

# 液体アルゴンTPCのための 信号読み出し回路開発

2014/08/12

横浜国立大学 大学院工学府  
博士課程前期 物理情報工学専攻  
物理工学コース PEDプログラム  
中村研究室

学籍番号：12GD239

氏名：岩崎裕也

担当教員：中村正吾、柴田槇雄、片寄祐作



Developed with KEK e-sys group,  
one of Open-it projects.

<http://openit.kek.jp>



# 1

## 液体アルゴンTPCとは

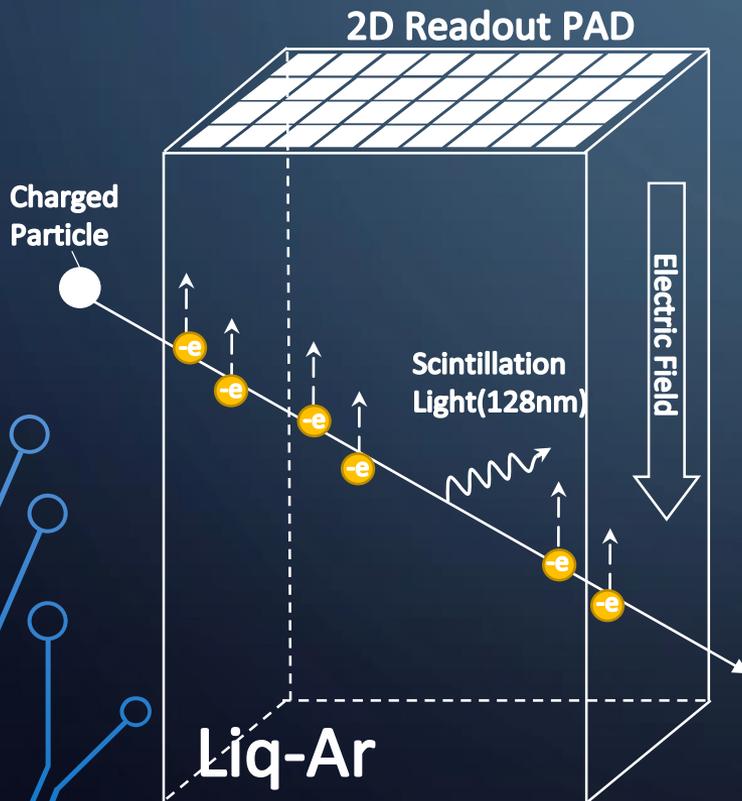


# Feature of Liquid-Argon-TPC



## 3次元飛跡イメージング検出器

2次元陽極読み出し+ドリフト時間情報  
を使用し、3次元飛跡再構成が可能



### 局所的なエネルギー損失の測定

$dE/dx$ と飛跡、飛程による粒子識別

### 高位置分解能( $\sim 1\text{mm}$ )

正確な事象形態の測定

### エネルギー再構成能力

# Research & Development of Liquid-Argon-TPC



将来のニュートリノ振動実験での使用が検討されている…

100ktonクラスまで大型化する必要がある



電子のドリフト距離を長くしなければいけない

• 液体アルゴン中の不純物(酸素、水素)は電離電子をトラップする。

• 検出する信号が微小である  
~1 fC/mm (Minimum Ionization)



Research & Development

**High  
Purity**

**High  
Voltage**

**Readout  
Electronics**

## 2

検出器の大型化における  
読み出し回路への要求

# Requirement of Liquid-Argon-TPC



## 高ゲイン

数十mV/fC程度のゲインが必要となる

## 低ノイズ

数fCの信号をSN比が10以上で読み出す

## 多チャンネル

100ktonの検出器では、2D readout PADのサイズが120m×120m程度となり、総チャンネル数は約1400万チャンネルとなる

Feed through cable の静電容量がノイズを大きくさせる要因となる。

大量のFeed through cableの取り回しの複雑さ、低温環境への悪影響

液体アルゴン温度(-185°C)で動作可能な読み出し回路を開発したい



# 3

## 読み出し回路開発



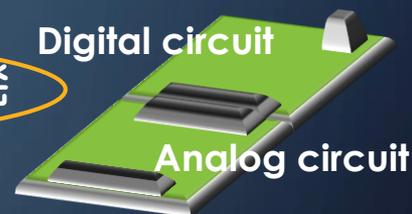
# Development Process of readout circuit

7

## Phase 1

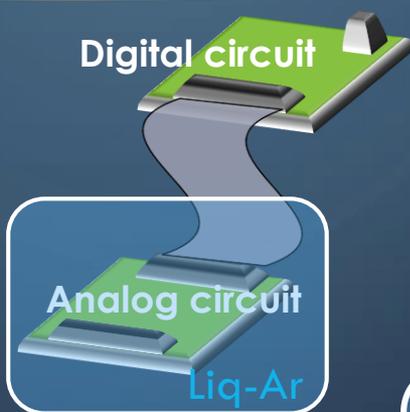
独自のDAQシステムを開発する

常温動作するAnalog circuit と Digital circuitを開発



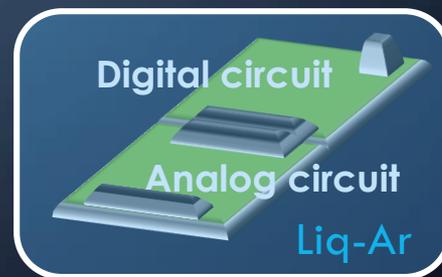
## Phase 2

低温動作する  
Analog circuitを開発



## Phase 3

低温動作するDigital circuitを開発



順にシステムを確立し、SN比10以上を達成することを第一目標とする

# Specifications of prototype circuit



## 読み出し回路構成

電荷電圧変換  
増幅、整形

+

アナログ  
デジタル変換

+

PCへのデータ転送やADC制御など様々なデジタル処理

Analog circuit

ASIC

Digital circuit

ADC + FPGA (ARTIX-7)

- \* 全32channel
- \* 入力電荷  $\geq -2fC$
- \* SN比が10以上 @検出器容量100pF
- \* ADC 2.5MHz sampling, 12bit resolution
- \* 外部トリガー入力

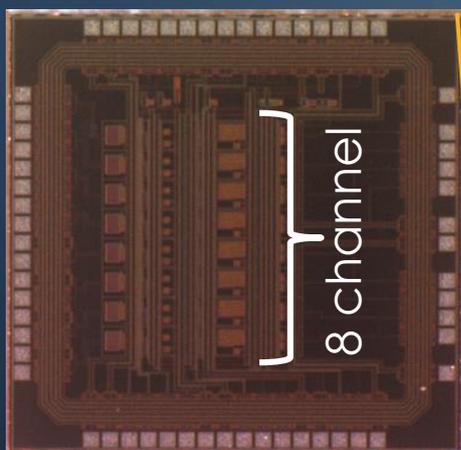
# LTARS ASIC



Low Temperature Analog Readout  
Application Specific Integrated Circuit

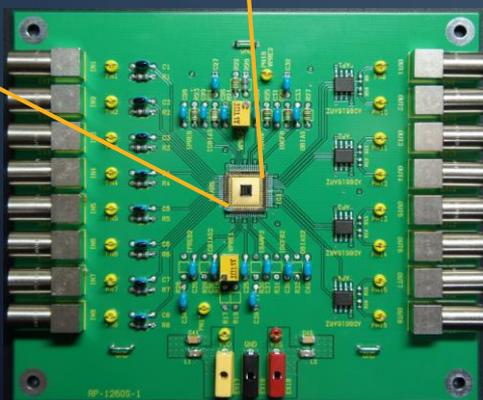
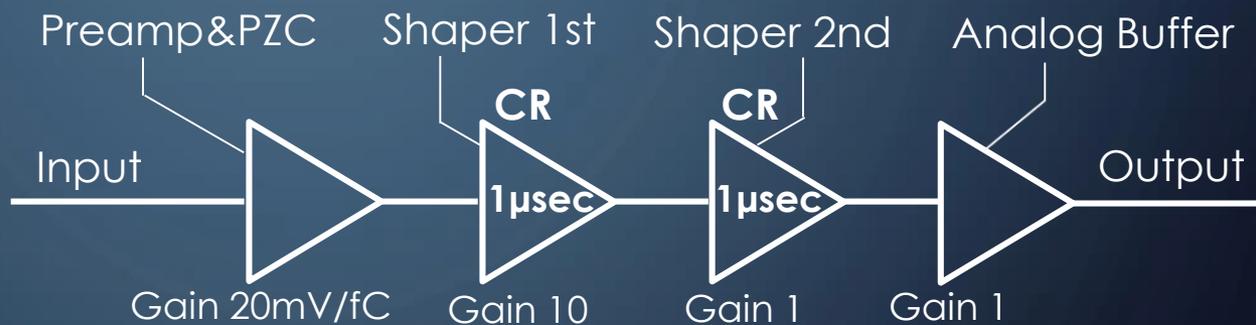
2.8mm

