

ガスTPCを用いた暗黒物質 探索実験のための読み出し技術

神戸大 東野 聰

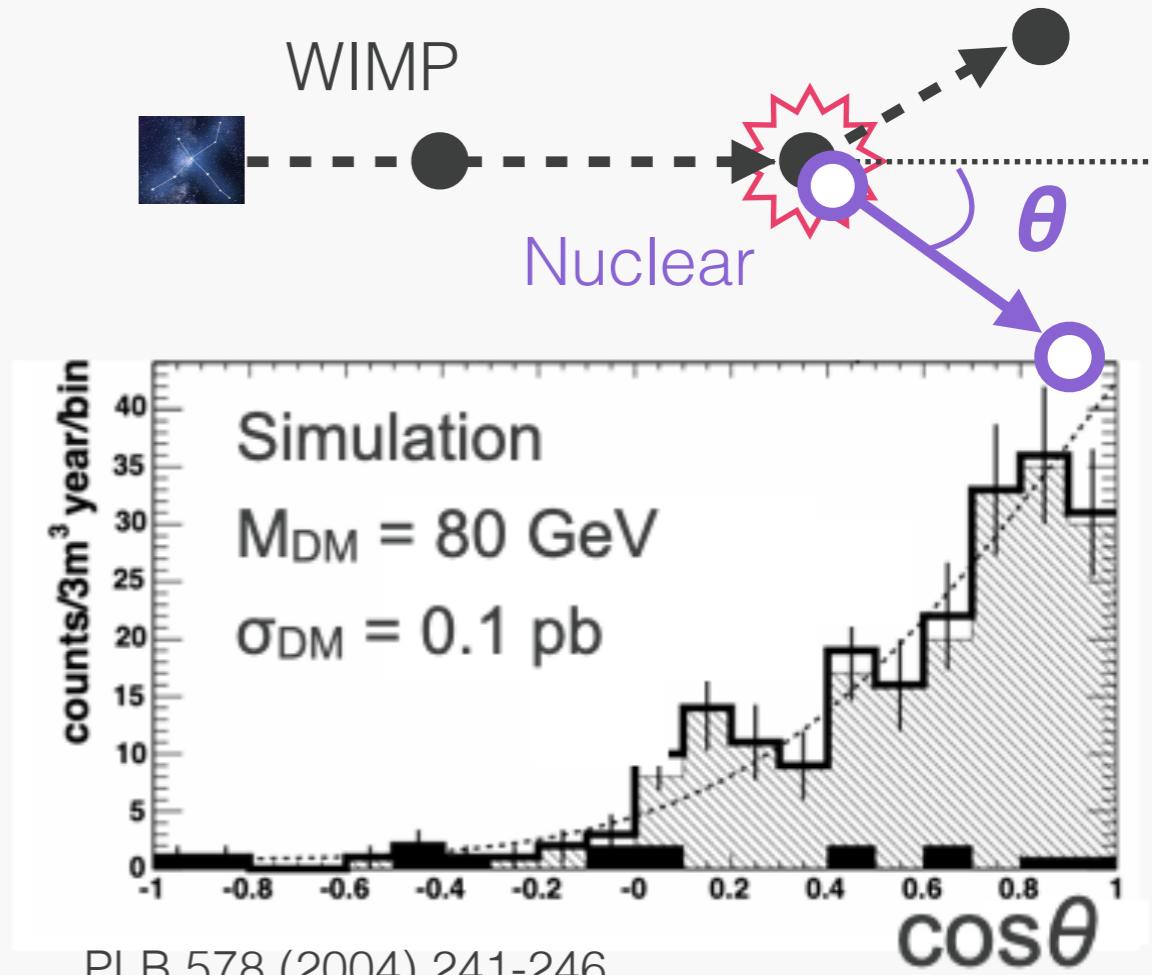
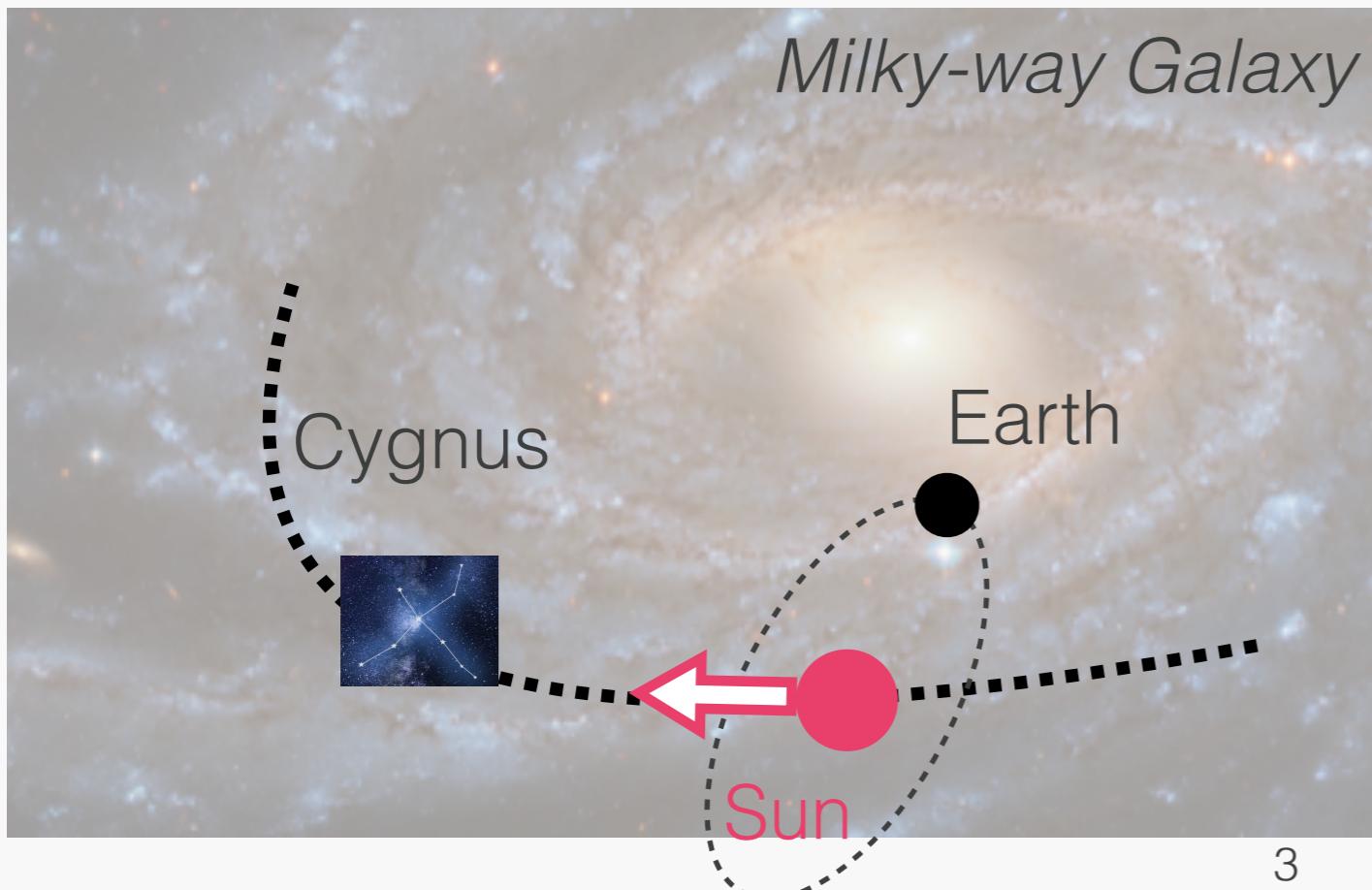
on behalf of NEWAGE and MIRACLUE groups

2025年 11月 18日

イントロダクション

方向感度を持ったWIMP直接探索

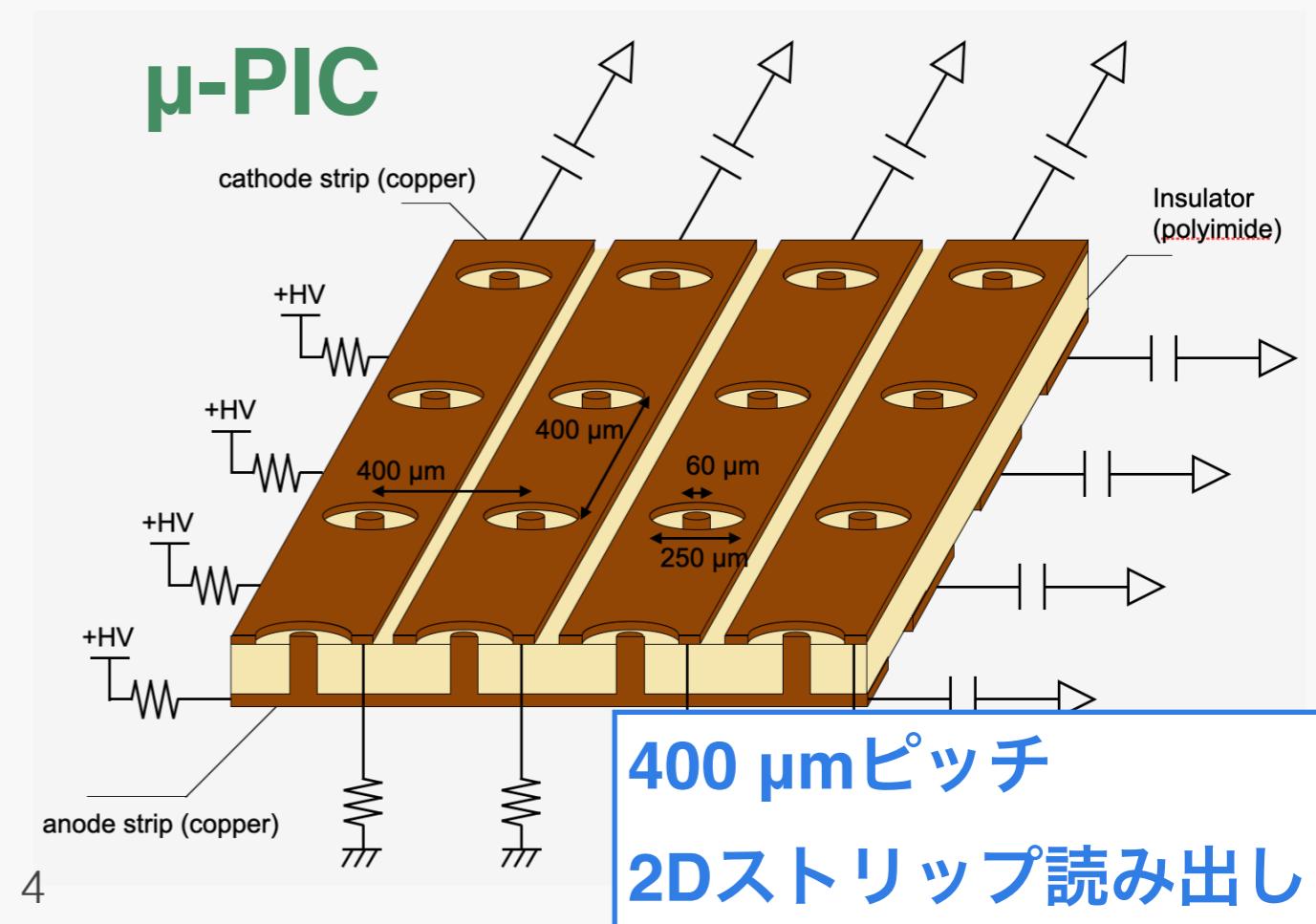
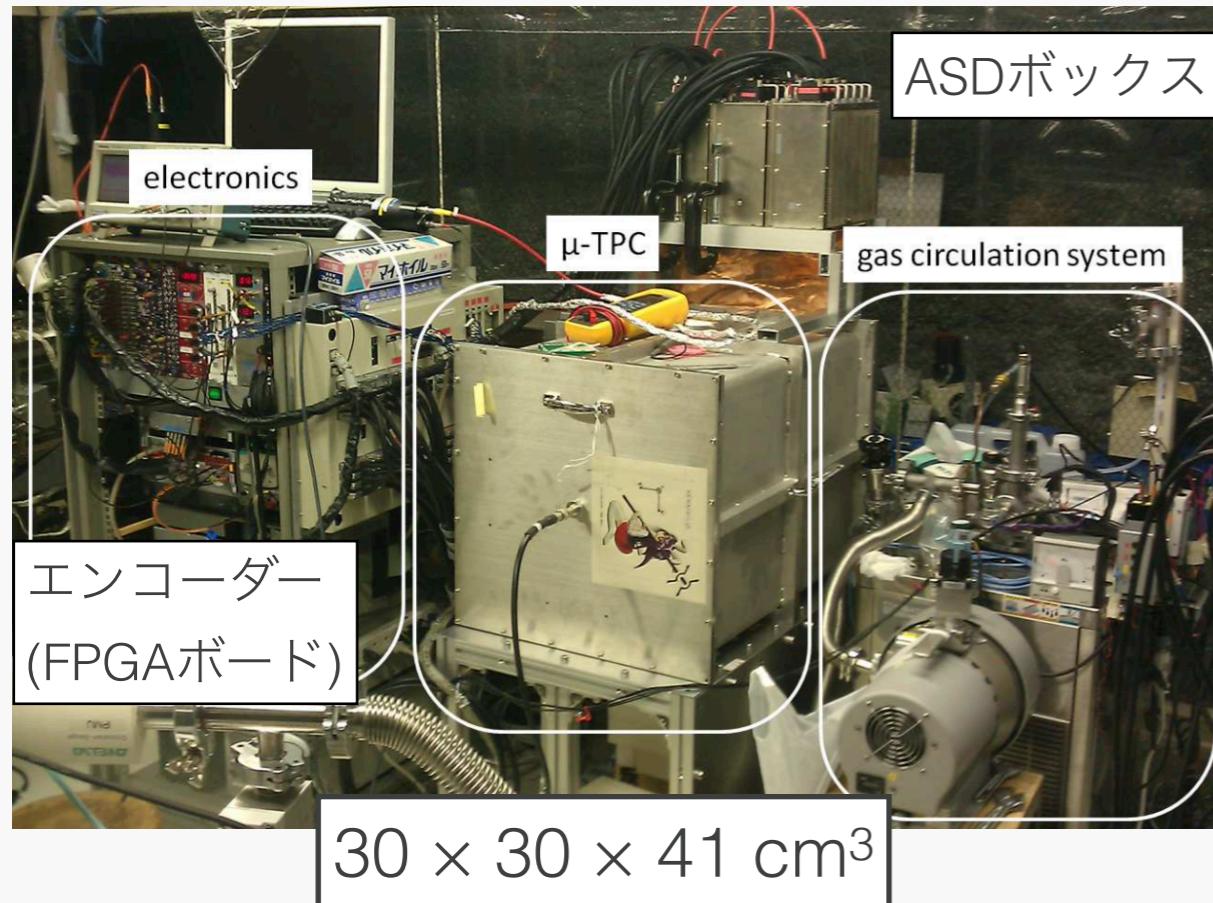
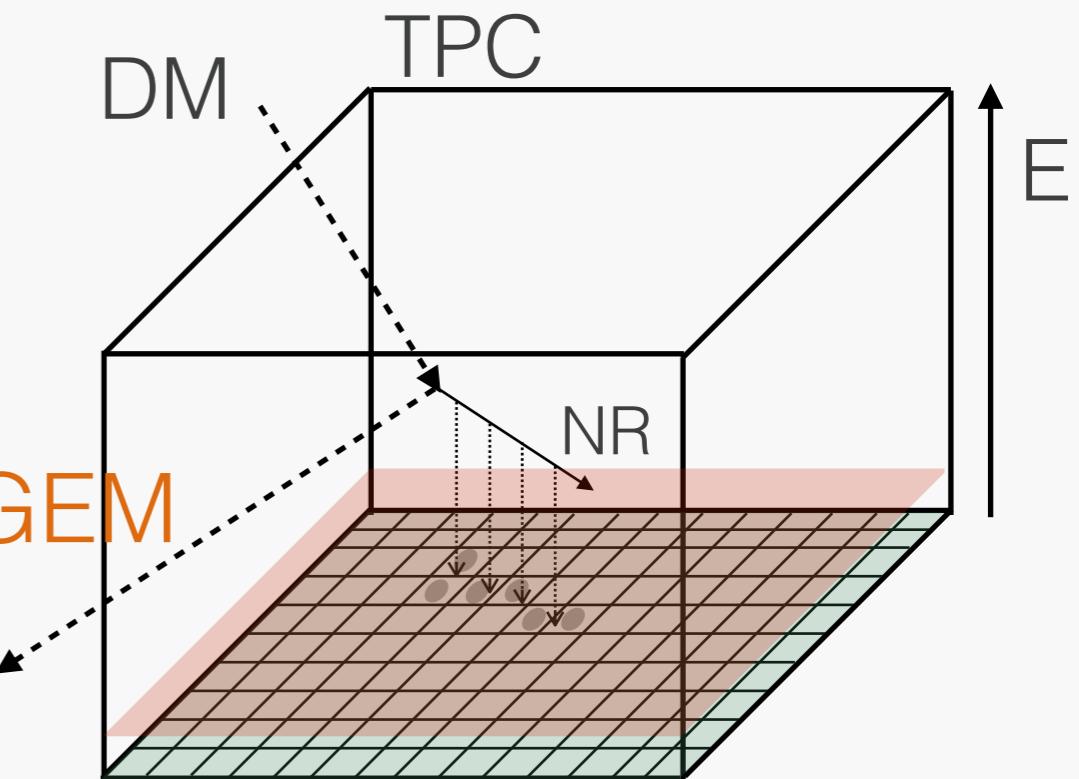
- はくちょう座方向から相対的に到来する暗黒物質 (WIMP) よる原子核反跳観測
- 反跳角度を測定することで発見 + より detailなWIMP性質理解へ
 - “ニュートリノフォグ”領域へのアクセス (発見)
 - WIMP kinematicsの理解で標準ハローモデルの検証 (性質理解)



- 神岡坑内での地下実験実施中

- 低圧ガスTPCで**飛跡再構成**

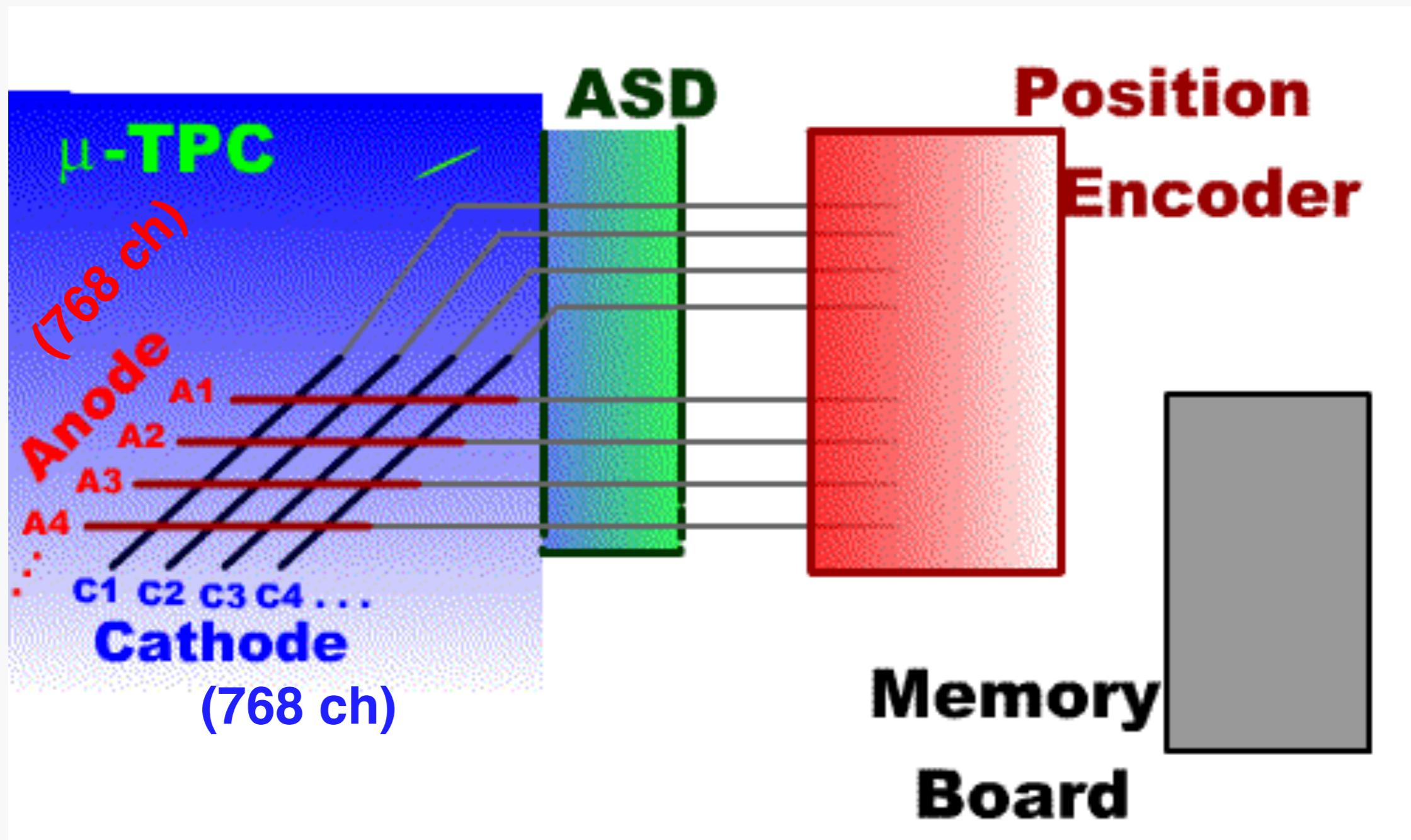
- $30 \times 30 \times 41 \text{ cm}^3$ fiducial volume
- 低圧CF₄ ガス (0.1 atm)



3次元飛跡再構成に向けたデータ収集

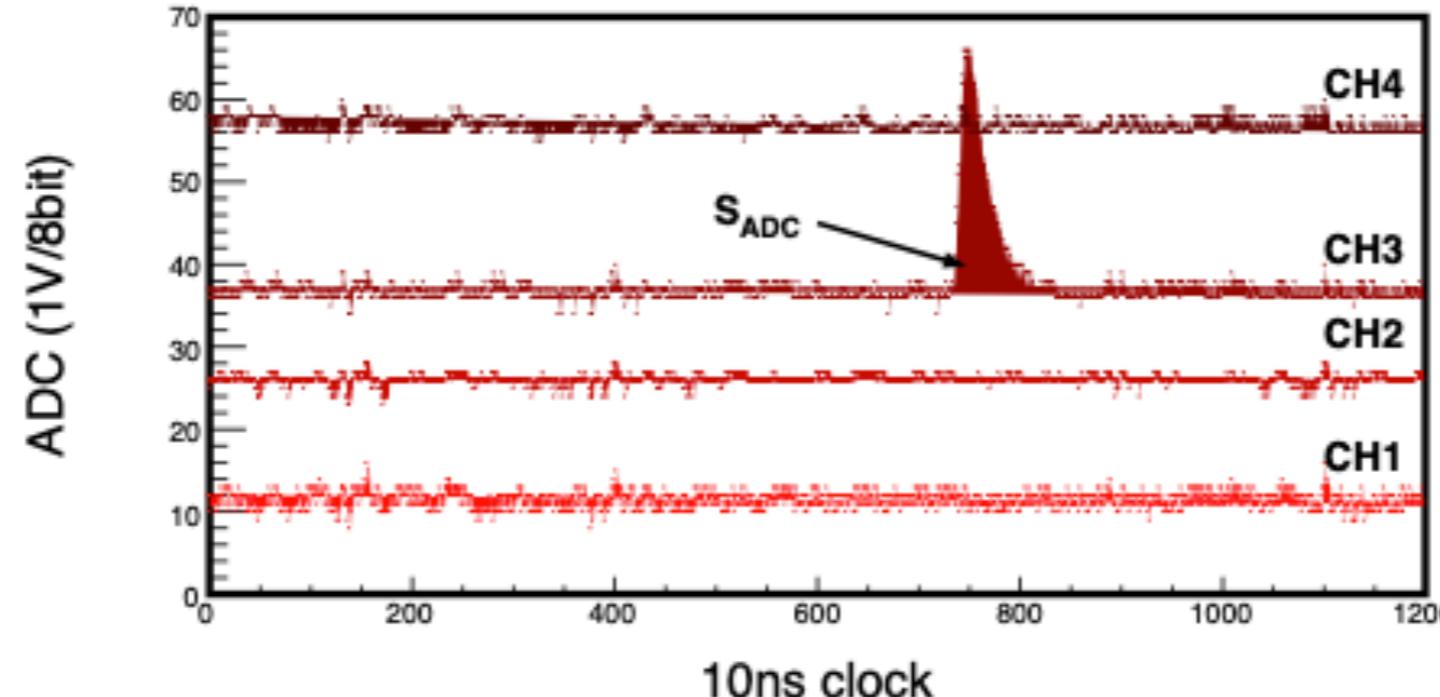
現行NEWAGEのDAQシステム

(これに加えて4チャンネルに束ねたADC波形)



