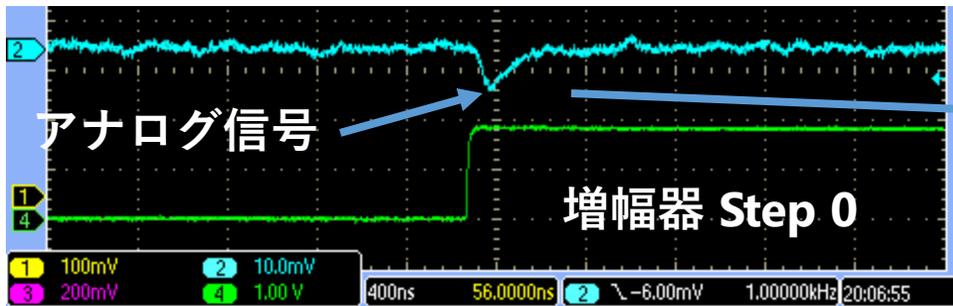


電源系統(GND、±1.65V、3.0V、5.0V)

テストパルスを用いた性能評価

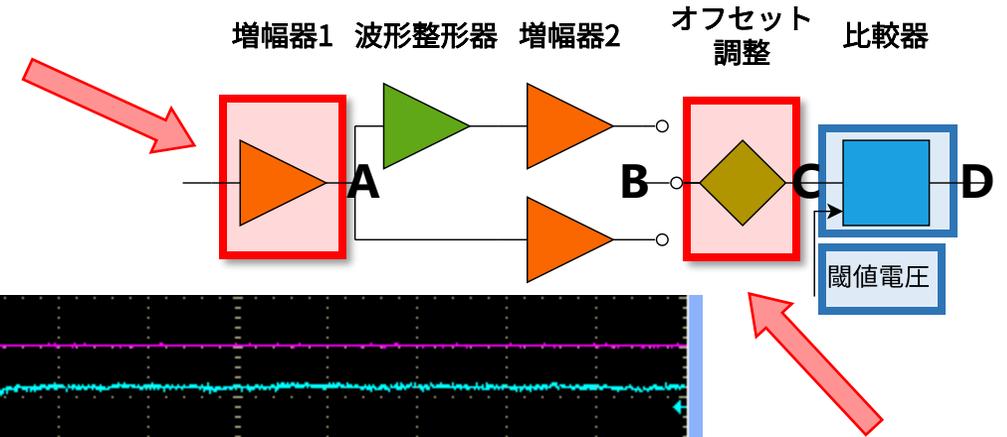
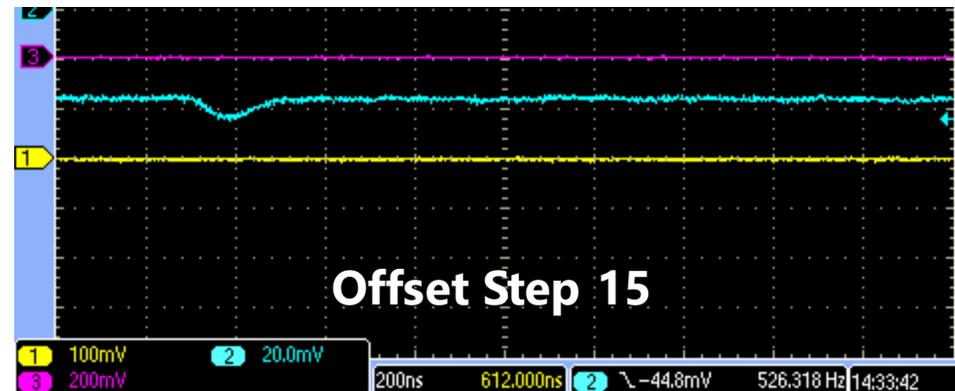
■ Gain調整 (4段階)

- 先行研究と同等の増幅を確認できた (モニタ箇所: **B**)



■ Offset調整 (256段階、約2mV/step)

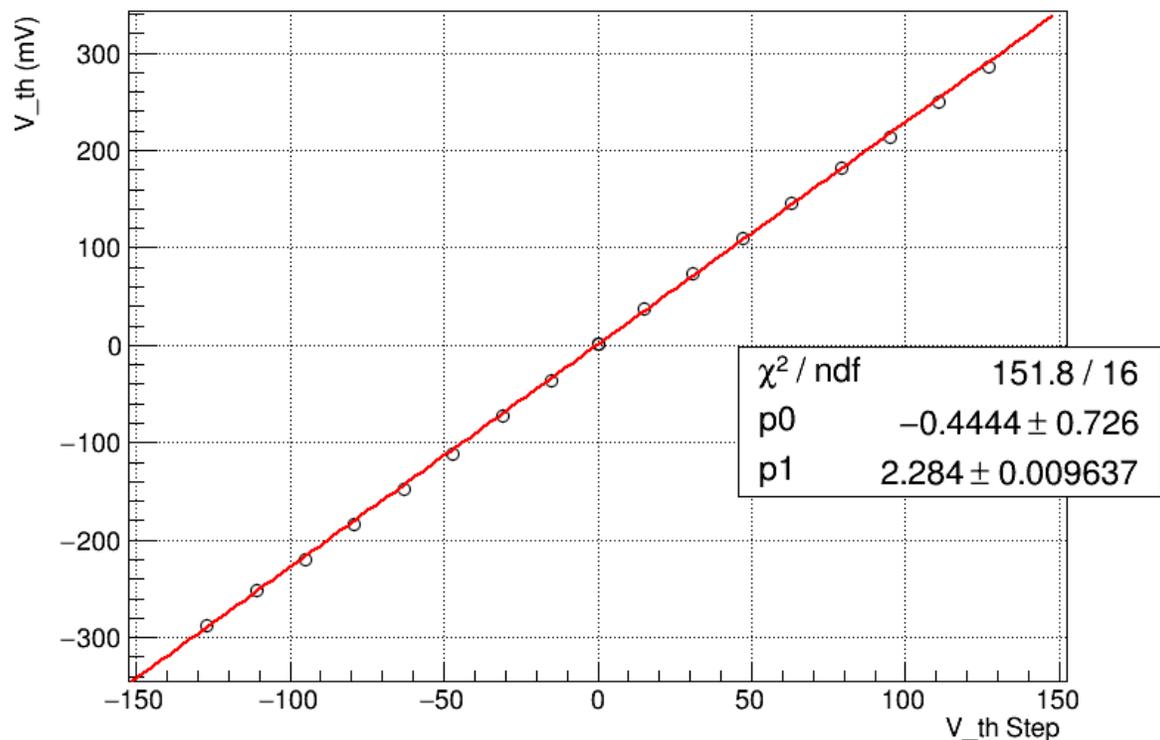
- 変化を確認 (モニタ箇所: **C**)



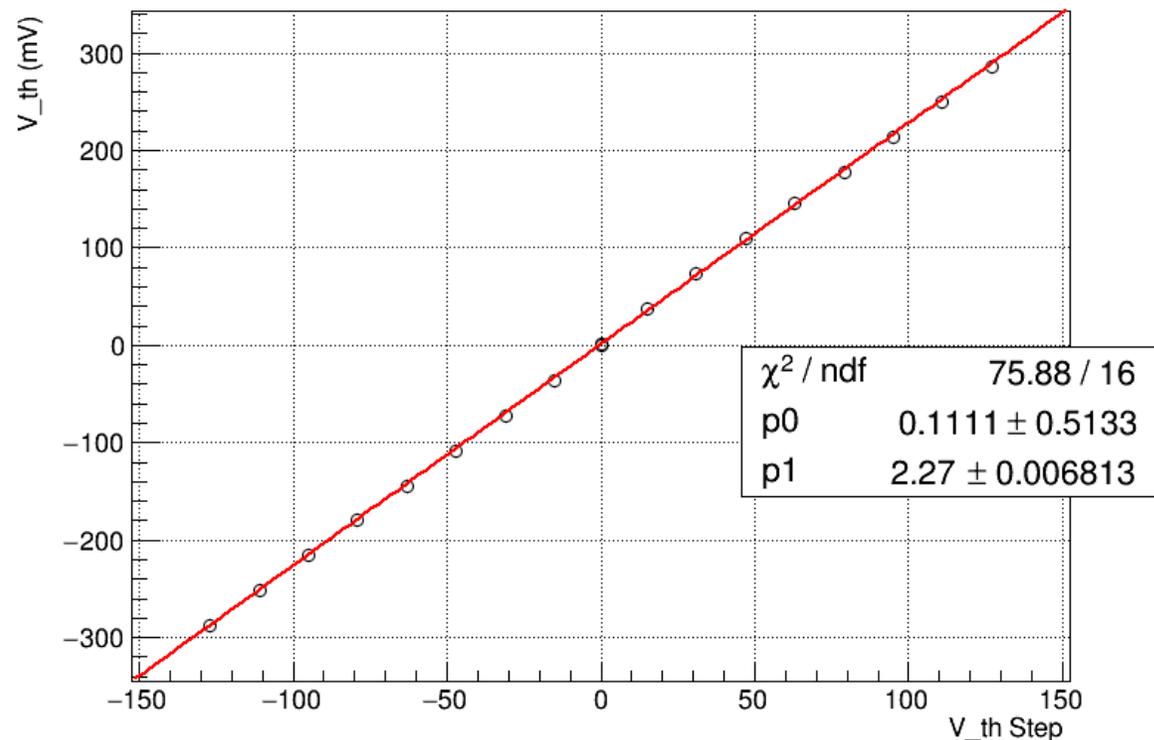
閾値電圧調整の確認

- テストパルス入力時とアナログ信号入力時に大きな差は見られない

V_th (vth_230121/vth_tp)



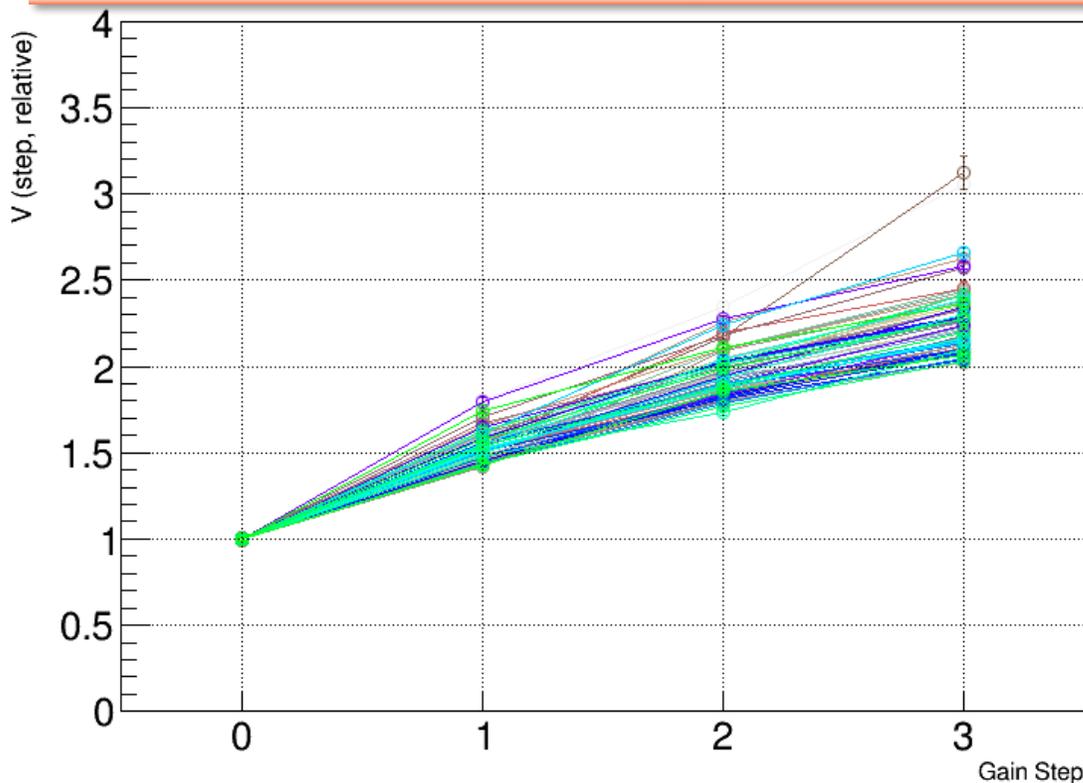
V_th (vth_230121/vth_analog)



