

# J-PARCハドロンホールにおける LArTPC反粒子検出原理の検証

第29回ICEPPシンポジウム

2023年02月19日

早稲田大学 修士課程1年

清水虎冨

# 目次

---

- GRAMS検出器反粒子検出原理検証のための加速器ビーム試験
- ビーム試験に向けた検出器のアップグレード
  - Anode読み出しASIC

# GRAMS実験 概要

- **G**amma **R**ay and **A**nti-**M**atter **S**urvey

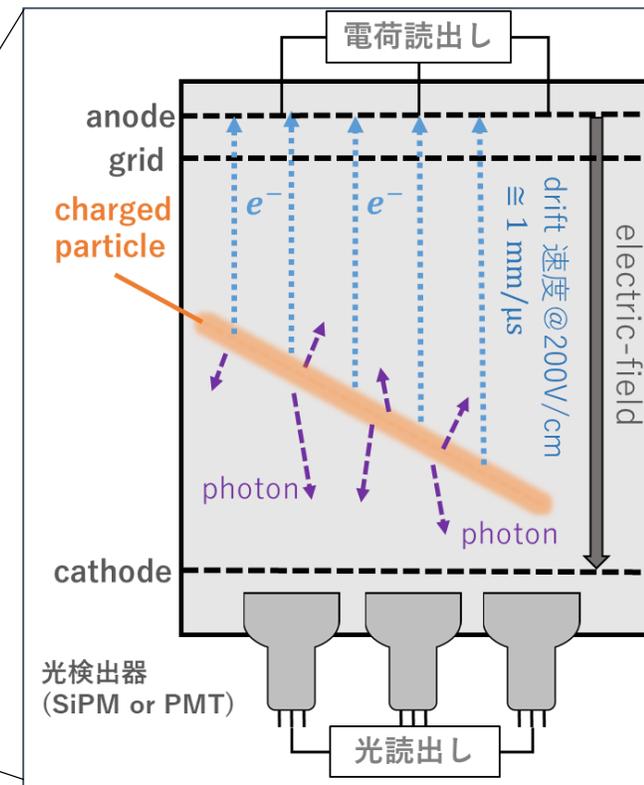
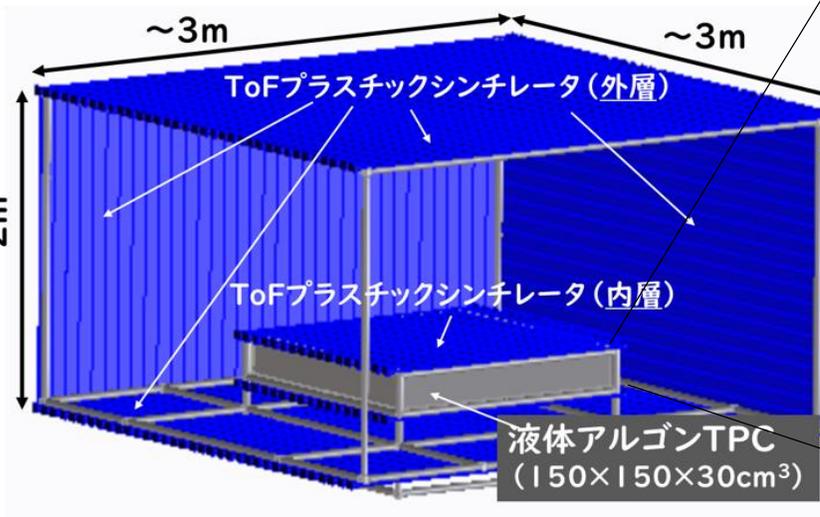
- 大気球搭載液体アルゴン(LAr)TPC検出器を用いた宇宙線反粒子探索とMeV- $\gamma$ 線観測
- 南極上空, 30日間にわたる周回軌道による実験

● **宇宙線反粒子探索**  
 ...反陽子, 反重陽子, 反ヘリウム  
 ↓  
 暗黒物質間接探索

反粒子探索に向けた  
LArTPCの開発

- GRAMS検出器

- 二層のToFシンチレータ  
 ...入射荷電粒子の $\beta$ 測定
- 液体アルゴン検出器  
 ...飛跡再構成,  $dE/dx$ 測定



# LArTPCによる粒子-反粒子識別方法

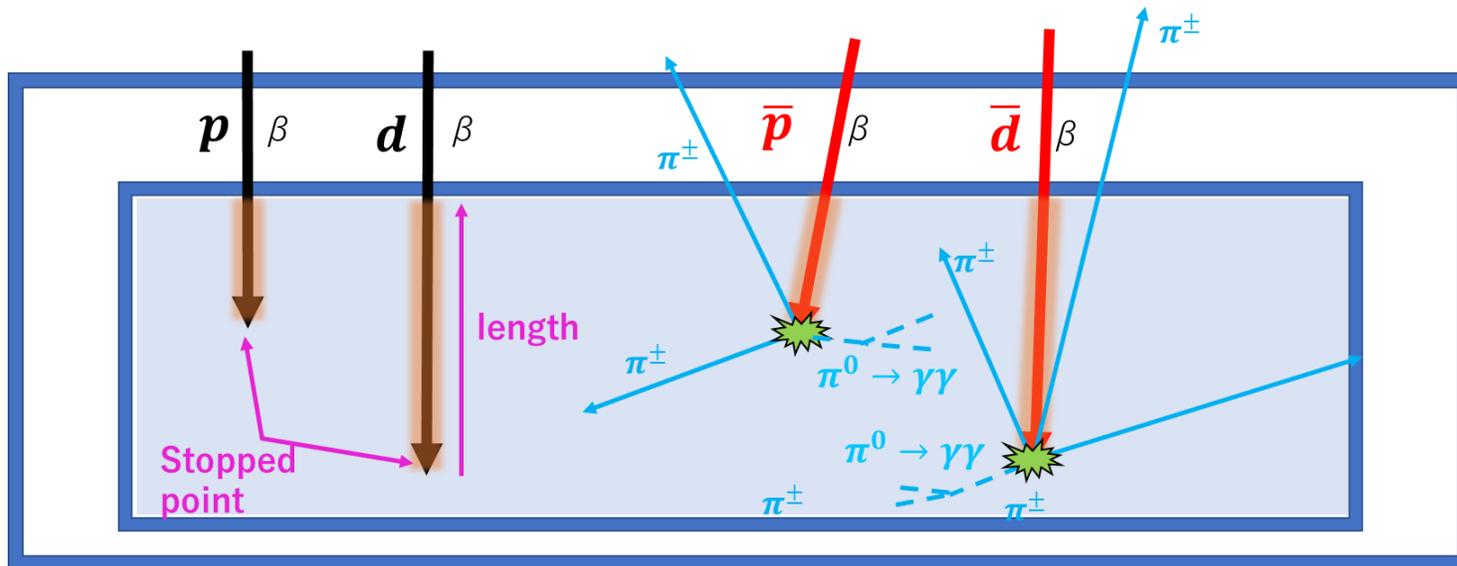
## ■ 粒子の質量識別

- 入射荷電粒子の速度  $\beta$  が等しい  
 $\Rightarrow$  質量に依存して, ①  $dE/dx$  ② 飛跡長 が異なる

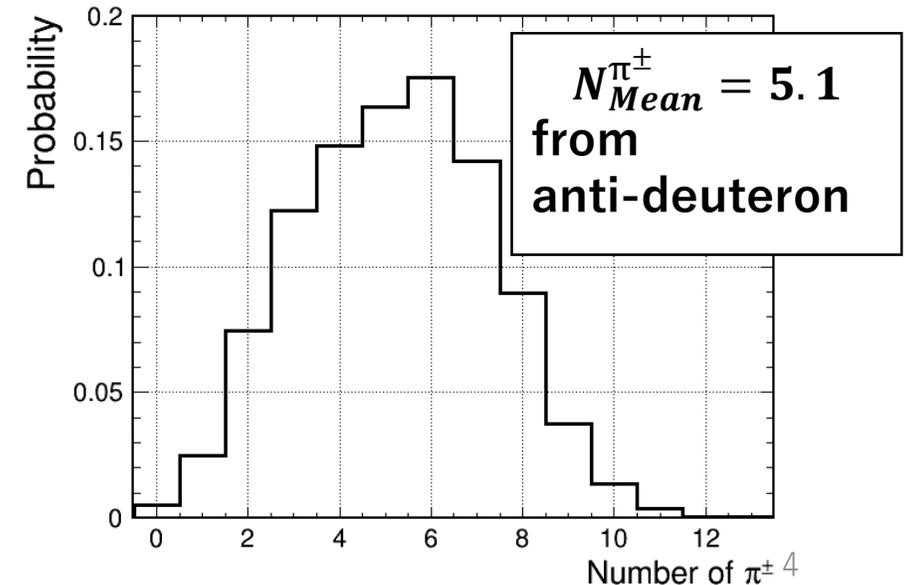
## ■ 粒子の電荷識別(反粒子識別)

- 入射負電荷粒子がAr原子核に捕獲  
 $\Rightarrow$  脱励起後, 核子と対消滅してハドロン生成

			対消滅@停止点	
			なし	あり
			正電荷	負電荷
質量	核子数	1	<b>p</b>	<b><math>\bar{p}</math></b>
		2	<b>d</b>	<b><math>\bar{d}</math></b>



$\pi^\pm$  Multiplicity (Geant4, FTF model)