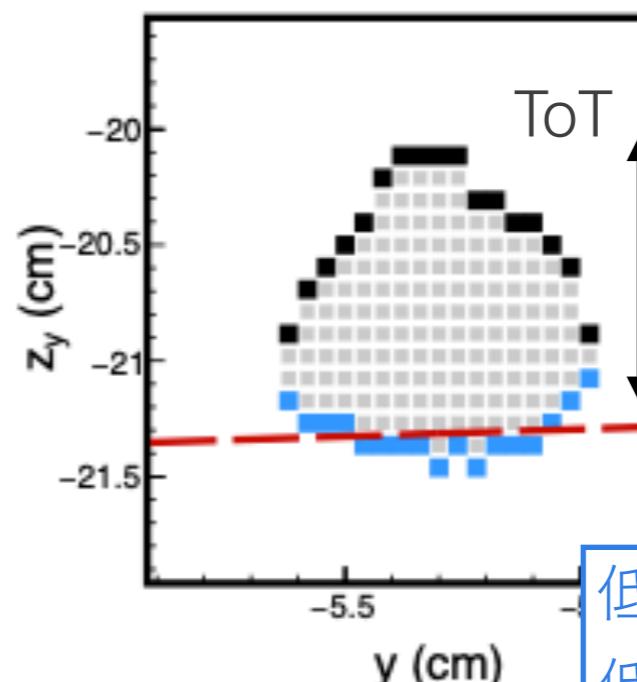
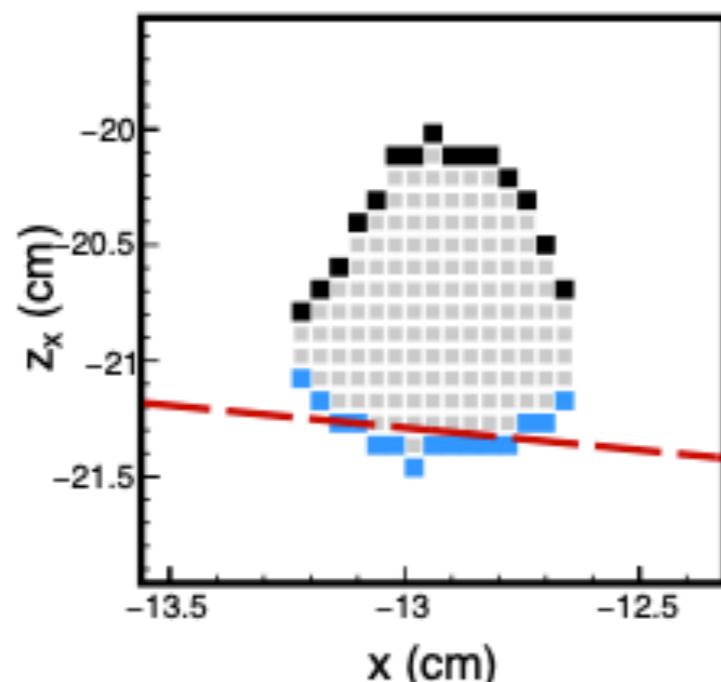
取得データ (Event display)

束ねたチャンネルの波形からエネルギー測定: 典型的には $O(1\sim10)$ keV



ToT (Time over Threshold)

各チャンネルのToT / ToFから飛跡を再構成



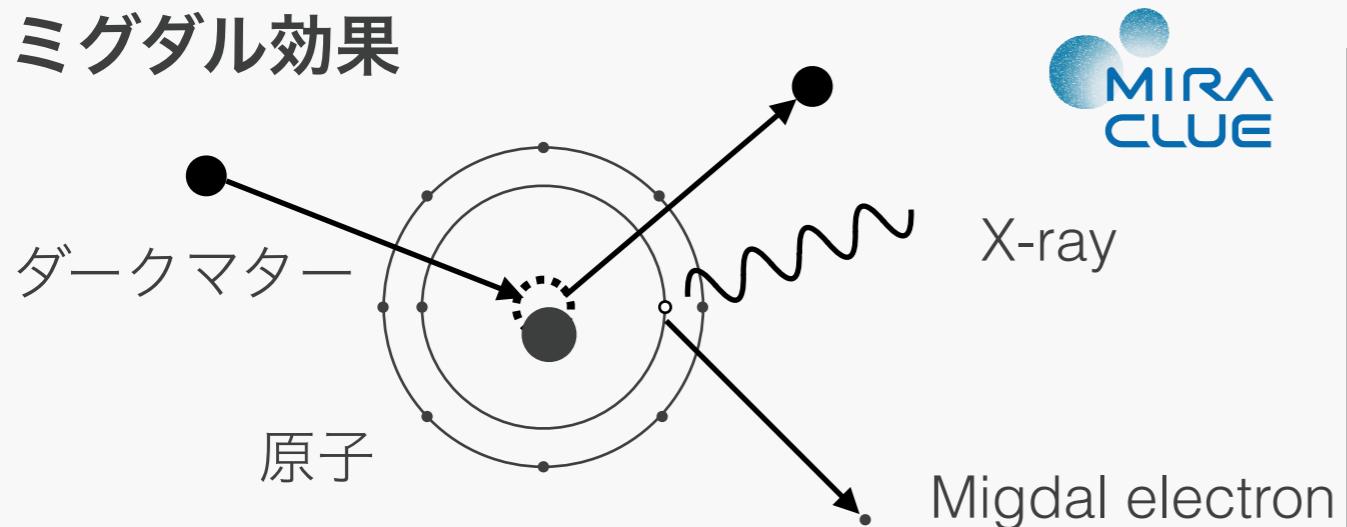
低エネルギーなので
低圧ガス使っても短飛跡

V_{th}

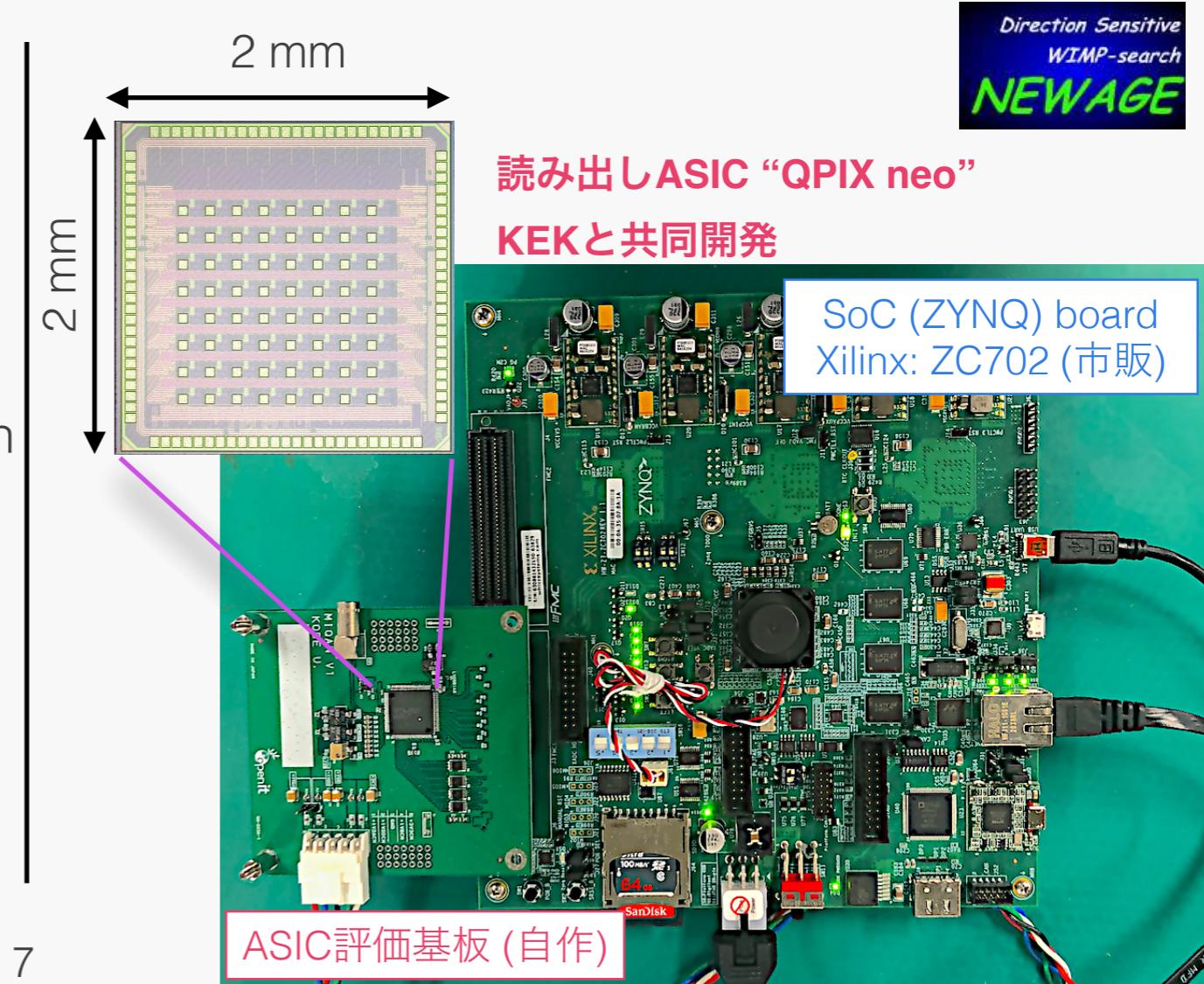
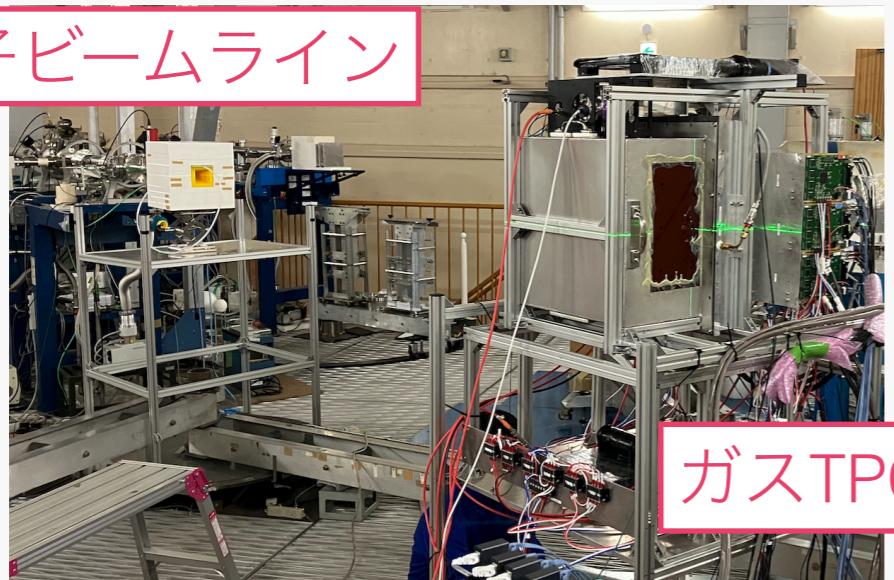
暗黒物質探索関連のアプリケーション

- NEWAGEの検出器技術を派生させて...
 - “ミグダル効果”を初観測したい → MIRACLUE 実験: 統合DAQシステム
 - 飛跡再構成精度を向上させたい → 次世代NEWAGE実験: ピクセル読み出し

ミグダル効果



中性子ビームライン

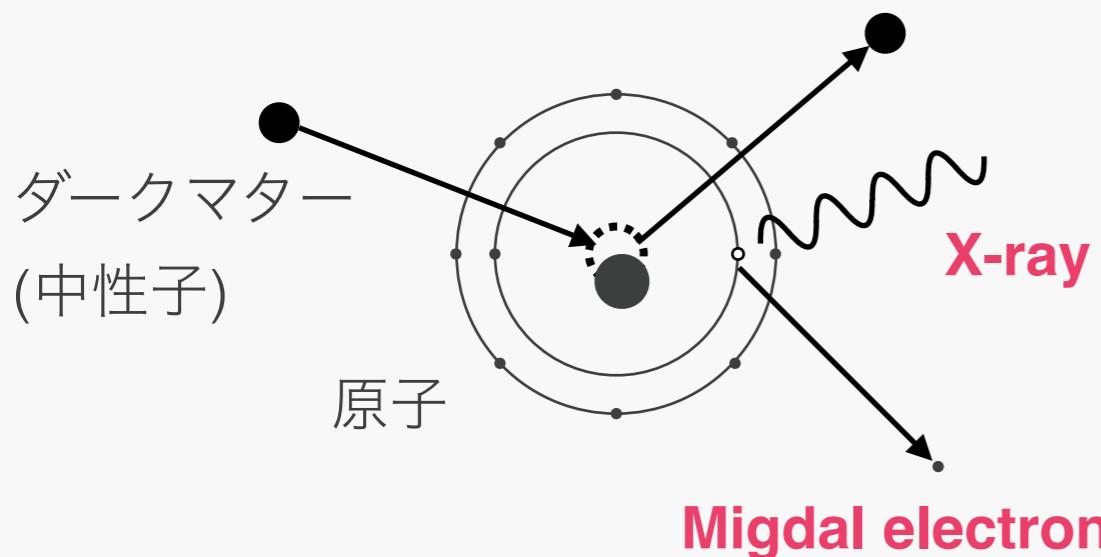




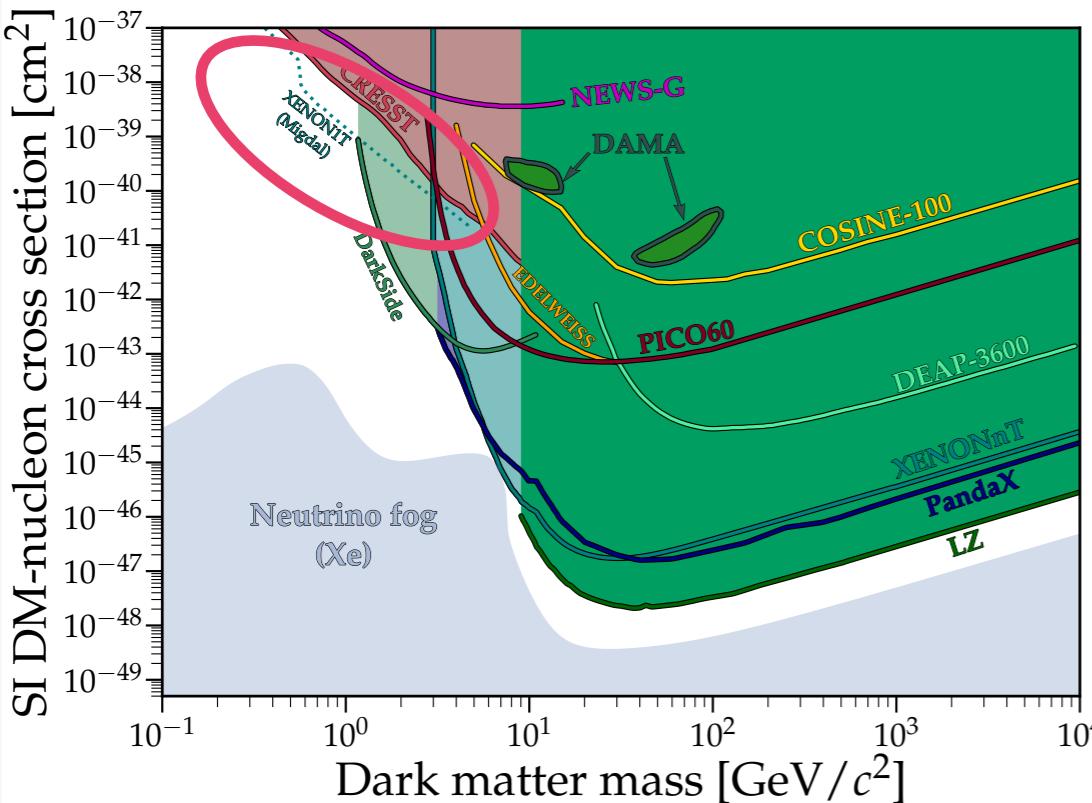
MIRACLUE

MIRACLUE実験

ミグダル効果



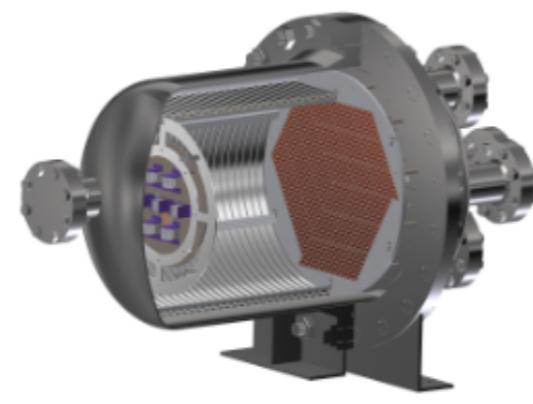
- 原子核が突然動くと周りの電子が励起または電離
 - 暗黒物質や中性子による原子核反跳で**稀に起こる**
- 原子核反跳 + α のエネルギー損失
 - より低エネルギー事象 (低質量DM) 探索に感度
- が、そもそも原子核反跳でのミグダル効果未検証
- ふたつの既存の検出器技術でそれぞれ観測を目指す



<https://github.com/cajohare/DirectDetectionPlots>

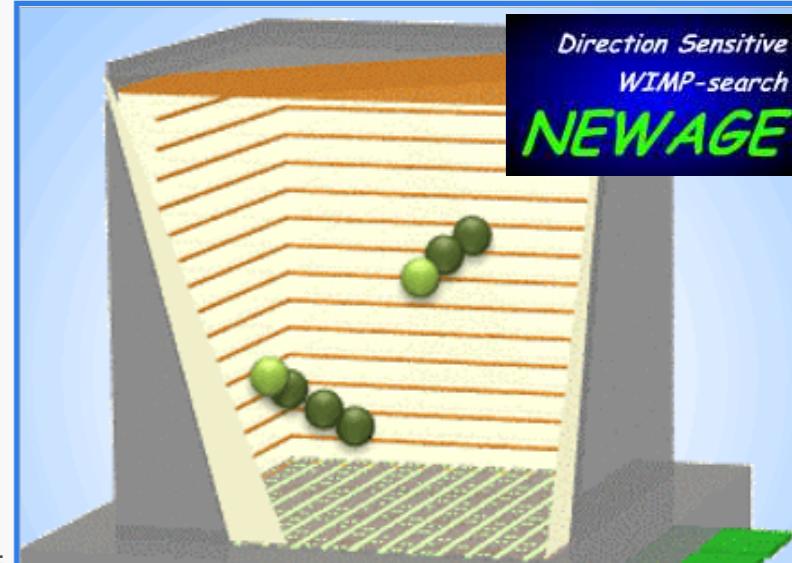


AXEL (東北大)
高圧Xeガスでの $0\nu\beta\beta$ 探索





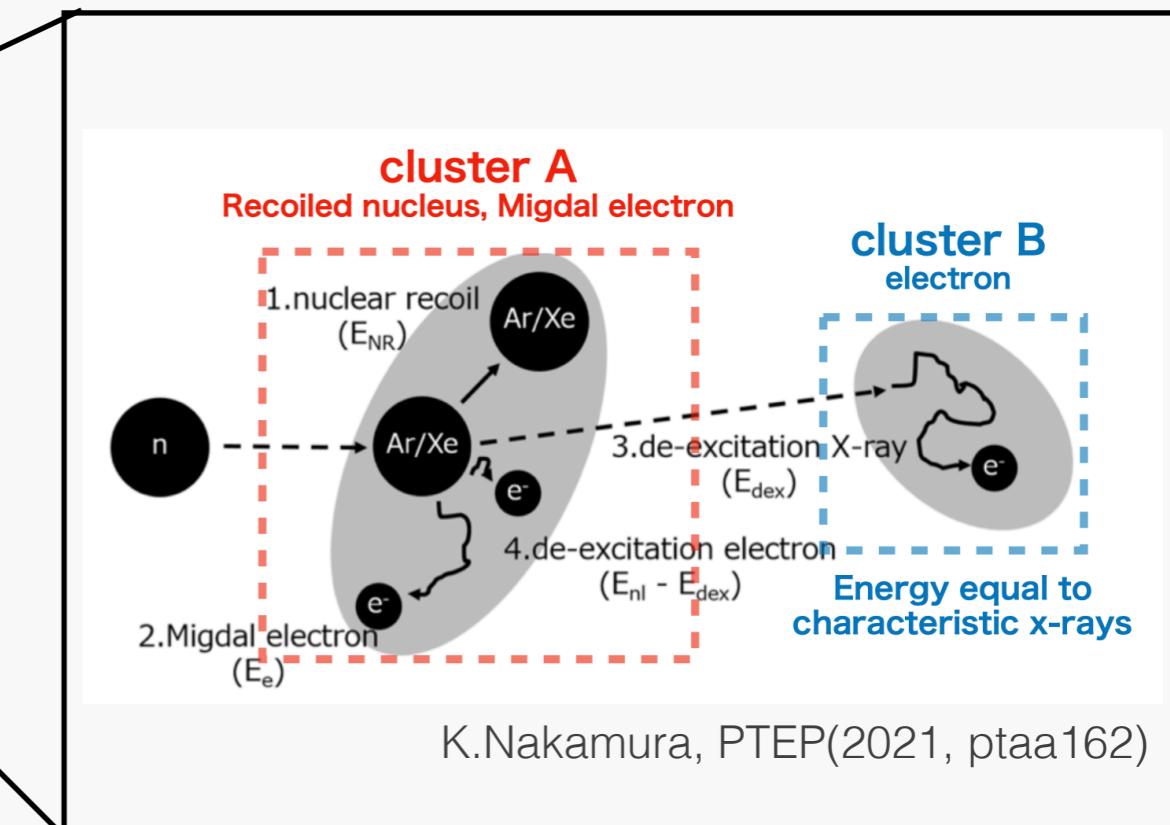
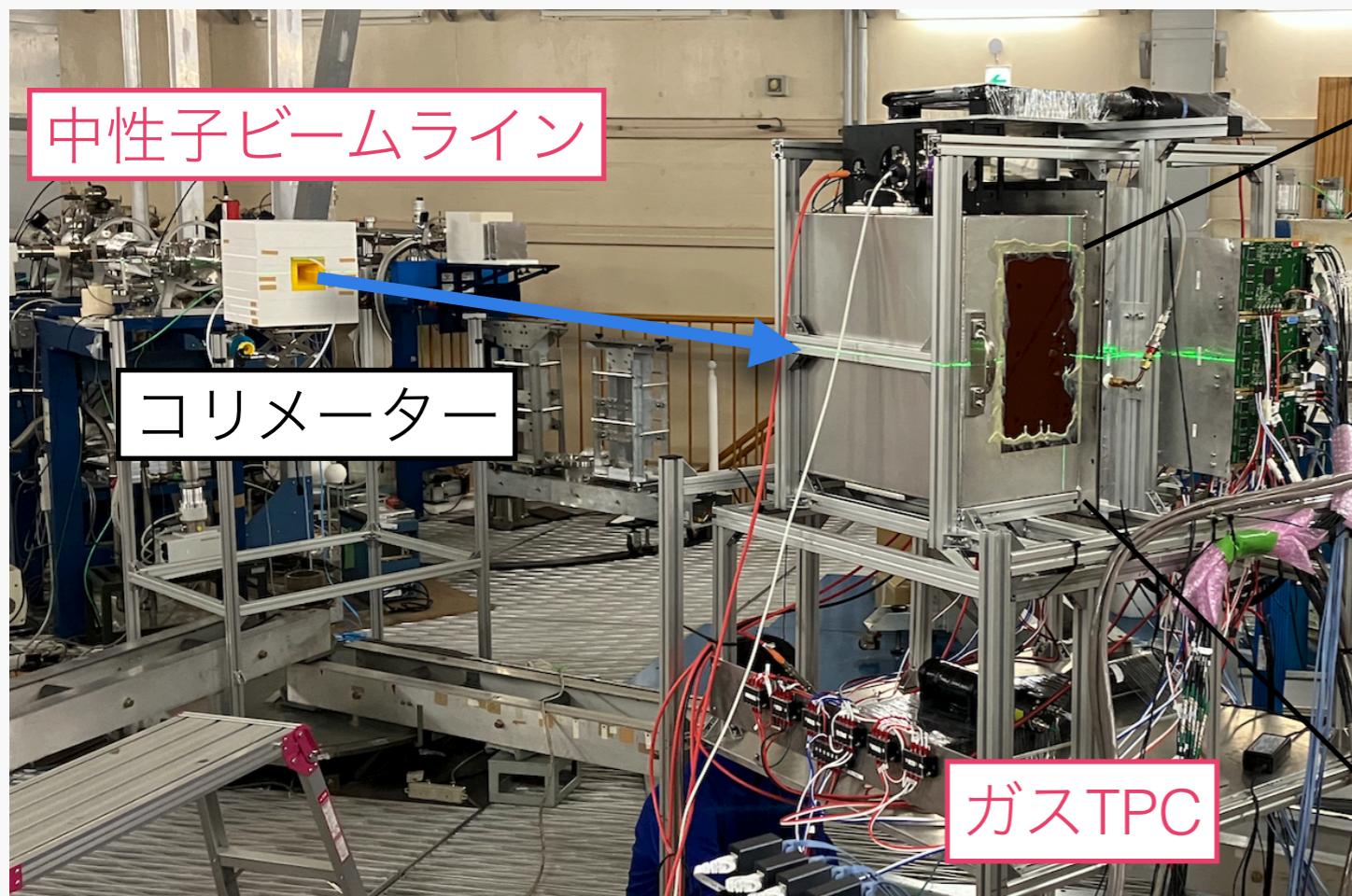
NEWAGE (神戸大)
Arガスでの暗黒物質探索
本日はこちらがメイン