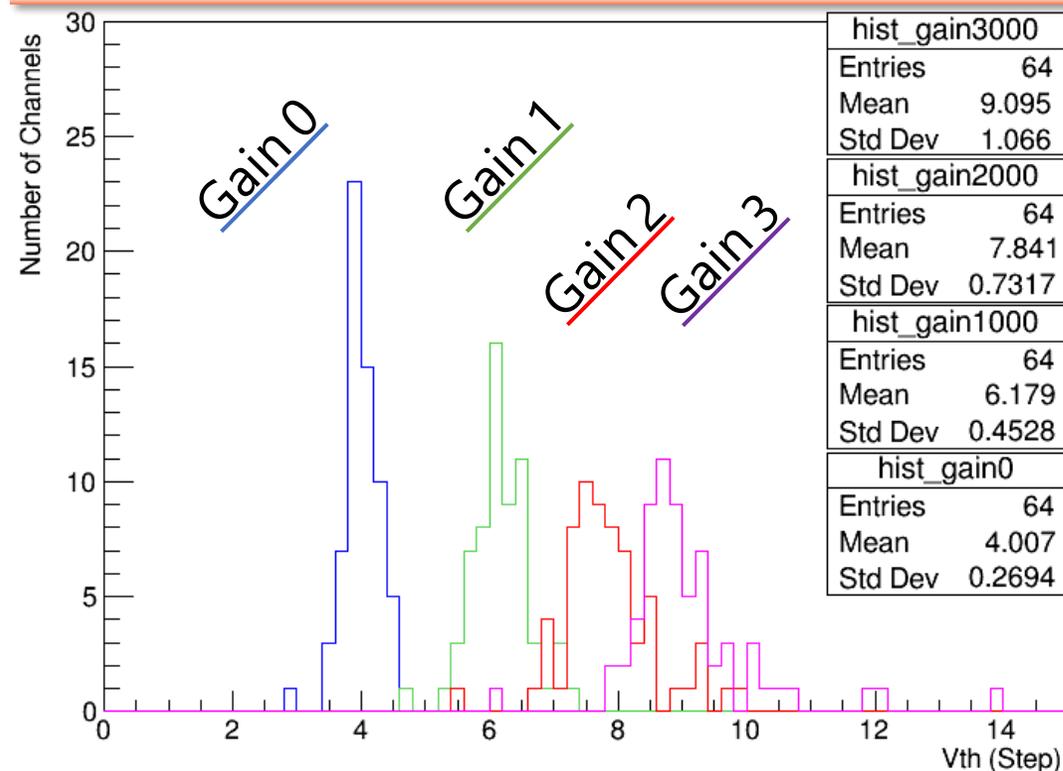
Threshold Scanによる評価：Gain

- Gain調整機能：テストパルスで全64chの確認
 - Gain changeの傾きの分布（線形ではない）

全64chのGain Change（折れ線）



各chについて、Gain Step毎の波高値の分布

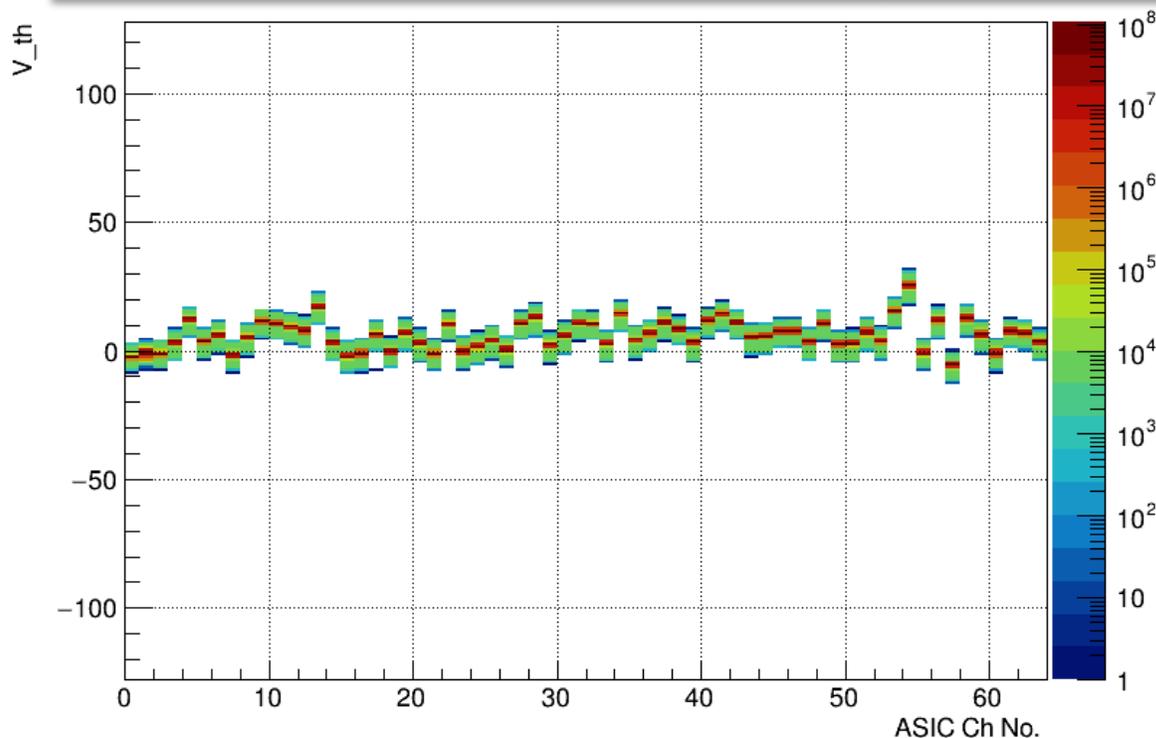


Threshold Scanによる評価

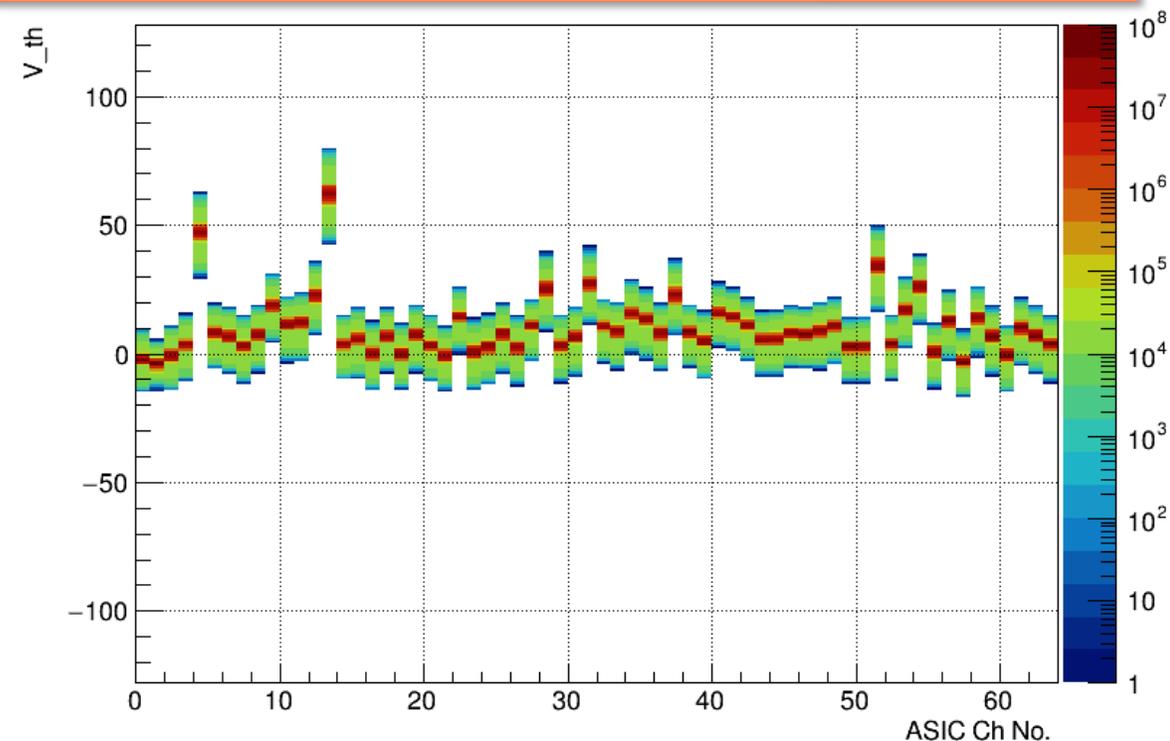
■ 全64chのCount Rateの分布

- 多少のばらつきはあるが、offset調整機能で対応可能

64ch Count Rate (Gain Step = 0)



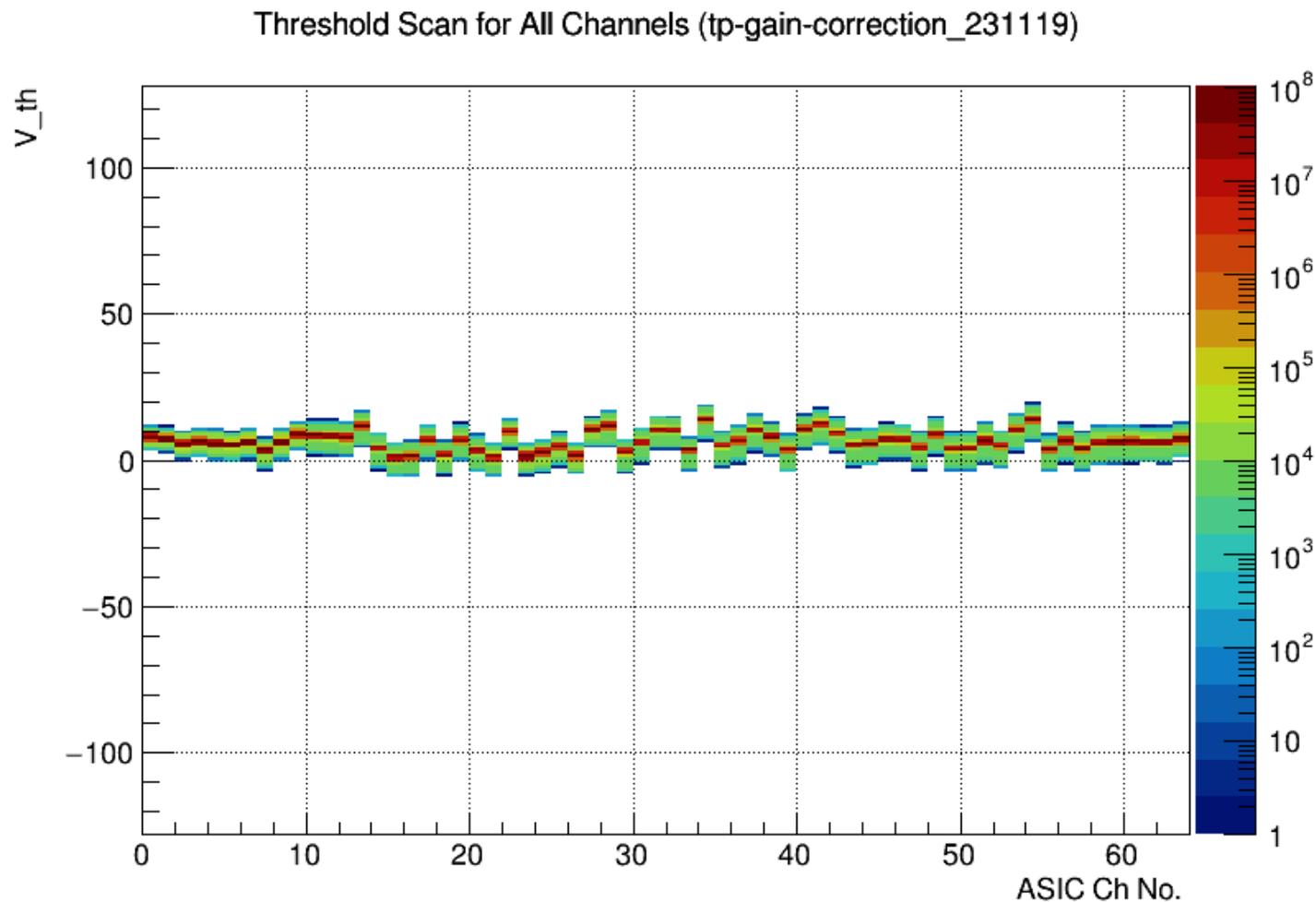
64ch Count Rate (Gain Step = 3)



Threshold Scanによる評価

■ 全64chのCount Rateの分布

● Offset調整後

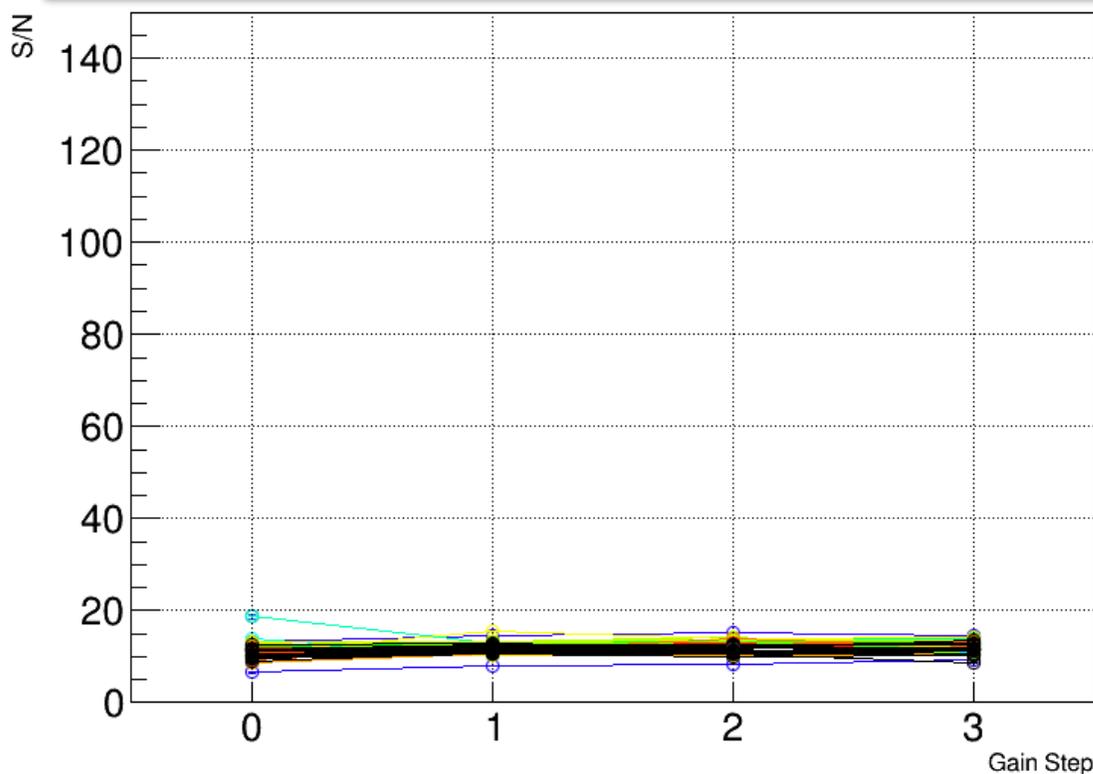


テストパルスのS/N

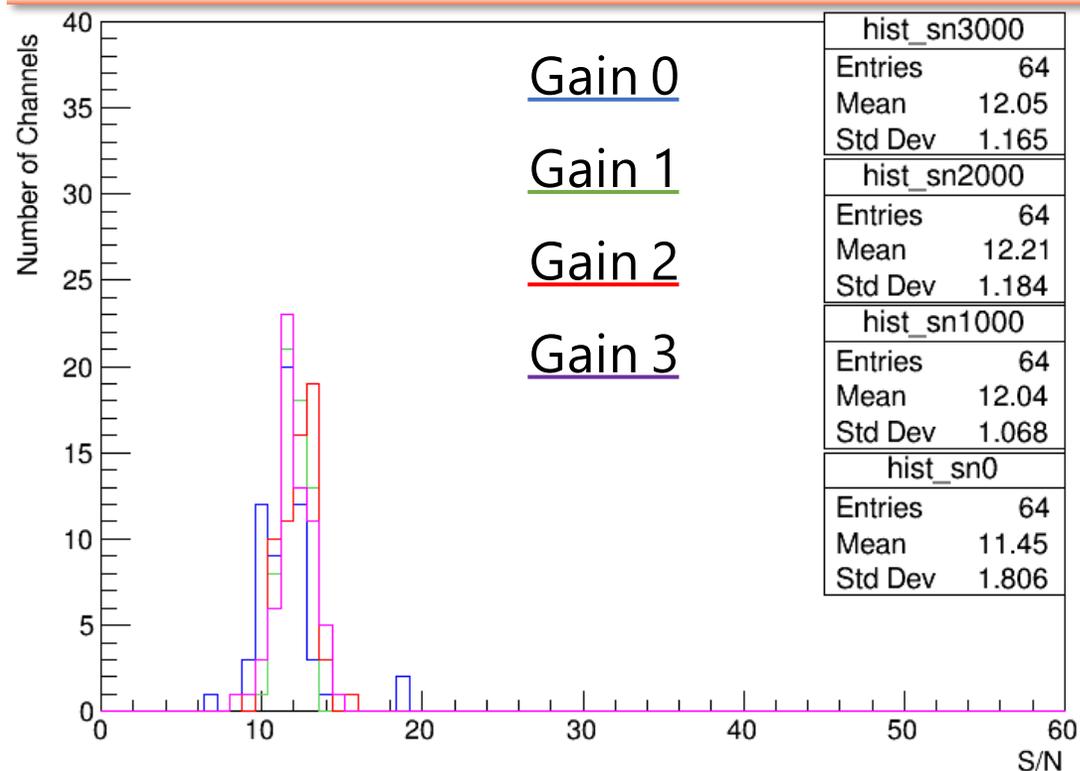
■ S/N：全64chの確認

- Gain stepの変化による大きな差は見られなかった（ノイズも増幅されているため）。

S/NのGain毎の変化（全64ch）



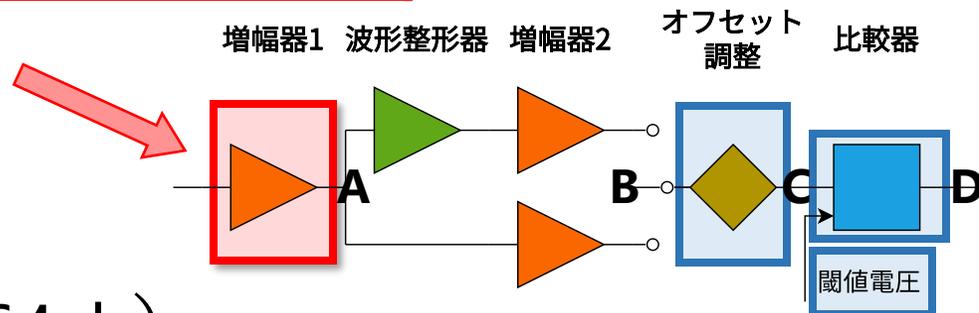
各chについて、Gain毎のS/Nの分布



テストパルスのGain、Offset

■ Gain Step毎の相対gain (全64ch、Gain 0を1とした)

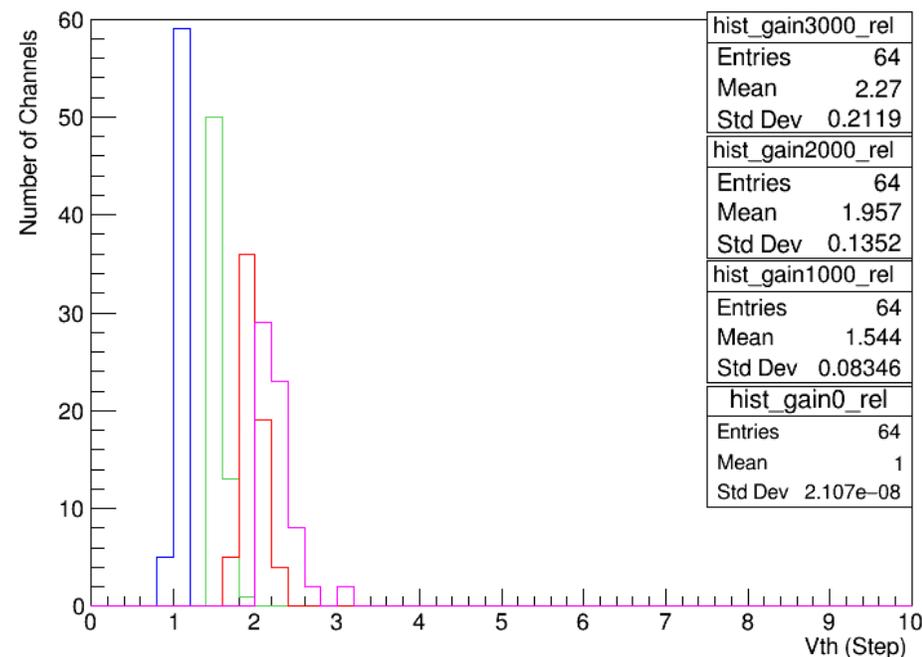
	平均値	標準偏差	先行研究 (シミュレーション)
Gain 0	1	-	1
Gain 1	1.54	0.08	1.62
Gain 2	1.96	0.14	2.03
Gain 3	2.27	0.21	2.34



■ S/N比 (全64ch)

	平均値	標準偏差	先行研究 (シミュレーション)
Gain 0	11.45	1.806	~22.3
Gain 1	12.04	1.068	~26.8
Gain 2	12.21	1.184	~29.3
Gain 3	12.05	1.165	~30.7