2.8mm

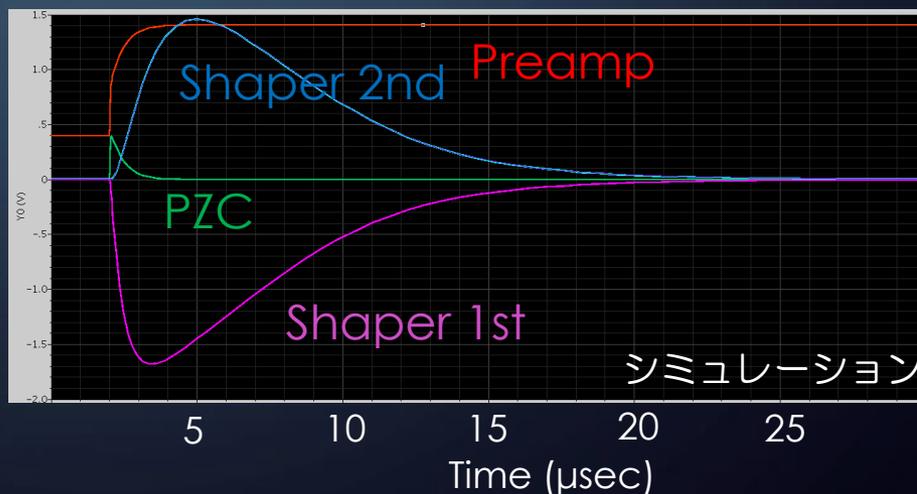


8 channel

液体アルゴンTPC用に開発された試作品  
低ノイズ高ゲインのAnalog ASIC



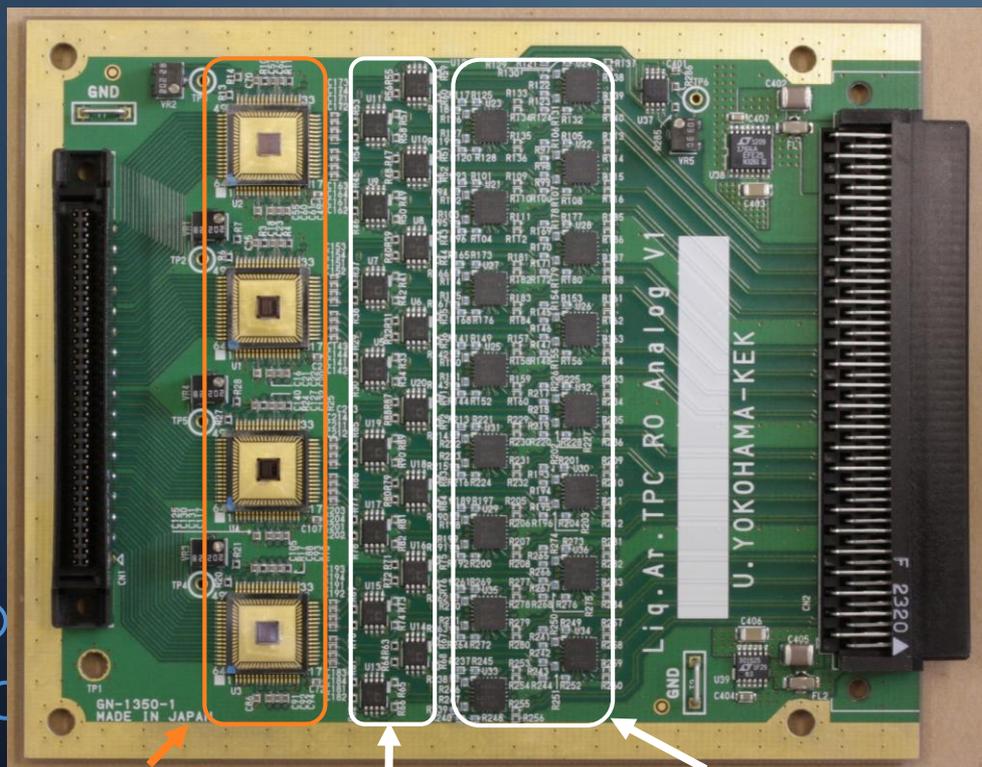
LTARS評価基板



# Analog circuit

10

110mm



LTARS

Voltage  
Follower

Differential  
Driver

LTARSを4つ実装した  
アナログ信号処理基板

最小信号に対して10以上の  
SN比を達成できていることを  
確認した @検出器容量100pF

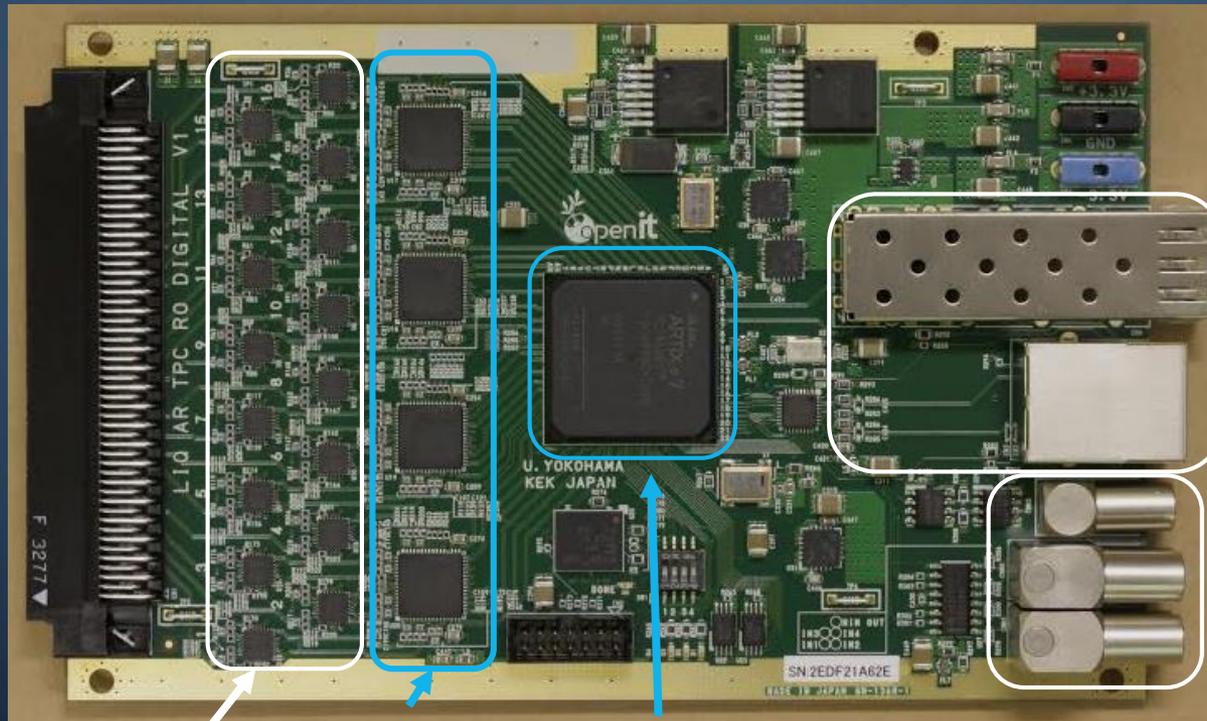


テストを行っている様子

# Digital circuit

145mm

11



Differential Receiver

ADC

FPGA

イーサネット通信機能  
ADC制御 リングバッファ等

- \* FPGAに実装するデジタル回路を開発
- \* 本基板に対応したデータ取得ソフトウェアを開発

# 4

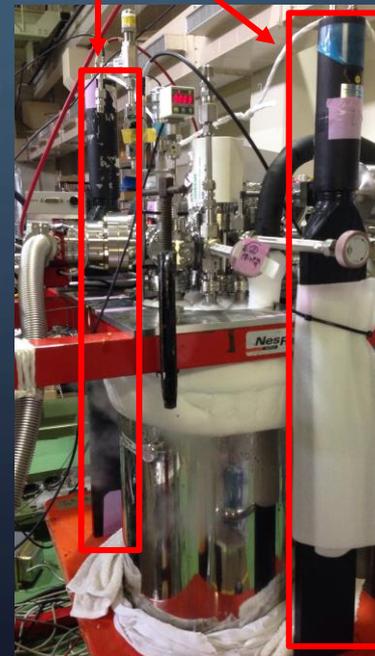
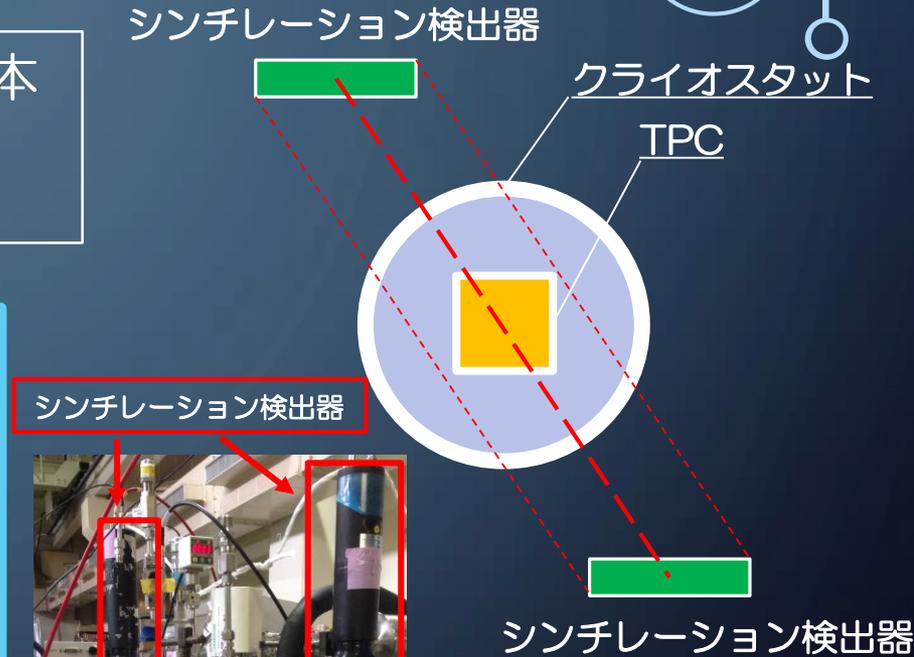
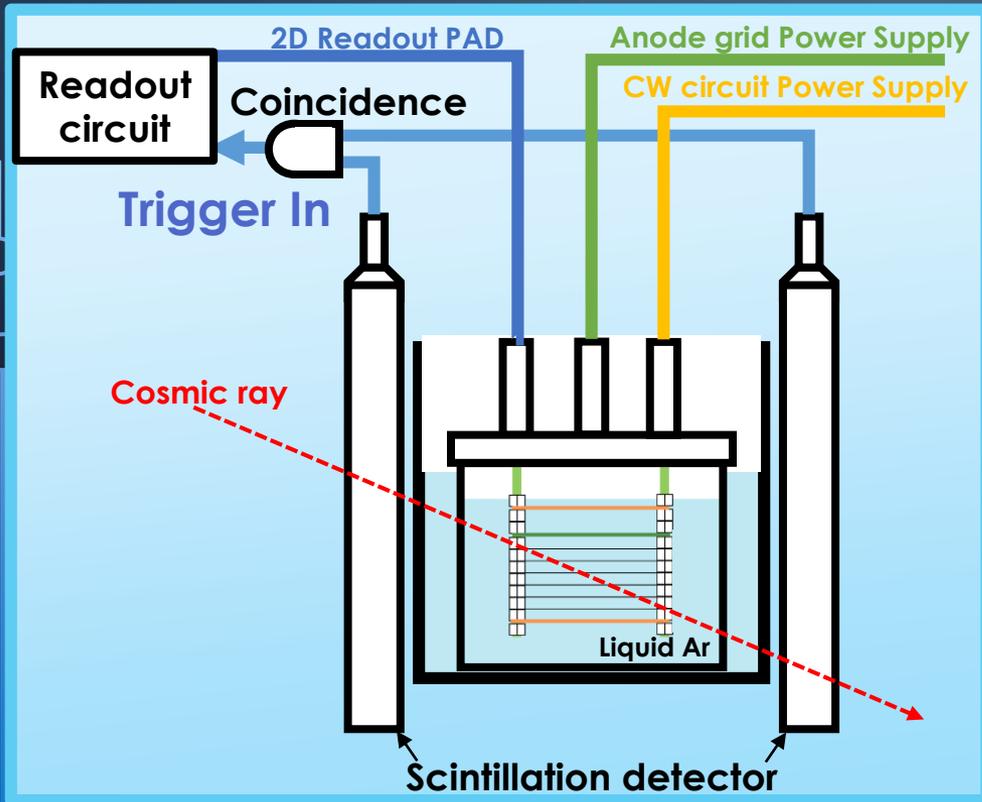
## 宇宙線データ取得実験

# Cosmic ray Trigger

of 10L Liq-Ar TPC detector

13

液体アルゴンTPCを中心として2本のシンチレーション検出器を設置し、宇宙線トリガーとして利用する。



55時間の宇宙線データ取得実験を行い16000eventのデータを取得した

# 5

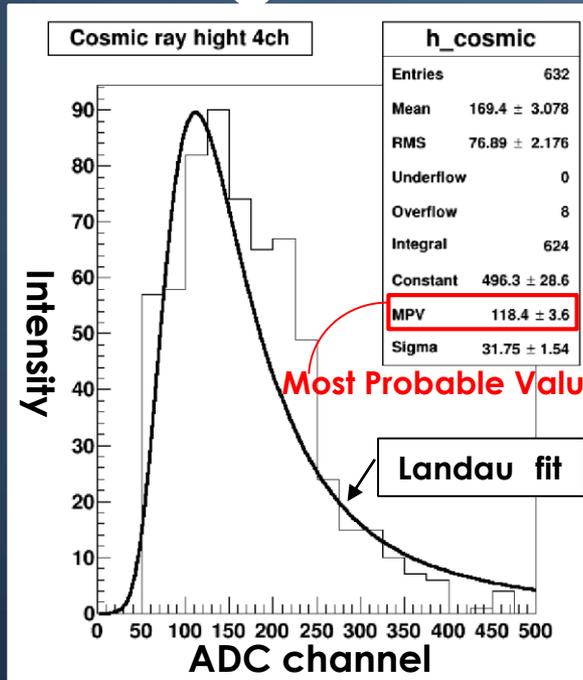
## 宇宙線データ解析



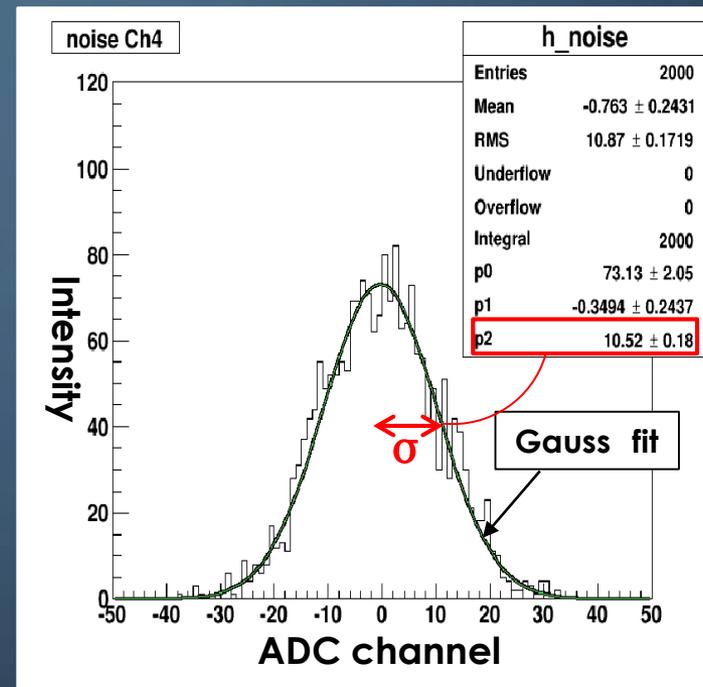
# Signal to noise ratio

15

## Signal



## Noise



118.4 ADC count

$$S/N = 118.4 / 10.9$$

= 10.7

Channel 4 に関しては目標のSN比を達成した。しかしSN比が10以下のchannelが14channel分ある…

10.9 ADC count

(30 trigger分の平均値)

これはニュートリノ事象のMIPと同等である

# 3D reconstruction of cosmic ray track

16

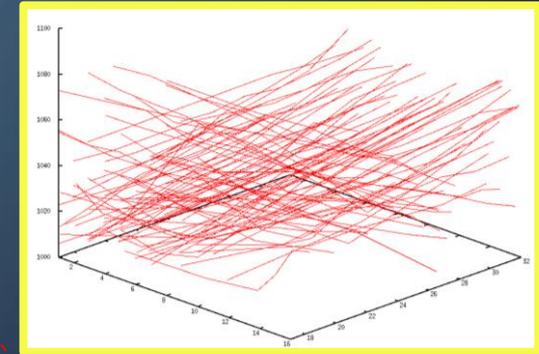
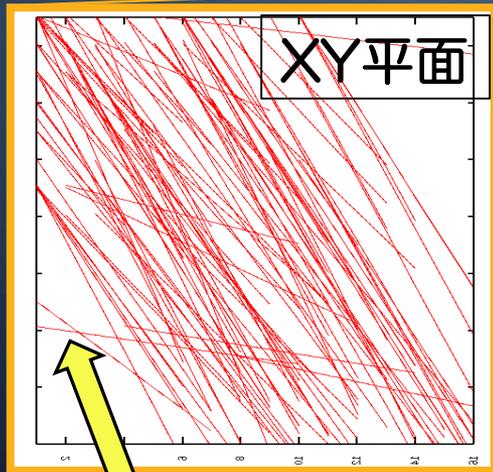
シンチレーション検出器

クライオスタット

TPC

宇宙線トリガーの位置関係により  
取得できる宇宙線の入射方向は制  
限される

宇宙線入射方向に  
対して垂直方向



シンチレーション検出器

今回の宇宙線トリガー設置位置では  
取得できないはずの入射方向の飛跡が数本程度ある  
→いくつかの要因を検討中である

# 6

## まとめと今後の方針



# Summary and work plan



## まとめ

### 読み出し回路の開発を行った

- Analog circuitはアナログ信号処理を行うLTARSを中心とした、低ノイズ、かつ高ゲインで集積度の高い基板となった。
- Digital circuitはADCやFPGAを中心として、高速データ転送やADC制御、外部トリガー入力など、コンパクトで多機能な基板が完成した。

### データ取得用ソフトウェアの開発を行った

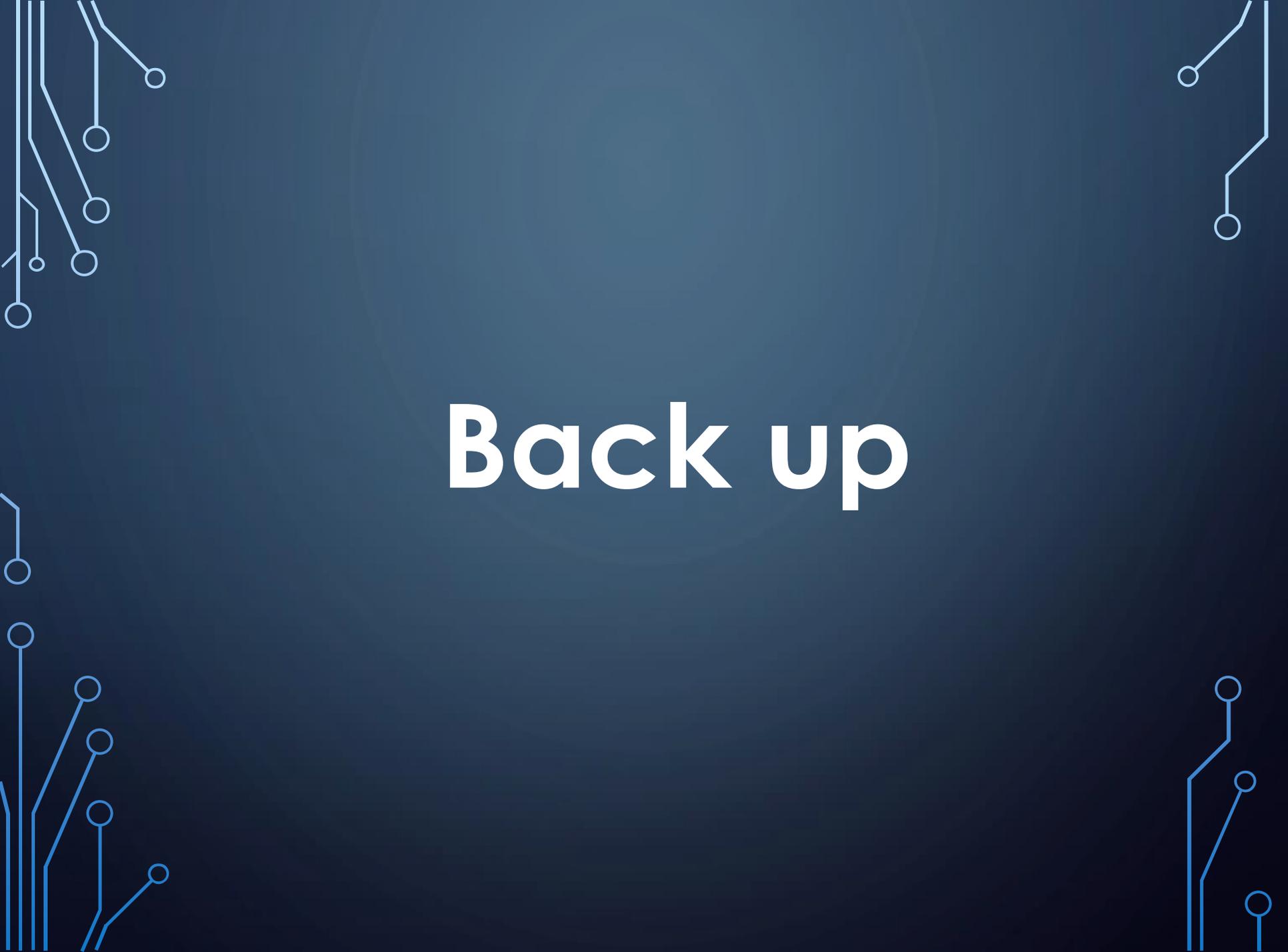
- 必要な情報を表示するリアルタイムモニタやなど、宇宙線データ取得実験を行うに十分なソフトウェアが開発できた。

### 宇宙線データ取得実験による評価

- 長時間(55時間)の安定動作を確認した。
- 18channel分についてはSN比10以上を達成できた。実験系の改良や解析手法の改善等の余地がある。

## 今後の方針

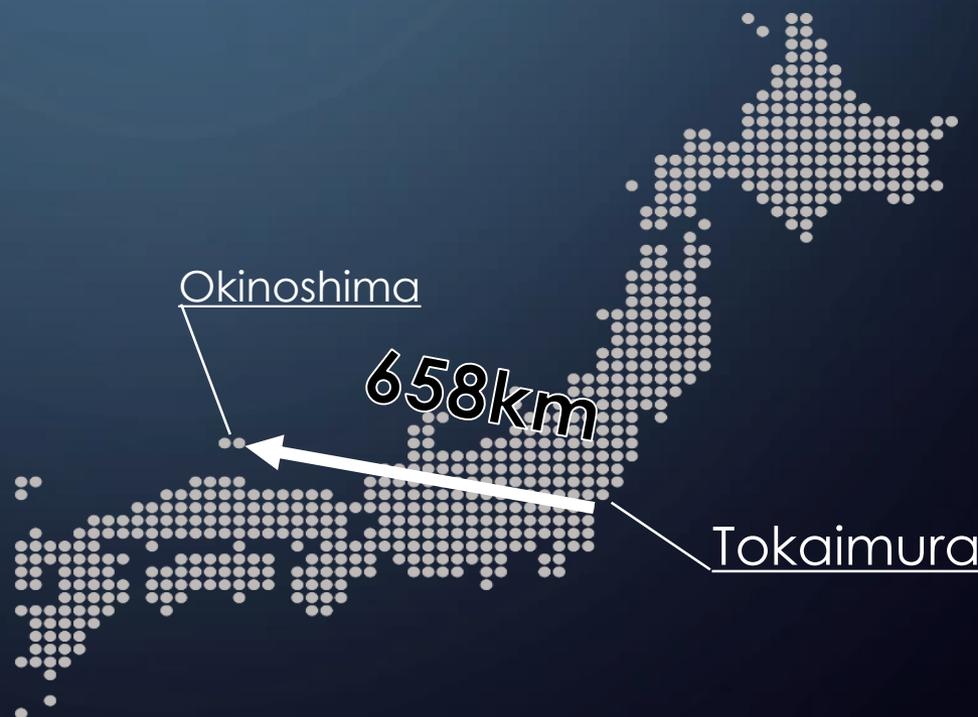
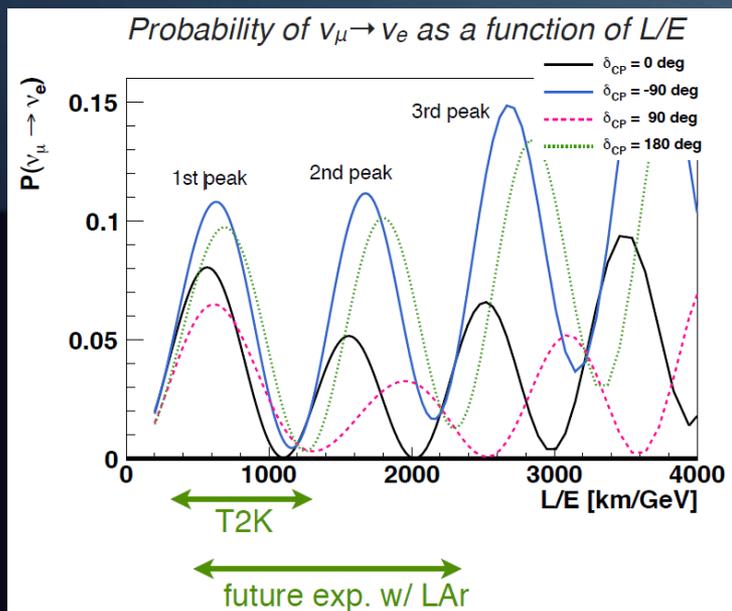
次期バージョンのAnalog circuitの開発や、LTARSの改良などが計画されている。

The image features a dark blue background with a subtle circular gradient. In the four corners, there are decorative white and light blue circuit-like patterns consisting of lines and small circles, resembling a network or data flow diagram.