位置感度のある検出器で
イベントトポロジーを捉える

MIRACLUE-Argon team

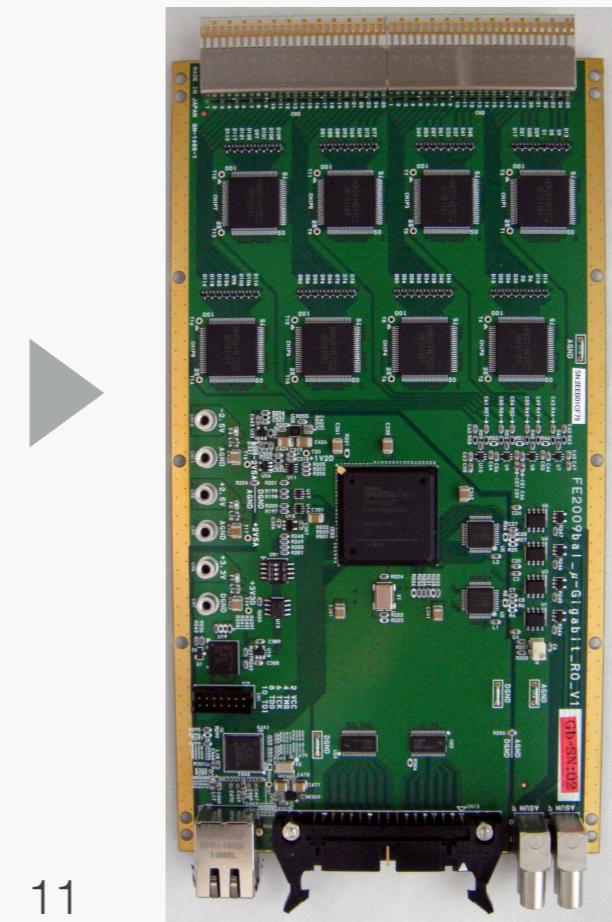
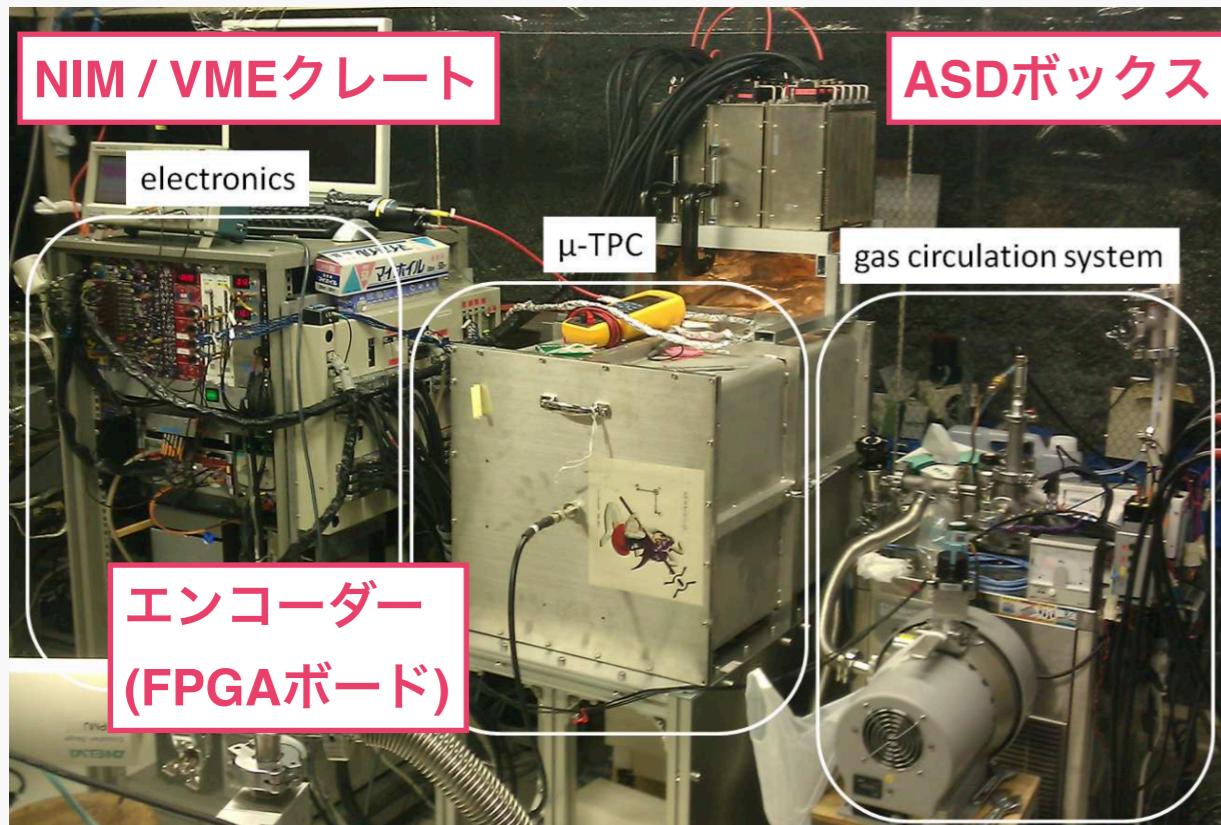
- 「稀」なのでたくさんの中性子をぶつけていく
 - そこからミグダル効果っぽい事象を見つけ出す
- 原子核反跳 + ミグダル電子放出に伴い放出する特性X線を検出
 - (暗黒物質直接探索目線で) **高レートで2クラスターの位置検出**が重要



産総研 中性子標準場ビームライン

NEWAGE DAQシステムからの脱却

- NEWAGEが持つエレキではでかすぎ
 - 中性子も跳ね返るし物質量(サイズ)の大きいものを持ち込みたくない
- でも新しいものを(極力)作りたくない → 既存のμ-PIC読み出し流用したい
 - コンパクトな既製品の読み出しボードを12枚使って読み出すことにした
 - ▶ NEWAGEからDAQほぼ一新

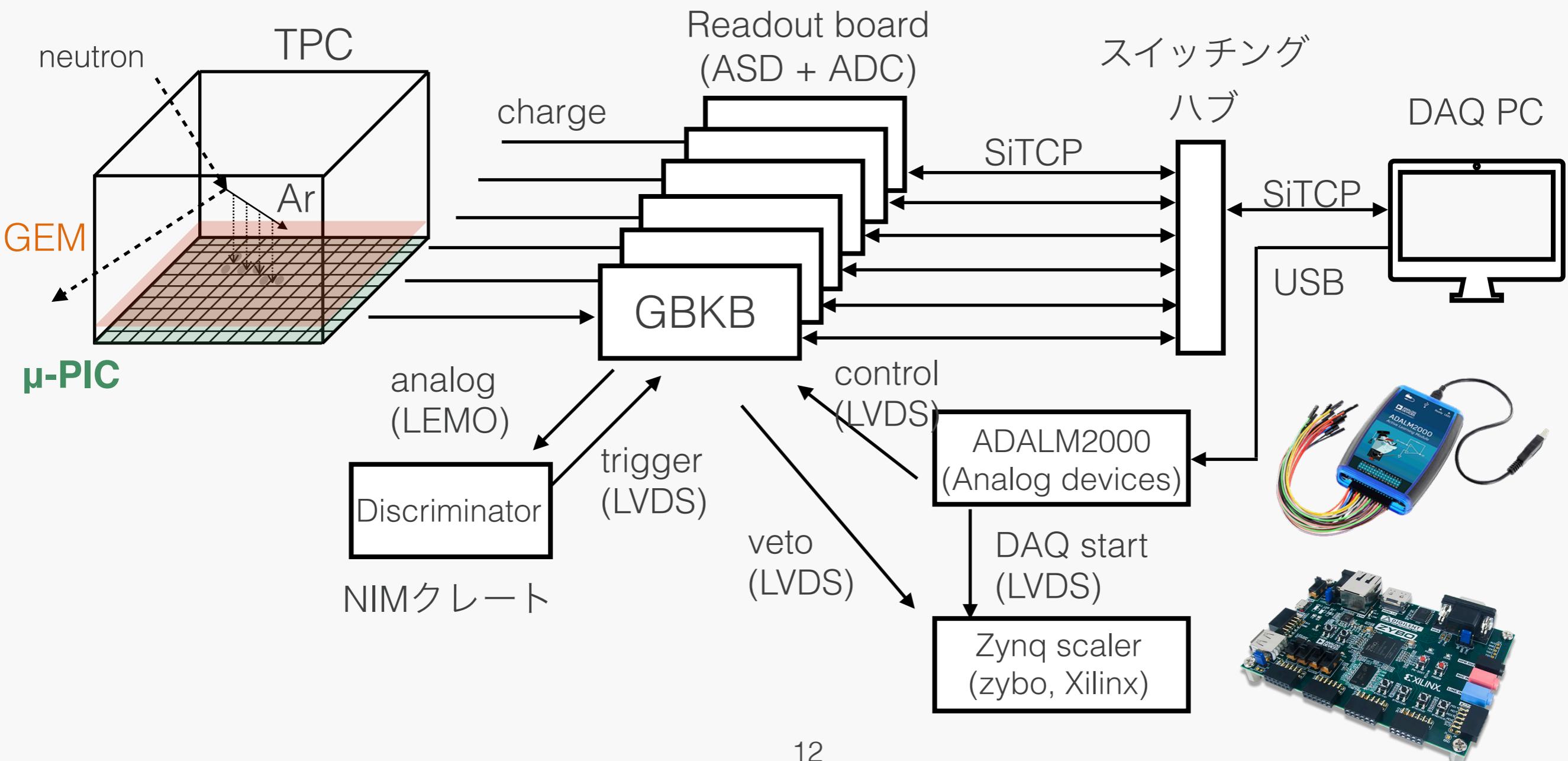


計1536チャンネル読み出し

MIRACLUE Argon DAQ ver. 0

- 読み出しボードを12枚→6枚で構築 (単にボードを用意できていなかった)

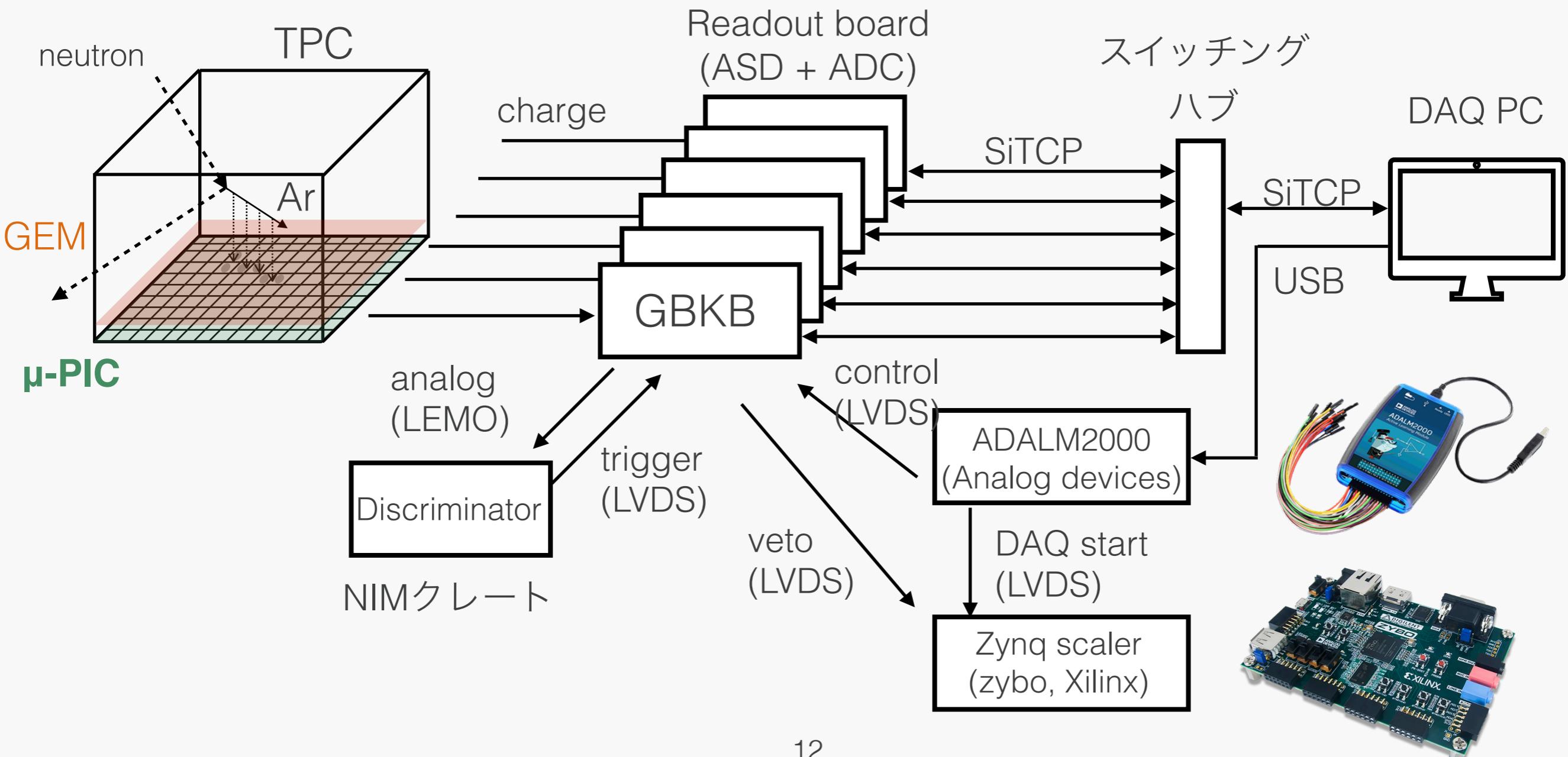
→ すぐ用意できそうなものでコントロール、データ通信も1台のPCで担う



MIRACLUE Argon DAQ ver. 0

- 読み出しボードを12枚→6枚で構築 (単にボードを用意できていなかった)

12ボードに対応させたい



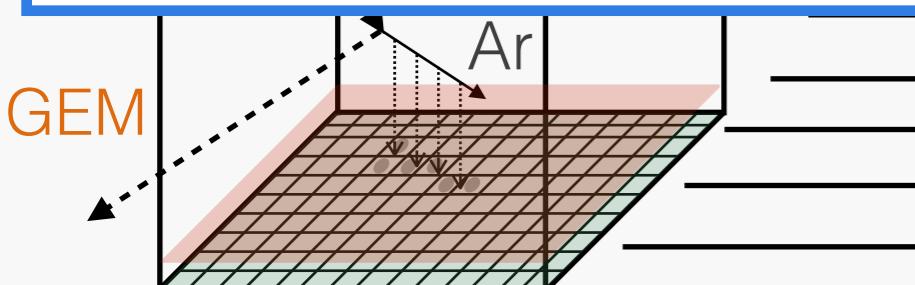
MIRACLUE Argon DAQ ver. 0

- 読み出しボードを12枚→6枚で構築 (単にボードを用意できていなかった)

12ボードに対応させたい

データ帯域逼迫を解消したい

(worst caseで300Mbps / board)



μ -PIC

analog
(LEMO)

Discriminator

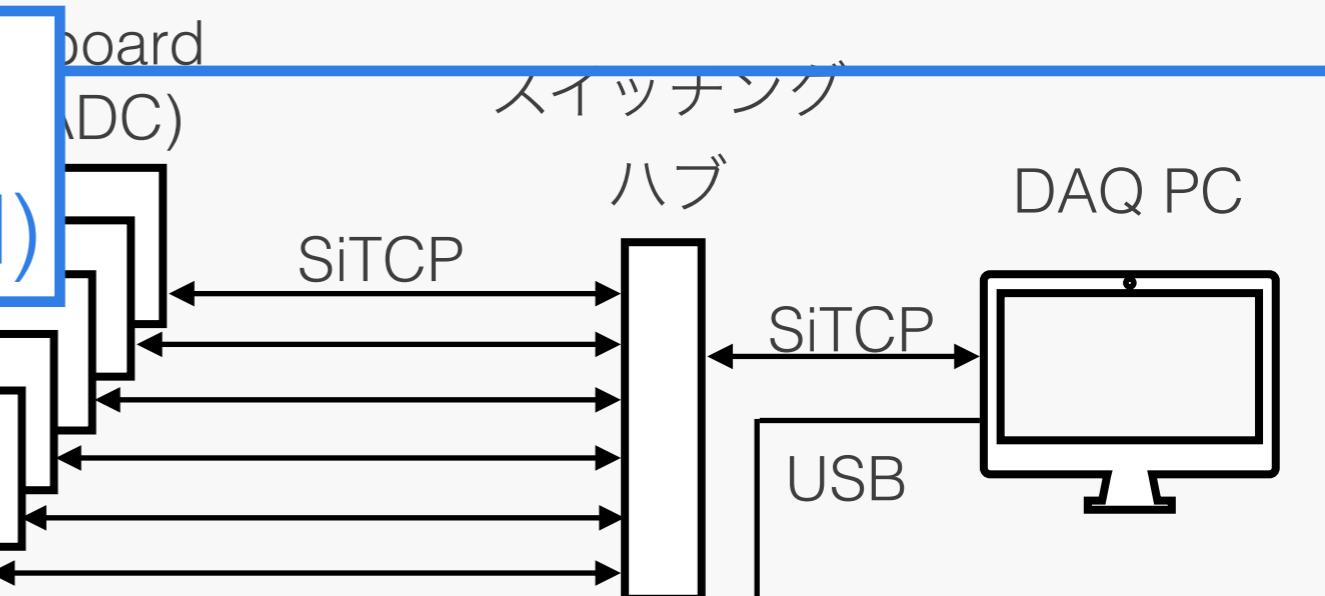
NIMクレート

trigger
(LVDS)

veto
(LVDS)

ADALM2000
(Analog devices)

Zynq scaler
(zybo, Xilinx)



MIRACLUE Argon DAQ ver. 0

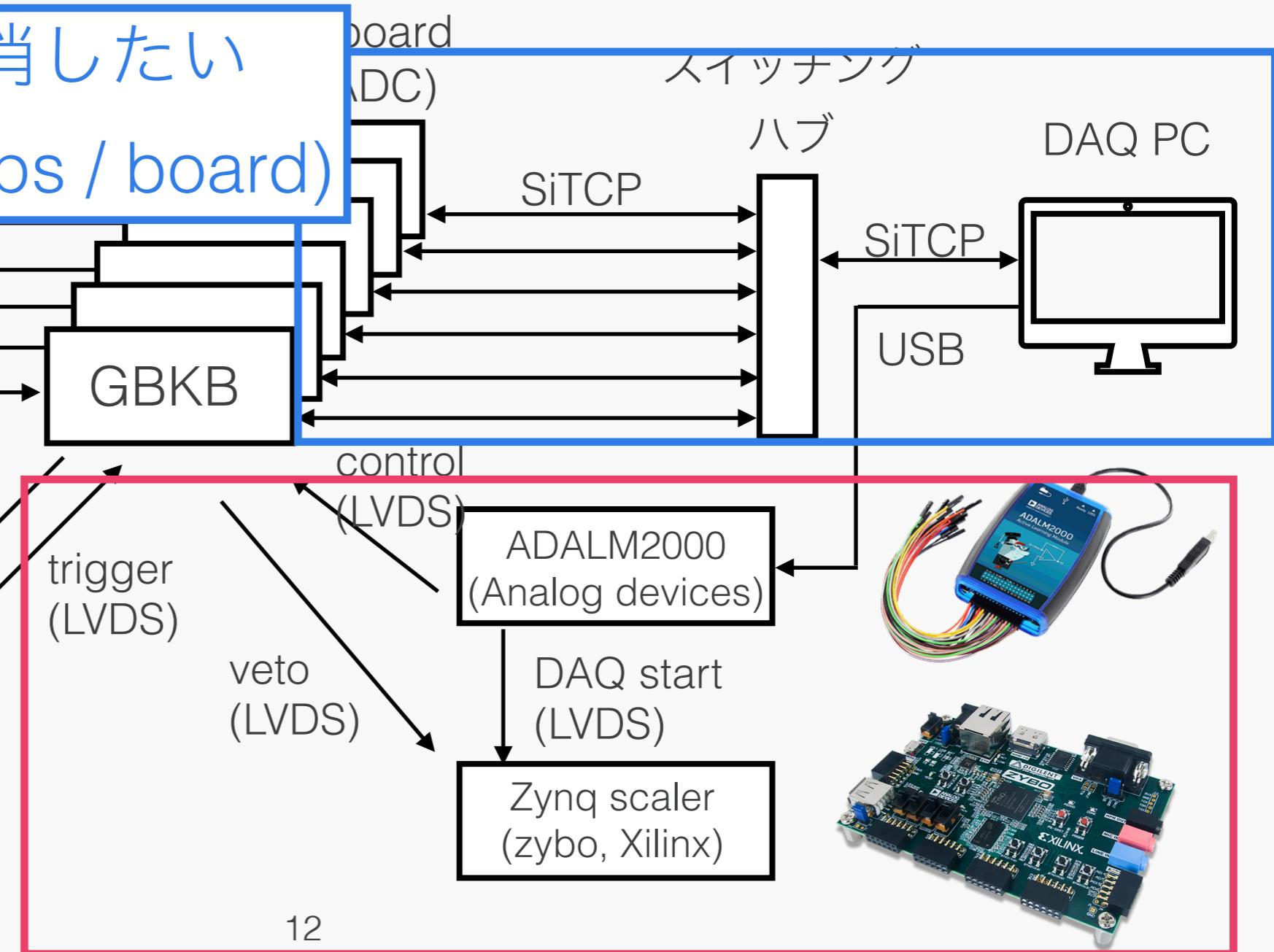
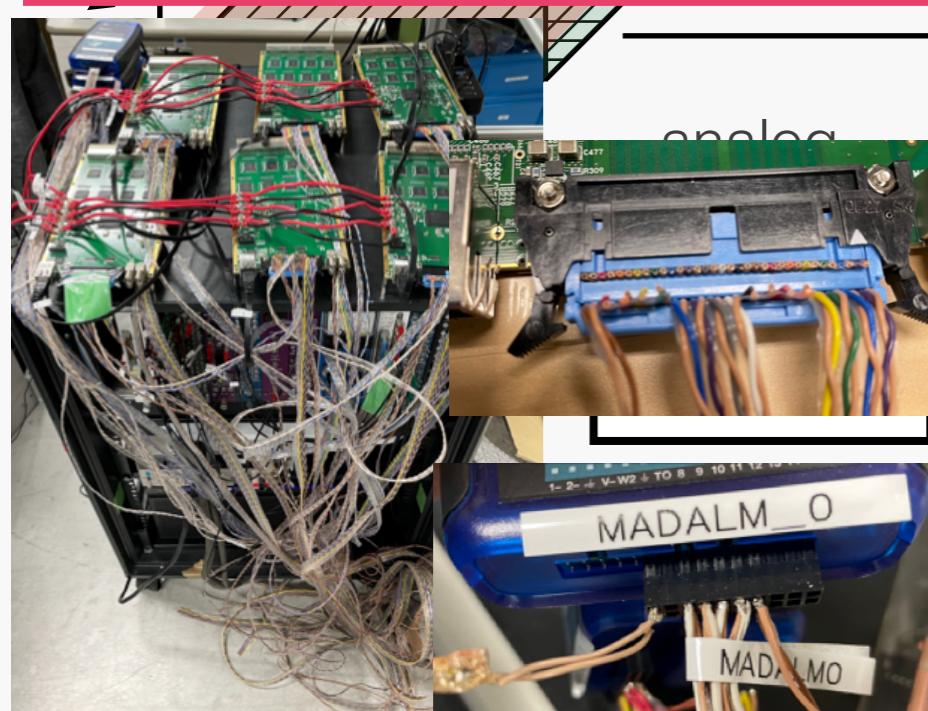
- 読み出しボードを12枚→6枚で構築 (単にボードを用意できていなかった)