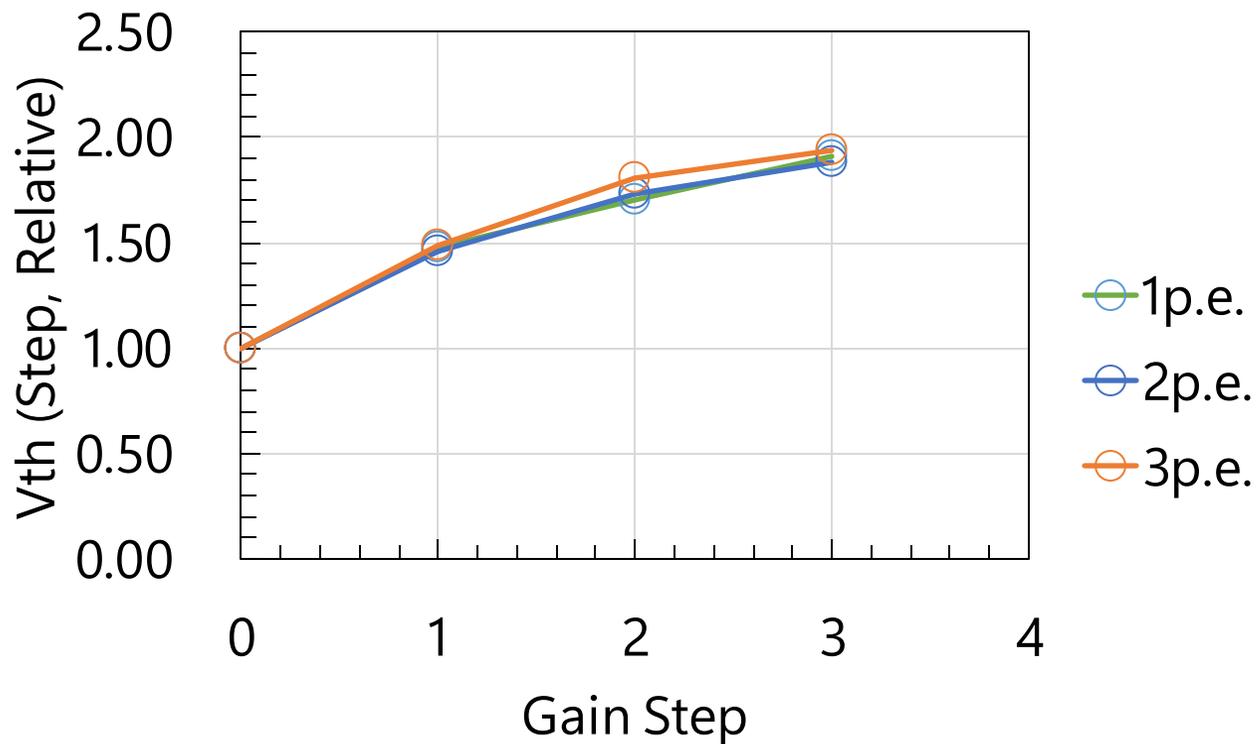
相対gainの分布



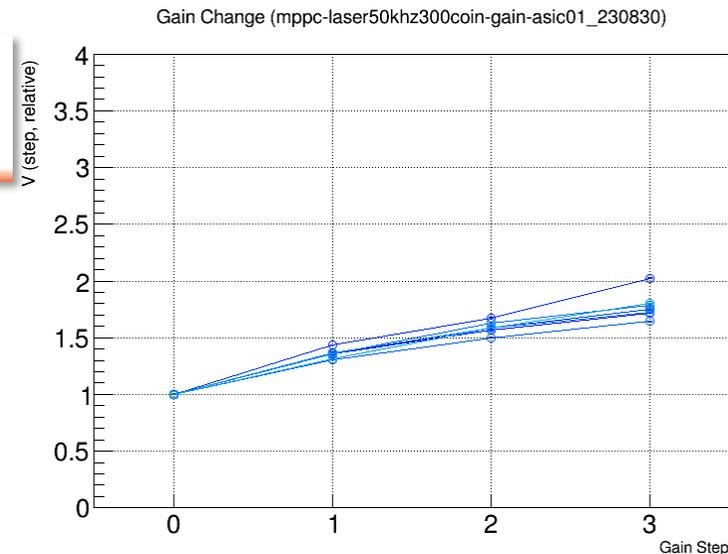
MPPC信号のGain変化

Gain変化

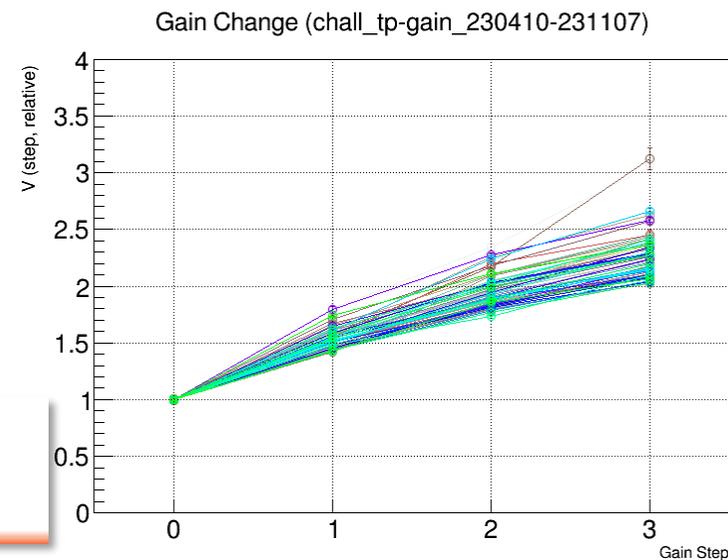
MPPC Gain Change (ch26)



MPPC接続時、
1p.e.ピーク (8ch分)



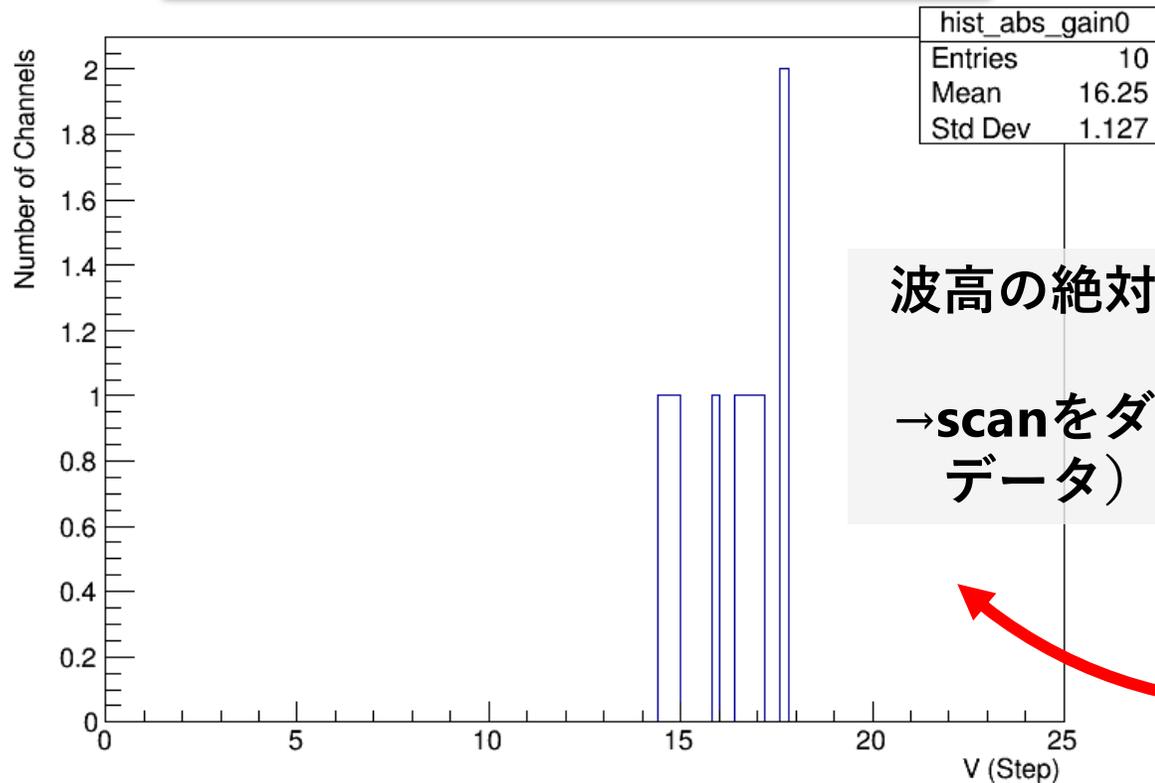
参考：テストパルスでの
gain変化 (64ch分)



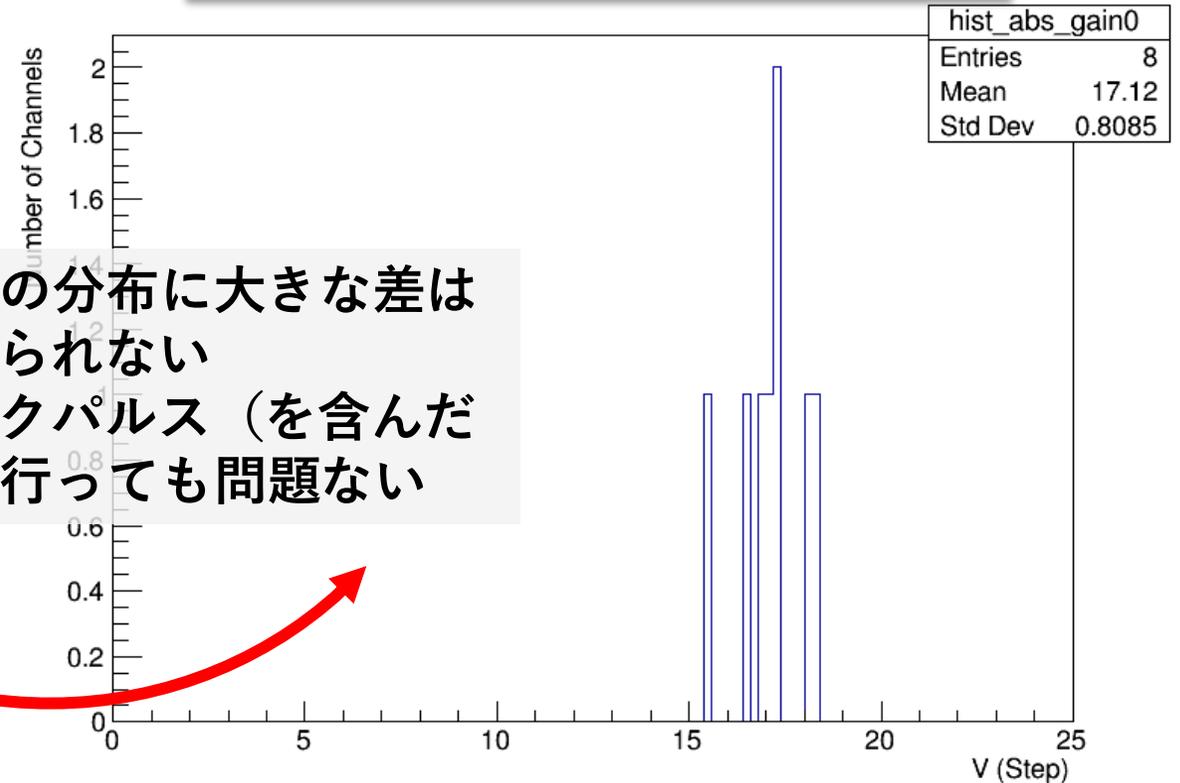
MPPC信号の波高分布

■波高の絶対値の分布（ダークパルスとレーザー入射時の比較）

ダークパルス（10ch分）



レーザー入射時（8ch分）
（レーザー光由来の信号と
coincidenceをとった結果）



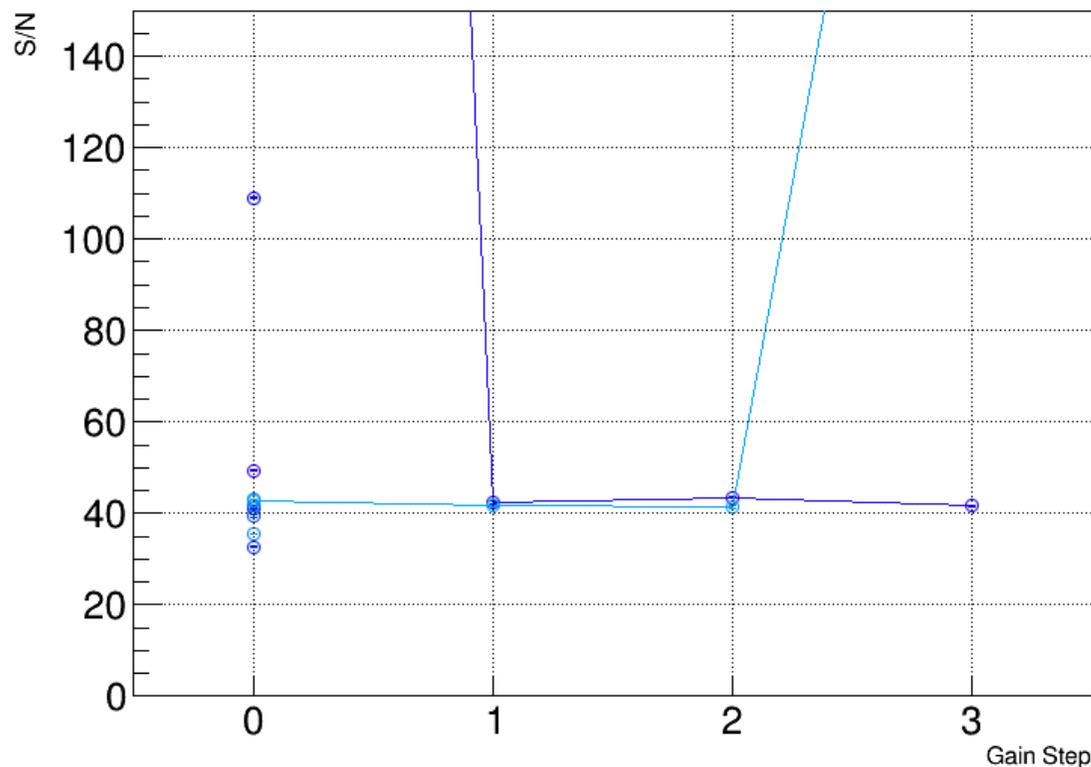
波高の絶対値の分布に大きな差は
見られない
→scanをダークパルス（を含んだ
データ）で行っても問題ない

MPPC信号のS/N

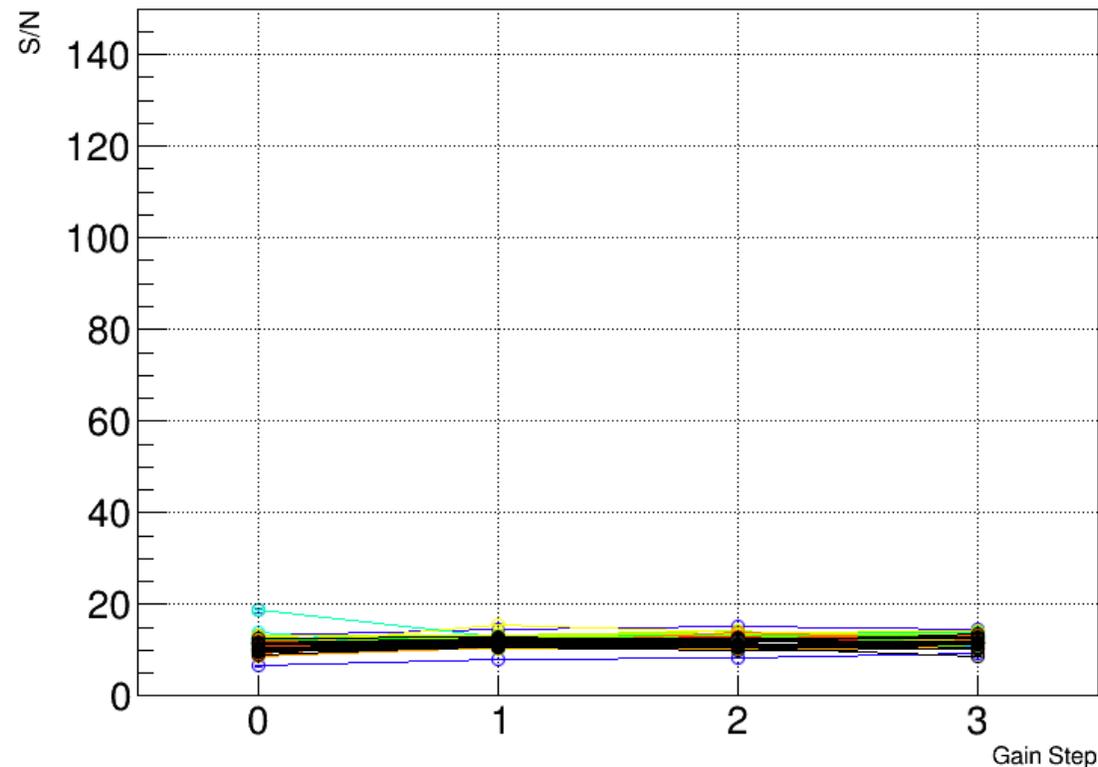
■ S/N比

- 1p.e.ピークで (Gain step = 0でも) 十分なノイズ分離を確認
- テストパルスよりMPPC信号の方が波高値が大きいためS/Nも大きい

ダークパルス1p.e.ピーク (10ch分)



参考：テストパルス (64ch分)



テストパルスとMPPC信号の評価の比較

■ Gain Step毎の相対gain (Gain 0を1とした)

	MPPC (ch26のみ)			テストパルス (64ch分)		シミュレーション (先行研究)
	1p.e.	2p.e.	3p.e.	平均値	標準偏差	
Gain 0	1	1	1	1	-	1
Gain 1	1.45	1.45	1.49	1.54	0.08	1.62
Gain 2	1.75	1.73	1.80	1.96	0.14	2.03
Gain 3	1.93	1.89	1.93	2.27	0.21	2.34

■ S/N比

- テストパルスより大きい
- 但し、VRDRIVEを設定していないときの結果 (設定後悪化している可能性)