# Back up

# Next generation neutrino oscillation experiment 1

東海村J-PARCからのニュートリノビームを隠岐の島の液体アルゴン測定器で検出する。これは神岡へニュートリノを飛ばすT2K実験の次期計画であり、神岡～東海村間の295kmに比べて、ニュートリノを658kmという長距離間飛ばすことにより、ニュートリノの振動現象から、レプトンセクターでのCPの証明などの宇宙創世期の謎にも踏み込める可能性がある。



# Next generation neutrino oscillation experiment 2

荷電カレント準弾性散乱 (Charged-Current Quasi Elastic, CCQE)



レプトンの運動量や方向からニュートリノの状態を知ることが出来る。

ニュートリノエネルギーの再構成が重要となる。

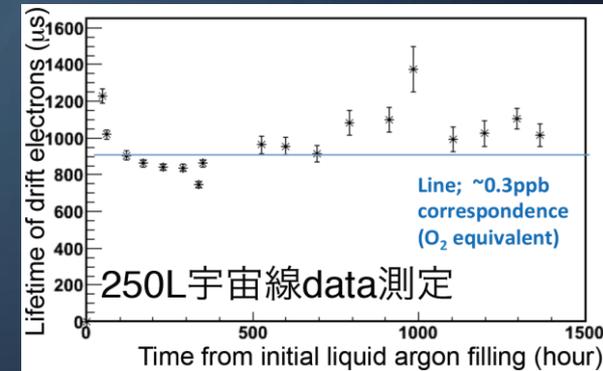
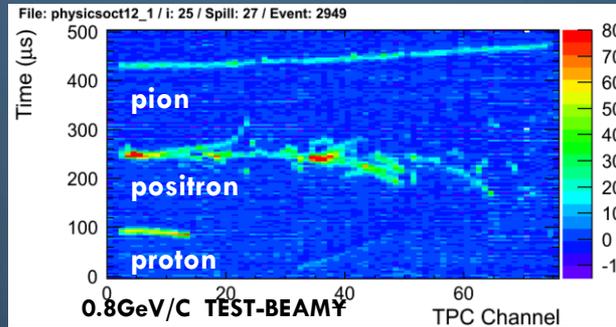
しかしニュートリノの反応はこれに加えて $\pi$ 中間子の生成を伴うものがあり、バックグラウンドとなってしまう。

液体アルゴンTPCはエネルギーが低い $\pi$ 中間子も検出可能であり、除去する事が出来る

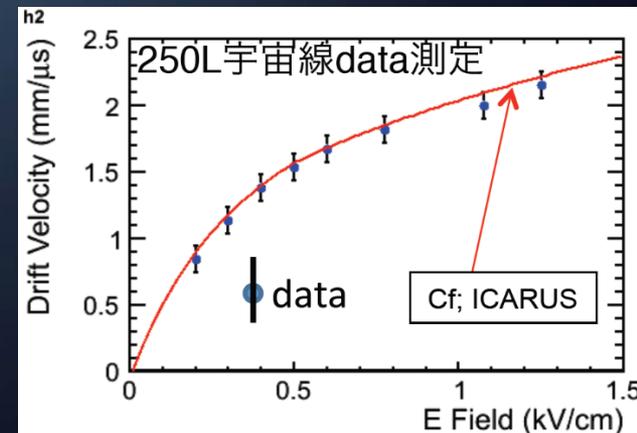
# State of R&D progress in Japan



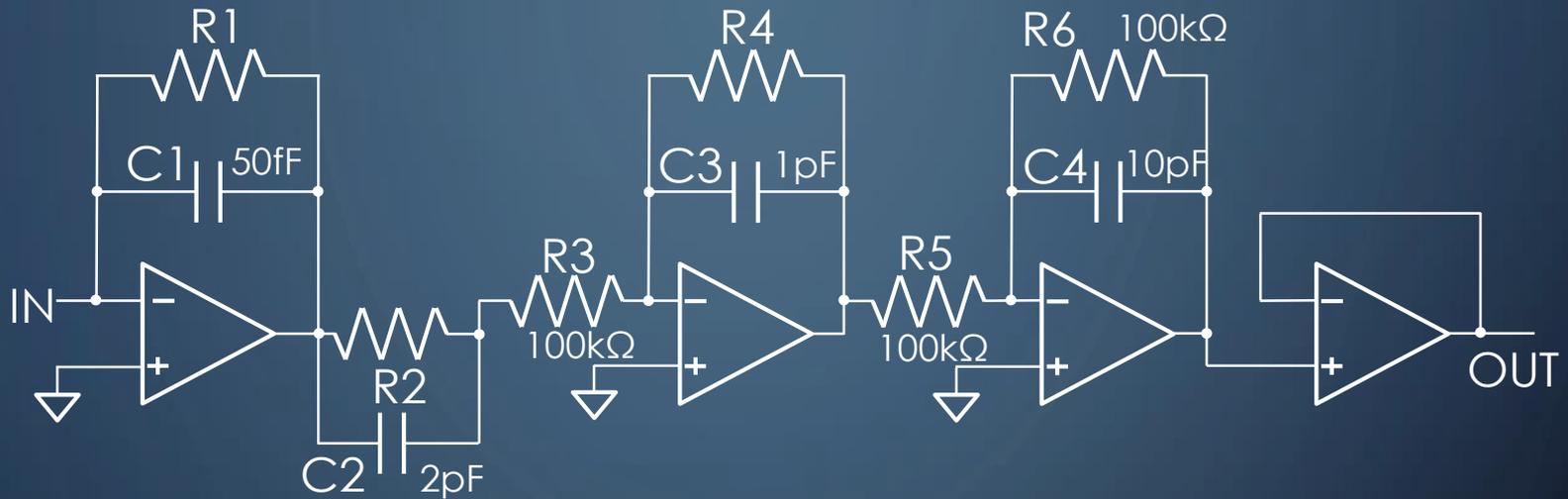
250Lテストチェンバーと10Lテストチェンバーを運用しており、さらなる大型化に向けて研究開発を行っている。



- 純度
  - ~0.3ppbの純度を長時間安定して維持  
今後 0.1ppb以下を目指す
- 高電圧
  - CWにより60kVでの宇宙線測定  
今後 -数百kVを目指す
- 読み出し回路
  - 2次元読み出しPADの開発