12ボードに対応させたい

データ帯域逼迫を解消したい

(worst caseで300Mbps / board)

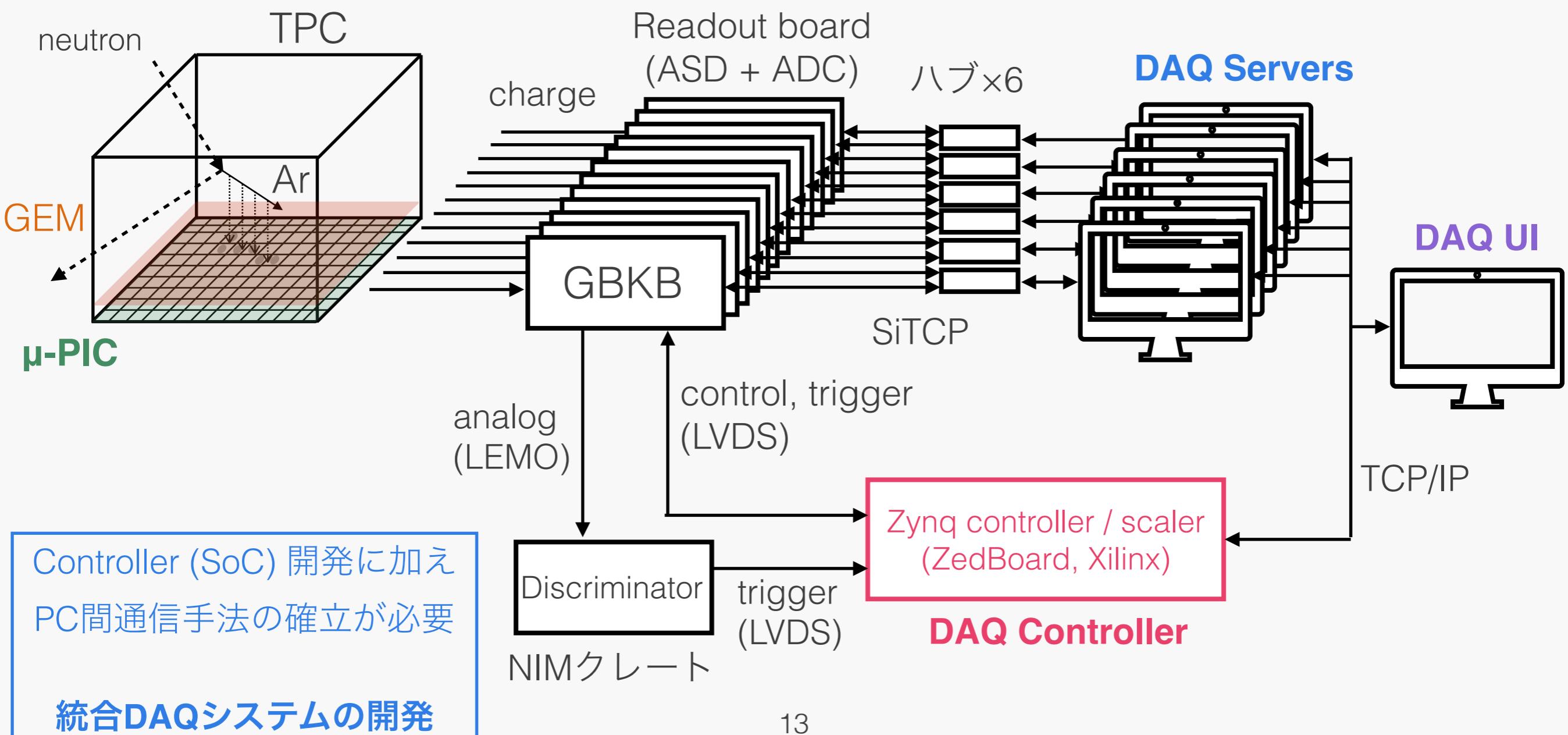
機構を単純化したい



尋麻疹の出るケーブリング

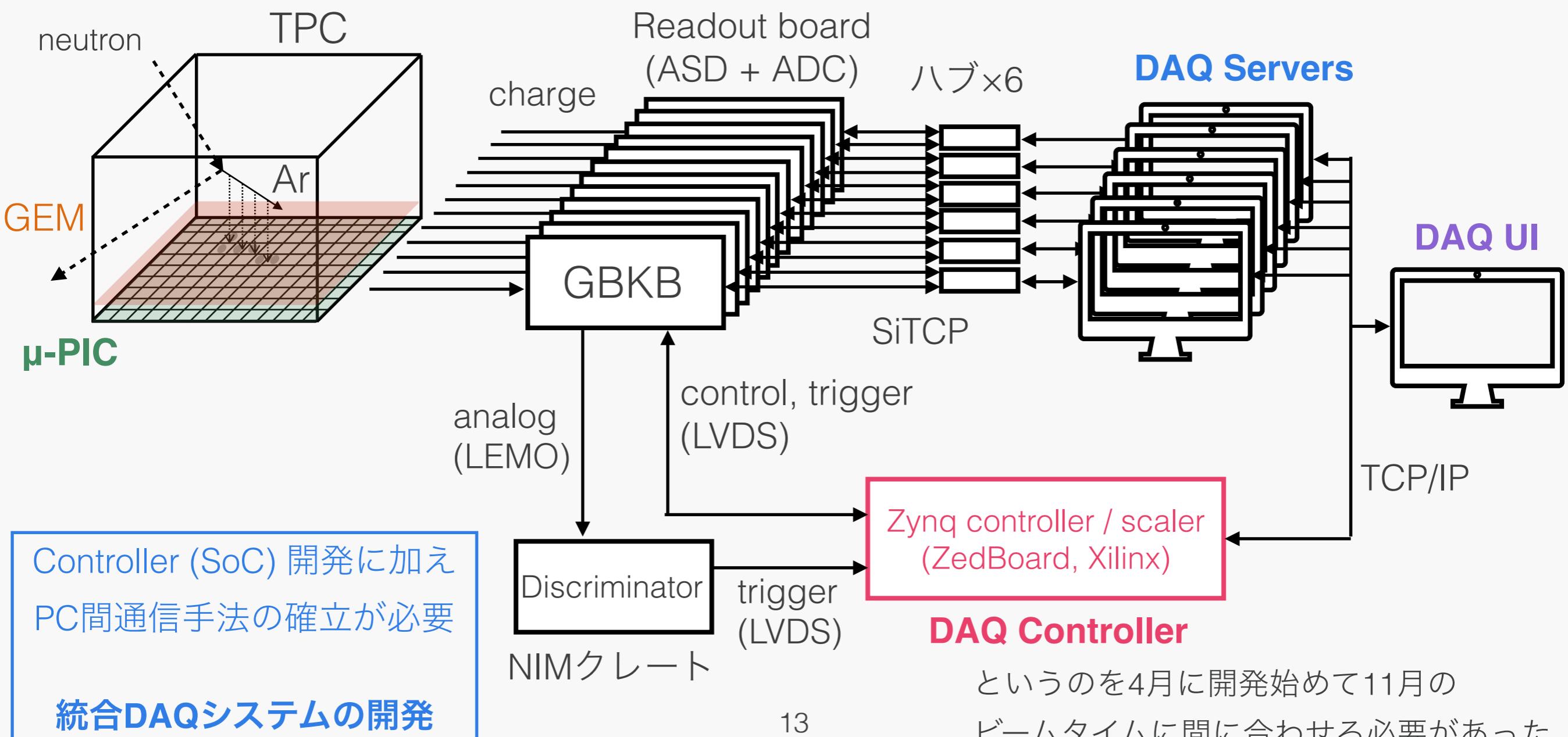
MIRACLUE Argon DAQ ver. 1

- ボード12枚体制に拡張(半分以上を京大SMILE実験 高田氏より拝借)
- DAQ PC 1台につき2 boardでの読み出しに分散、帯域緩和
- DAQ controllerを(結局)開発、SoCを用いることでfirmware / software的に制御



MIRACLUE Argon DAQ ver. 1

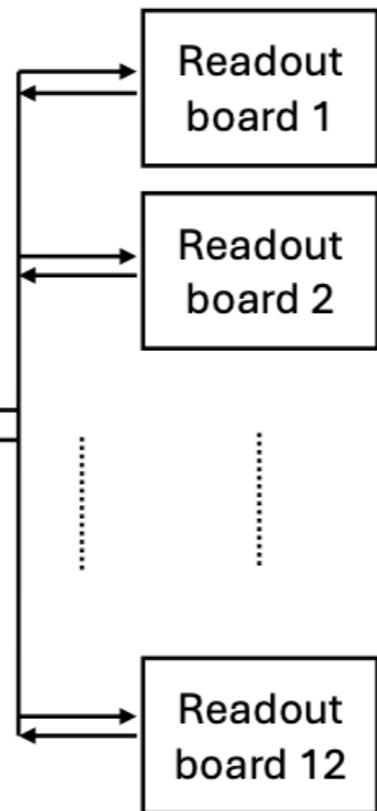
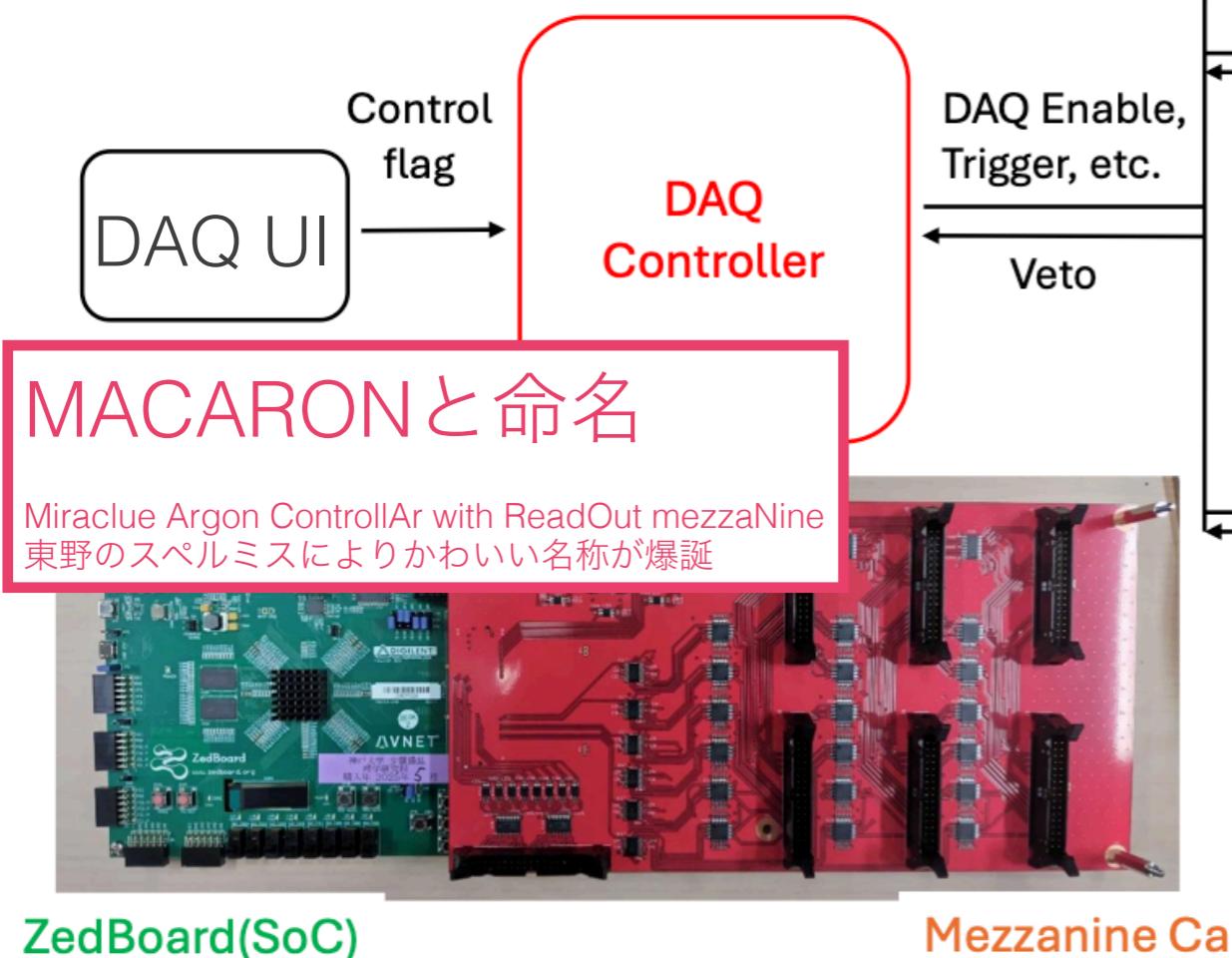
- ボード12枚体制に拡張(半分以上を京大SMILE実験 高田氏より拝借)
- DAQ PC 1台につき2 boardでの読み出しに分散、帯域緩和
- DAQ controllerを(結局)開発、SoCを用いることでfirmware / software的に制御



DAQ Controller

新DAQシステム

- DAQ Controller 周り



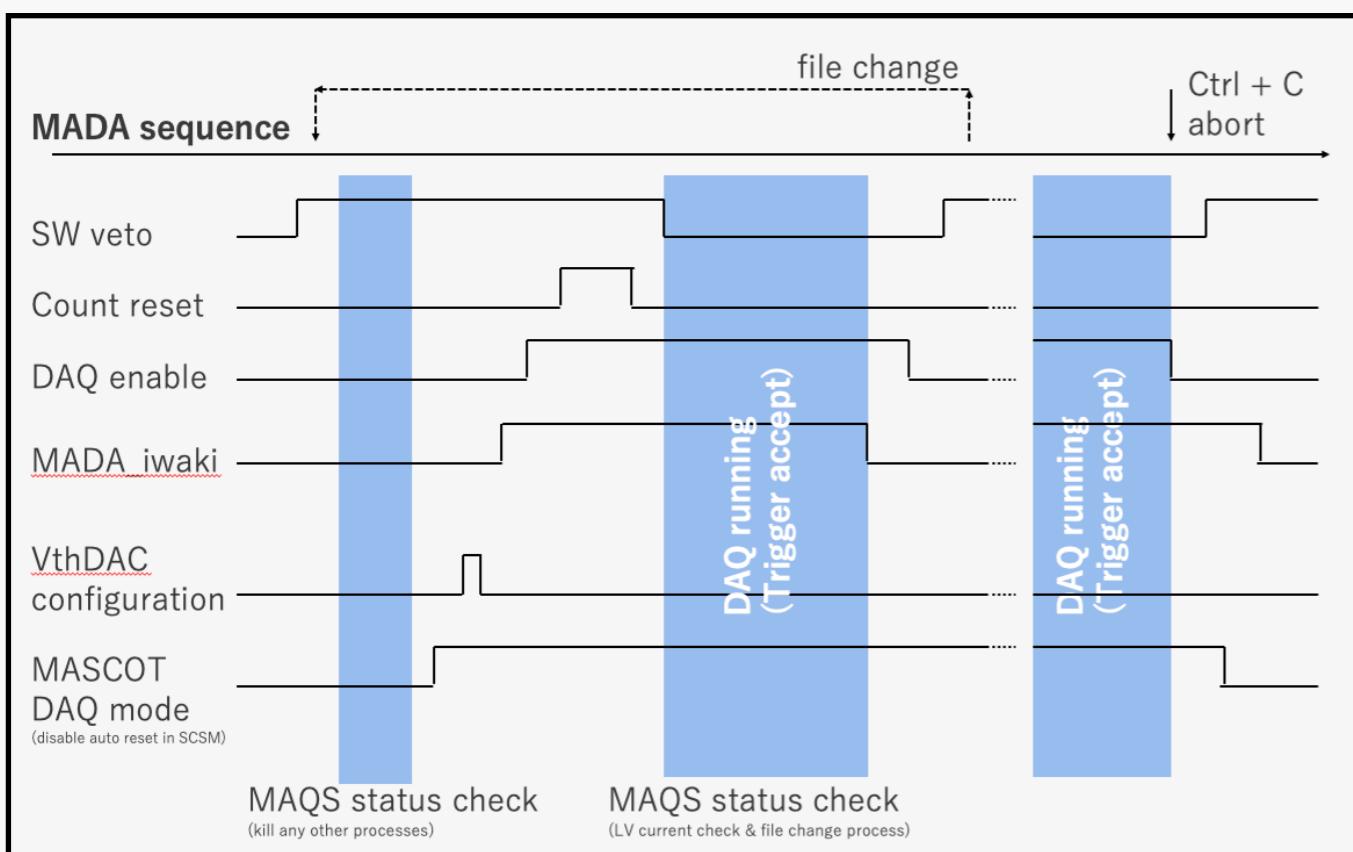
- DAQ User Interfaceとの通信
 - Control信号の送信、受信
 - 時間のカウント
 - 信号の分配
- の機能が必要
→ SoC + Mezzanine Card

Mezzanine cardはKiCADで設計、
P板.comで製造と実装 (完全自作)

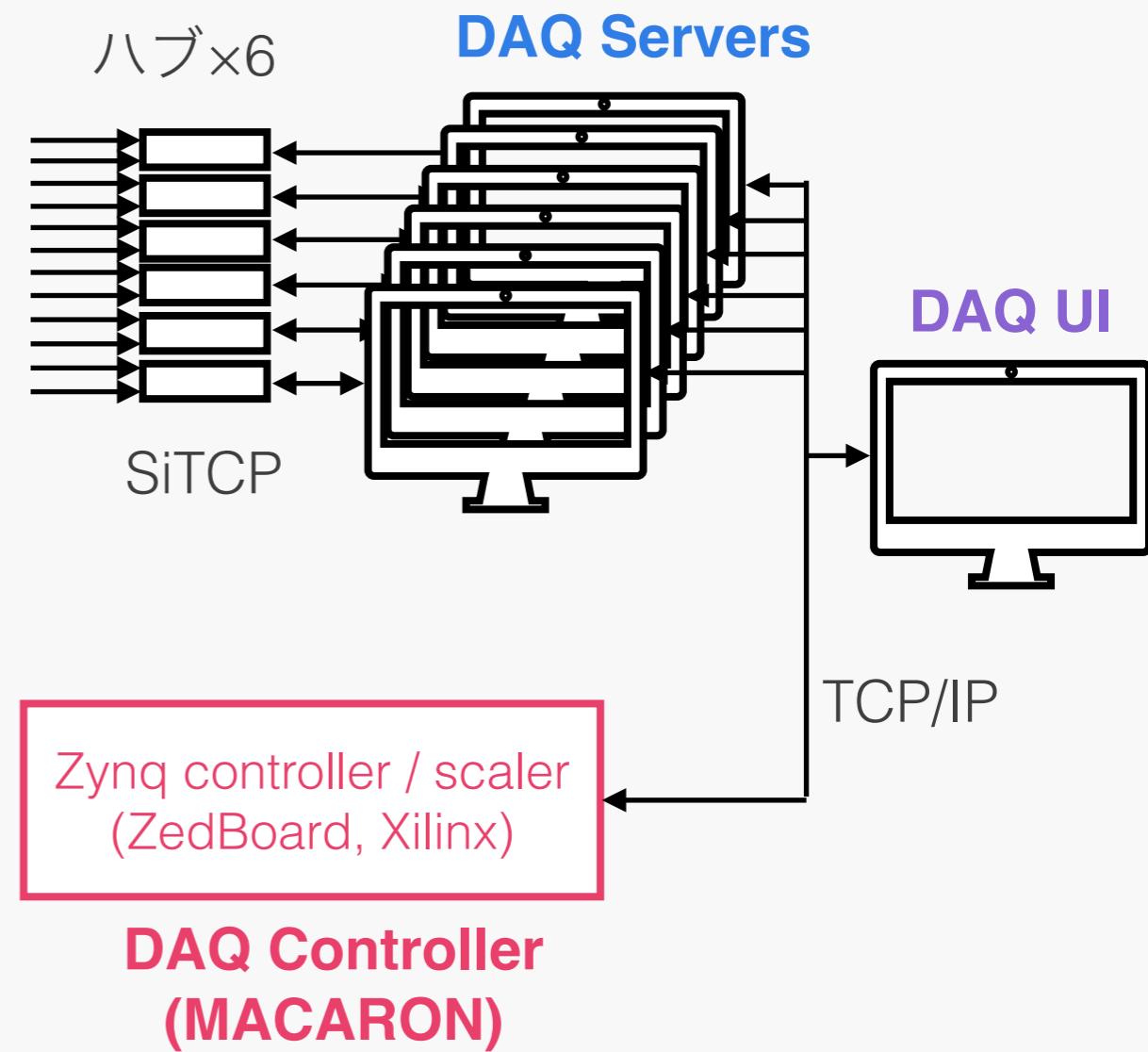
日本物理学会 第80回

PC間連携

- ソケットプログラミングでDAQ UIからコマンド送信
 - Control sequenceをDAQ UIで組んでそれぞれを動かす
 - 現状UDP通信で動かしているが、それで正しかったかはわからない（コメントください）

