

# 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集積回路の性能評価

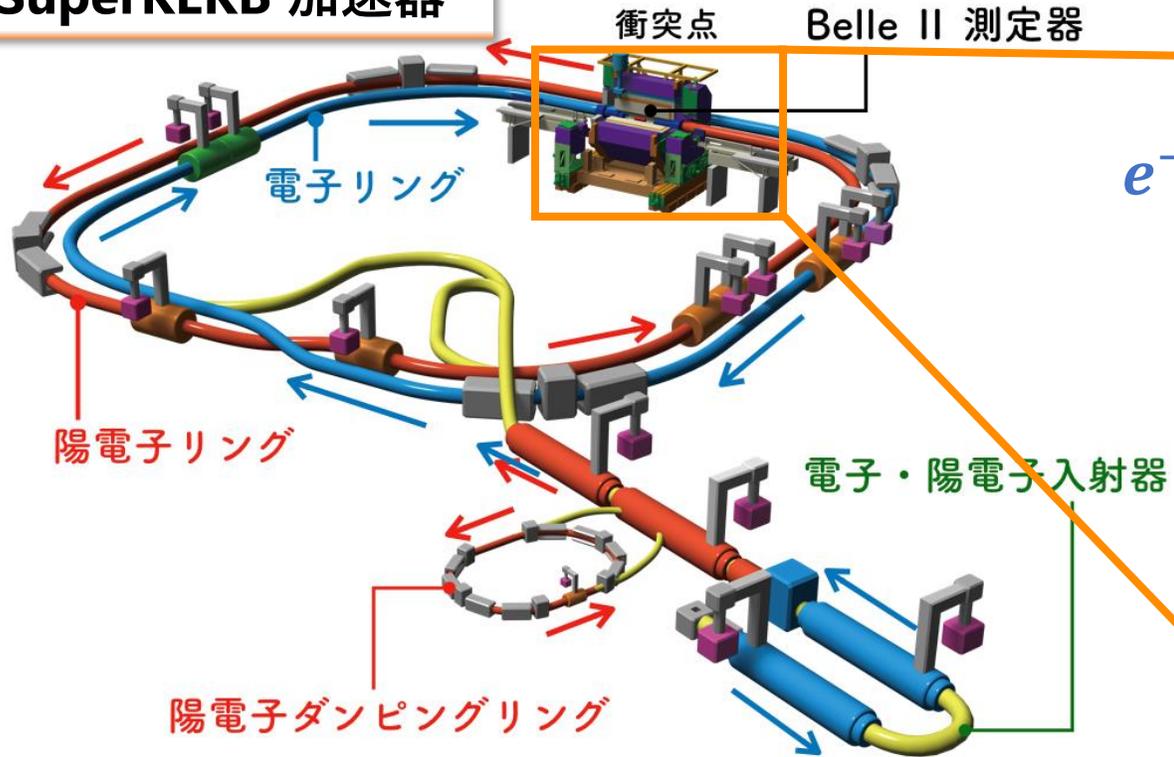
黒川俊輔<sup>A</sup>, 角野秀一<sup>A</sup>, 汲田哲郎<sup>A</sup>, 住吉孝行<sup>A</sup>, 本橋完太<sup>A</sup>, 岩城彩希<sup>A</sup>, 西田昌平<sup>C, D, H</sup>, 足立一郎<sup>C, D</sup>, 高力孝<sup>C</sup>, 松岡広大<sup>C, D, G</sup>, 宇野健太<sup>C, D</sup>, 庄子正剛<sup>C</sup>, Yun-Tsung Lai<sup>C</sup>, Eiasha Waheed<sup>C</sup>, 飯嶋徹<sup>G</sup>,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

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

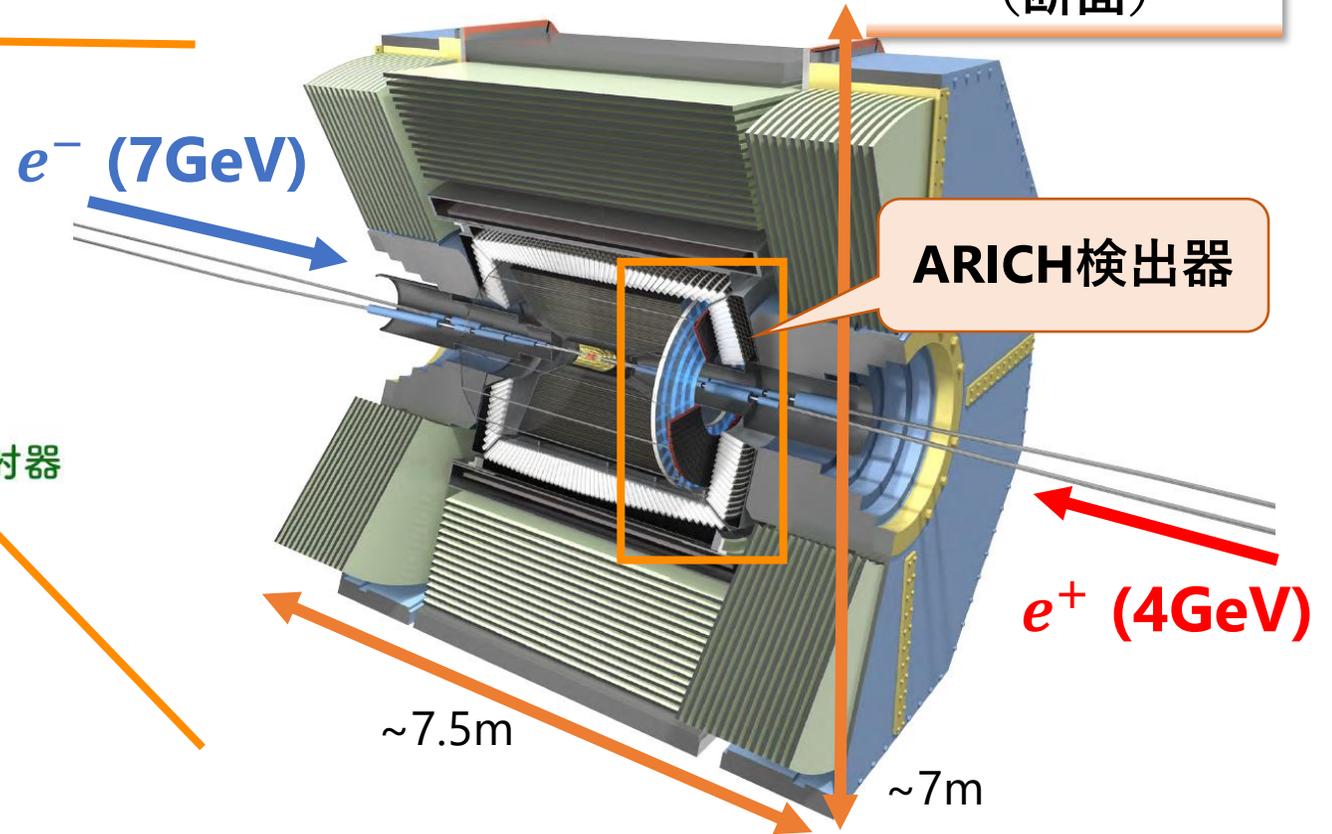
# Belle II 実験

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

## SuperKEKB 加速器



## Belle II 測定器 (断面)

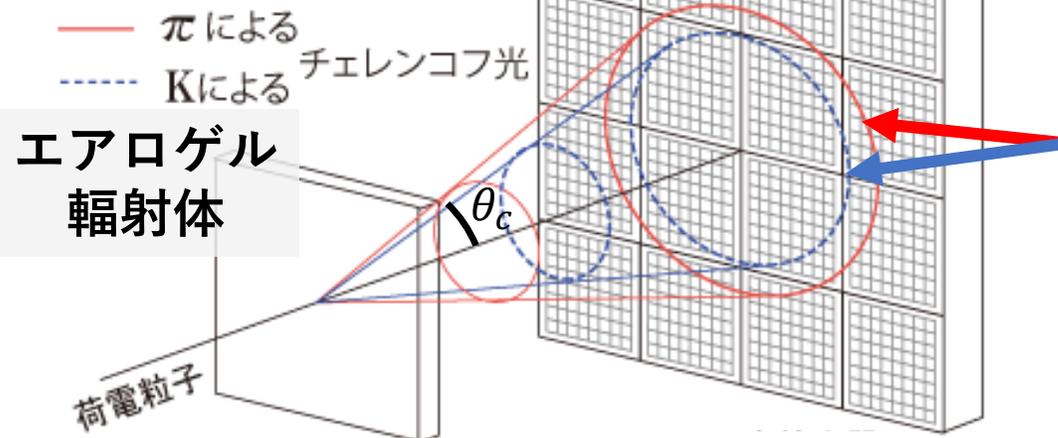


# ARICH 検出器 (Aerogel Ring Imaging Cherenkov Counter)

## 粒子識別原理

## 光検出器HAPD

(Hybrid Avalanche Photo-Detector)



放射角  $\theta_c$  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 $\pi$ 中間子を識別

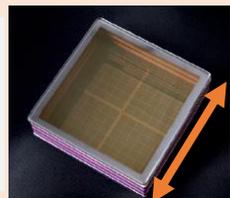
荷電粒子が通過時に  
チェレンコフ光を放出

光検出器で光子を検出  
→ 1光子検出が要件

## 光検出器のアップグレード

HAPD: 生産終了、10年以上の運用に向け 置換検討 (2030年以降)

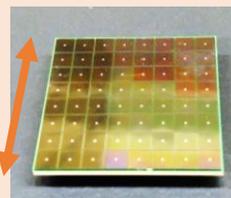
[**現行**]  
**HAPD**



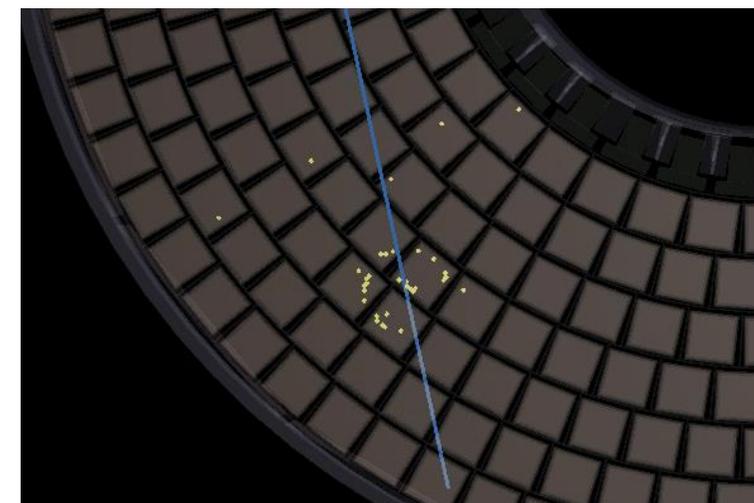
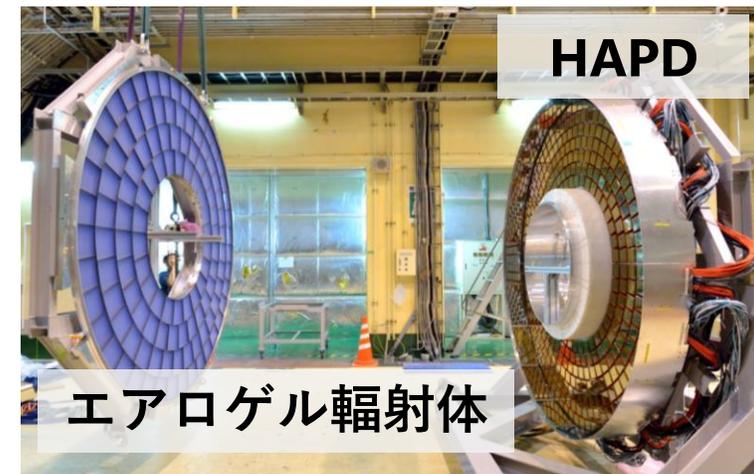
144ch  
73mm