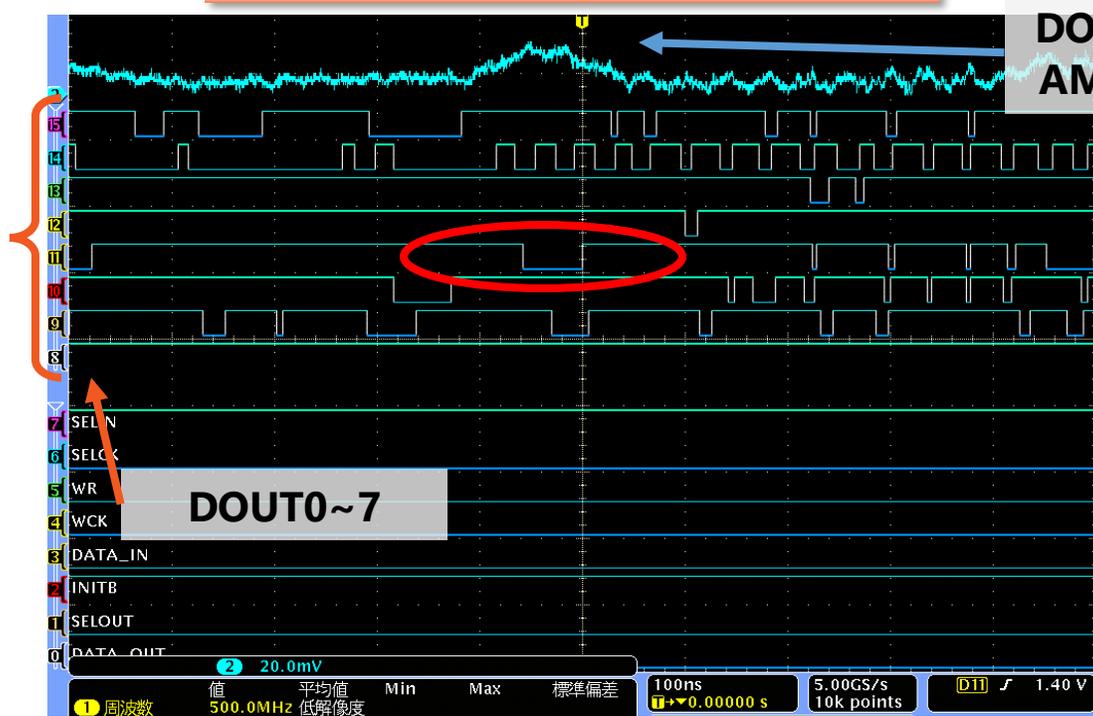
	MPPC 1p.e (ch26のみ)	テストパルス (64ch分)		シミュレーション (先行研究)
		平均値	標準偏差	
Gain 0	27.09	11.45	1.806	~22.3
Gain 1	23.37	12.04	1.068	~26.8
Gain 2	20.81	12.21	1.184	~29.3
Gain 3	21.72	12.05	1.165	~30.7

DOUT出力の確認・One Shot

■ DOUT

- PTS (FPGA) での読み出し用出力を確認した。
- One Shot : 比較器出力の信号幅を一定にする機能。約20ns幅を確認した。

One Shot非設定



DOUT3のchを
AMONで確認

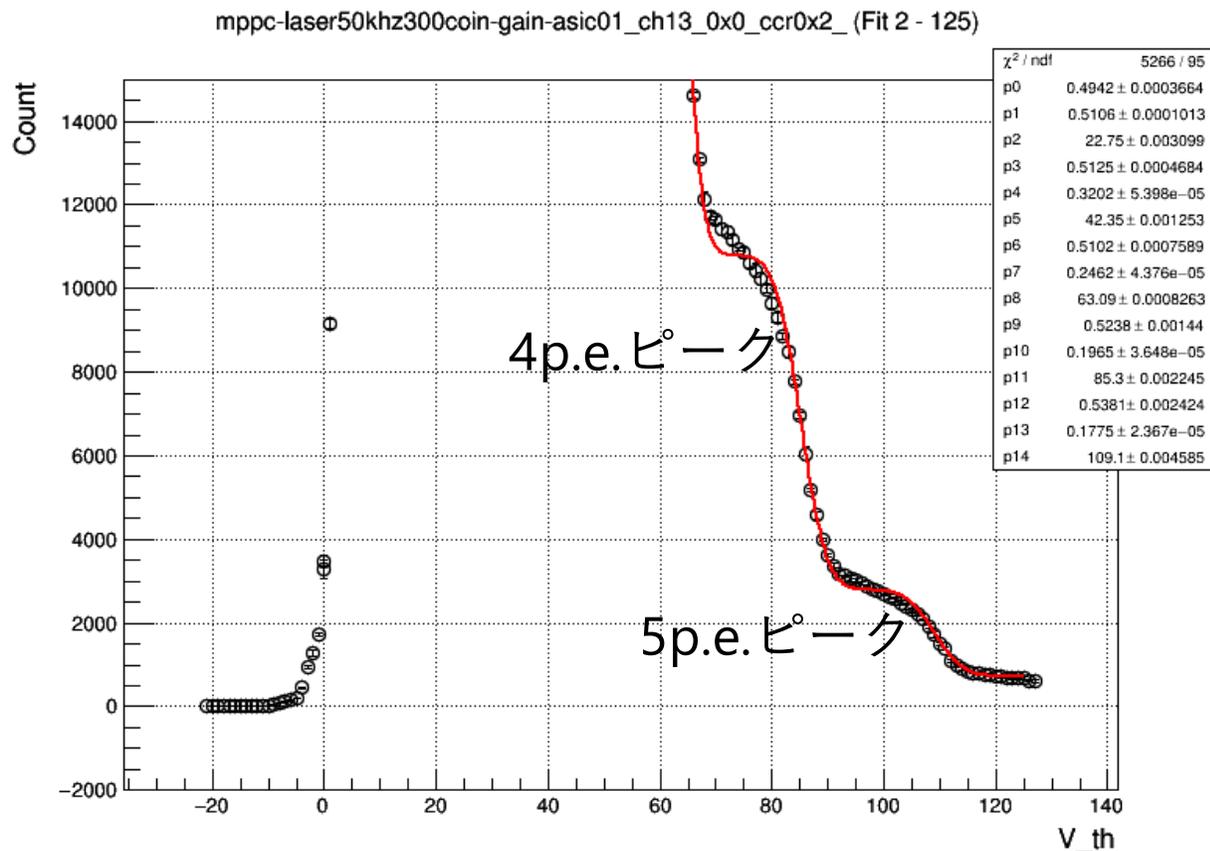
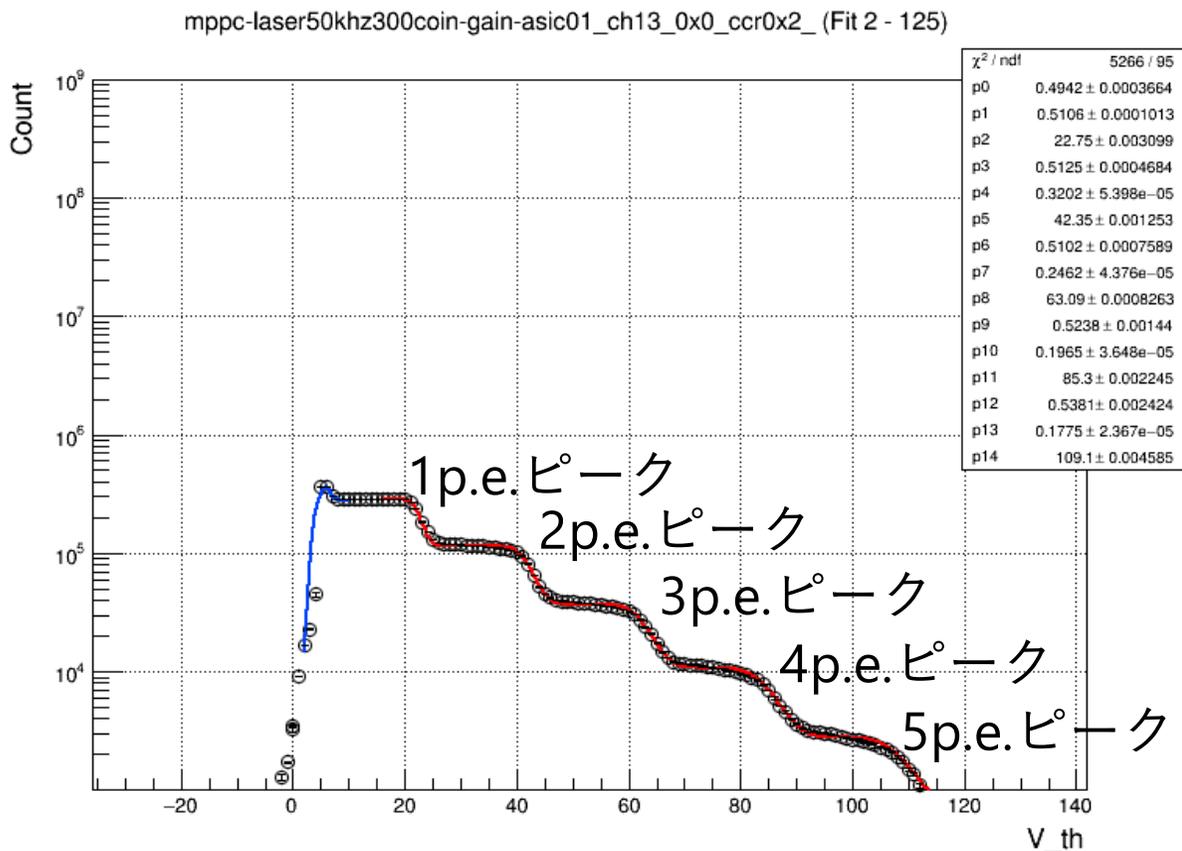
One Shot設定



MPPCに光を入射

■ レーザー光入射時のThreshold Scan結果 (50kHz)

- 最もhit rateが高いチャンネルで、1パルスあたり光子数は最大5個程度



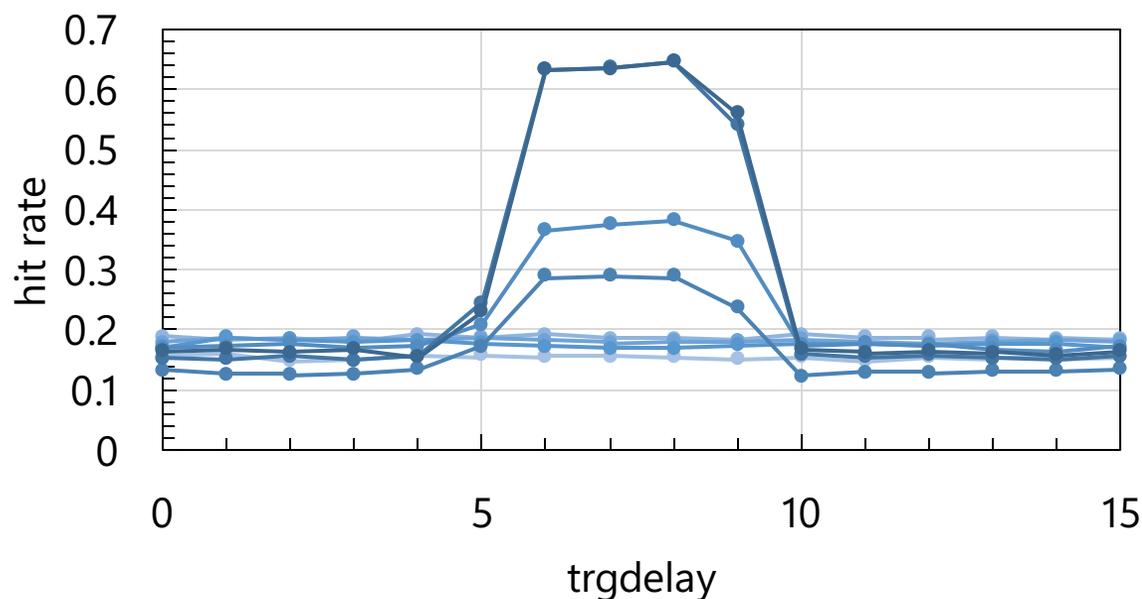
MPPCに光を入射してDAQ

■ レーザーのトリガー出力を利用してDAQ

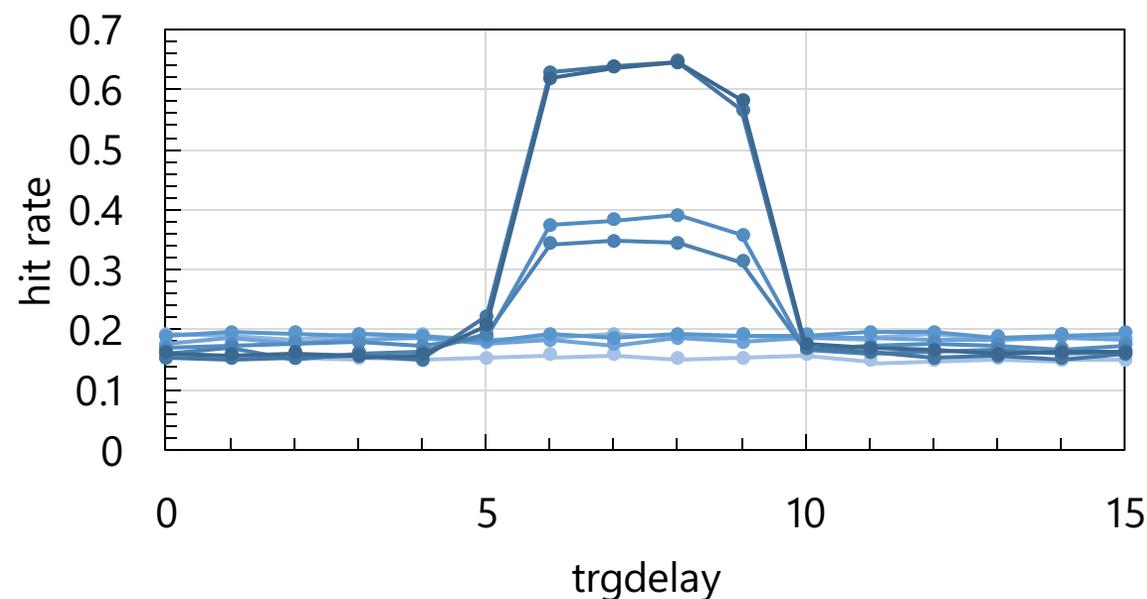
- MPPCを接続している8個のchの結果
- レーザーに近いchで高いhit rateを確認できた

1p.e.ピークの波高の80%、50%にVthを設定したときのhit rate比較 (hdcycle=5)

Vth 80% (50kHz, tune30.0%)



Vth 50% (50kHz, tune30.0%)



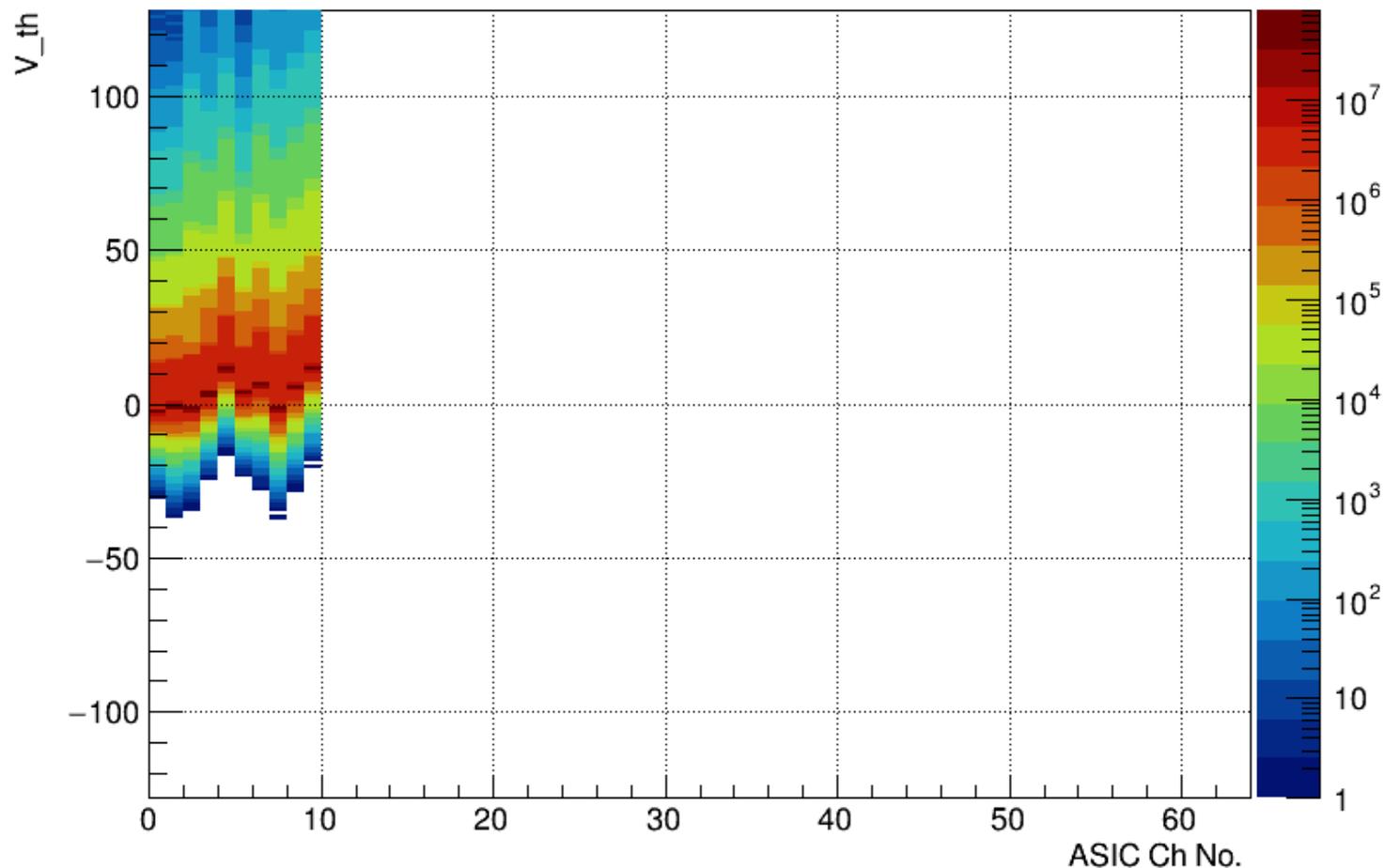
—●— ch2 —●— ch3 —●— ch4 —●— ch5 —●— ch6 —●— ch7 —●— ch8 —●— ch9

