

2020年2月16日

第26回ICEPPシンポジウム

T2K実験の新型検出器Super-FGD用 MPPCの大量試験システムの開発

東京大学 物理学専攻 修士1年
鞠谷 温士

T2K実験

◆ 概要

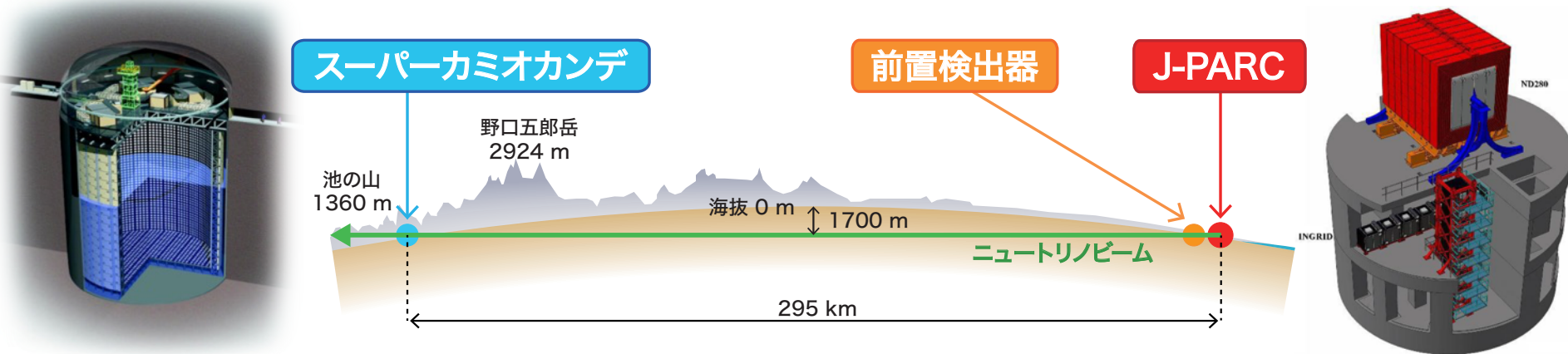
- 長基線ニュートリノ振動実験 (Tokai to Kamioka)
- J-PARC陽子加速器を用いて ν_μ ビームを生成し, 295km離れたSKに向けて射出
- 後置検出器SKでニュートリノ反応を測定し, 振動パラメータを測定
- 一連の前置検出器群によってビームのフラックスや反応断面積に制限

◆ 目標

- レプトンにおけるCP対称性の破れの検証
- ニュートリノ振動パラメータの精密測定



統計の増加
系統誤差の削減



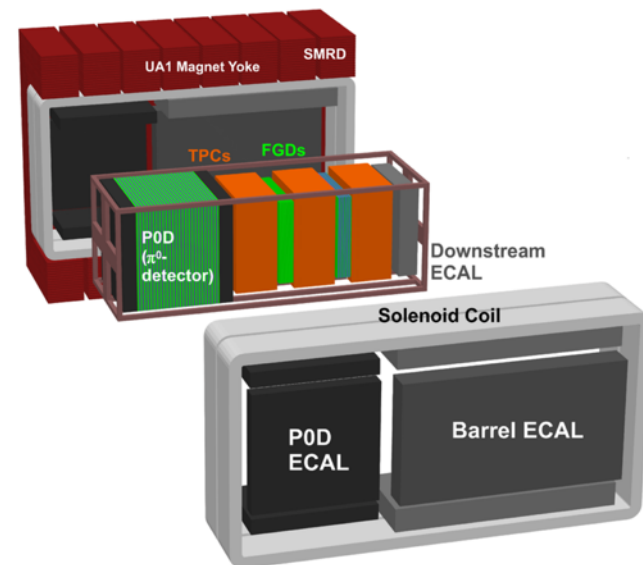
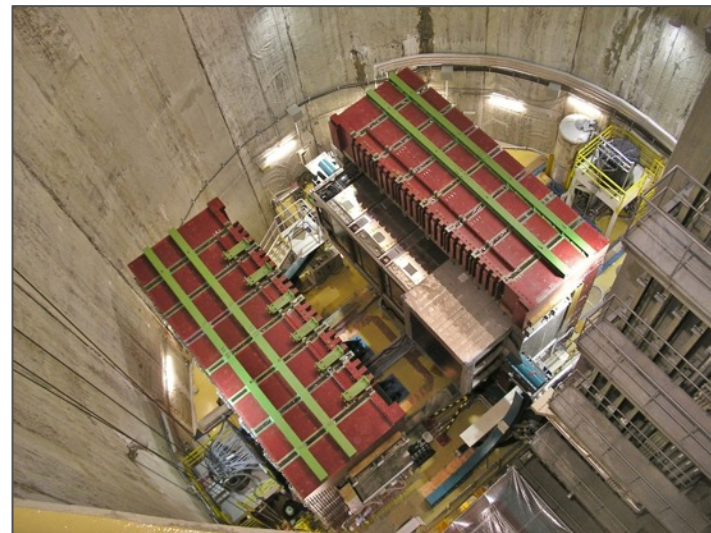
前置検出器 ND280

◆ 概要

- 標的から280m離れたホールに設置
- 測定対象
 - 振動前のエネルギースペクトル
 - ニュートリノ-核子反応断面積
 - ビームに内在する電子ニュートリノ

◆ 検出器

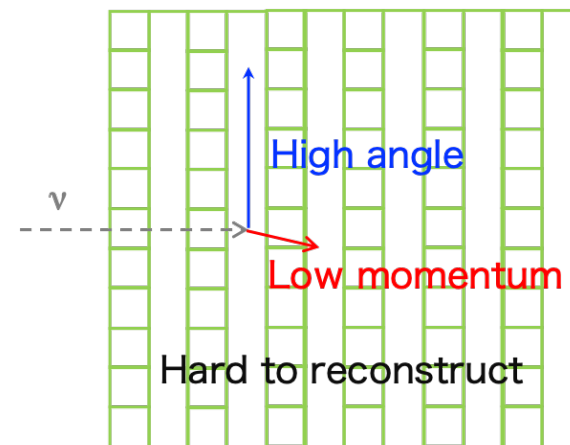
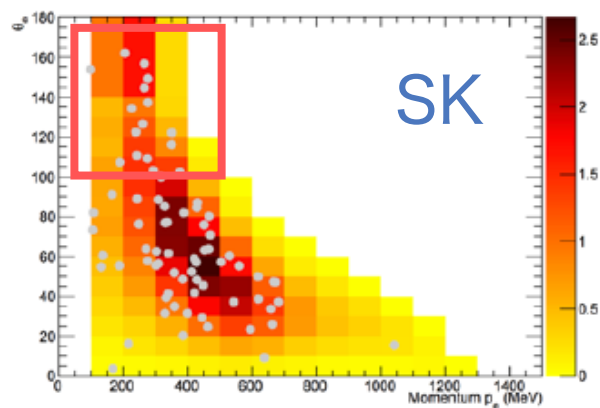
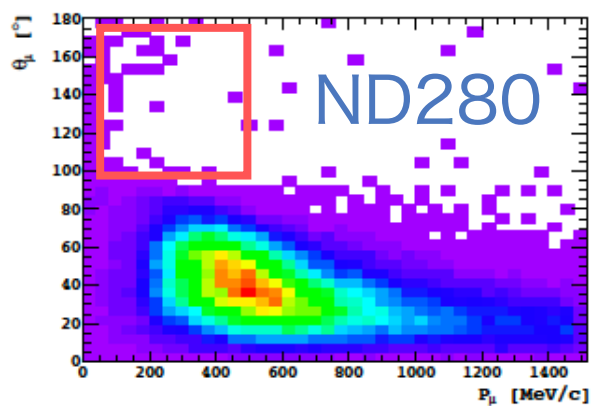
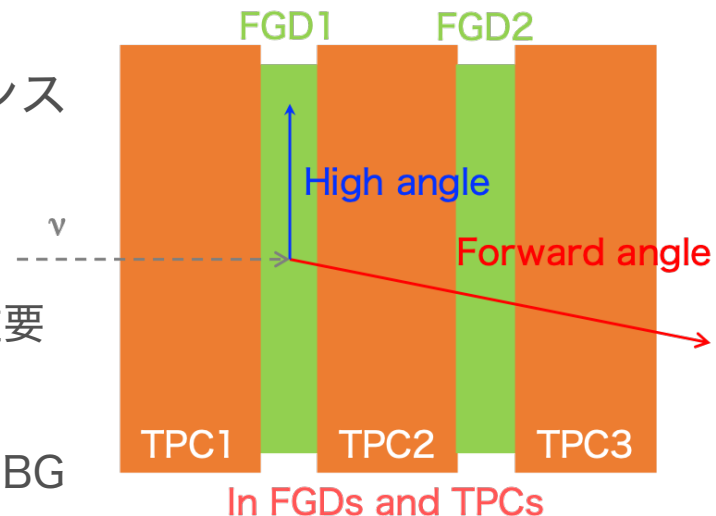
- **Fine Grained Detector (FGD)**
 - ニュートリノ標的かつ反応点近傍の飛跡検出器
 - 棒状シンチレータを縦横に並べた構造
- **Time Projection Chamber (TPC)**
 - FGDでの反応で生じた荷電粒子をトラック
 - 電荷・運動量の測定, dE/dx によるPID



前置検出器 ND280

◆ 問題点

- 大角度方向への散乱粒子に対する低アクセプタンス
 - SKは全角度方向にアクセプタンス, 系統誤差の要因
- 低運動量のハドロンの検出効率の低さ
 - ニュートリノ反応の区別・エネルギー再構成の際に重要
- 電子ニュートリノ反応の検出効率の低さ
 - γ と電子の識別の困難, 振動前の ν_e 混入は振動解析のBG



ND280とSKでの運動量角度分布

前置検出器アップグレード

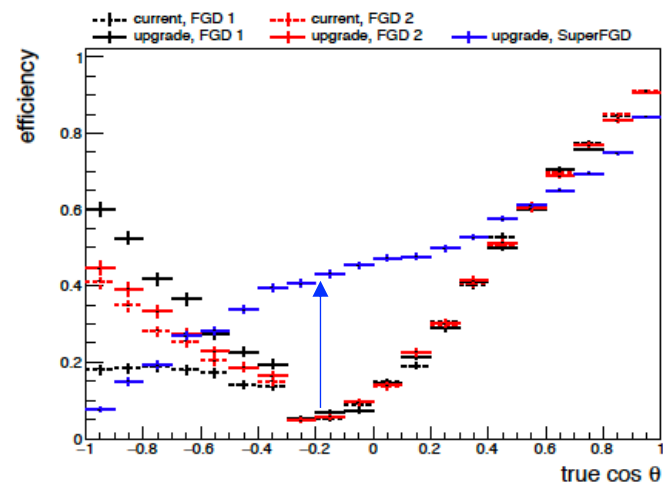
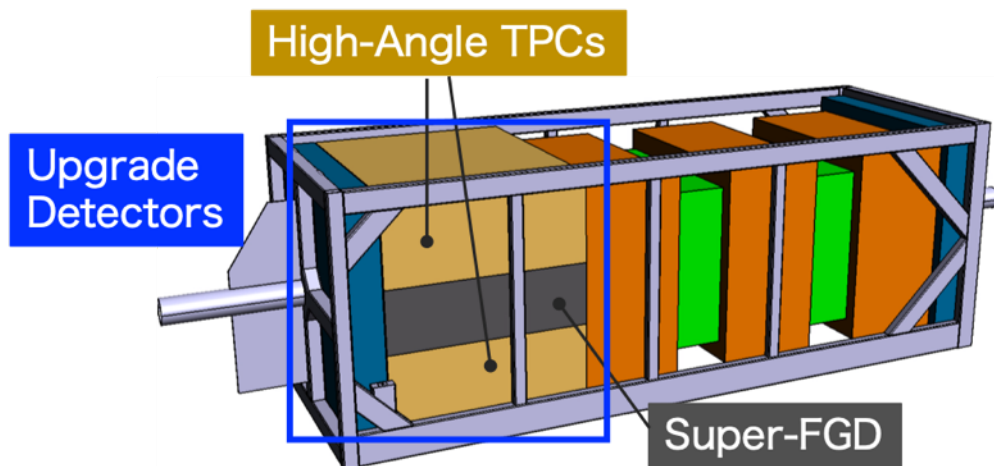
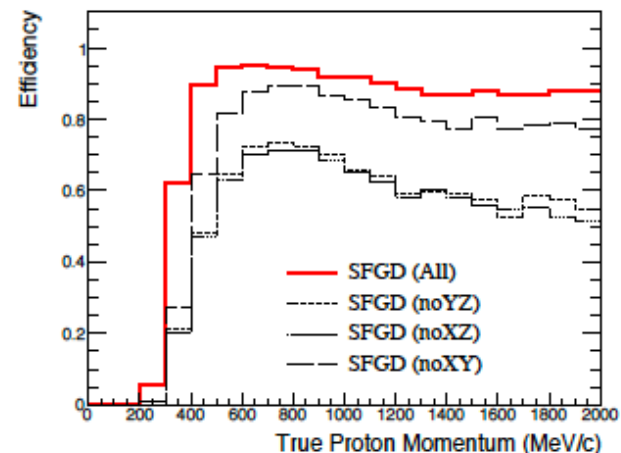
◆ 上流側の検出器を新しいトラッカー群にアップグレード

