

ニュートリノ検出器WAGASCIにおける 信号読出しシステム開発の現状

大阪市立大学大学院

M2 東 佑真,

第7回高エネルギー 春の学校

2017年 5月20日

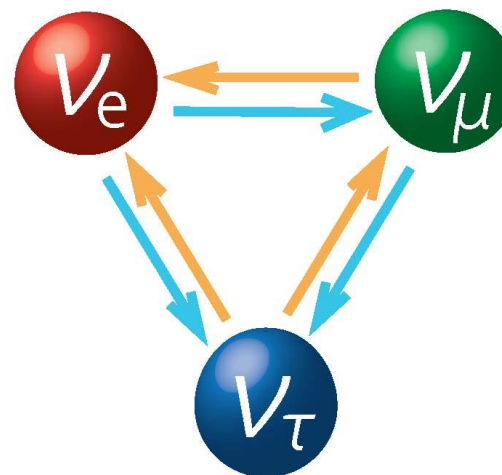
Contents

1. イントロダクション
 - A) ニュートリノについて
 - B) T2K実験
 - C) WAGASCI
 - D) WAGASCI DAQ
2. エレクトロニクス
 - A) 概要
 - B) Set up
 - C) 試験
3. まとめと今後

ニュートリノ

- ニュートリノ
 - 電荷を持たない
 - 弱い相互作用をする
 - ニュートリノの質量は0と考えられていた
- ニュートリノ振動
 - 別の種類のニュートリノに変化してる
 - 質量が存在しないと起こらない現象
- 標準理論では見られない

	第一世代(first)	第二世代(second)	第三世代(third)
LEPTON	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
	電子	ミューオン	タウ
QUARK	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム

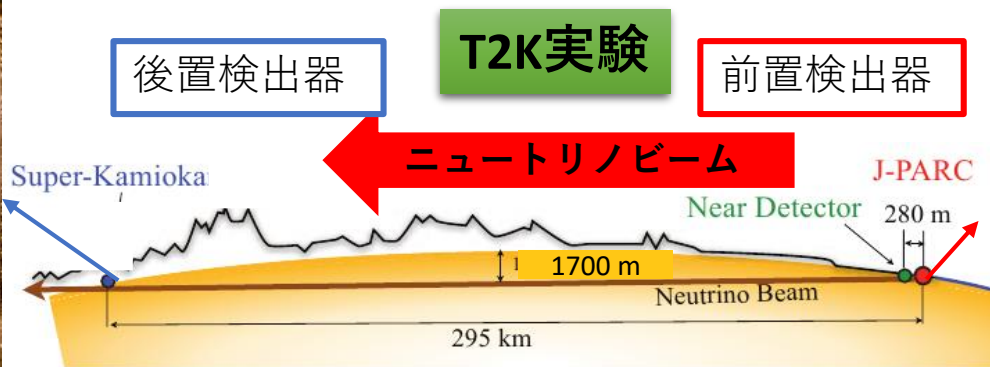
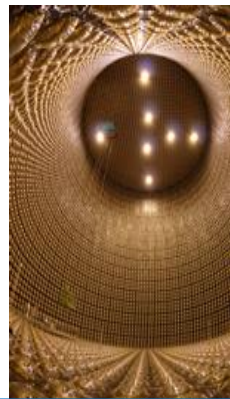


T2K実験

- 茨城県東海村J-PARCで実験を行っている
- 長基線ニュートリノ振動実験による

目的

ニュートリノ振動パラメータの精密測定
CP対称性の破れの探索



スーパーカミオカンデ

- 水標的
- 4π アクセプタンス

ND280

- プラスチック標的 (一部水標的)
- 前方散乱

これらの違いによるニュートリノ反応における不定性が
系統誤差の要因となっている

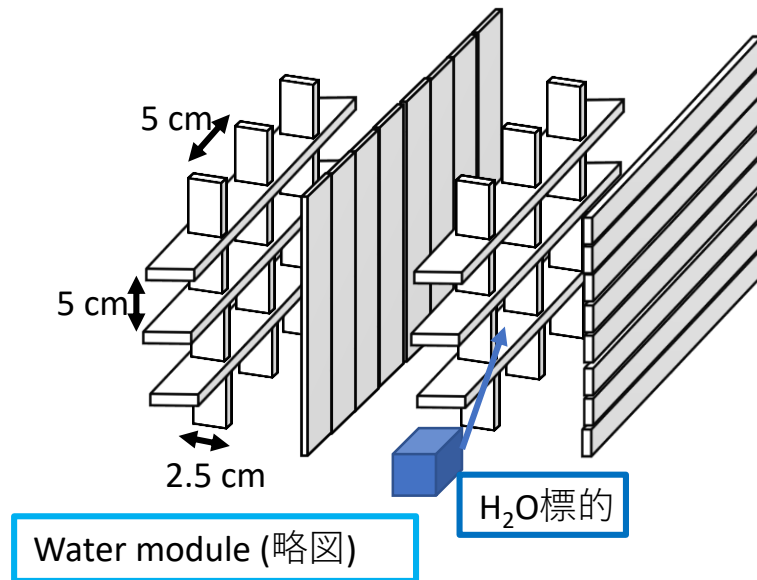
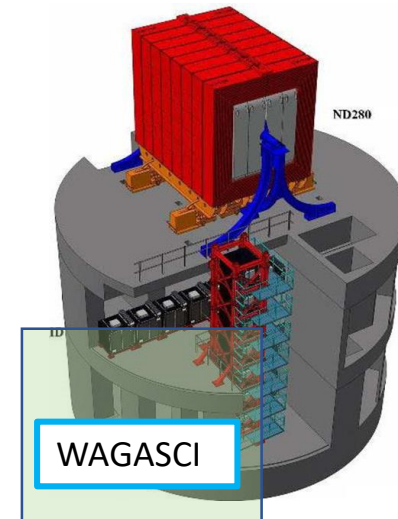
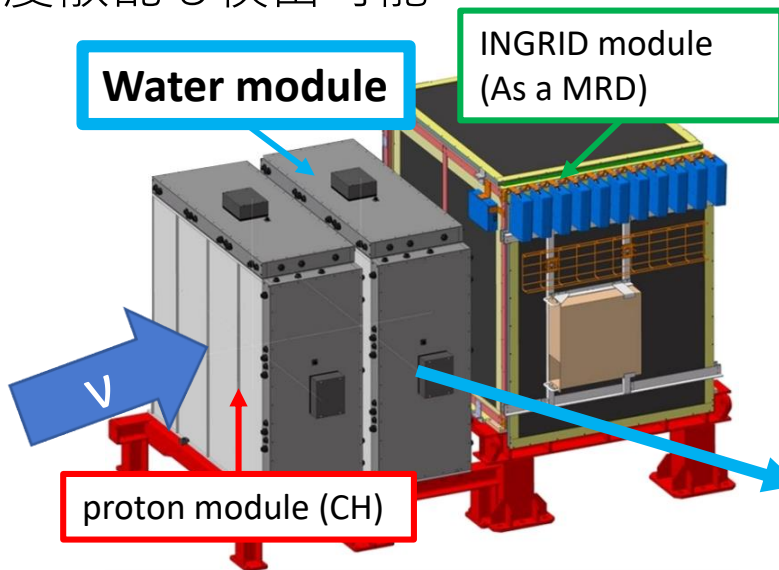
WAGASCI 実験

目的

- H_2O , CHとのニュートリノ反応断面積比の精密測定

構造

- プラスチックシンチレータ(1280本)
- 格子構造をもつ
- 大角度散乱も検出可能

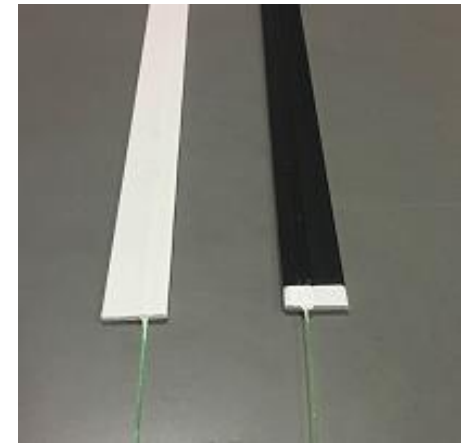


Water Module 建設

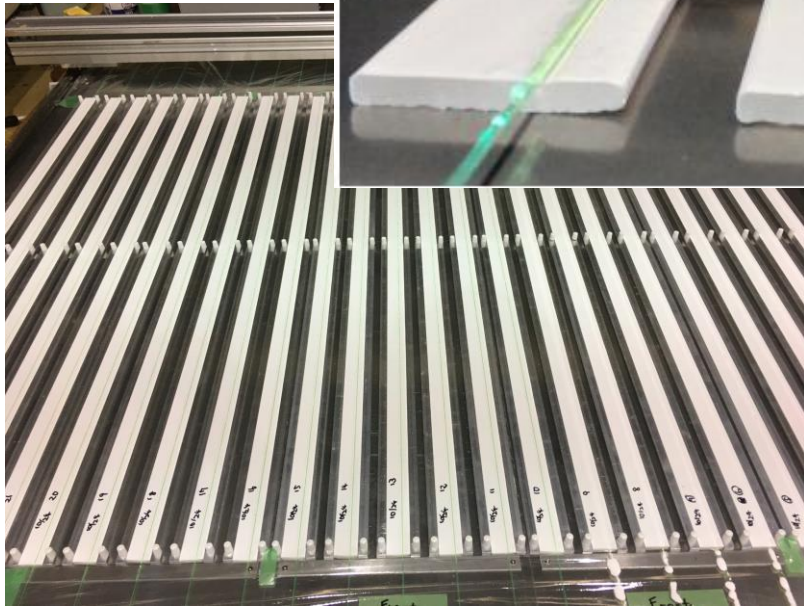
シンチレータとファイバーを接着



黒塗料を塗布

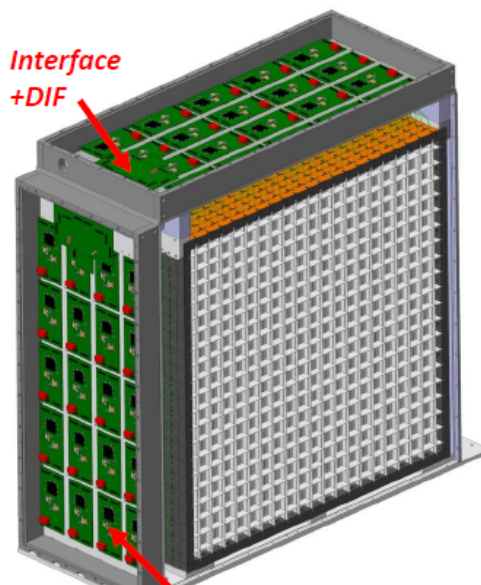
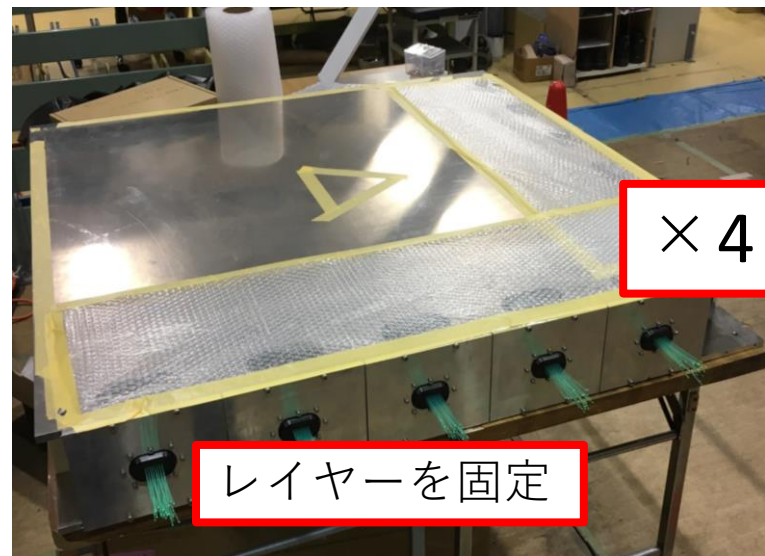


シンチレータ間の
クロストーク抑制のため



反射材を塗布

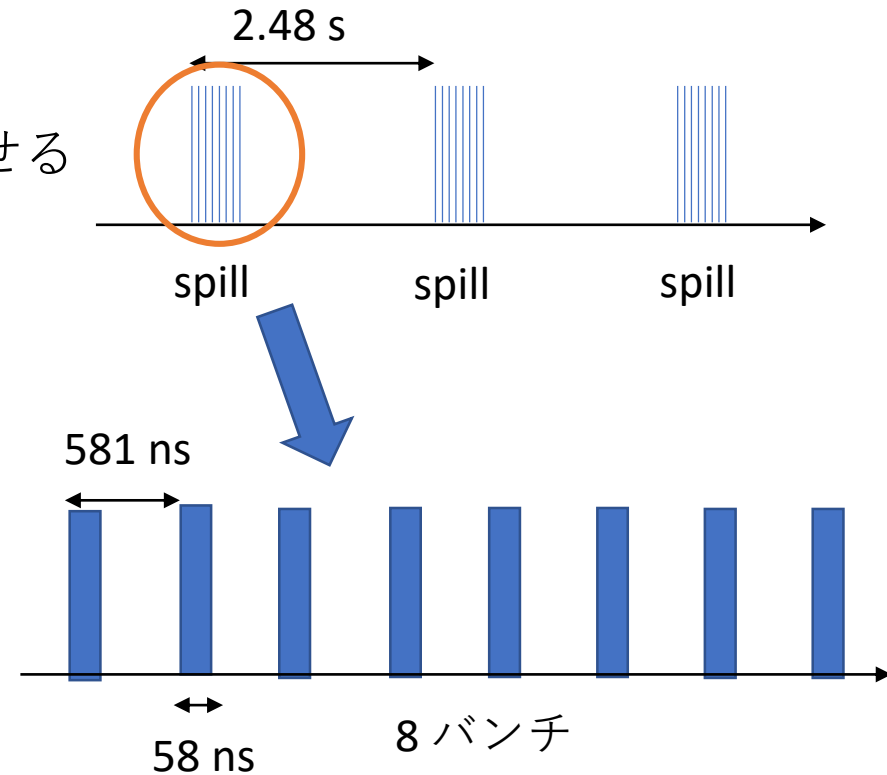
Water Module建設



WAGASCI
Water Module

エレクトロニクスへの要求

- J-PARCのニュートリノビームに合わせる
 - 1スピル8バンチ構造
 - 2.48 sec周期
- 多チャンネルの読み出し
- 各チャンネルの個別調整
 - 増幅率
 - MPPC供給電圧



Water moduleへのエレクトロニクスの開発

エレクトロニクス関係

MPPC

- 光検出器
- 32chのアレイ型

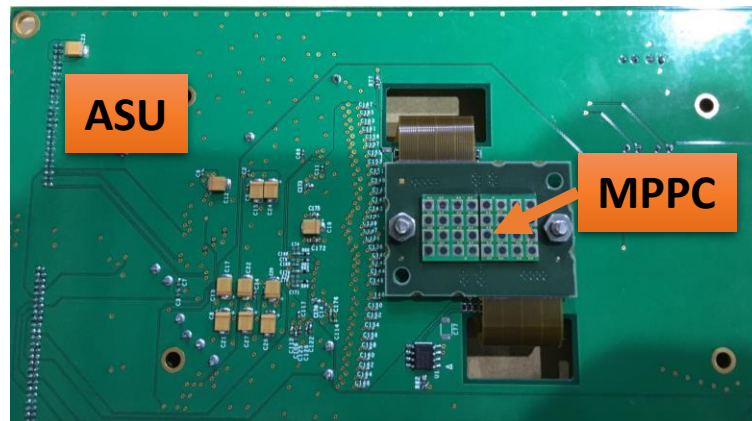
SPIROC2D・ASU

Silicon Photomultiplier Integrated Read-Out Chip

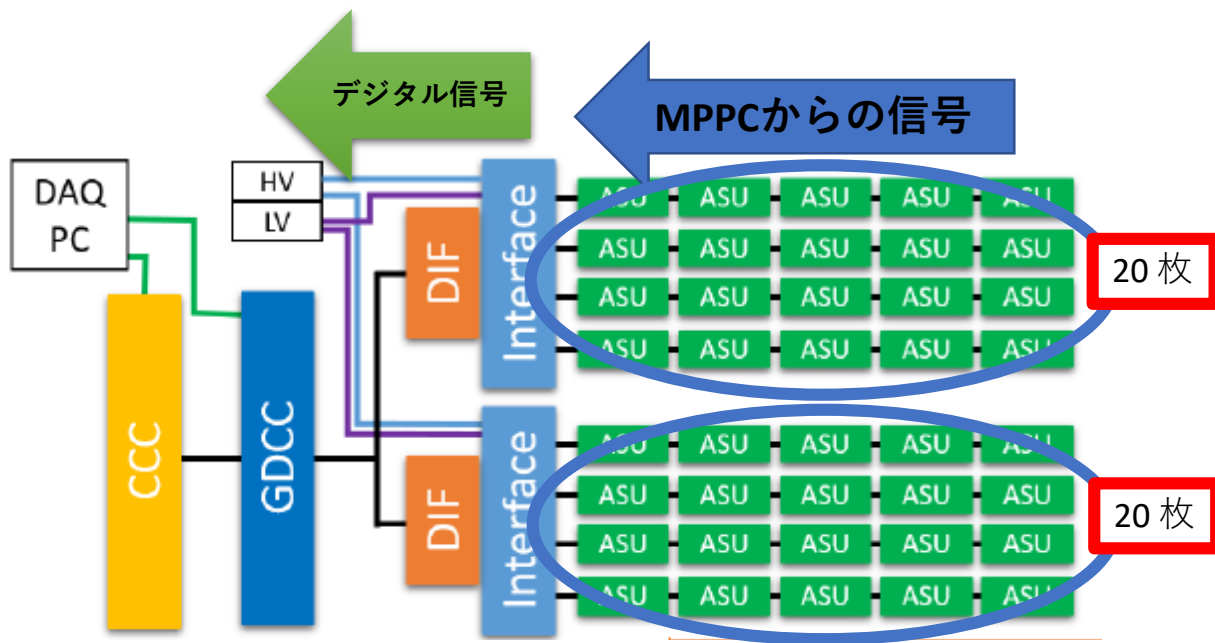
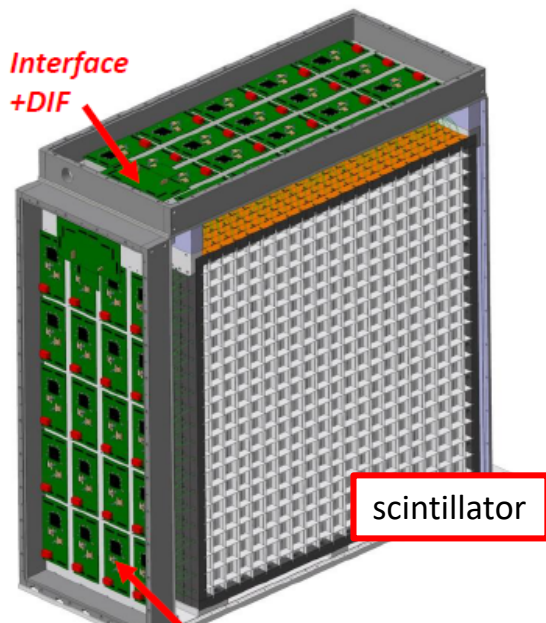
- 低ノイズ
- 広いダイナミックレンジ
- デジタル変換まで行う
- チャンネルごとに16個のコラム(メモリ)