—●— ch2 —●— ch3 —●— ch4 —●— ch5 —●— ch6 —●— ch7 —●— ch8 —●— ch9

MPPCに光を入射してDAQ

■ (ダークパルス) MPPC接続時のThreshold Scan結果

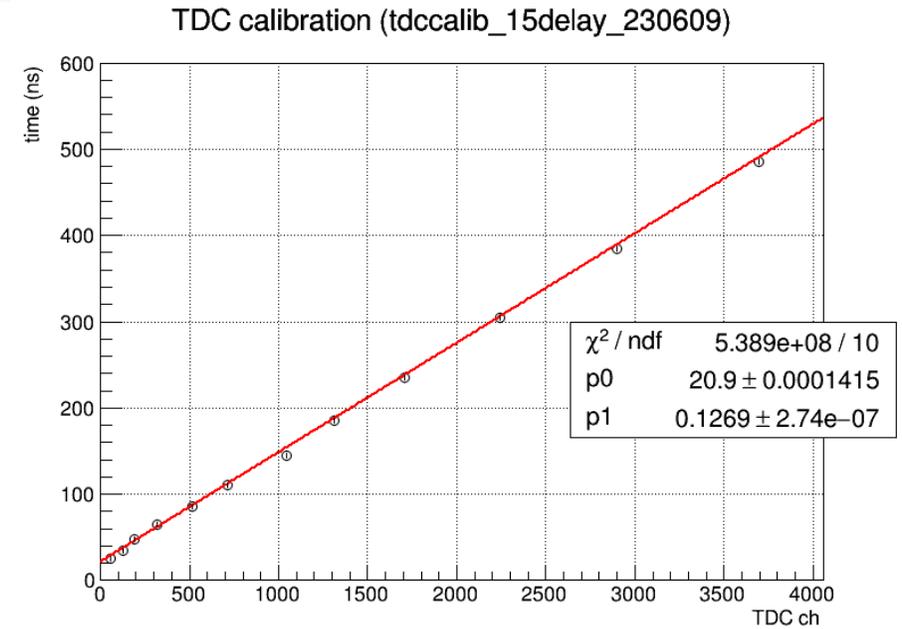
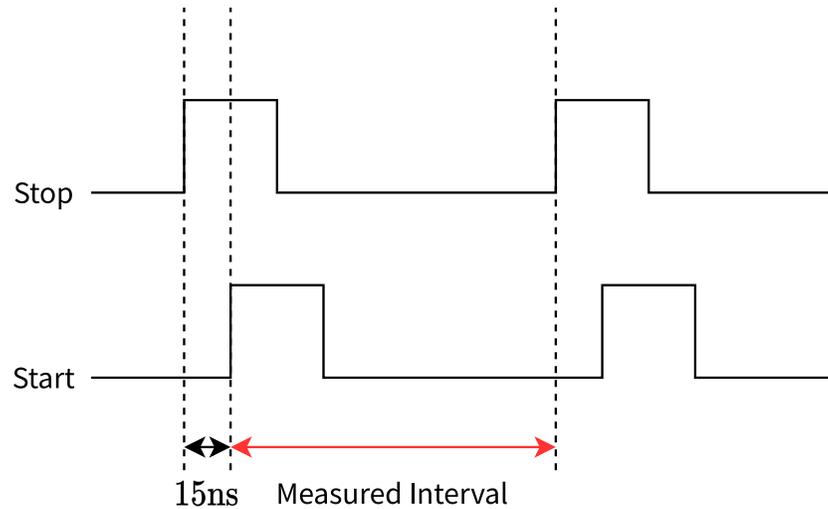
Threshold Scan for All Channels (mppc-laseroff-gain-asic01_230911)



ダークパルス分離性能の評価

■ CAMAC TDCのキャリブレーション

- Function generatorで信号間隔を指定

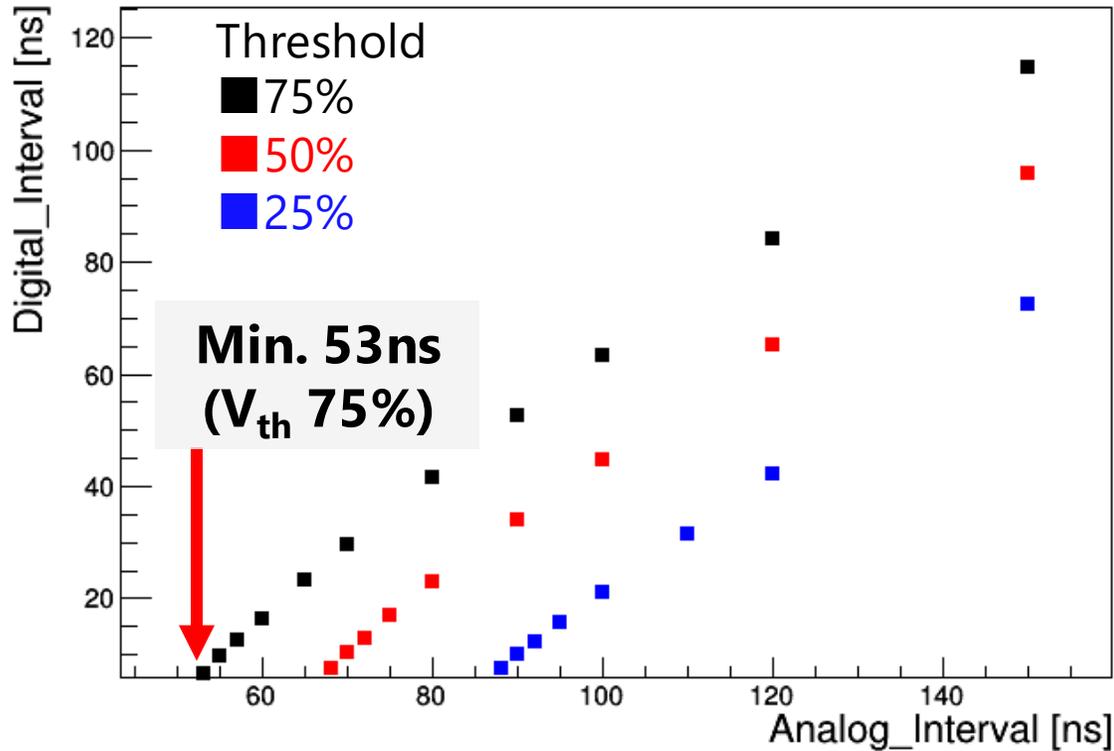


ダブルパルスシミュレーション結果

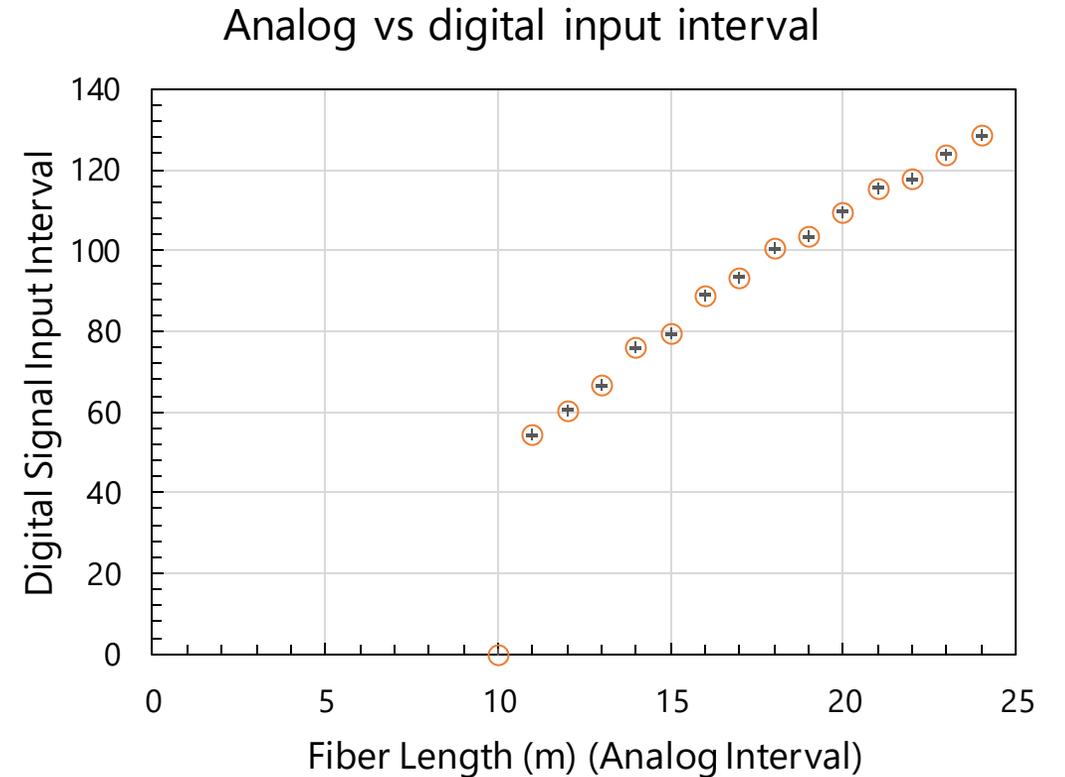
■ ASICに波形整形回路が未装備の状態

● シミュレーション結果と実機測定結果の比較

シミュレーション結果



実機測定結果 (波形整形回路が未装備)

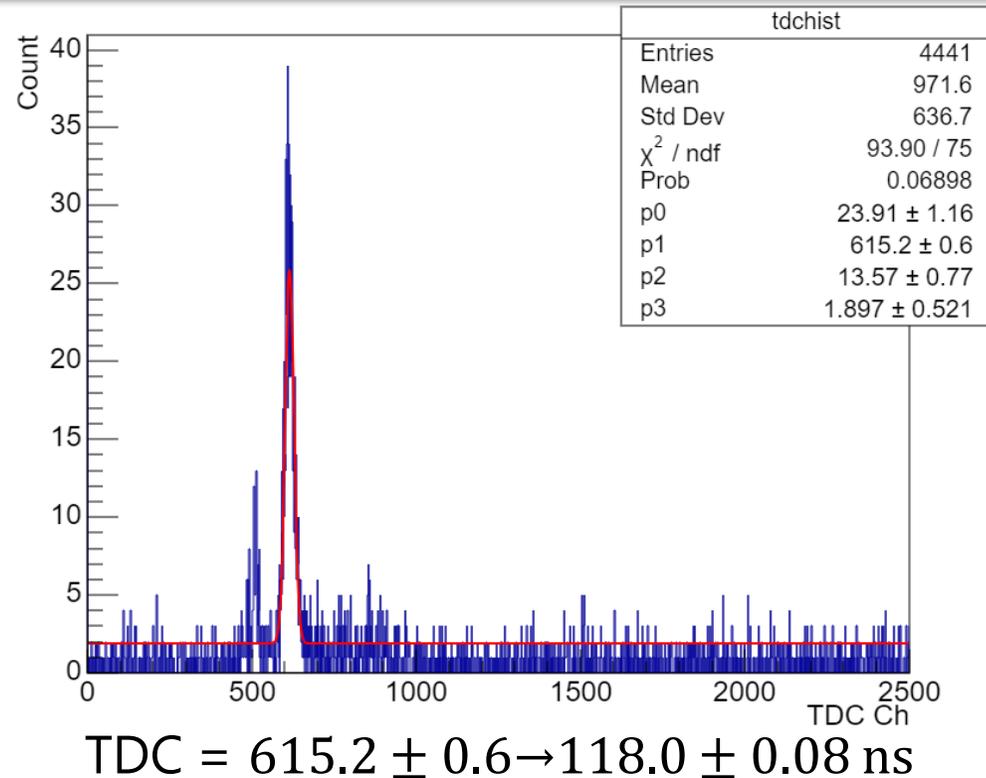


光によるダークパルス分離評価

■ TDCによる測定の結果

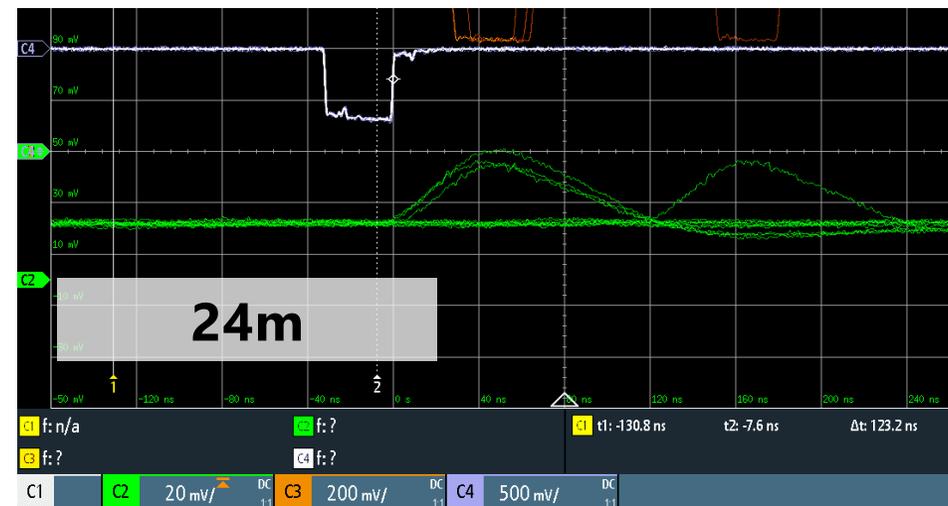
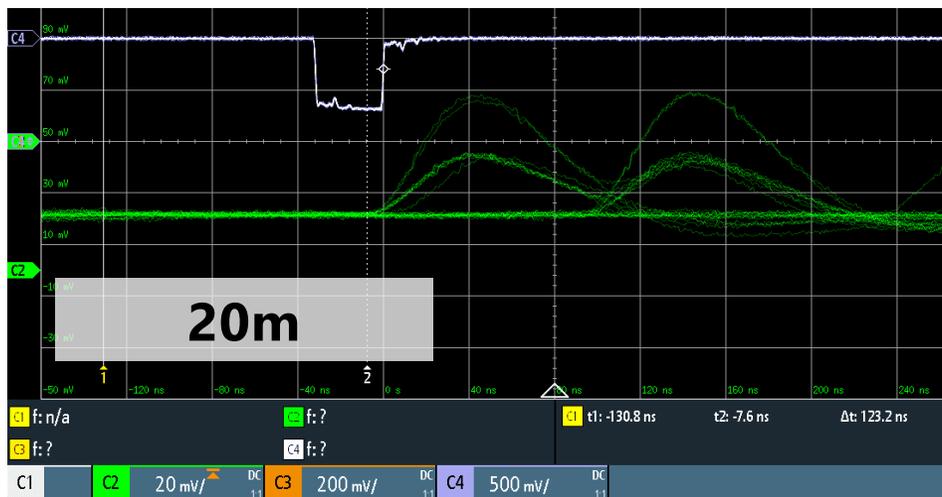
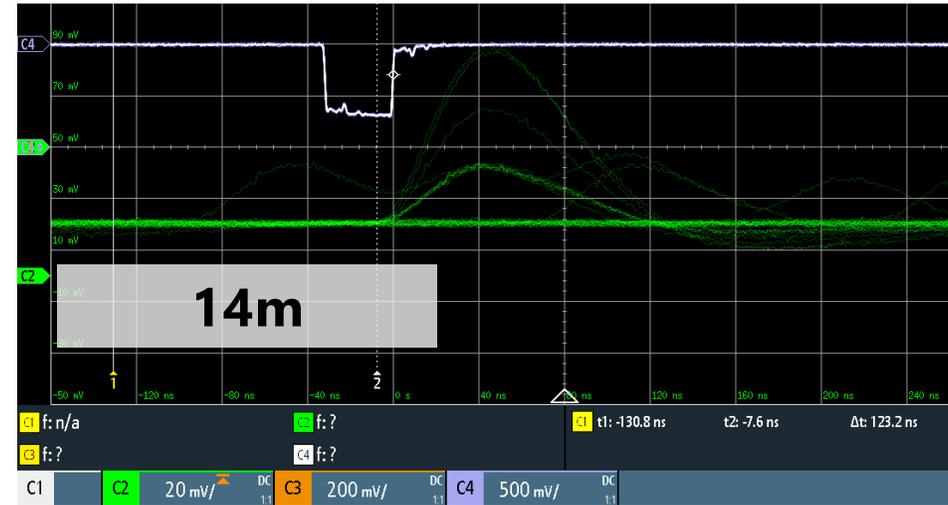
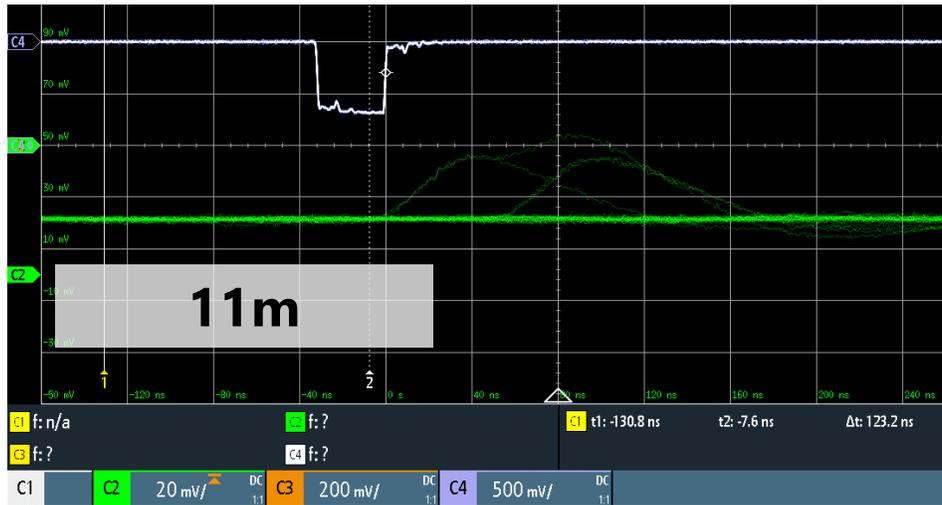
- 光ファイバー22m接続時
- 対応するAnalog Intervalは十分分離できているときの差分で算出予定