64ch  
25.8mm



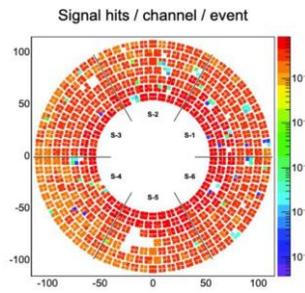
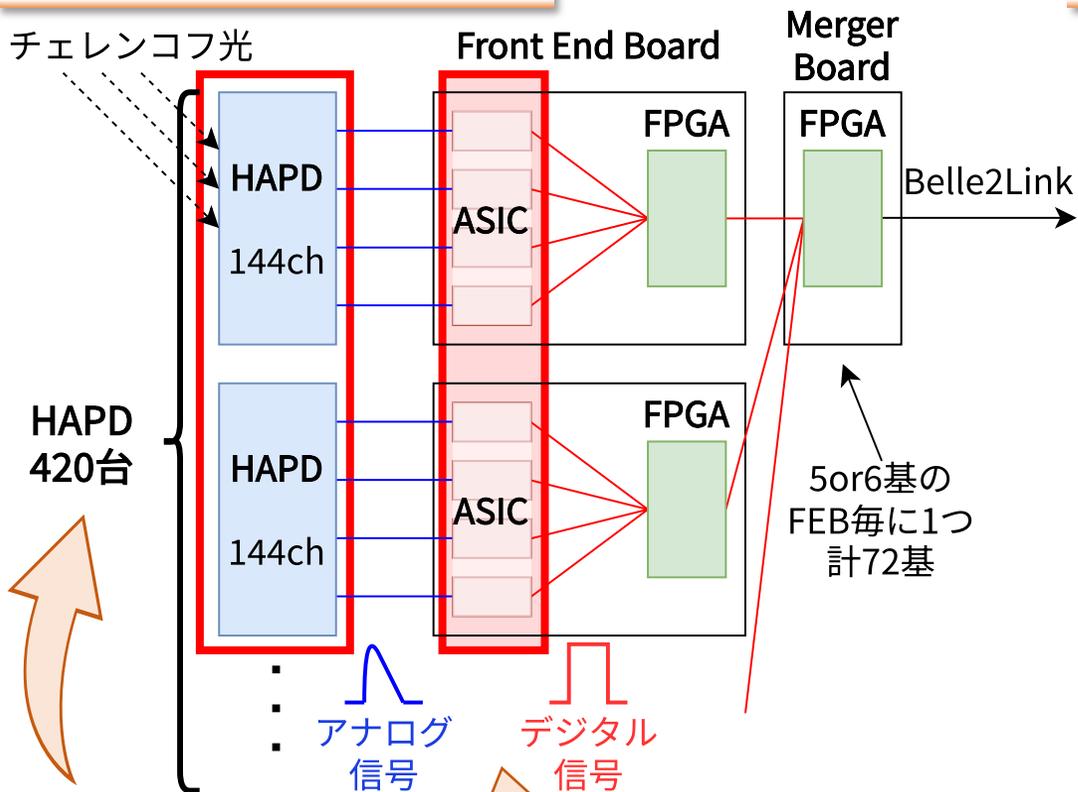
[**候補**]  
**MPPC**



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

## ARICHの現行構成



HAPD→MPPC置き換え用に  
**ASICも開発【本研究】**

## 比較

	現行 : HAPD (生産終了)	候補 : MPPC
原理	<p>チェレンコフ光による光子</p> <p>光電子加速用電圧 -7000 ~ 8500 V</p> <p>ガラス光電面</p> <p>真空</p> <p>APD</p> <p><math>e^-</math></p> <p>逆バイアス電圧 -350 V</p> <p>ガード電極用電圧 175 V</p> <p>加速による増幅(1700倍)と APDピクセルでのアバランシェ増幅(40倍)</p>	<p>(1ch分)</p> <p><a href="https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html">https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html</a></p> <p>APDをブレイクダウン電圧以上で動作させる</p>
検出効率	~19%	50%
増倍率	$5.6 \times 10^4$	<b>良好</b> $4.0 \times 10^6$
動作電圧	200 ~ 400 V, -7 ~ -8 kV	56 V
ダークカウントレート	~0 cps	<b>悪化</b> ~1 Mcps
放射線耐性	△	×

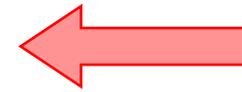
# 目次

## ■ Belle II 実験

- ARICH 検出器のアップグレード

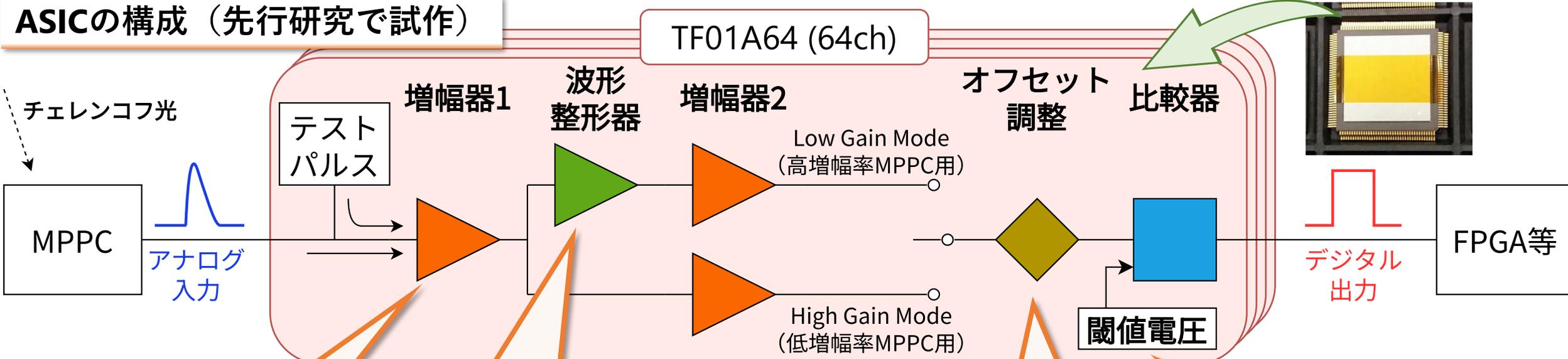
## ■ MPPC向け信号読み出し用集積回路 “TF01A64” の性能評価

- “TF01A64” の概要
- (1) テストパルス・MPPC信号を用いた評価
- (2) 光を入射・同時多チャンネル読み出し
- (3) ダークパルス分離性能
- (4) 現状の問題点

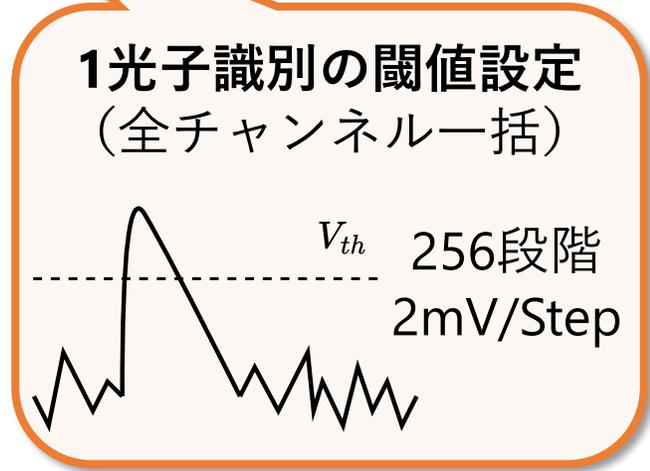
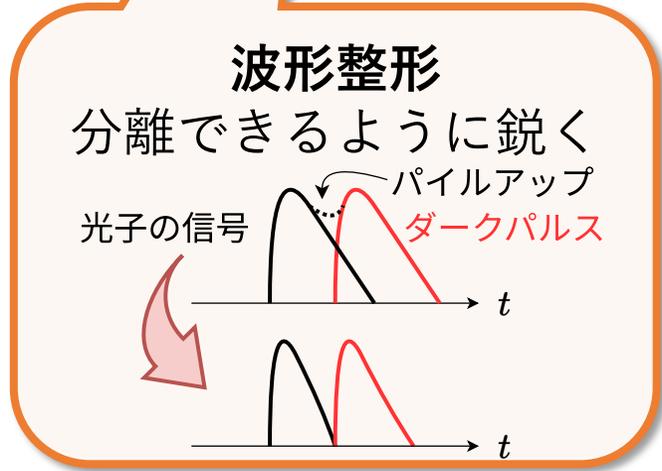
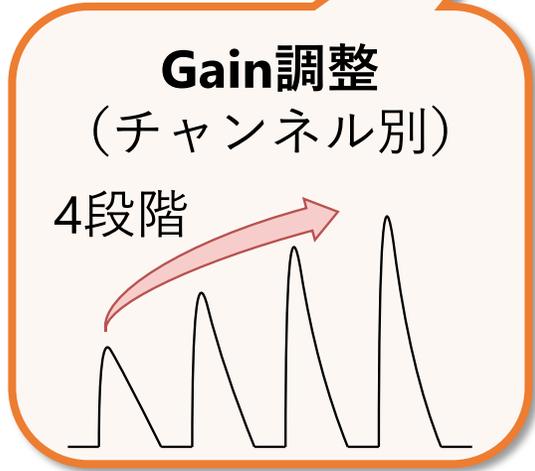


# MPPC向けASIC “TF01A64”の概要

## ASICの構成 (先行研究で試作)



## 要求性能・設計



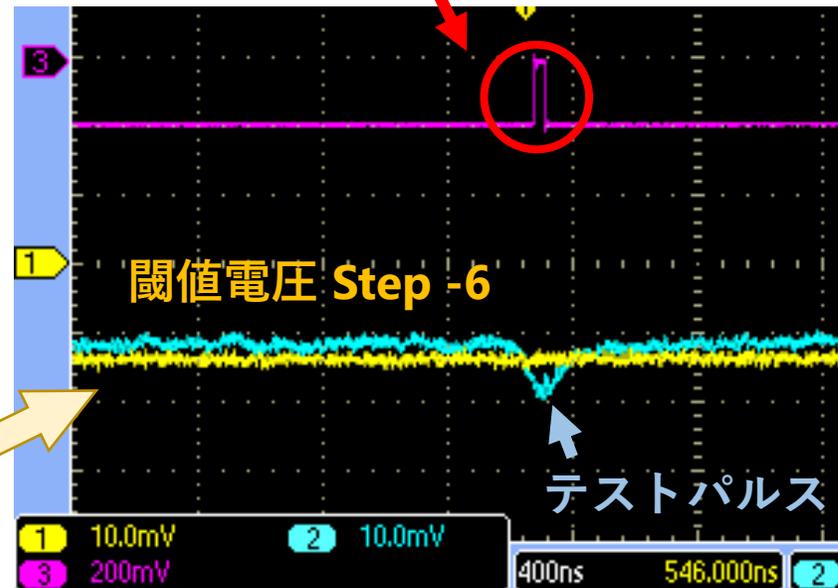
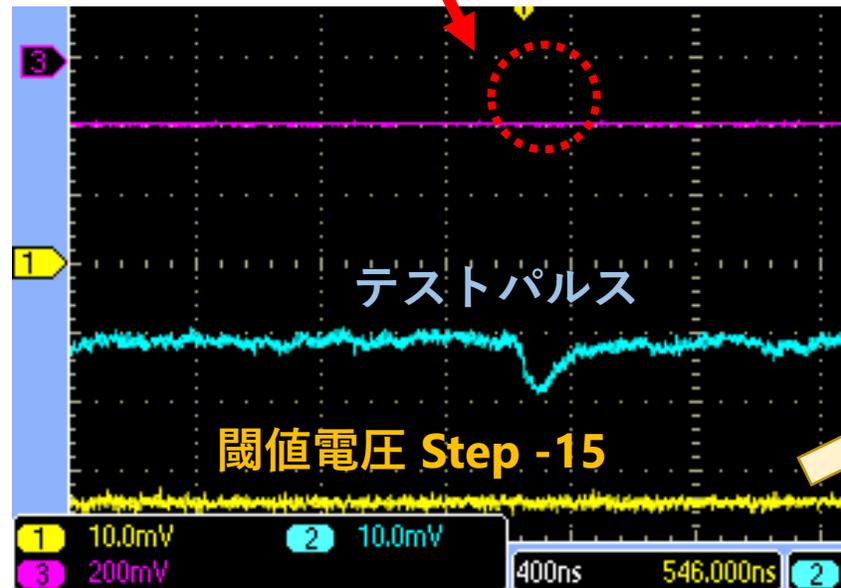
# 閾値調整による光子識別