● Super-FGD

- 新たなニュートリノ標的・反応点近傍のトラッカー
- 1cm^3 のシンチレータキューブを約200万個並べた構造

● High-Angle TPC

- Super-FGDの上下にTPCを設置
- Super-FGDで高角度に散乱された荷電粒子をトラック



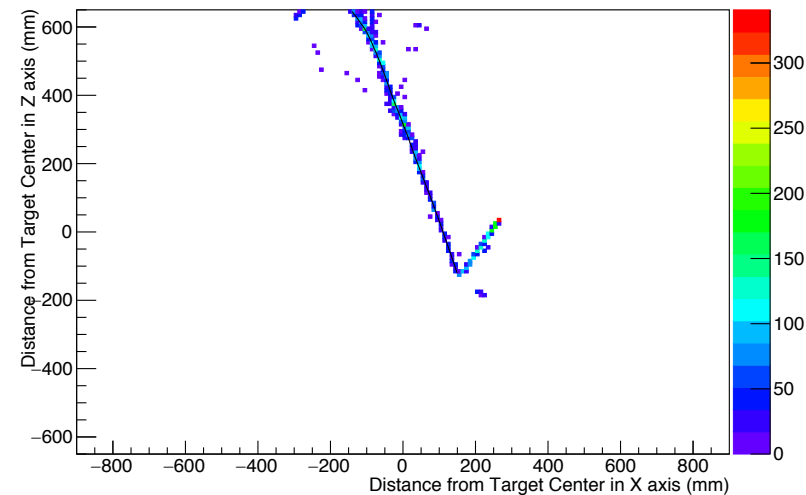
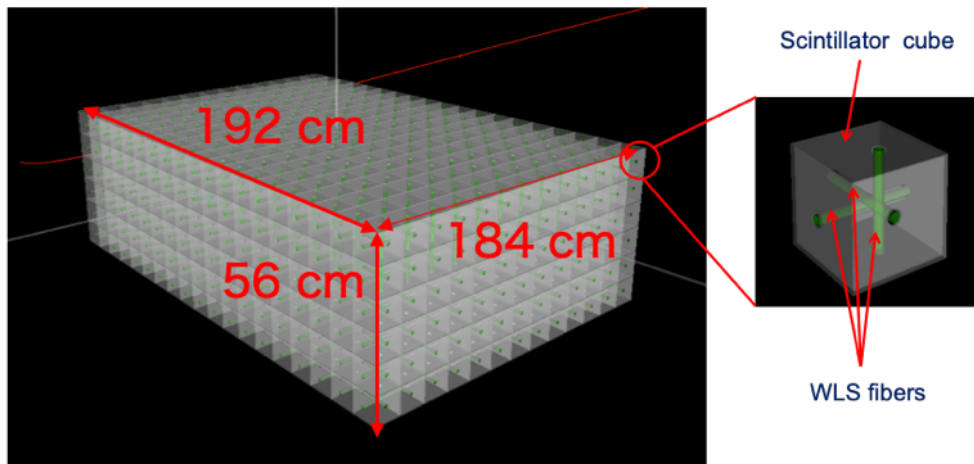
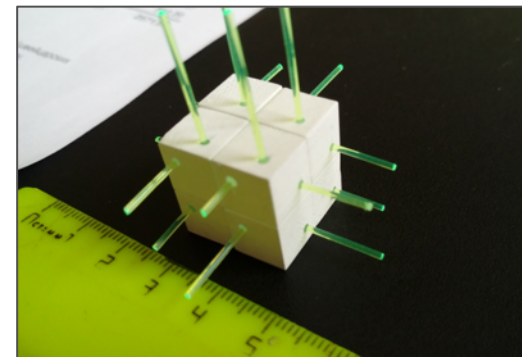
Super-FGD

◆ 概要

- 1cm³のシンチレータキューブを約200万個並べた構造(総重量 ~2ton)
- キューブからの光を三方向の波長変換ファイバーで読み出し
- ファイバーで読み出した光を約6万個のMPPCで検出

◆ 期待される性能

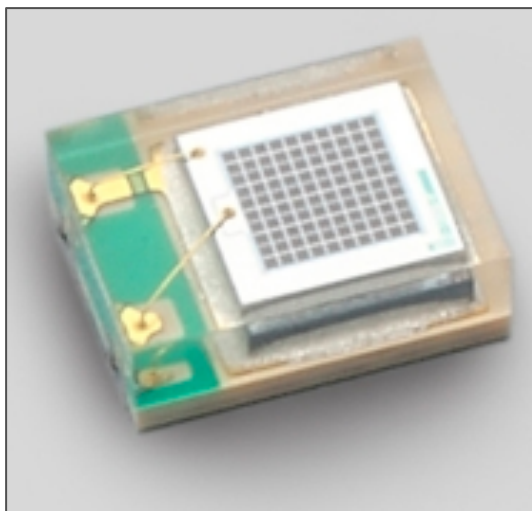
- 低運動量粒子の短いトラックの検出効率の向上
- あらゆる角度に散乱される粒子を検出可能



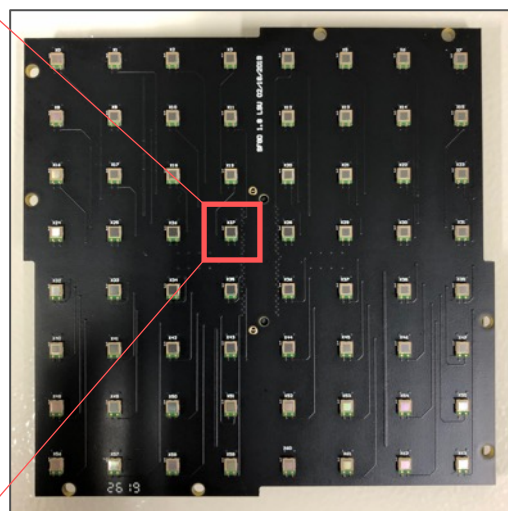
MPPC in Super-FGD

◆ 概要

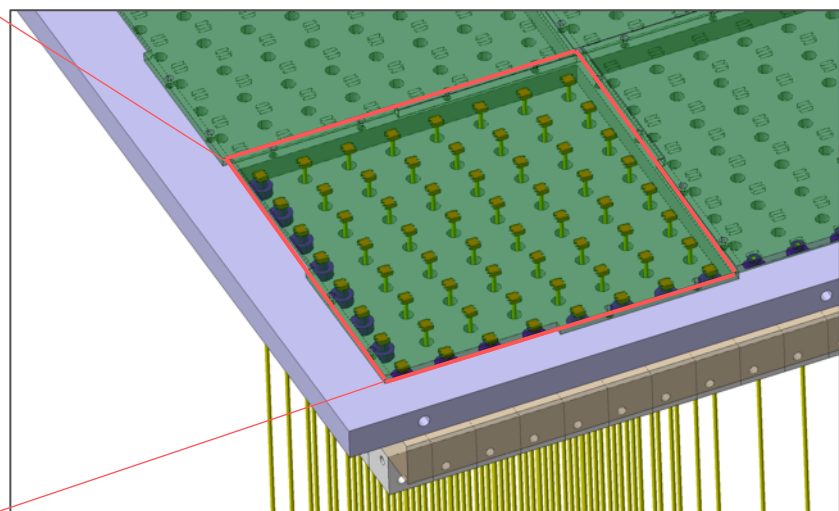
- 型番：S13360-1325PE (表面実装タイプ)
- 受光面： $1.3 \times 1.3 \text{mm}^2$
- ピクセル幅 (ピクセル数)： $25 \mu\text{m}$ (2,668)
- 狭いスペースに配置するため64個のMPPCをPCBに実装
- ファイバーとMPPCの位置が合うようにPCBを固定
- 全56,384個のMPPC(881PCB)を用いる→インストール前の特性試験



MPPC



64MPPC-PCB



MPPC connected to fiber

MPPC大量試験

◆ 目的

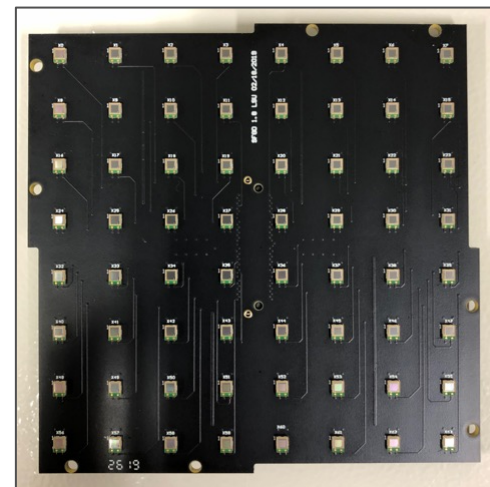
- 全てのMPPC・PCBが正常に動作することを確認
- 測定結果をキャリブレーションの際の参照値として利用
- Super-FGDに用いるMPPCの特性の理解

◆ 測定項目

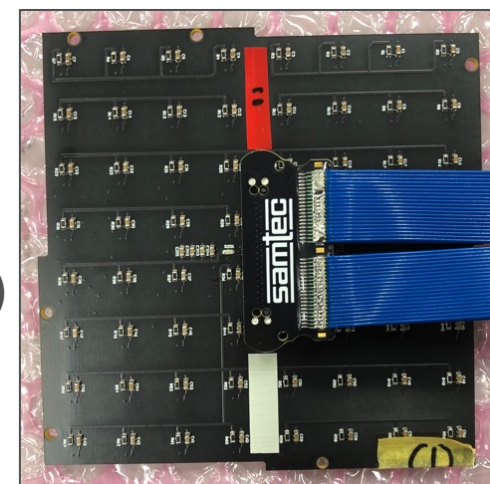
- Gain, Capacitance, Breakdown voltage, PDE
- Noise rate, Crosstalk probability
- サンプル試験として温度依存性の測定を行う