# Block diagram of LTARS ASIC



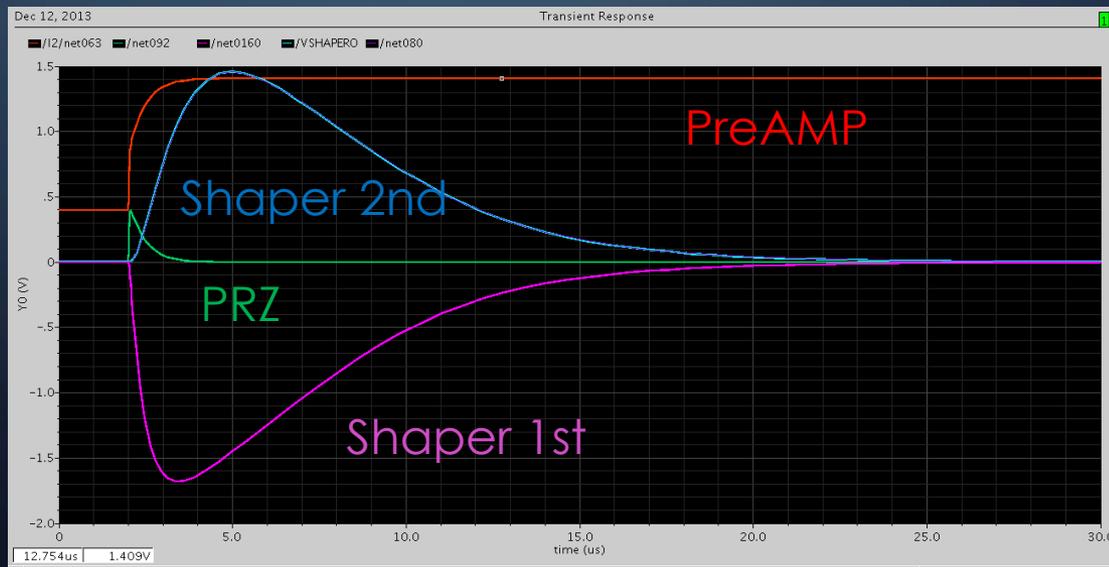
PreAMP

PRZ

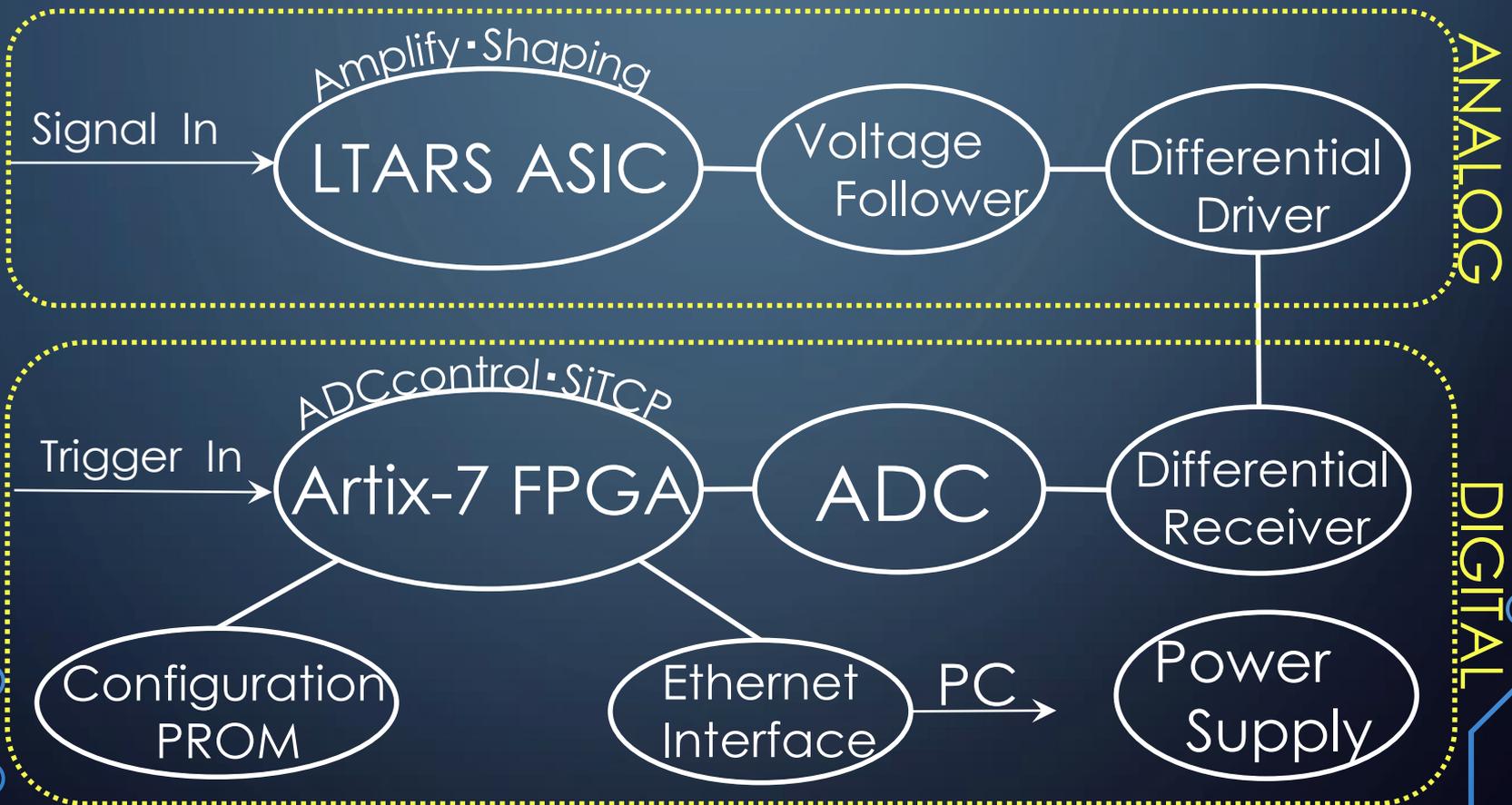
Shaper 1st

Shaper 2nd

Analog Buff

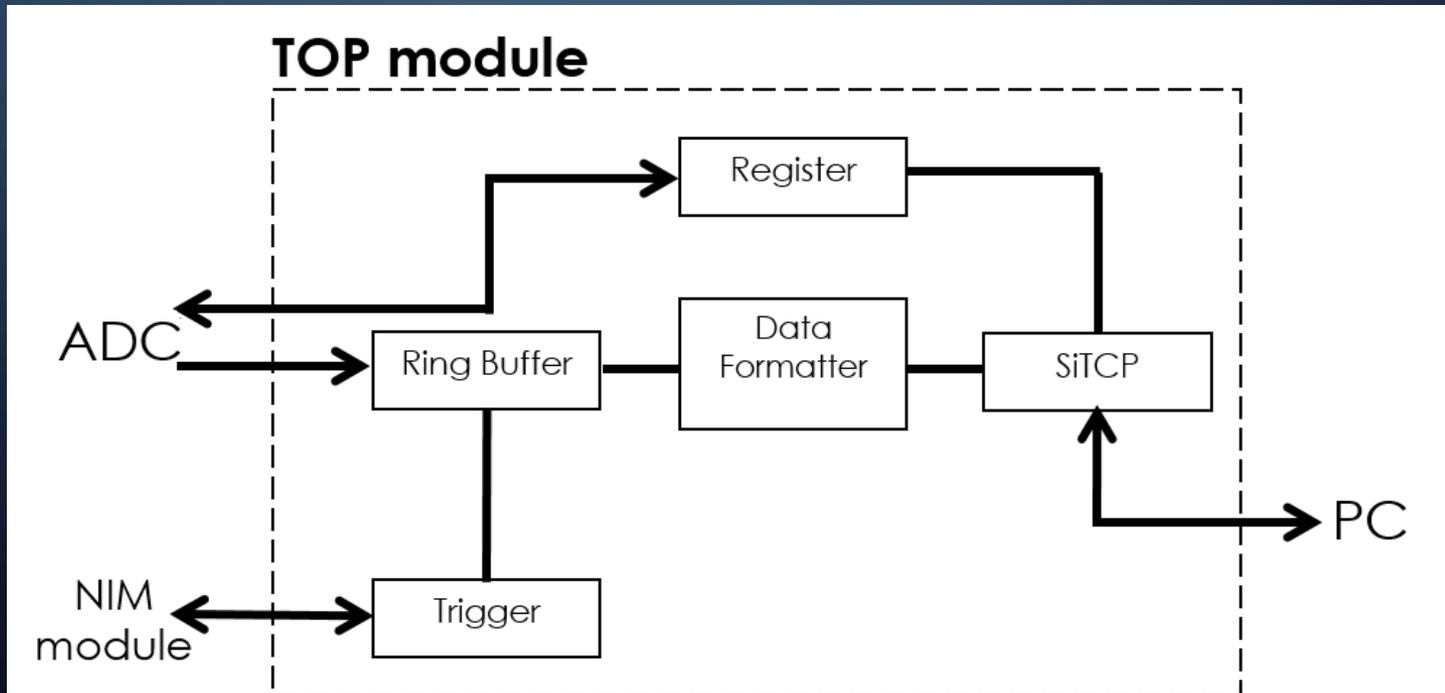


# Block diagram of prototype circuit

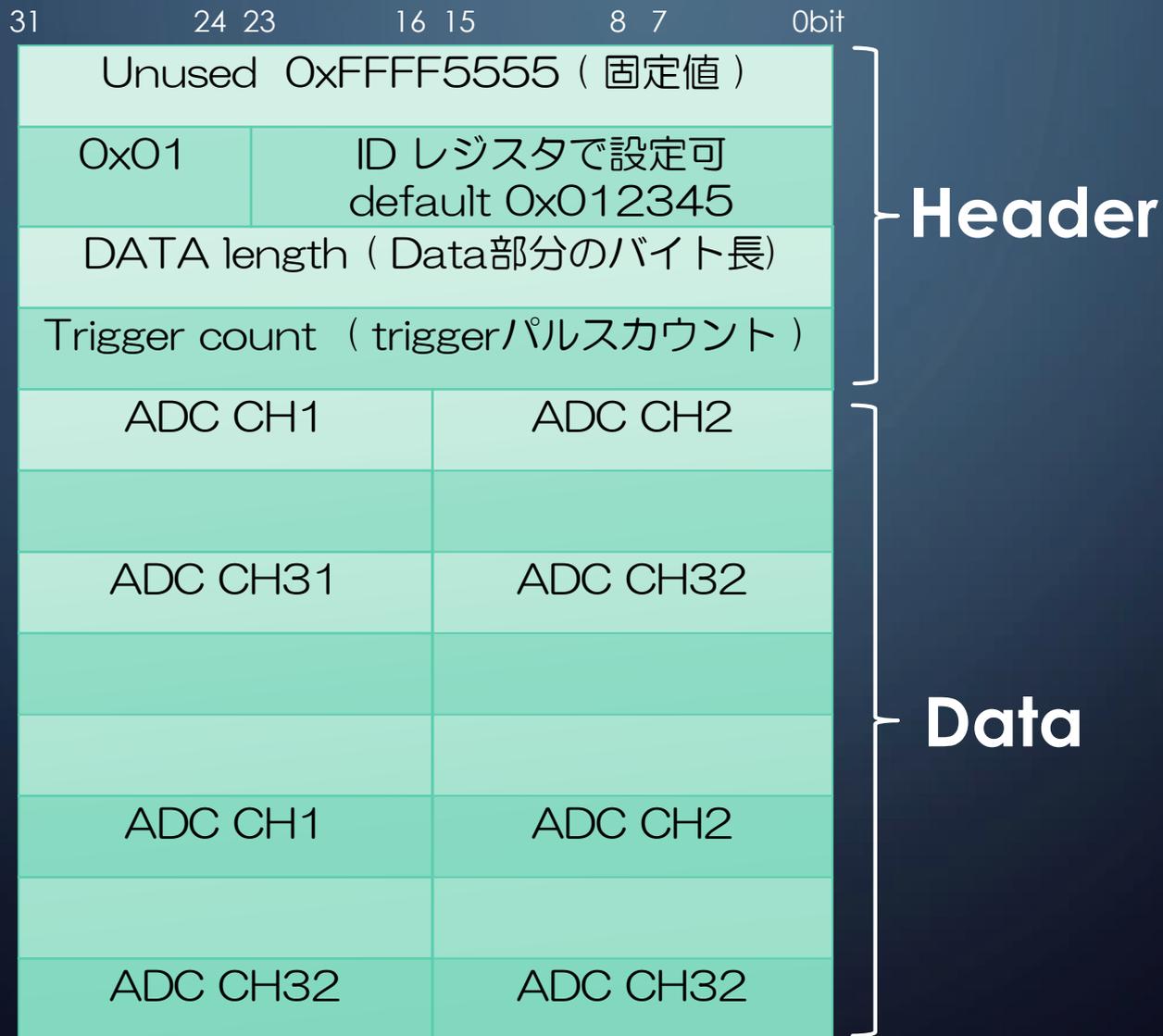


# FPGA firmware

- ADCからの高速シリアル通信
- 2.5MH sampling, 12bits resolution
- 1eventごとPCにデータを転送する
- 1eventごとに4000sample/chのデータ取得
- 取得したADCデータを決められたフォーマットへ変換
- PCへのデータ転送にはTCP通信(SiTCP)
- FPGA、ADCの制御にはUDP通信(SiTCP)
- 外部トリガーの処理
- トリガーを受信した瞬間から設定したsample数だけ過去のデータを取得する
- Ethernetケーブル(ツイストペアケーブル)にてPCと接続



# Data format



# Data acquisition software

by using DAQ-Middleware

## DAQ-Middleware framework

- 使用するコンポーネントを指定
- コンポーネント間接続情報
- パラメータ

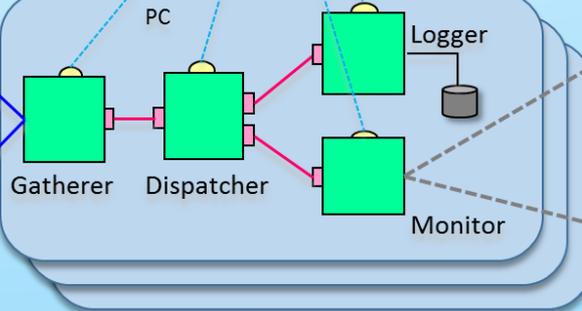
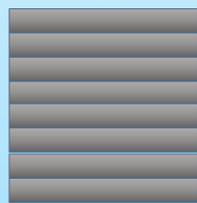
XML

System Configuration

- 装置パラメータ
- オンラインモニタパラメータ

XML/JSON

Device Condition/  
Online analysis



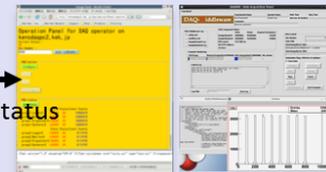
Daq Operator

mod\_python  
mod\_wsgi

HTTP Server

Command/Status

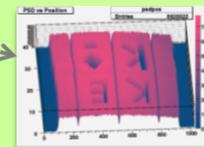
User Interface



- Control Panel on Web browser (javascript, ajax)
- Python GUI
- Command line program

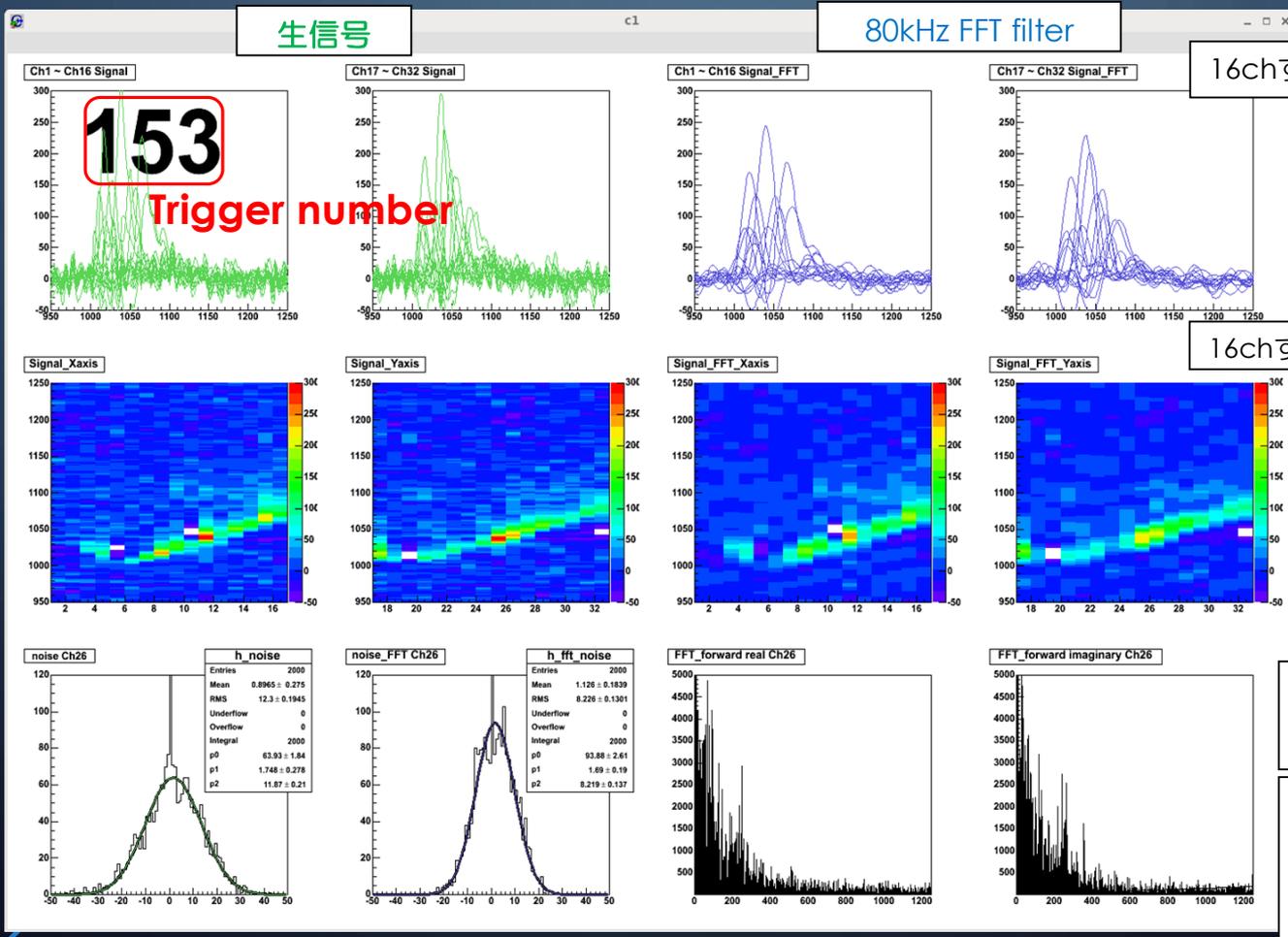


Online histograms  
on Web browser



Online histograms  
using ROOT

# Cosmic ray event



生信号

80kHz FFT filter

16chずつグラフ重ね合わせ

横軸 sample count (時間)  
縦軸 ADC count

16chずつ2次元ヒストグラム

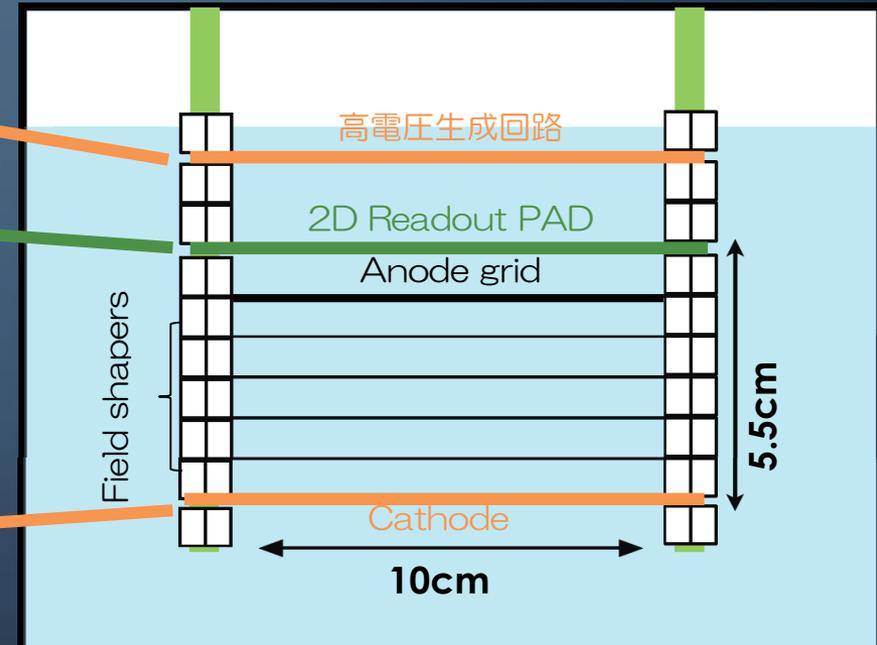
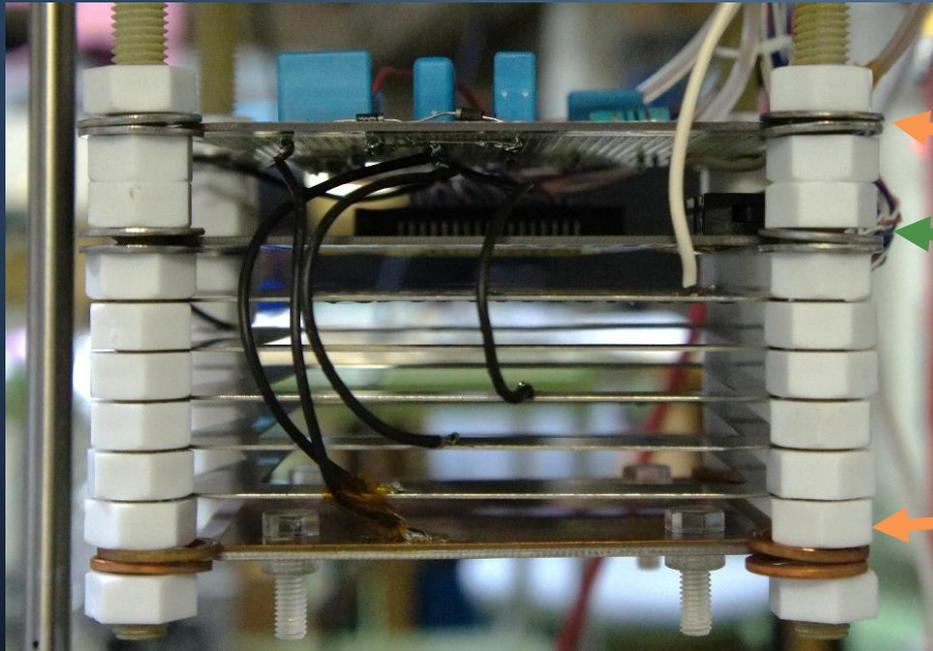
横軸 channel  
縦軸 sample count  
色 ADC count

左：ノイズヒストグラム  
左側：生信号  
右側：FFT

右：生信号のスペクトル  
右側：実数  
左側：虚数  
縦軸 power  
横軸 frequency kHz

# TPC section

of 10L Liq-Ar TPC detector

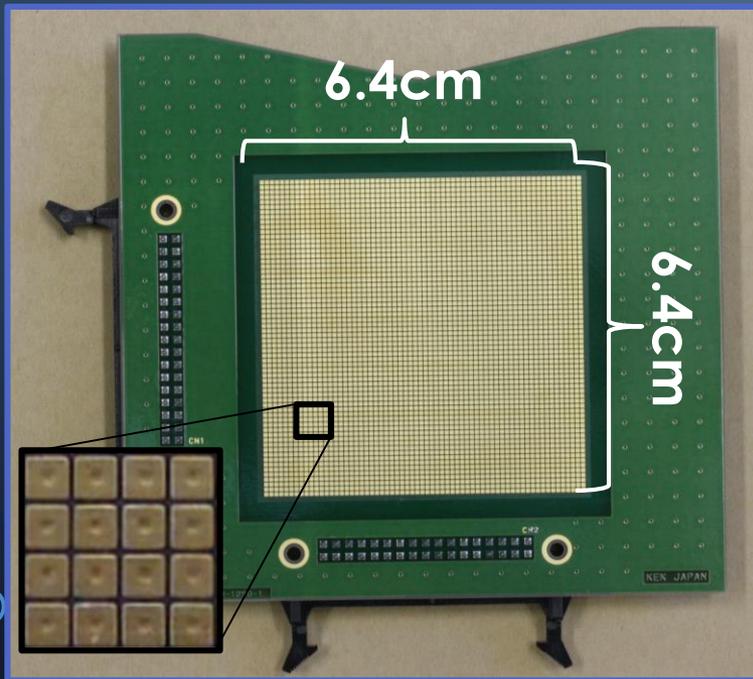


- 高電圧生成回路 : -2.5kVの高電圧を生成
- Anode grid : -1kVを印加し、信号の時間分解能を高める
- Field shaper : 均一な電場を生成する (0.5kV/cm)
- Cathode : -3.5kVを印加している