# GRAMS開発スケジュール

## ● 反粒子探索に向けたマイルストーン

- ❑ 粒子-反粒子識別の実機検証
- ❑ 加速器ビームを用いた粒子識別の定量化
- ❑ 気球高度での液体アルゴン安定運用技術の確立

### 宇宙線 $\mu$ 観測試験

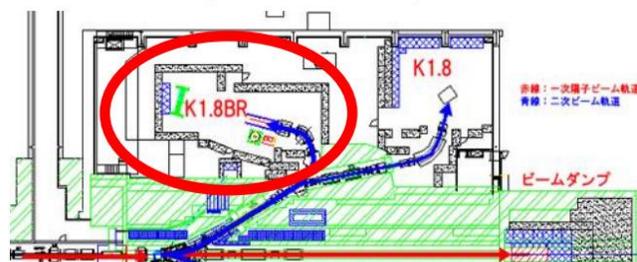


Sep. 2022

30 x 30 x 30 cm<sup>3</sup> LArTPC  
Cosmic Muon test

### ビームテスト @J-PARC

LAr中での反粒子捕獲事象の検証  
→ K1.8BR (ハドロンホール)  
@ J-PARC



Mar. 2023

J-PARC Phase 1  
Beam test

### 気球工学試験

気球観測の経験 w/ 小型気球  
(システム設計、通信) → Nakajima's talk  
→ @JAXA 大樹町 2023.7~9



Sep. 2023

J-PARC Phase 2  
Beam test

Mar. 2024

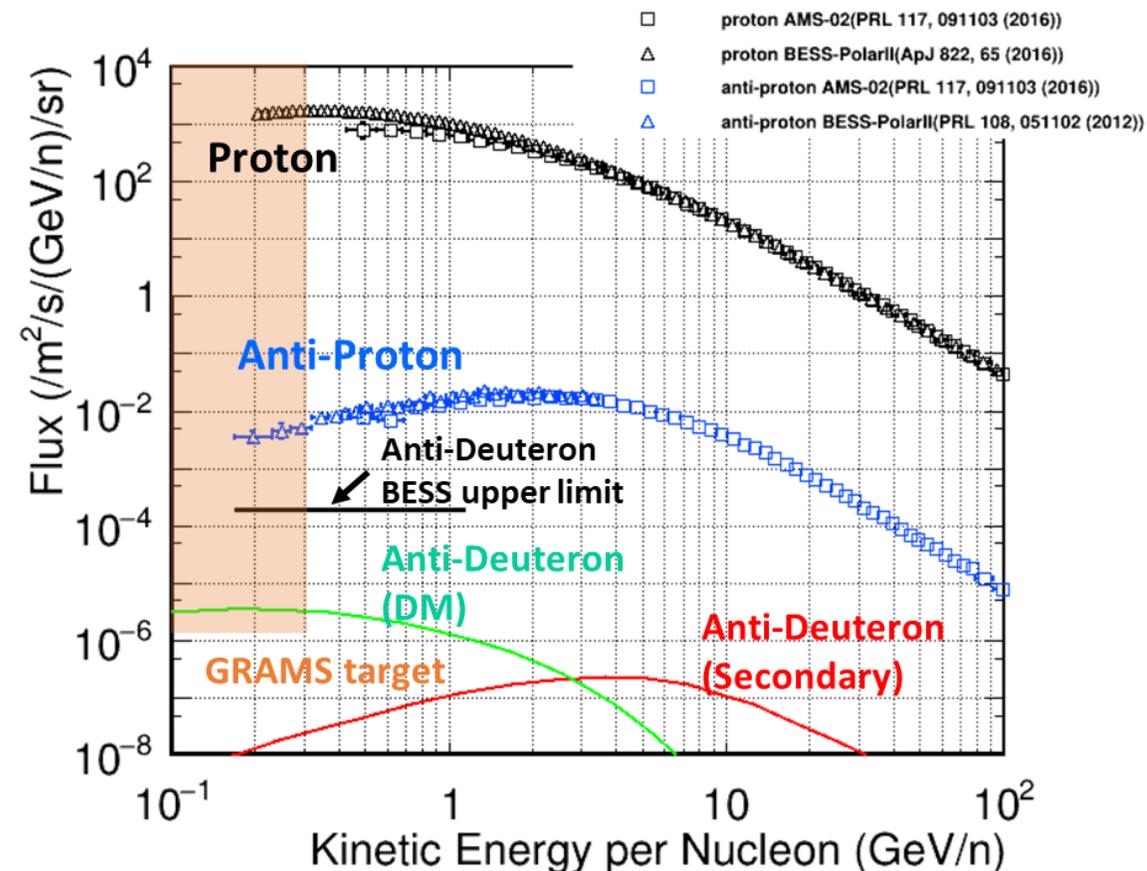
Engineering Balloon flight @ JAXA TARF

# ビーム試験の目的

## ● GRAMS実験の物理目標

- DM由来の反重陽子fluxは二次宇宙線中の反重陽子fluxと比べ3桁程度落ちる
- 1GeV以下の領域の探索を目指す

粒子種	Flux @ 0.2GeV/n [ $/m^2/s/(GeV/n)/sr$ ]	反重陽子1事象におけるBG数
陽子 (AMS-02&BESS)	$10^3$	$10^9$
反陽子 (AMS-02&BESS)	$10^{-2}$	$10^4$
反重陽子	$10^{-6}$	1



1. 液体アルゴン中で反陽子および反重陽子の捕獲事象を測定する (信号事象)
2.  $10^4$ 事象以上の高統計の反陽子捕獲事象を測定する (背景事象)

# J-PARC K1.8BR 概要

## ■ J-PARC K1.8BR ビームライン

- シンクロトロンで30GeVまで陽子を加速
- T1: 金の固定標的と衝突
- 2次粒子生成: K-中間子 Rate $\sim 10^5$ , 反陽子も同程度
- 最高運動量: 1.1GeV/c
- 磁石, 静電分離機: 磁場/電場による運動量と質量を選別可能

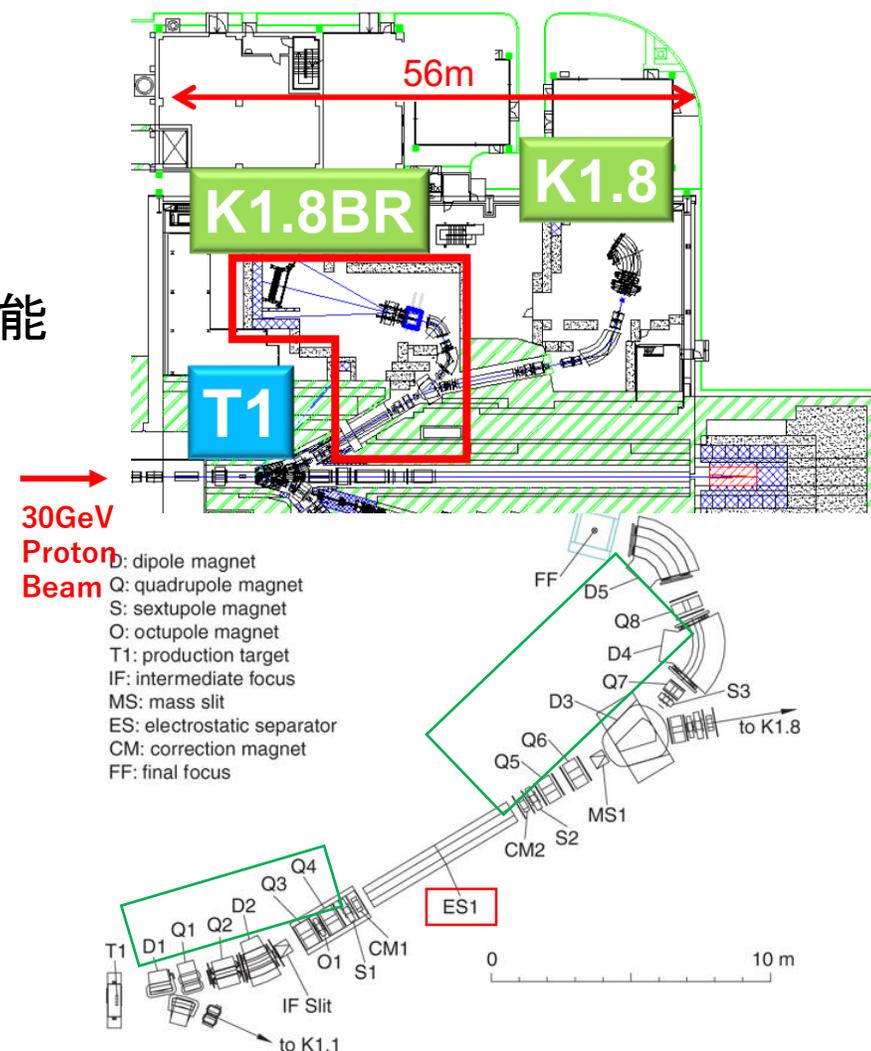
## ■ 反粒子の供給

- 反陽子: 十分なレートあり
- 反重陽子(<1.1GeV/c): ビームラインのレートの検証が必要  
⇒2023年度実施予定(準備中)

粒子	GRAMS Target Rigidity	運動量
反陽子	100~300 MeV/n	450~800 MeV/c
反重陽子	100~300 MeV/n	900~1600MeV/c

⇒GRAMS検出器の原理検証に最適

ハドロン実験施設内俯瞰図



# ビーム試験シミュレーション

## ■ ビーム試験セットアップ案

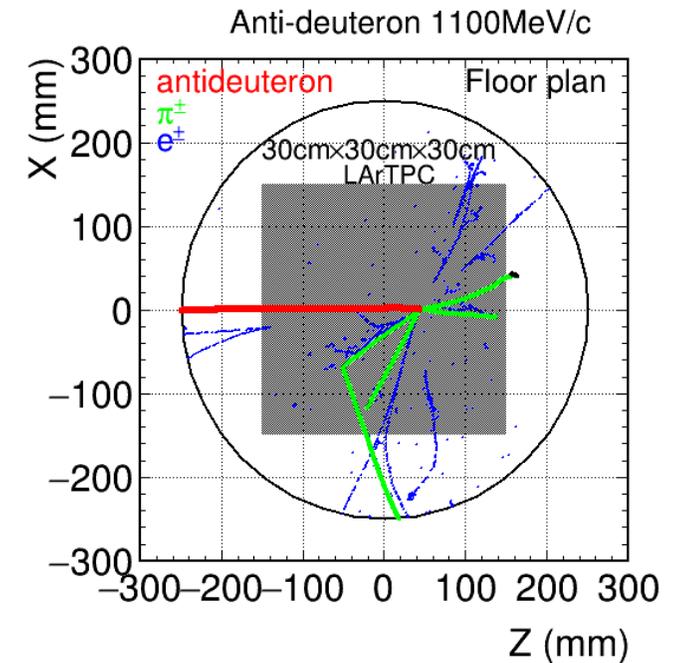
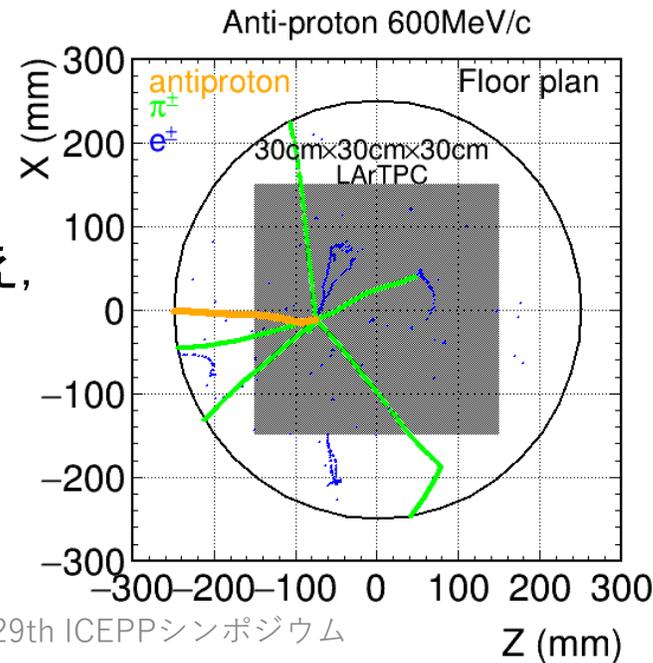
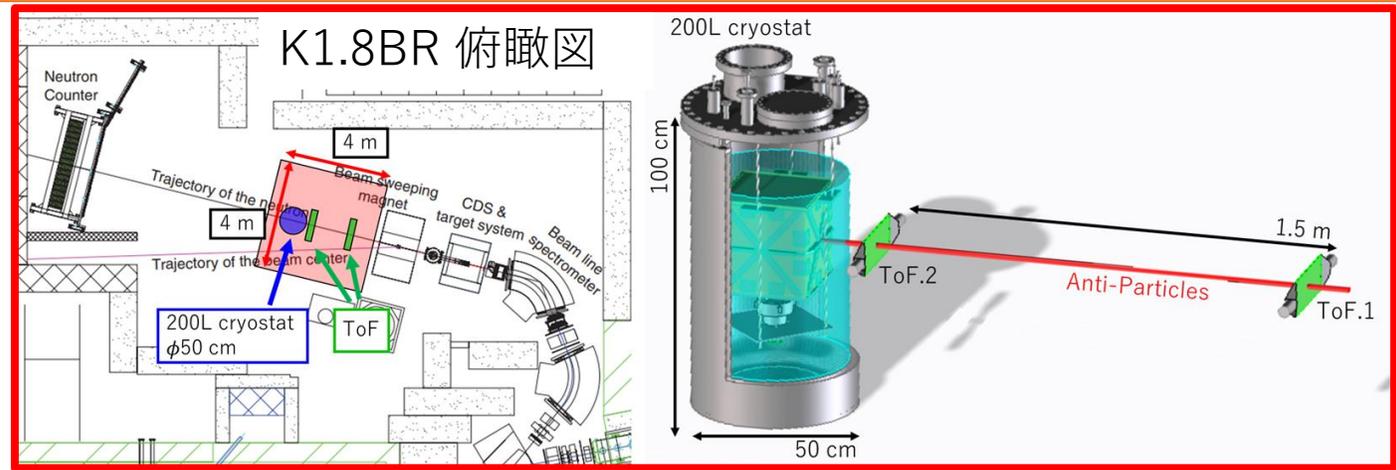
- スペース: 4m × 4m
- 容器:  $\Phi 500\text{mm}$
- 検出器サイズ: 30cm × 30cm × 30cm
- ToFプラスチックシンチレータ: 2本