◆ その他

- 日本で試験するのは日本調達分50,688MPPC(792PCB)
- 残りの10kほどはU.S.が試験を行う→クロスチェック



MPPC side

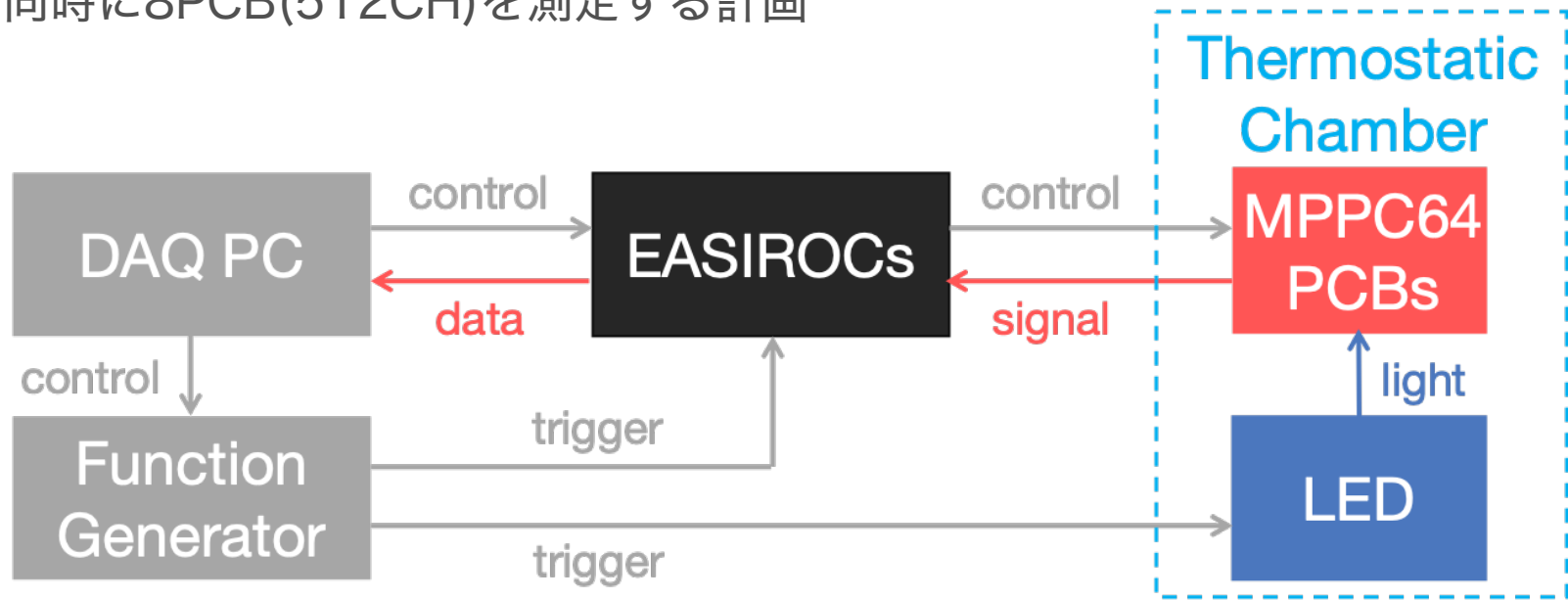


Connector + RC side

MPPC大量試験

◆ 試験システムの概要

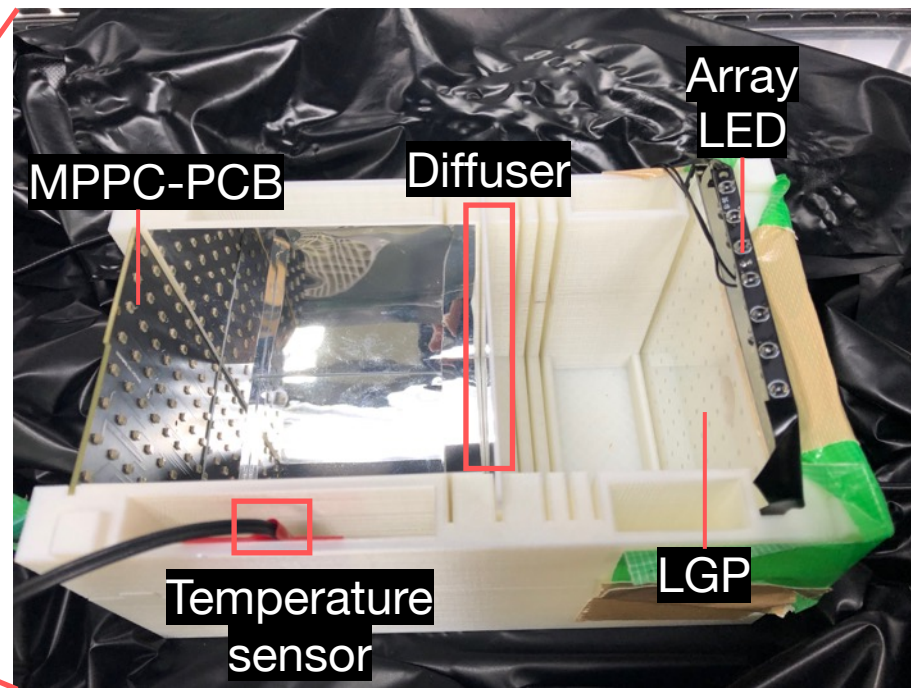
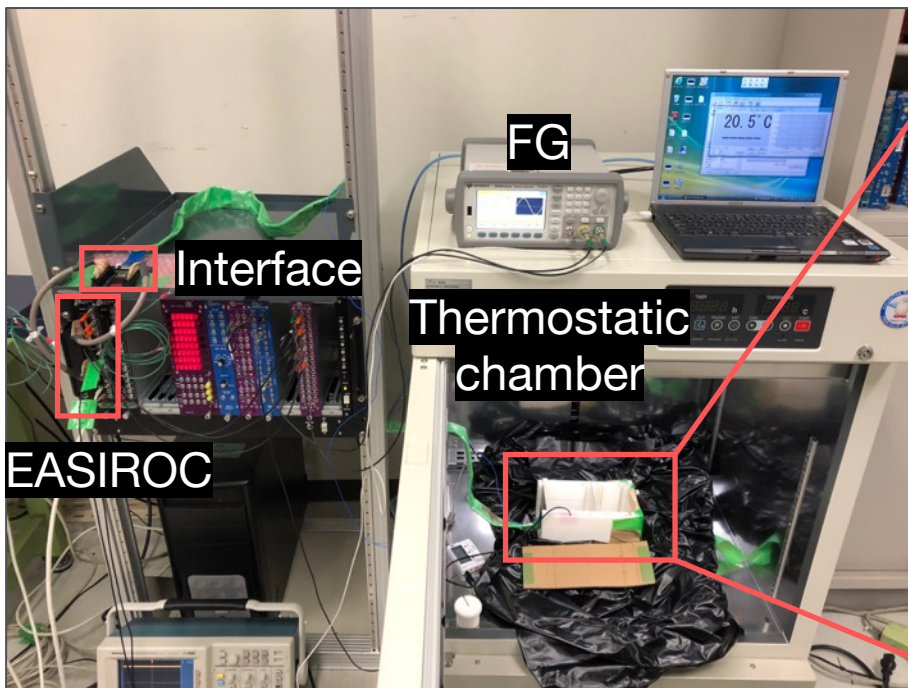
- DAQ PCによって測定の制御とデータの収集
- 読み出しエレクトロニクスとしてはEASIROCを利用
- ゲイン及びPDEの測定のためにLED光を入射するシステムが必要
- 全ての測定は恒温槽内で行う($\sim 20^{\circ}\text{C}$)
- 同時に8PCB(512CH)を測定する計画



MPPC大量試験

◆ 開発中のシステム

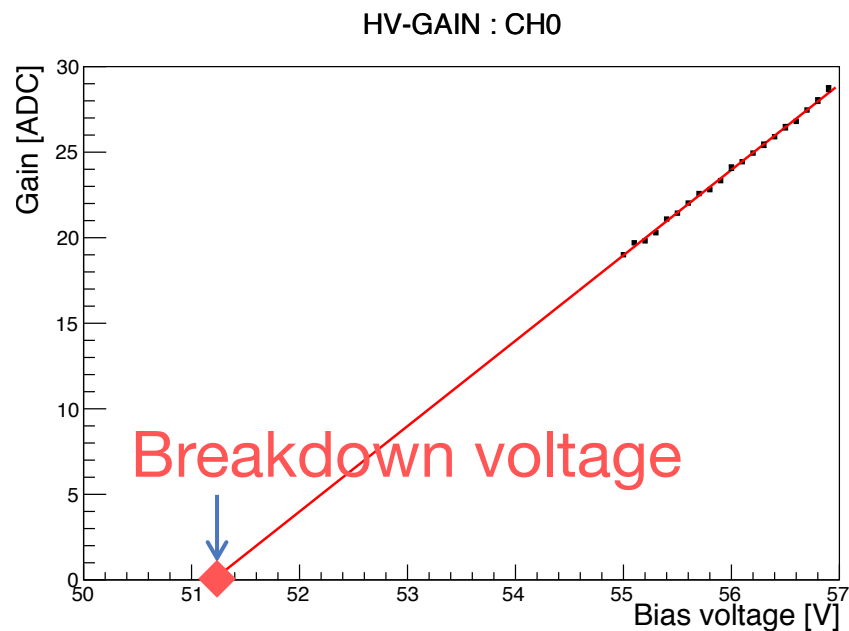
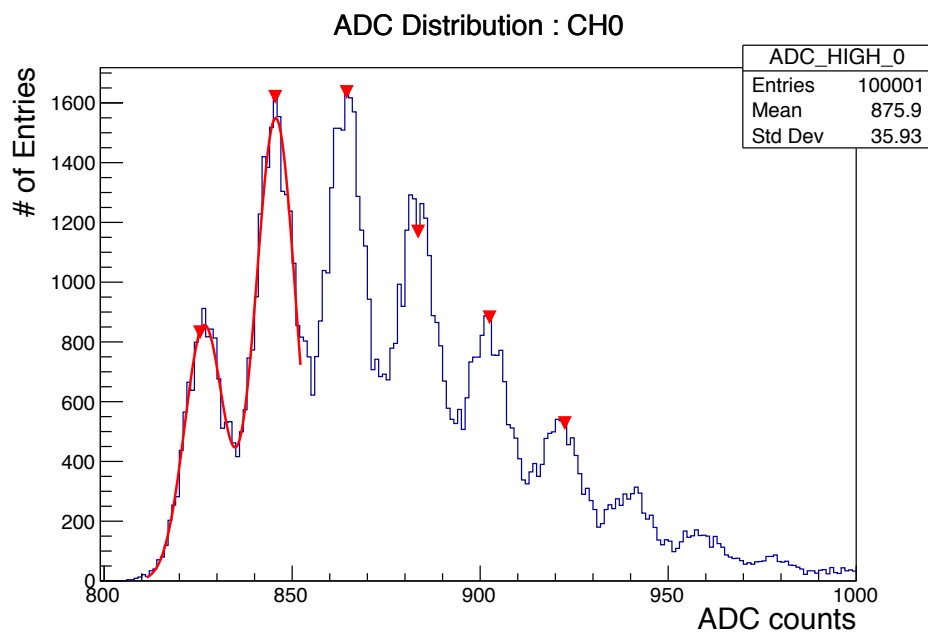
- 最初に1PCBを測定するシステムを開発 (現在, 並列化に向けて準備中)
- 光源はアレイLED+導光板, 光量一様性の向上のため拡散板やミラーを用いる
- 恒温槽内の温度は温度センサでモニター
- DAQ PCによってLEDのON/OFFや電圧変化など測定の自動制御が可能