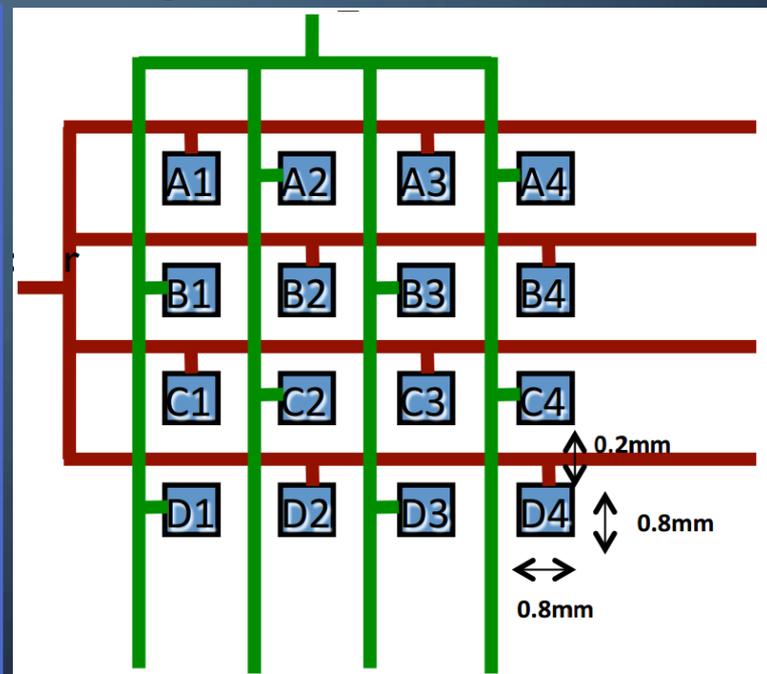
# 2D Readout PAD

of 10L Liq-Ar TPC detector

## 2D Readout PAD



## PAD pattern

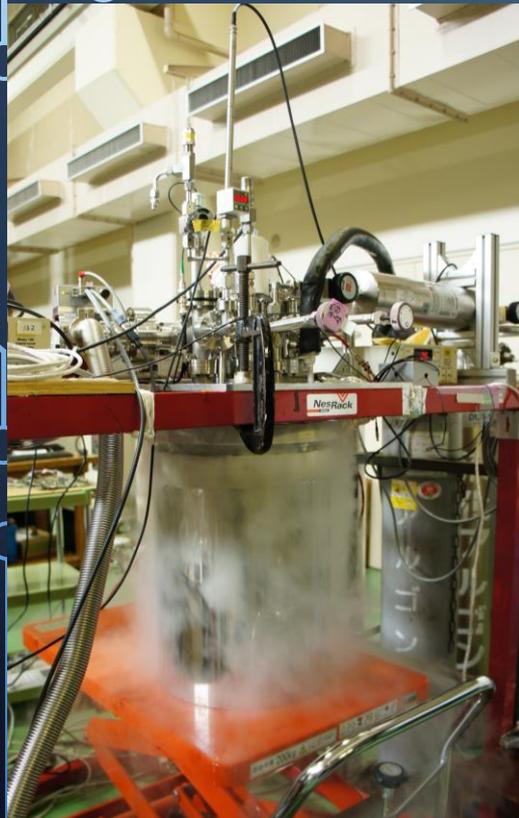


Pads  
0.8 mm  
×  
0.8 mm

Space  
0.2 mm

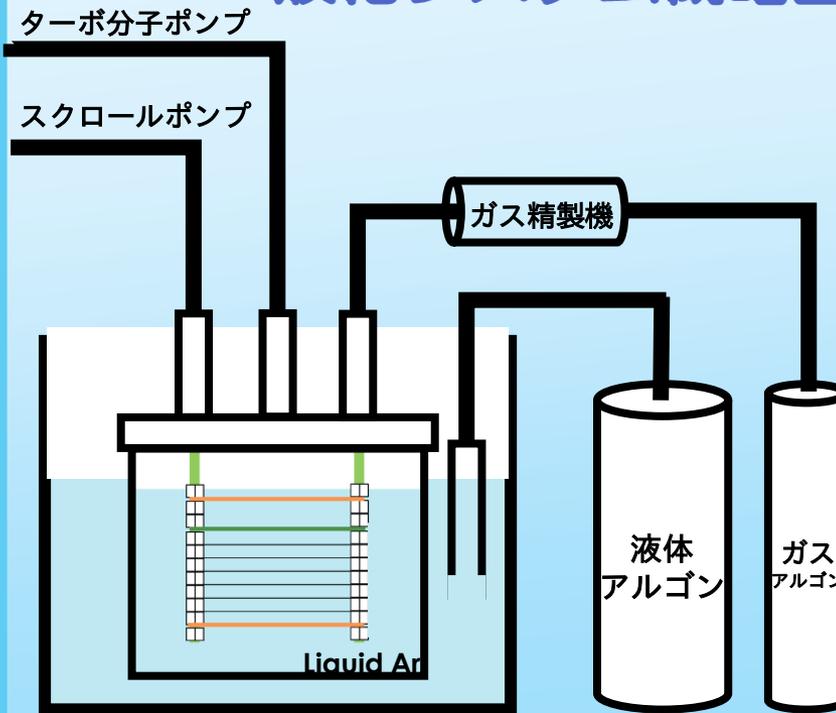
# Liquefaction system

of 10L Liq-Ar TPC detector



浴槽に液体アルゴンを注入している様子

## 液化システム概略図



$\sim 10^{-2}$  Pa  
スクロールポンプ



$\sim 10^{-4}$  Pa  
ターボ分子ポンプ



チェンバー内に  
アルゴンガス注入



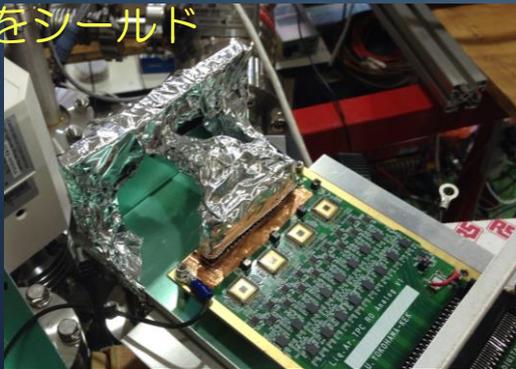
浴槽に液体アルゴンを  
注入し液化

# Readout circuit

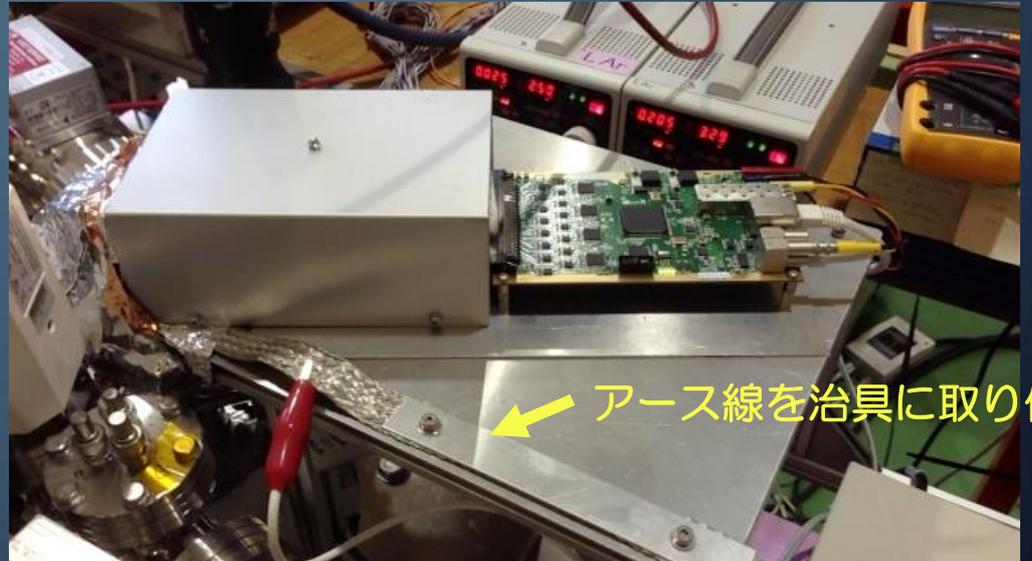
of 10L Liq-Ar TPC detector



フィードスルーケーブル  
周りをシールド



読み出し回路をクライオスタット上部に固定した



← アース線を治具に取り付けた

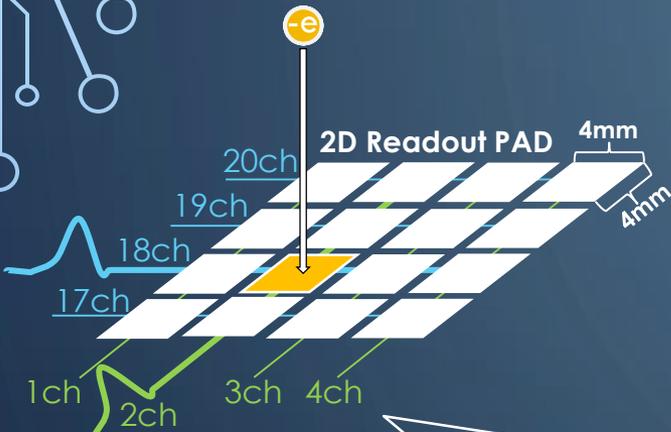


100mm

Analog boardのみ  
アルミケースでシールド



# Tracking of cosmic ray



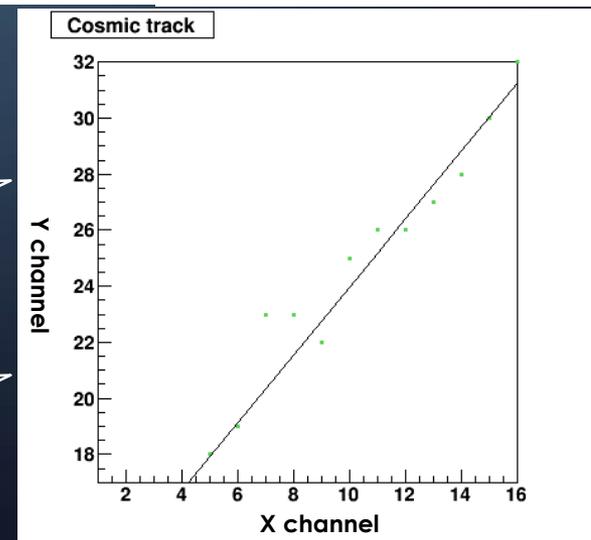
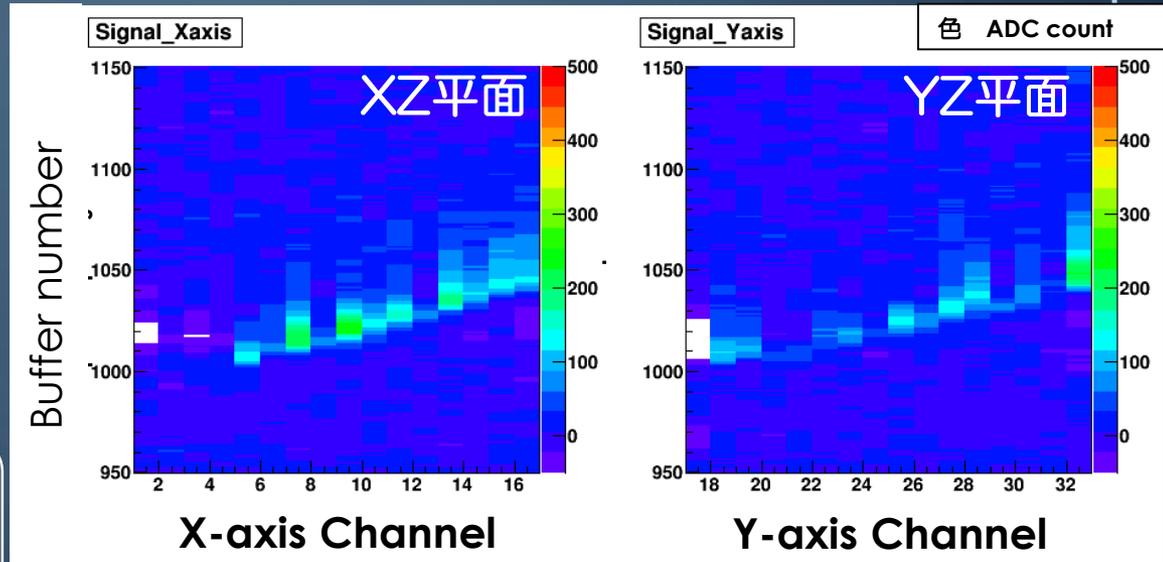
PADパターンにより、PAD平面 (XY平面)のピクセルにドリフトした電荷はX軸、Y軸のそれぞれのチャンネルに電荷を分け合う

## 1st STEP

X channel, Y channelで同時刻のピークを探し、XY平面にプロット

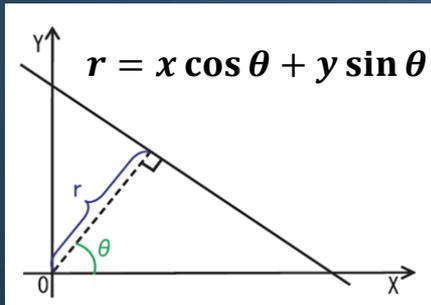
## 2nd STEP

画像処理技術の一つであるハフ変換を用いて直線を抽出



# Hough Transform

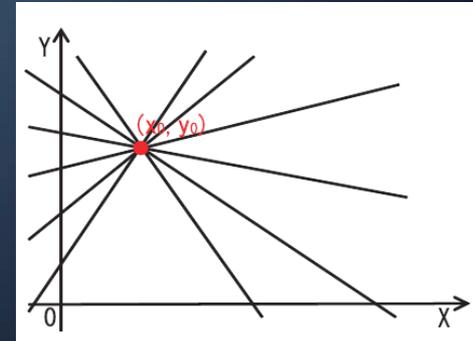
Hough変換は画像処理で用いられる特徴抽出法の一つであり、おもに直線の検出を行う技術である。



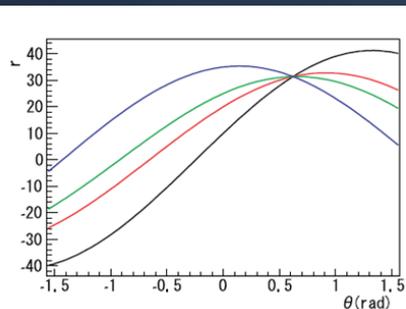
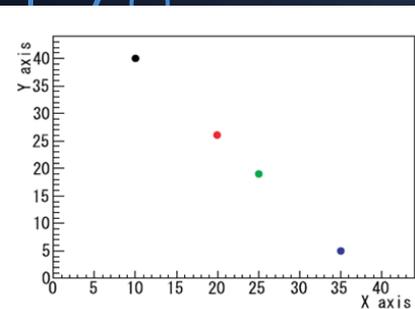
xy平面上の直線は、原点からの法線の長さrと、x軸となす角  $\theta$  を一意に決定することができる。これはr $\theta$ 平面上における点がxy平面上の直線に対応していることを意味している。

ここで $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ と範囲を限定した場合、2次元平面上における、ある点 $(x_0, y_0)$ を通過する直線は無数存在し、これらは $(r, \theta)$ を用いて以下のように表すことができる。

$$r(\theta) = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$$

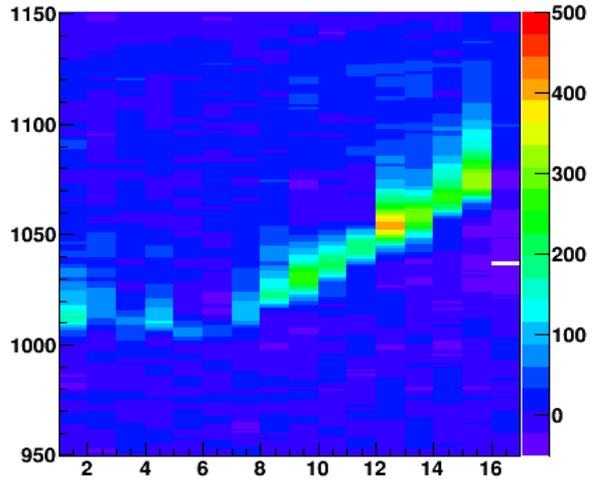


上式はr $\theta$ 平面上において正弦曲線となり、この正弦曲線はxy平面上の点に対して一意に決まる。よってxy平面で直線上に並んだ点のr $\theta$ 平面上における曲線は一点で交わることになる。