## ■ 1光子信号の識別

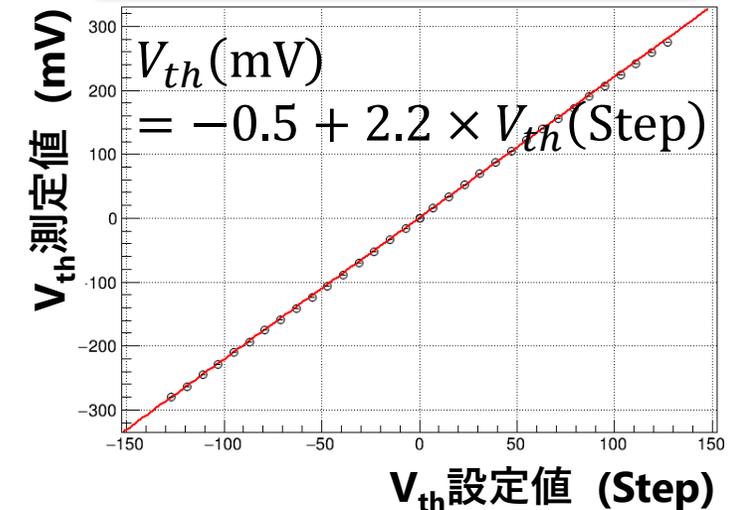
- 閾値電圧  $V_{th}$  の調整 (256段階) によって行う

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
- 1光子信号のS/N比
- ASIC内部で生成するテストパルスを基本的な確認に利用



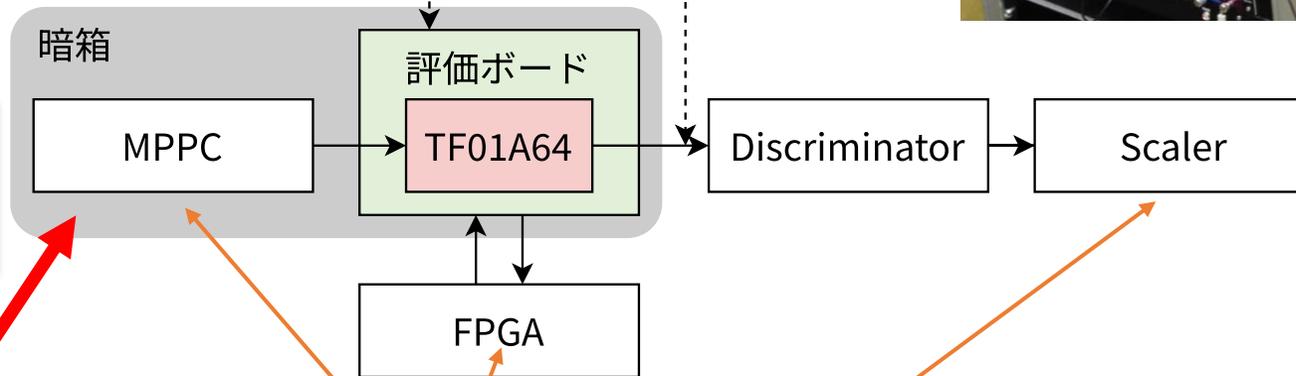
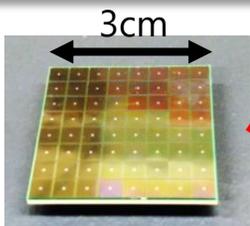
評価ボード・  
ASIC・MPPC

評価ボード

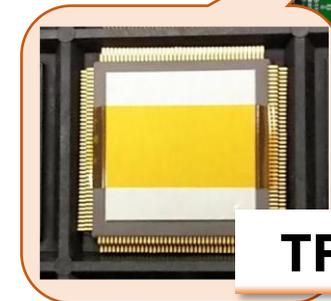
## 測定セットアップ



使用中のMPPC  
(HAMAMATSU  
S13361-3075AE-08)