ASU (Active Sensor Unit)

搭載されたSPIROC2DでMPPCの信号を読み出す



WAGASCI DAQ

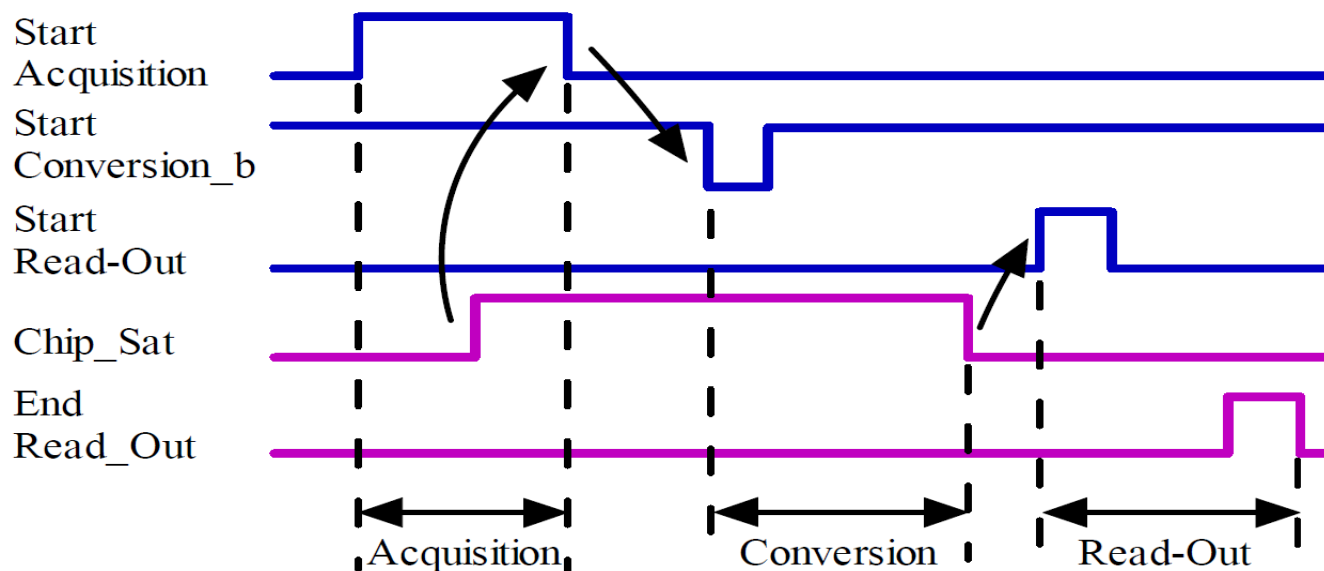


- Interface : DAQ信号の伝達、MPPCに電圧を与える
- DIF (Detector InterFace) : chipにDAQの信号や設定を伝える
- GDCC (Giga Data Concentrator Card) : PC・DIFへ信号を伝える
- CCC (Clock & Control Card) : GDCCにDAQ関連の信号を伝える

- シンチレーション光を検出
- SPIROC2D, ASU等によりデータ取得

DAQ 信号

- Spillの間でデータ取得(ゲートの役割) (acquisition)
- Spillが終わるとアナログ→デジタルに変換(conversion)
- その後、読み出し(readout)
- 読み出し終了の信号(end readout)が次のチップへ伝わり、readout開始する



Chronogram with chip full

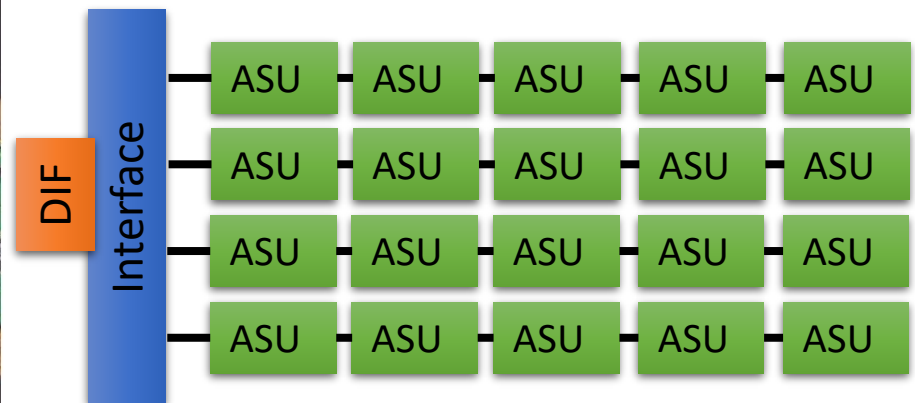
大量試験 準備

目的

- 実際のセットアップと同じ状況でASUの動作試験を行う

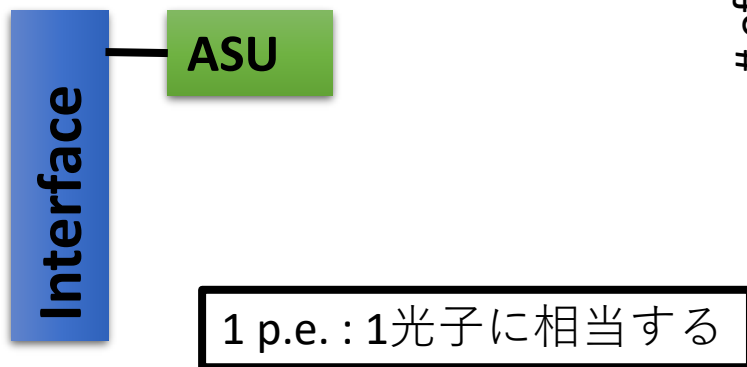
測定項目

- ペDESTALの位置
- ゲインの値



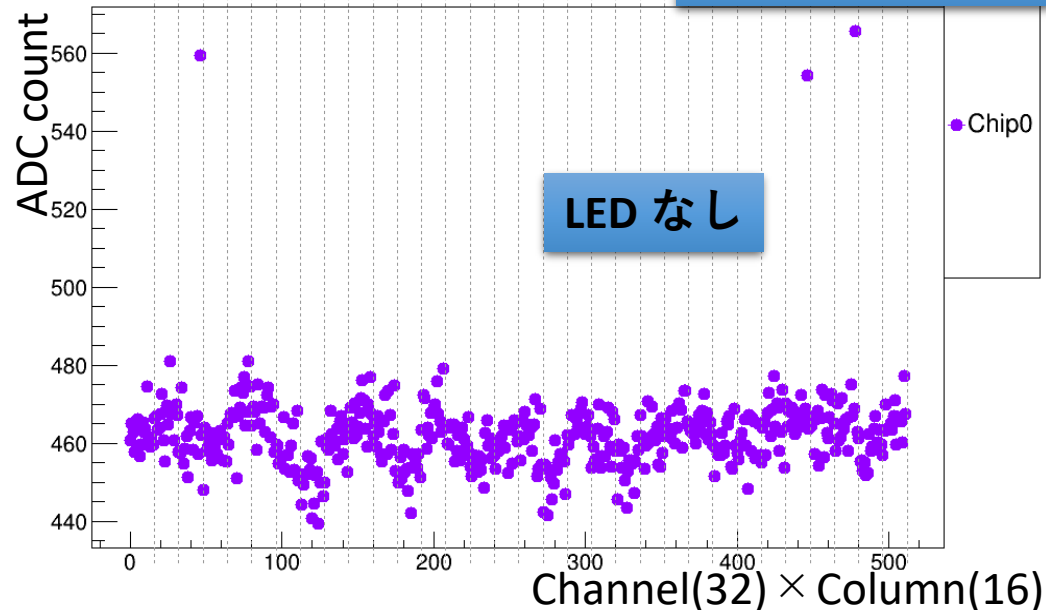
測定

- 作成したセットアップで動作するかを確認
- ペDESTAL測定
 - データが取得できていることがわかる
- LEDの動作も確認
 - 6~7 p.e.程が見えている

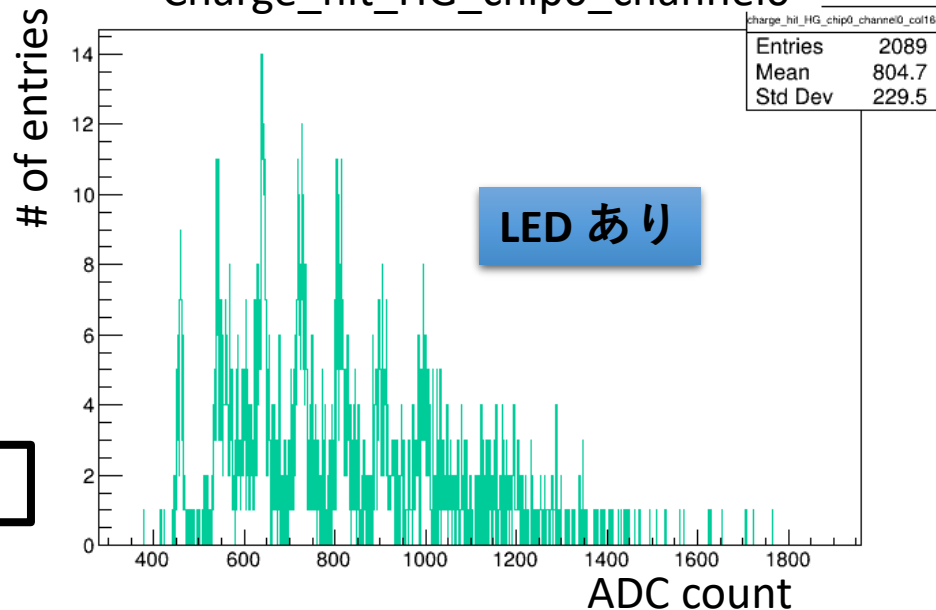


Pedestal_chip

ペDESTAL位置



Charge_hit_HG_chip0_channel0



まとめと今後

まとめ

- ニュートリノ検出器WAGASCIの建設をJ-PARCで進めている
- WAGASCI DAQ用に新しいエレクトロニクスを導入
- ASU大量試験の準備を行っている

今後の予定

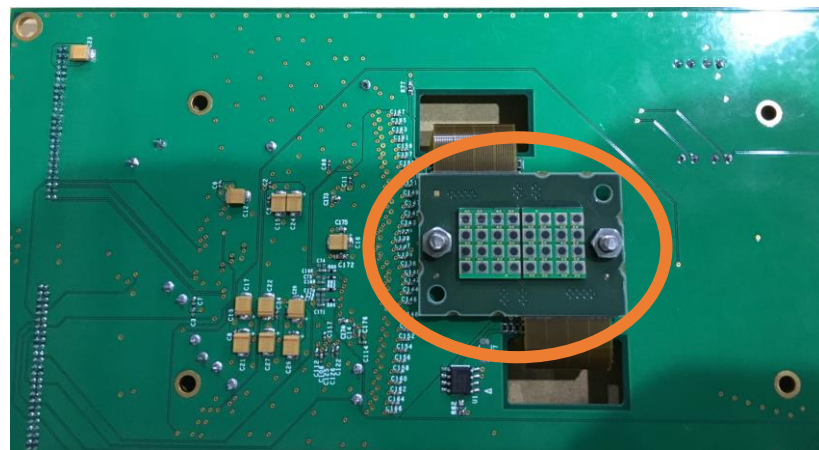
5月 ASU複数枚での読み出し試験

6-7月頃 検出器への実装・測定準備

BACK UP

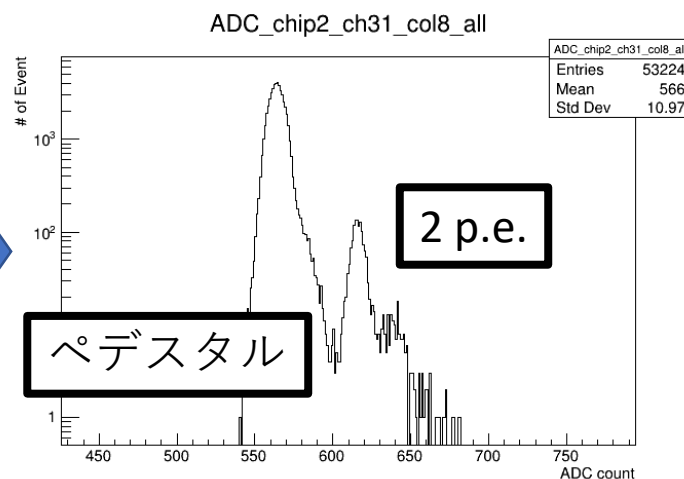
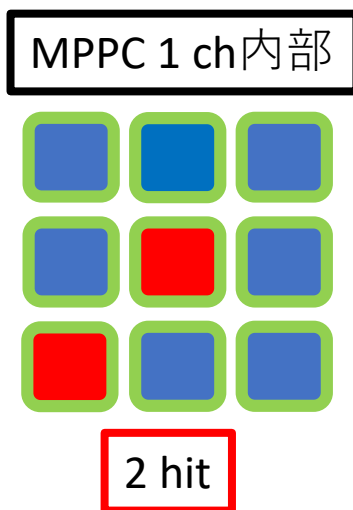
MPPC

- 光検出器
- 32chのレイ型
- ダークノイズ(1 p.e.相当)が存在
 - 入射光がなくても信号が出力される

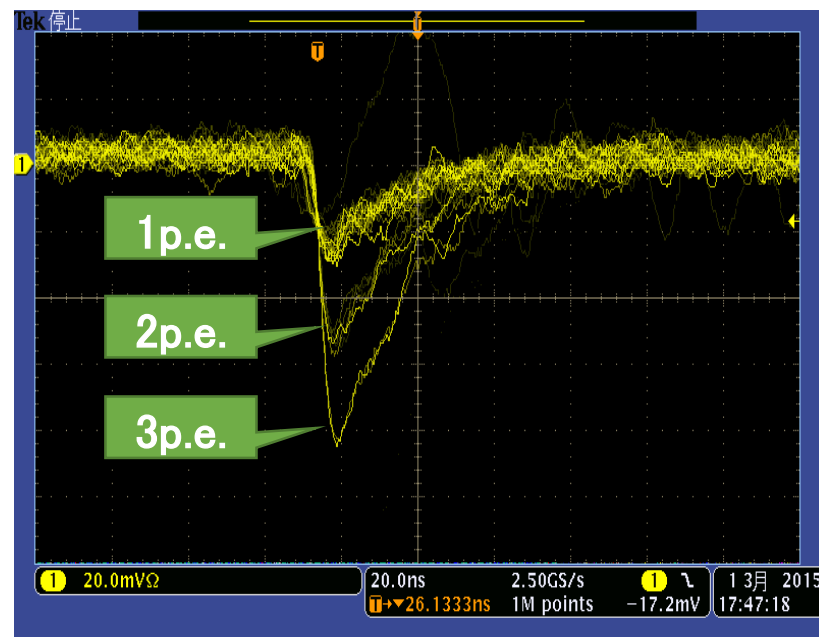
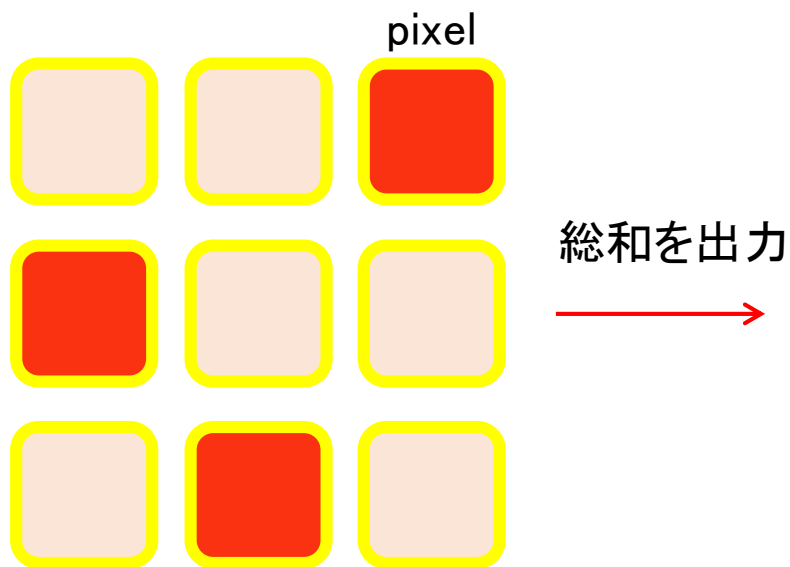