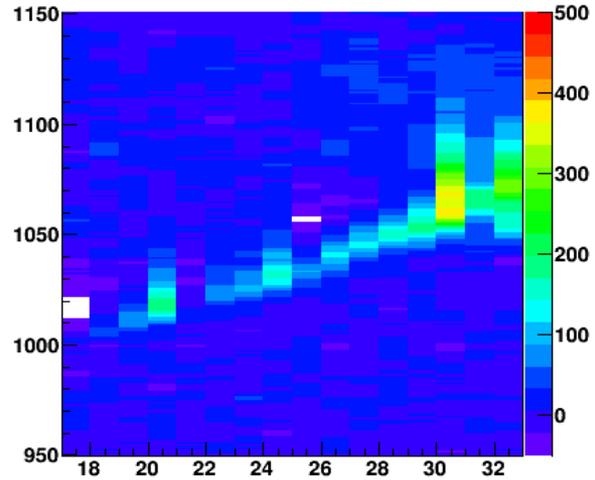


# Hough Transform

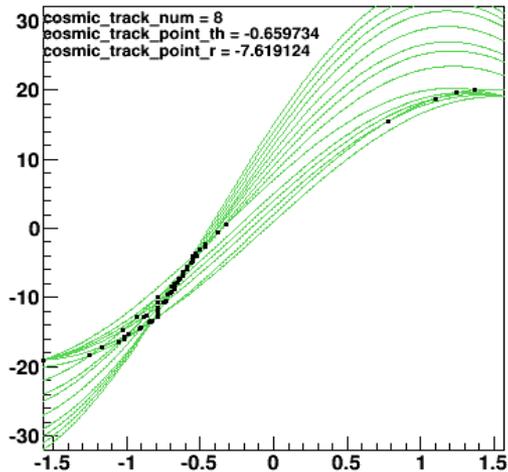
Signal\_Axis



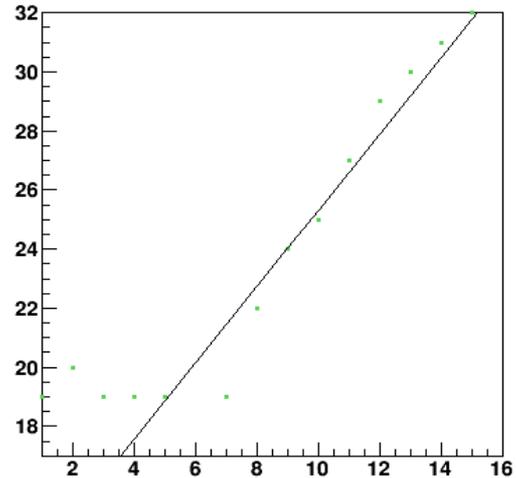
Signal\_Yaxis



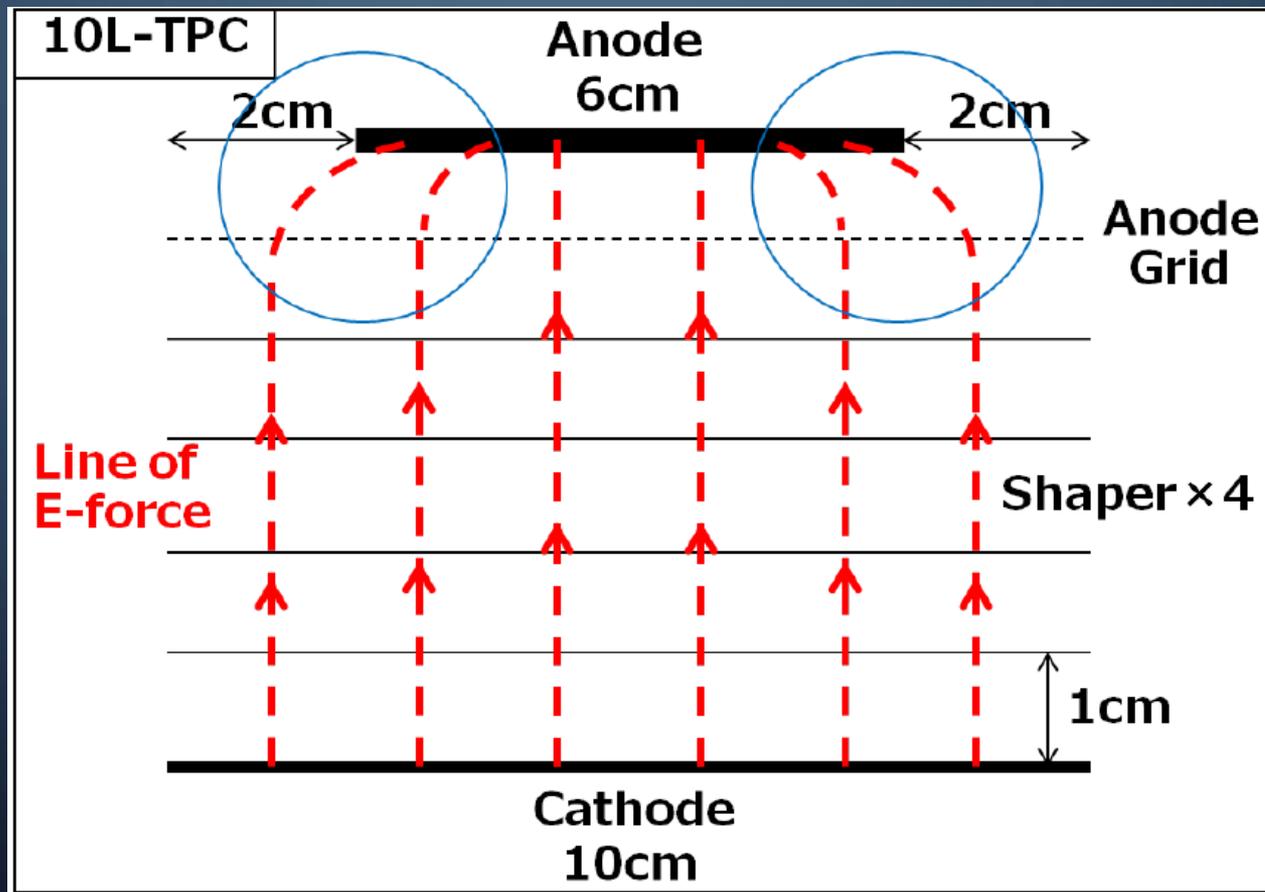
Hough Transform



Cosmic track

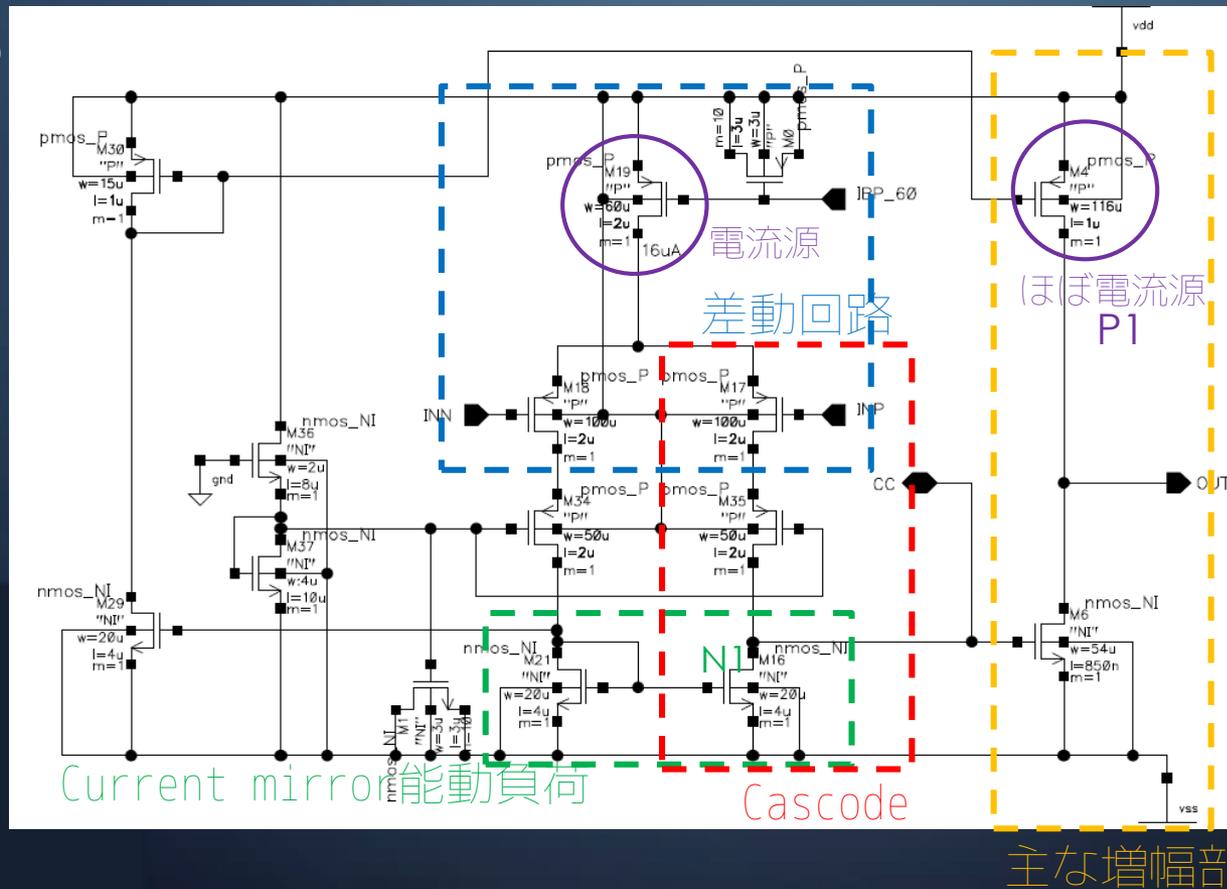


# nonuniformity of electrical field



# OPamp

2つのshaperに使用 opampとしては基本的な構成



正入力と負入力の差分を二段増幅する。左側が差動回路とカレントミラー回路から成る初段の差動増幅部、右側が二段目の出力増幅部である。

ほぼ電流源P1のバイアス電流により、このアンプのインピーダンスが決まる。

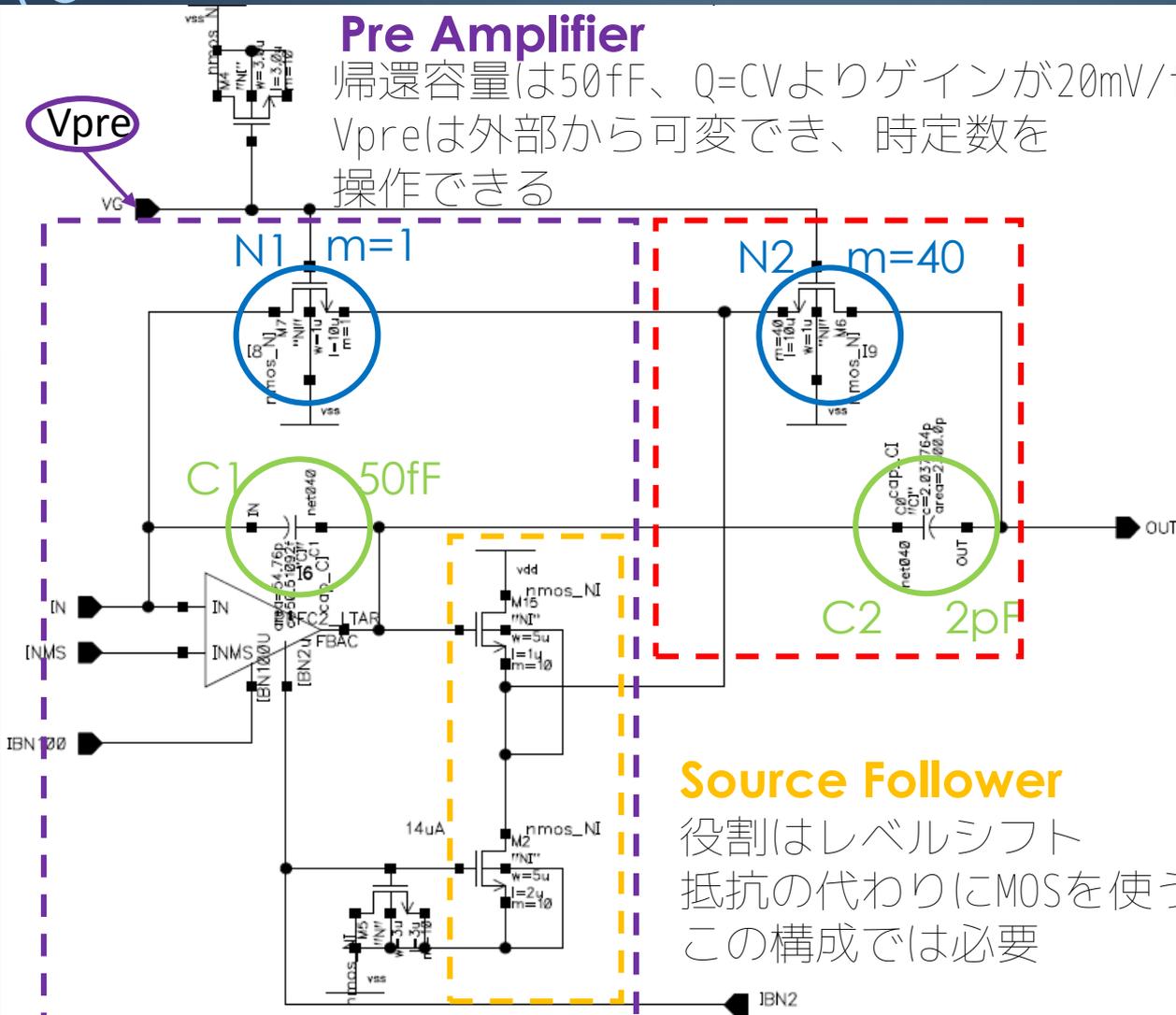
正入力と負入力の差分により電流が変化。N1が定電流源負荷である場合に比べてゲインは倍増。

高周波での利得が改善

# PreAMP + PZC

## Pre Amplifier

帰還容量は50fF、 $Q=CV$ よりゲインが20mV/fC  
 $V_{pre}$ は外部から可変でき、時定数を操作できる



## NMOS

役割的には抵抗

$m$ =multiple

Lと見なしてよい

$V_{gs}$ が一定の時

電流が  $I_{dN2} : I_{dN1} = 1 : 40$

$$R_{N1} : R_{N2} = 1 : 40$$

## Poll Zero Cancellation

の構成では

$$R_{N1} C_{N1} = R_{N2} C_{N2}$$

## Source Follower

役割はレベルシフト

抵抗の代わりにMOSを使う

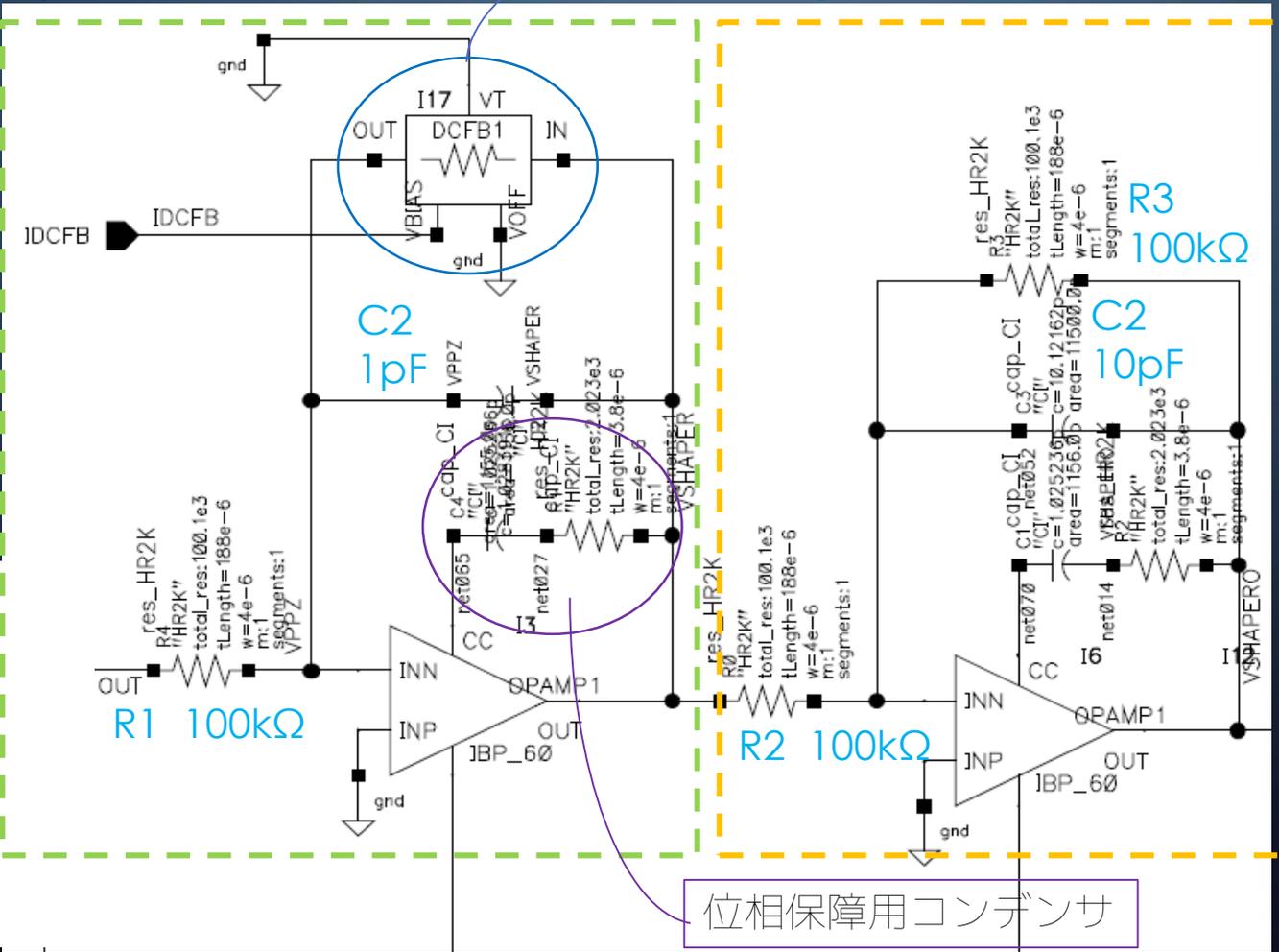
この構成では必要

# CR shaper × 2

V-Iコンバータによる擬似抵抗  
外部から操作可能。

1st

2nd



位相保障用コンデンサ



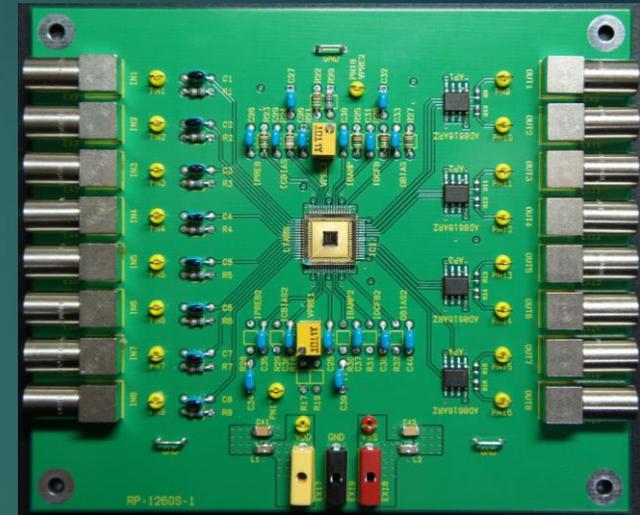
# ASIC Test Board Result

# LTARS ASIC 常温評価

## テスト項目



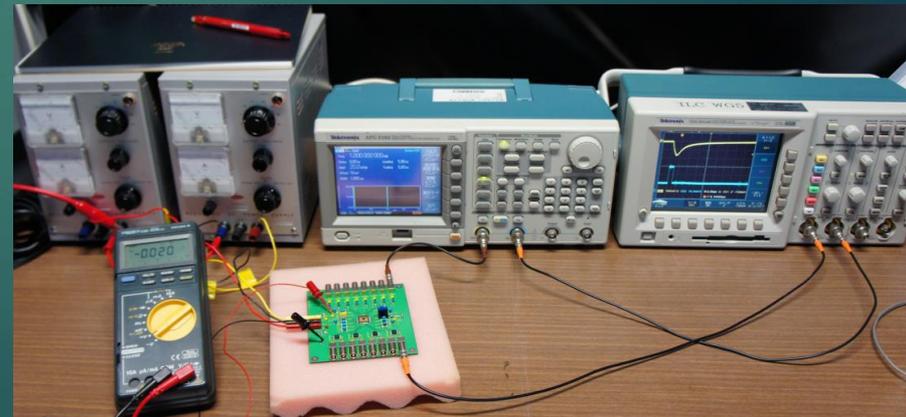
1. 直流試験
2. 動作確認
3. ダイナミックレンジ特性
4. ノイズの検出器容量特性
5. ゲインの検出器容量特性
6. ゲインのシェーパー時定数特性
7. チャンネルごとのばらつき