光ファイバー22mのとき (8h測定)



光ファイバーの長さによるダブルパルスの変化

■ ファイバー長さ11m→24m

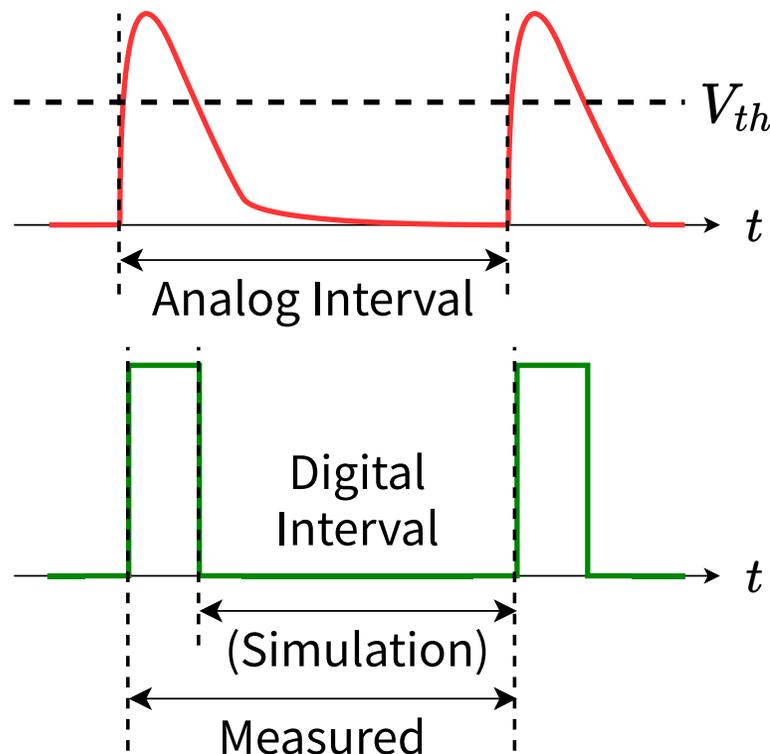
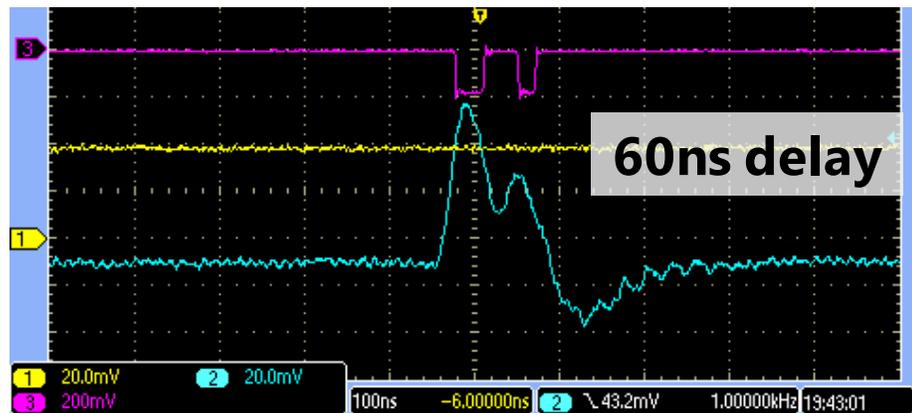
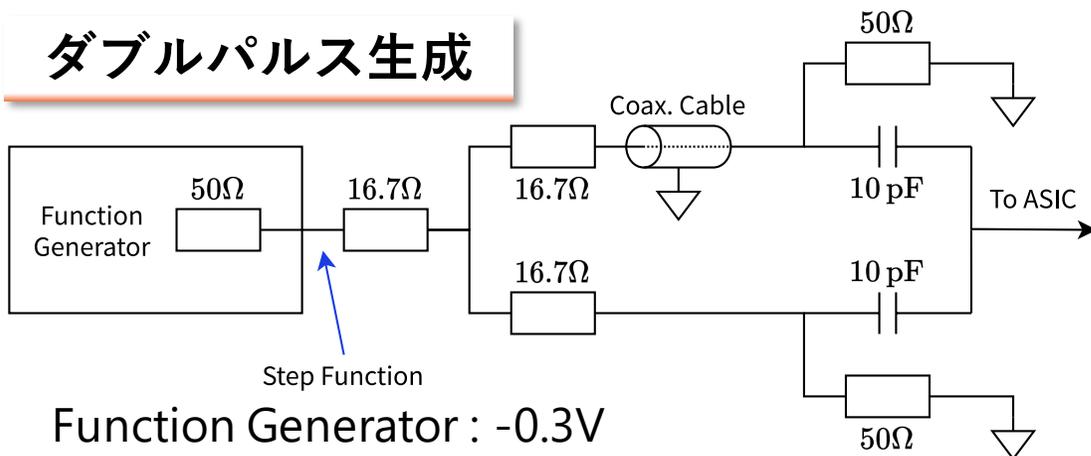


電気信号によるダブルパルスの生成

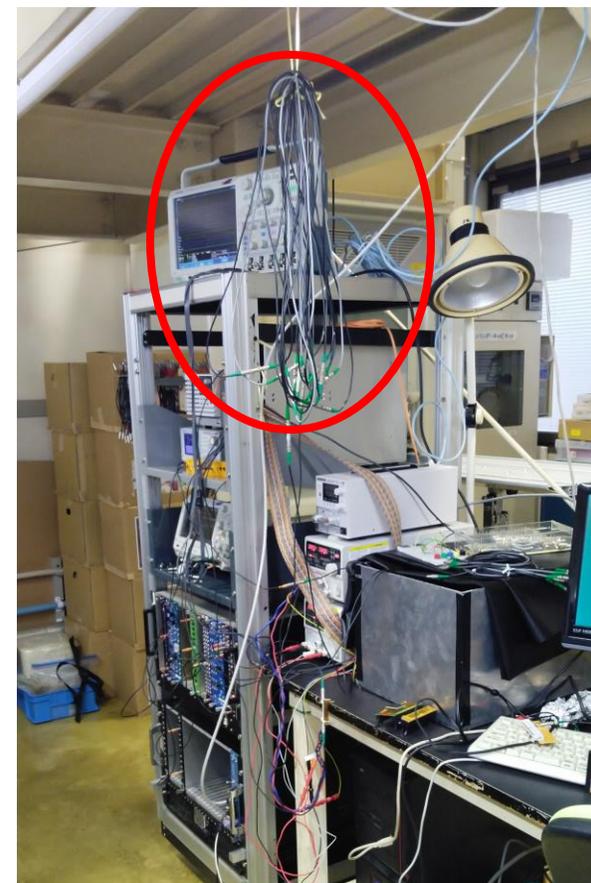
■ テスト電気信号（MPPC信号の代わり）での検証

- 信号を分離し、片方だけをケーブルで遅延させ、再度合成
- 短時間間隔の2デジタル信号の間隔をTDCで測定

ダブルパルス生成



信号間隔の定義

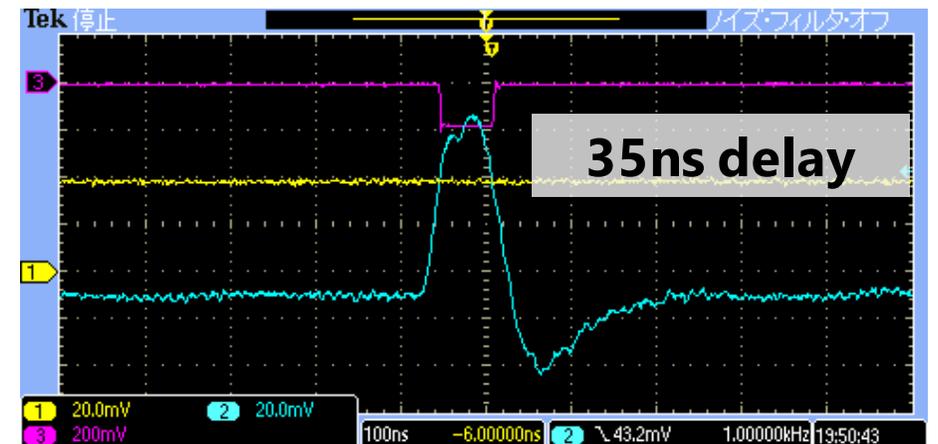
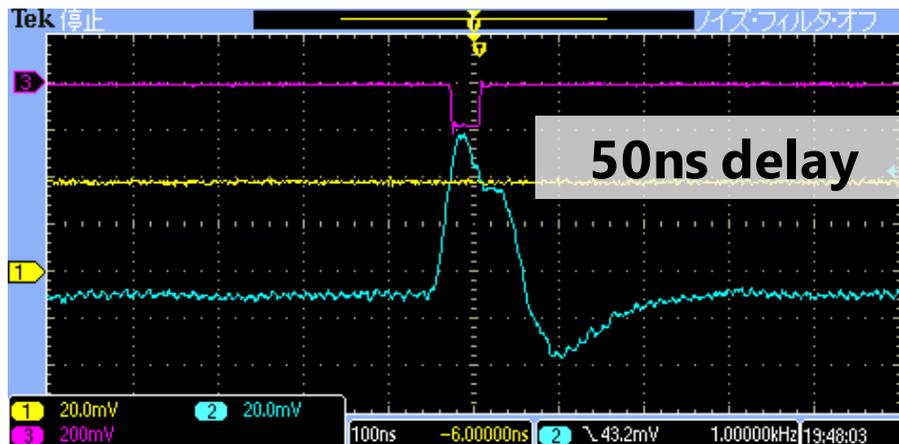
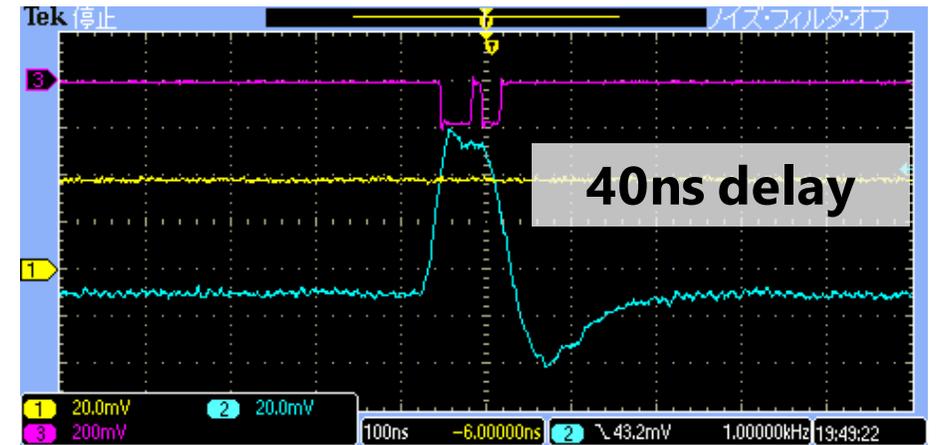
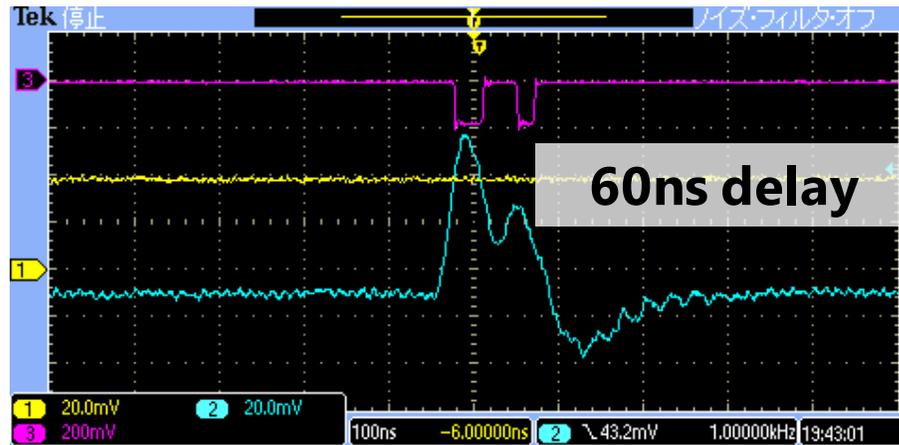


遅延用のケーブル

電気信号によるダークパルス分離性能の評価

- 改良したDouble Pulse回路による信号の様子
 - ファンクションジェネレータから-0.3Vの方形波出力

$V_{th} = 0 \times 10$
で間隔を
変えたとき

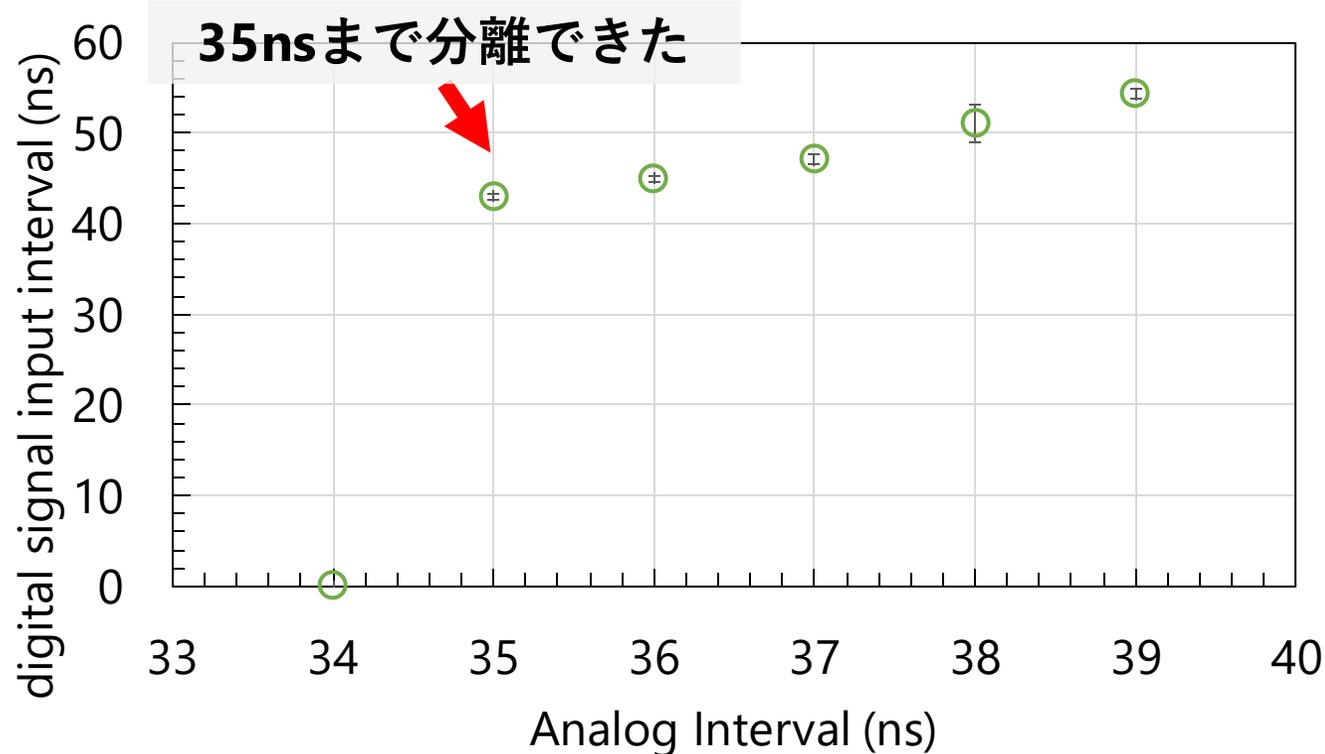


電気信号によるダークパルス分離評価

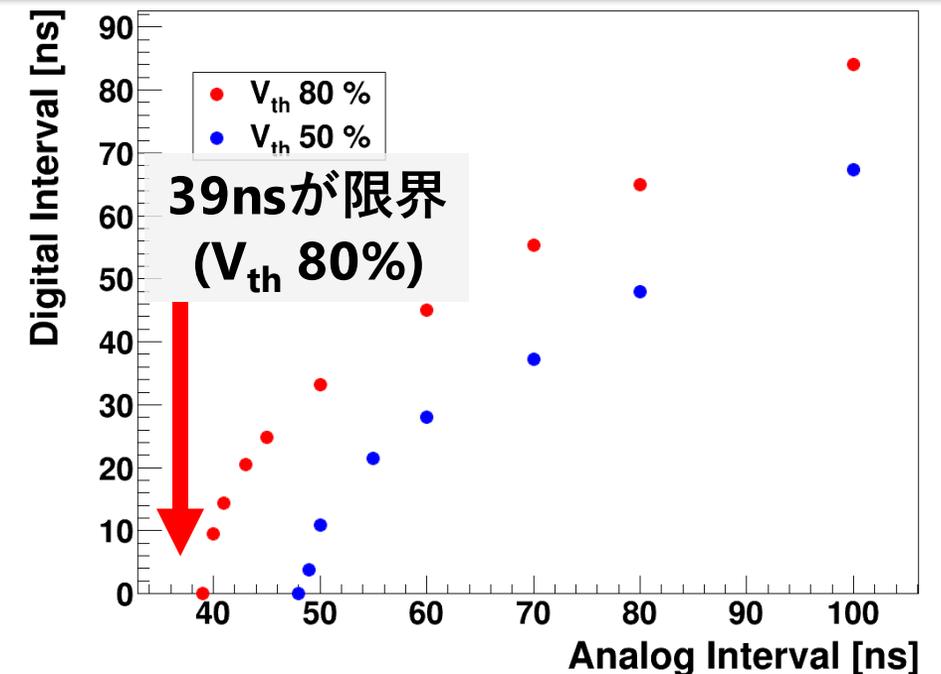
■ アナログ信号の間隔とデジタル信号の間隔

- $V_{th} = \text{波高} \times 29.08\%$
- 今後PZC回路の調整や信号幅を一定にした場合で検証予定

Analog vs digital interval (ch1, $V_{th}=24$)