## ■ 反粒子入射のシミュレーション

- 反陽子(左): 600MeV/c ( $\beta \sim 0.5$ )
- 反重陽子(右): 1.1GeV/c ( $\beta \sim 0.5$ )

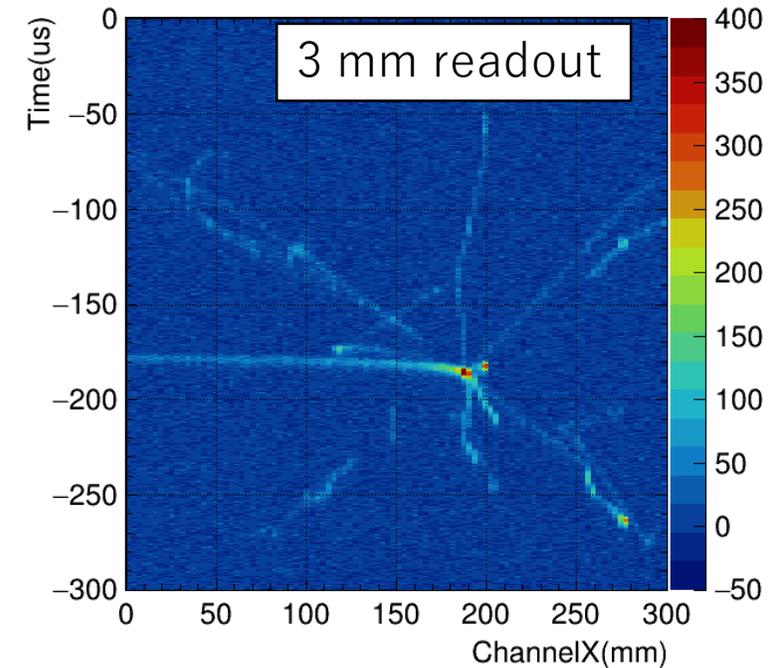
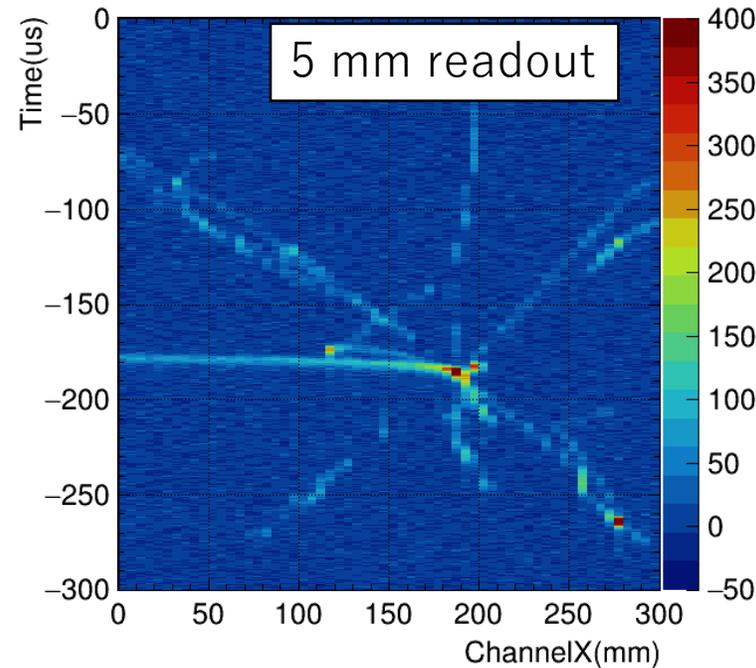
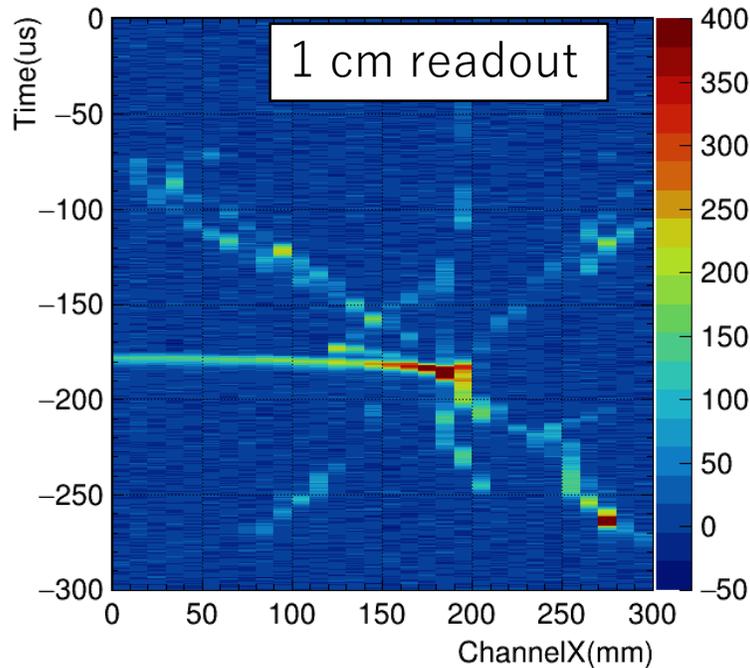


- いずれの場合もLArTPC内で反応が見え、PIDの検証が可能  
以下のビームを要求
  - 反陽子: 600 & 700 MeV/c
  - 反重陽子: 1.1GeV/c
 TPCサイズ決定



# 読み出しパッドのピッチサイズ検討

- GRAMS40検出器を用いた、地上での宇宙線 $\mu$ 粒子のLAr中での停止事象の観測できている
- ビーム試験に向けた検出器のアップグレード: 読み出しパッドの変更
- ピッチを変えた時のシミュレーション: 入射してきた反重陽子と対消滅後のハドロンの飛跡



- 読み出しエレクトロニクスの必要チャンネル数と1chあたりの信号量に対するノイズ  
⇒ 電子読み出し基板の開発を進めていく

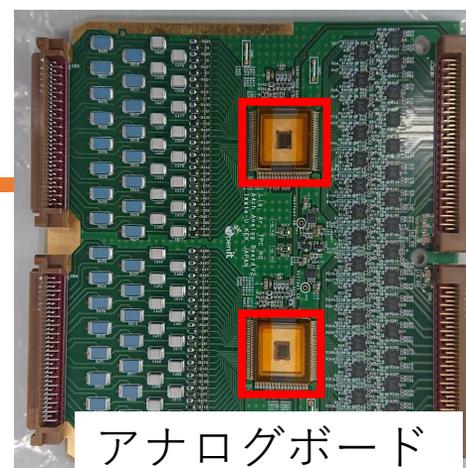
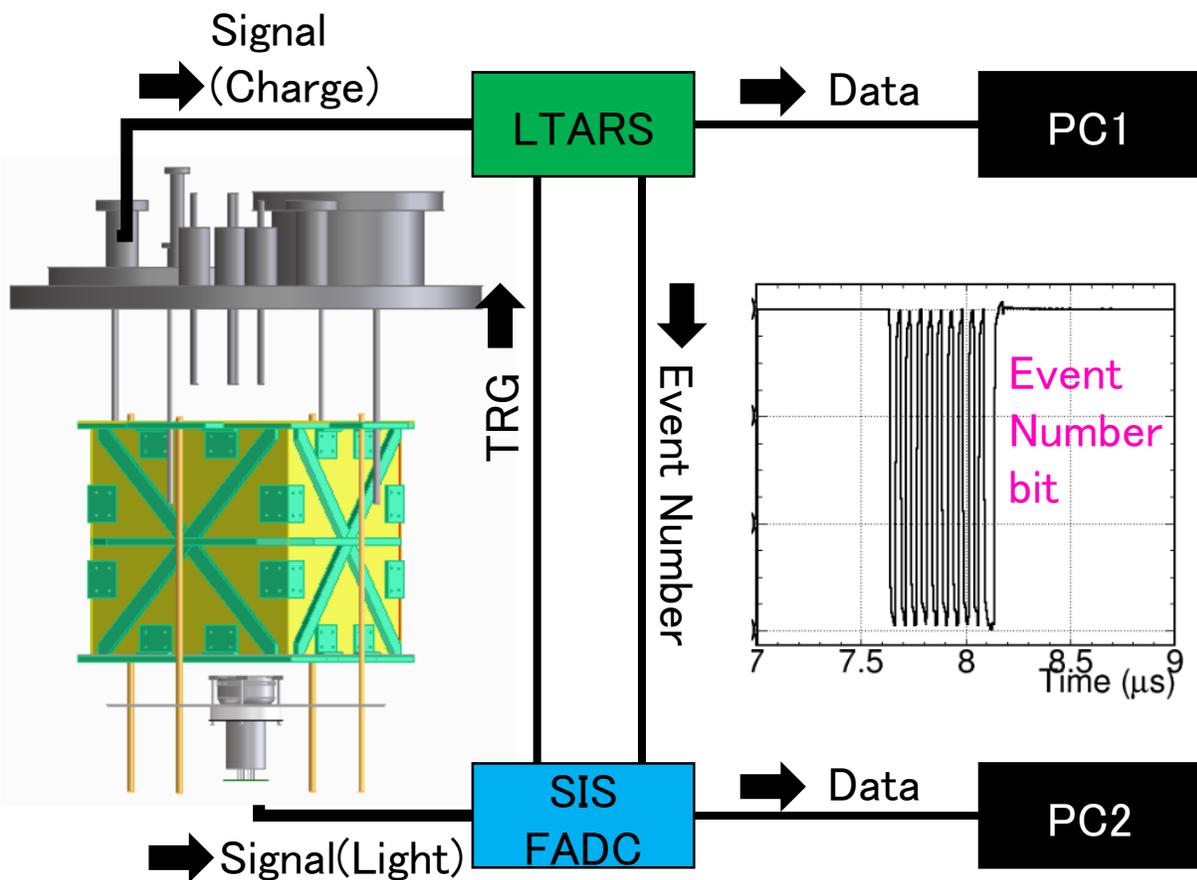
# LTARS