- 出力は一定
- 出力信号は重ね合わされる

1 p.e. : 1光子に相当する



MPPCの出力波形



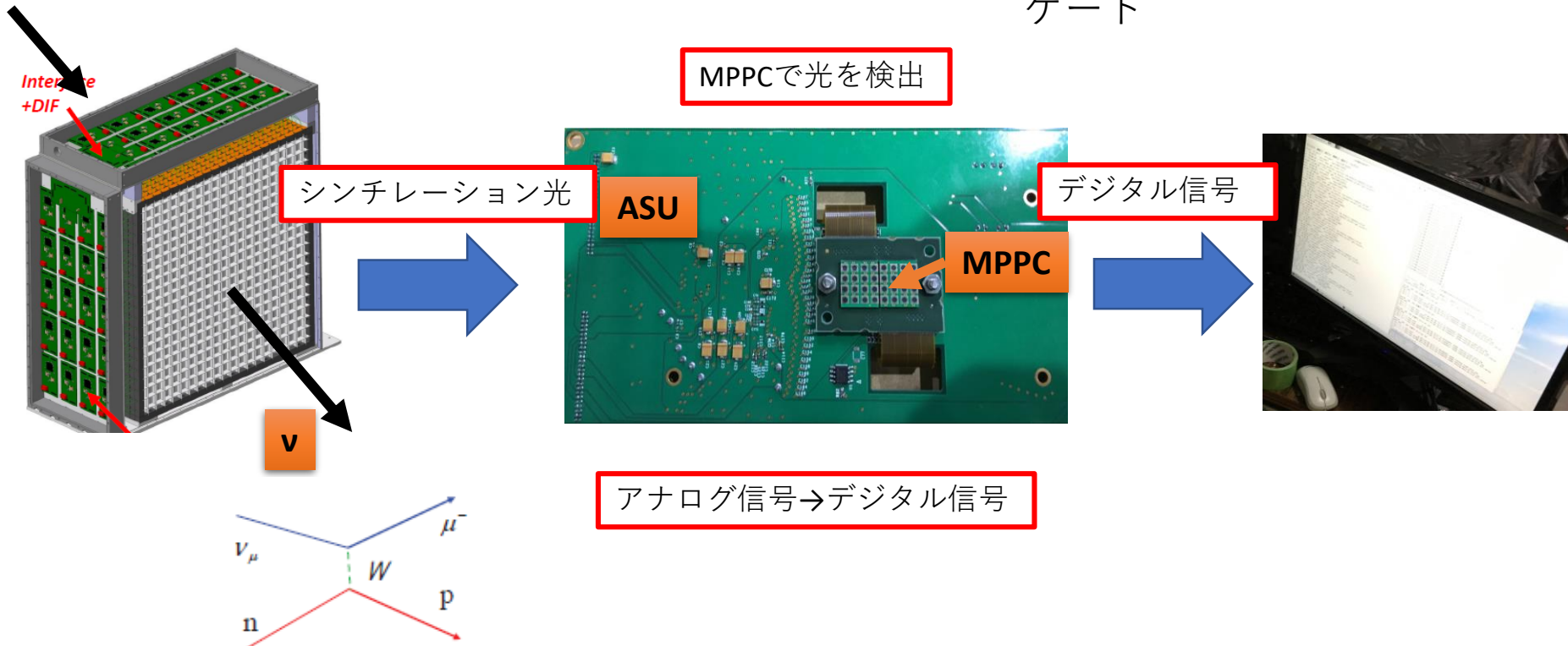
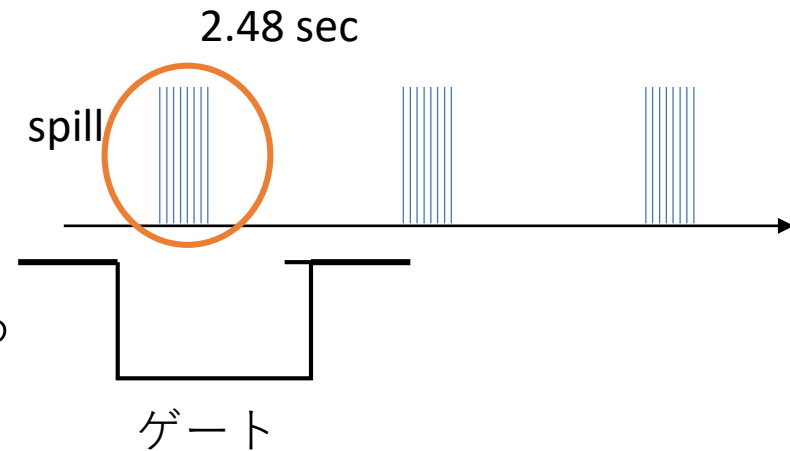
- 1ピクセルの出力は入射光子の数により変化せずほぼ一定

□ photon equivalent (p.e.)

- 光子がピクセルに入射したかを表す情報

DAQ 概略

- 1 spillごとにデータ取得を行う
- 設定した閾値を越えるとトリガーがかかる

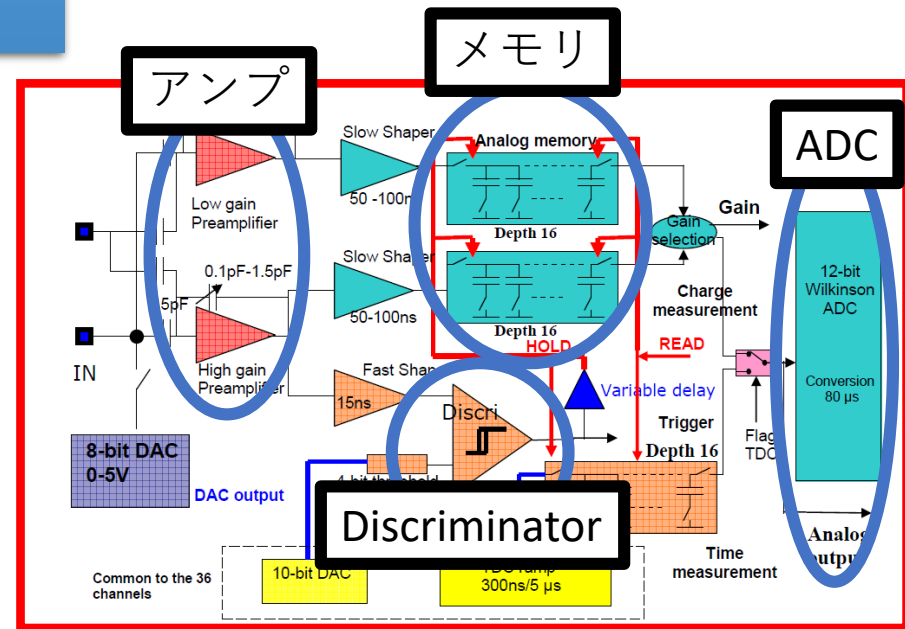


ASU · SPIROC2D

- MPPCからの信号を取得する
 - 信号の増幅
 - デジタル化
 - 閾値によるデータのカット(discrimi)
- チャンネルごとに16個のコラム(メモリ)
- アンプにはHigh Gain, Low Gainがある
 - ある値で増幅率が変わる



- ヒット情報も取得
 - 自分自身がトリガーとなる
 - ヒットすると次のコラムへ移動する

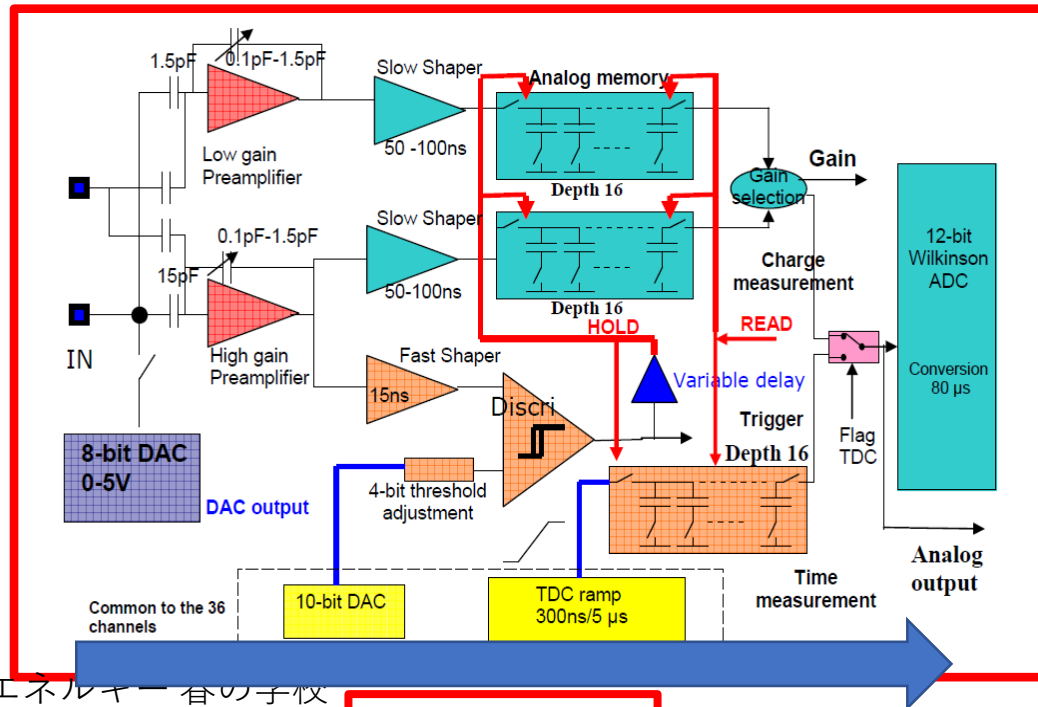
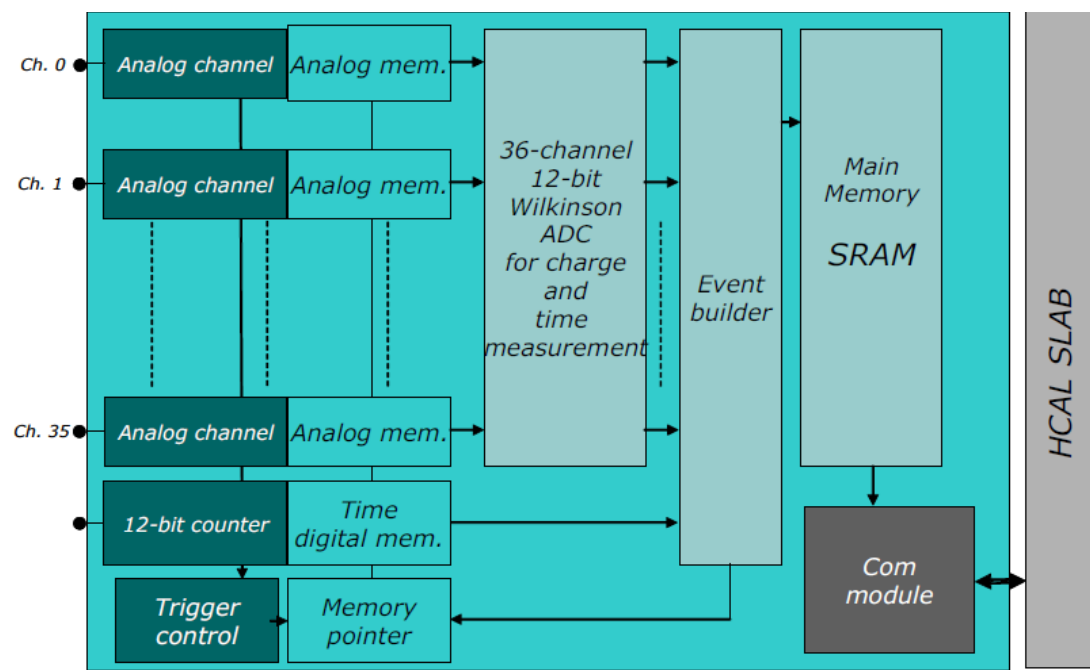


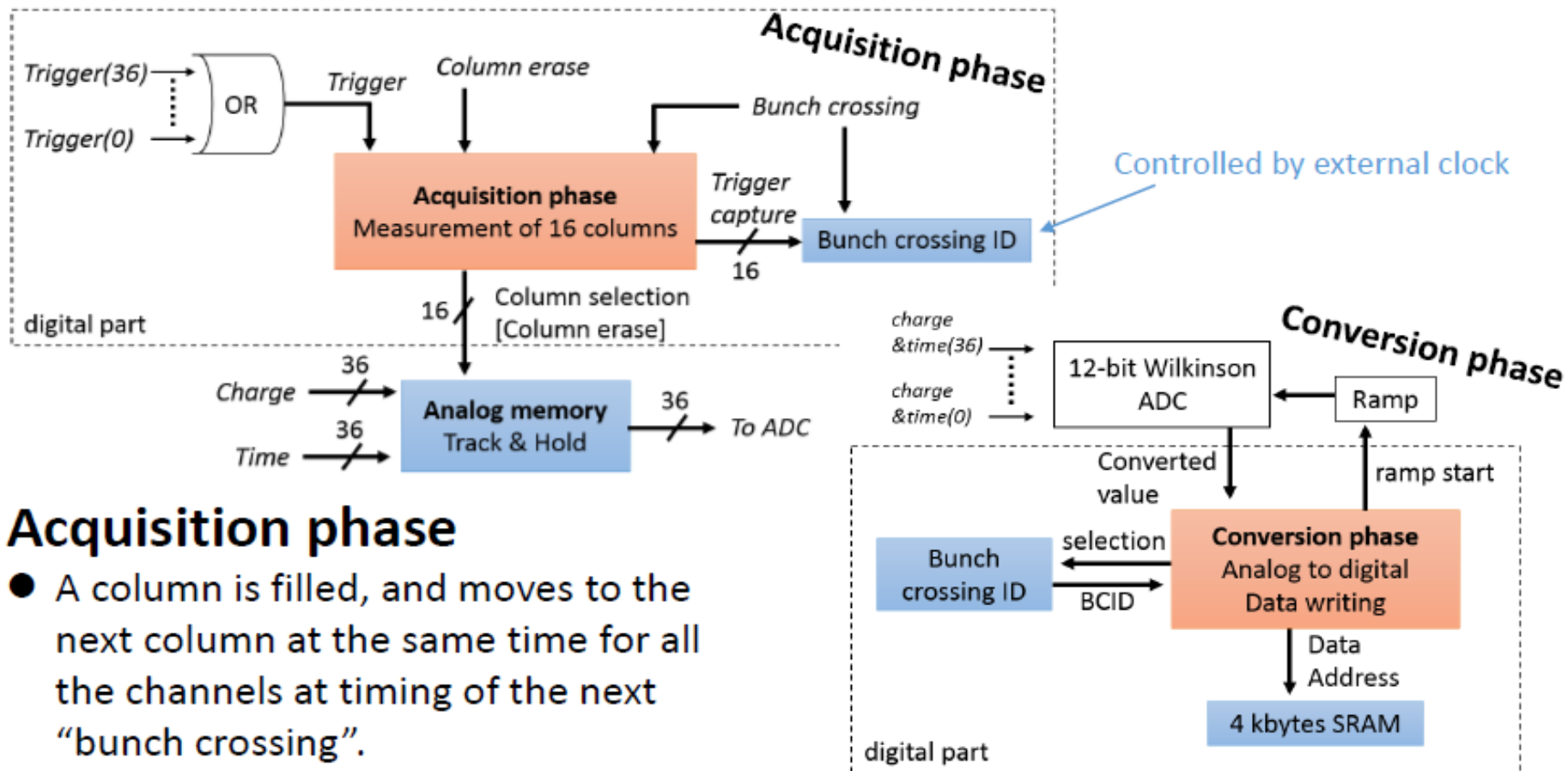
WAGASCI DAQにおいて
閾値は1.5 p.e.に設定

SPIROC2D



- 32mm² (4.2mm × 7.2mm)
- 2gain/12bit ADC : 1 – 2000p.e.
- 5V/3.5V power supply
- 25μW/ch (idle mode)
- Input DACによりMPPCにかけるHVを調節
- 信号を増幅して電荷・時間情報をメモリ(16コある)に保存
- threshold以上の信号が16個来ると、メモリがいっぱいに
 - 次のトリガーまでデータ取得は止まる





Acquisition phase

- A column is filled, and moves to the next column at the same time for all the channels at timing of the next “bunch crossing”.
- “Bunch crossing” is a coarse time flag for the triggers.
- BCID is controlled by external 2.5MHz clock.

Conversion phase

- 36 charge/36 timing in the analog memory are sequentially converted at an ADC with using ramp signals.
- The digital data are stored in 4kbytes SRAM.

エレクトロニクス関係

Interface board

- Interfaceは4つのASU・1つのDIFと繋がっている
 - 並列に信号を伝達
- InterfaceからASUを通してMPPCに電圧を供給



DIF (Detector InterFace)

- DIFはFPGAを持ち、SPIROCを制御する
- DAQ信号とコンフィグをSPIROCに伝達する
- IFを通してSPIROCからの出力データを受け取る
- ファームウェアはGDCCによって制御される



エレクトロニクス関係

GDCC

- DAQ PCへのイーサネットとDIFへのHDMIとの信号伝達
- signal transfer between an Ethernet to a DAQ PC and HDMI to DIFs.