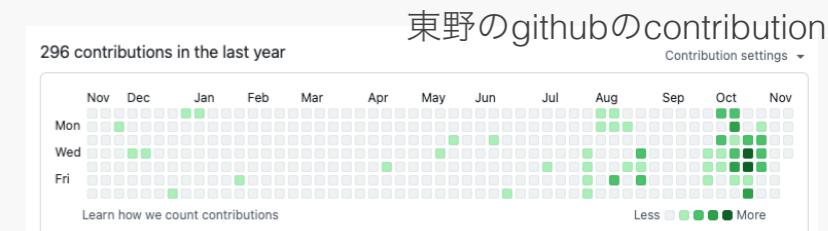


詳細説明割愛、このタイミングチャートに従ってコマンドパターンを作成

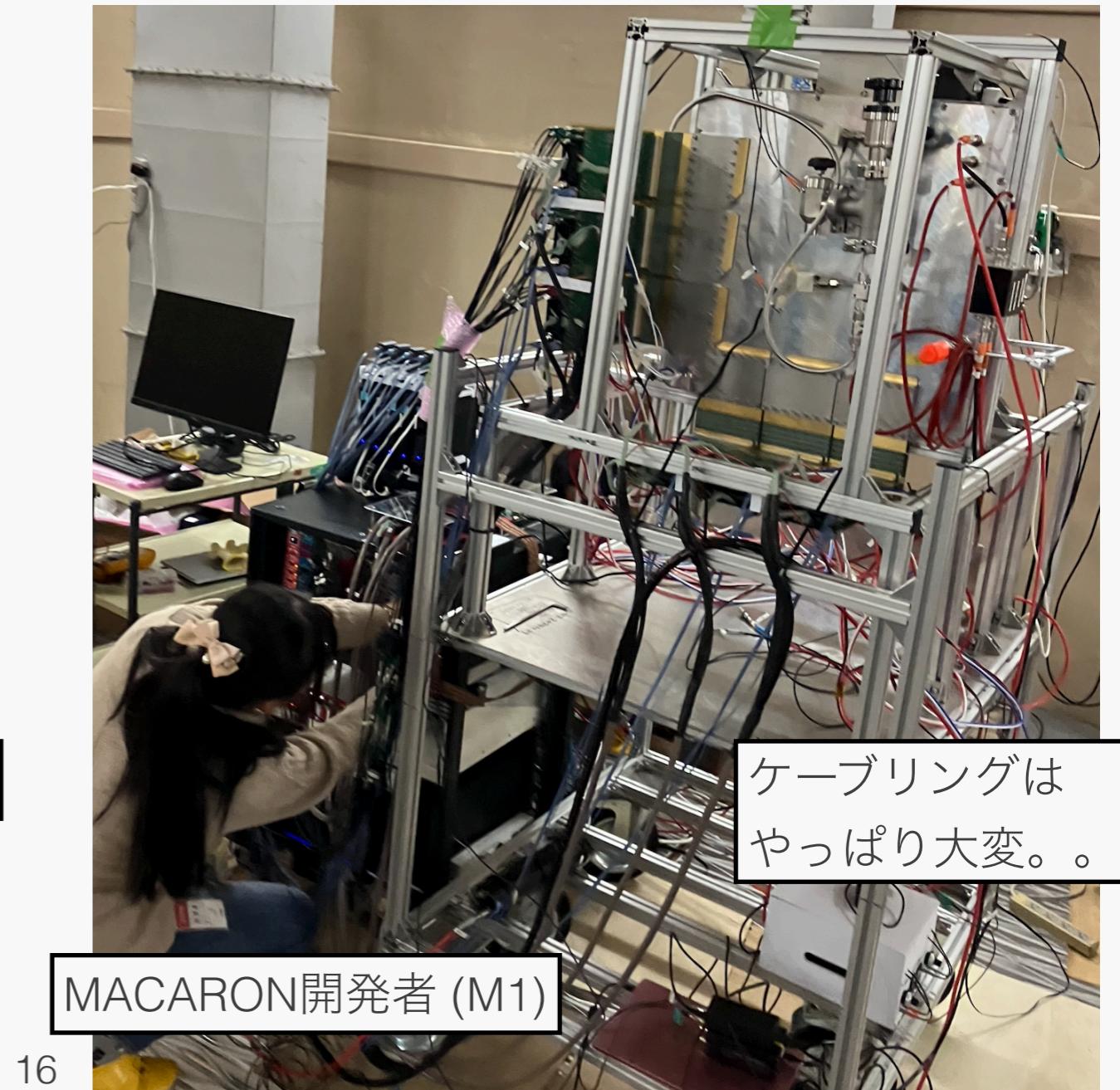
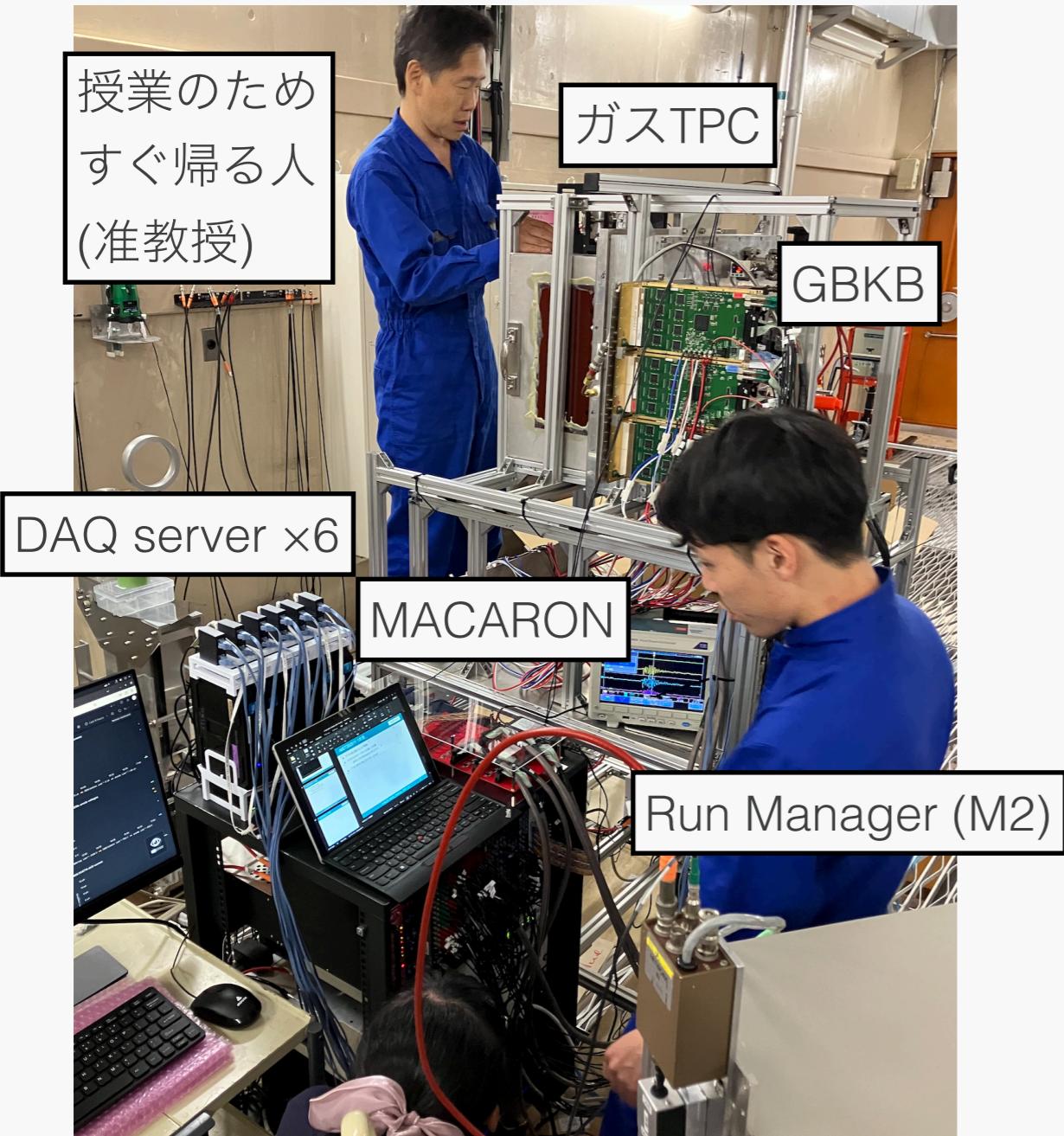


統合DAQシステム構築 @産総研

- 神戸大で統合試験を済ませたあと産総研へ



→ ビームタイム2週間前に統合試験を開始、死ぬ気でデバッグした

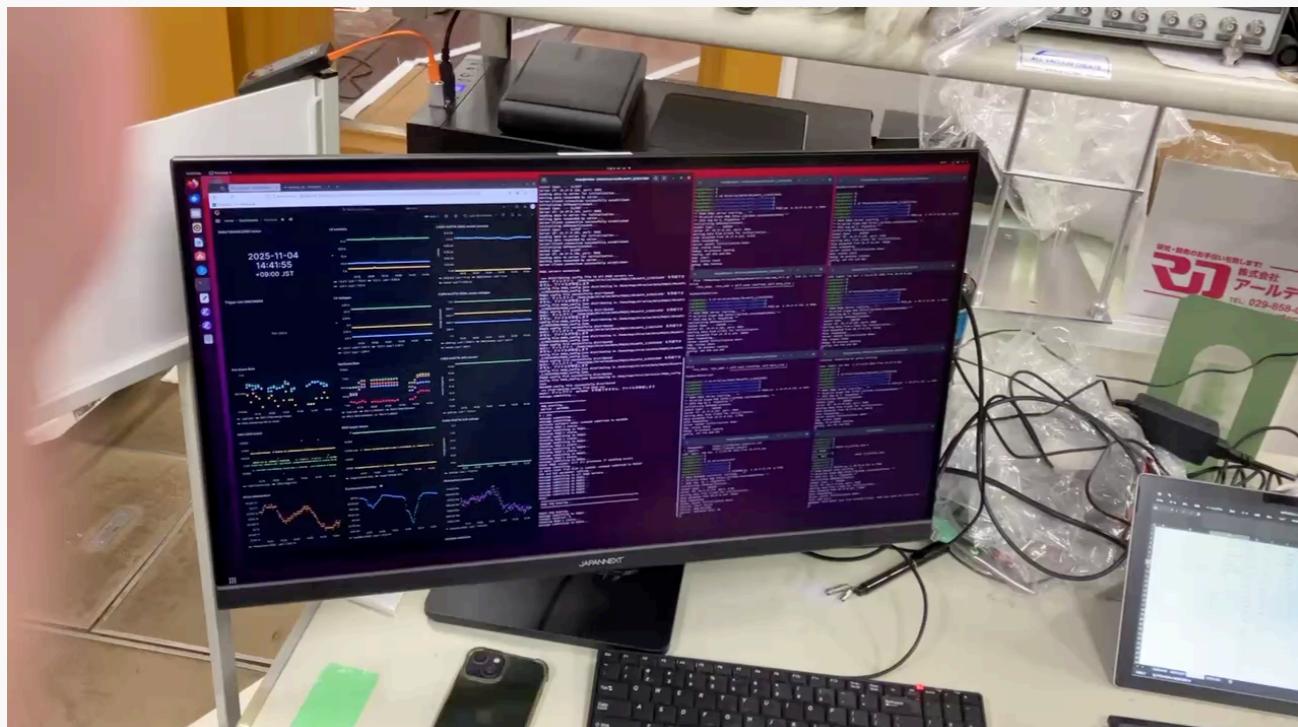
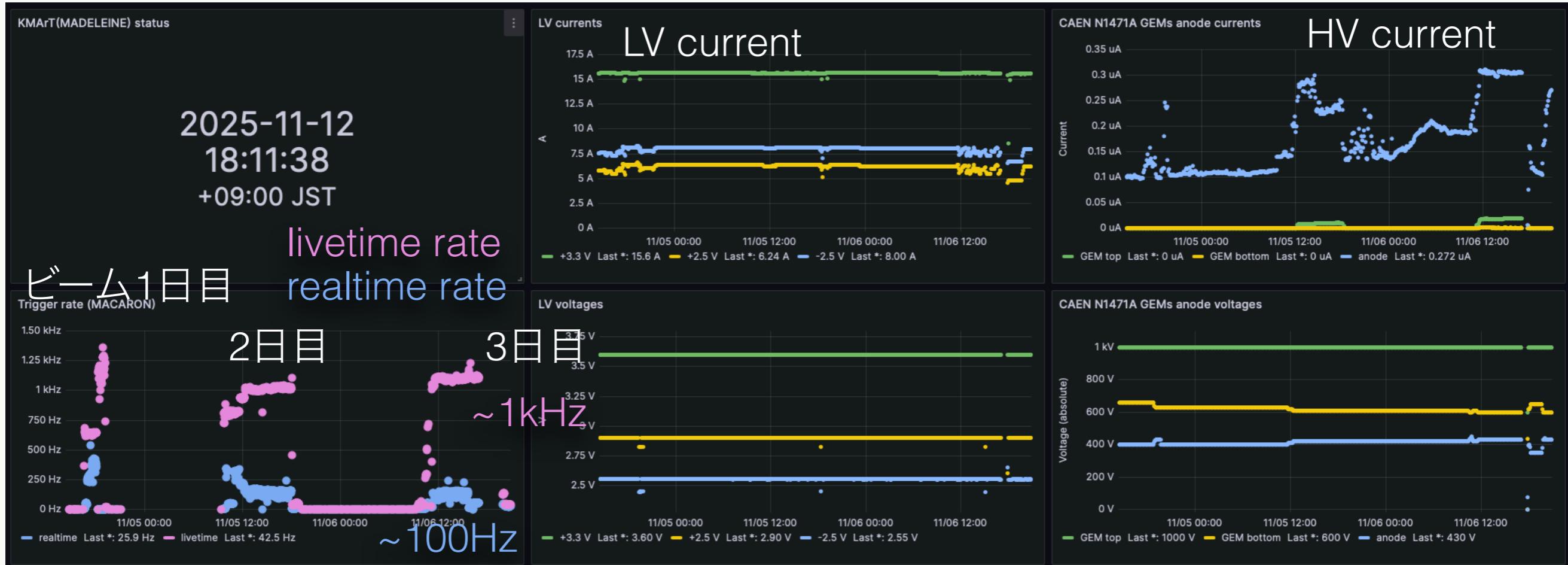


産総研ビーム実験

- 2025年11月3日-7日 (うち3日間ビーム照射)
 - 直流の中性子ビーム (565 keV)
 - ビームフラックス: $\sim 10^2 / \text{cm}^2/\text{s}$ (具体的な値は産総研からのデータ待ち)
 - ▶ トリガーレート的には1kHz程度 (DM直接探索からするとやはり高レート)



データ取得状況

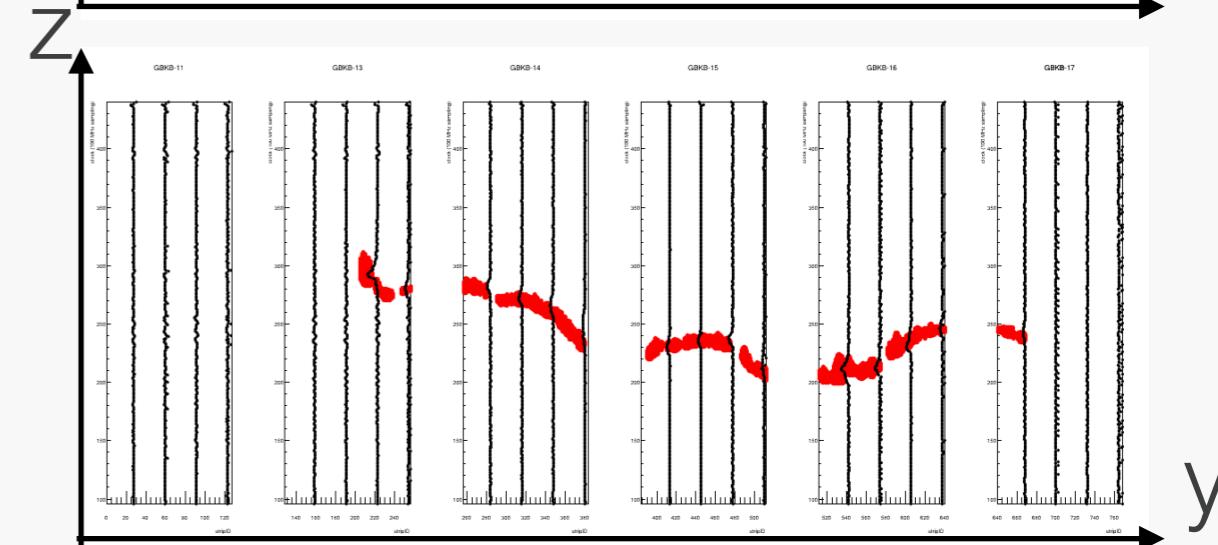
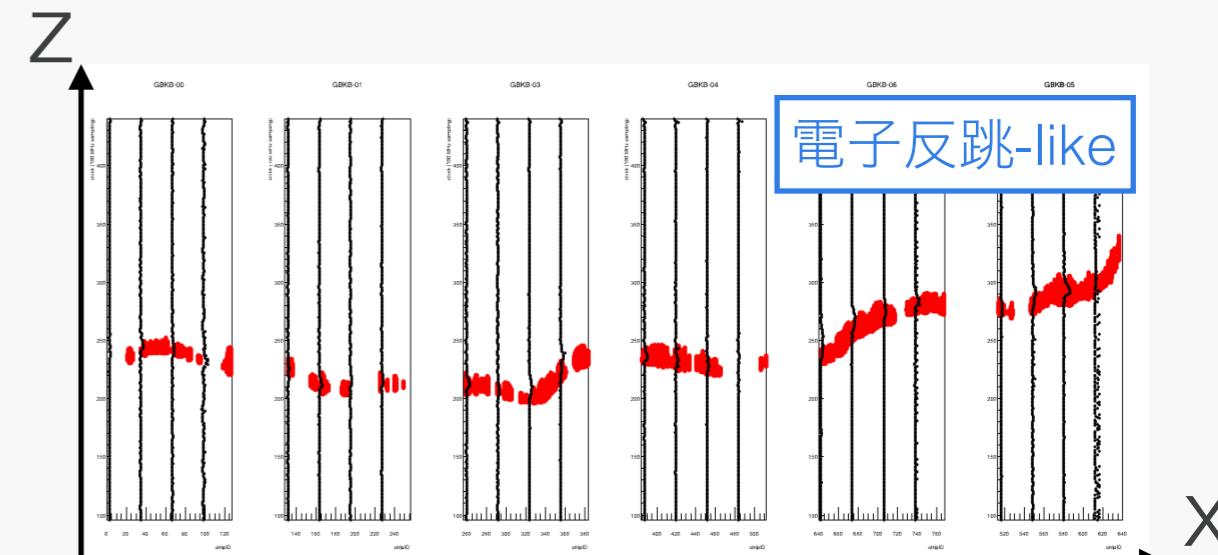
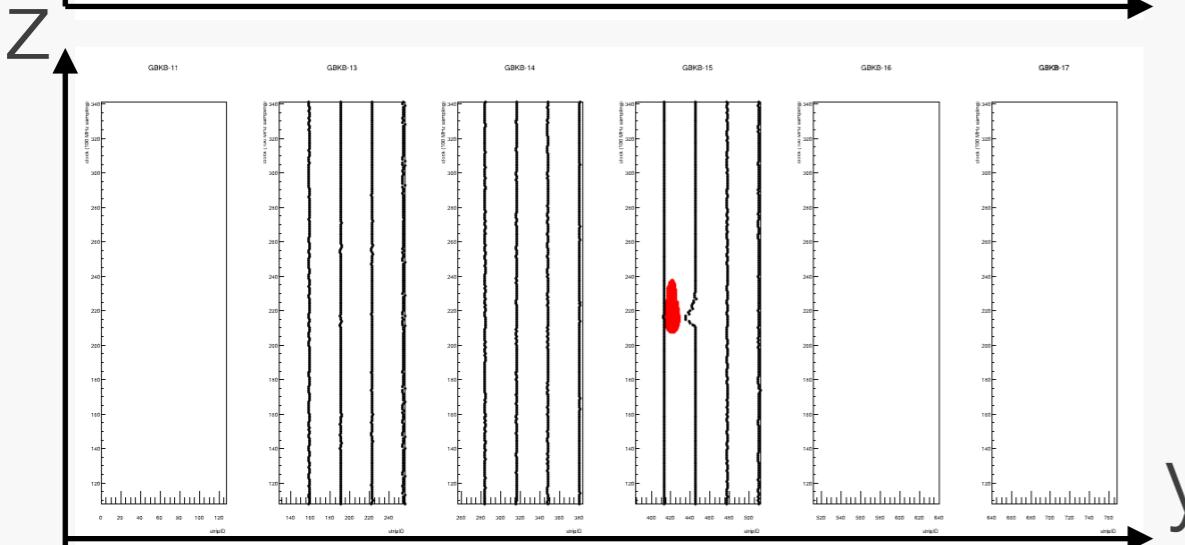
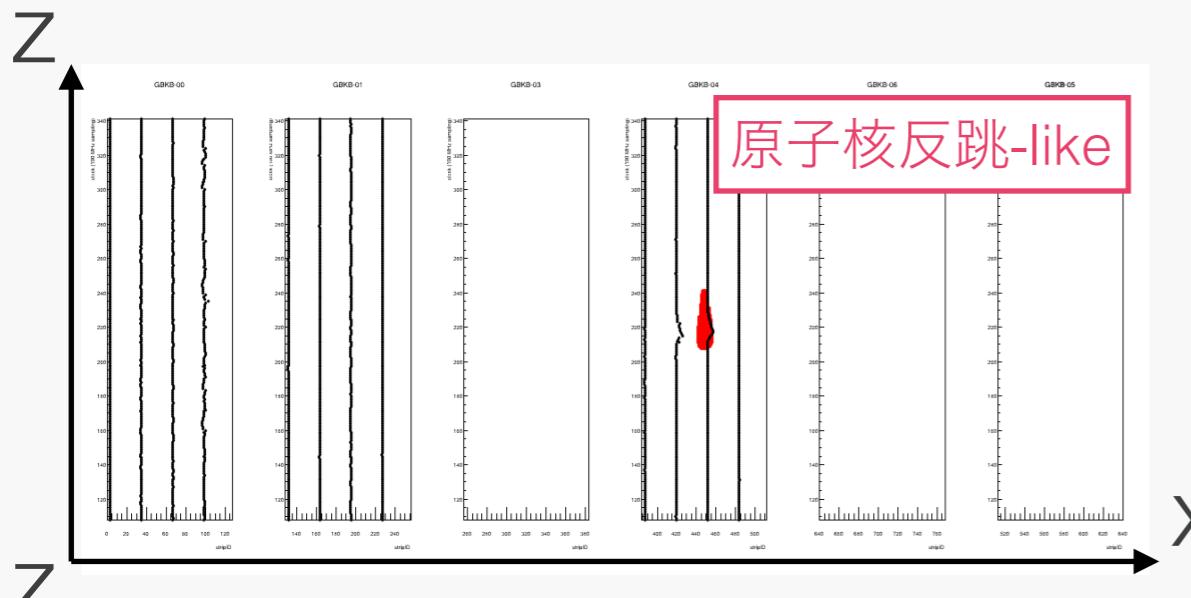