- 加速器ビーム試験における検出器の電子読み出しASICにLTARSを使用
    - 電荷信号読み出しパッドに発生した電荷信号を電圧信号に変換・増幅・整形する
    - 大型液体アルゴン検出器用ASICとして高ゲイン, 多チャンネル, 低ノイズ, 低コストを目標に開発
- \* コールドエレクトロニクス: ~80Kで動作を要求, 低温下だとトランジスタの閾値電圧が変化

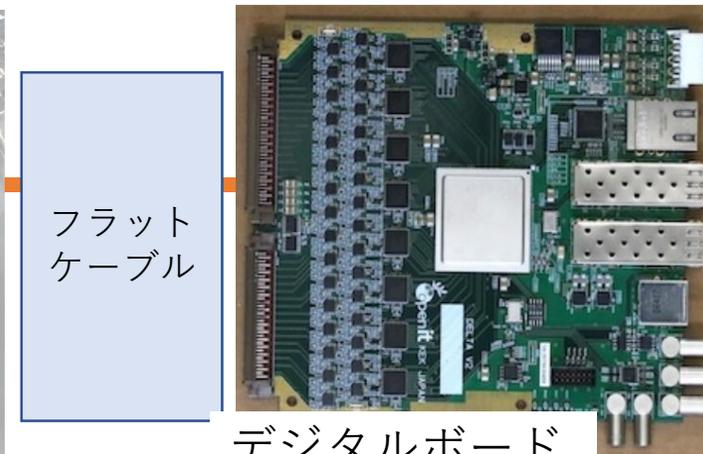
設計値	LTARS2014	LTARS2018A	
		HG	LG
チップサイズ	5.0mm × 5.0mm	2.5mm × 5.0mm	
ch数/chip	32ch	16ch	
時定数	3us	7us	3us
動作温度	室温	室温	
ダイナミックレンジ	±90fC	±120fC	±1600fC
ゲイン	9.7mV/fC	10mV/fC	0.5mV/fC
ENC(Cdet=300pF)	14000e <sup>-</sup>	4000e <sup>-</sup>	6000e <sup>-</sup>
使用	地上宇宙線 $\mu$ 観測	ビーム試験	使用しない

# 地上テスト@早稲田

- LTARS2014で64chの電荷信号を取得
- 地上セットアップでのDAQ構築

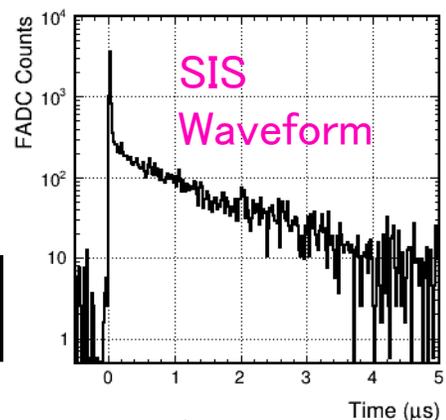
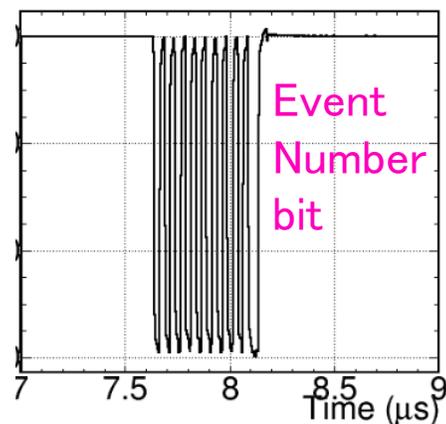
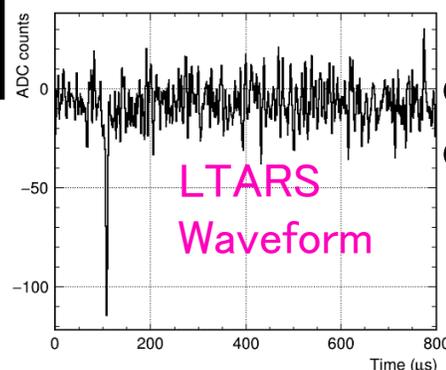


アナログボード



デジタルボード

フラット  
ケーブル



- 容器の外にLTARS2014
- FPGAのファームウェア
  - ✓ サンプル数: 1000
  - ✓ NIM\_IN: PMTからの光信号をトリガーとして入力
  - ✓ NIM\_OUT: 取得データのEvent Numberを32bitで出力
- 複数枚のボードを使用するときは, NIMの入出力から内部クロックで同期をとる

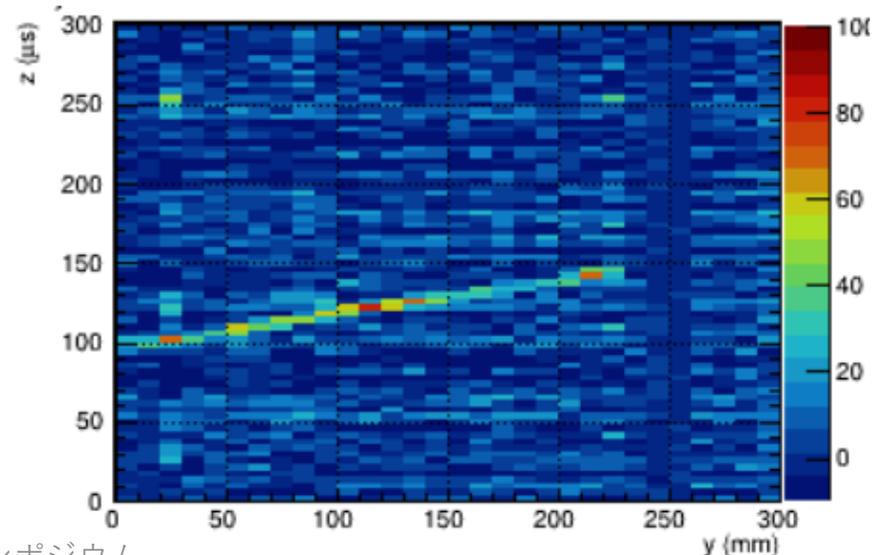
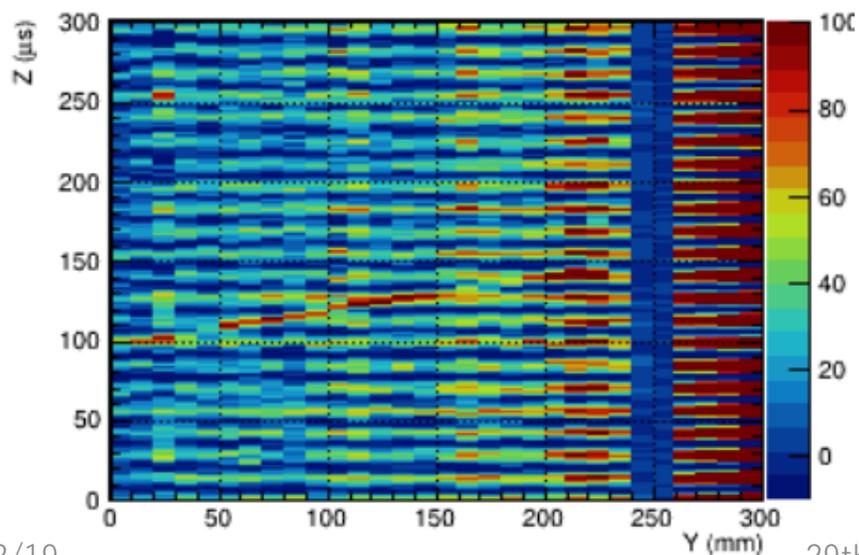
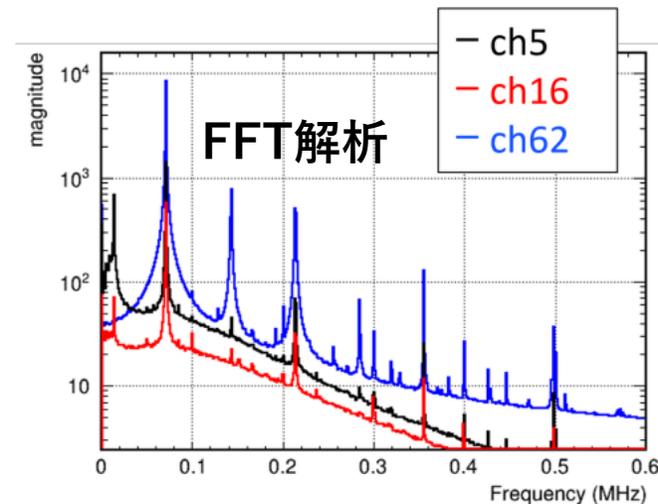
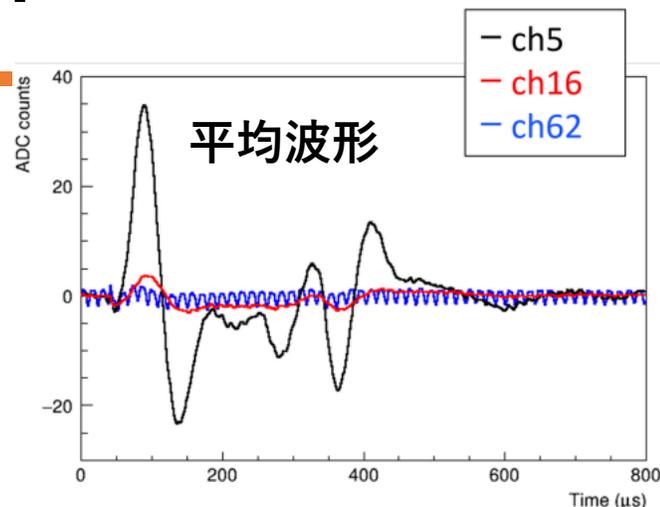
# LTARS2014 ノイズ解析