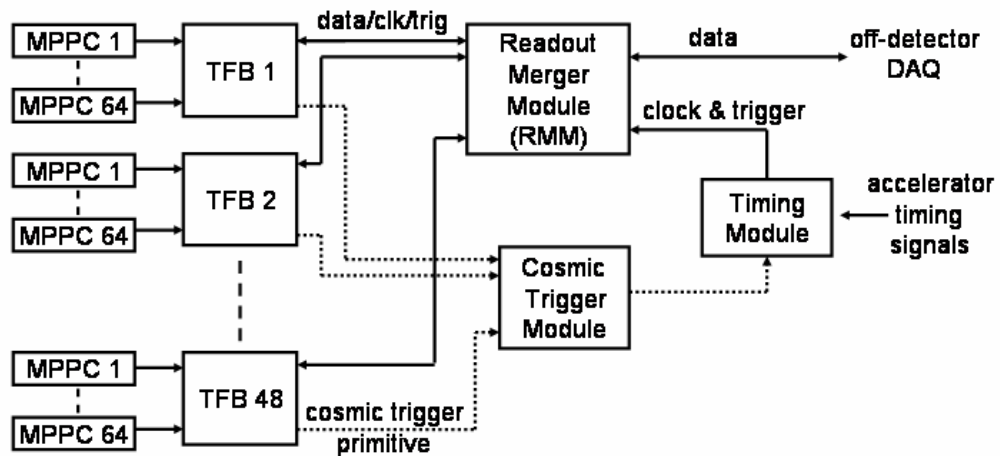
CCC

- GDCCのCCCモード
- Clock 信号とfast controlで接続されている
- DAQシステム全体を同期させる

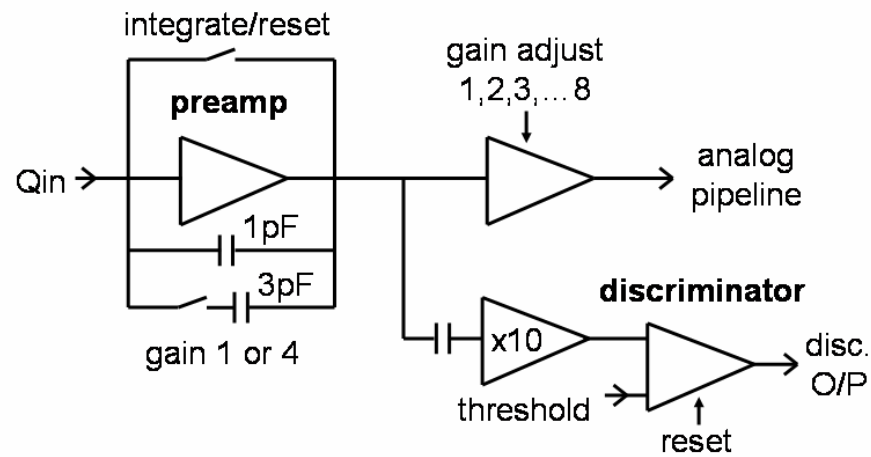


TFBとの違い

- TFB (Trip-t Front end Board)
 - 4 Trip-t chipから成る(16 ch)
 - Trigger thresholdは16ch共通
- 電荷積分型ADCを使用している



T2K DAQ system (using TFB)



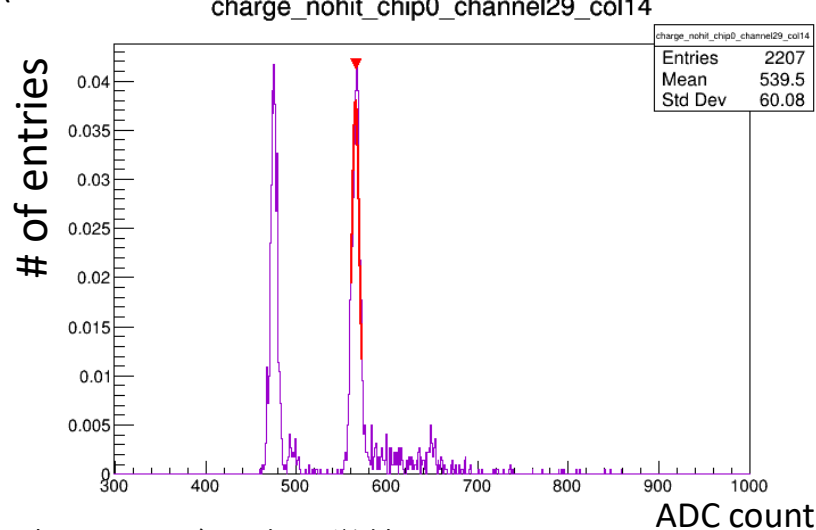
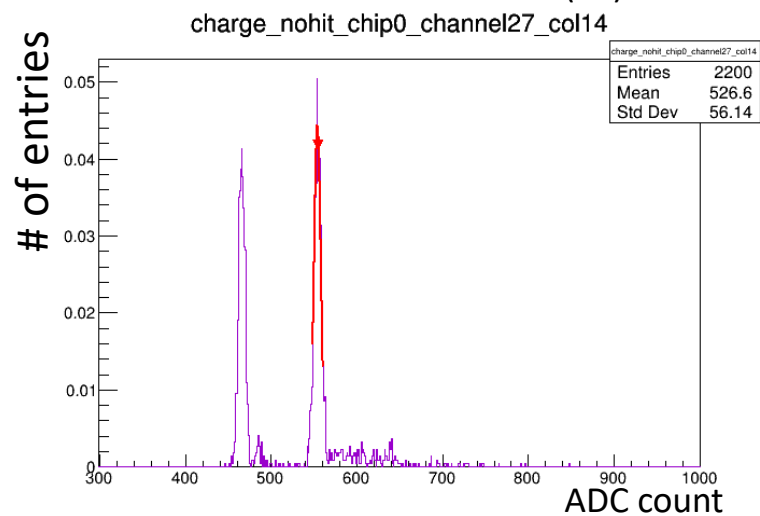
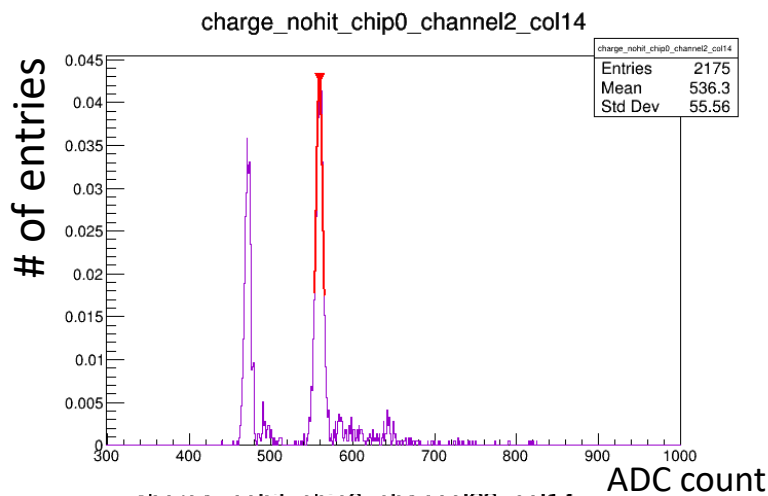
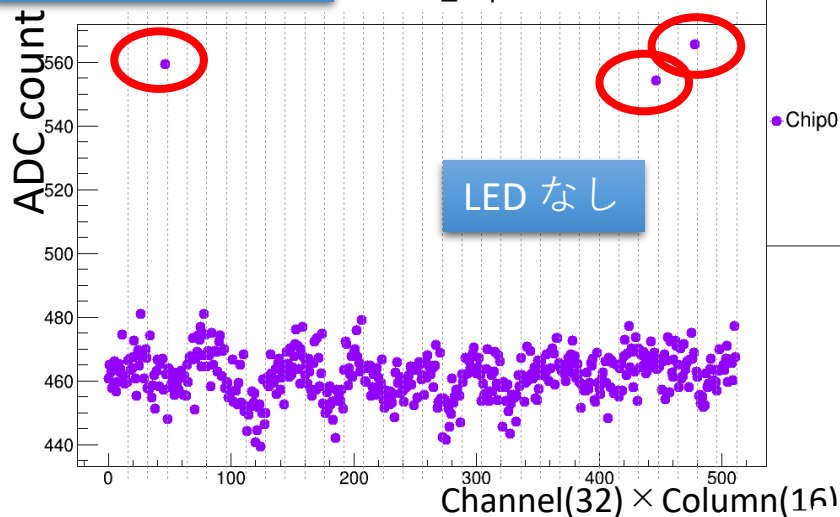
Single Trip-t chip front end channel

ペDESTAL

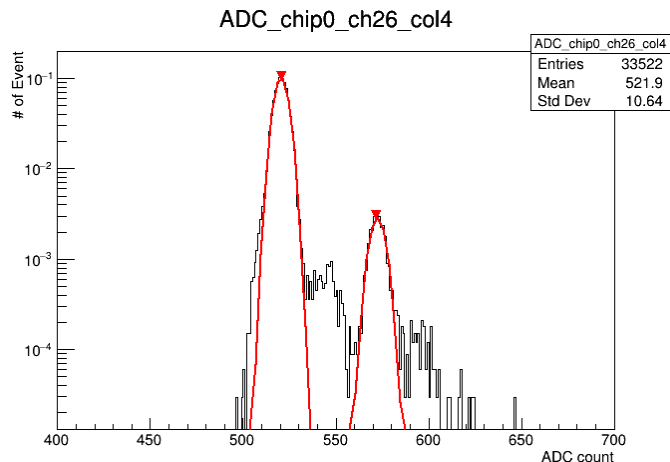
- 全てcolumn 14
- Trigth=155なので2 p.e.が見えている
- Fit を改善すべき

ペDESTAL位置

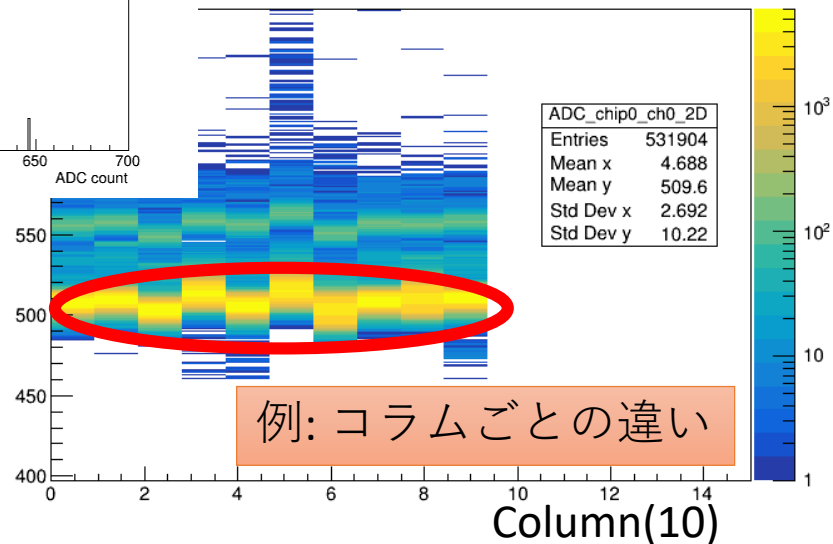
Pedestal_chip



予備測定



ADC_chip0_ch0_2D



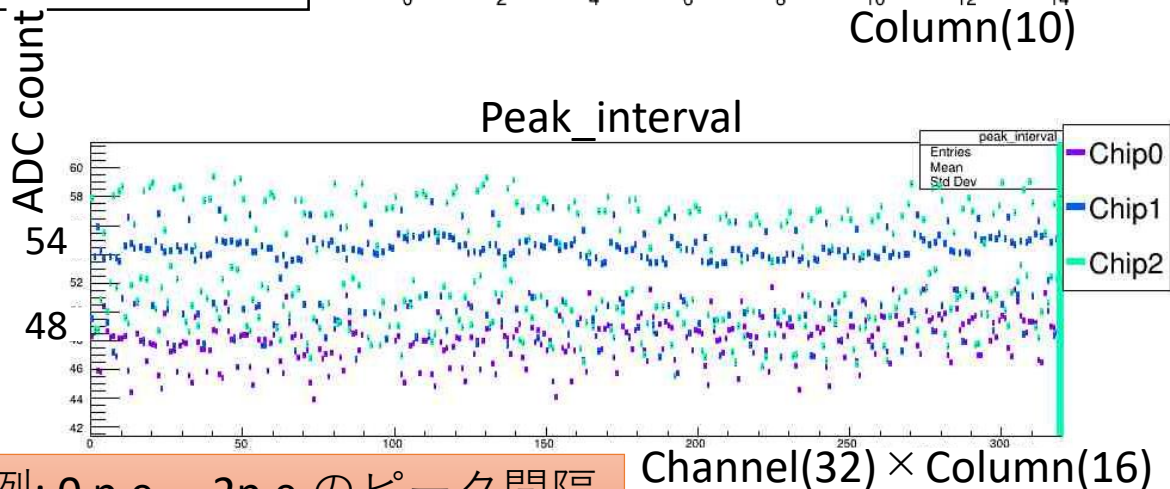
例: コラムごとの違い

ペDESTALの位置

- チャンネル・コラムごとにペDESTALの位置に違いがある
 - 約10 ADC countのばらつき(=0.5 p.e.程)
 - ペDESTAL位置の把握が必要

ゲイン(ピーク間隔)

- chipごとに約3~7%のばらつきがある
 - ゲインチューニングの必要性



例: 0 p.e. - 2p.e.のピーク間隔

Channel(32) x Column(16)

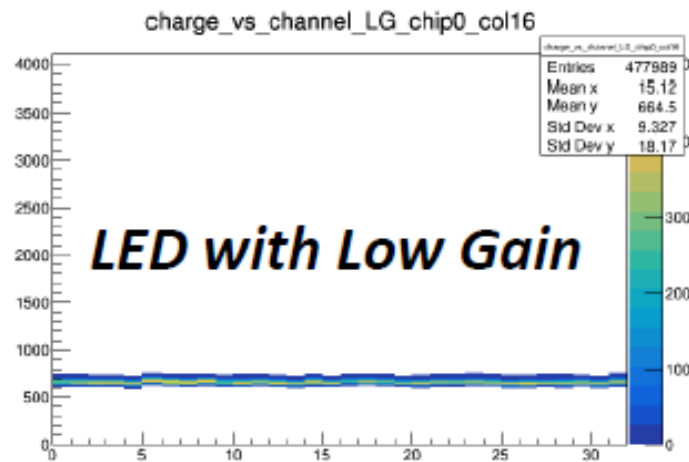
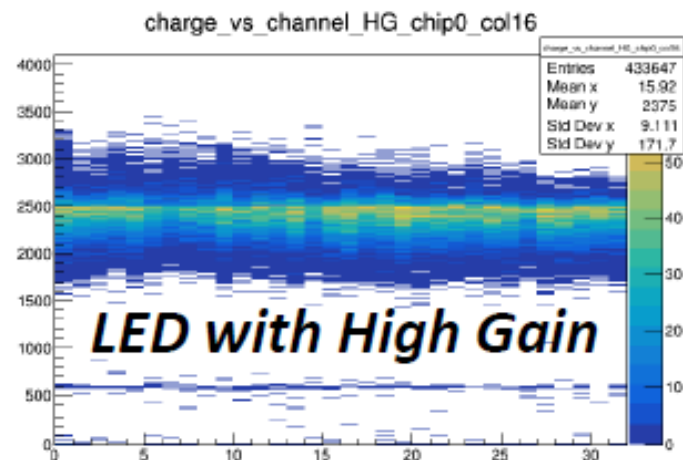
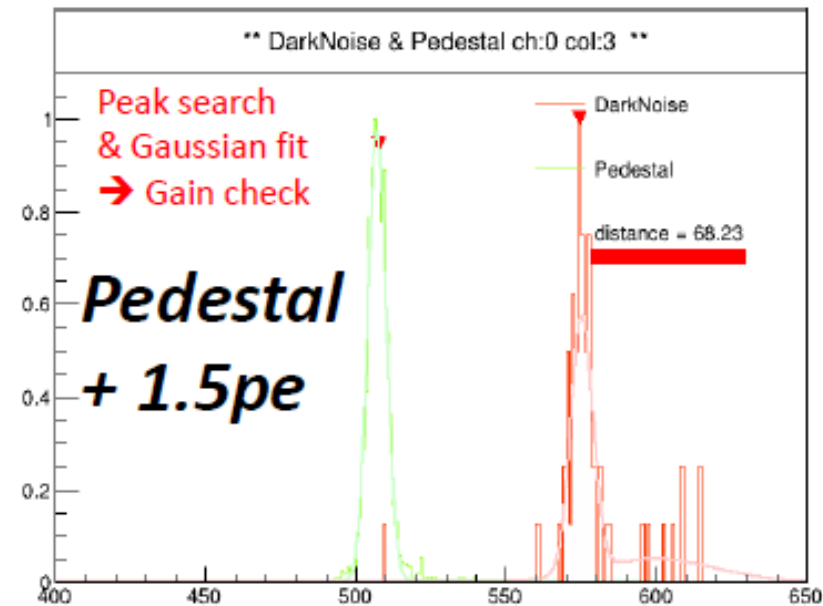
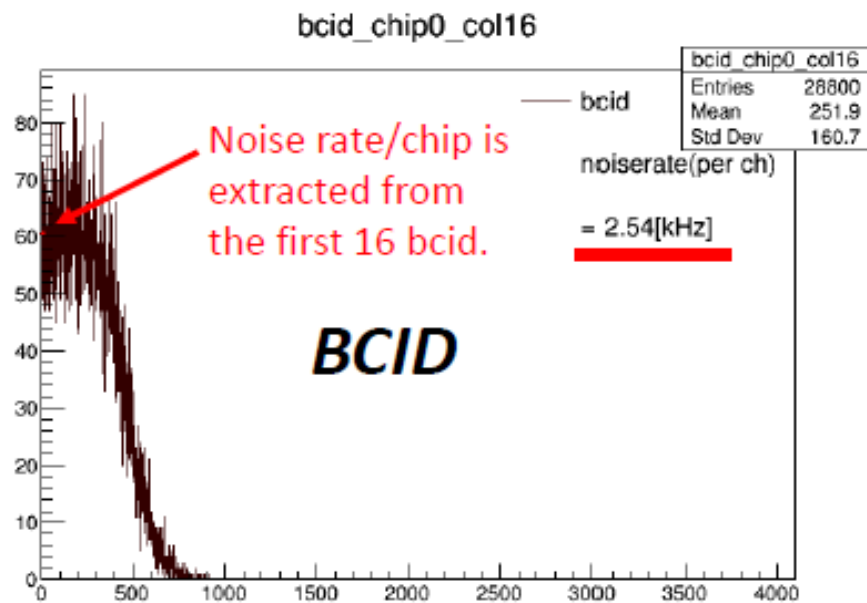
□ **20th Feb:** 45 ASUs boards have arrived @Utokyo

➤ 1 ASU had a trouble on its connector before assembly, and will be assembled by using another connector.