テスト測定結果

◆ GainとBreakdown voltage

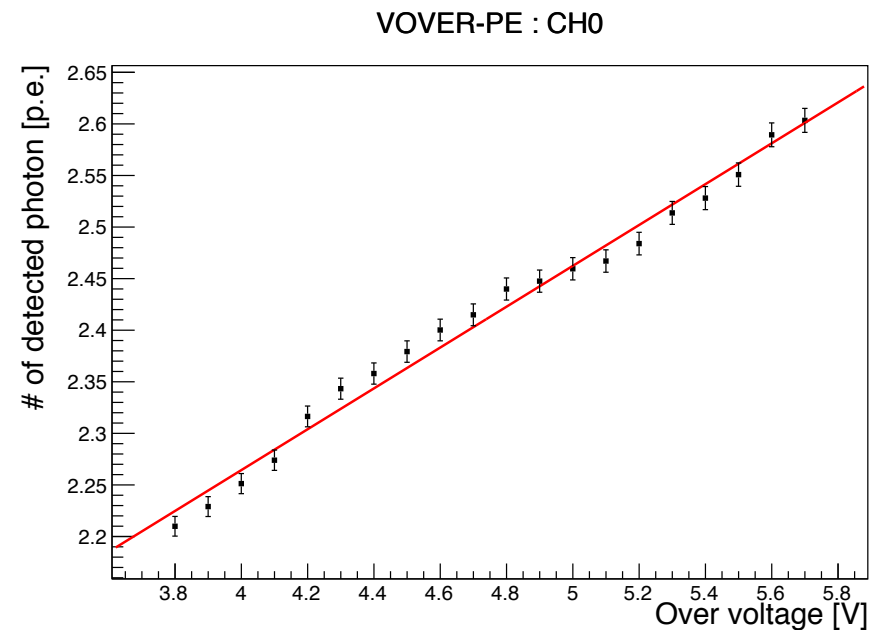
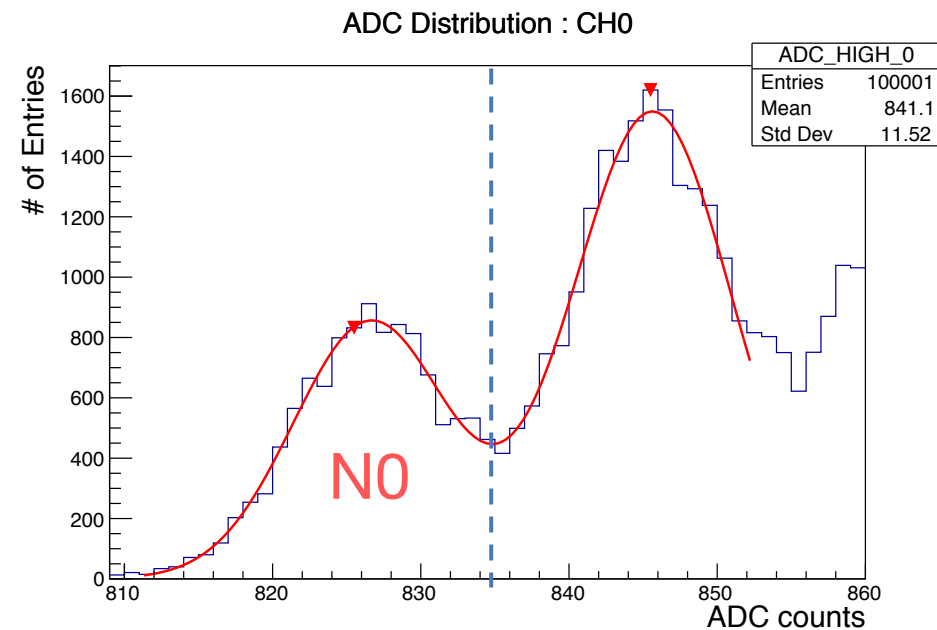
- LED ON のときのADC分布より算出
- Gainは0p.e.と1p.e.のピーク差[ADC]として定義
- Breakdown voltageはHV-GainグラフのX切片として定義
- Breakdown voltage基準の電圧をOver voltage ΔV で表す



テスト測定結果

◆ 検出光子数

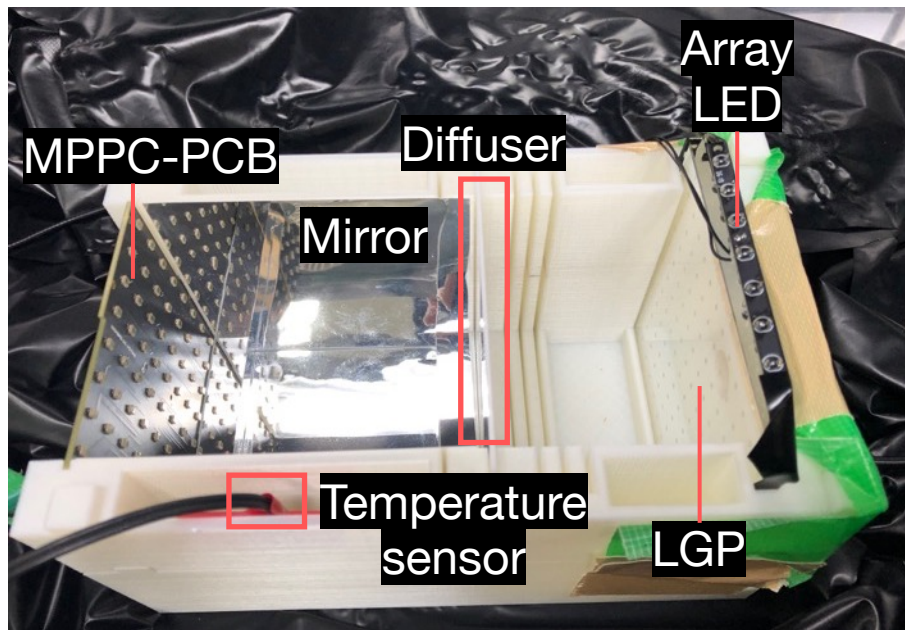
- LED ON のときのADC分布より算出
- ペDESTALの確率を $p_0 = \# \text{ of pedestal events} / \# \text{ of total events}$
- ポアソン分布を仮定すると検出光子数 $= -\log(p_0)$
- PDEを測定するためにモニターMPPCの導入を検討中



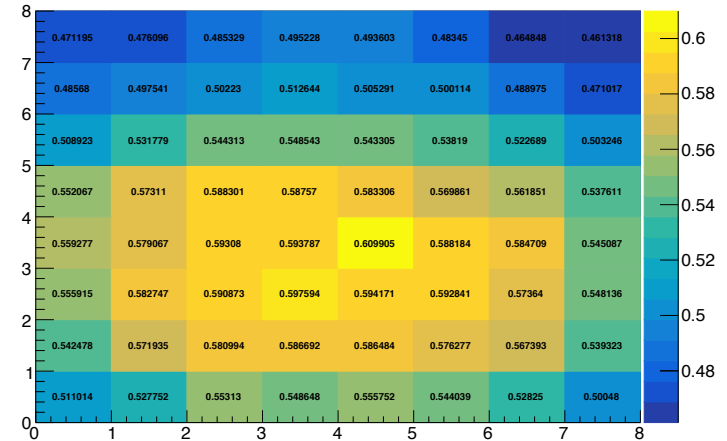
測定結果

◆ 光量一様性

- 光源はArray LEDとLGP
- 光量一様性を拡散板とミラーで改善
- 一様性は1.5%のレベル
- 光量モニタシステムによって光量安定性も確認する予定

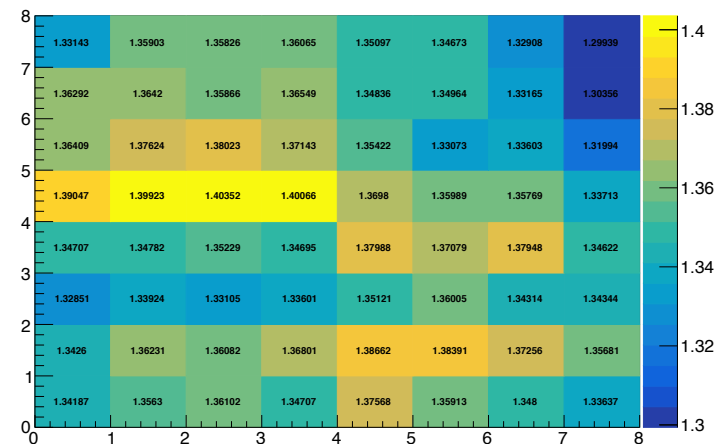


of P.E. 2D distribution @ VOVER = 5V



w/o mirror : uniformity 7.4%

of P.E. 2D distribution @ VOVER = 5V



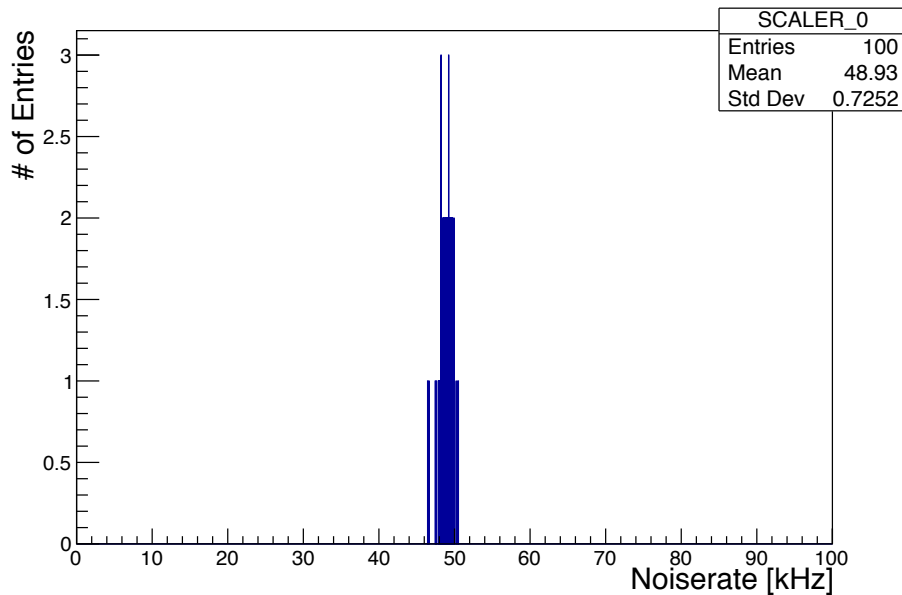
w/ mirror : uniformity 1.5%

テスト測定結果

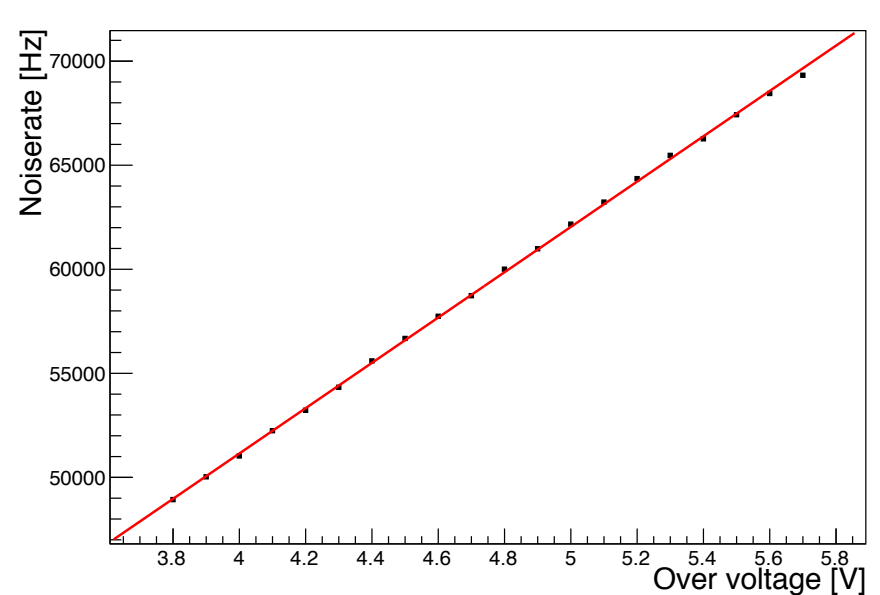
◆ Noise rate

- LED OFFのデータから算出
- EASIROCのSCALER機能で0.1secに一回Noise rateを算出し分布にする
- 20度のとき $\Delta V=5V$ で~50khz (現行ND280は $\Delta V=1.5V$ で~600khz)