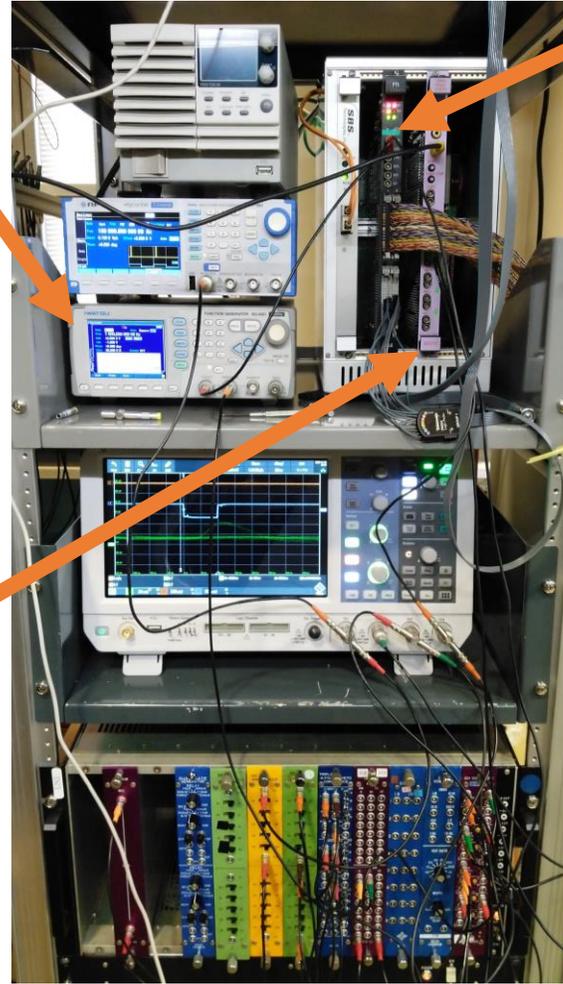


これらと、トリガーのファンクションジェネレータをPCと接続し計数を自動測定。オンラインでモニタリング。



TF01A64

# 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)

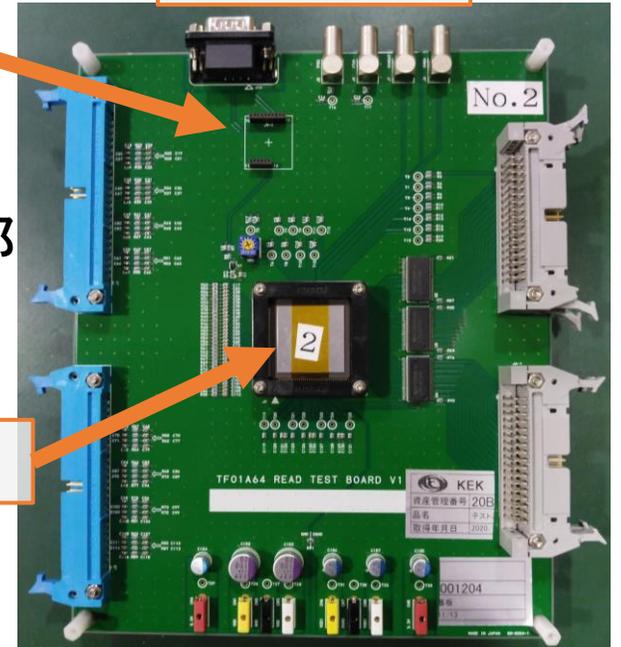
パラメータ書き込み・信号読み出し

MPPC用電源接続部

評価ボード

MPPC接続部

TF01A64



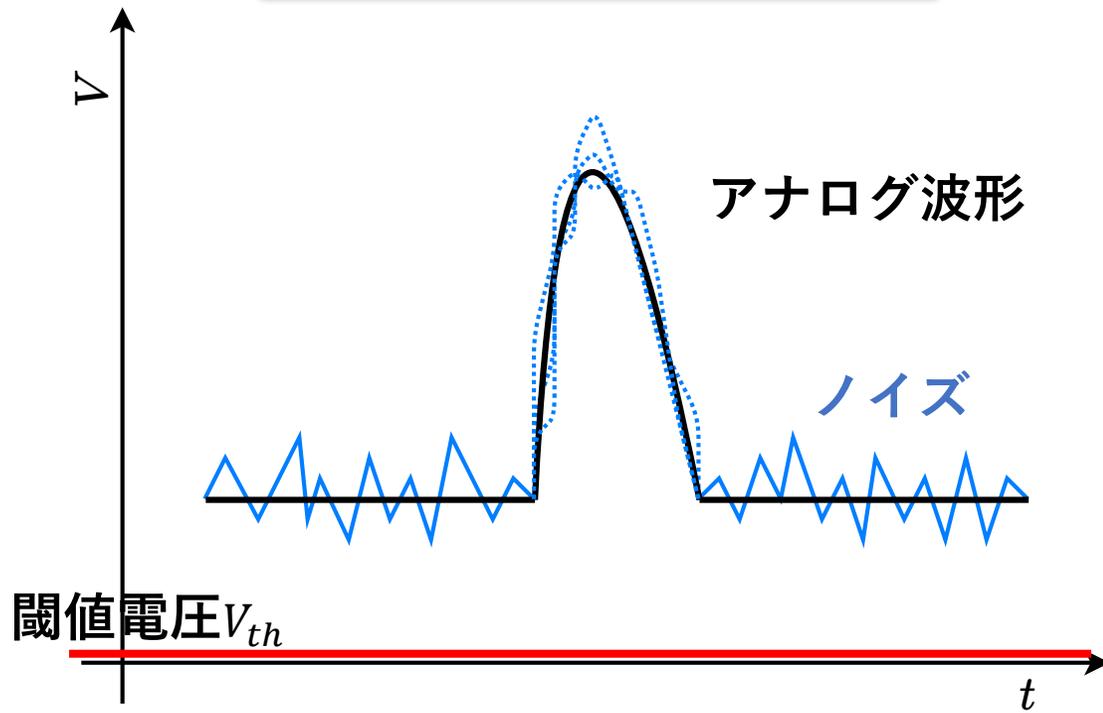
ASIC電源供給部

# 評価手法：Threshold Scan

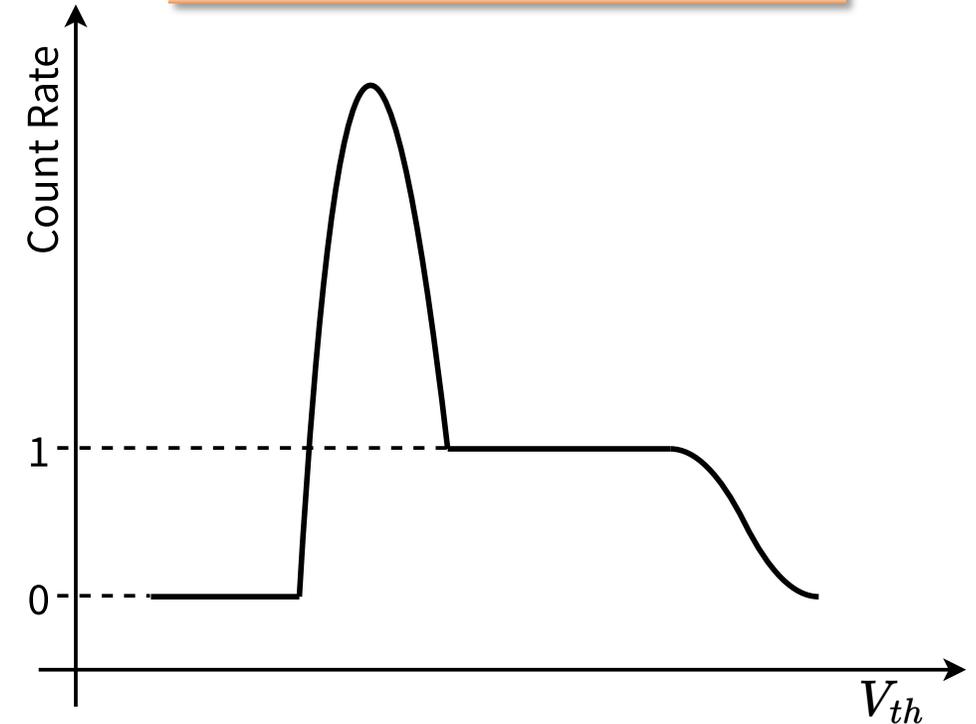
## ■ 波高値・ノイズの定量化：Threshold Scan

- 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

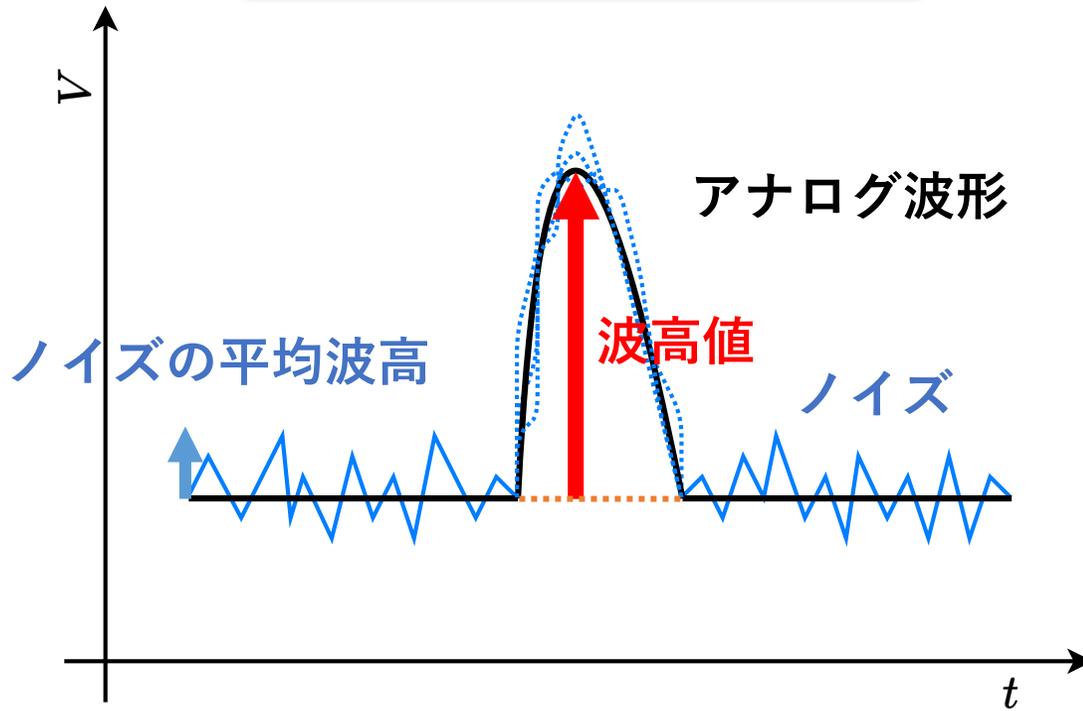


# 評価手法：Threshold Scan

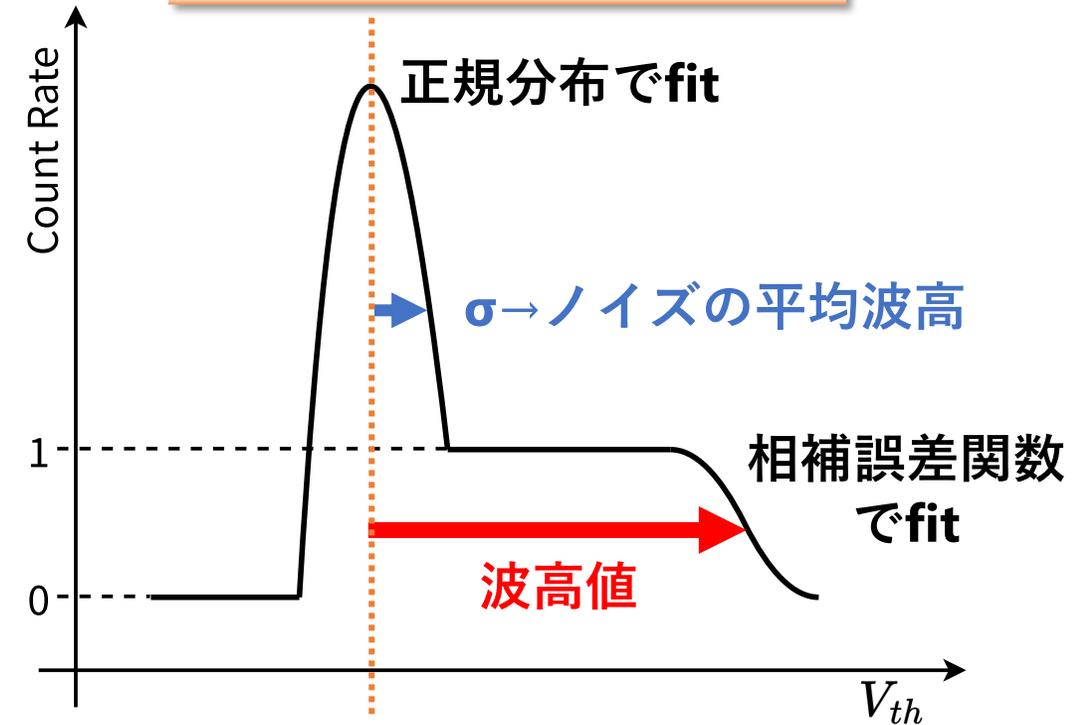
## ■ 波高値・ノイズの定量化：Threshold Scan

- 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



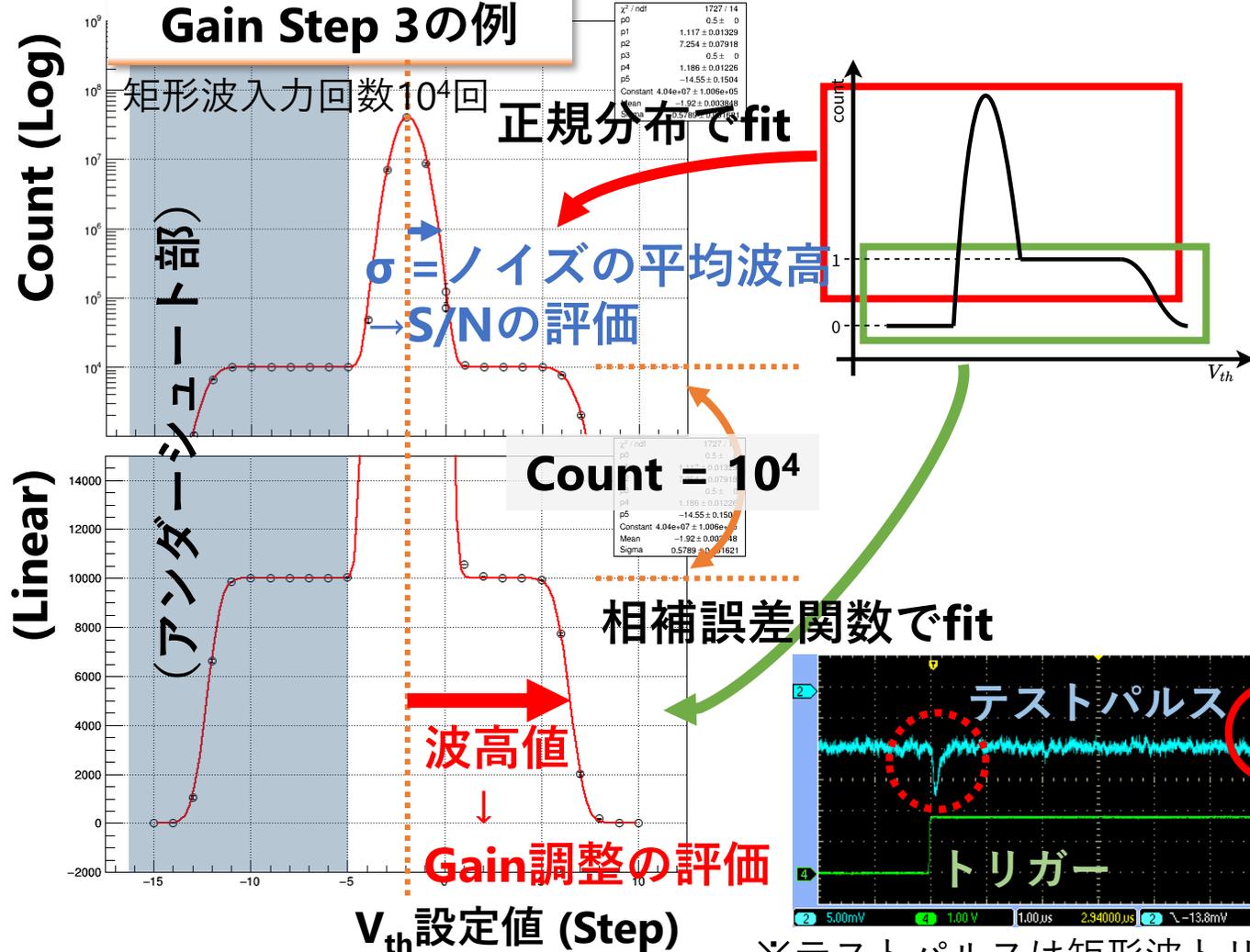
デジタル化後のカウント数



# テストパルスを用いた評価

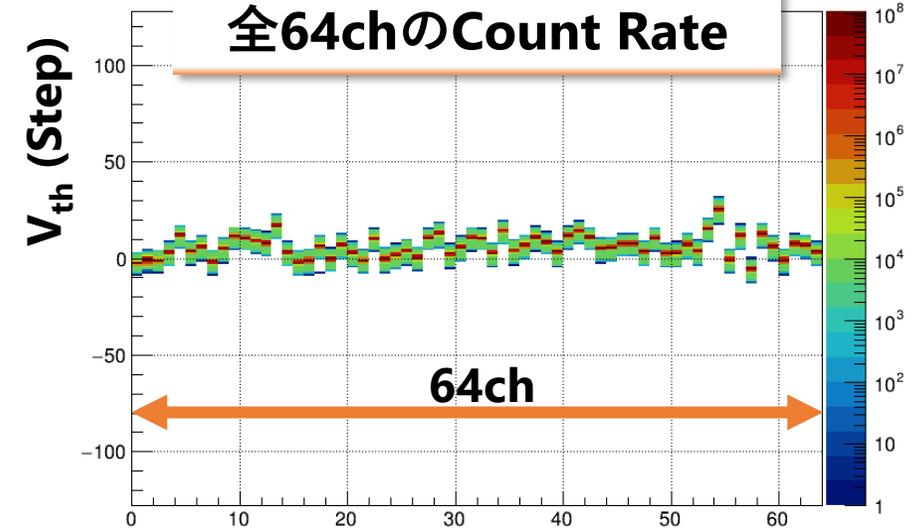
## Threshold Scanの結果

### Gain Step 3の例

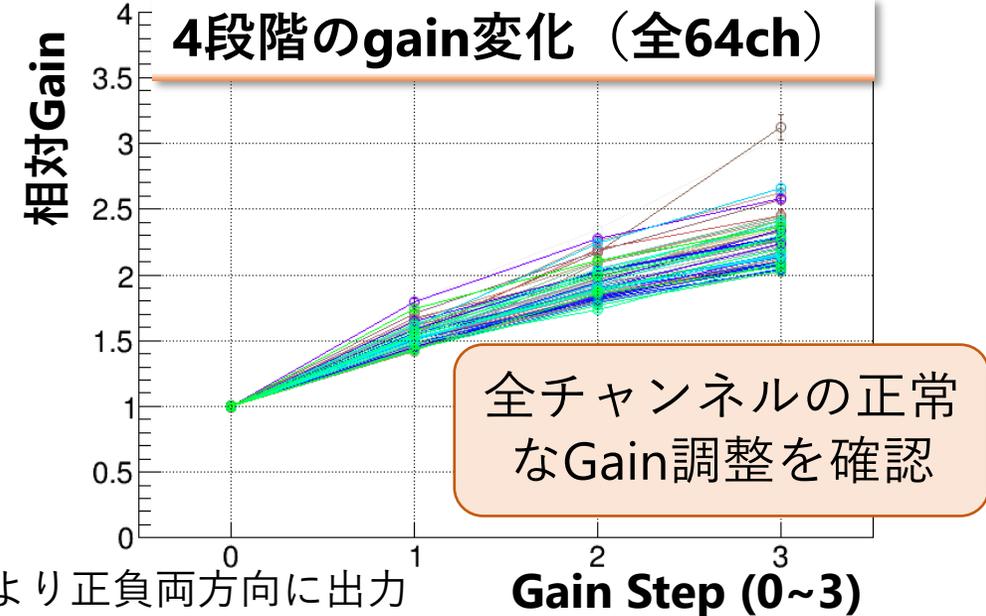