## ■ Anodeパッド配置

- Xch: 1~30ch / Ych: 33ch~62ch
- Ch5, 62付近にHV線あり(←ノイズ源)

## ■ 解析手法

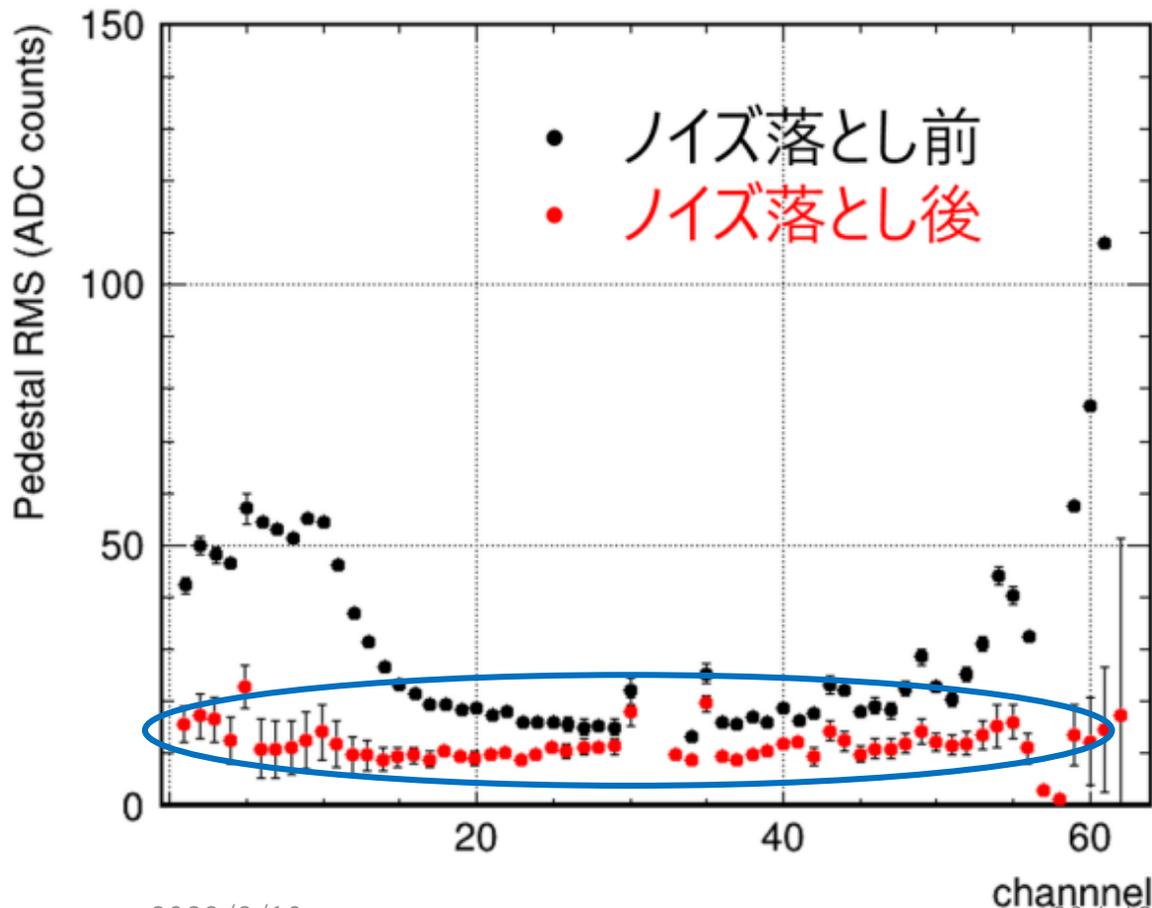
1. HV起因: ch62をtriple cos fitして差し引く
2. トリガー起因: 一様にのっているため信号のない波形の平均を差し引く
3. 低周波ノイズ: cos fitして差し引く



# LTARS2014 設計値比較

## ■ 解析的なノイズ処理

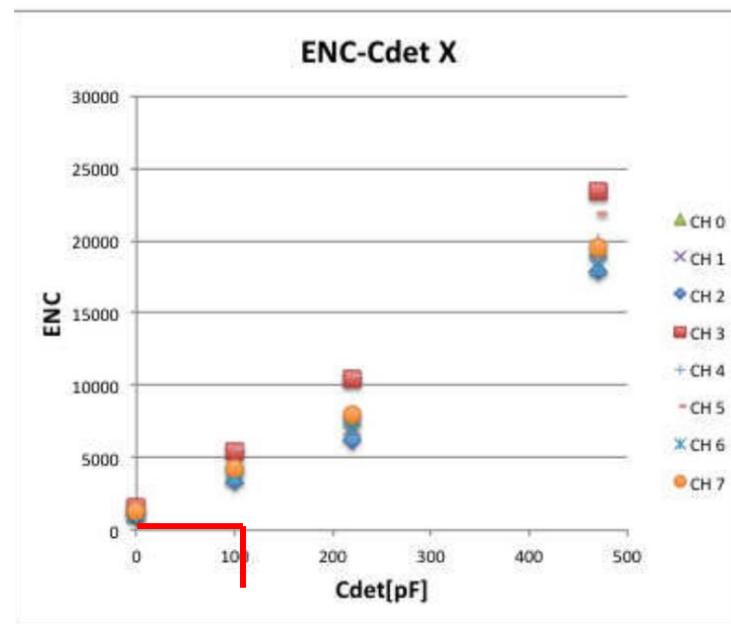
- 特徴的なノイズを解析的に落とす
- ペDESTALのRMSを評価



## ■ ノイズ解析(ENC)

- ノイズはおよそ12ADCCounts程度
- 検出器容量: 110pF
- コンバージョンゲイン: 9mV/fC

ENC ~  
4000e<sup>-</sup>



LTARS2014設計値  
検出器容量: 110pF  
ENC: 4000e<sup>-</sup> ~ 5000e<sup>-</sup>  
⇒ 設計値を満たしている

図 岩手大学 黒森雄介氏修士論文 H28.3  
「大型液体アルゴン TPC 測定器用 信号読み出しシステムの開発」

さらにSN比を上げるため、より良い性能のASICを使いたい

## ■ 開発方針

- KEK坂下氏, KEK岸本氏, 神戸大, 早稲田大の共同での開発
- Open-itでプロジェクトの立ち上げ
- 検出器の原理検証のためのビーム試験に向けた読み出しエレクトロニクス開発

## Readout electronics for LTARS2018\_K06A ASIC

作者: New Project Proposer — 最終変更 2022年11月15日 17時24分 — 履歴

### 概要

ガスTPCや液体アルゴンTPCの多チャンネル読み出し用のプロトエンドボードおよび読み出しシステムの開発を行う。これまでに開発されたLTARS2018\_K06A ASICを搭載し、低ノイズでワイドダイナミックな電荷読み出しボードを開発する。1枚のボードで、32chの検出器からの信号をASICで信号増幅し、アナログデジタル変換とFPGAによるデータ収集、ネットワーク読み出し機能を搭載したコンパクトなボードの開発を目指す。

### メンバー

- 寄田浩平, Kohei Yorita(代表:早稲田大学・教授)
- 田中雅士, Masashi Tanaka (早稲田大学、准教授)
- 身内賢太郎, Kentaro Miuchi(神戸大学、准教授)
- 岸本祐二, Yuji Kishimoto(KEK, 准教授)
- 坂下健, Ken Sakashita(KEK, 准教授)
- 本多良太郎, Honda Ryotaro (KEK)
- 岸下徹一, Tetsuichi Kishishita (KEK)
- 庄子正剛, Shoji Masayoshi (KEK)
- 東野聡, Satoshi Higashino (神戸大学、研究員)
- 窪田雅弓, Kubota Masami (総研大、修士1年)
- 清水虎冴, Tige Shimizu (早稲田大学、修士1年)
- 石川皓貴, Koki Ishikawa (早稲田大学、学部4年)

## 反(重)陽子ビームを用いた粒子識別試験

### □ 検出器からの要求

ノイズ(ENC)