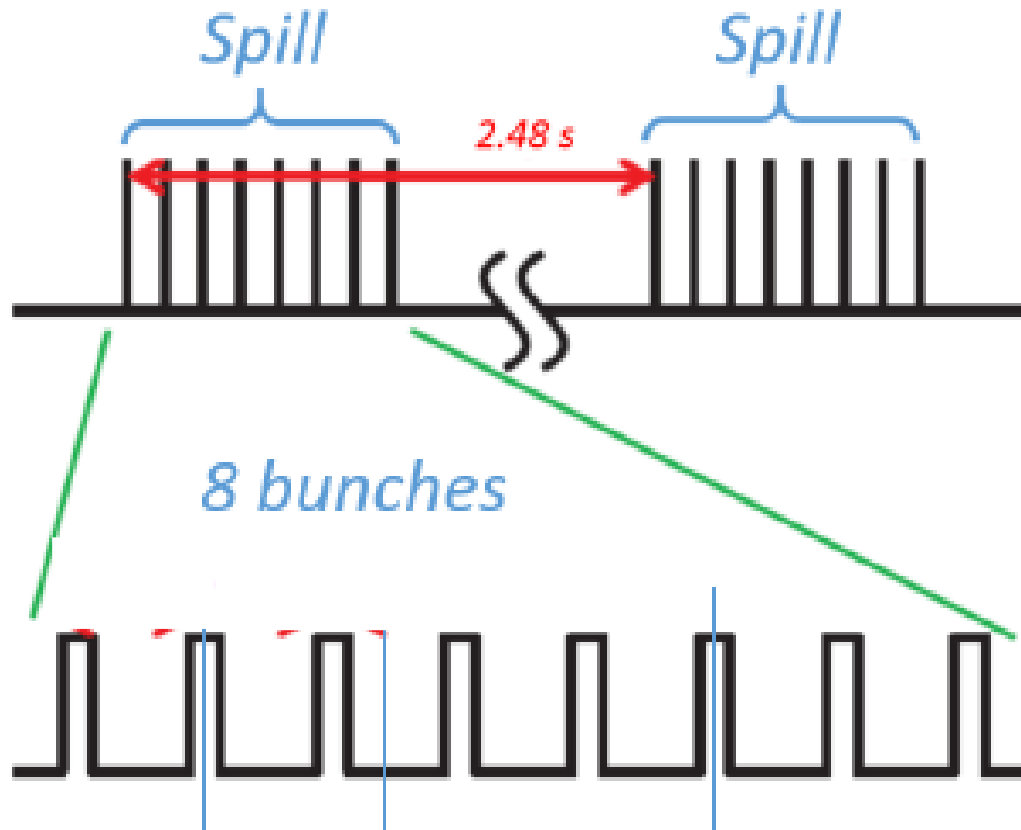
□ **22nd -24th Feb:** Test for simple functions for each ASU.



Typical events

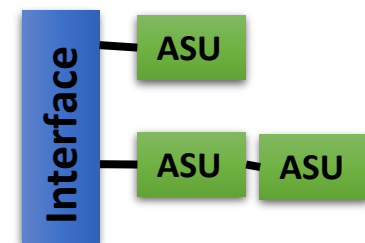
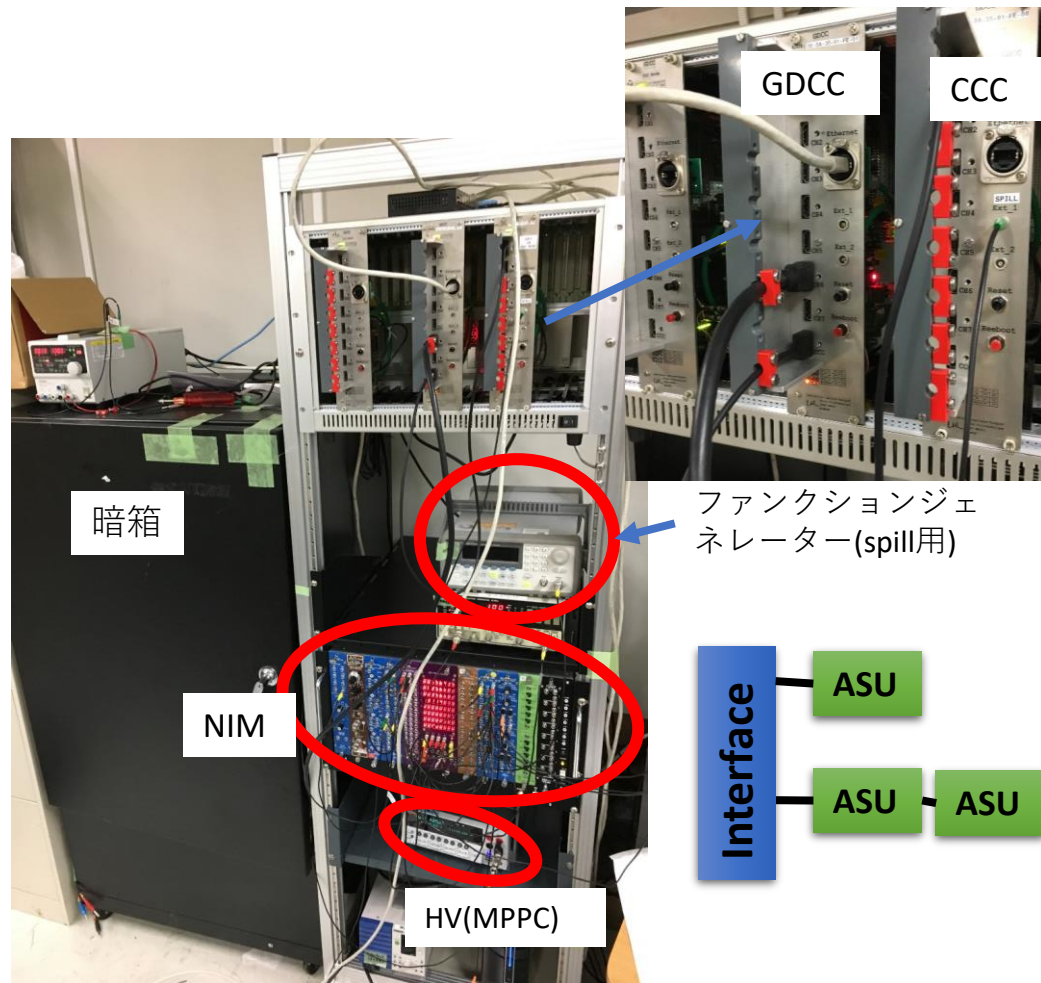
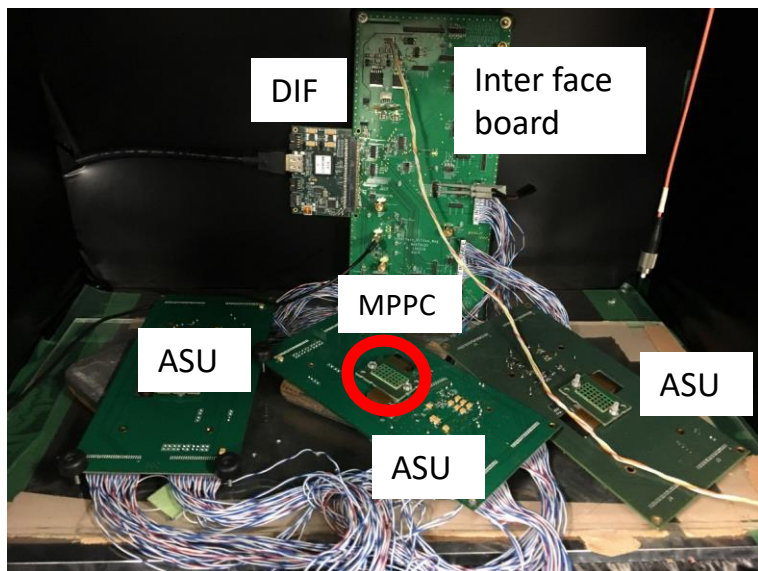


ビームスピル



予備測定

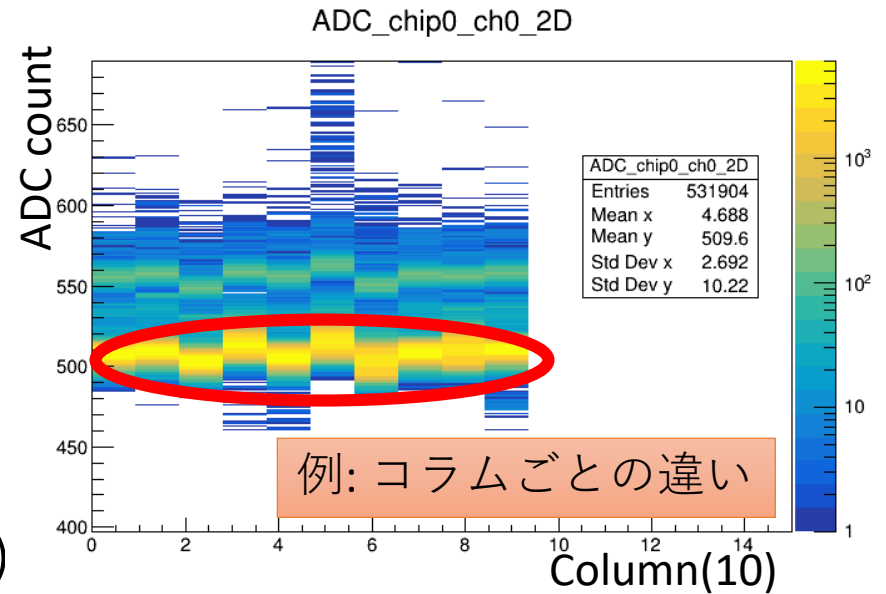
- 大量試験前の予備測定のSetup



予備測定

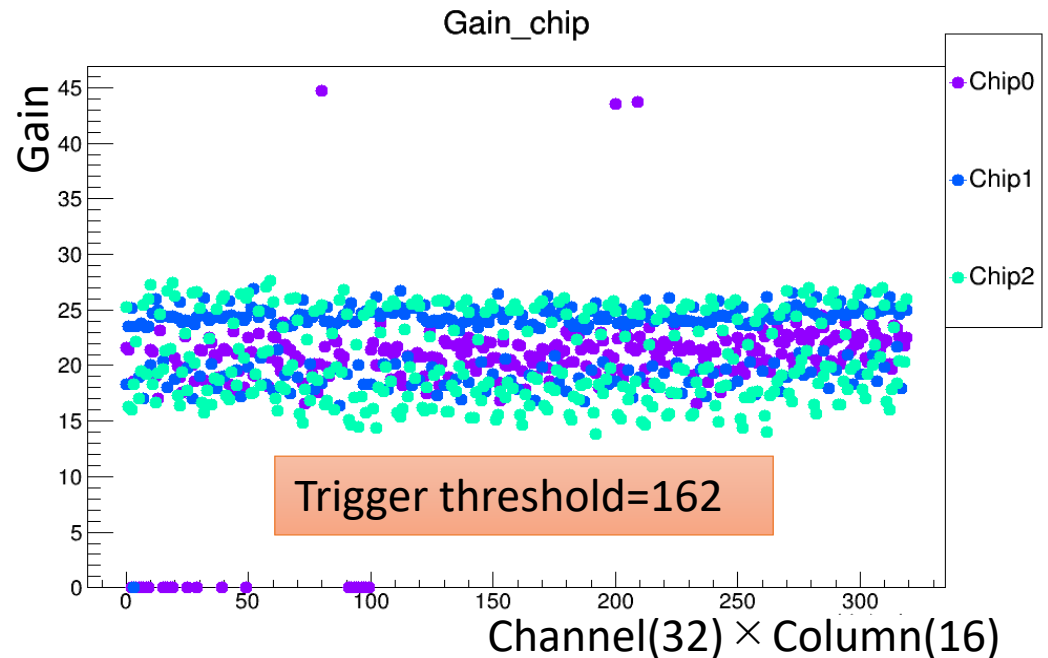
ペDESTラルの位置

- チャンネル・コラムごとにペDESTラルに違いがある
 - 約10 ADC countのばらつき(=0.5 p.e.程)
 - ペDESTラル位置の把握が必要



ゲイン

- chipごとに約3 ~ 7%のばらつきがある
 - ゲインチューニングの必要性

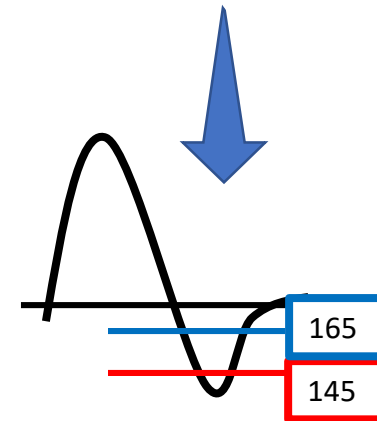
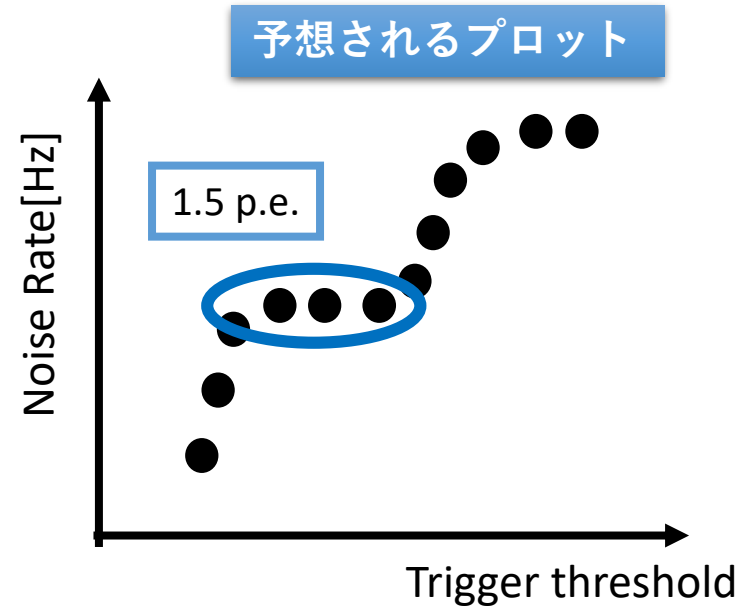


測定

- 適切な閾値(1.5 p.e.)を探す
 - ペDESTALがそれぞれ異なるから
- トリガーの閾値を変えながらノイズレートを測定する
 - BCID(bunch crossing ID)を使用

• MPPC ノイズレート

- 60 kHz / channel ($V_{th}=0.5$ p.e.)
- 1 kHz / channel ($V_{th}=1.5$ p.e.)



閾値を下回ったものがトリガーとなる

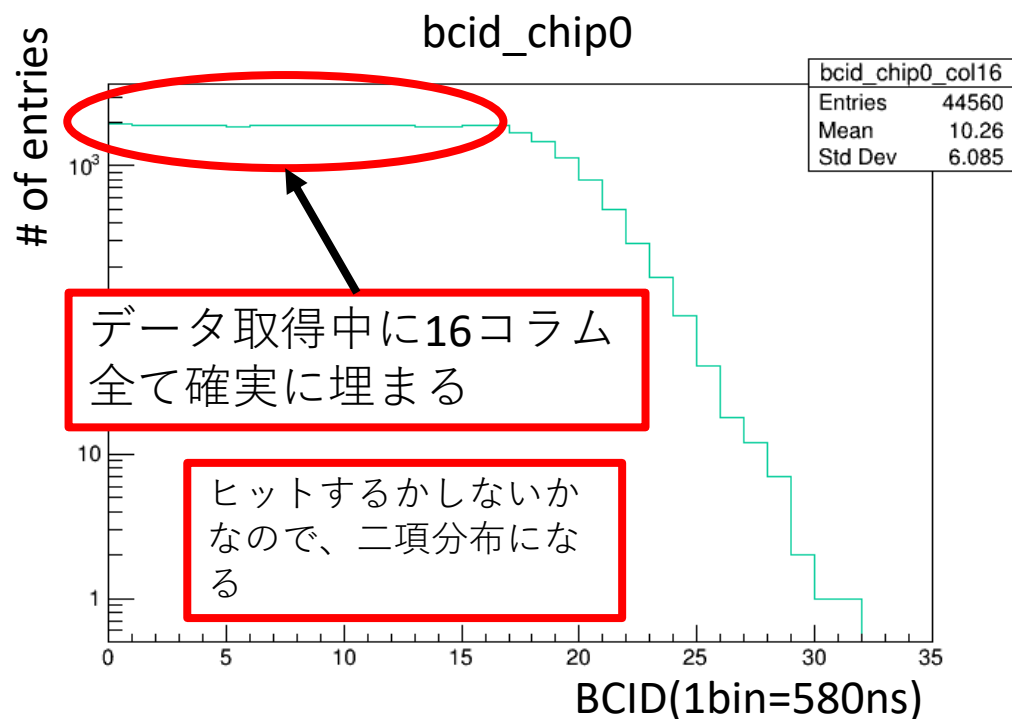
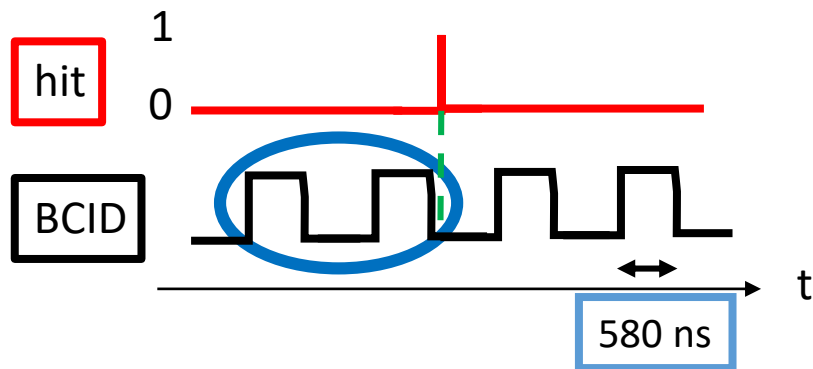
BCID