Noiserate distribution : CH0



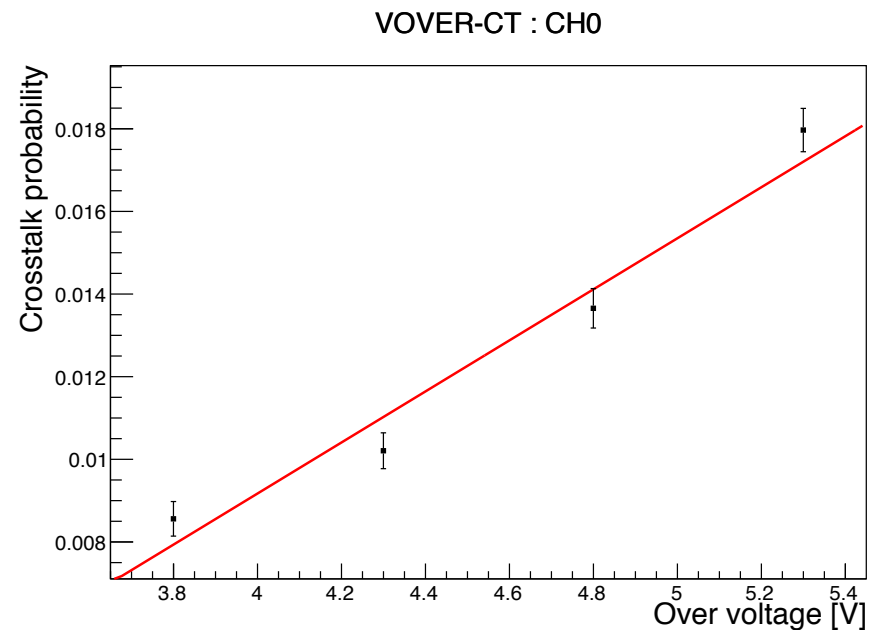
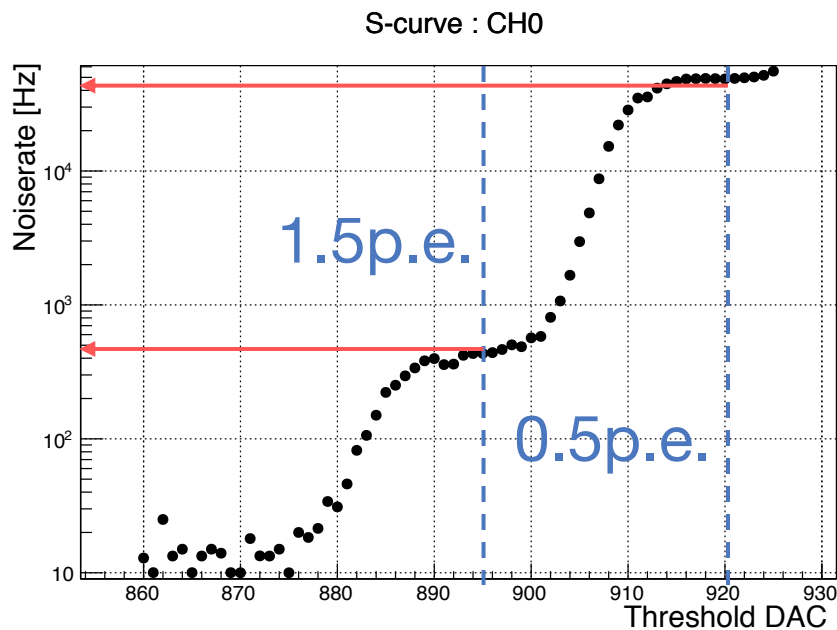
VOVER-NR : CH0



テスト測定結果

◆ Crosstalk probability

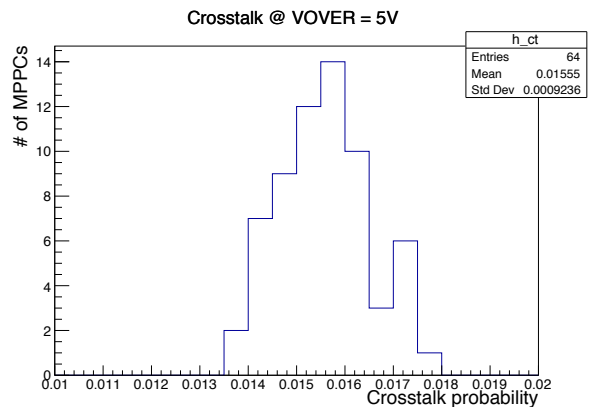
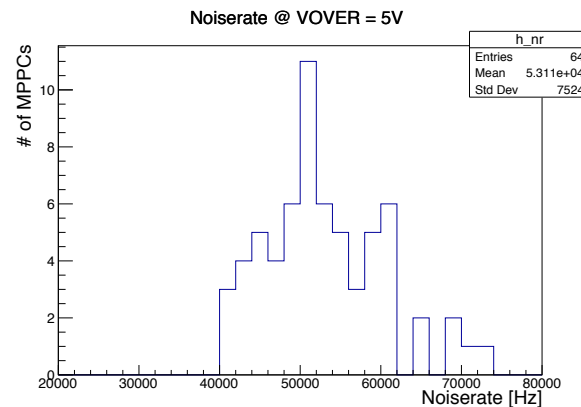
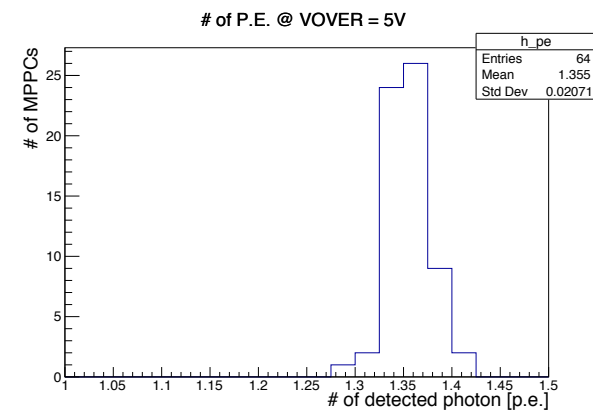
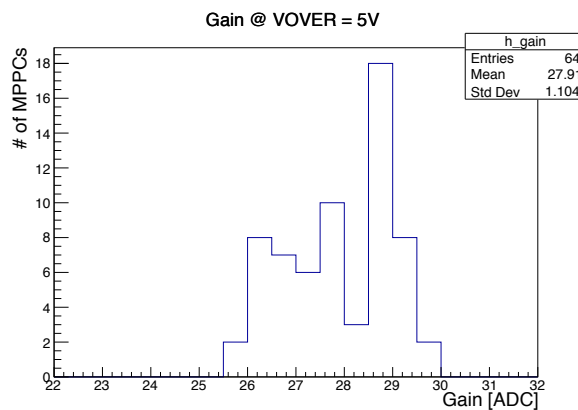
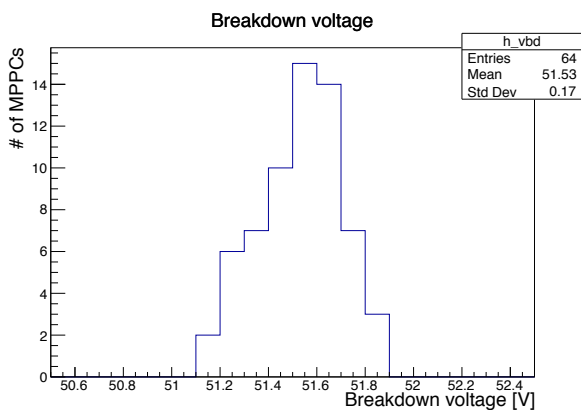
- LED OFFのときのデータから算出
- Thresholdを変えたときのNoise rateの変化を測定
- Crosstalk probability = 1.5p.e. noise rate / 0.5p.e. noise rate
- $\Delta V=5V$ で~1.5% (現行ND280は $\Delta V=1.5V$ で~15%)



テスト測定結果

◆ 64CHの特性分布

- 平均的な値は浜松のデータシート整合的
- バラツキは個体差+測定系のバラツキも含むと考えられる→キャリブレーション

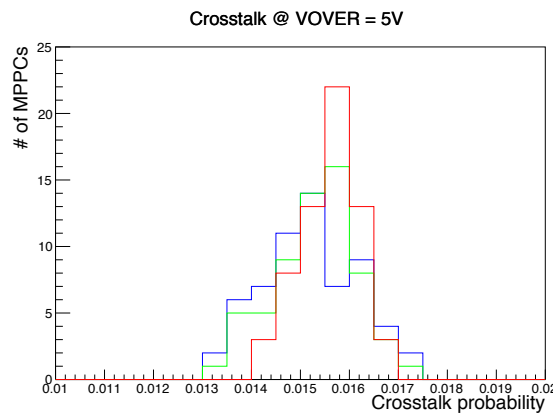
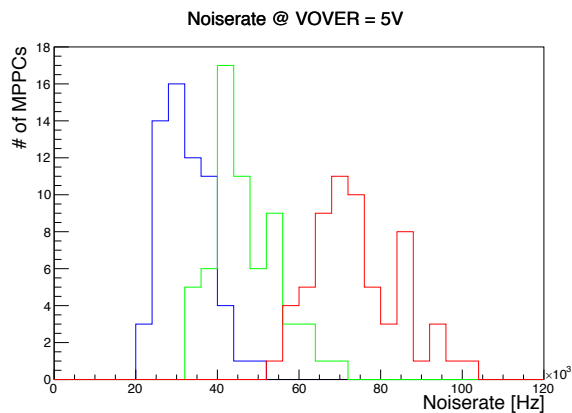
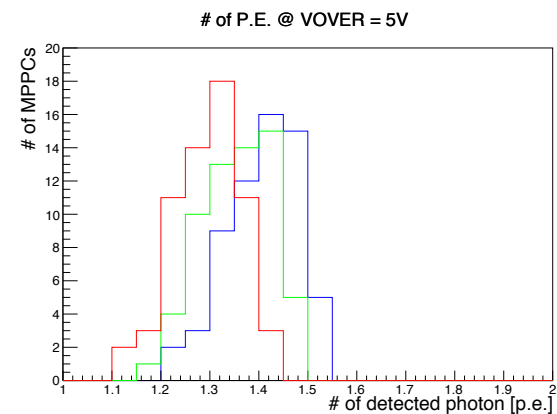
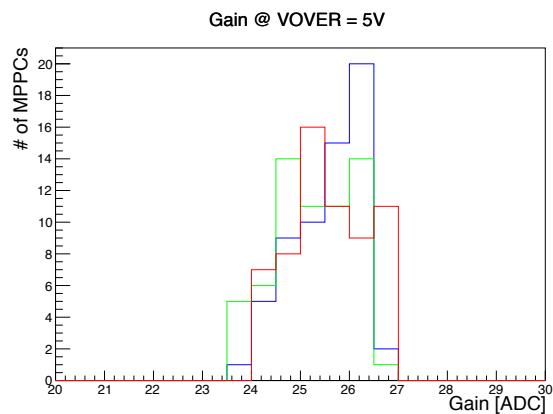
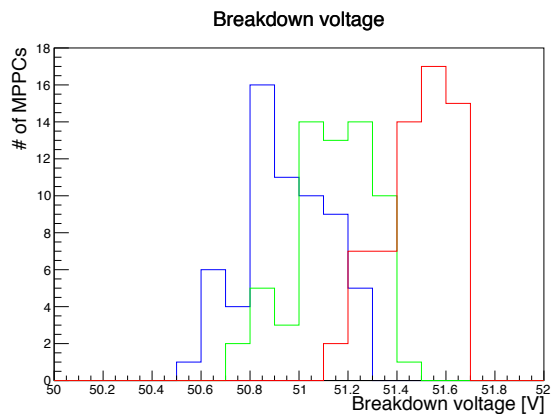


	Mean	Std Div	Ratio[%]
Vbr [V]	51.53	0.17	0.3
Gain [ADC]	27.91	1.1	3.9
# of p.e. [p.e.]	1.36	0.02	1.5
Noise rate [khz]	53	7	13.2
Crosstalk [%]	1.6	0.1	6.3

テスト測定結果

◆ 温度依存性

- VbdやNoise rateは温度とともに上昇(知られてる温度依存性と整合的)
- 大量試験時には温度依存性はサンプル試験を行う予定



15°C
20°C
25°C

スケジュール

◆ 試験期間

- 1回の測定時間は30分程度
- PCBの取り替えや温度の安定化の時間を考慮すると1サイクルに1時間程度
- 1度に8PCBを同時に測定し、1日6回測定すれば1日48PCBが測定可能
- 日本測定分792PCBを測定するのに大体20日程度かかる見積もり
- 温度依存性のサンプルテストやU.S.との測定のクロスチェックやシステムトラブルなどを想定して試験期間として3ヶ月くらいを想定(7~9月くらい?)