< 3000e<sup>-</sup> : SN比 10  
荷電粒子から得る信号のみ考えればよい

ゲイン

10mV/fC

チャンネル数

~ 数100ch  
30cm(X) × 30cm(Y) : 5mmピッチ

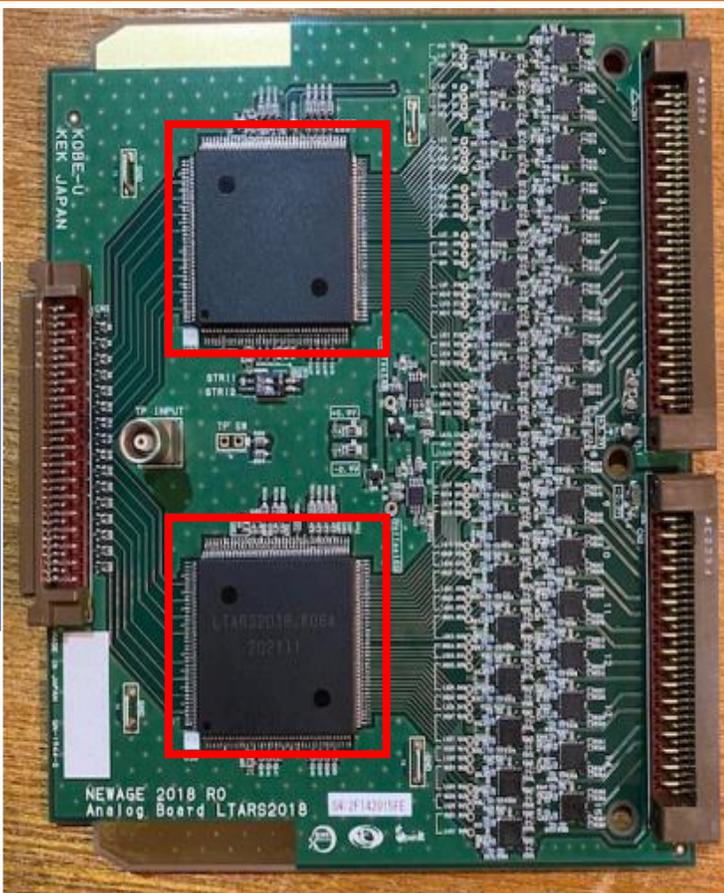
ダイナミックレンジ

数fC ~ 数10fC  
ビームの方向は一定

⇒ 搭載ASICに“LTARS2018\_A”を使用

# LTARS2018A搭載ボード

検出器



フラット  
ケーブル

フラット  
ケーブル

- アナログボード(REBOLT)
  - LTARS2018A × 2 ⇒ 32ch処理可能
  - LTARS2018A: ~1000個パッケージ済

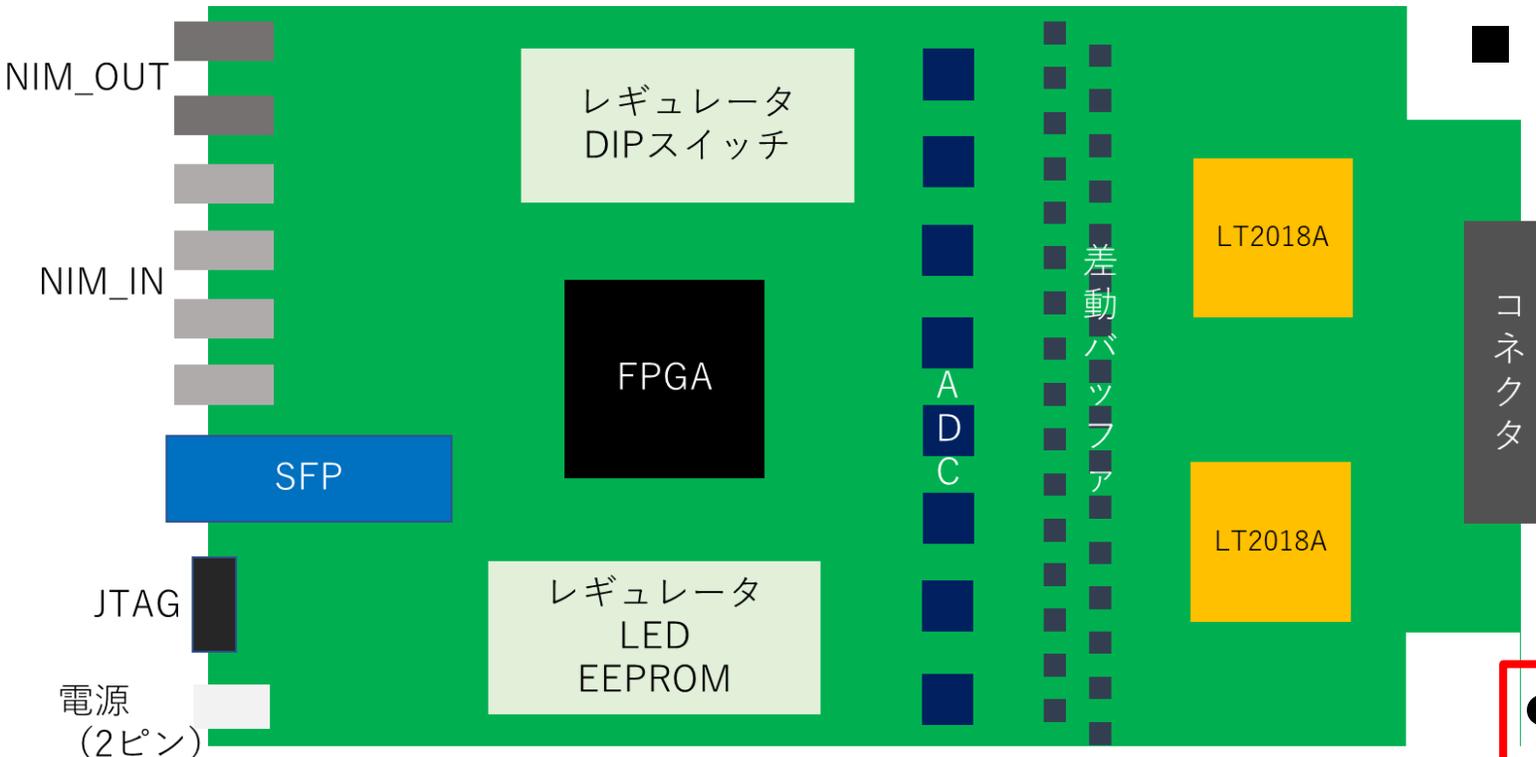


- デジタルボード(DELTA)
  - ADC, FPGA搭載
  - NIM信号でトリガー/同期
  - EthernetでPCにデータ送信

# 基板レイアウト案

## ■ 仕様

- 従来のLTARS2018\_K06Aチップが搭載されたボード(REBOLT)とデジタルボード(DELTA)の**統合型**
- 各機関の要求をまとめ最適解として設計 ⇒ 32ch/boardの信号処理が可能



## ■ 早稲田からの要求

- ✓ 30cm × 30cm × 30cmの検出器サイズで3mmピッチの読み出し ⇒ ~200ch程度必要
- ✓ CF152FTに複数枚挿して運用したい ⇒ 検出器側のボルトと干渉しない ⇒ 基板の横幅(136mm)
- ✓ 扱いやすいようI/Oコネクタは片側統一

- 既に回路設計は完了
- 基板が製作され次第, ビーム試験での実用化を目指しテストしていく

# まとめ/今後の展望

## ■ まとめ

- ✓ GRAMS実験はLArTPCを用いて反粒子探索を行う
- ✓ 反(重)陽子のLAr中での原子核捕獲事象についての原理検証
  - ⇒ J-PARC K1.8BRビームラインでの検証を予定
  - ⇒ プロポーザル承認
- ✓ シミュレーションによるセットアップ検討
  - 検出器の読み出しパッドのサイズ
  - LTARS搭載の新規基板の設計, 製作
- ✓ 地上試験におけるLTARS2014の使用

## ■ 今後の展望

- J-PARC K1.8BRでの反重陽子のレート検証 (Phase1: 2023年度)
- LArTPCによる反(重)陽子の測定 (Phase2: 2023~2024年度)

# Back Up

---

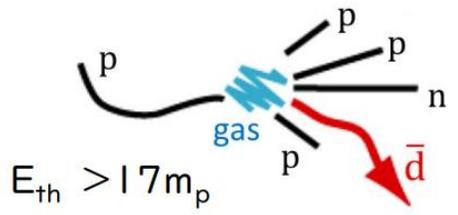
# 宇宙線反粒子フラックス

- 反陽子、陽電子は既に多くの気球・衛星実験で観測
  - 2次生成 (1次宇宙線+ISM)の宇宙線としてある程度理解

※統計的な制限、モデル不定性は残る

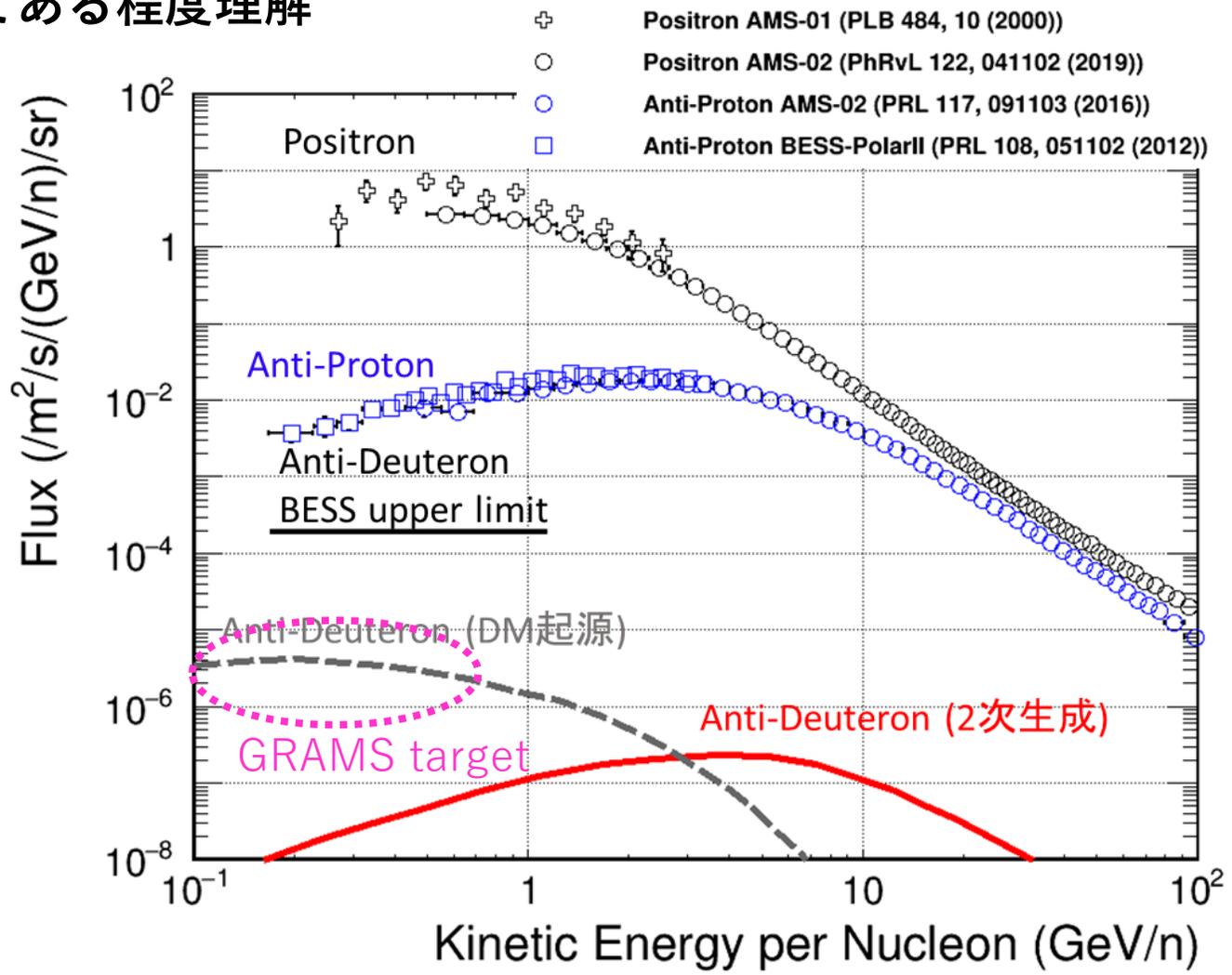
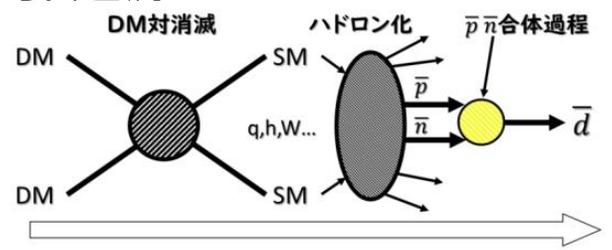
- 宇宙線中の反重陽子、反ヘリウムは未観測