※テストパルスは矩形波トリガーにより正負両方向に出力

### 全64chのCount Rate

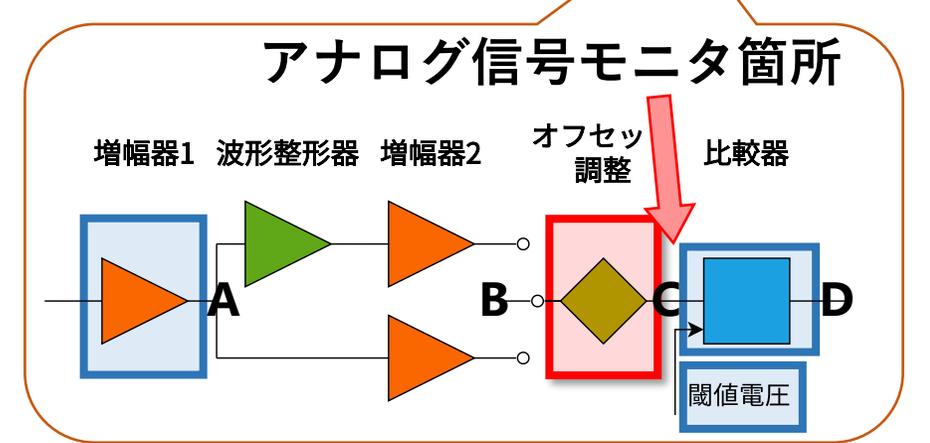
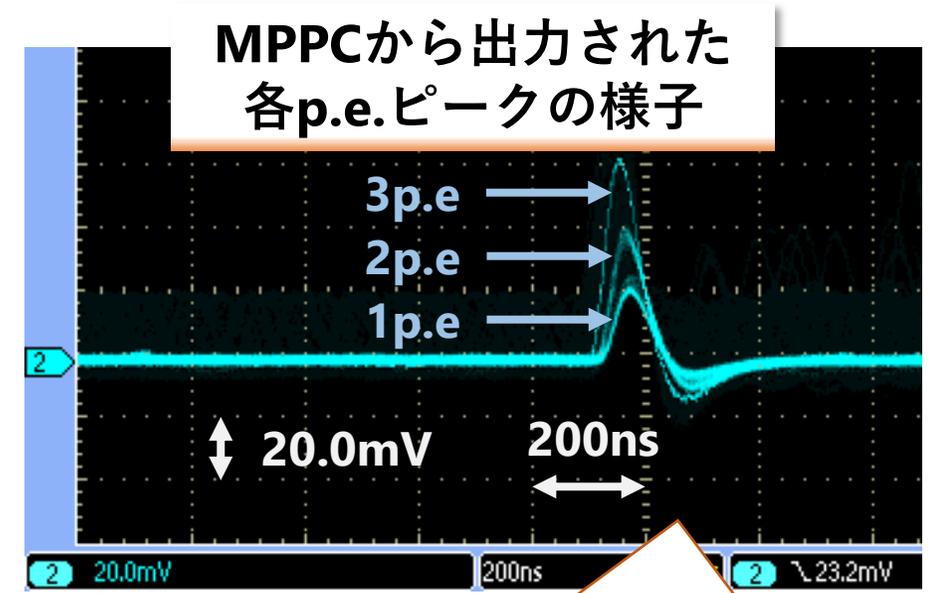
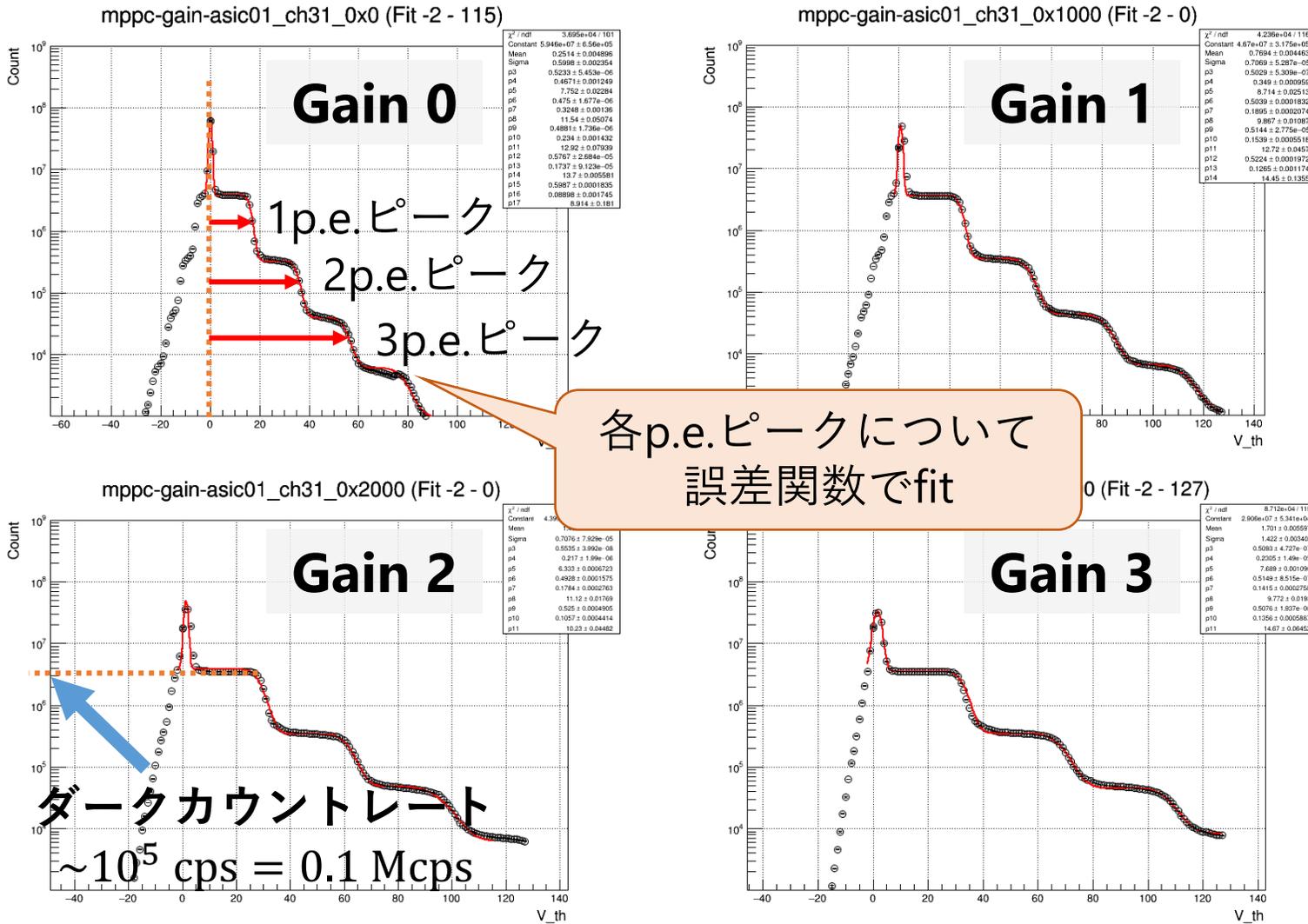


### 4段階のgain変化 (全64ch)



# 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



# Threshold ScanによるGain、S/N評価

## Gain Step毎の相対gain (Gain 0を1とした)

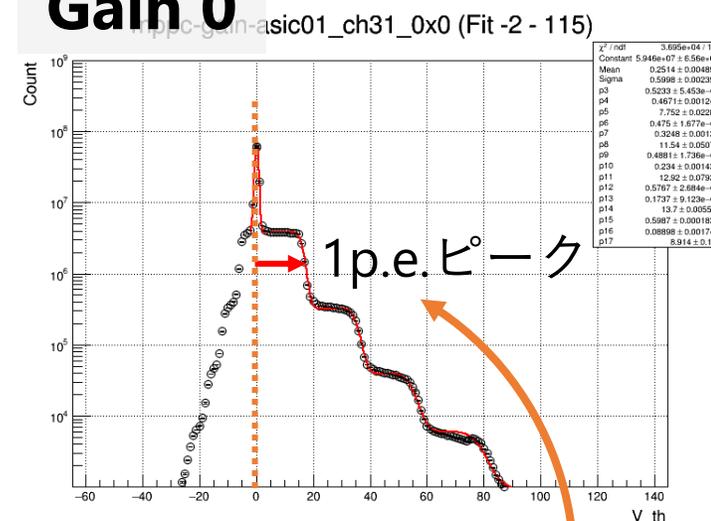
	MPPC 1p.e. (ch26のみ)	シミュレーション (先行研究)
Gain 0	1	1
Gain 1	1.45	1.62
Gain 2	1.75	2.03
Gain 3	1.93	2.34

## S/N比

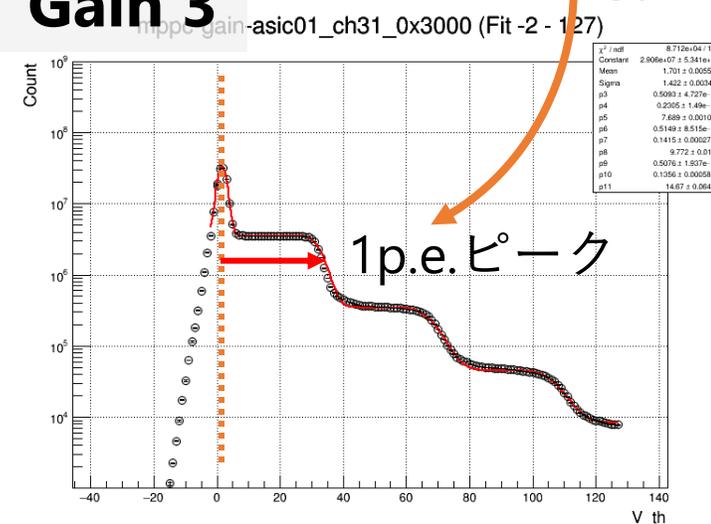
- 十分にノイズを分離できることを確認

	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

# 目次

## ■ Belle II 実験

- ARICH 検出器のアップグレード

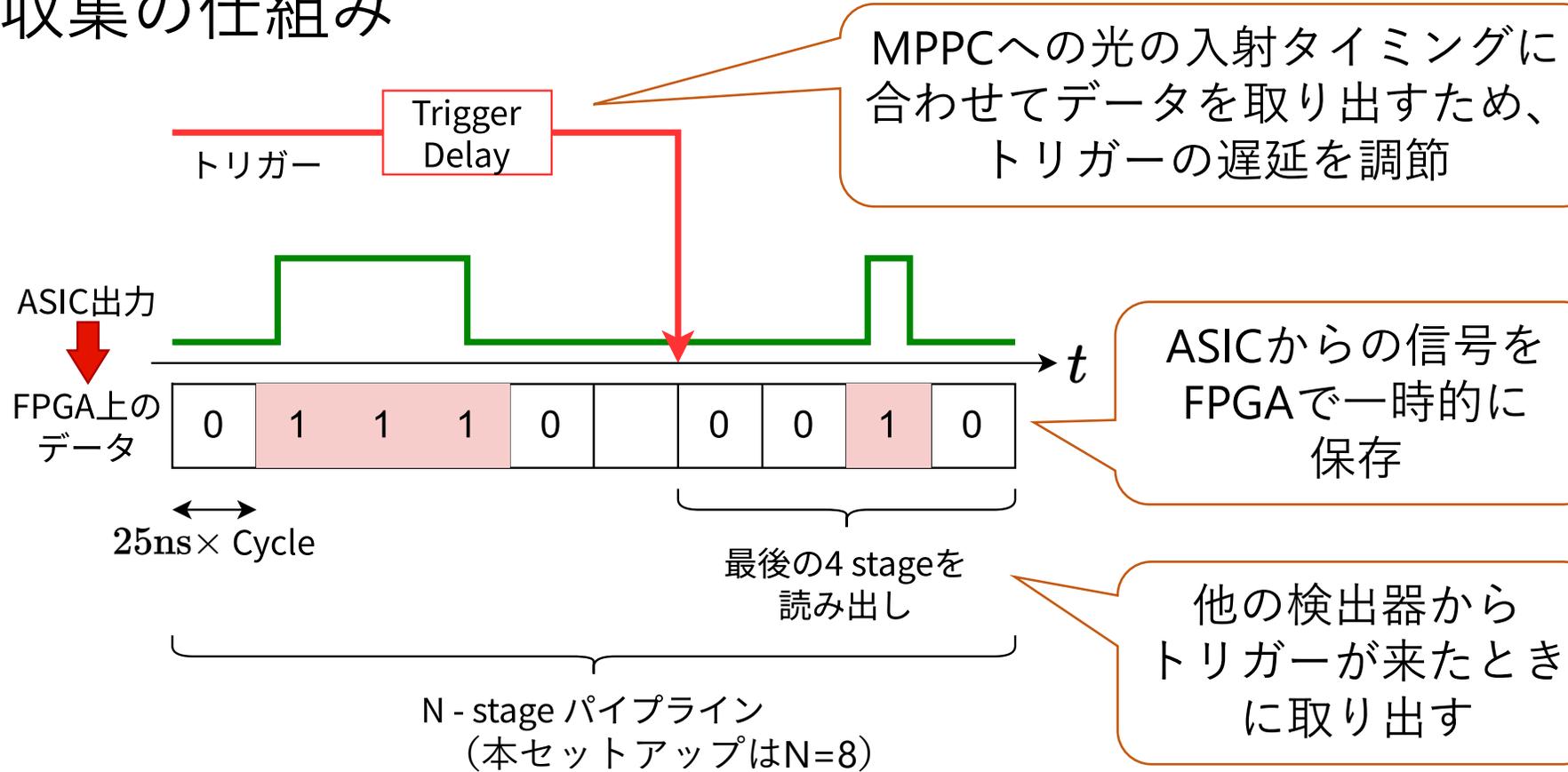
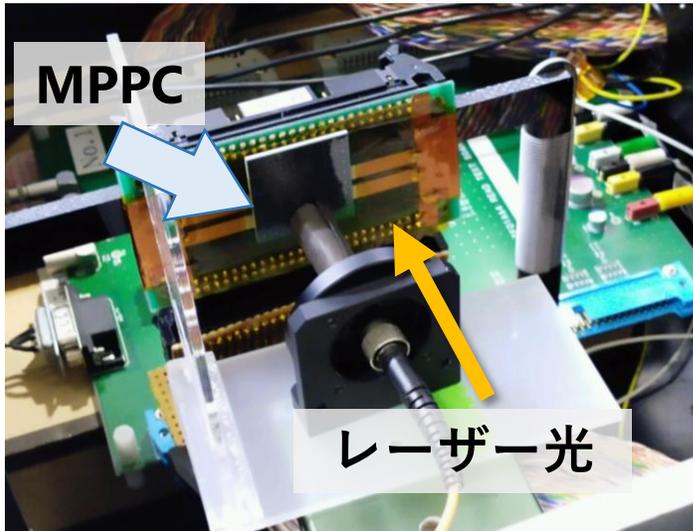
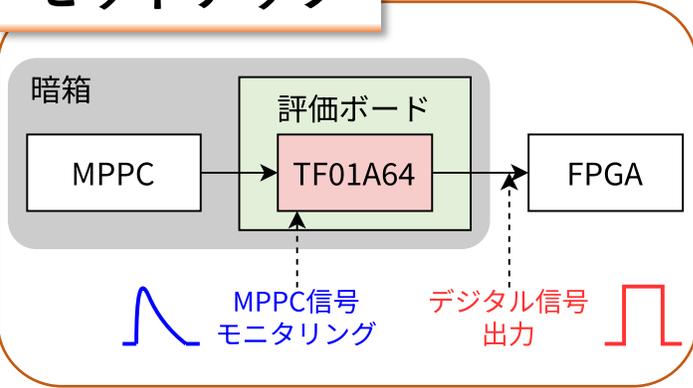
## ■ MPPC向け信号読み出し用集積回路 “TF01A64” の性能評価