LTARS ASIC 評価ボード



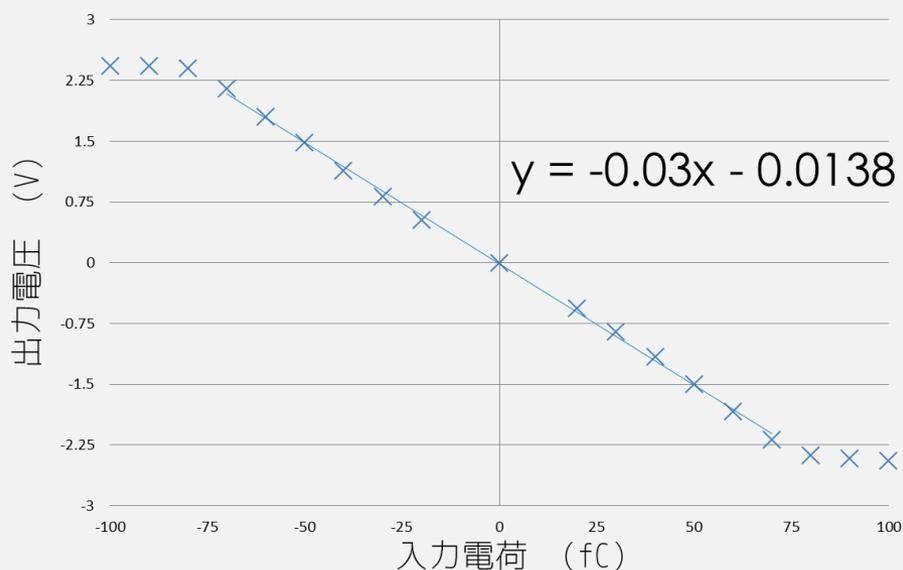
テストパルスと出力信号



評価している様子

# ダイナミックレンジの評価

ダイナミックレンジ特性のテスト結果



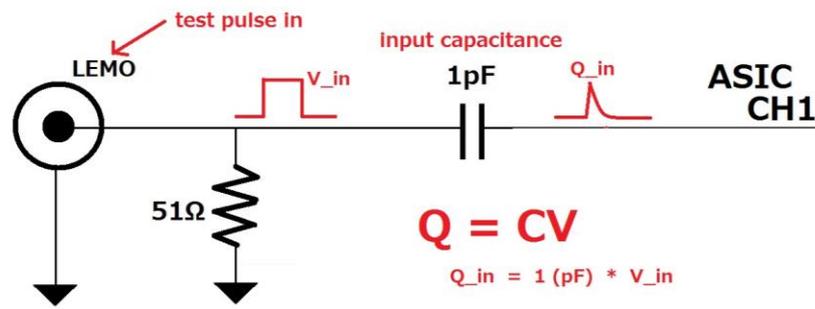
## テスト内容

- ①出力のアナログ波高値を縦軸に、入力値を横軸にして負～正に対してプロット。
- ②フィティングを行い、傾き(ゲイン)を求める。

## テストパルスのパラメータ

Frequency	Amplitude	Duty	Width
1kHz	-100mV ~ 100mV	50%	500μs

## CH1 INPUT (simplified)



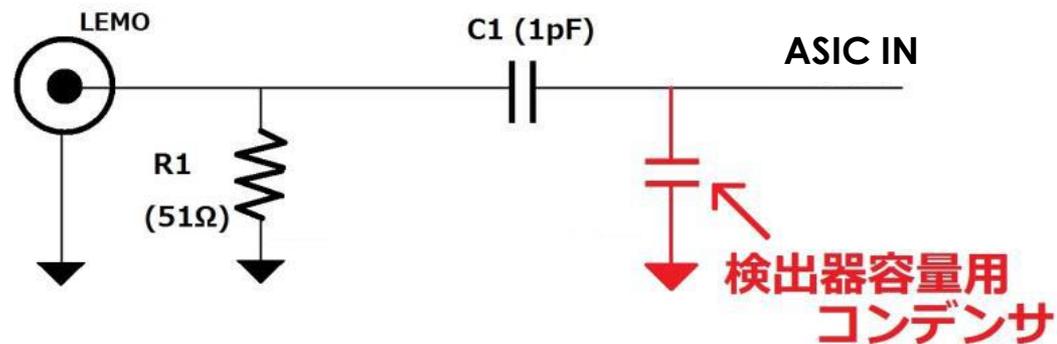
良く線形性がとれているといえる。

両外側の3プロットを省いてフィッティングしたところ - 0.03 ( V/fC ) という傾きを得た。切片もほぼ原点を通過している。この結果は資料のシミュレーションともよくあっている。

# ノイズの検出器容量特性評価

テスト基板回路に検出器用コンデンサを付け加えて、ノイズの検出器容量特性を評価した。

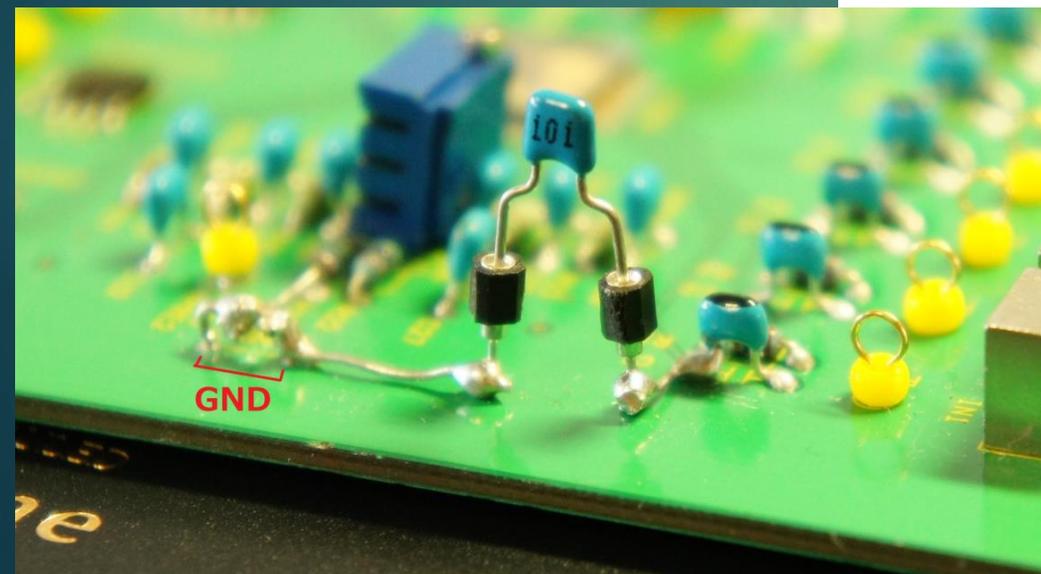
CH1



テストパルス入力周辺回路

- ①入力を回路のGNDレベルに設定する。
- ②オシロスコープのヒストグラム解析機能を用いて標準偏差 $\sigma$ (V)を取得。
- ③入力等価雑音電子数を算出。
- ④検出器容量を変化させて数回行う。

検出器容量用コンデンサを付けた様子

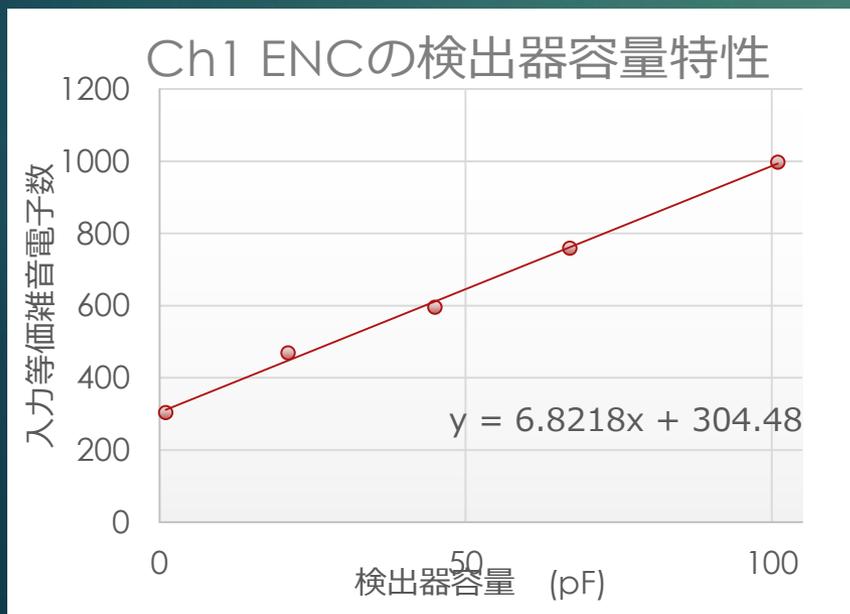
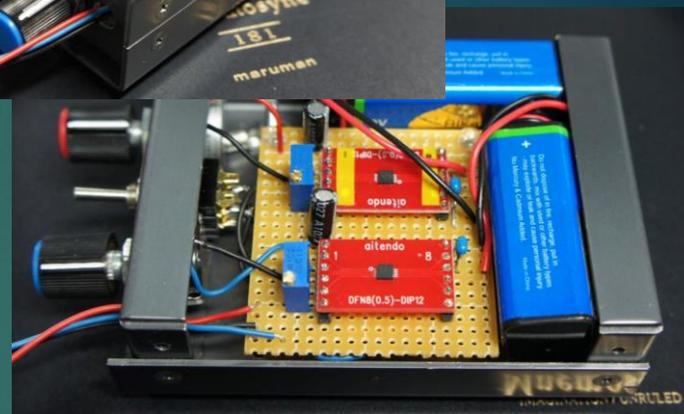


# ノイズの検出器容量特性評価

## 電源の自作

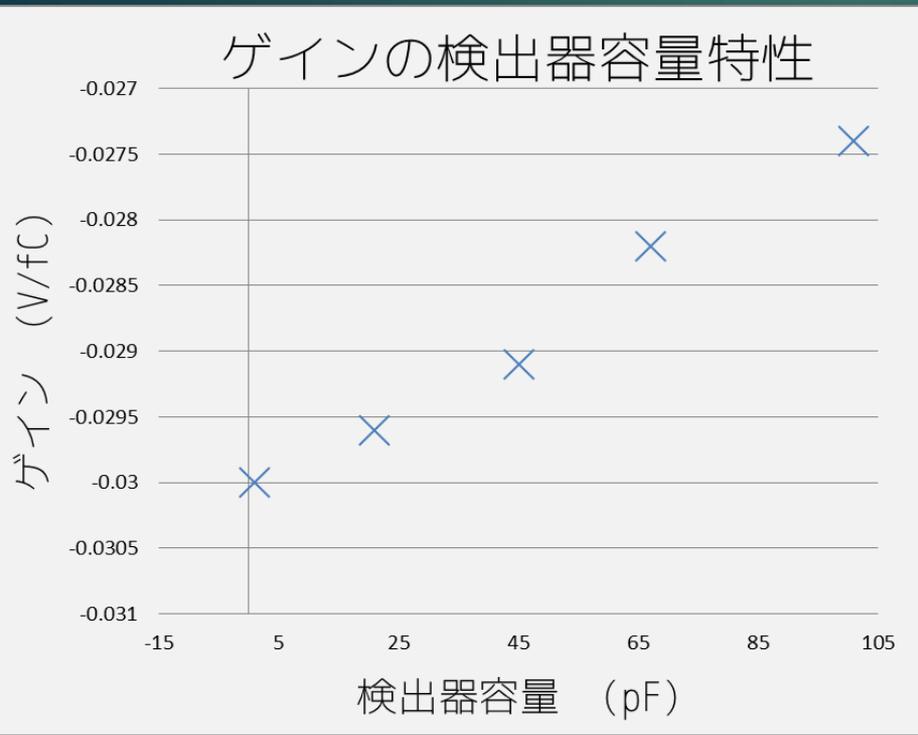
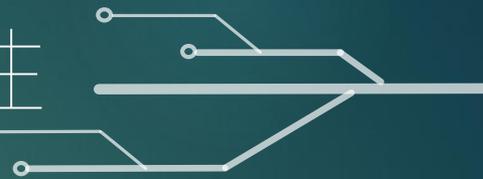
ノイズの低減、また実験の効率なども考慮し、小型の専用電源を作製した

- ・ 006P電池をリニアレギュレータ(LT3014)により降圧
- ・ サイズ 7.5 x 10 x 3 (cm)



検出器容量が 100pF 程度で入力等価雑音電子数が 987 electron  
 $4fC = 25000$  electron の入力電荷を考慮すると、  
SN比10以上を達成出来ている

# ゲインの検出器容量特性



## テスト内容

- ①出力のアナログ波高値を縦軸に、入力値を横軸にして負～正に対してプロット。
- ②フィッティングを行い、傾き(ゲイン)を求める。
- ③検出器容量を変化させて数回行う。
- ④検出器容量に対するゲインをプロット。

## テストパルスのパラメータ

Frequency	Amplitude	Width
1kHz	-100mV ~ 100mV	100μs

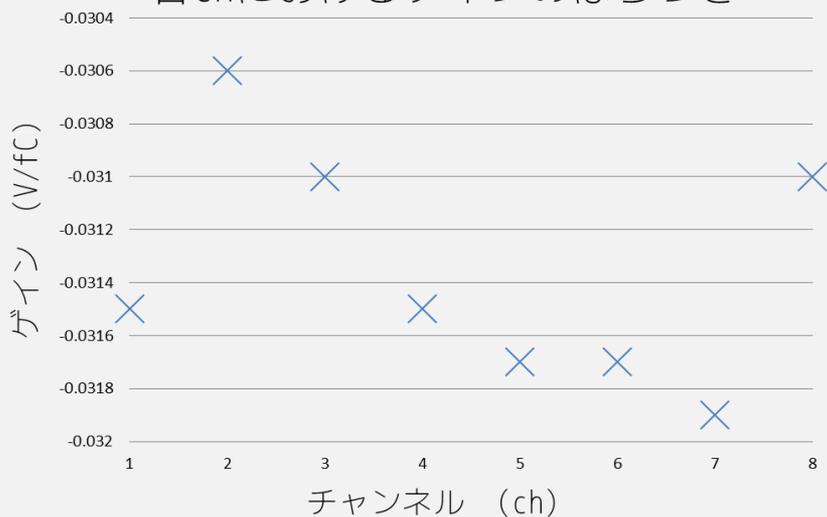
検出器容量の大きい部分でゲインが落ちていることがわかる。これはASIC設計段階で初段トランジスタのドレイン電流を絞っているため、大きな負荷容量に対しゲインが落ちてしまうためである。