- 既知の起源 = “2次生成”( +超新星爆発)

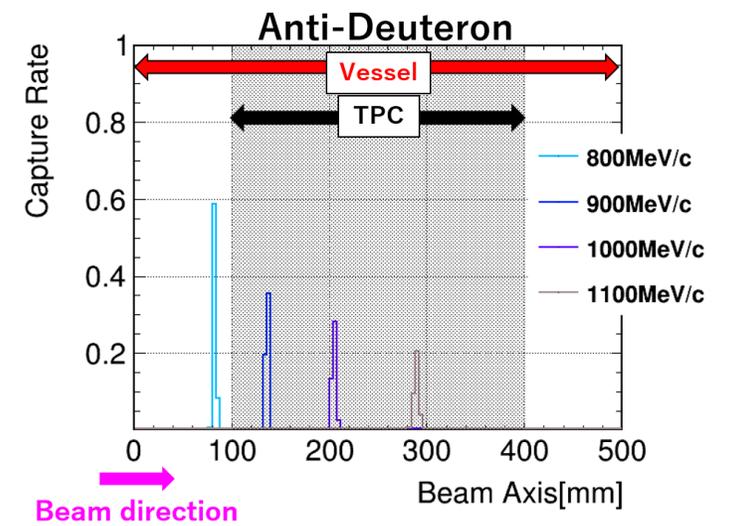
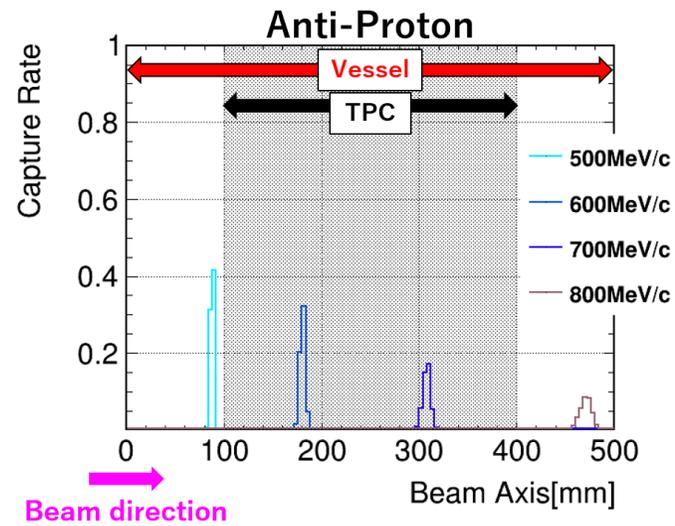
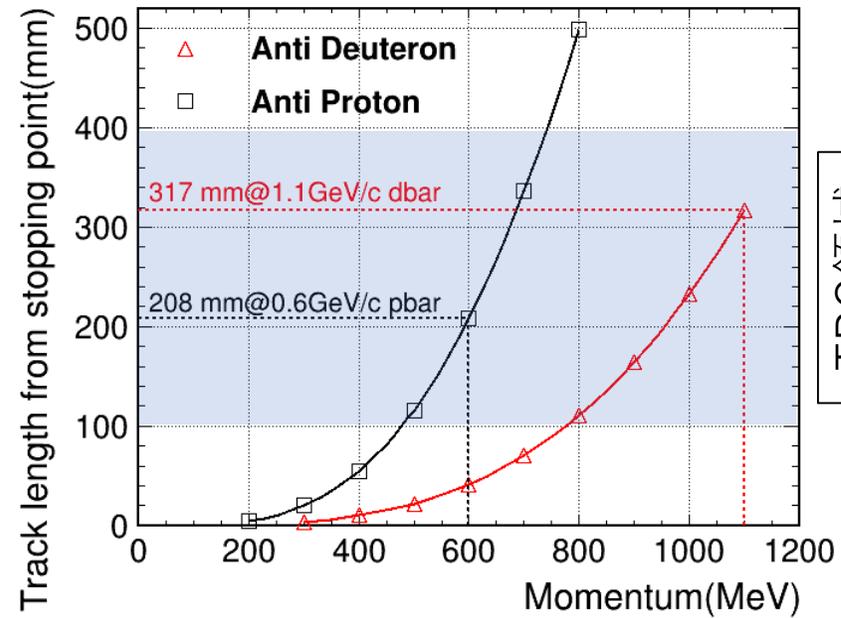


※衝突の運動学より  
低エネルギー側で抑制

- DMの対消滅/崩壊 起源



# Anti-Matter Stopping point



# P98: Details of the Request (Proposal document)

- Phase-1 (Ready)

## Antideuteron Beam Study Request

<b>Objective:</b>	Establishment of antideuteron beam at K1.8BR beam line
<b>Beam Line:</b>	K1.8BR in J-PARC Hadron Hall
<b>Beam Particle:</b>	Antideuteron 1100 MeV/ $c$
<b>Detectors:</b>	Present beam counters at K1.8BR beam line (+ ToF counters if necessary)
<b>Beam Time:</b>	8 hours (anytime prior to the LArTPC Beam Request)
<b>Beam Rate:</b>	TBC ( <i>e.g.</i> 1 antideuteron per spill [1]) <b>&gt;10 kW</b>

- Phase-2 (2023 Fall – End of JFY 2024)

## Summary of Beam Request (LArTPC beam exposure)

<b>Objective:</b>	Measurement of antimatter reaction in LArTPC
<b>Beam Line:</b>	K1.8BR in J-PARC Hadron Hall
<b>Beam Particle:</b>	Antiproton 600 MeV/ $c$ and 700 MeV/ $c$ Antideuteron 1100 MeV/ $c$ (in case of successful beam study)
<b>Detectors:</b>	One LArTPC and scintillation counters
<b>Beam Time:</b>	6-hour each (2-hour beam tuning + 4-hour data taking with commissioning)
<b>Beam Rate:</b>	Less than 1 KHz (including background particles)

# 信号読み出しエレクトロニクスへの要求

	GRAMS本検出器	反(重)陽子ビームを用いた粒子識別試験
・検出器からの要求		
ノイズ(ENC)	< 200e <sup>-</sup> MeV- $\gamma$ 線観測による制限	< 3000e <sup>-</sup> : SN比 10 荷電粒子から得る信号のみ考えればよい
ゲイン	10mV/fC	10mV/fC
チャンネル数	数1000ch 150cm(X) × 150cm(Y): 数mmピッチ	~数100ch 30cm(X) × 30cm(Y): 3mmピッチ
ダイナミックレンジ	TPCに入射する荷電粒子の方向による	数fC ~ 数10fC ビームの方向は一定
・工学的な要求	気球実験特有の課題	
消費電力	低	地上での試験のため必要なし
耐衝撃	あり	

# LTARS2018\_K06A 概要

- LAr検出器用ASIC+陰イオンガスTPC用に開発された, 汎用ASIC
- 陰イオンガスTPC特有の二つのピークに対応

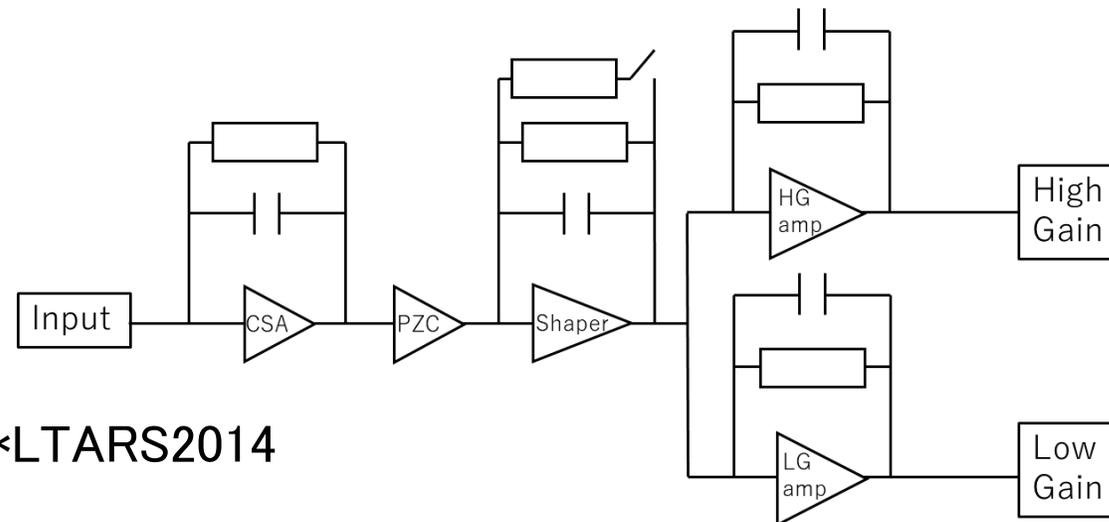
## ● 基礎特性

項目	値	
チップサイズ	2.5mm × 5mm	
Ch数	16ch	
時定数	7 $\mu$ s	3 $\mu$ s
動作温度	室温	
検出器容量	300pF	
ダイナミックレンジ	$\pm 120$ fC / $\pm 1600$ fC	
ゲイン	10mV/fC(High) / 0.5mV/fC(Low)	
ENC	4000e <sup>-</sup> / 6000e <sup>-</sup>	