増幅率Step 0 のシミュレーション結果
(先行研究、信号波高値34.59mV)

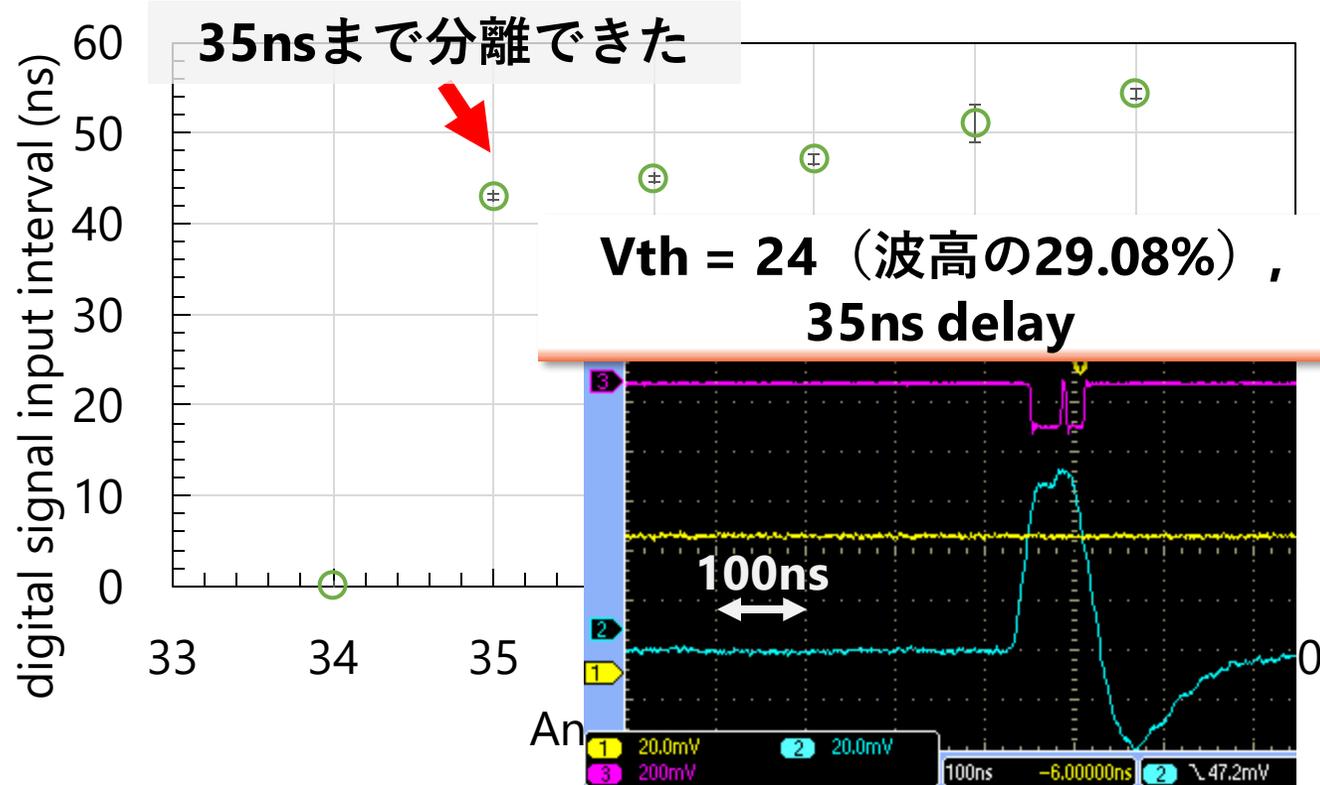


電気信号によるダークパルス分離評価

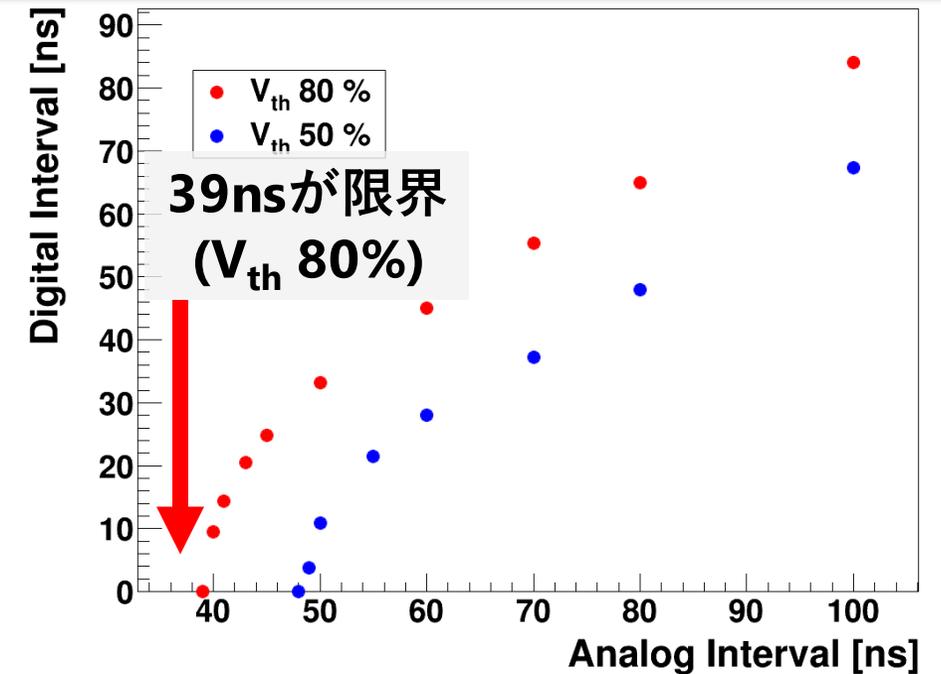
■ アナログ信号の間隔とデジタル信号の間隔

- $V_{th} = \text{波高} \times 29.08\%$
- 今後PZC回路の調整や信号幅を一定にした場合で検証予定

Analog vs digital interval (ch1, Vth=24)



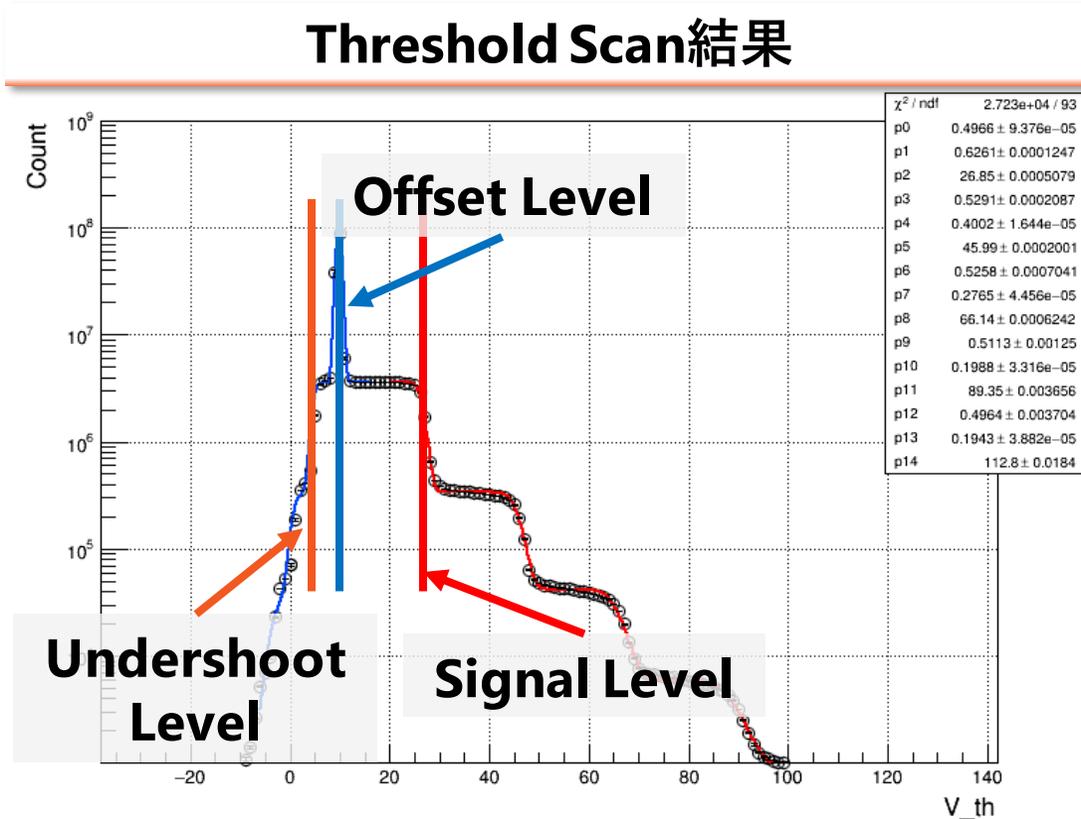
増幅率Step 0 のシミュレーション結果
(先行研究、信号波高値34.59mV)



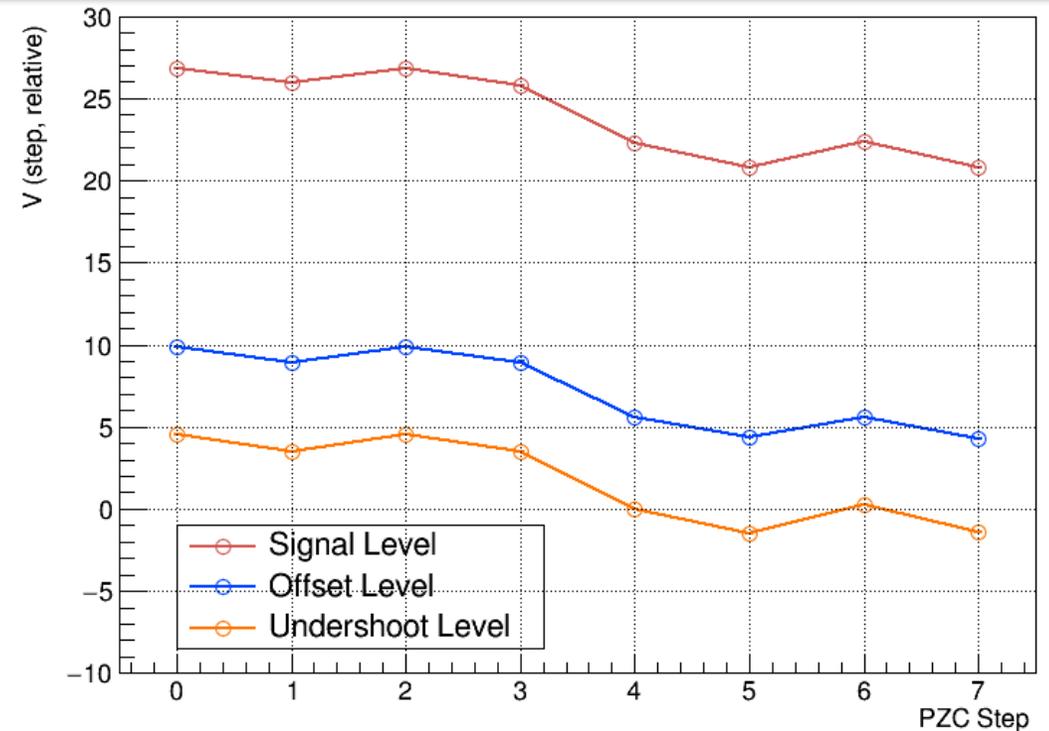
課題：PZC回路の評価

■ PZC (Pole-Zero Cancellation) 回路

- 時定数を調整→MPPC信号の信号幅を調整・アンダーシュートを軽減
- アンダーシュートの大きさは変化せず、Offset Levelが変化したのみだった



PZC回路の抵抗値を変化と各Levelの変化

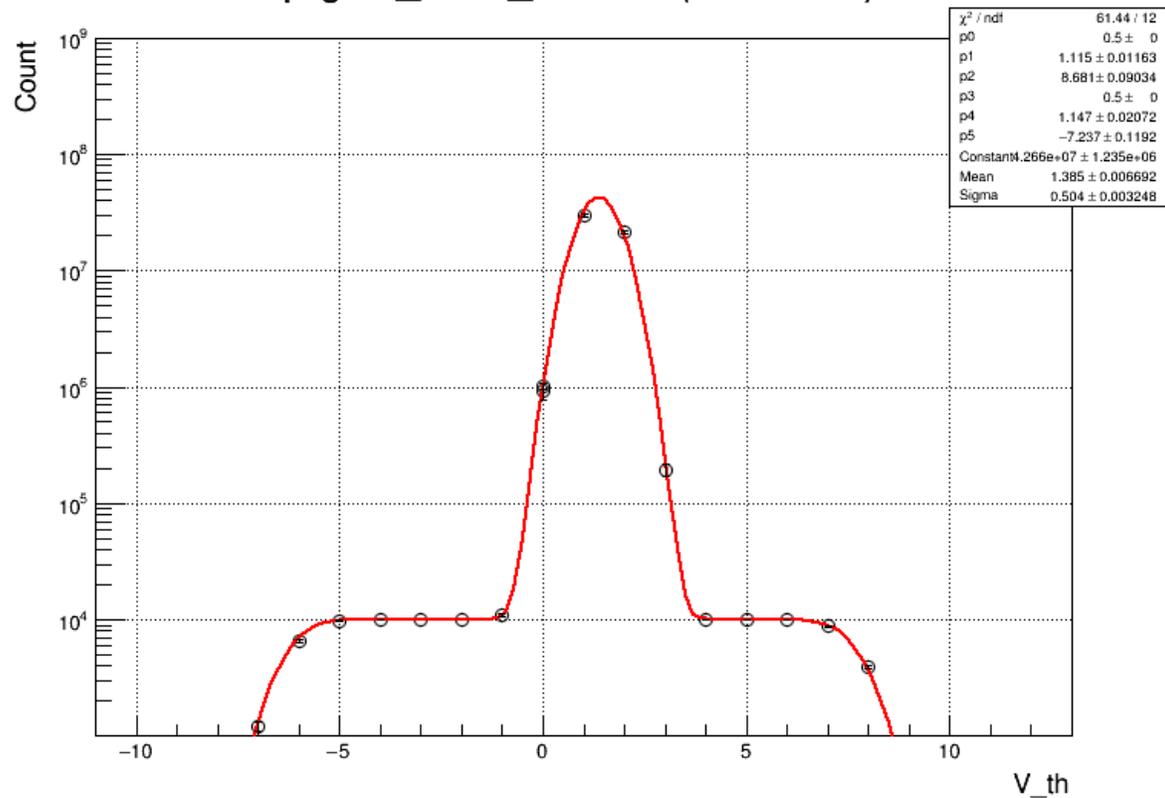


Threshold Scan (gain step 1)