◆ 試験後

- データを解析し実機に応用できるように整理する
- 実機へのインストールは来年の4月～

Year	2019			2020									2021								
Month	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
MPPC production	■			■																	
PCB production							■														
Development of test system	■			■			■														
MPPC mass test										■											
preparation for integration													■								
Integration																■					

今後のシステム開発

◆ 複数PCB測定システムの開発

- 8PCBを同時に測定する予定, 複数EASIROCを同期しながら測定
- 必要になるもの(EASIROC, ケーブル, 追加の恒温槽など)を現在調達中

◆ LEDシステムの改良

- 光量の一様性・安定性の確認と向上
- 光量モニタシステムの準備

◆ EASIROCキャリブレーション

- 電圧・増幅率などのCHやモジュール間での差異を把握して校正
- 測定精度の見積もりを行う

◆ データ管理システム

- データを適切に管理・利用できるようなシステムを準備

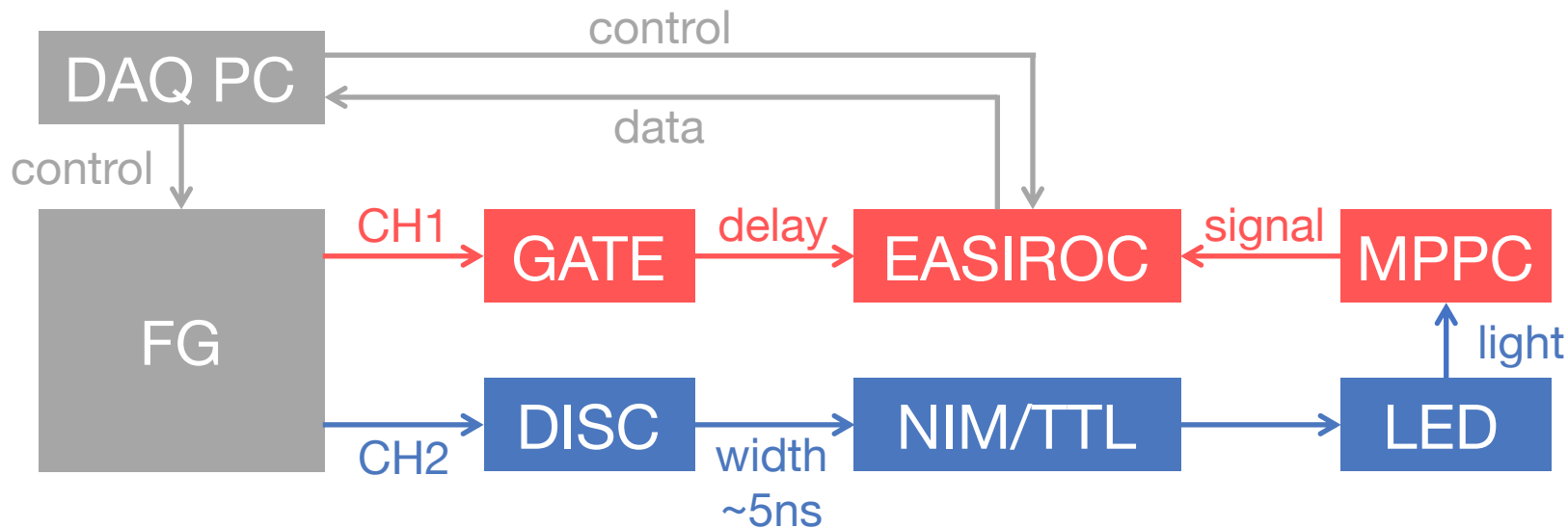
まとめ

- T2K実験では前置検出器のアップグレード計画が進行中
- ニュートリノ標的かつ飛跡検出器として新型シンチレータ検出器Super-FGDを研究開発
- Super-FGDに用いる56,384個のMPPCの特性試験を行う
- 試験システムの開発が現在進行中

Back up

Setup

● Diagram of digital signals



● Trigger mode

- ON **EASIROC(CH1) : 5kHz**
LED(CH2) : 5kHz } synchronized
- OFF **EASIROC(CH1) : 1kHz**
LED(CH2) : OFF

Setup

● Measurement mode

- ON : TRIG ON / 100,000evts / 20voltage
- Noise rate : TRIG OFF / 10,000evts / 20voltage
- S-curve : TRIG OFF / 1000evts / ~80DAC / 4voltage

● EASIROC configuration

- Capacitor HG : 100fF
- Time Constant HG Shaper : 50ns
- Threshold DAC code : 920(CHIP1), 880(CHIP2) (except S-curve)
- Trigger Pattern : OneCh0
- Input DAC : 511

※ 2MPPCs are not measured due to interface's misconnection problem

Measurement time

- measurement time per run
 - ON : 434s
 - Noise rate : 270s
 - S-curve : 704s
 - Total : 1408s = **23min 28 sec**

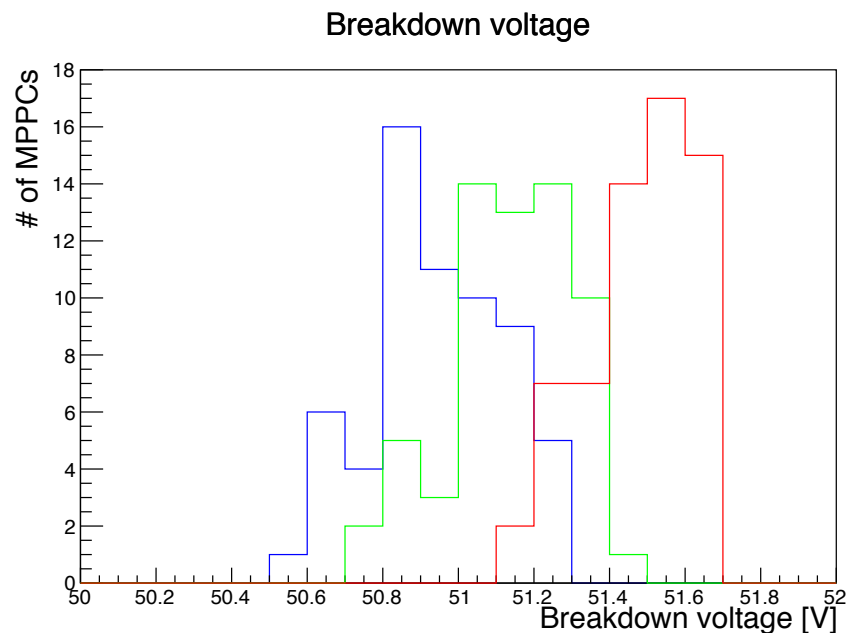
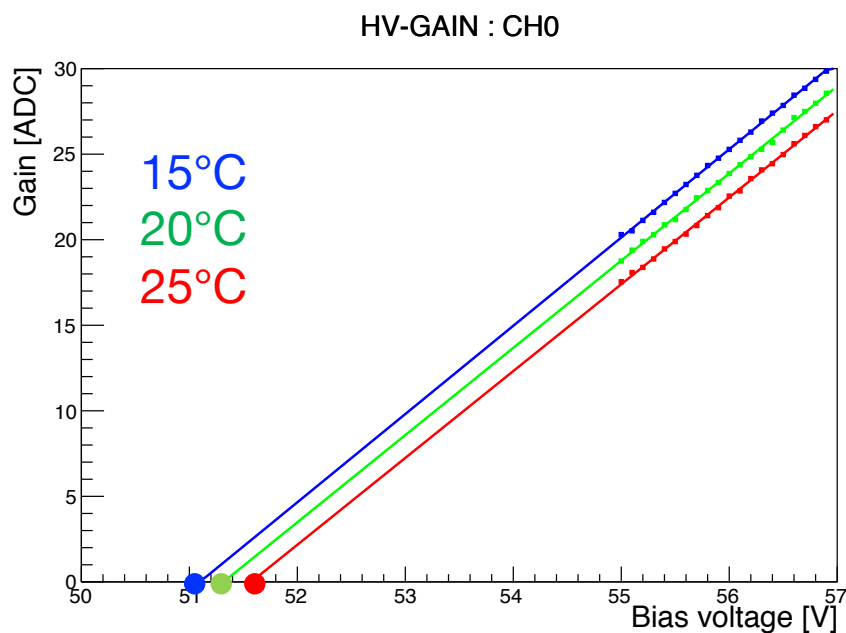
	ON	Noiserate	S-curve	Total	
Events	100,000	10,000	1,000		
Trig [khz]	5	1	1		
Time / Point [s]	20	10	1		
+ Lag ~2s	22	12	3		
Points / Voltage	1	1	75		
Time / Voltage [s]	22	12	225		
Voltage Points	20	20	4		
Time / PCB [s]	440	240	900	1580	estimated
Time / PCB [s]	434	270	704	1408	measured

Breakdown voltage

● Temperature dependence of V-bd

- Left figure shows Gain as a function of Bias voltage
- Gain decrease by 5% as temperature increase by 5°C at same V-bias
- Right figures shows V-bd distribution of 62 MPPCs
- Mean of V-bd in each temperature is

15°C : 50.9 V 20°C : 51.2 V 25°C : 51.5 V

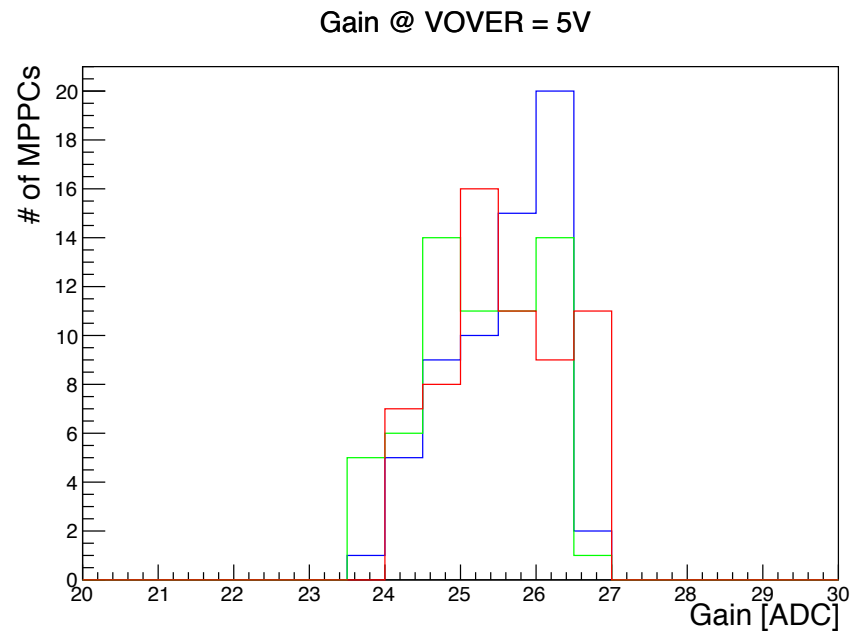
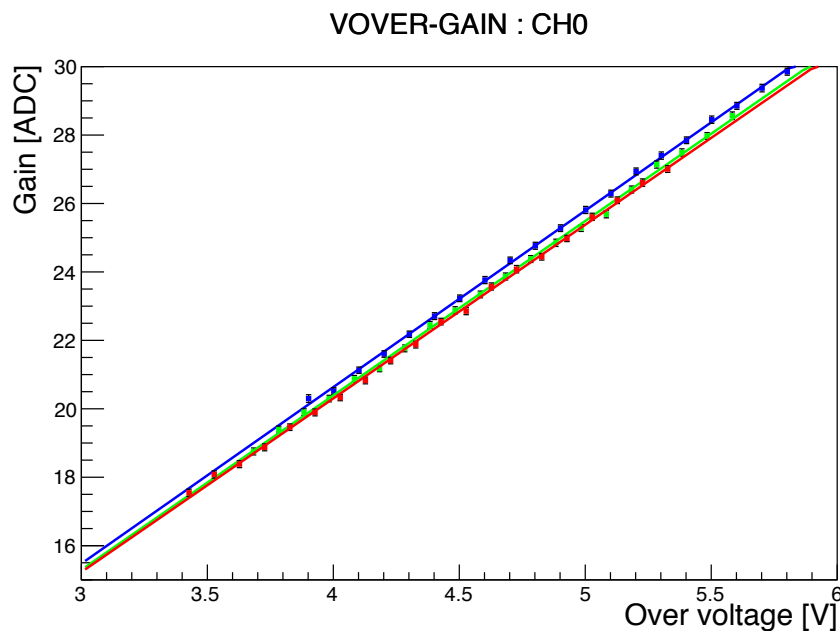