- レートが十分高い場合は閾値を超える信号が多くなる

BCID

ヒット時間の情報
データ取得開始からのクロック信号の数

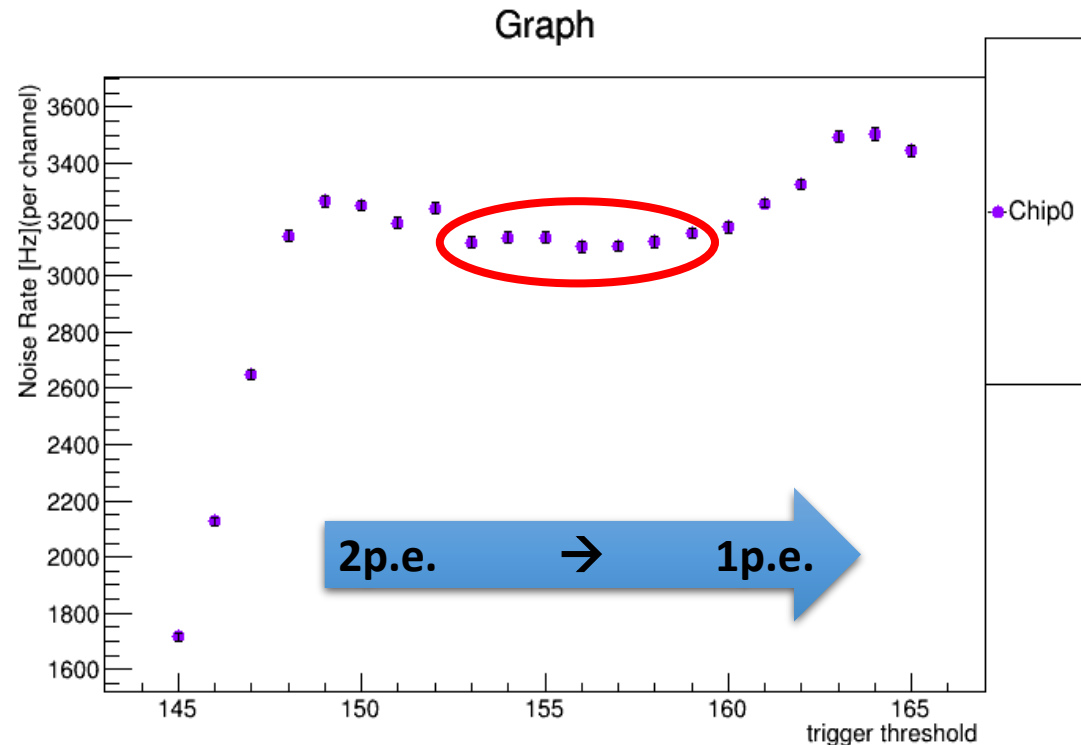
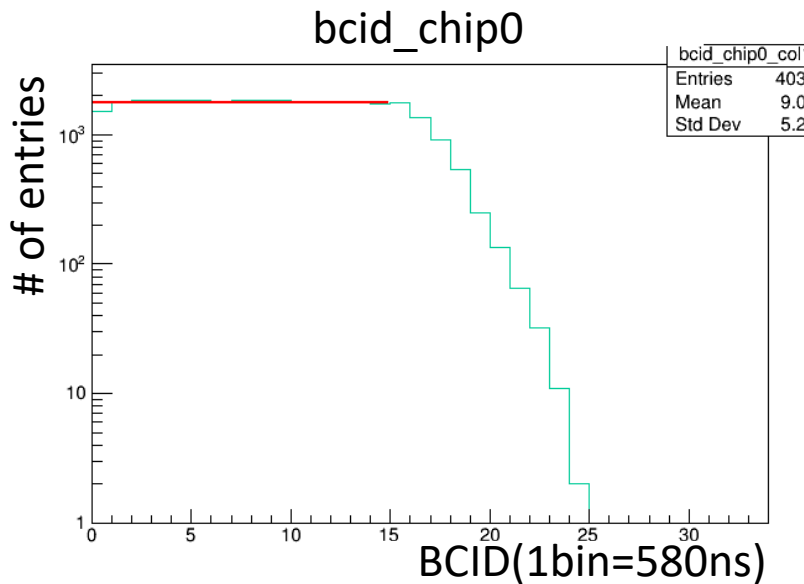
例: BCID=2

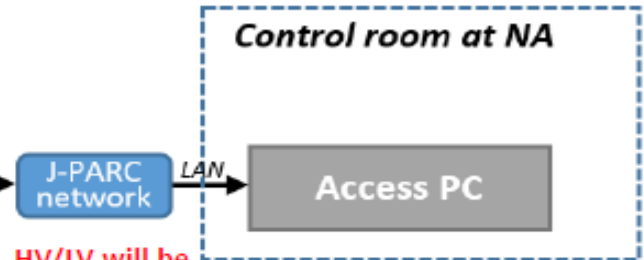
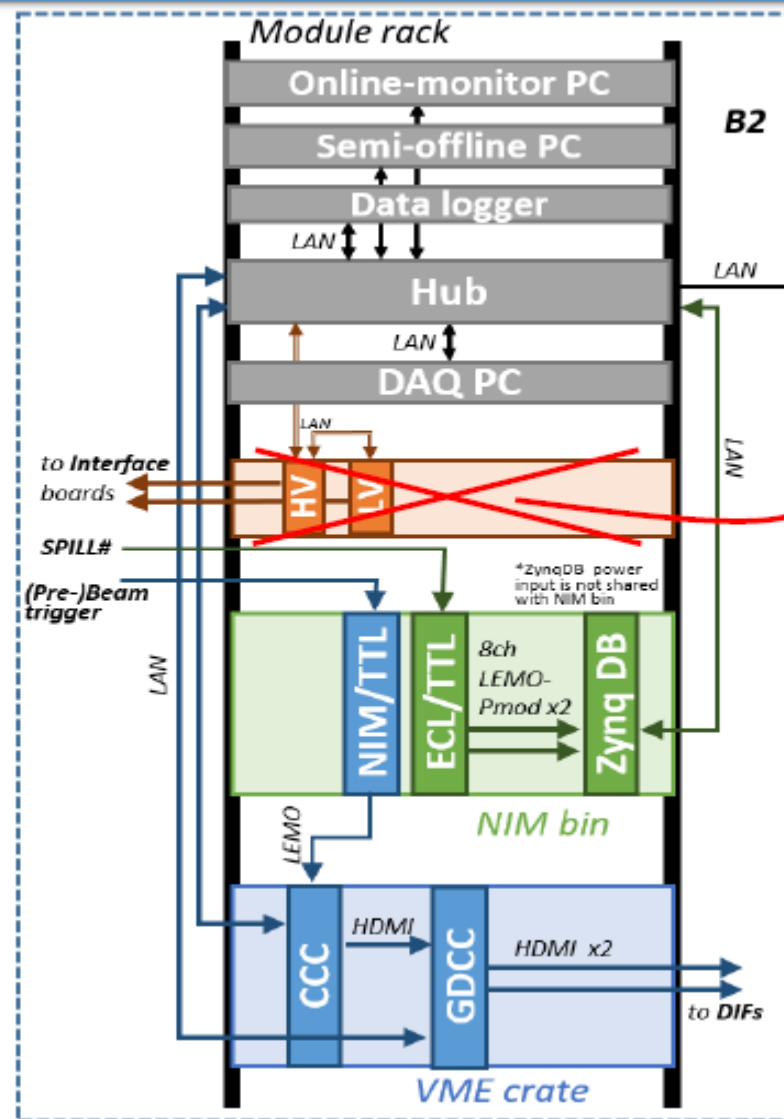


ノイズレート

- ノイズレートが安定している部分を閾値として設定したい
- このchipの場合、155付近が適切なことがわかる

$$\begin{aligned} \text{Noise Rate [Hz]} &= \frac{\text{Noise hit の数}}{\text{データ取得時間 [s]}} \\ &= \frac{\text{BCID(0~15)のfit結果}}{580 \text{ [ns]} \times \text{全Entry数} \times 32 \text{ [ch]}} \end{aligned}$$





HV/LV will be implemented on the water module



□ Front-end DAQ node

- Dell PowerEdge R330 - Quantity: 1
- Processors: Intel Xeon E3 Series, 4 core, No turbo
- Memory capacity: 8Gb, 2133MHz, UDIMM
- HDD: 1TB SATA Hot plug - RAID: No
- Fan: Yes - OS: No
- ¥323,892

*Specification detail
<https://drive.google.com/file/d/0ByrxSXghHz0b0bkpCWVh6QIF6OGs/view?usp=sharing>

□ The other nodes

➤ It remains to be investigated.

Data format

GDCC Packet Format

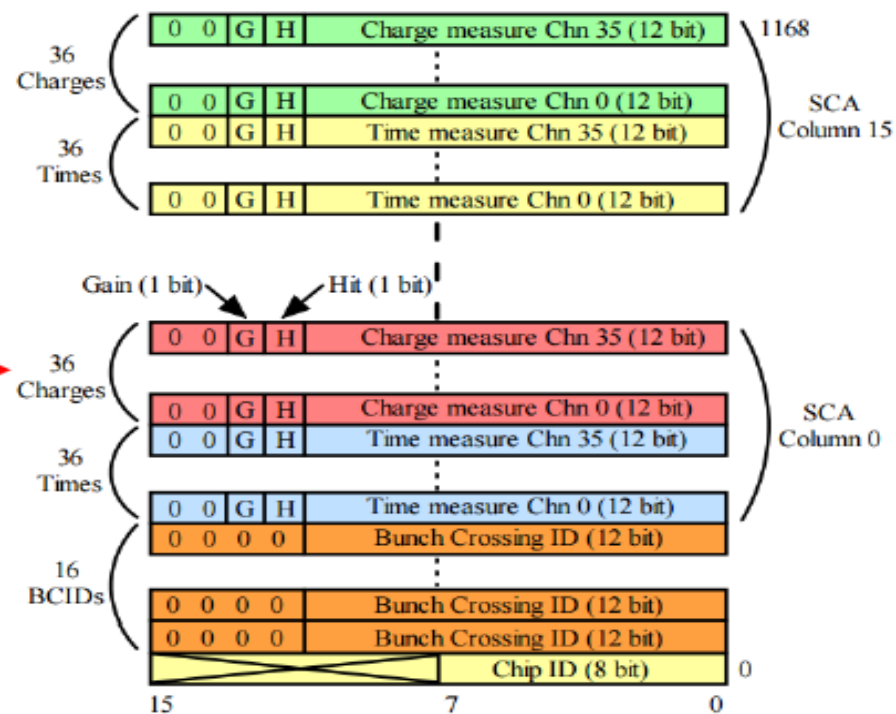
<i>Dst MAC</i>	<i>Src MAC</i>	<i>Ethernet Type</i>	<i>GDCC Type</i>	<i>GDCC_Modifier</i>	<i>GDCC_PktID</i>	<i>GDCC_DataLength</i>	<i>GDCC_Data</i>	<i>PAD</i>	<i>CRC32</i>
6 Bytes	6 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	Variable	Pad to Min Ethernet Size	4 Bytes

Used for SPILL#

DIF data format

Section	subsection	field	hex	ascii
SPILL header		Marker	0xFFFC	
		<ACQid> msb	
		<ACQid> lsb	
		Ascii tag	0x5053	"SP"
		Ascii tag	0x4C49	"IL"
CHIP header		Marker	0xFFFD	
		<ID>	0xFF..	
		Ascii tag	0x4843	"CH"
		Ascii tag	0x5049	"IP"
		Blank space	0x2020	" "
		Raw DATA	binary	
CHIP trailer		Marker	0xFFFE	
		<ID>	0xFF..	
		Blank space	0x2020	
		Blank space	0x2020	
SPILL trailer		Marker	0xFFFF	
		<ACQid> msb	
		<ACQid> lsb	
		<nb chip>	0x00 ..	
		<ACQid> msb	
		<ACQid> lsb	
Blank space	0x2020			

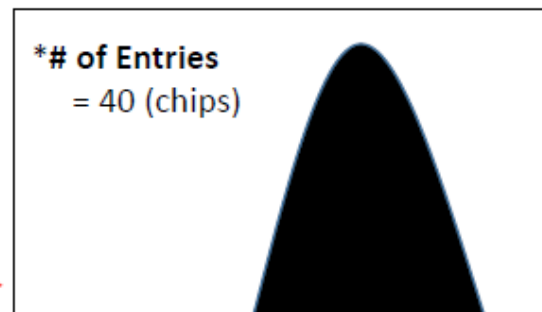
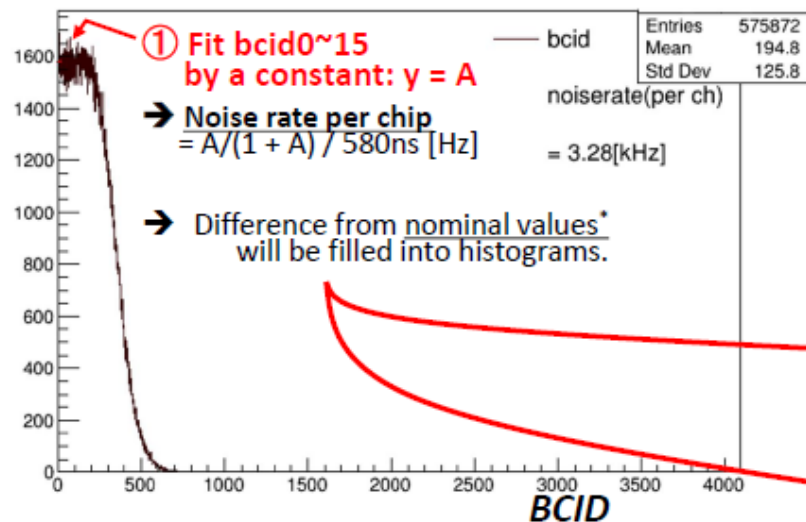
SPIROC data format



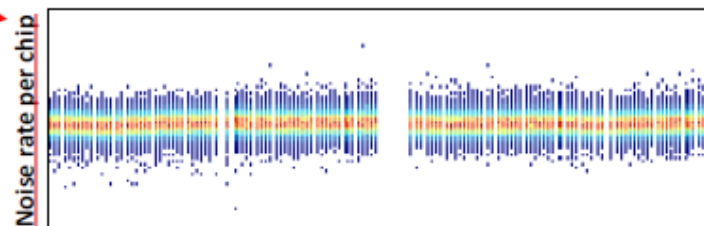
2. Noise rate per chip by BCID

- To monitor if any unexpected noise affects the data taking and if the noise rate corresponds to the MPPC noise rate.

* After “spill flag” and “spill number” will be implemented, this plots should be produced only for the “periodic spills”.



Noise rate per chip (diff. from nominal)



Time

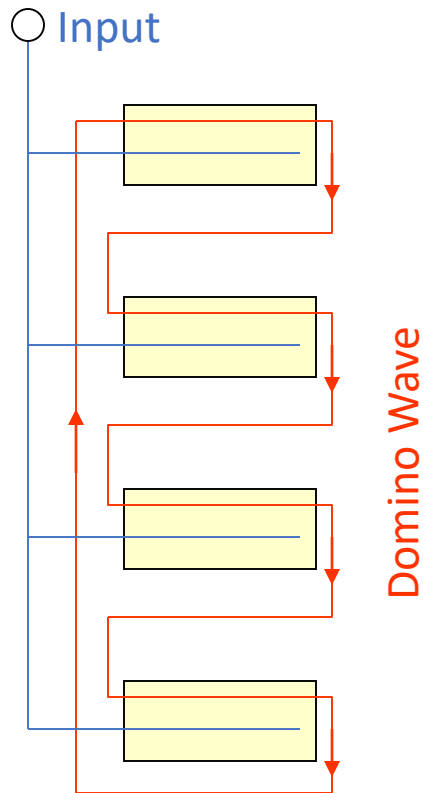
The plots could be renewed every 1600 spills.

* It corresponds to ~100 entries for each bin of the first 16 columns.

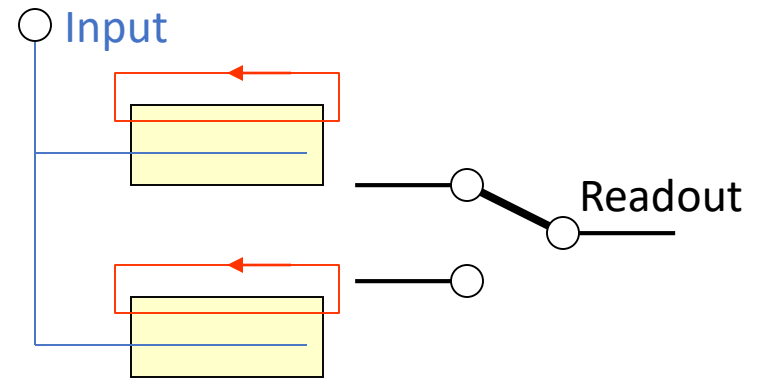
*Update period is expected ~6min.

*Nominal value will be measured for each chip.
Temporarily, 3kHz can be used for all chip.