絶望的なdeadtimeは課題。
精査中だがおそらくinitializeなどに
時間がかっている。

しかし無事使えそうなデータを
収集して帰ってくることができた！

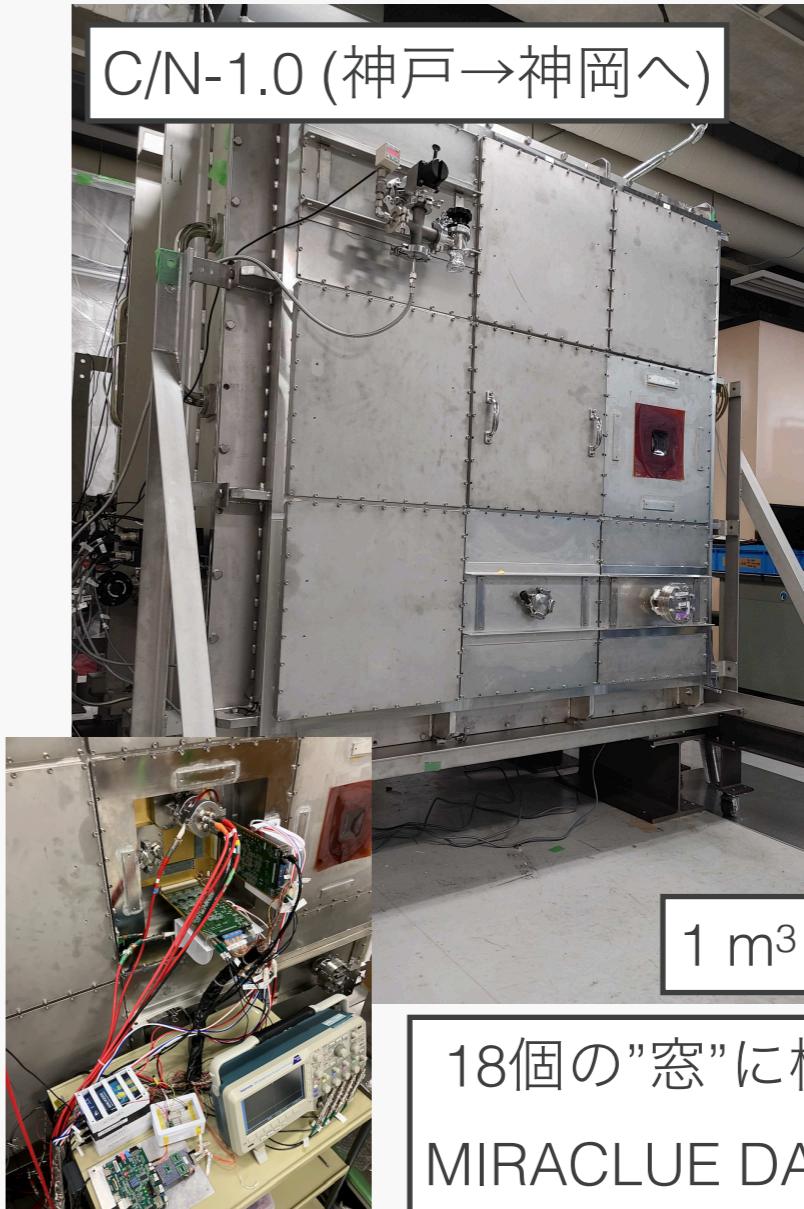
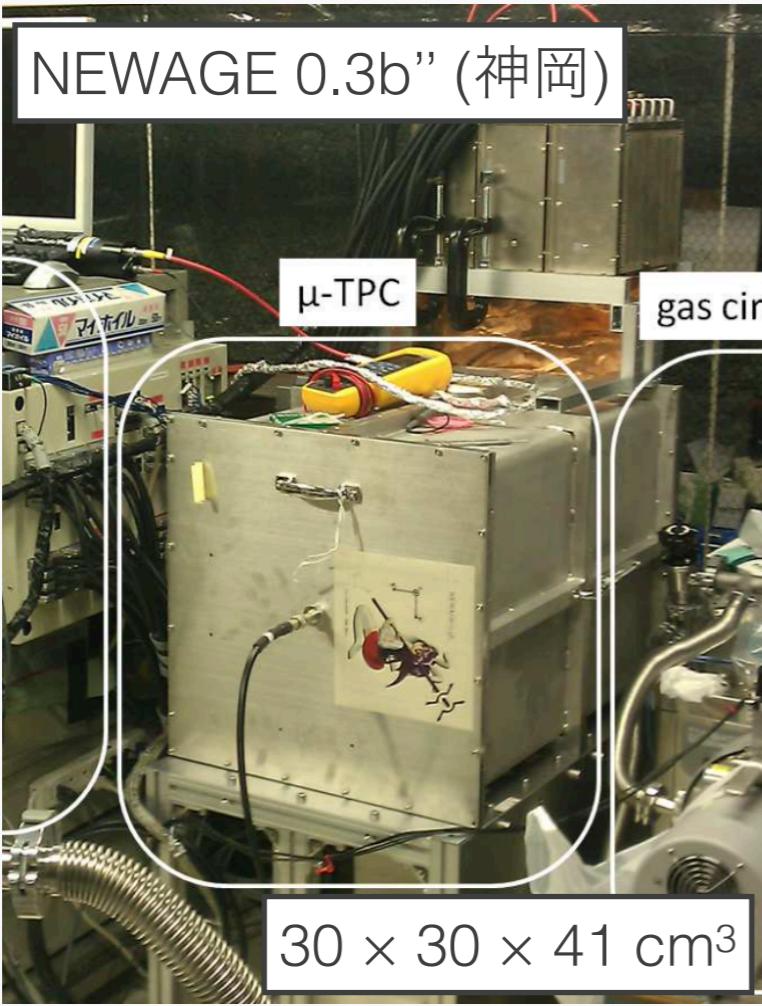
Data quality

- 中性子由来の原子核反跳を検出
 - 12ボード版の統合DAQがちゃんと機能している
- DAQ的にはdeadtimeの改善が課題だが、使えるデータが取得できたのは大収穫
- 取得データは現在絶賛解析中



NEWAGE的将来計画

- 感度向上に向けて大質量化(大型化)進行中
 - モジュール搭載型チェンバー “C/N-1.0” 準備中(従来検出器を18個実装可)
- 従来DAQはすでにディスコン、MIRACLUE DAQの逆輸入を検討
 - 今回の開発はそれぞれのモジュールのDAQ統合に向けたデモンストレーションでもある



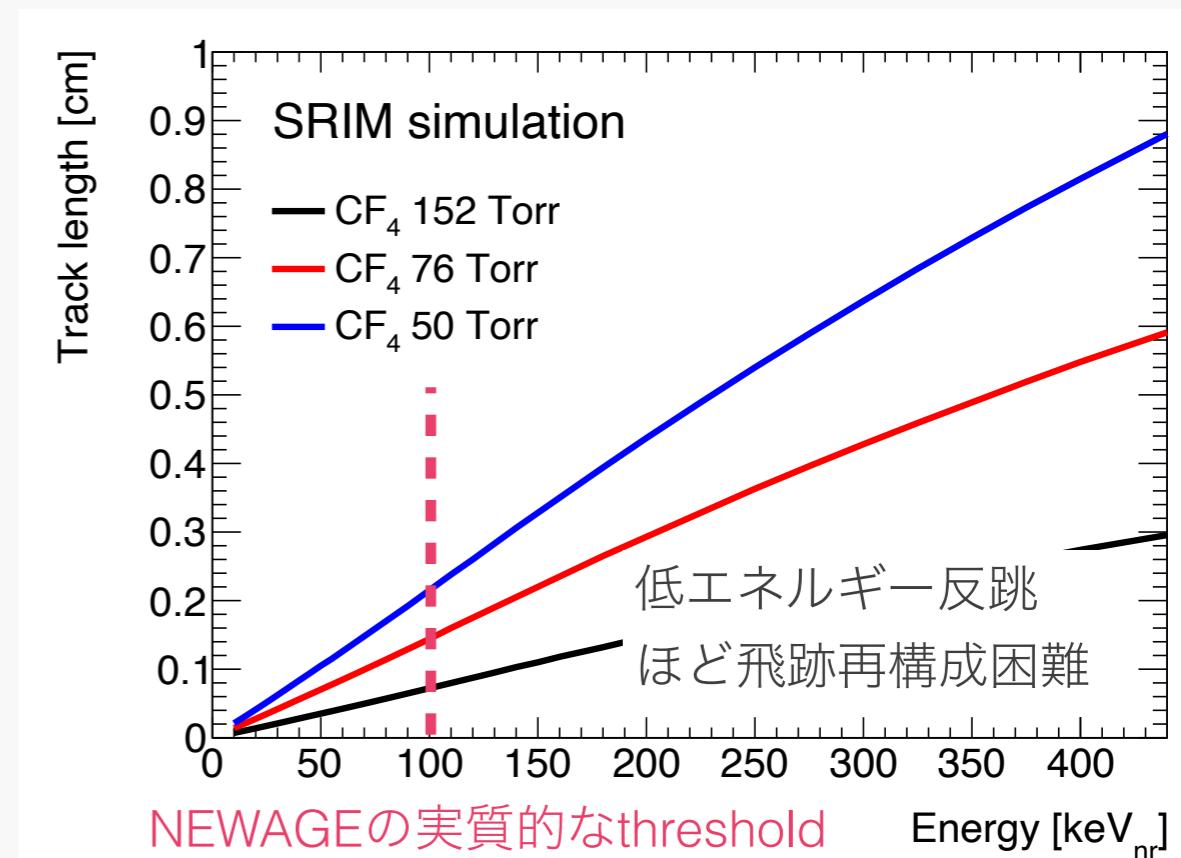
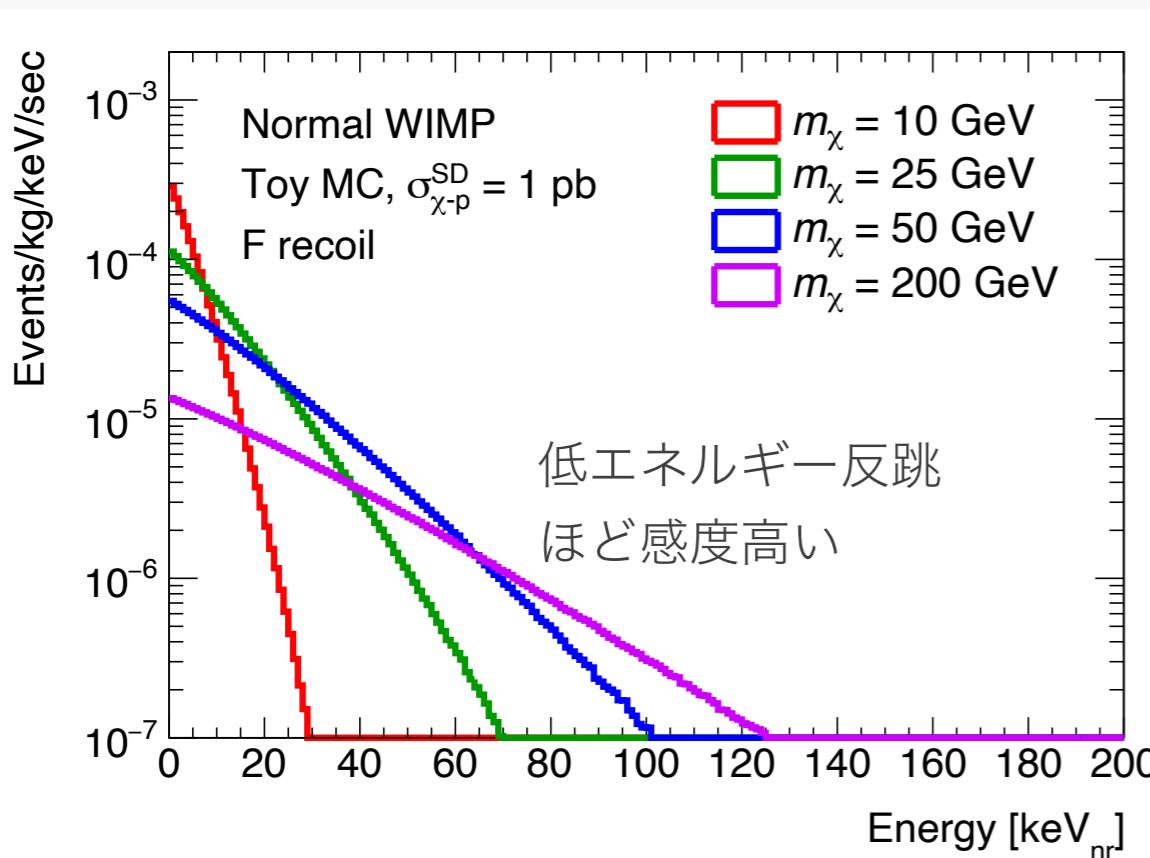
各モジュールのDAQ統合に向けたノウハウの蓄積

18個の”窓”に検出器実装可
MIRACLUE DAQにて試験中

Pixel

短飛跡の高精度再構成

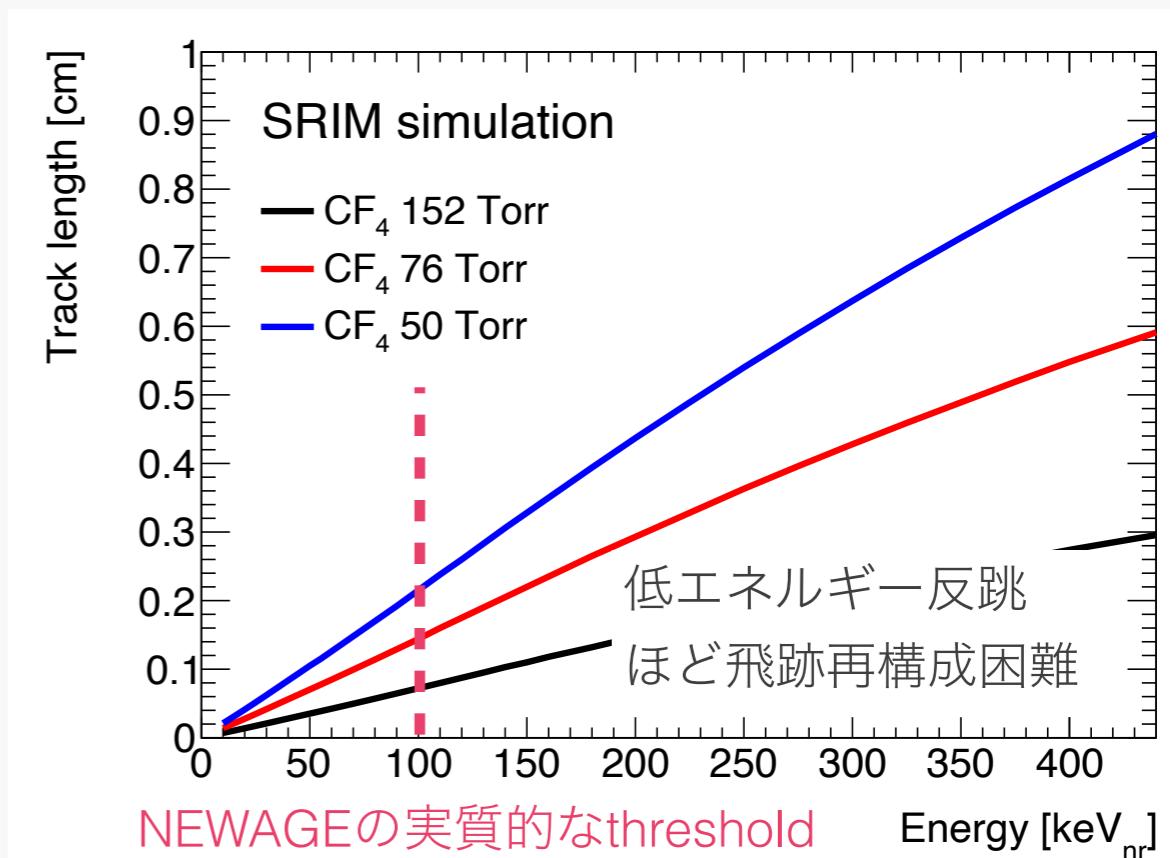
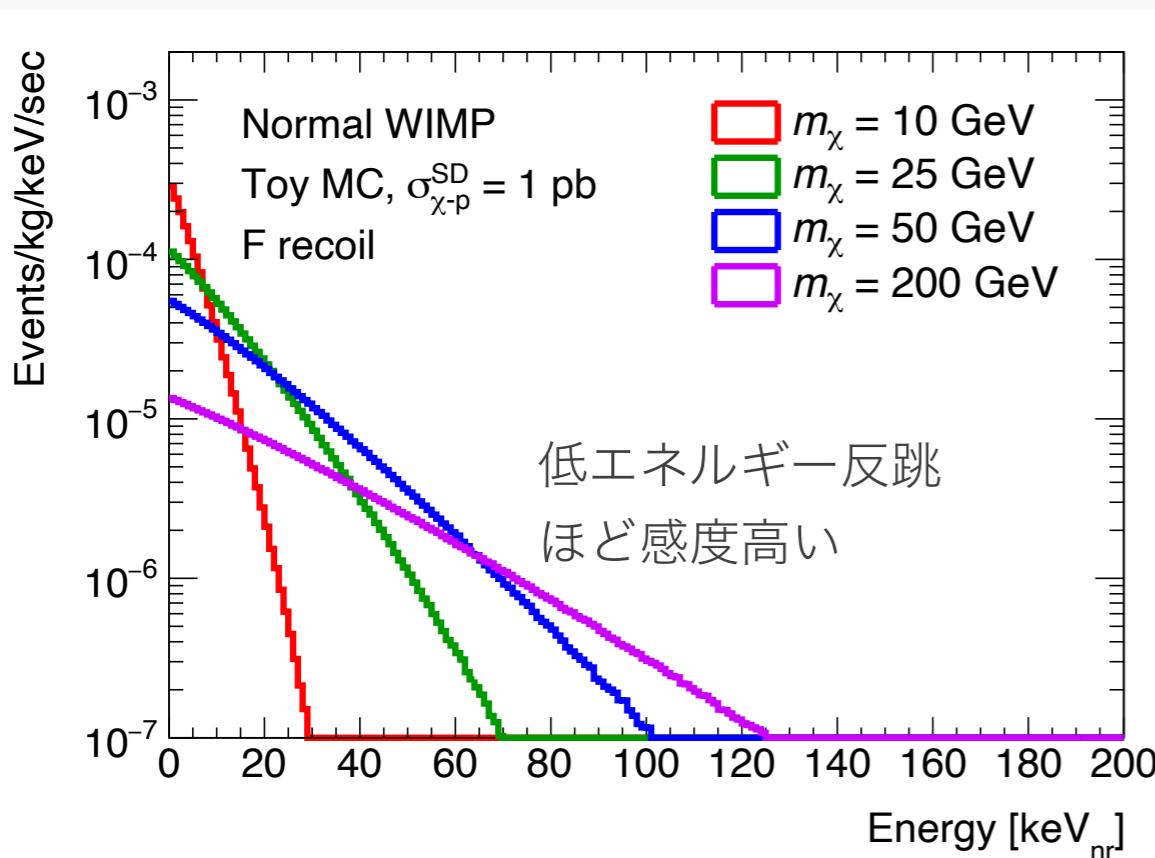
- WIMP massはEW scaleでも速度遅いので反跳エネルギーも低い
 - 反跳原子核の飛跡はミリオーダー以下
- なので反跳角を求めるための飛跡がまず組めなくなってくる
 - より低圧なガスにして飛程を伸ばす(ターゲット減る)
 - より粒度の細かい読み出し検出器を使う(値段も技術もかかる)



短飛跡の高精度再構成

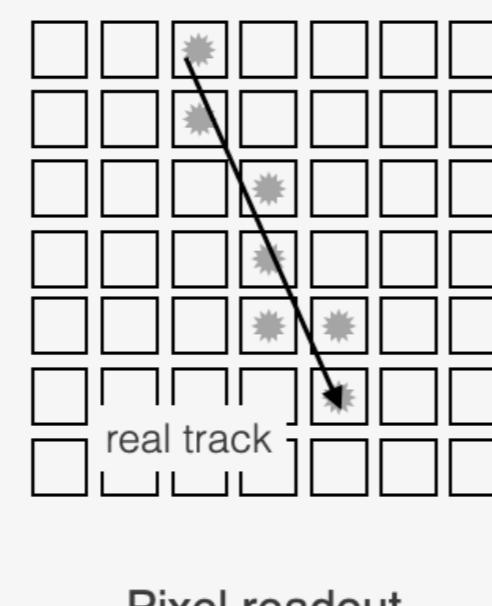
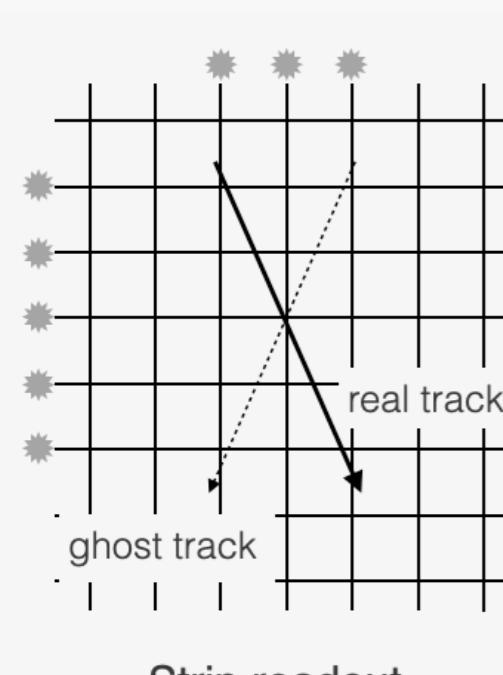
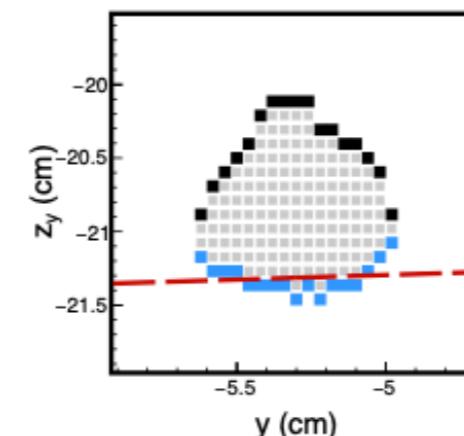
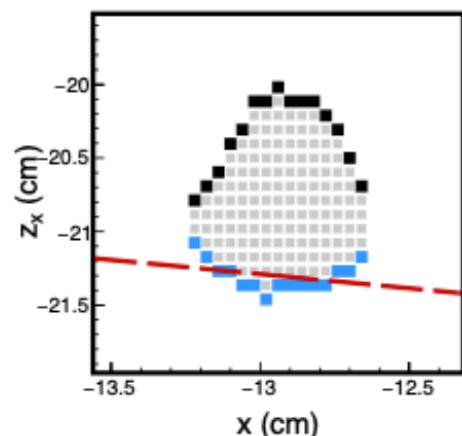
- WIMP massはEW scaleでも速度遅いので反跳エネルギーも低い
 - 反跳原子核の飛跡はミリオーダー以下
- なので反跳角を求めるための飛跡がまず組めない
 - より低圧なガスにして飛程を伸ばす (ターゲット減る)
 - より粒度の細かい読み出し検出器を使う (値段も技術もかかる)