- ただし, 液体アルゴン温度での動作はしない

## ● LTARS2018\_K06A回路構成(1ch)

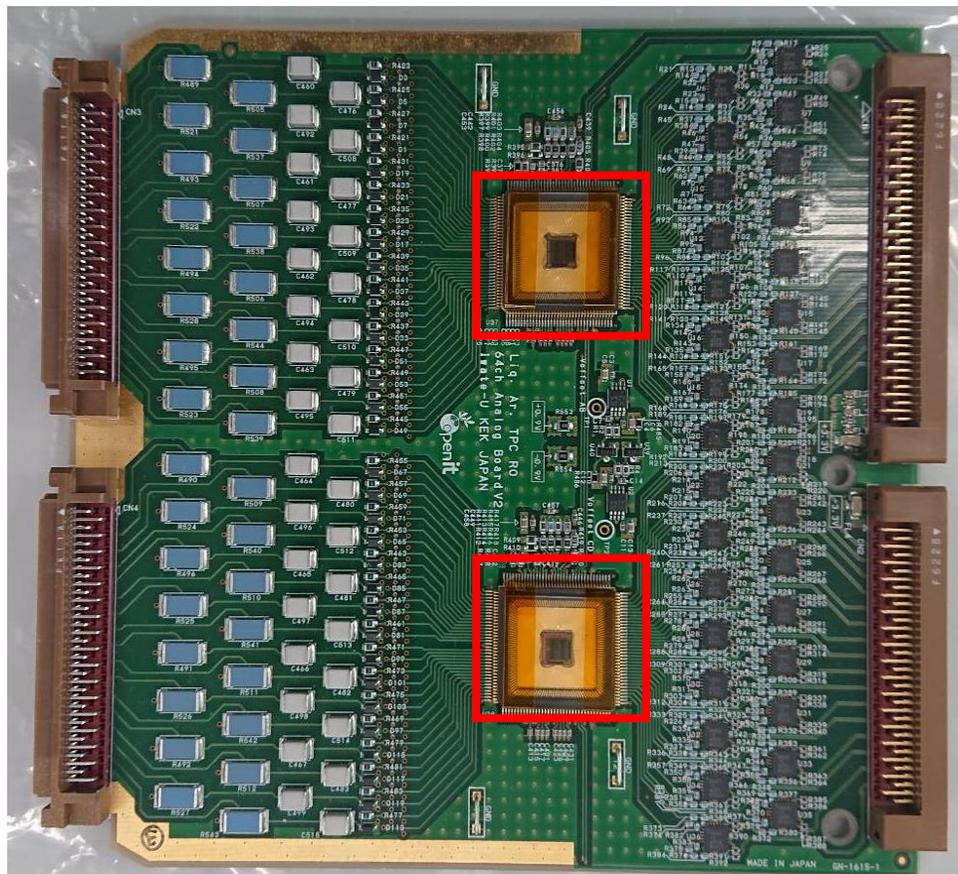
- プリアンプ, PZC回路, シェイパー
- HG amp / LG amp
  - ・一つの入力信号に対して, 二つの出力



\*LTARS2014

ENC=14000e<sup>-</sup>

# LTARS2014搭載ボード



フラット  
ケーブル

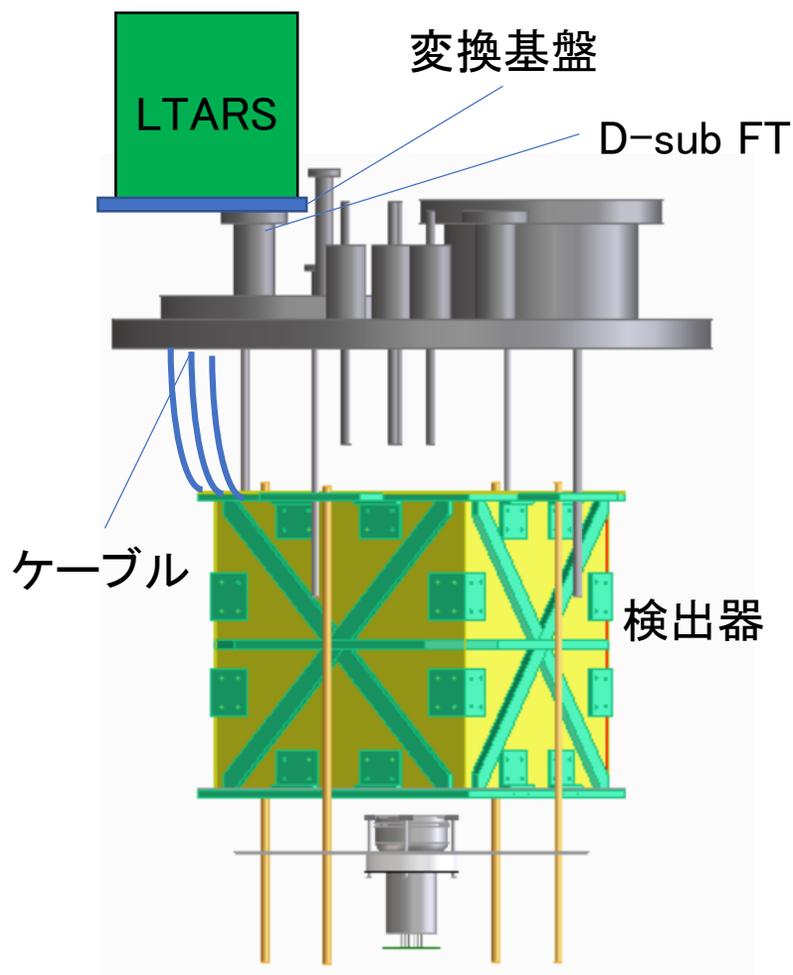
フラット  
ケーブル

- アナログボード
  - LTARS2014 × 2 ⇒ 64ch処理可能



- デジタルボード (DELTA)
  - ADC, FPGA搭載
  - NIM信号でトリガー/同期
  - EthernetでPCにデータ送信

# 検出器容量



## ■ 検出器容量の測定

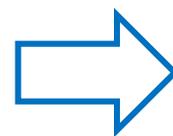
- 読み出しボードからTPCまでにのる静電容量

○: 接続有  
×: 接続無

エレキ変換基盤	FT	ケーブル	TPC変換基盤	TPC	静電容量
○	○	×	×	×	20[pF]
○	○	○	×	×	45[pF]
○	○	○	○	×	55[pF]
○	○	○	○	○	<b>110[pF]</b>

## ■ Anodeパッドの容量

- Anodeパッドは5mmピッチで配置
- パッドとパッドの間に静電容量がのっている



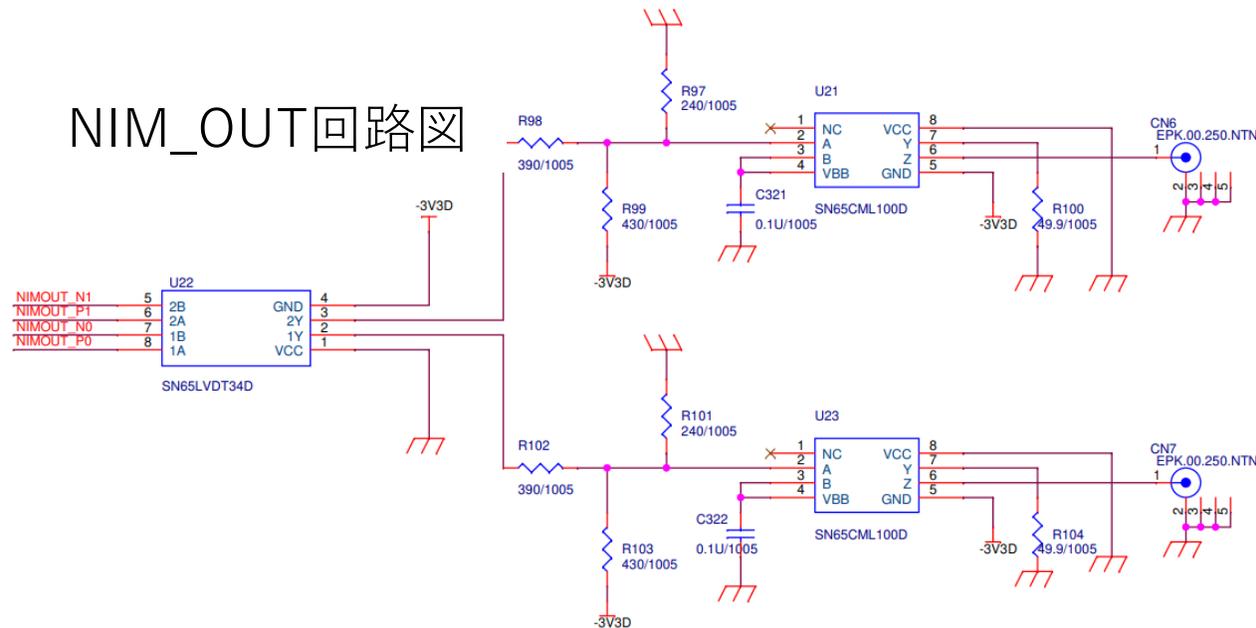
1. Anodeパッドのデザイン検討
2. LTARS2018の使用

# 回路設計 -I/Oコネクタ-

## ■ I/O

- NIM\_IN：外部からPMT信号をボードに入力して，FPGA内で処理，同期させる
- NIM\_OUT：複数枚のボードで同期をとる，1⇒2に増やした
- SFP：PCにデータを送信
- JTAG：FPGAの書き換え用

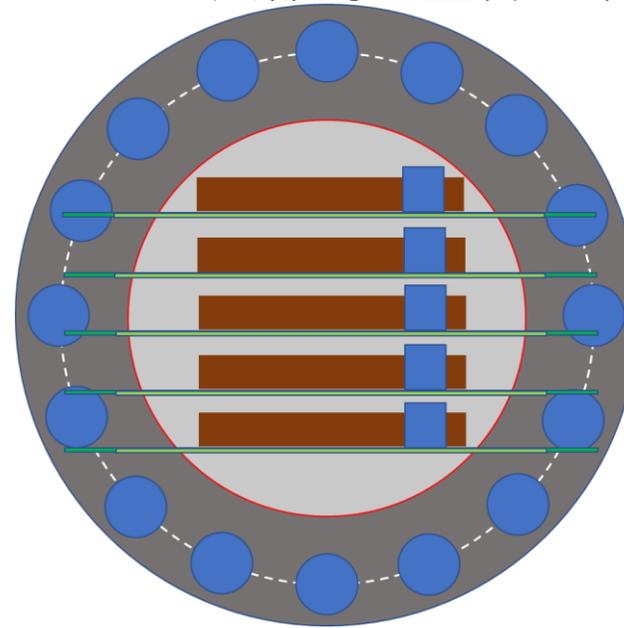
NIM\_OUT回路図



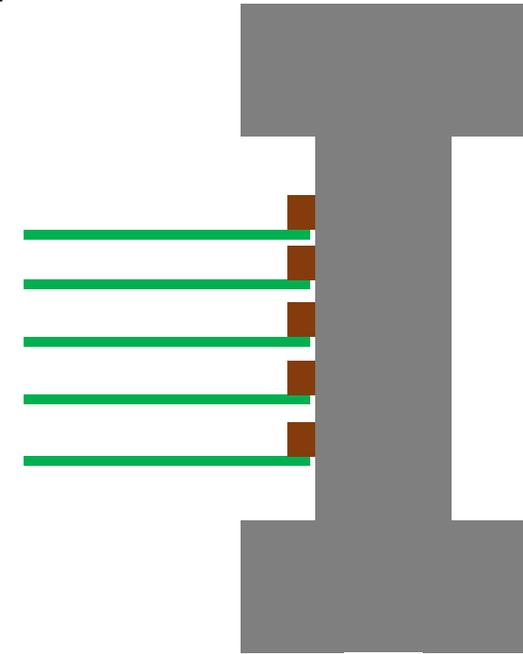
2023/2/19

## ■ 検出器側IF

- 容器のCFフランジを想定
- サイズ：CF152 (or CF253)
- 複数基板を平行に挿したい：ライトアングル型
- 具体的な型番は未定



正面



横