DRS options



Daisy-chain mode



Dual-channel mode

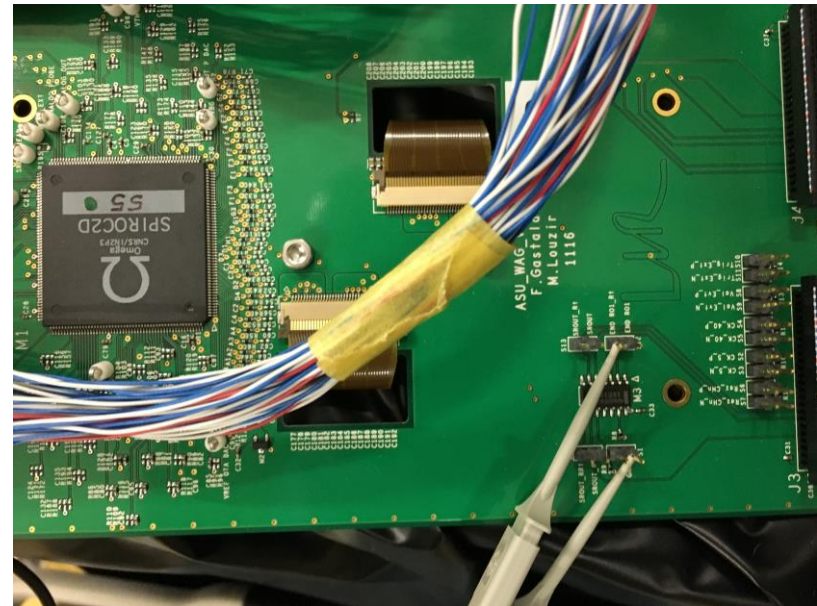
動作試験

- ASUの枚数を増やしての動作試験



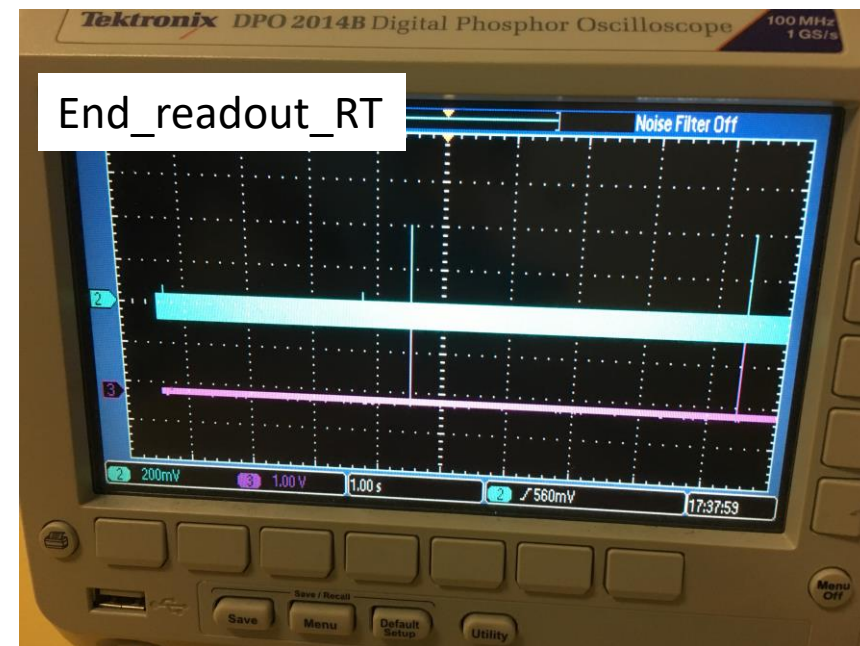
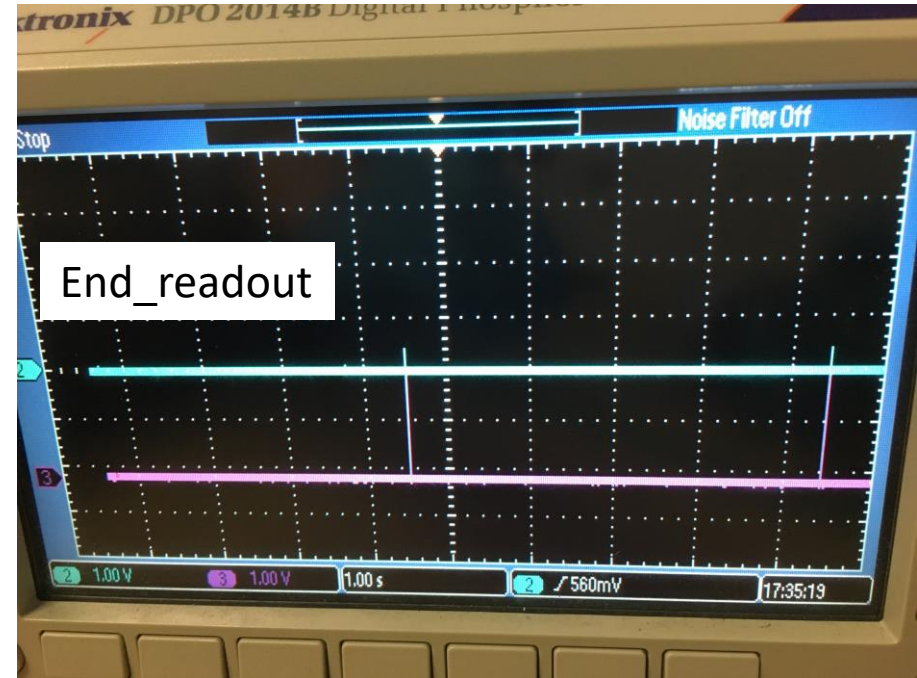
ASU測定 調査

- 2. データ取得できるか？
- Spillが飛んでしまっている
 - 10Hzでspill(ゲート)を出している
 - 1つspillが来るごとにspill#が一つずつ増えていくはず
 - しかしspill#にギャップがある
- Start_readoutとend_readoutを直接見る



readout

- End_readoutが小さすぎる
 - ASUが壊れている？
 - 電圧供給が足りていない？
- 小さすぎてendreadoutが認識されていない？
- RTはバッファで信号を回復させてIFに戻している



ニュートリノ？











- 観測対象がどんどん小さくなっていった
 - 物質→原子核→電子・陽子・中性子
- さらに細かくすると
 - 中性子が陽子と電子に壊れた
- 崩壊前後でエネルギーが保存しない...?
 - 陽子・電子以外に何かが出てきてる
 - なんや？



ニュートリノ

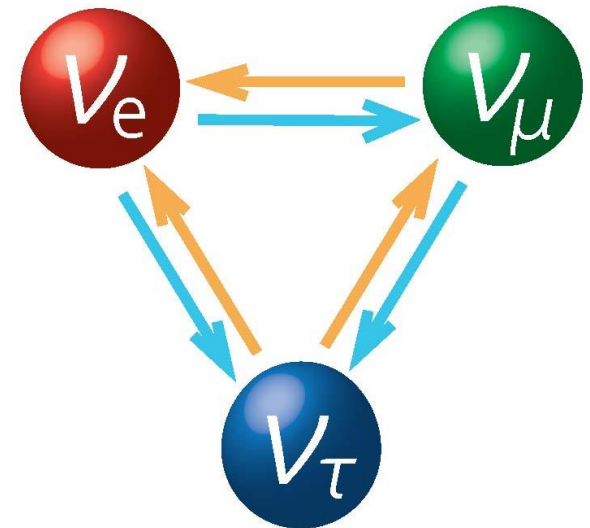
ニュートリノ

- 素粒子の一種
 - 物質の最小構成物
- ニュートリノ
 - 電荷を持たない
 - 弱い力と相互作用する
 - ニュートリノの質量は0と考えられていた

	第一世代(first)	第二世代(second)	第三世代(third)
LEPTON	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ
QUARK	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム

ニュートリノ

- 予測されたニュートリノの数より少なくなる現象が存在
 - 太陽ニュートリノ問題・大気ニュートリノ問題
- 別の種類のニュートリノに変化してるのでは??
 - ニュートリノ振動
- 質量が存在しないと起こらない現象



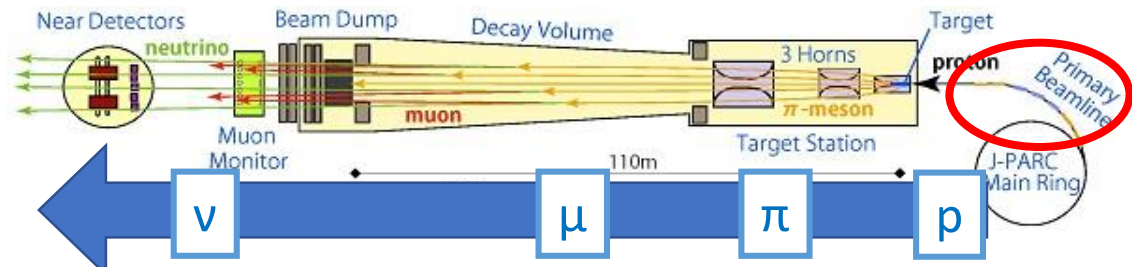
標準理論の範疇を超えてる

T2K

- ニュートリノ振動を見るために
 - SKとJPARC側とでニュートリノの個数を比較
 - ニュートリノは電荷がない→検出できない
 - 強い力(原子核を構成する力)も働かない
- じゃあどうする？
 - 電荷を持つ粒子を検出し、間接的に見るしかない
 - ニュートリノが物質に当たって出る
 - しかし、ニュートリノは物質と反応しにくい

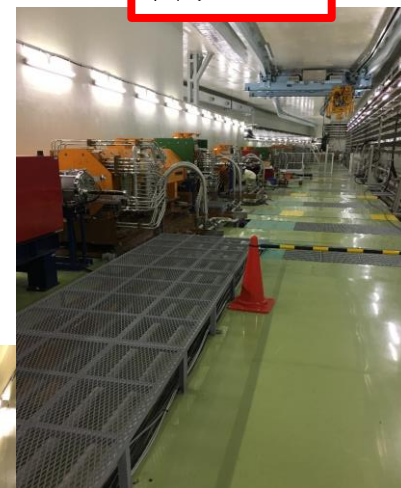
当てる対象をデカくして、ガンガン打ったらいつか反応する

Beam line



- どうやってニュートリノを飛ばす？
- Primary beam line (一次ビームライン)
 - 陽子ビームが曲げられていく (Super K方向に)
 - 2極や4極の超電導磁石によって収束・曲げる
 - 標的に当てて μ を生成 (ν の元)

曲げはじめ



ターゲット方向

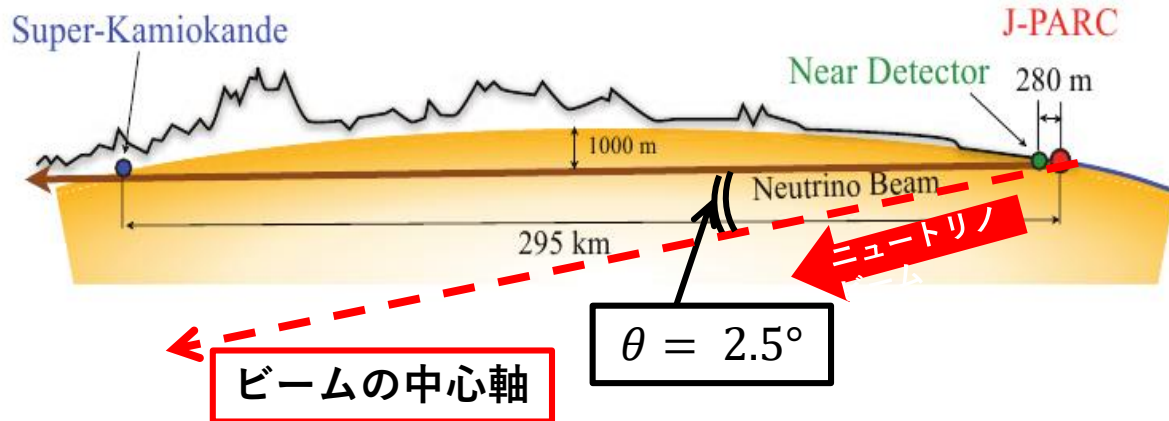
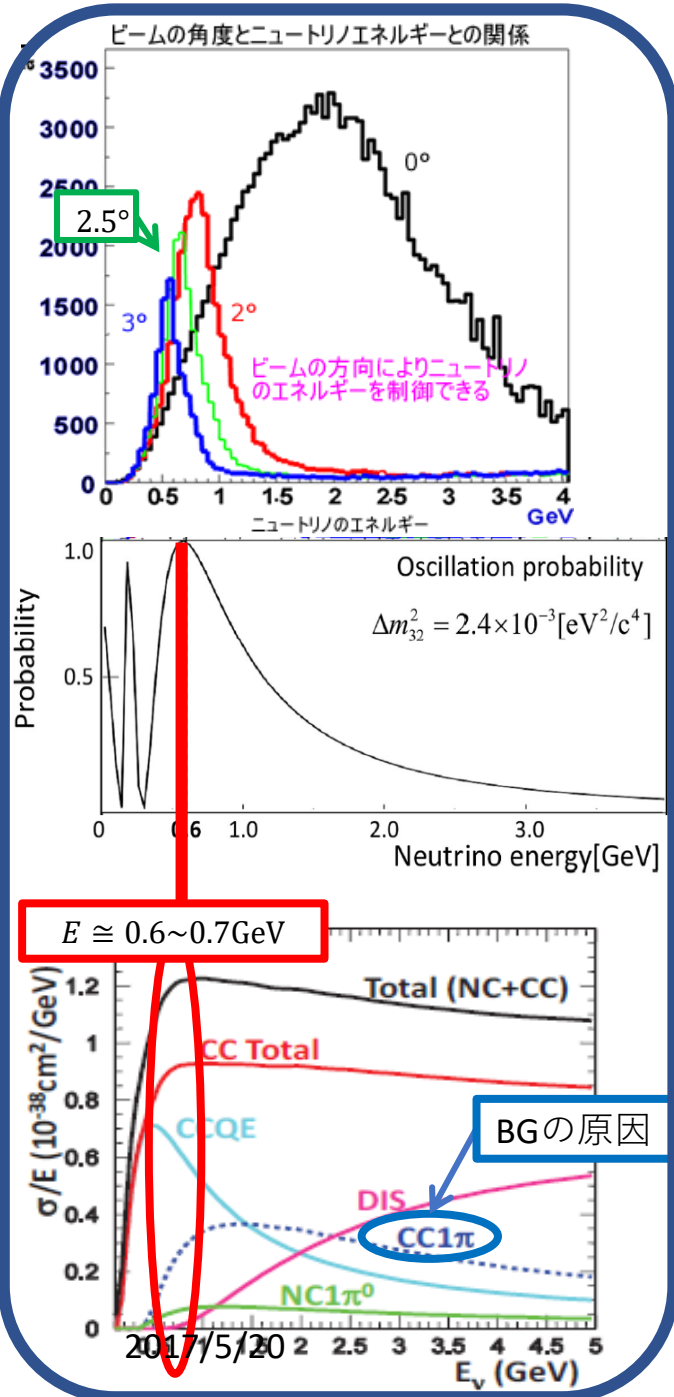


ビームモニター



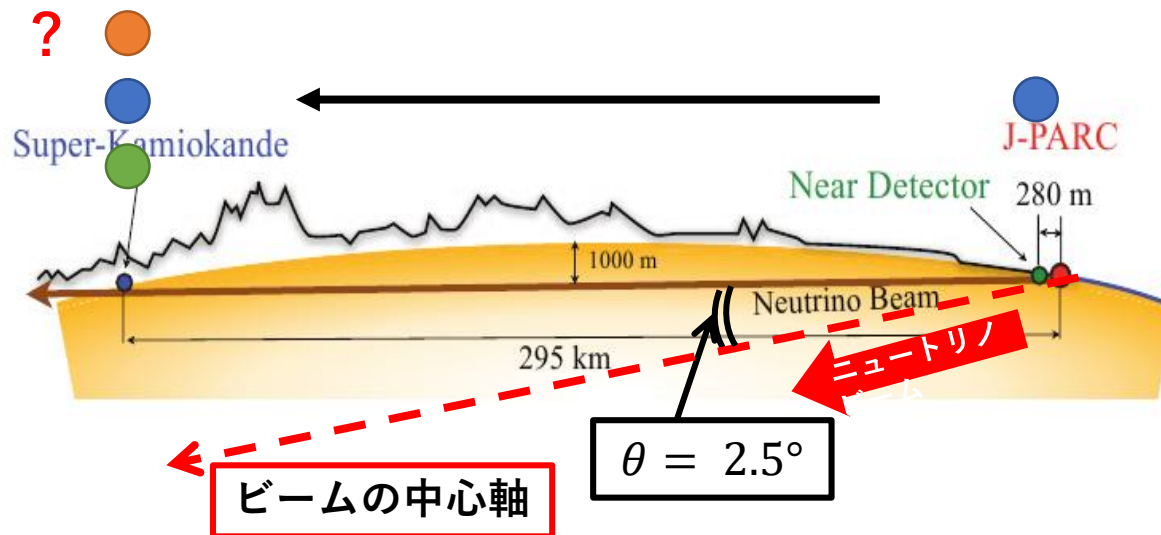
T2K実験

- 効率を上げるために...
 - ビーム中心を2.5°ずらす→off-axis法
 - ニュートリノビームエネルギーが鋭くなる (0.6~0.7GeVにピーク)
 - ニュートリノの振動確率が最大
 - バックグラウンドを抑制



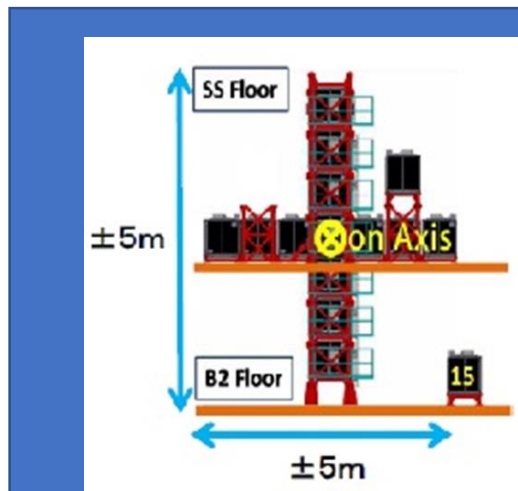
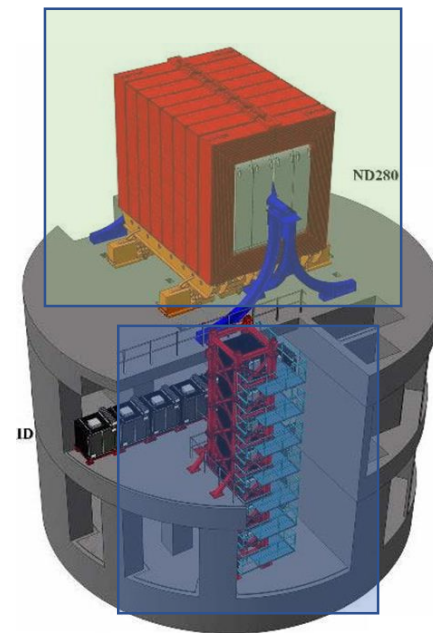
振動現象