- “TF01A64” の概要
- (1) テストパルス・MPPC信号を用いた評価
- (2) 光を入射・同時多チャンネル読み出し ←
- (3) ダークパルス分離性能
- (4) 現状の問題点

# 光を入射・同時多チャンネル読み出し

## ■ ARICHでのデータ収集の仕組み

### セットアップ



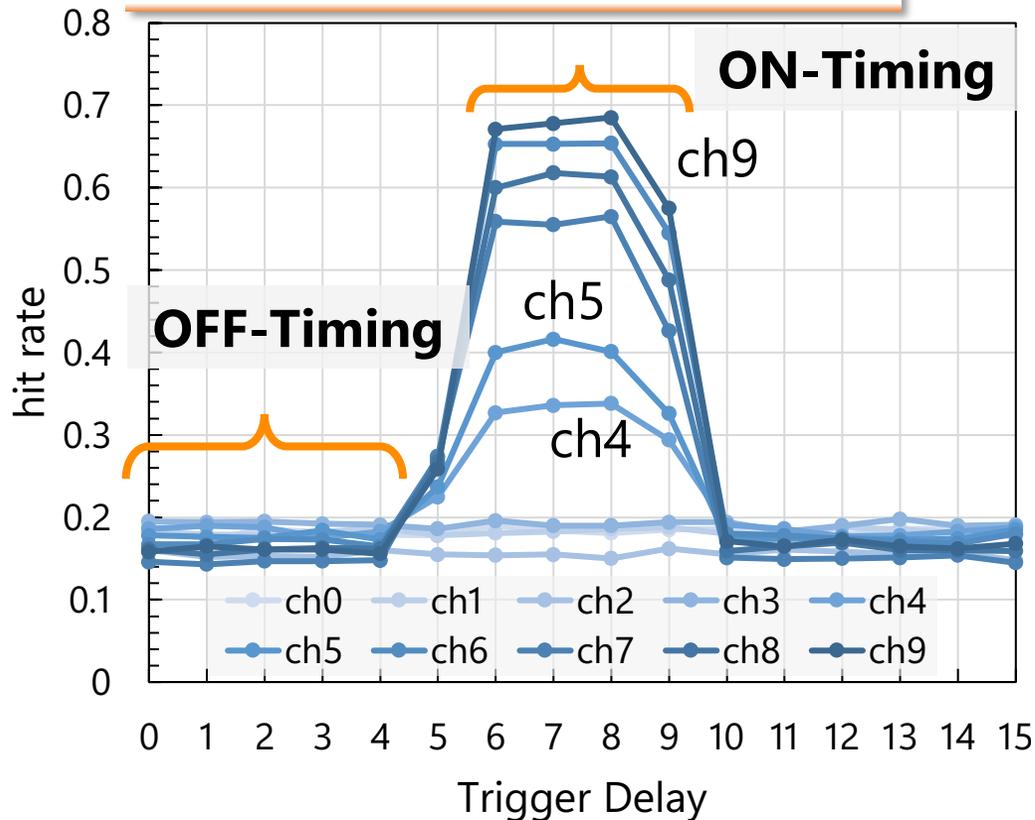
MPPCにレーザー光を入射・FPGAを接続し、同時に多チャンネルの信号を読み出してhit rateを評価 (レーザーのトリガー出力を利用)

# 光を入射・同時多チャンネル読み出し

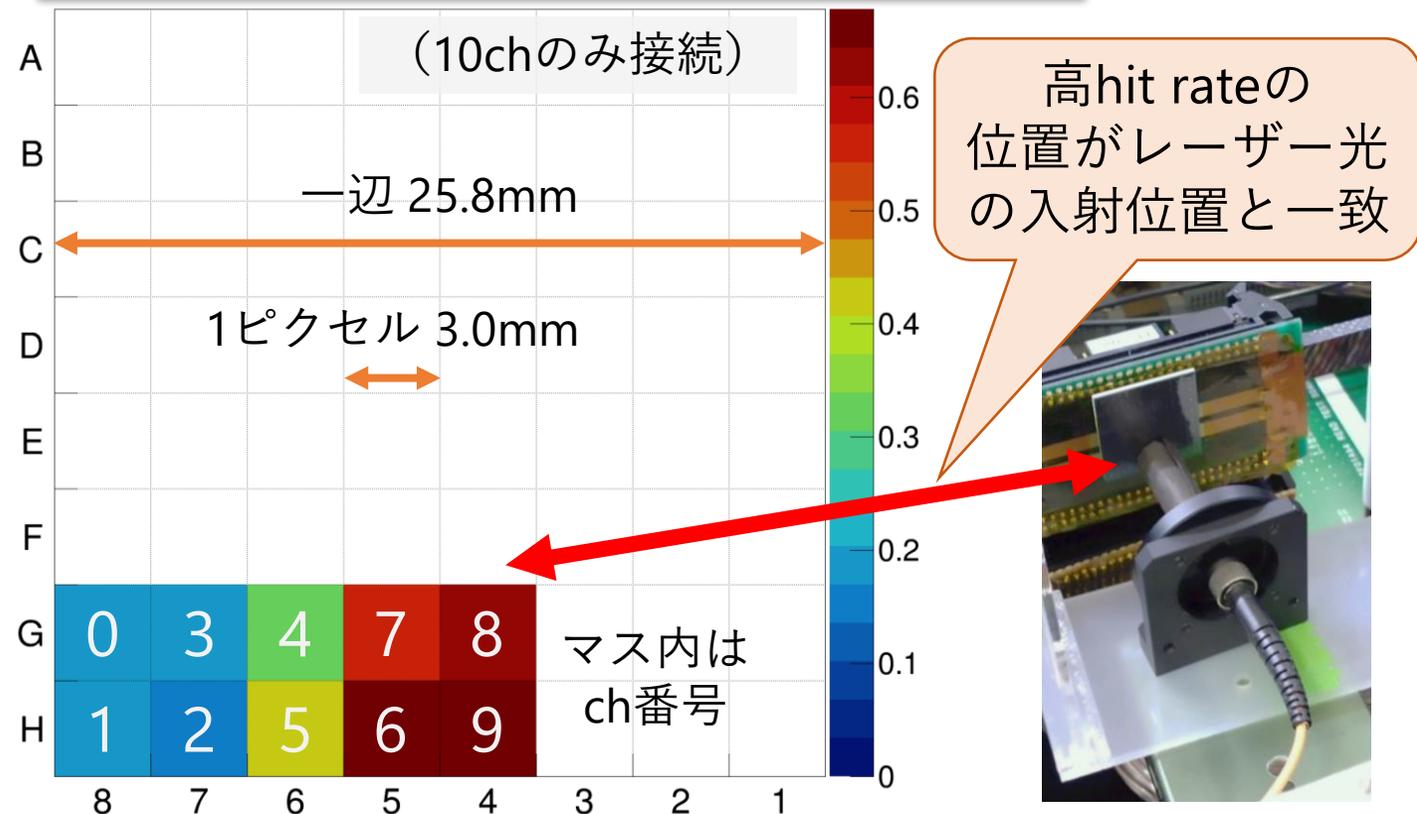
■ レーザー（50kHz）のトリガー出力を利用してhit rate計測

- 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  $\leq 5$  に設定
- Gain step = 0、 $V_{th} = (1\text{p.e.ピーク}) \times 80\%$

10ch分のhit rate (Cycle = 5)



MPPCのhit rate分布 (Trigger Delay = 7)



# 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

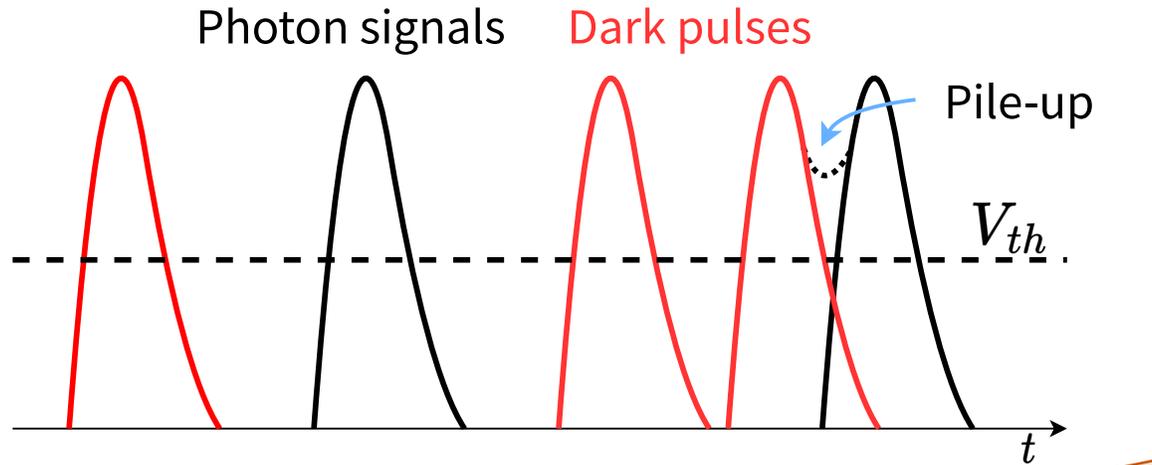
- “TF01A64” の概要
- (1) テストパルス・MPPC信号を用いた評価
- (2) 光を入射・同時多チャンネル読み出し
- (3) ダークパルス分離性能
- (4) 現状の問題点