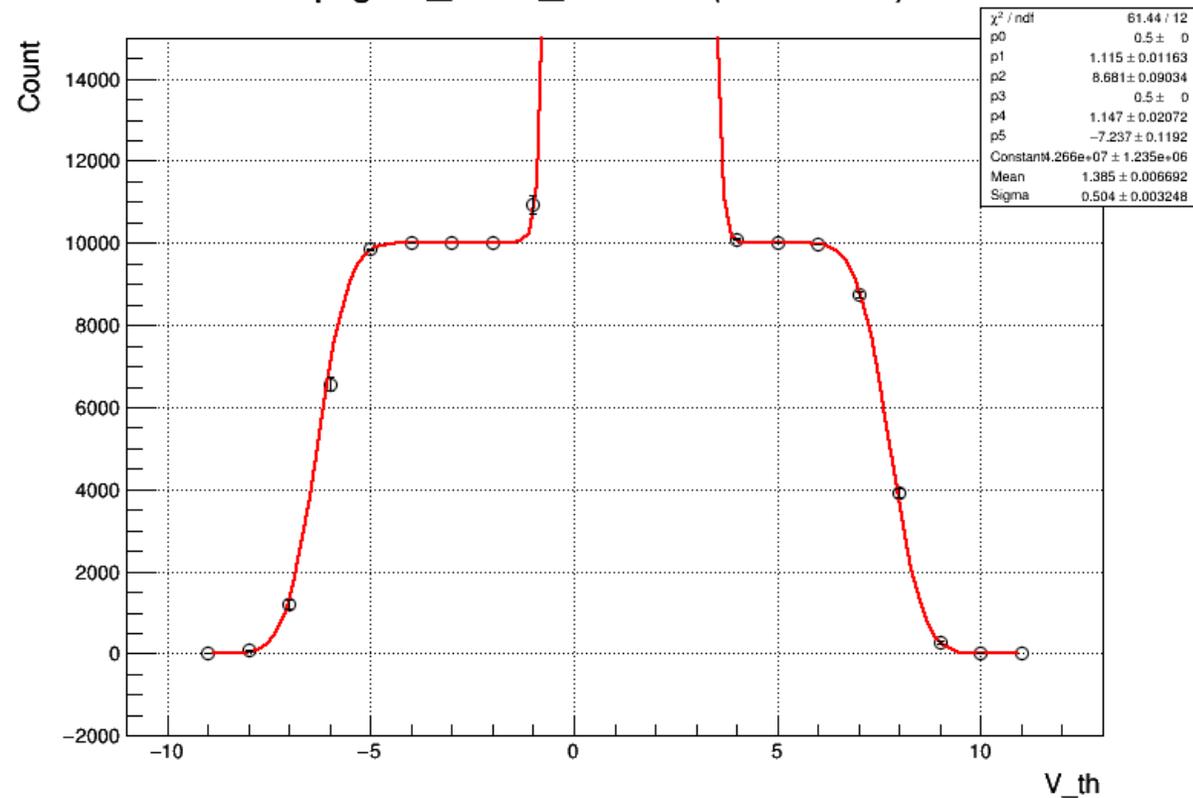
■ テストパルスでのgain確認 (gain step 1)

- ファンクションジェネレータ入力回数 10^4 回 (1000Hz)

tp-gain_ch31_0x1000 (Fit -9 - 11)



tp-gain_ch31_0x1000 (Fit -9 - 11)

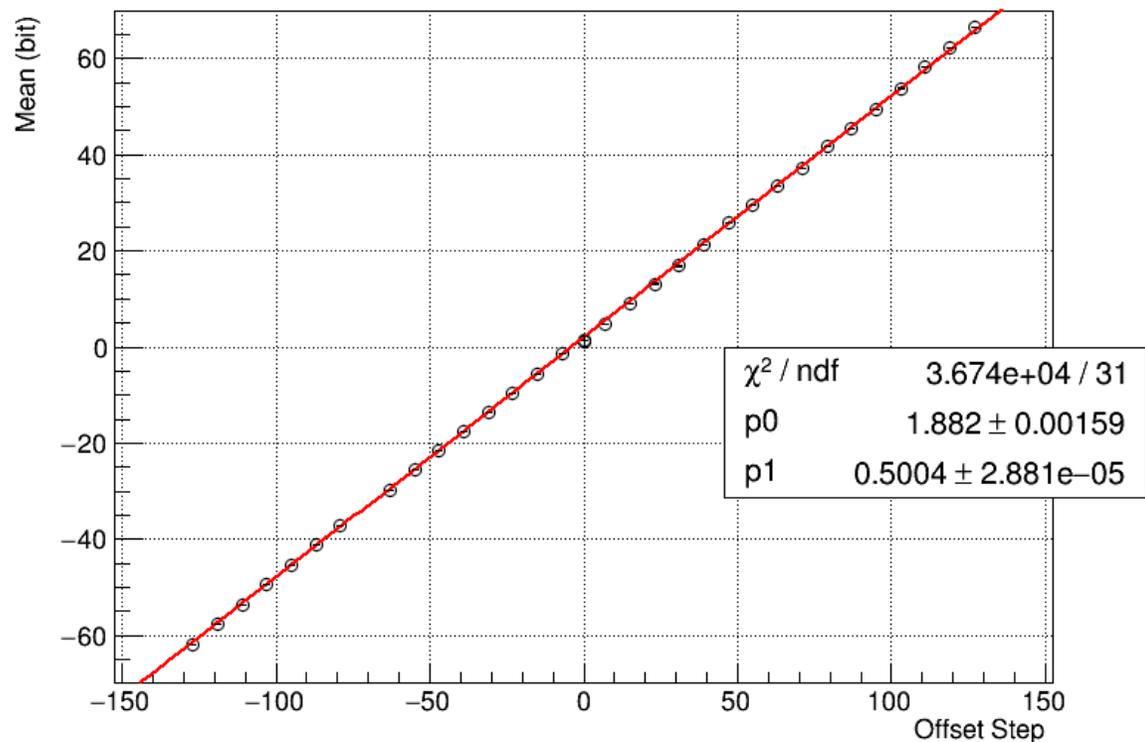


テストパルス：Offset調整の確認

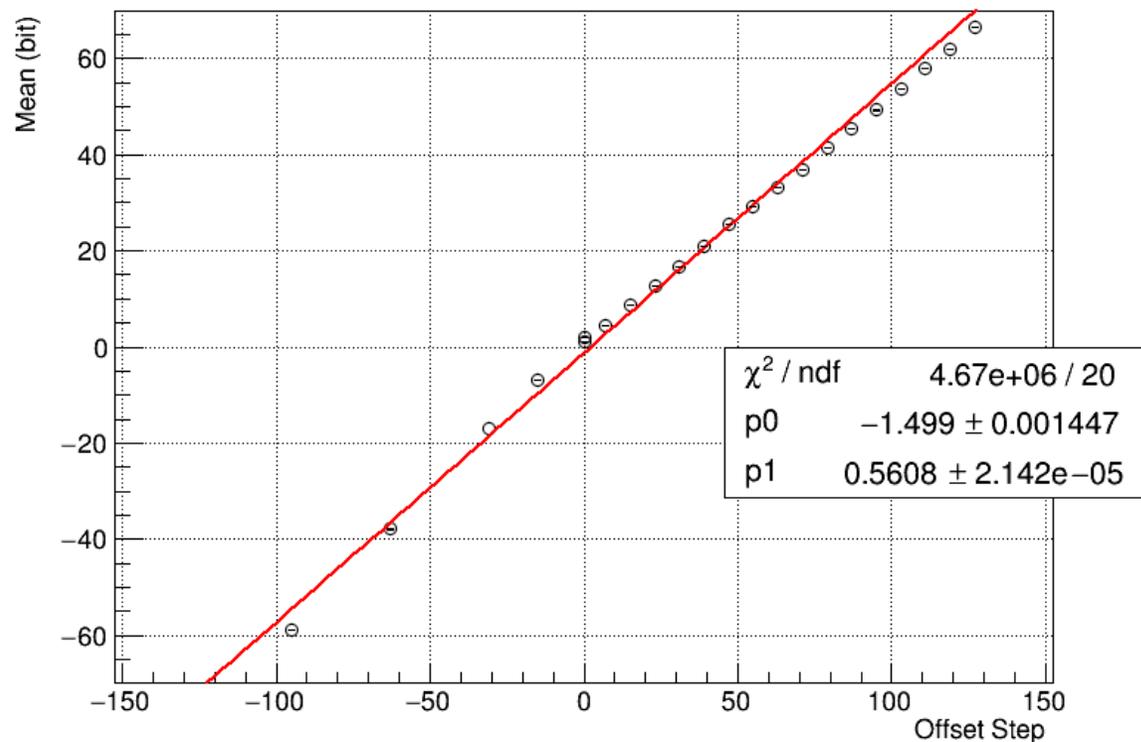
■ Gain Step 0と3の比較

- 傾向に大きな差は見られない

Offset (ch2_tp_offset_ave_230203_sigma/plot)



Offset (ch2_tp_offset_gain3_230211/plot)



MPPC以外の光検出器候補

■ LAPPD (Large Area Picosecond PhotoDetectors)

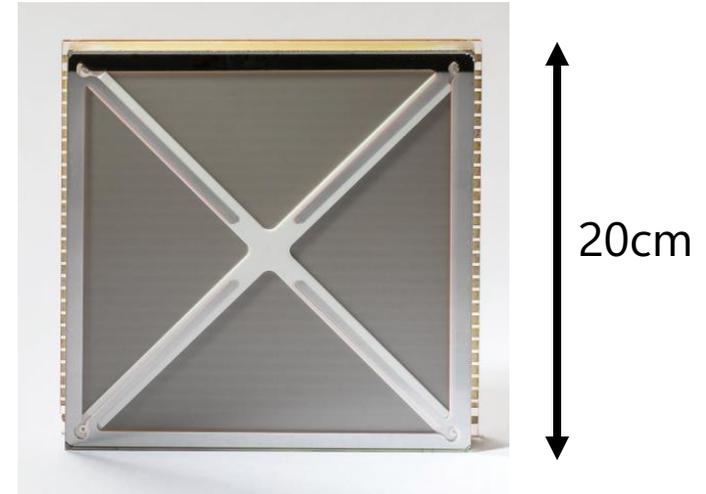
- MCP-PMTの一種

- メリット

- 従来のMCPより安価
- 高い時間分解能

- デメリット

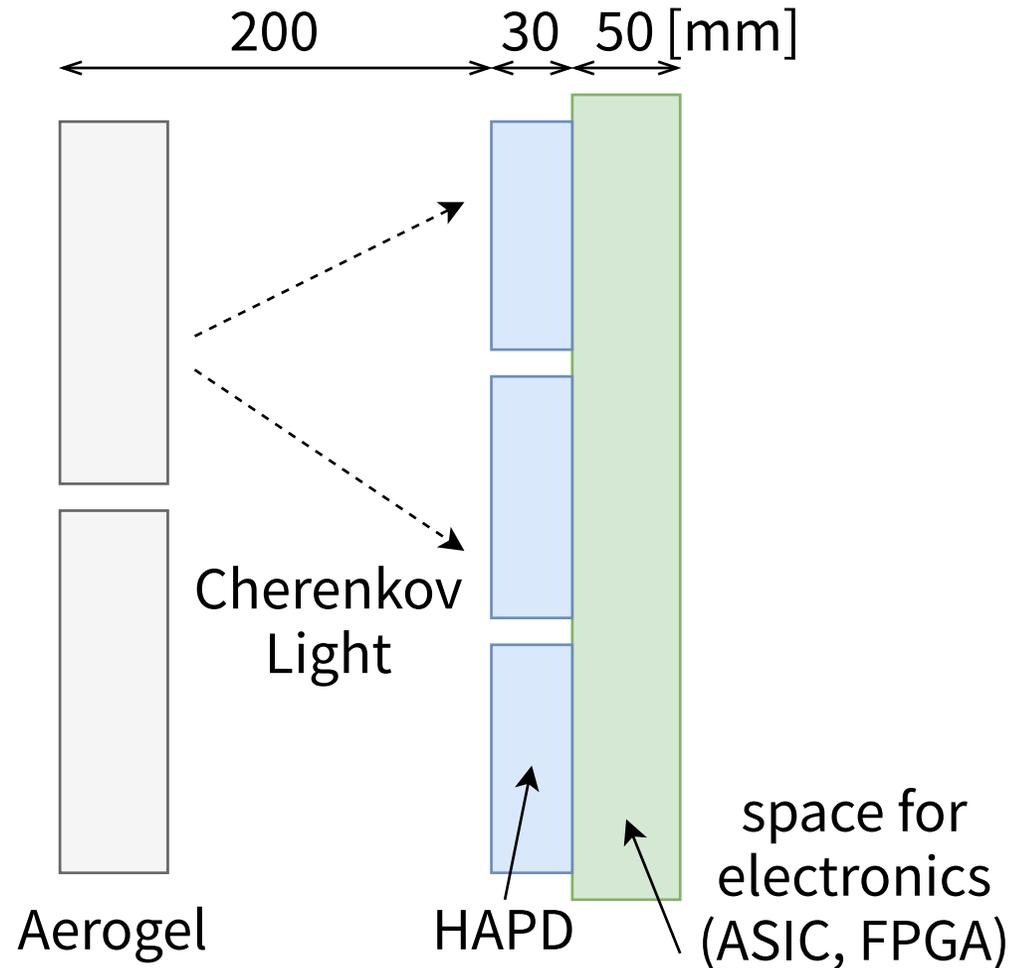
- 磁場による影響大
- MPPCより低い光子検出効率(PDE)
- charge collectionによる損傷大



[LAPPD-Data-Sheet-05-19.pdf \(incomusa.com\)](https://www.incomusa.com/LAPPD-Data-Sheet-05-19.pdf)

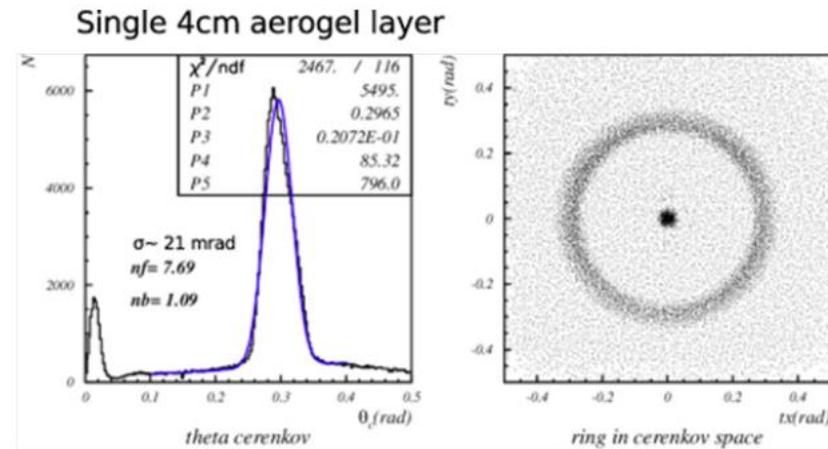
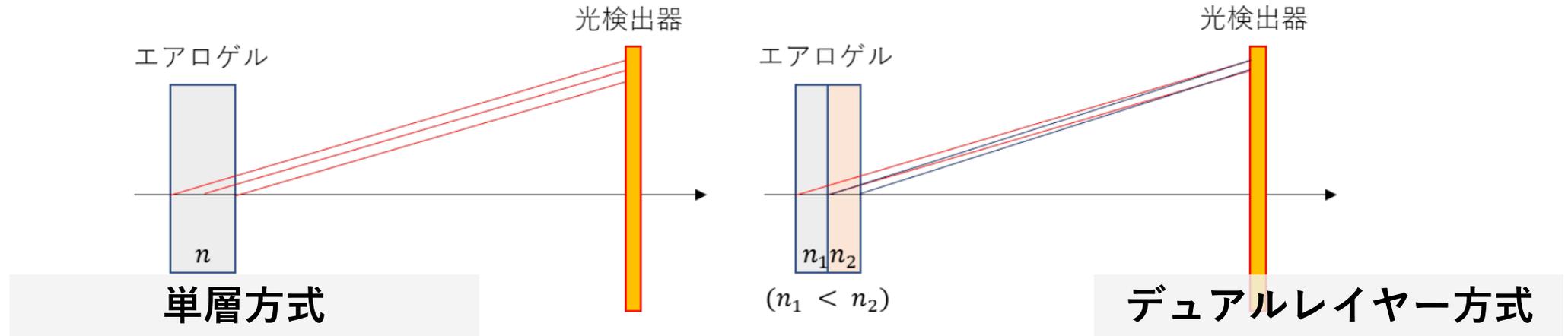
ARICHの構造

- エレクトロニクスに割けるスペースは限られている

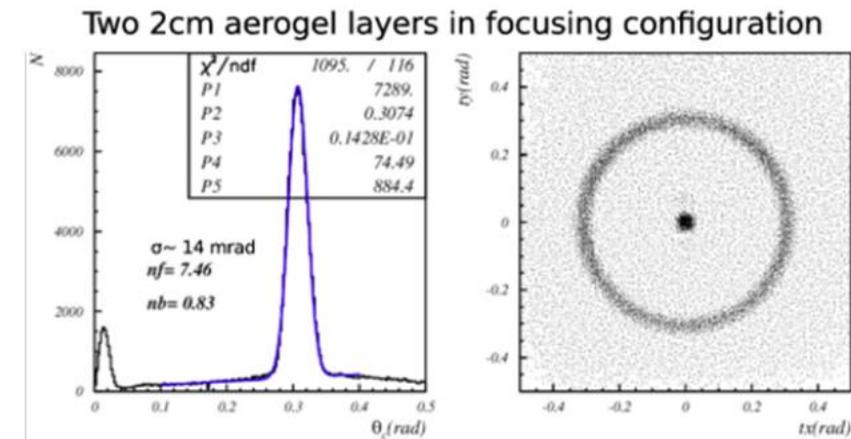


シリカエアロゲルのデュアルレイヤー方式

- 高角度分解能のため、シリカエアロゲルは2層構造になっている



角度分解能：21mrad 光子数：7.69



角度分解能：14mrad 光子数：7.46