# チャンネルごとののばらつき

## ベースラインののばらつき

チャンネル (ch)	電位 (mV)
1	48.1
2	15.2
3	-78.2
4	-16.9
5	-19.3
6	-0.7
7	25.1
8	-45.4

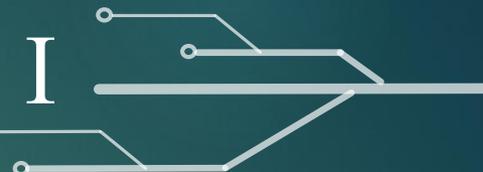
各chにおけるゲインのばらつき



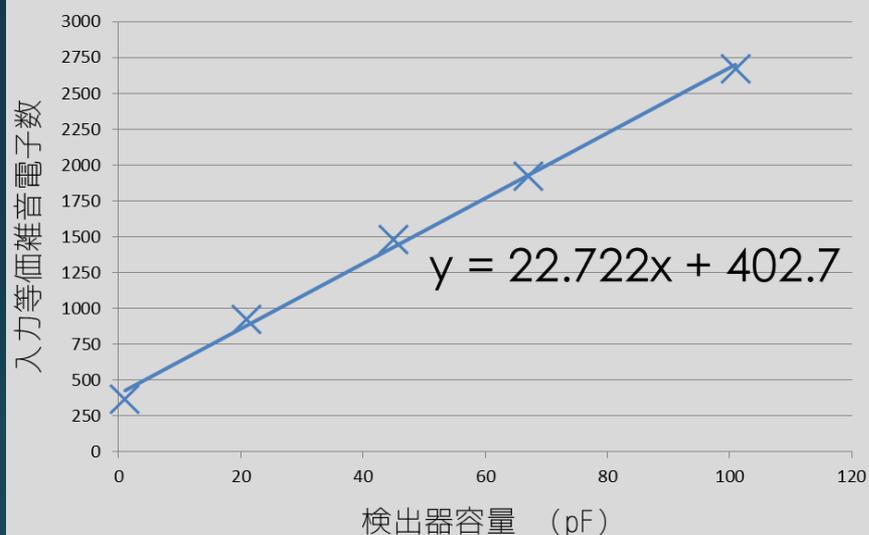
## ゲインのばらつき

プリアンプやシェーパに使用されたトランジスタやコンデンサの特性のばらつきのためである

# 電源によるノイズの問題 I



ノイズの検出器容量特性



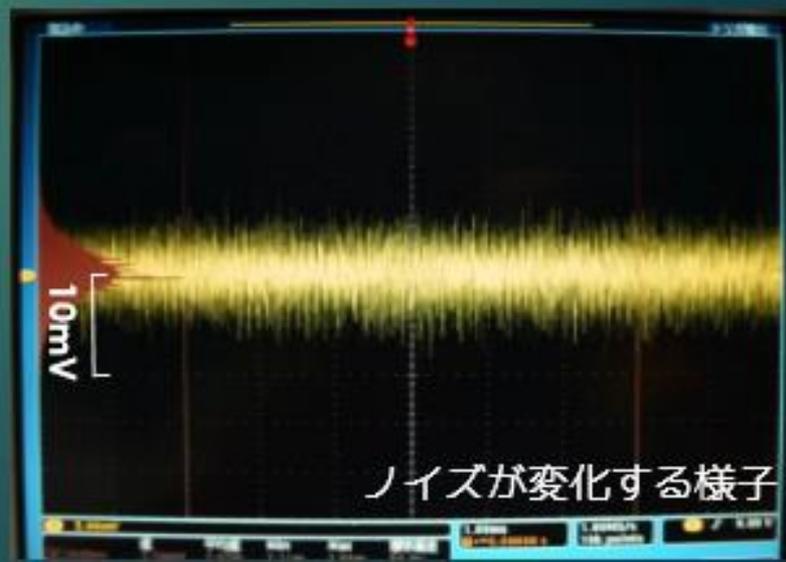
シミュレーションにおいてLTARS ASICのイントリンジックノイズは 10 electron/pF 程度

検出器容量が 100pF 程度で入力等価雑音電子数が 2675 electron  
4fC = 25000 electron の入力電荷を考慮すると、SN比10以上を達成出来ていない



このノイズ結果では値が大きい

ノイズの大きさが時間によって変化する現象が確認された



# 電源によるノイズの問題 II

## 原因

外来ノイズによる影響を強く受けている

## ノイズ源

\* 近くの電化製品

NIM, CAMAC modules

PC

換気扇

蛍光灯……etc

- ・ 電化製品の電源を切る
- ・ 場所を移動する
- ・ アルミ箔を数枚重ねた上で絶縁体のシートで覆った自作のシールドで回路全体を覆う

\* テストボード用電源

Metronix 532C

100V AC 駆動のかなり古い電源

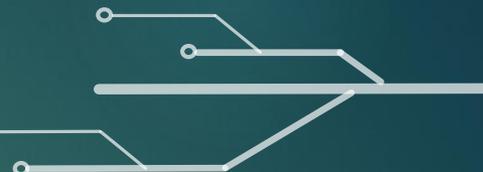


電源を自作する...

➡ あまり改善せず……

➡ 大幅な改善！！

# 7ch と 8ch の故障



各チャンネルのばらつきを評価しようとした際に  
7ch, 8chが全く動作しないことが判明した

## いつから...?

ASIC動作確認のための直流試験の際には不備は見られなかった。  
チップ作製の際、端のチャンネル(LTARSでは1chと8ch)に不良が出てしまう  
ことはある。

## 後天的に故障した可能性が高い

放電による故障。このチャンネルは保護回路が入っていない。

アースバンドをしていなかった。

どうしようもないため、予備のボードにて評価を行った……

# Analog Board 評価

# Analog Board 評価

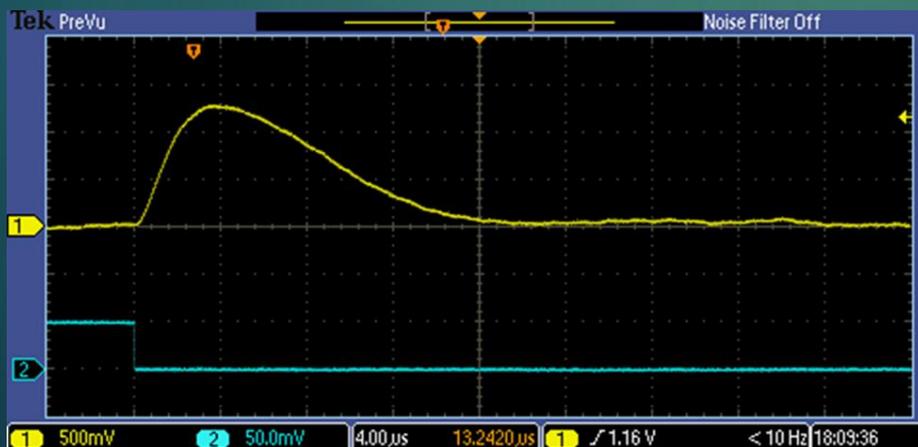
評価項目

14

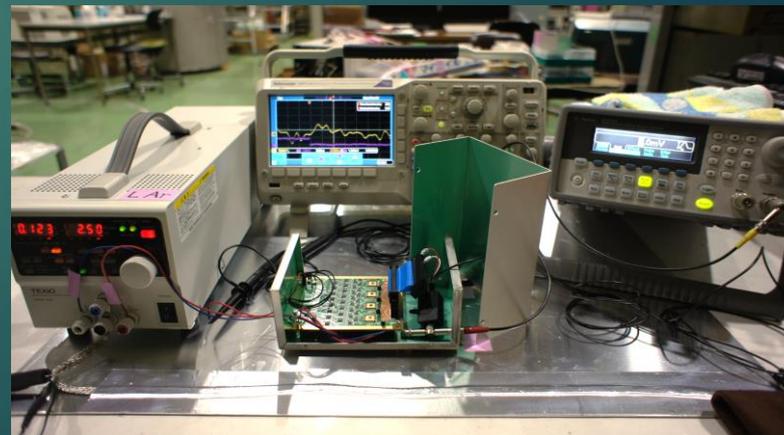
1. 直流試験 **終了**
2. 動作確認 **終了**
3. ダイナミックレンジ特性 **終了**
4. ノイズ **検証中**
5. ゲインの検出器容量特性



Analog Board



テストパルスと出力信号

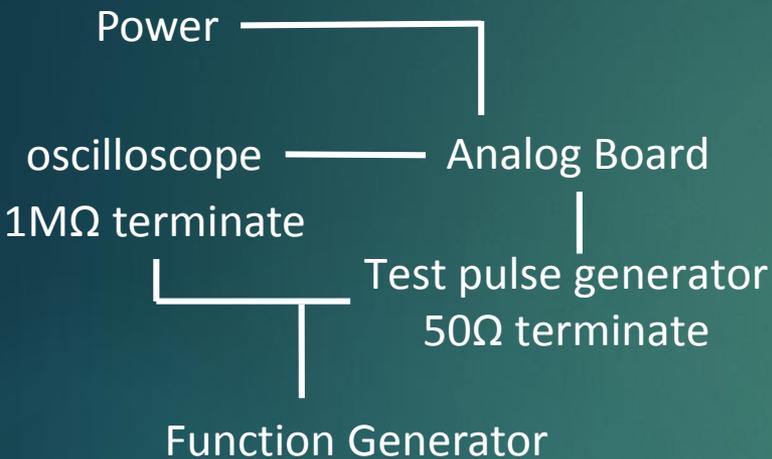


評価している様子

# ダイナミックレンジ特性

15

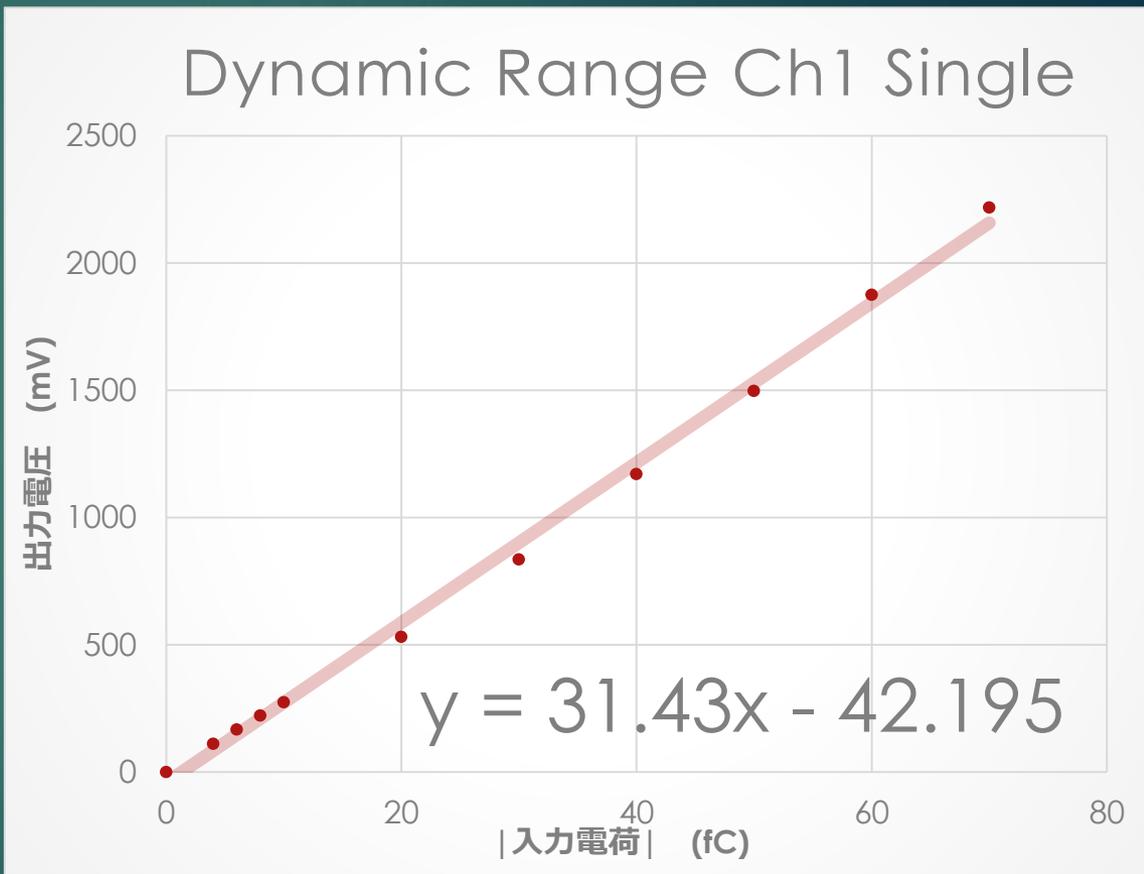
## 実験系



## Function Generator param

備考 パルスの立ち下がりトリガー  
入力信号が  $-4\text{fC} \sim -100\text{fC}$  を想定  
入力容量  $1\text{pF}$  (検出器容量も  $1\text{pF}$ )

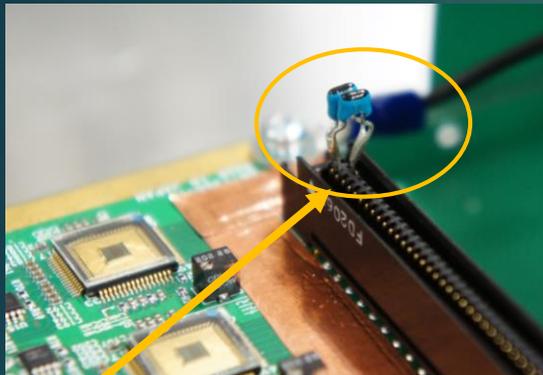
Frequency	Amplitude	Width	Edge time
1kHz	+4mV~+100mV	500 $\mu\text{s}$	5ns



Gain 31.43 mV/fC

# ノイズの検出器容量特性

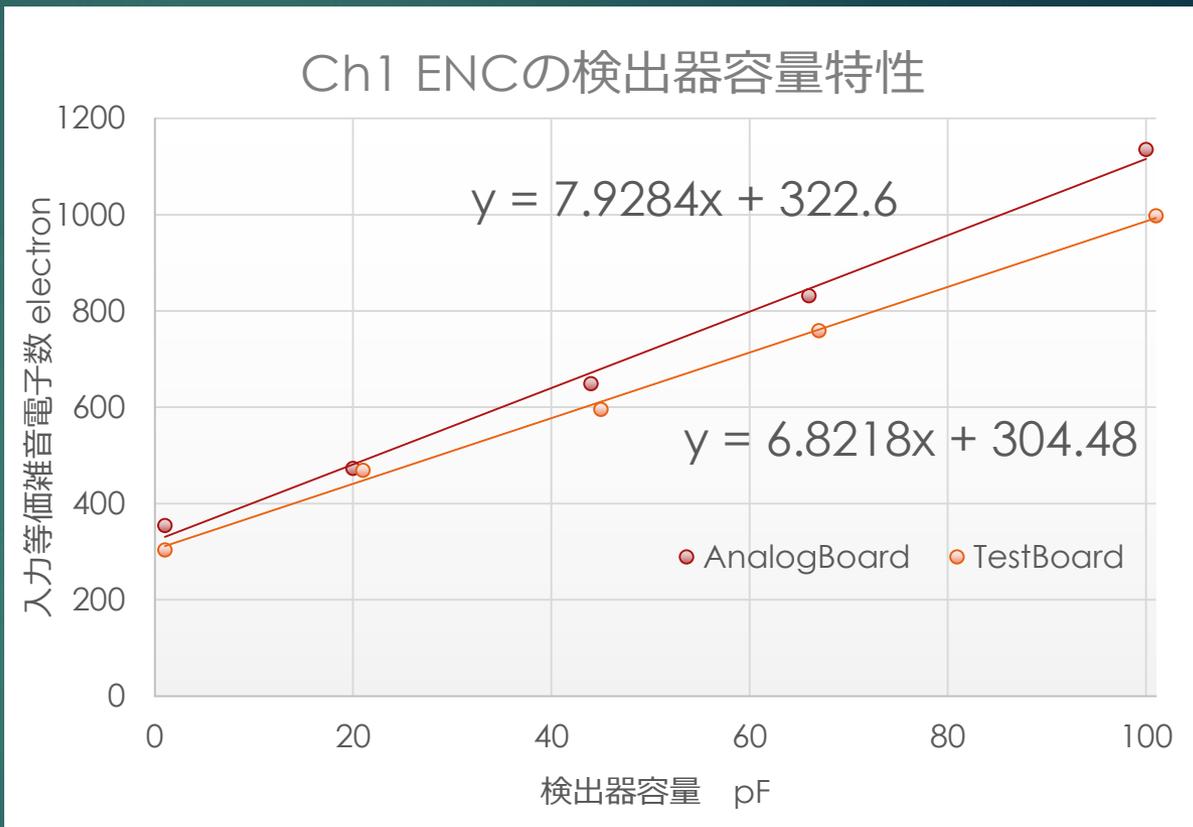
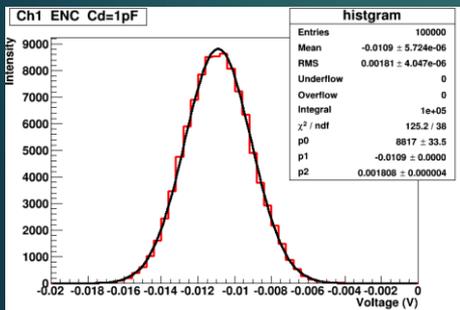
測定の様子



コネクタに直接検出器容量用のコンデンサ(Cdet)を設置する。



ヒストグラムから $\sigma$ を得る



最小信号  $2fC = 12500 \text{ electron}$  の入力電荷を考慮すると、  
検出器容量が100pFにおいて

SN比10以上を達成出来ている