どちらも必要だが
検出器側に焦点当てる



Pixelization

現行NEWAGEのイベント例



- ghost trackのせいで角度分解能低下

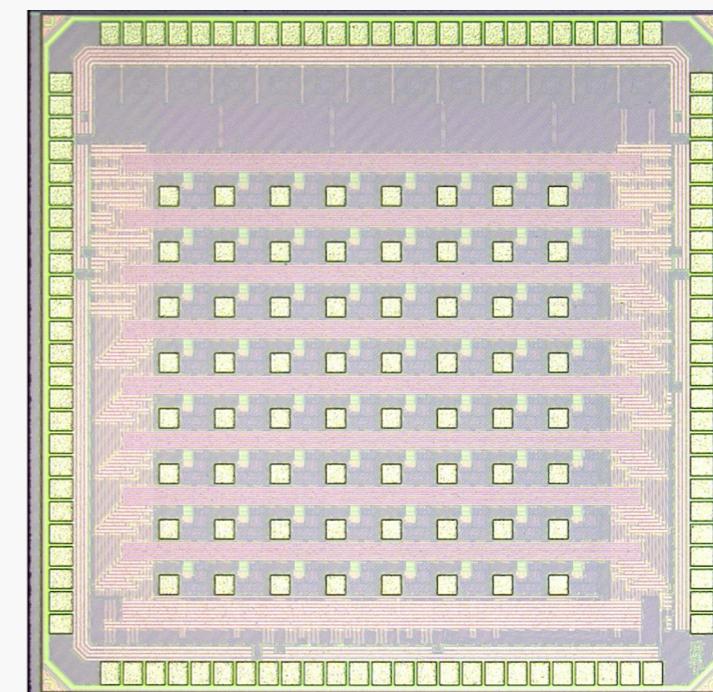
→ ピクセル化が必要

→ ただし読み出しチャネルは膨大に

▶ ASICも新たに開発が必要



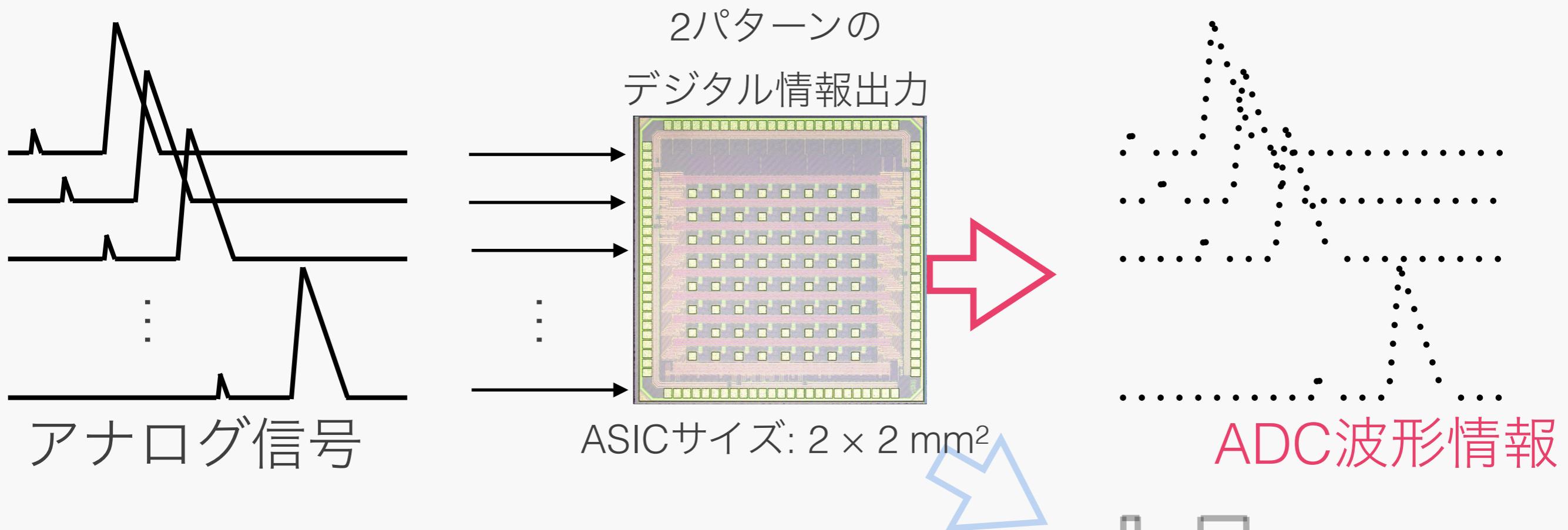
QPIX NEO



KEK宮原さんに作っていただいた

23 **ピクセルガスTPCプロジェクト始動！**

読み出しASIC: QPIX NEO



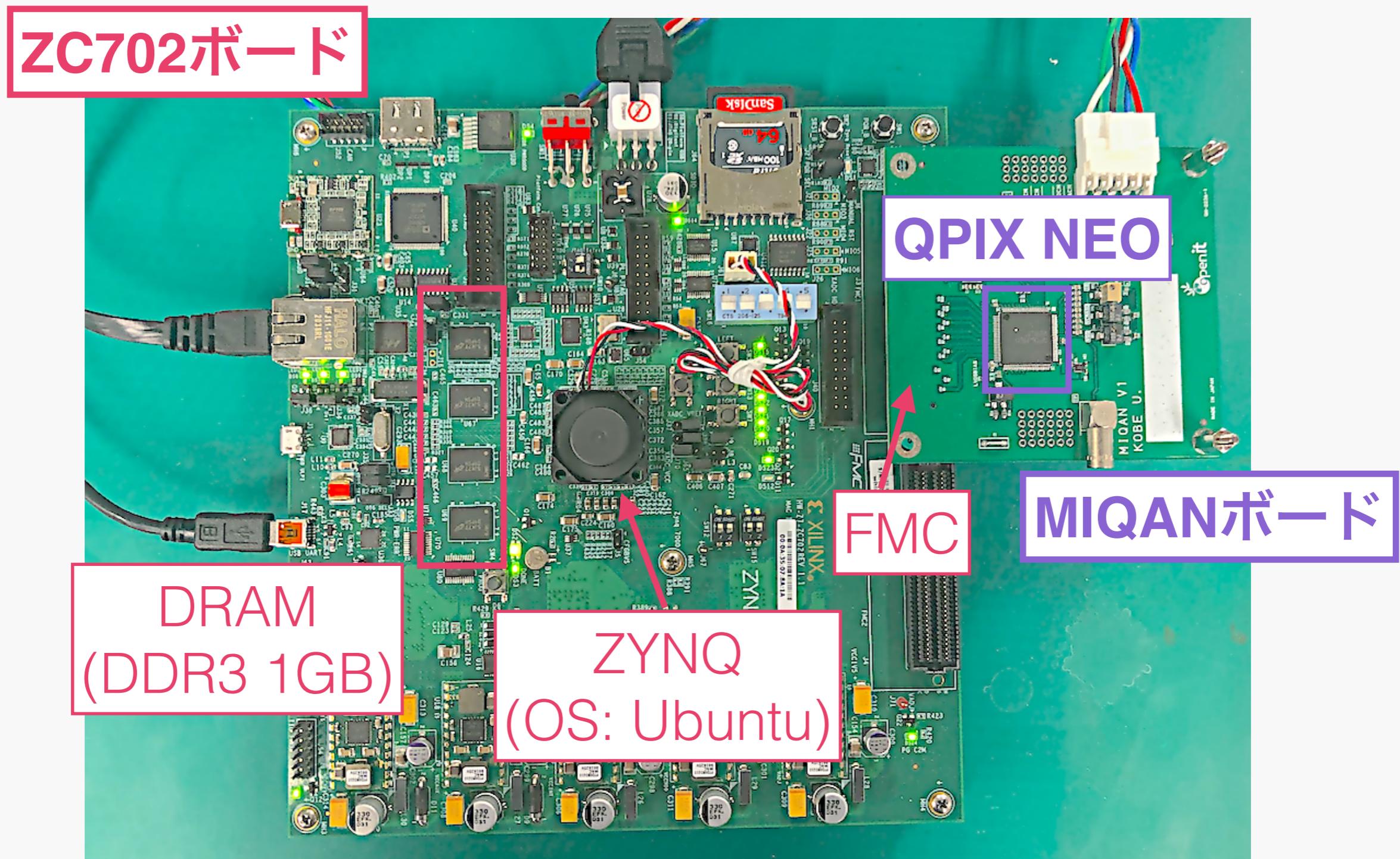
- 155 μmピッチピクセルパッド、64 ch
- 各chにADC 10bit 2.5MHz
- 各chにToT/ToF 4ヒット分ストア
- ASDのpeaking time: 3~4 us
- 高ダイナミックレンジ 400 fC
- ...

本講演では割愛
(性能評価中)

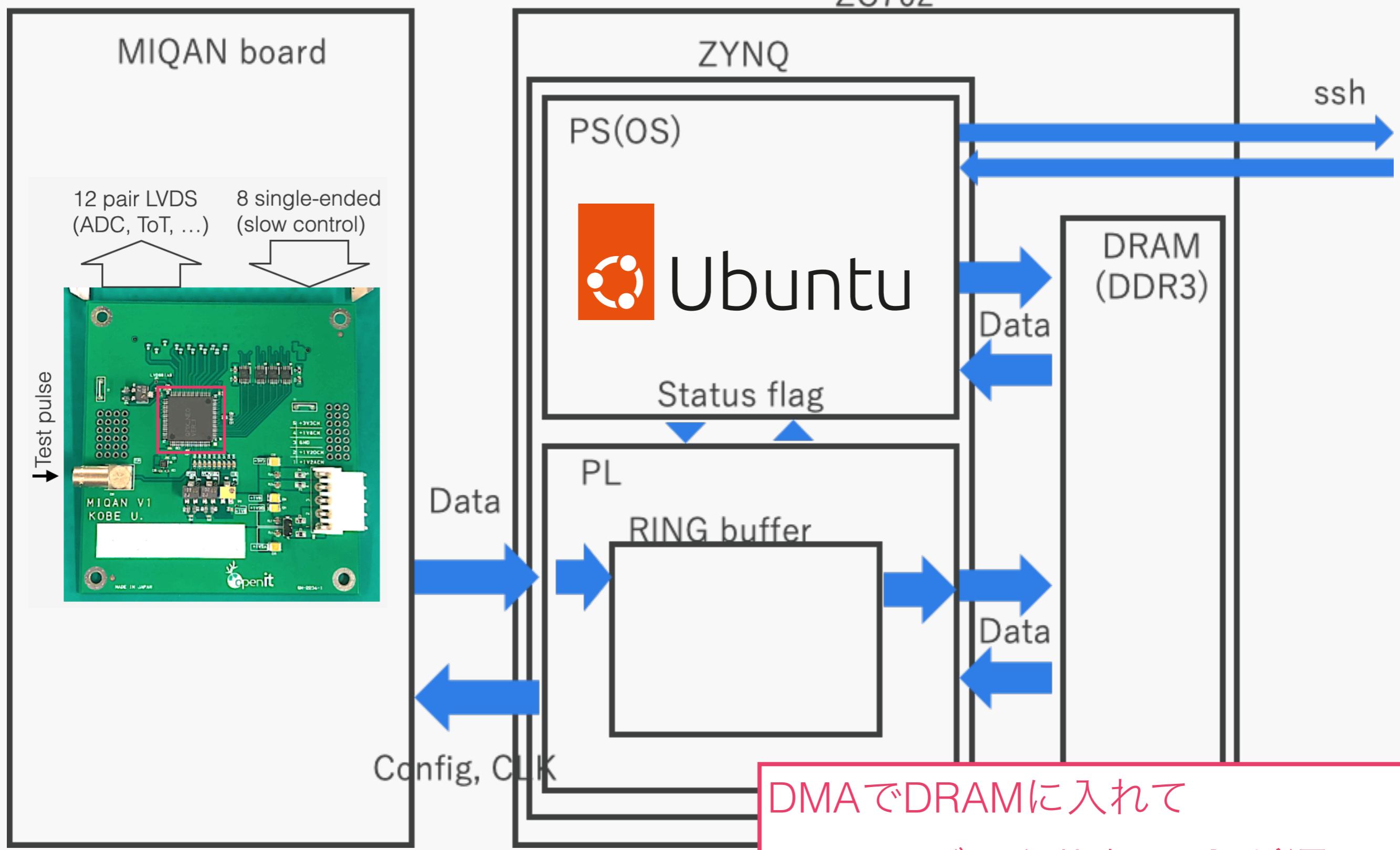
ToT + 時間情報

テスト用DAQシステム

- Xilinx ZYNQ (ZC702ボード) を用いてシステム構築



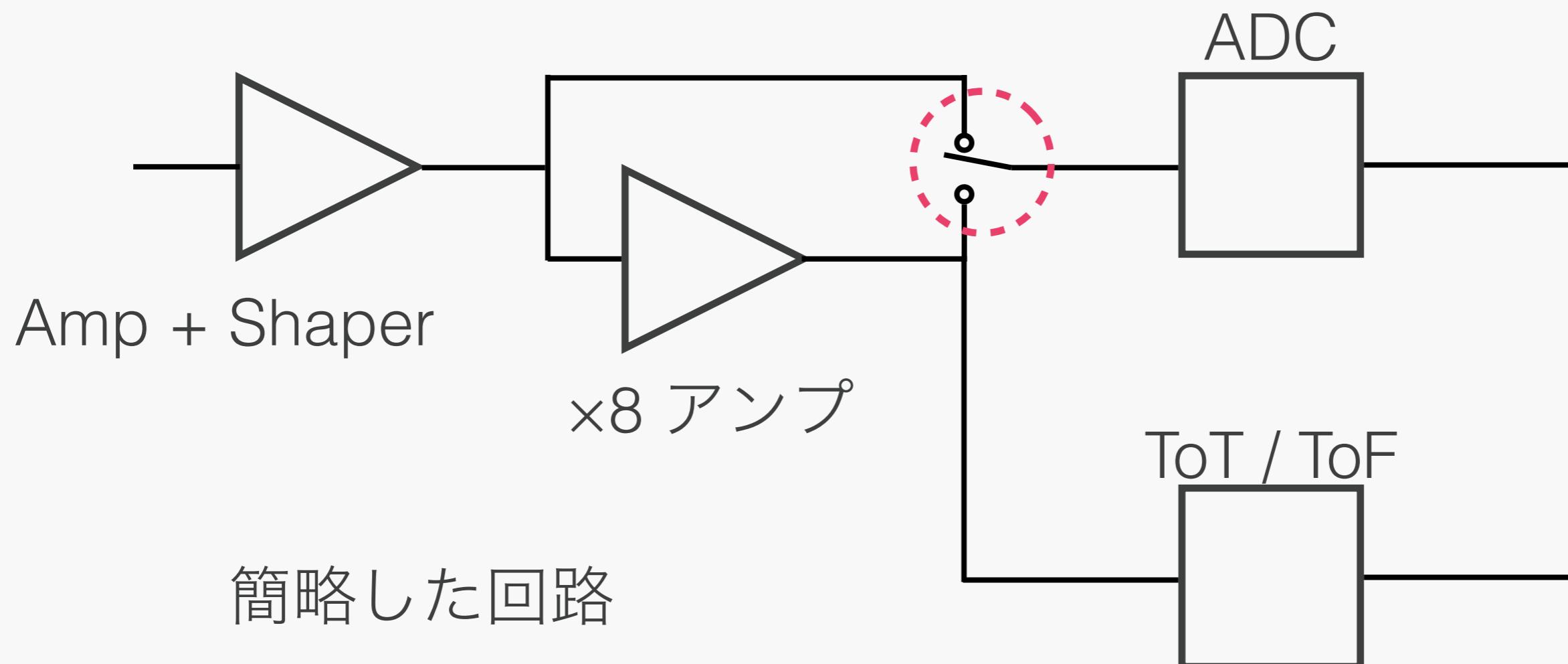
Block diagram



DMAでDRAMに入れて
PS-PLでデータ共有（これが遅い）

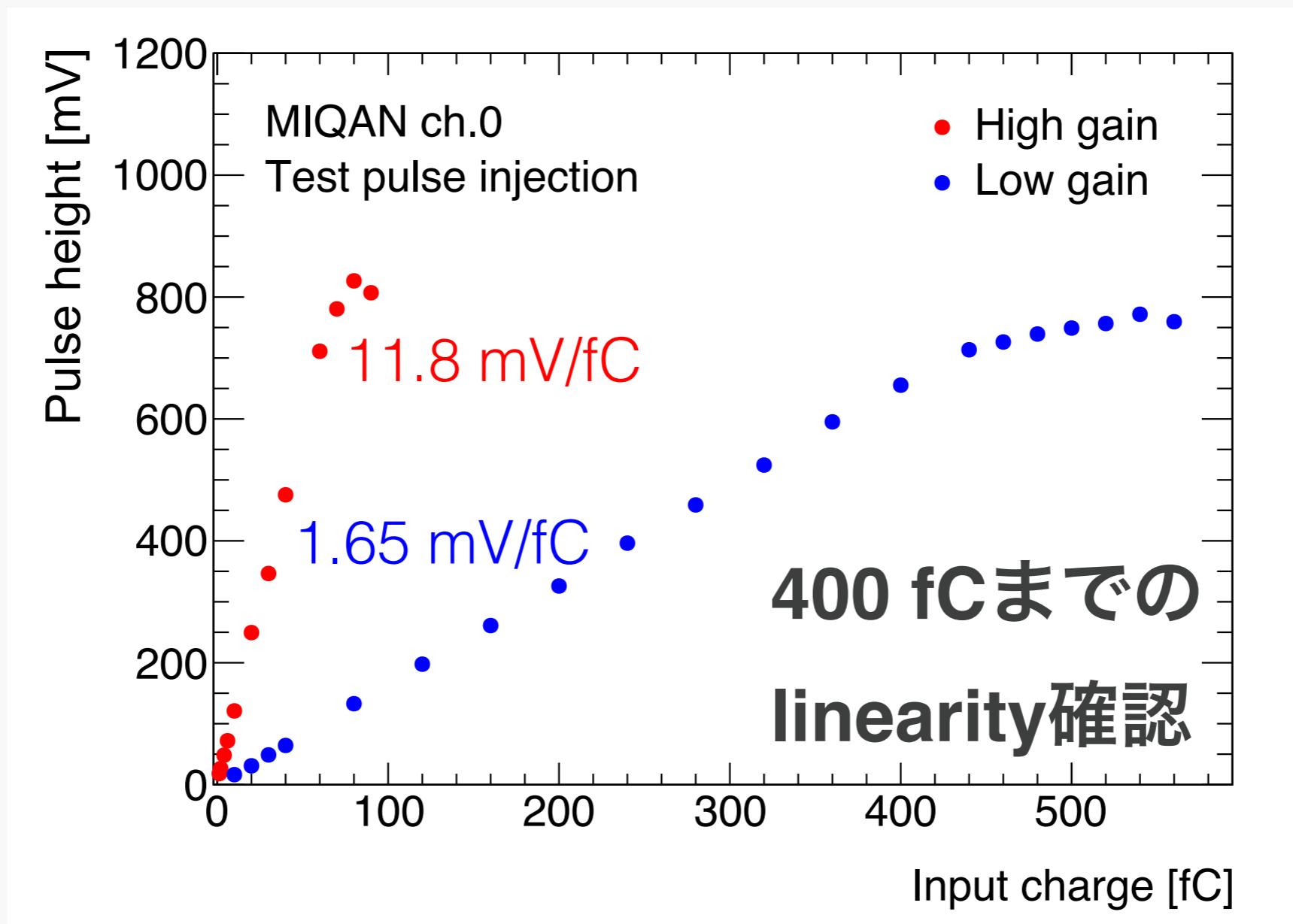
自動ゲイン切り替え

- 高ダイナミックレンジ実現のため2種類のアンプ搭載
 - x1アンプとx8アンプがある閾値で切り替わる

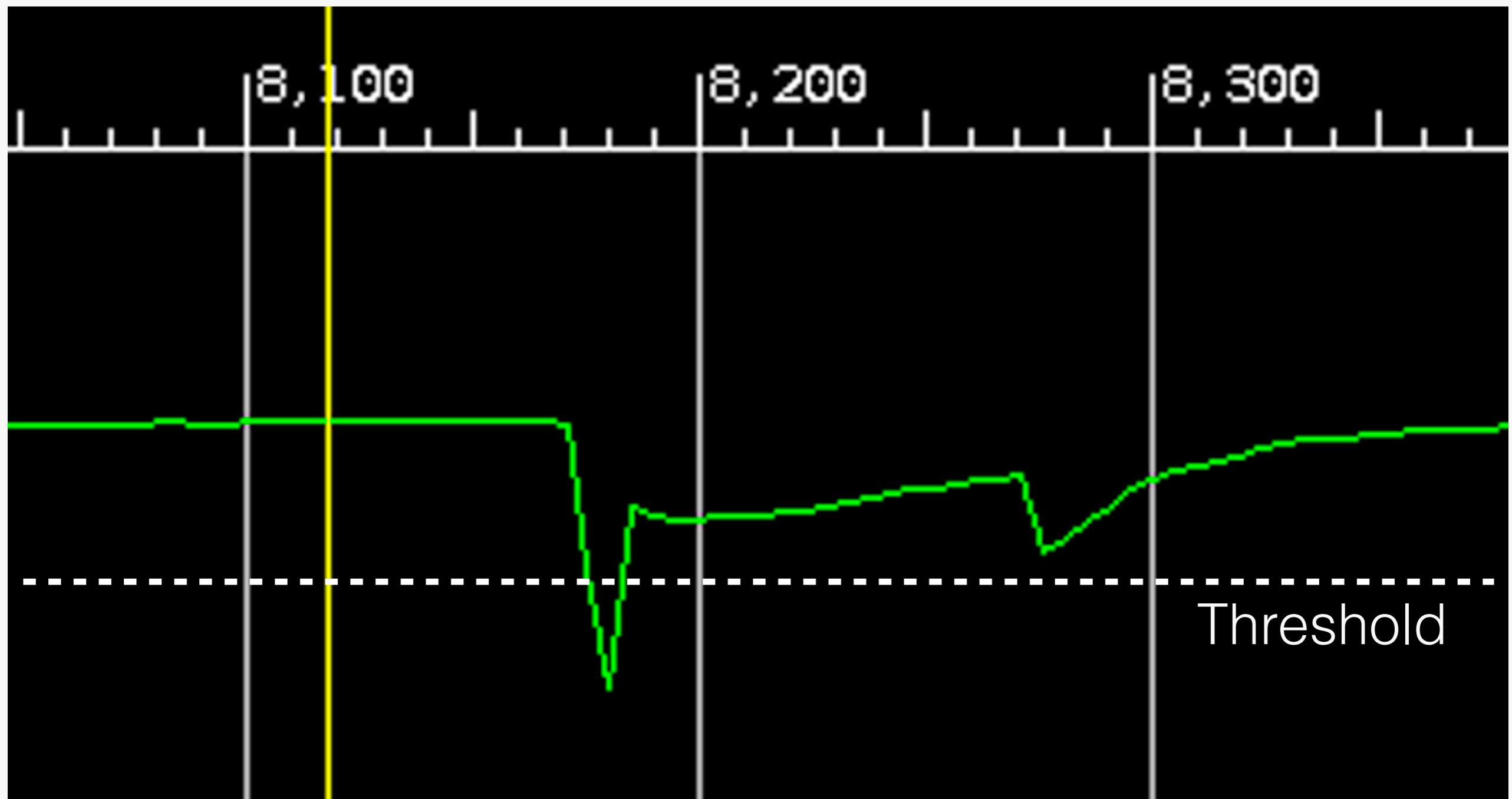


アンプのリニアリティ確認

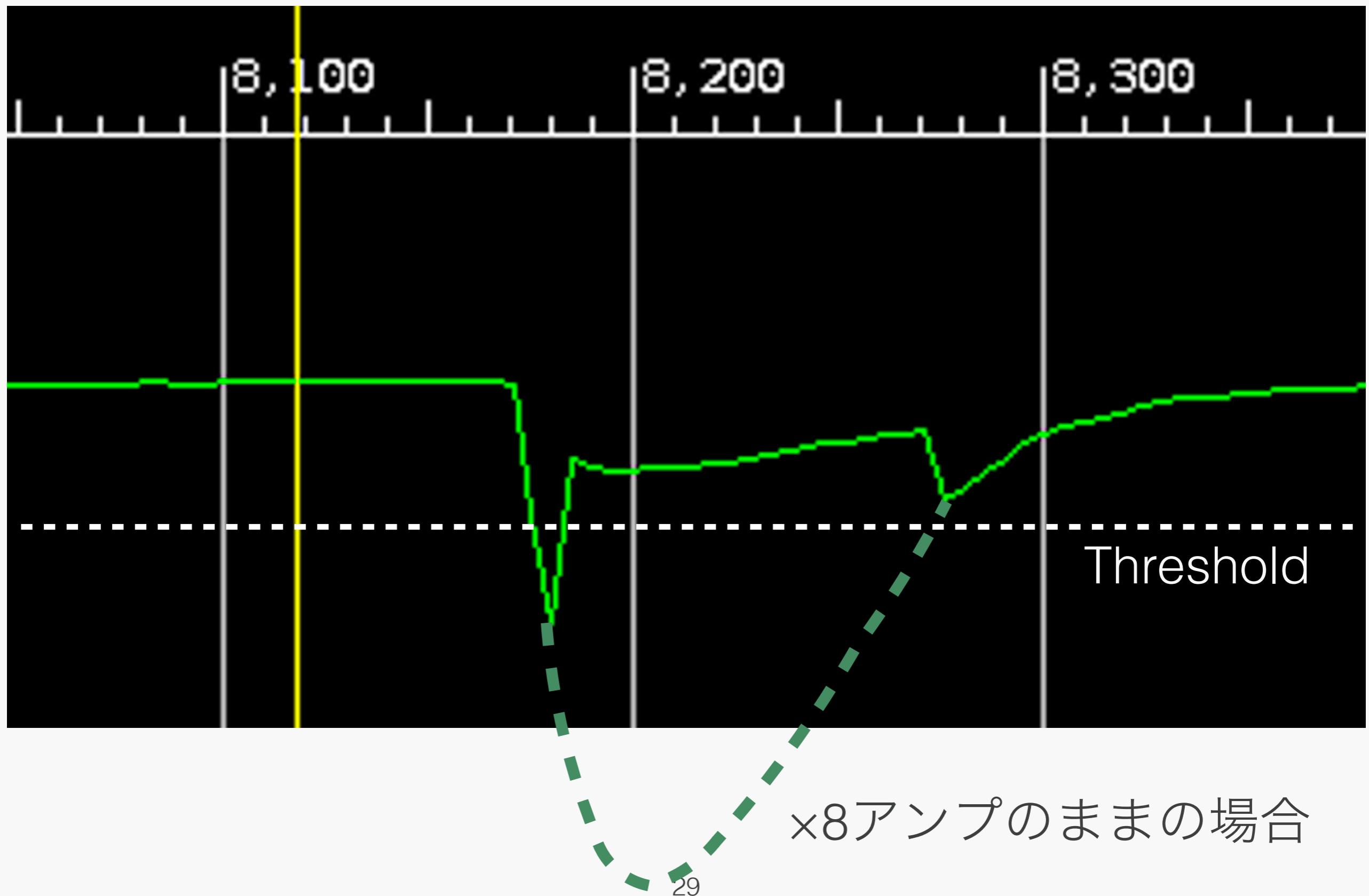
- まずはゲイン固定モードでそれぞれの性能評価
 - Configurationでゲイン設定可能
- テストパルス入力 (外部から矩形波入力→内部の0.4 pFコンデンサで電荷変換)