Gain

● Temperature dependence of Gain

- Left figure shows Gain as a function of over voltage
- Right figure shows Gain distribution at 5V over voltage
- Mean of Gain in each temperature is

15°C : 25.6 ADC 20°C : 25.3 ADC 25°C : 25.6 ADC

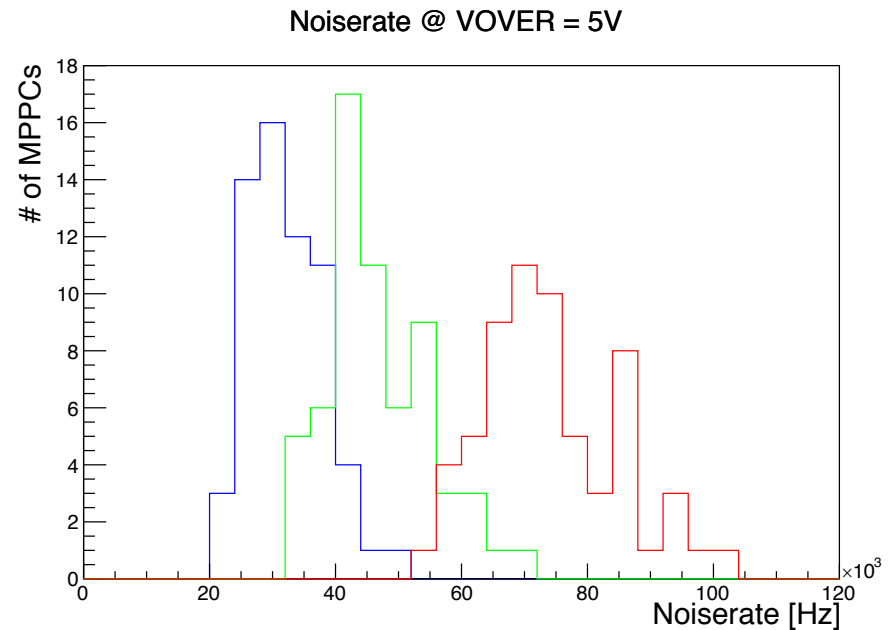
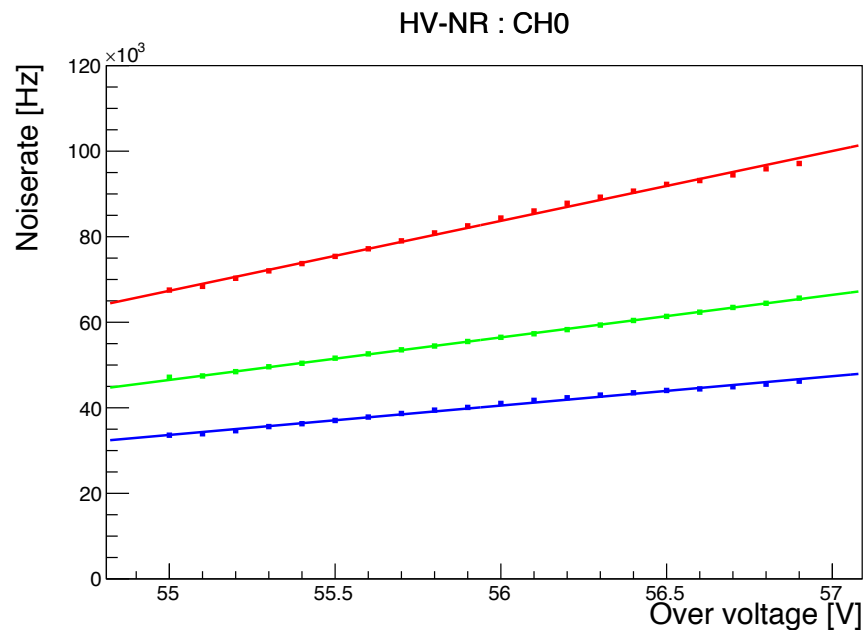


Noise rate

● Temperature dependence of Noise rate

- Left figure shows Noise rate as a function of over voltage
- Right figure shows Noise rate distribution of 5V over voltage
- Mean of Noise rate in each temperature is

15°C : 32 kHz 20°C : 47 kHz 25°C : 74 kHz



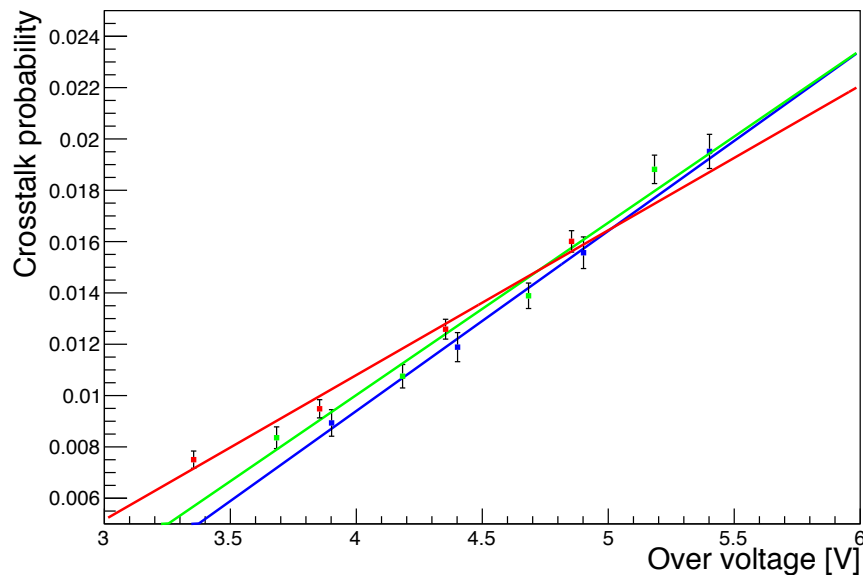
Crosstalk probability

● Temperature dependence of Crosstalk probability

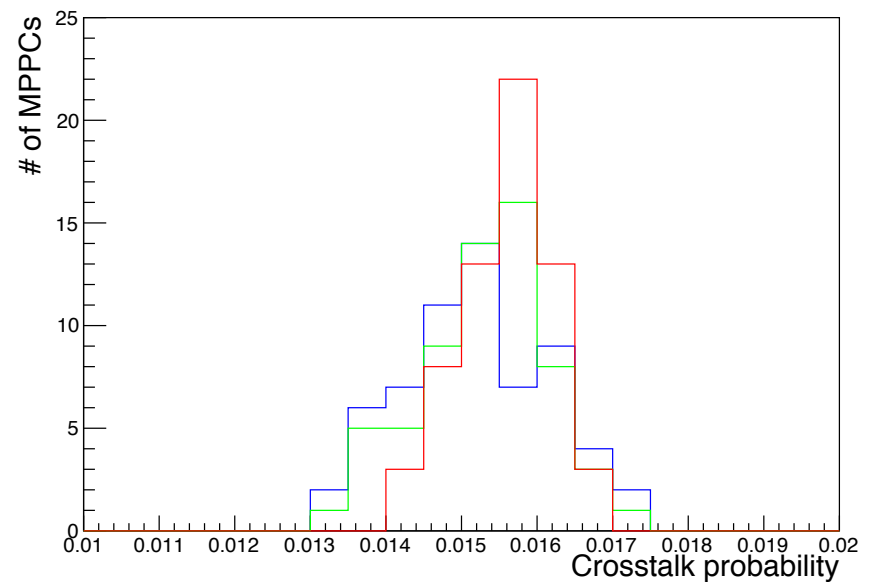
- Left figure shows Crosstalk probability as a function of over voltage
- Right figure shows Crosstalk distribution at 5V over voltage
- Mean of Crosstalk probability in each temperature is

15°C : 1.5% 20°C : 1.5% 25°C : 1.6%

VOVER-CT : CH0



Crosstalk @ VOVER = 5V



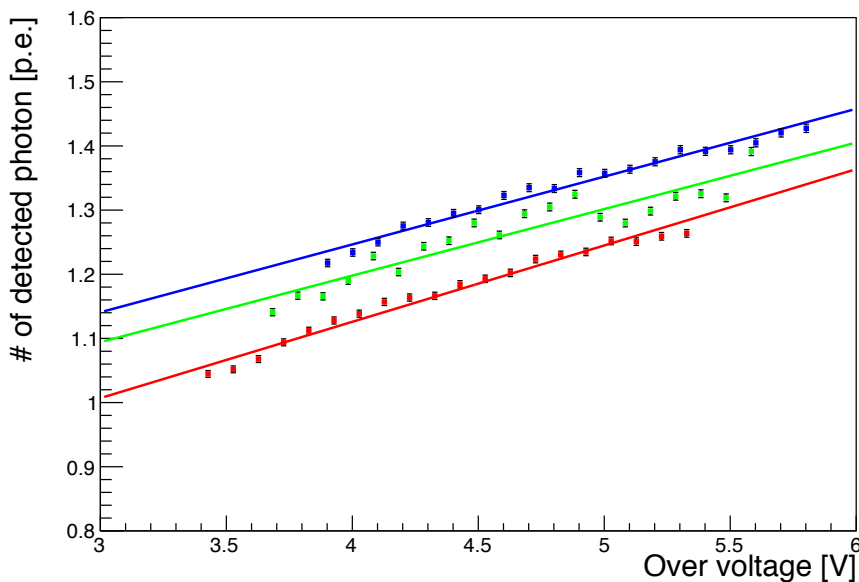
Number of detected photon

● Temperature dependence of # of P.E.