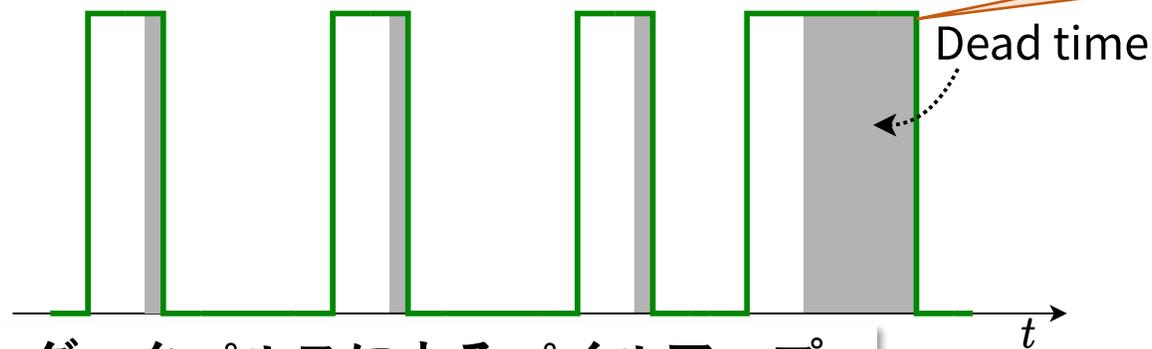
# ダークパルス分離性能の評価

## ■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

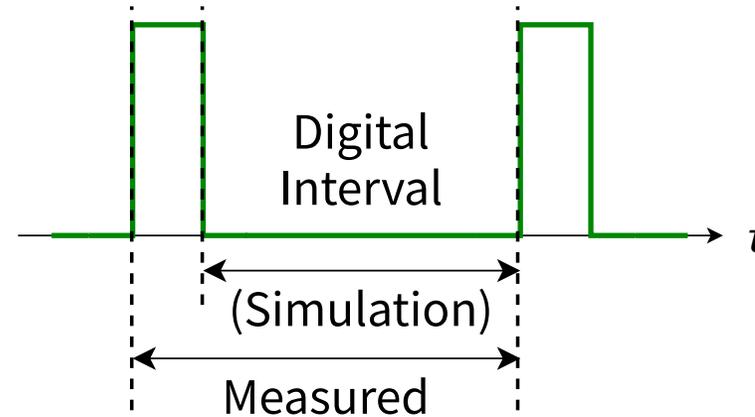
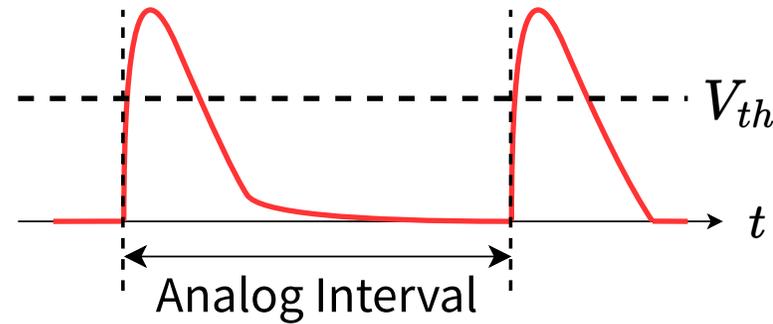
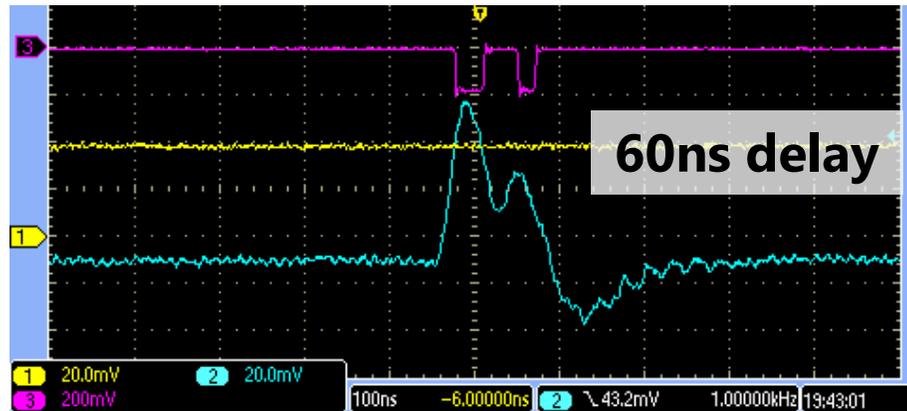
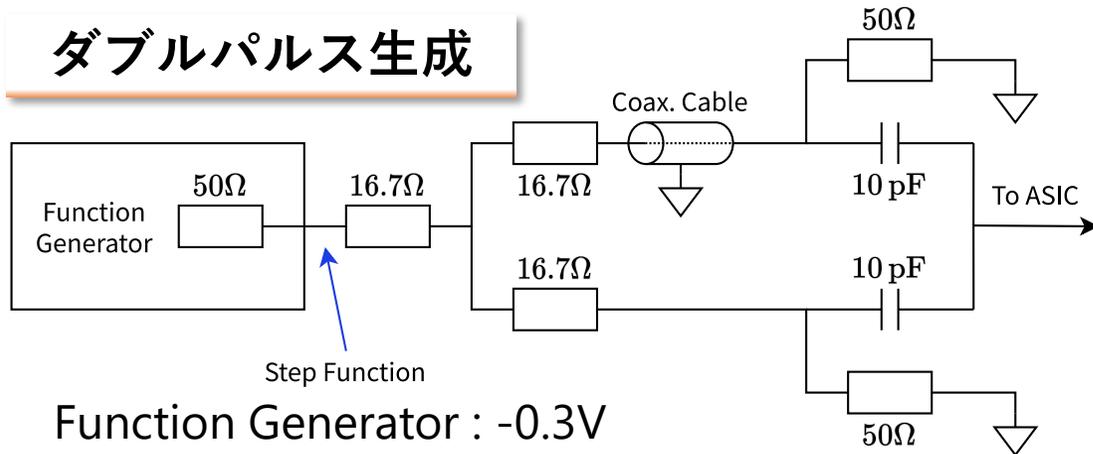
MPPCは高ダークカウントレート  
真の信号とできるだけ分離したい

# 電気信号によるダブルパルスの生成

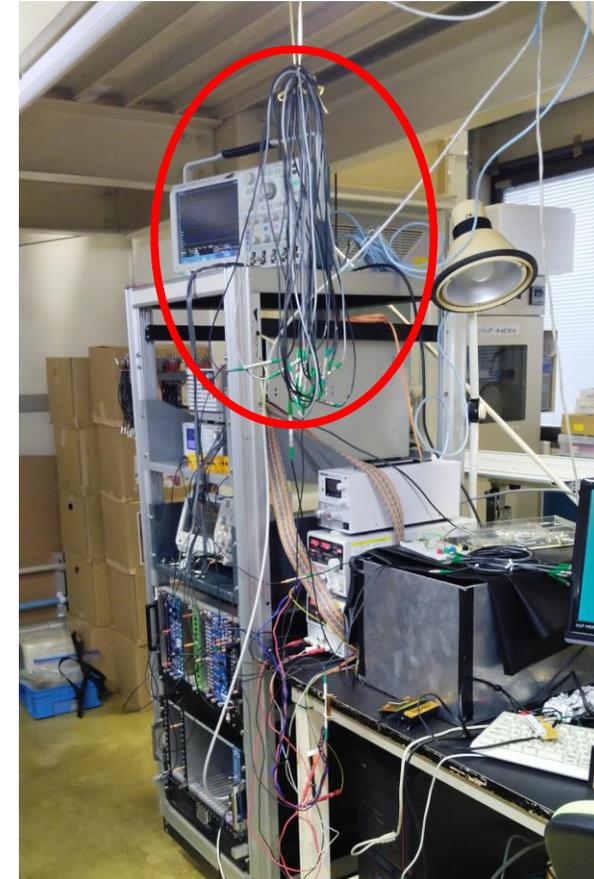
## ■ テスト電気信号（MPPC信号の代わり）での検証

- 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



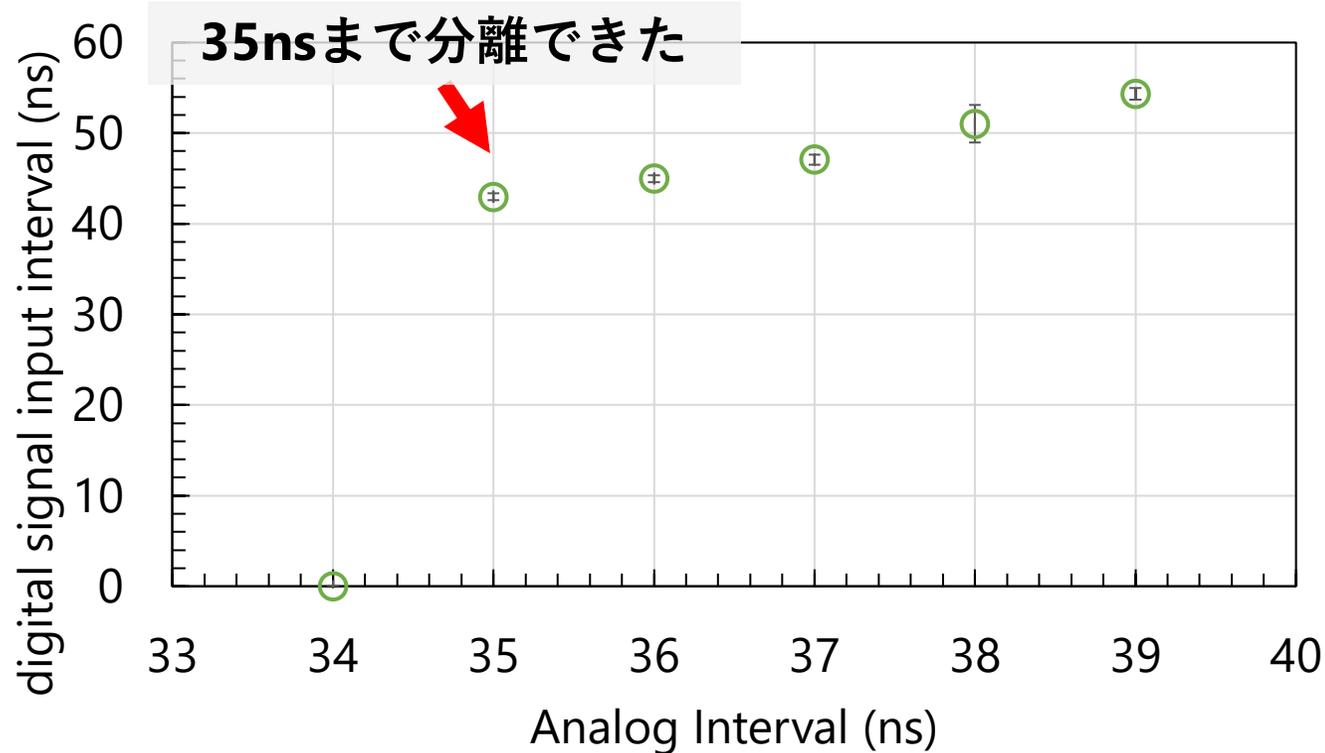
遅延用のケーブル

# 電気信号によるダークパルス分離評価

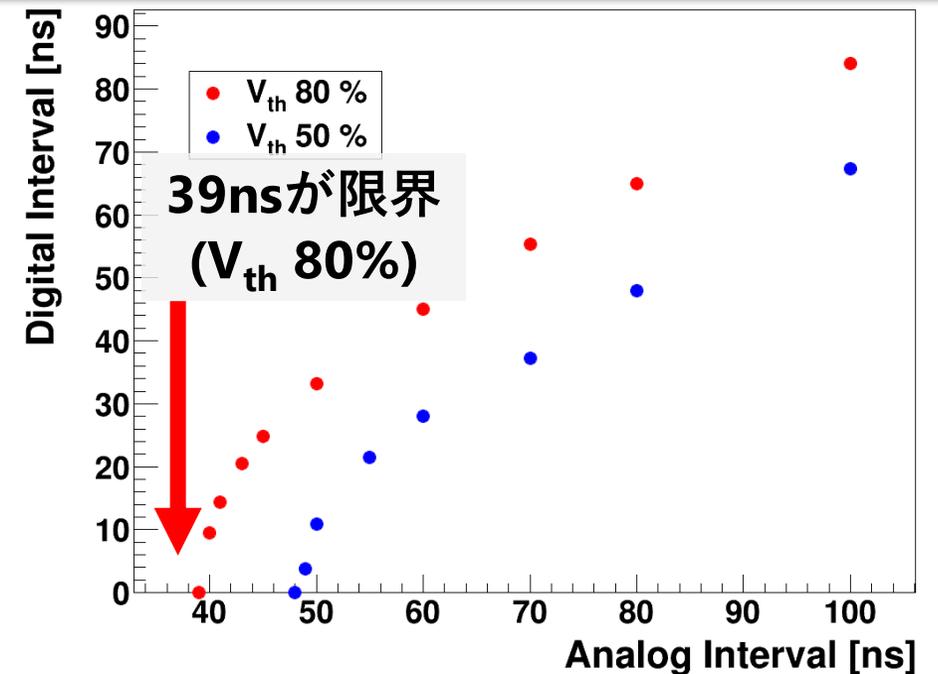
## ■ アナログ信号の間隔とデジタル信号の間隔

- $V_{th} = \text{波高} \times 29.08\%$
- 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)