- 前置側と後置側での違いを見る
- 振動しないと仮定したときとの差を見る



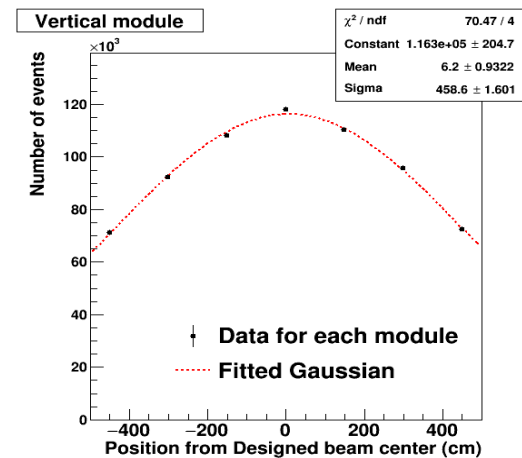
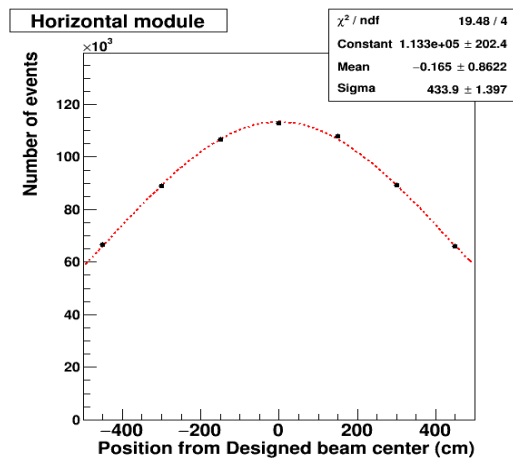
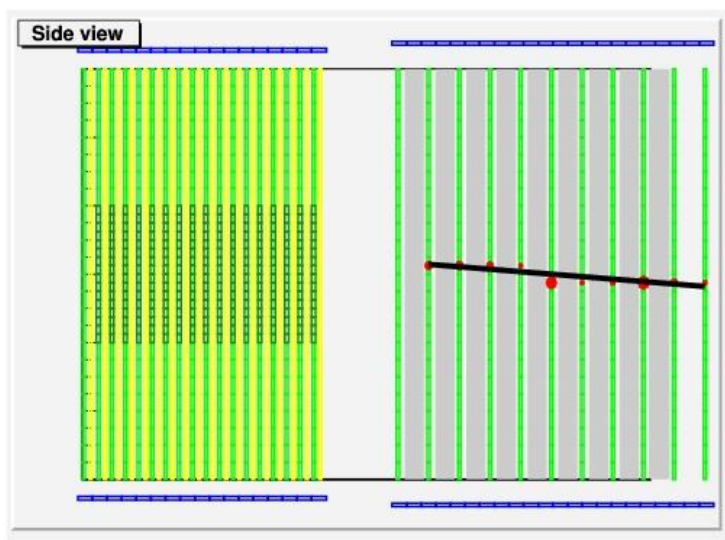
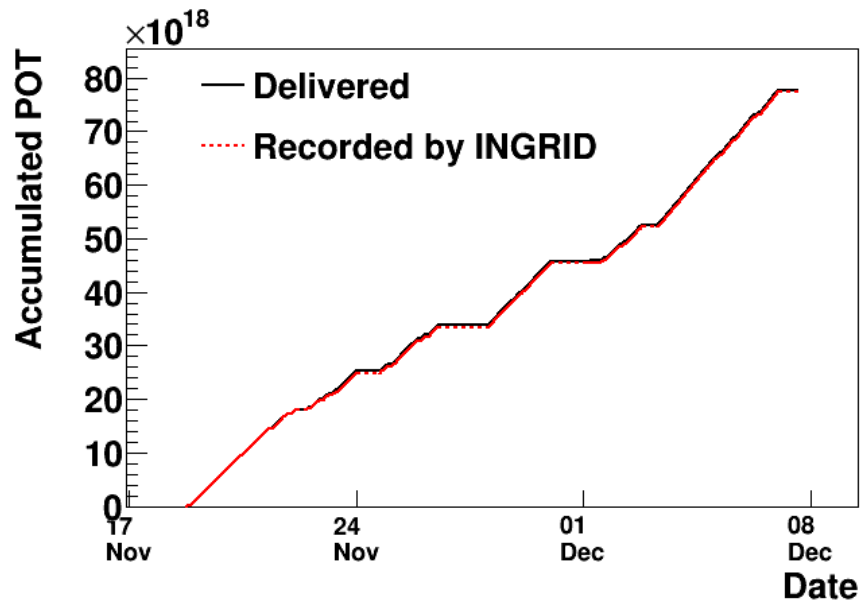
T2K 前置検出器

- ND280
 - 振動前のニュートリノフラックスの測定
- INGRID
 - ニュートリノビームの安定性と方向の監視
 - ビーム軸上に設置



INGRID

- INGRIDの測定データ
- 高精度で中心をとらえてる

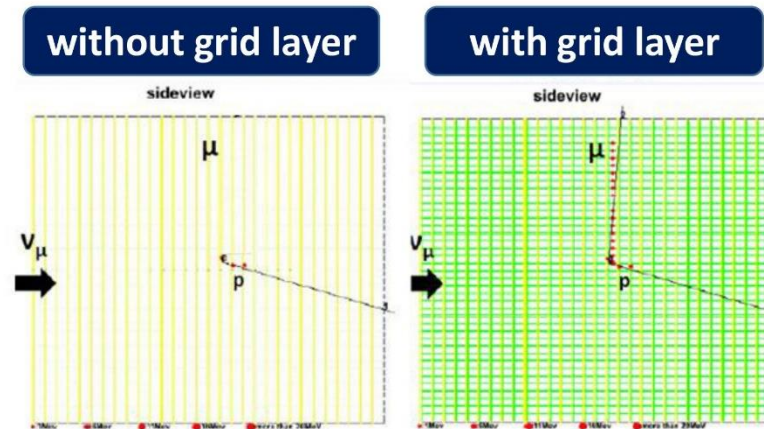


Wagasci (検出器)

- シンチレーターを三次元的に組み合わせる
- 和菓子の箱に似ていることからこの実験名になった
- 構造上、検出範囲（アクセプタンス）が大きい (4π)

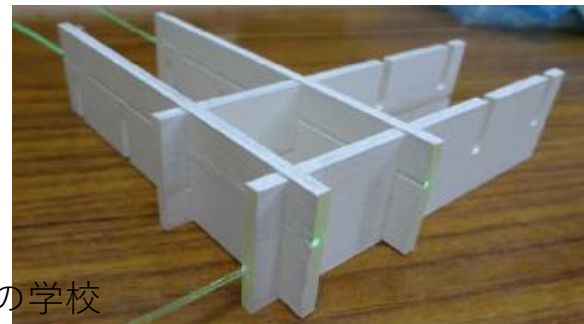
- 格子構造を持つ方は大角度方向も再構成できている

和菓子(の箱)



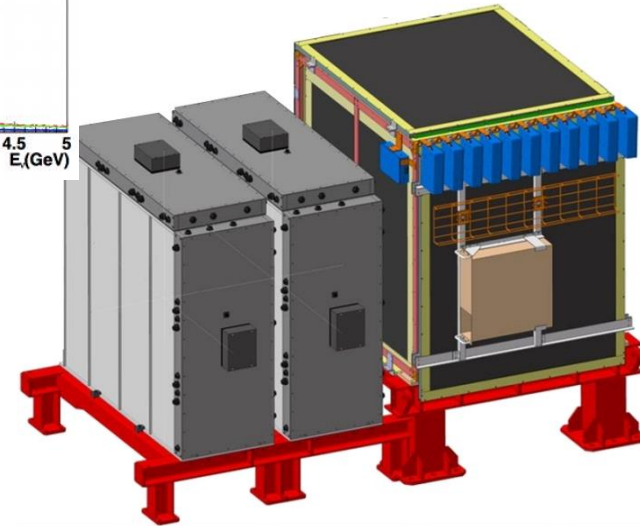
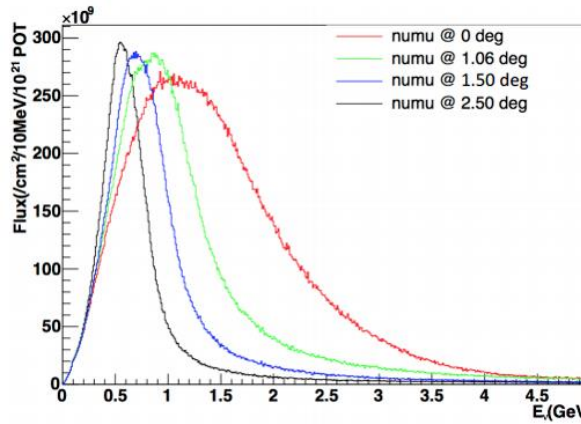
2017/5/20

第7回高エネルギー 春の学校



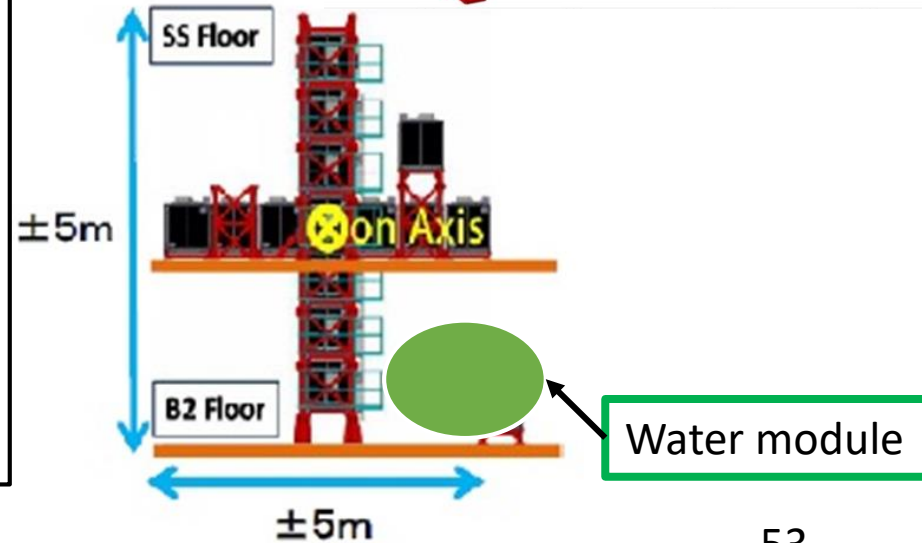
検出方法

- 薄いシンチを格子状に組む
 - 大角度散乱もとらえられる
 - 薄くすることで標的（水）の質量が大きくなる
- 荷電粒子がシンチを光らせる
 - MPPCへ



$$\sigma_{H_2O} = \frac{N_{obs} - N_{BG}}{\phi \cdot T_{H_2O} \cdot \varepsilon}$$

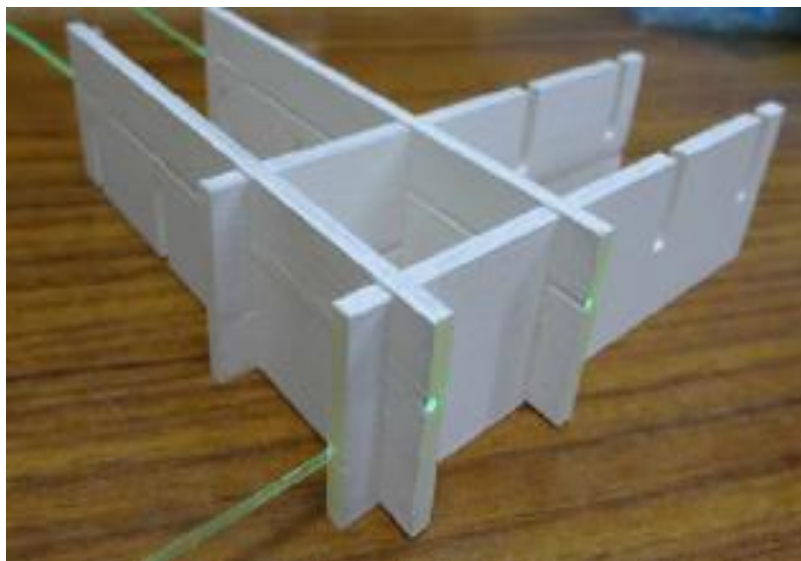
- N_{obs} : 観測されたイベント数
 N_{BG} : BGのイベント数
 ϕ : ニュートリノフラックス
 T_{H_2O} : 標的原子核数(H_2O)
 ε : 検出効率



Wavelength shifting fiber

Y-11 type fibers (Kuraray)

- Multi-clad structure



直径	1.0mm
Core の屈折率	1.59
Inner cladding の屈折率	1.49
Outer cladding の屈折率	1.42
最大吸収波長	430nm
最大発光波長	460nm
減衰長	~3m

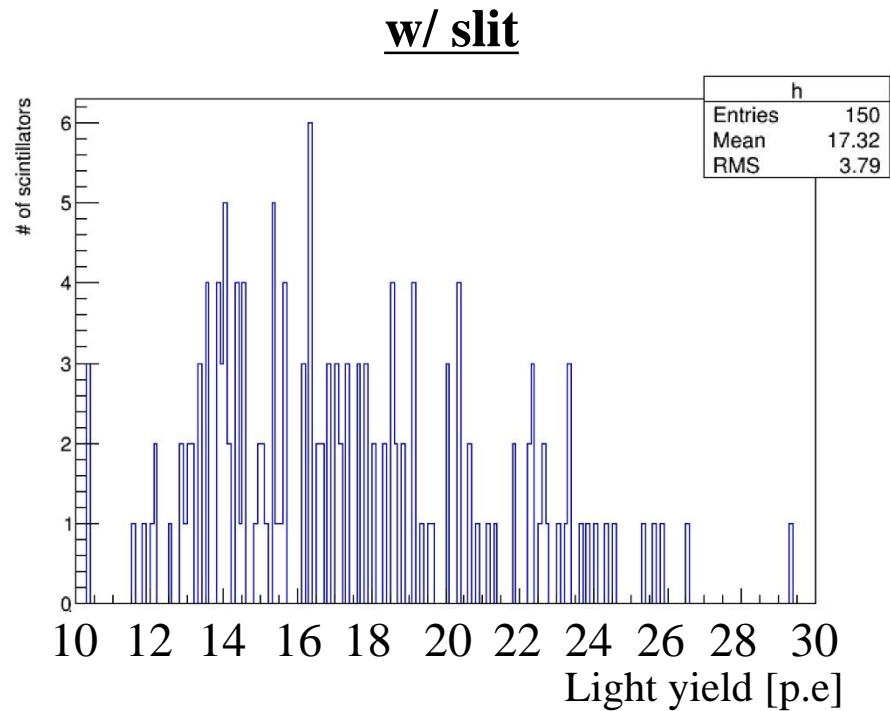
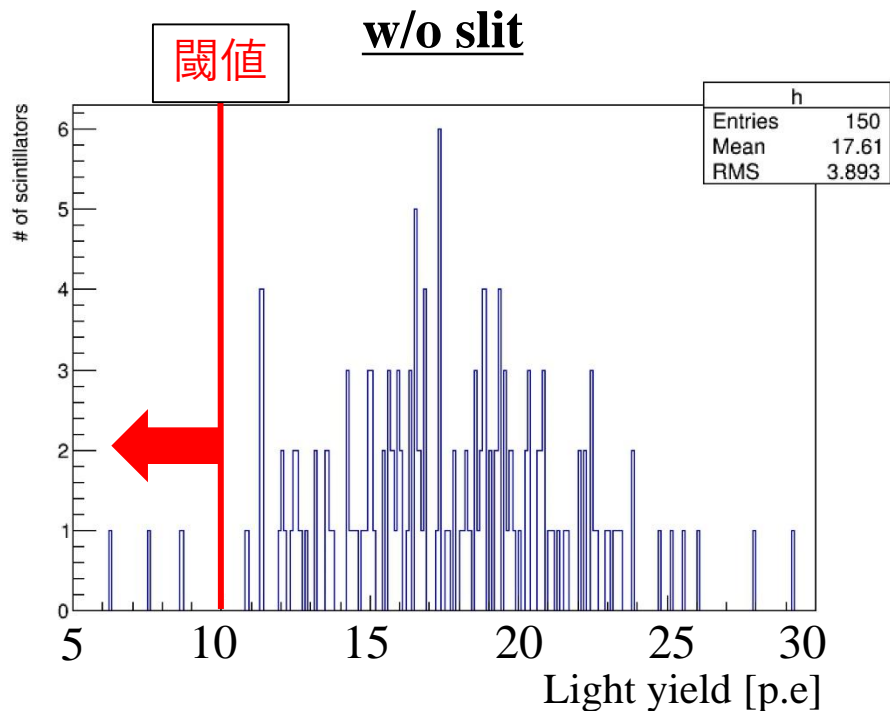
Sorry for Japanese...

シンチ・ファイバー接着 黒塗料

- シンチとファイバーを接着
- 反射材で覆い、光を効率よく運ぶ



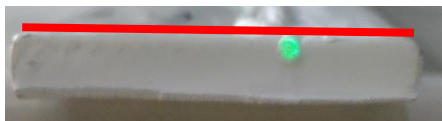
Light yield measurement by cosmic-rays



	Mean [p.e.]	RMS [p.e.]
w/o slit	17.6	3.5
w/ slit	17.3	3.8

Result

300本中3本が閾値の10 p.e.を下回った。
原因: シンチレータの溝からファイバーが浮き出たことによるファイバー受光面の減少



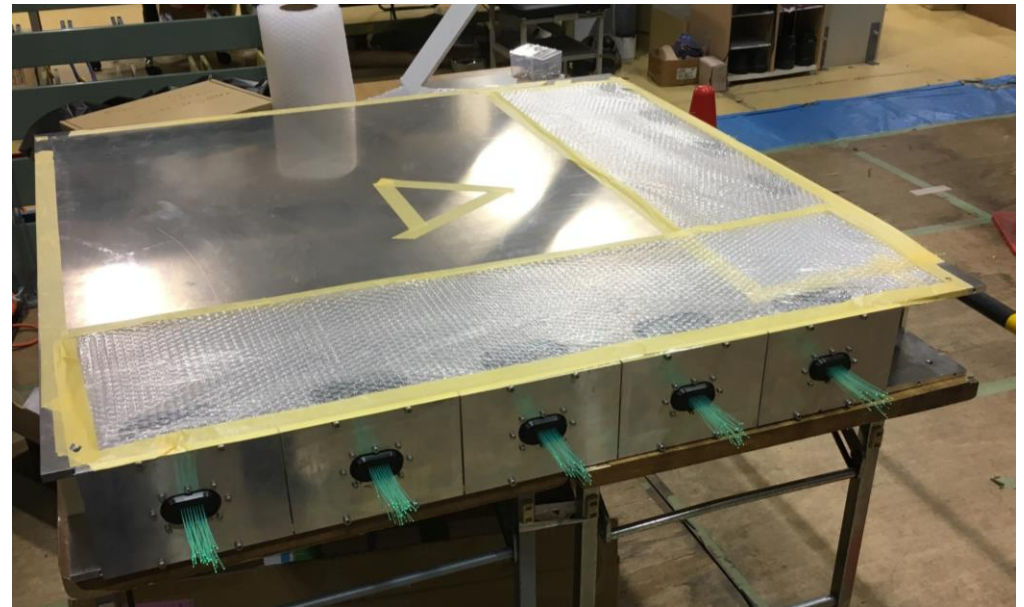
ファイバー浮きなし



ファイバー浮きあり

WAGASCI建設

- シンチレーターを格子状に組み、



2017/5/20

第7回高エネルギー 春の学校

Sub-module

- 1 sub-module : 4 layer (320 scintillators)
 - X-layer + y-layer
 - # of scintillator per layer : $20(\text{grid } x) + 20(\text{grid } y) + 40(\text{plane})$