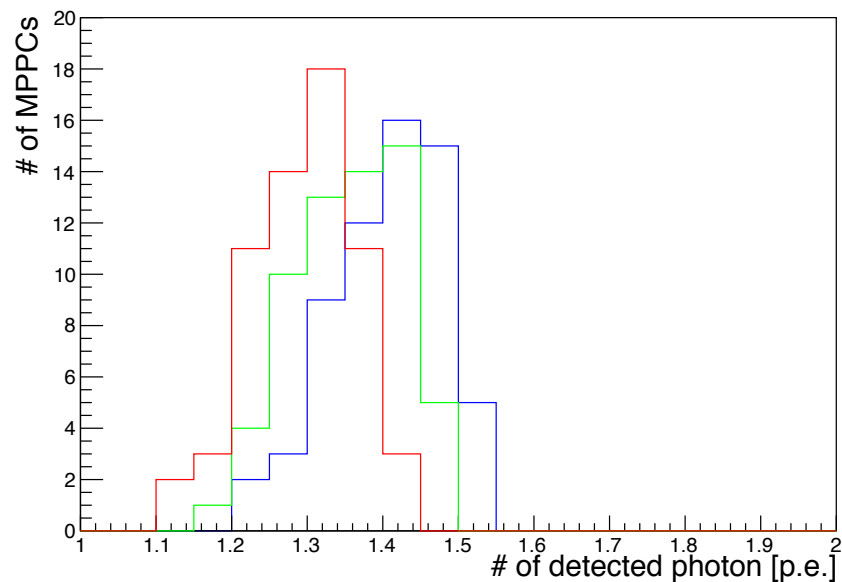
- Left figure shows # of P.E. as a function of over voltage
- Right figure shows # of P.E. distribution of 5V over voltage
- Mean of # of P.E. in each temperature is

15°C : 1.41 p.e. 20°C : 1.35 p.e. 25°C : 1.30 p.e.

VOVER-PE : CH0



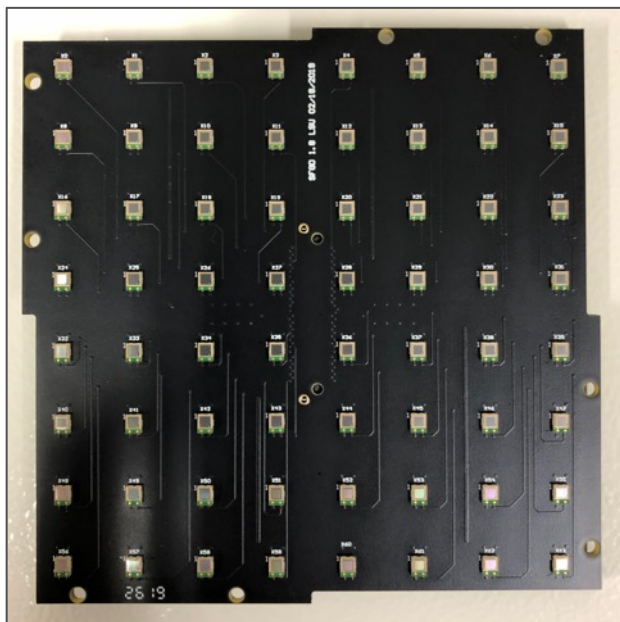
of P.E. @ VOVER = 5V



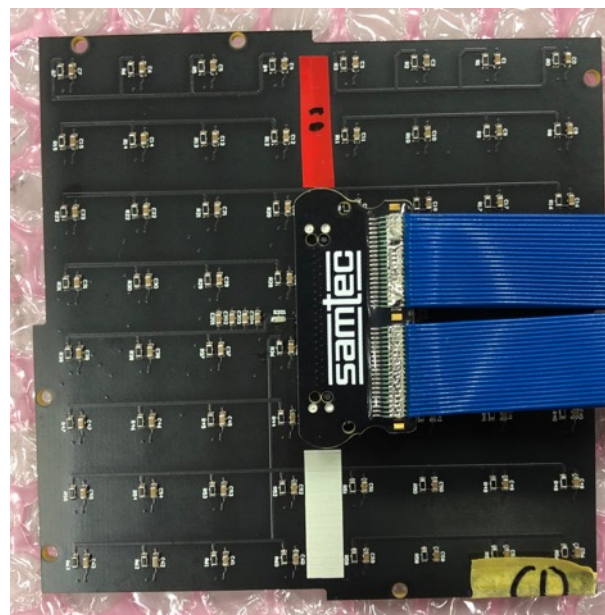
MPPC64-PCB prototype

◆ Overview

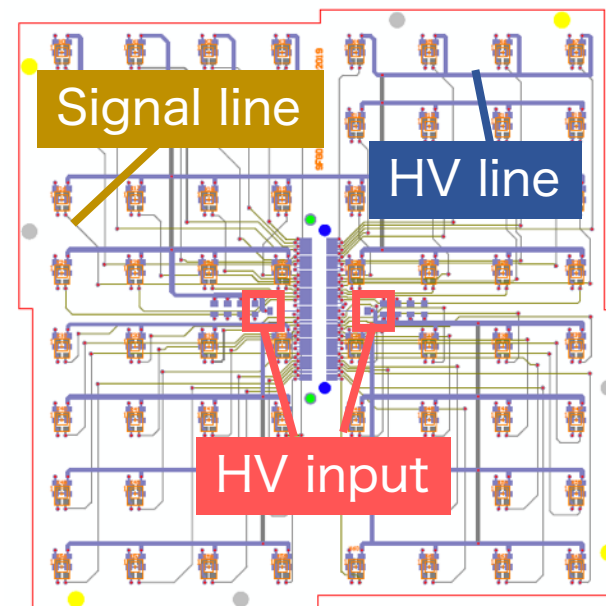
- Every 64 MPPC will be mounted on PCB for Super-FGD
- We produced MPPC64-PCB prototype designed by LSU
- Resistor and capacitor are mounted as low-pass filter
- HV and signal lines are connected to cable by samtec 80 pin connector



MPPC side



Connector + RC side



Lines

MPPC64-PCB prototype

◆ Comparison of the results

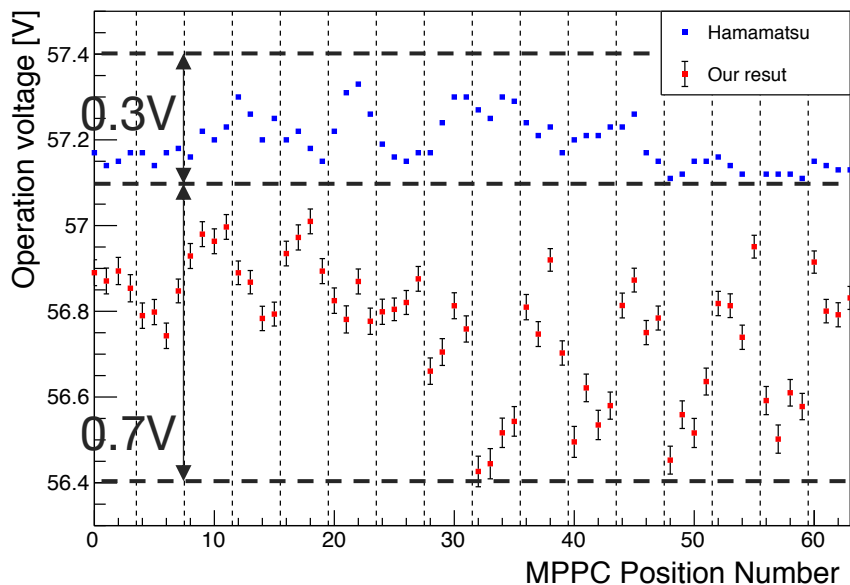
- There are some differences :

1. Our Vop is **0.1~0.9V** lower than Vop measured by Hamamatsu
2. Variation of our Vop is about **two times** as big as that of Hamamatsu Vop

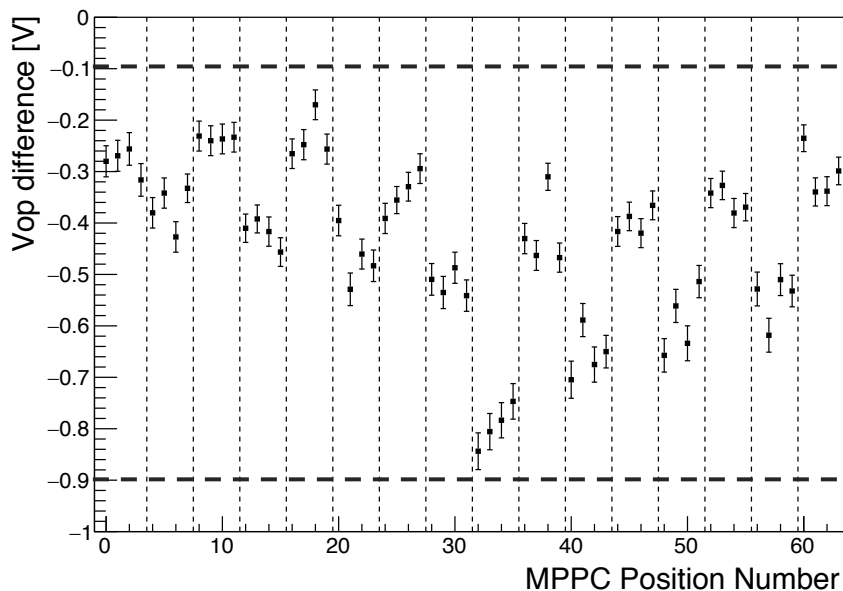
- To clarify the difference plot **Vop difference** (Our result – Hamamatsu)

- Need to understand the behavior

Operation voltage : PCB1



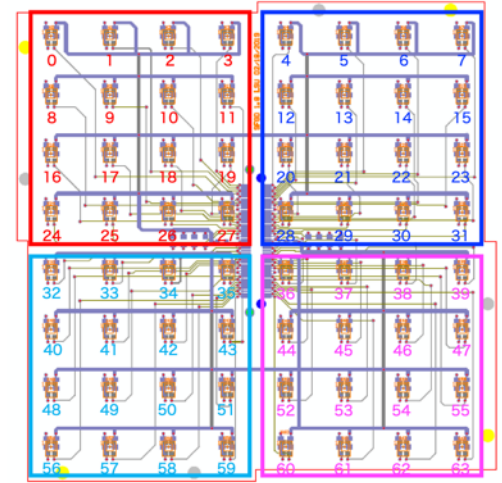
Operation voltage difference : PCB1



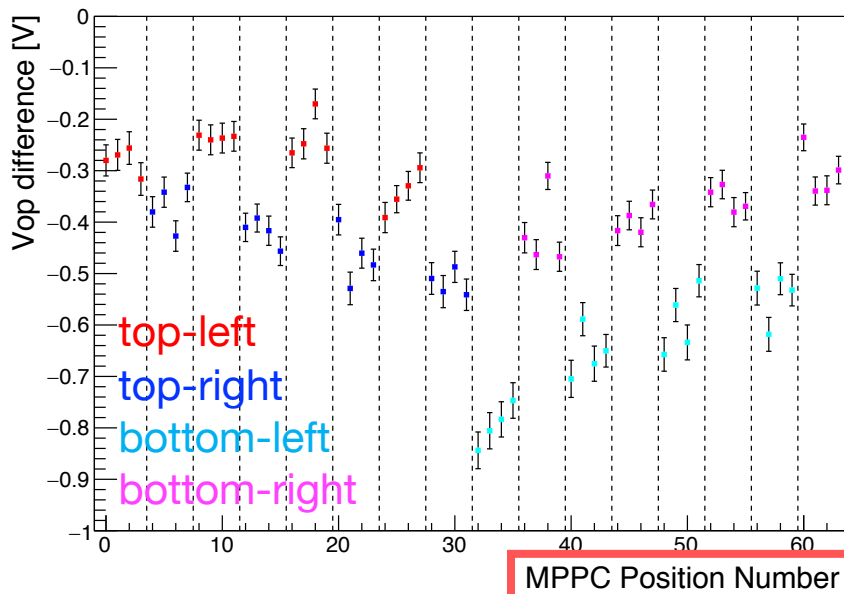
MPPC64-PCB prototype

◆ Dependence on MPPC position at PCB ?

- Last time I reported Vop seems dependent on **MPPC's position at PCB** (lower left figure)
- Lower right figure shows it is more natural to think Vop is dependent on **EASIROC channel**
- Vop difference in each 32CH **decreases** as CH# increase
- Need to investigate possible cause



Operation voltage difference : PCB1



Operation voltage difference : PCB1