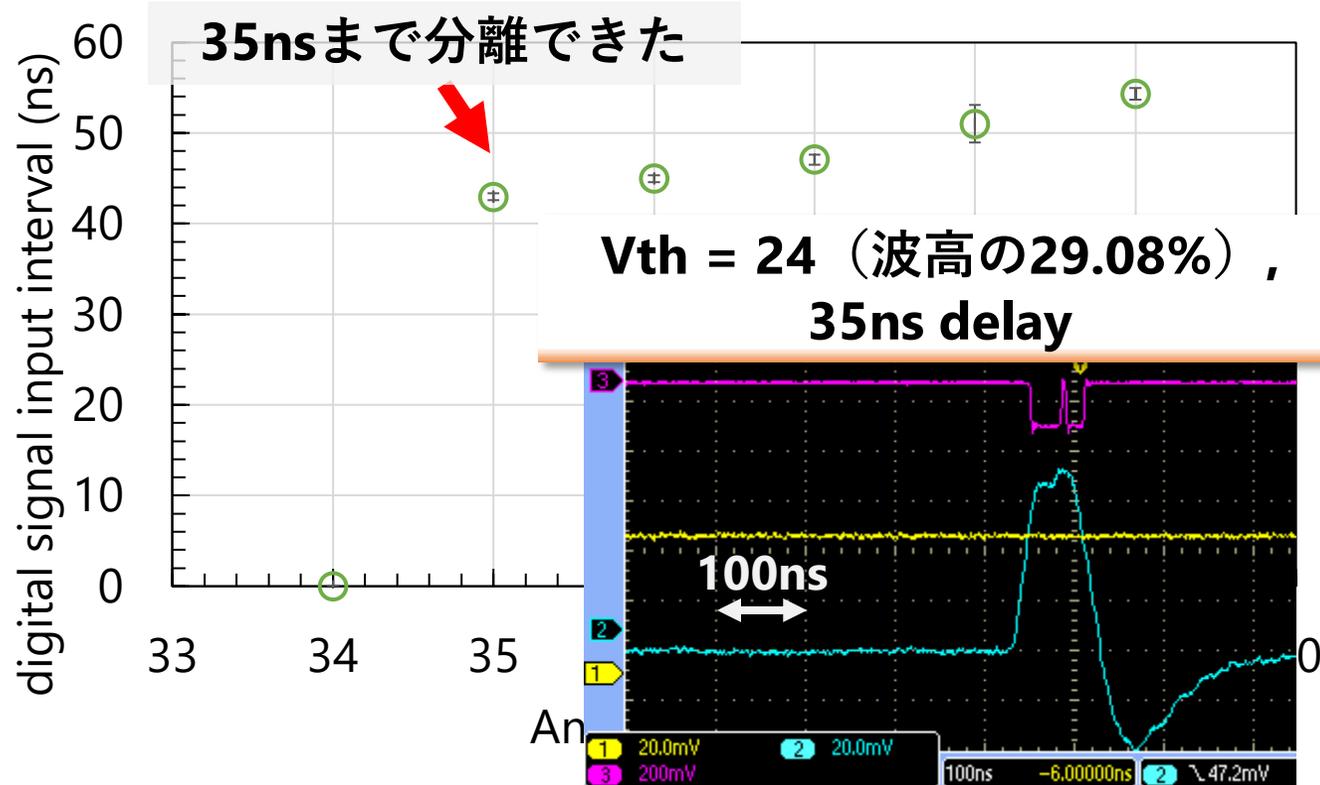


# 電気信号によるダークパルス分離評価

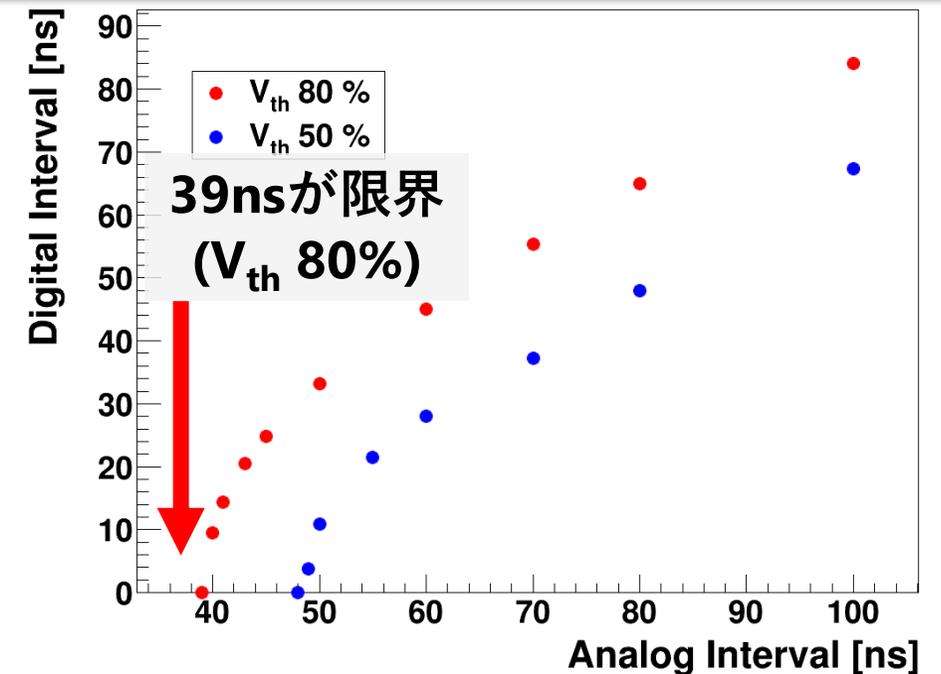
## ■ アナログ信号の間隔とデジタル信号の間隔

- $V_{th} = \text{波高} \times 29.08\%$
- 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,  $V_{th}=24$ )



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)

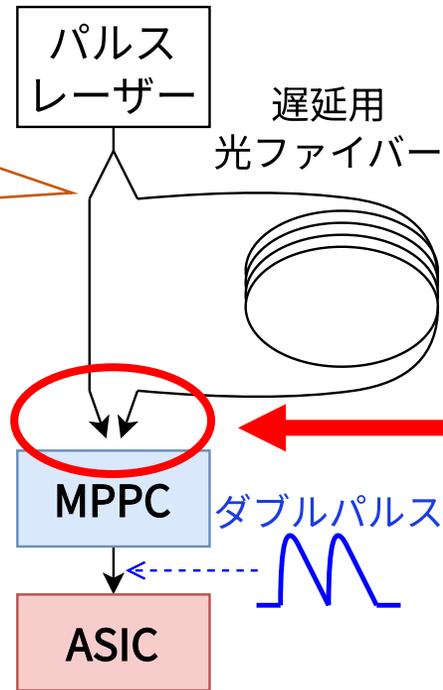


# 光によるダークパルス分離評価

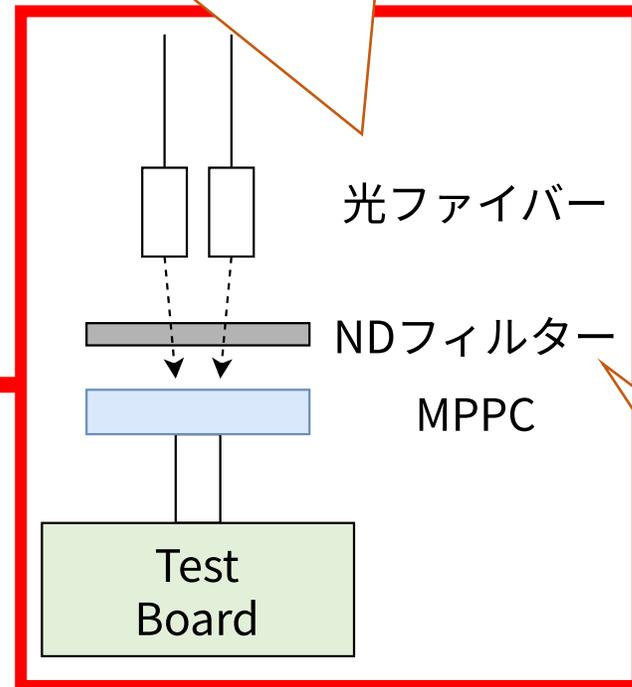
- 光ファイバーによるダブルパルスの生成
  - 実際の近接ダークパルスと同様の状態を再現
  - 評価が進行中。

## セットアップ

分岐光ファイバー  
(1入力2出力、  
光量50:50)

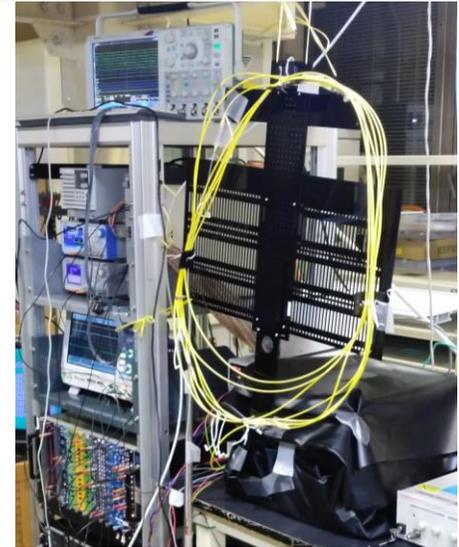


光量を増やし  
ダブルパルスの出力確率を上げる



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



# 光によるダークパルス分離評価

## ■分離能力の評価

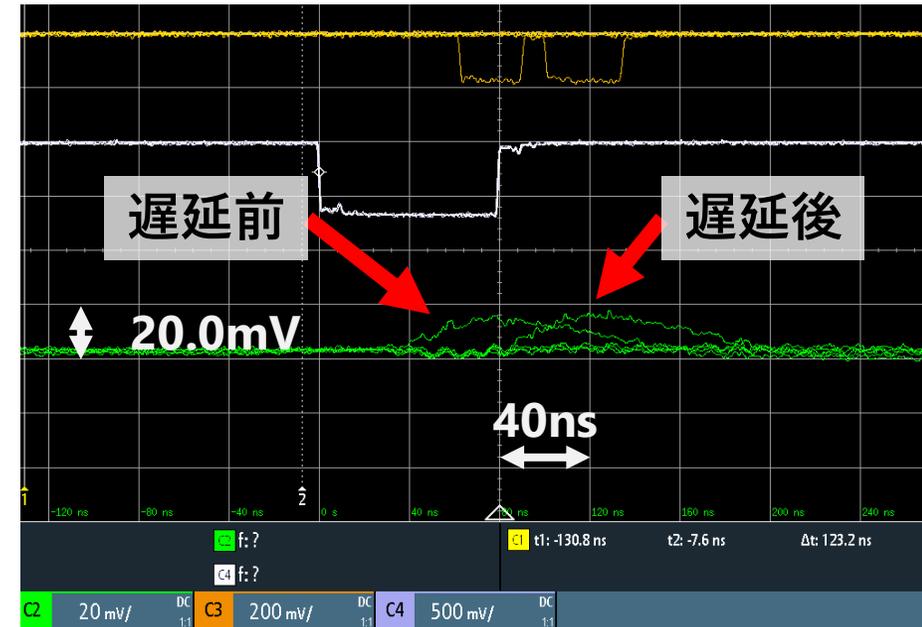
- ダークカウントレート  $N$  [cps]、Digital interval  $a$  [ns]として、不感時間の割合  $D$ は

$$D \equiv N \times a$$

- 測定結果（15mファイバー接続）

$V_{th}$	デジタル信号の間隔 (ns)
(波高) × 80%	$80.8 \pm 0.2$
(波高) × 50%	$78.5 \pm 0.1$

- ダークカウントレート1 Mcpsを仮定すると  
 $D_{V_{th}=80\%} = 1 \text{ Mcps} \times 80.8 \text{ ns} = 0.08 \rightarrow$  不感時間8%
- 分離限界は評価中。
- 但しMPPCによる検出効率向上を考慮していない。
- 放射線損傷後のダークカウントレート（室温、10年間）は $O(10^3)$  Mcps/chを見込む（先行研究）。



# まとめ

- ARICHアップグレード用MPPC向けのASIC “TF01A64”の性能評価
  - テストパルス・MPPCからの信号を用いてGain及びS/Nの評価を行った。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した。
  - 全チャンネルの増幅機能が正常に動作することを確認した。
  - レーザー光を入射したMPPCとFPGAを接続して、多チャンネル読み出しを行った。
  - 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 $D < 8\%$ と見積もり。
- 今後
  - 同時に全てのチャンネルの信号を読み出し、運用するセットアップを行う。
  - 中性子を照射したMPPCを用いて、ASICの性能評価を行う。
  - シミュレーションを経て次期試作の検討を行う。