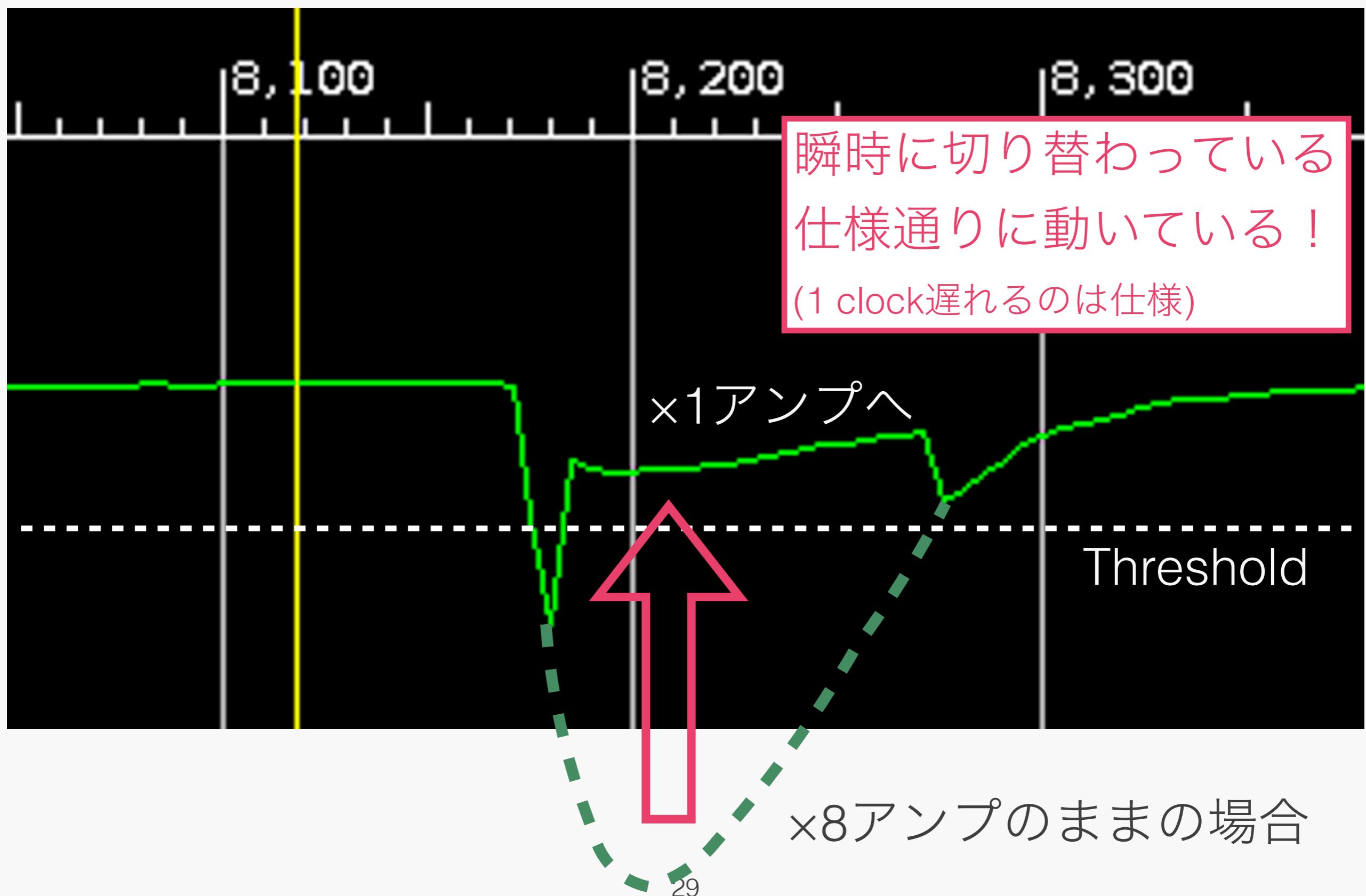
ゲイン自動切り替えの様子



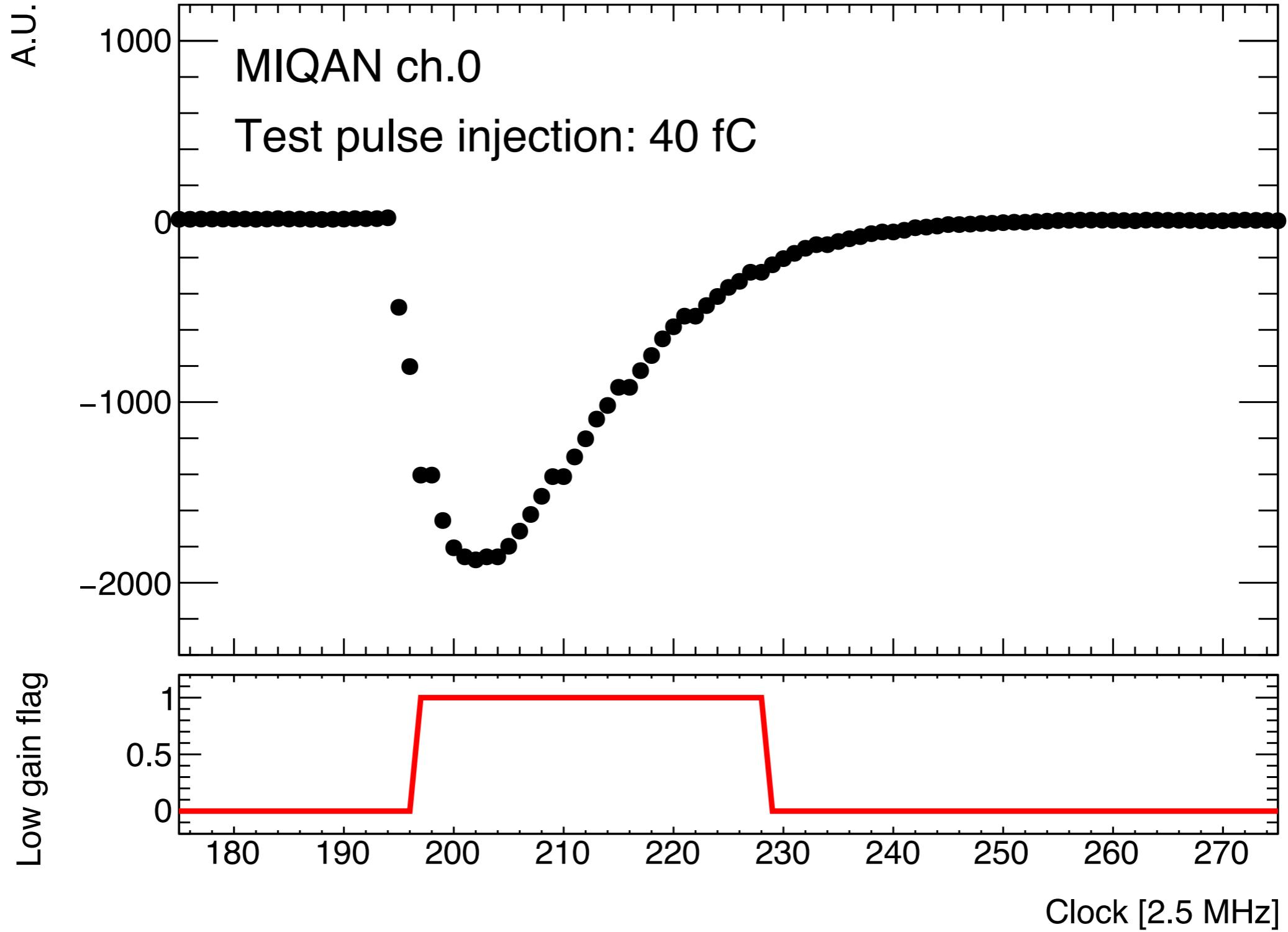
ゲイン自動切り替えの様子



ゲイン自動切り替えの様子



Waveform再構成



高ダイナミックレンジ実現、DM探索実験に利用可能

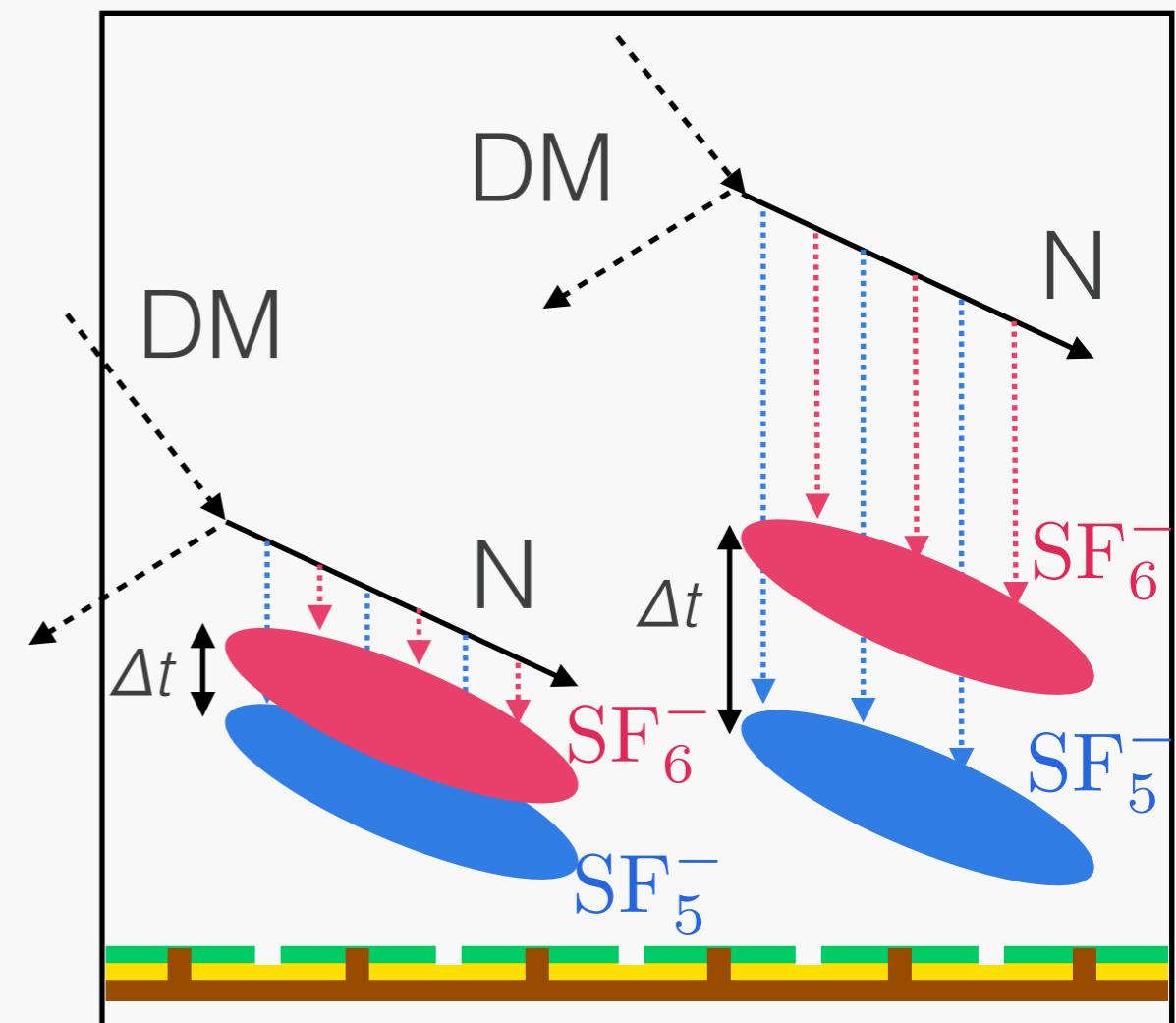
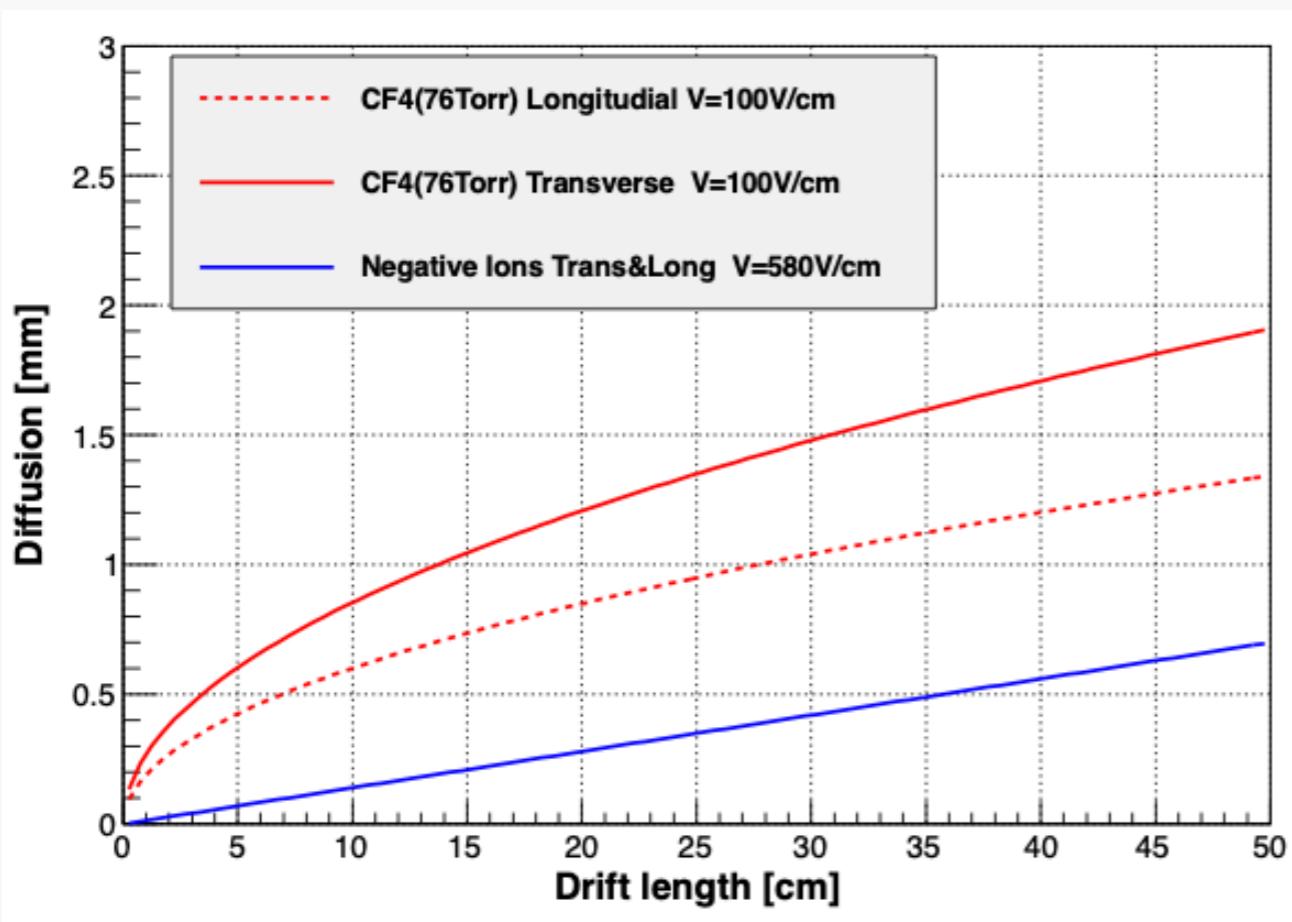
結論

- NEWAGE: ガスTPCを用いた暗黒物質直接探索実験
 - 3次元飛跡再構成技術を用いて多方面に応用
 - さらに感度向上のため新型検出器も試作中
- MIRACLUE: ミグダル効果探索実験
 - 統合DAQシステムを開発、中性子ビーム実験にて動作確認
- 次世代NEWAGE: ピクセルガスTPCを用いた暗黒物質探索
 - ASICから開発して絶賛DAQ開発中
- 低レートの地下実験でもけっこうがんばっている
 - 今後ともご助力おねがいします。興味あれば一緒になにかしましょう！

Backup

低エネルギー = 短飛跡検出に向けた戦略

- 問題点はドリフト電子の拡散と読み出しピッチ
 - “陰イオンガス”を微細読み出しで勝負
 - ガス分子が電離電子をアタッチ、大きく重たい陰イオン形成→ゆっくり低拡散なドリフト
- 陰イオンガスにSF₆ガスを選択→絶対位置の再構成可能 (BG削減に有力)



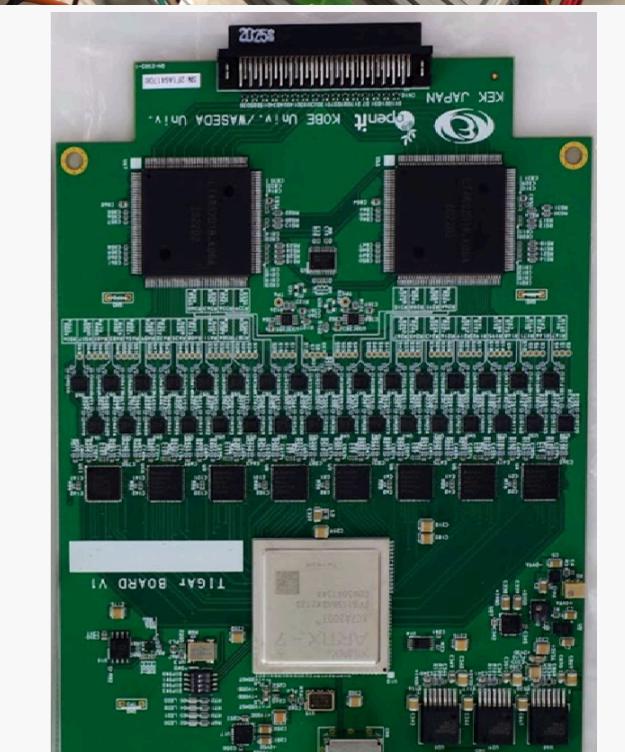
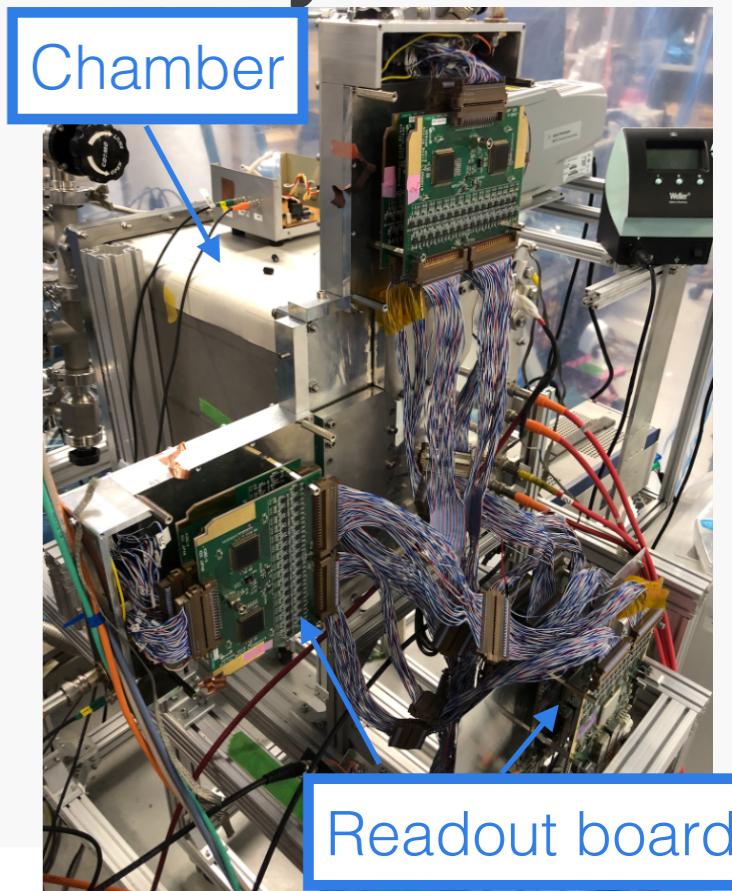
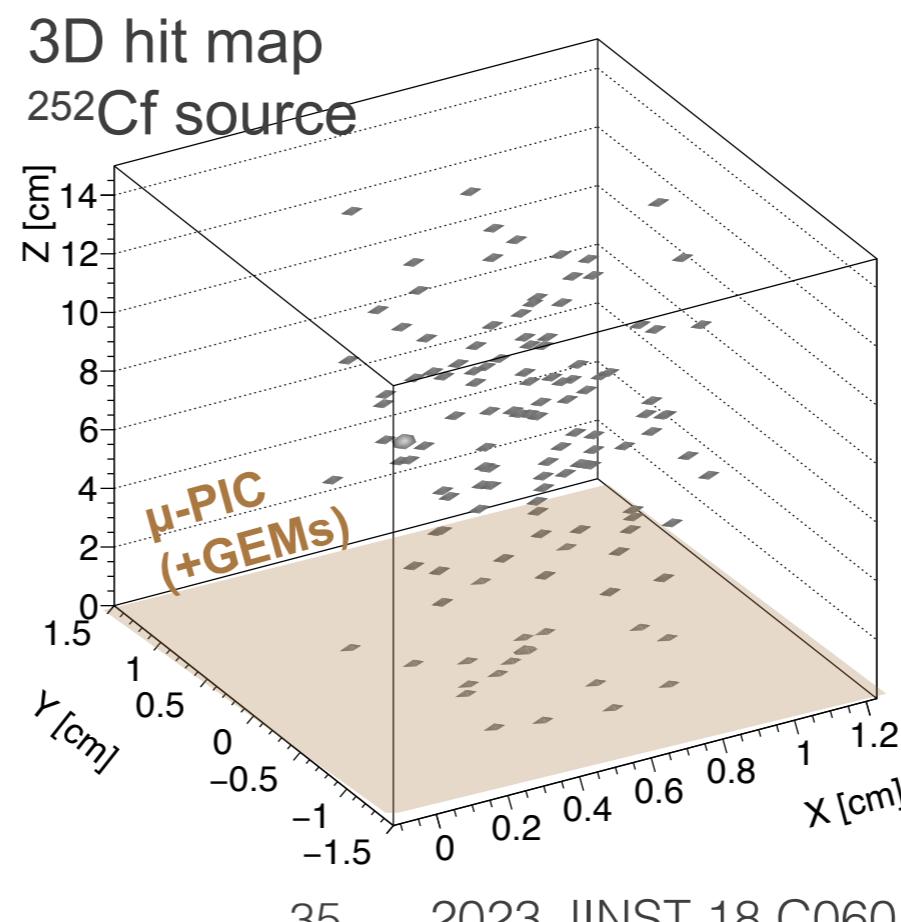
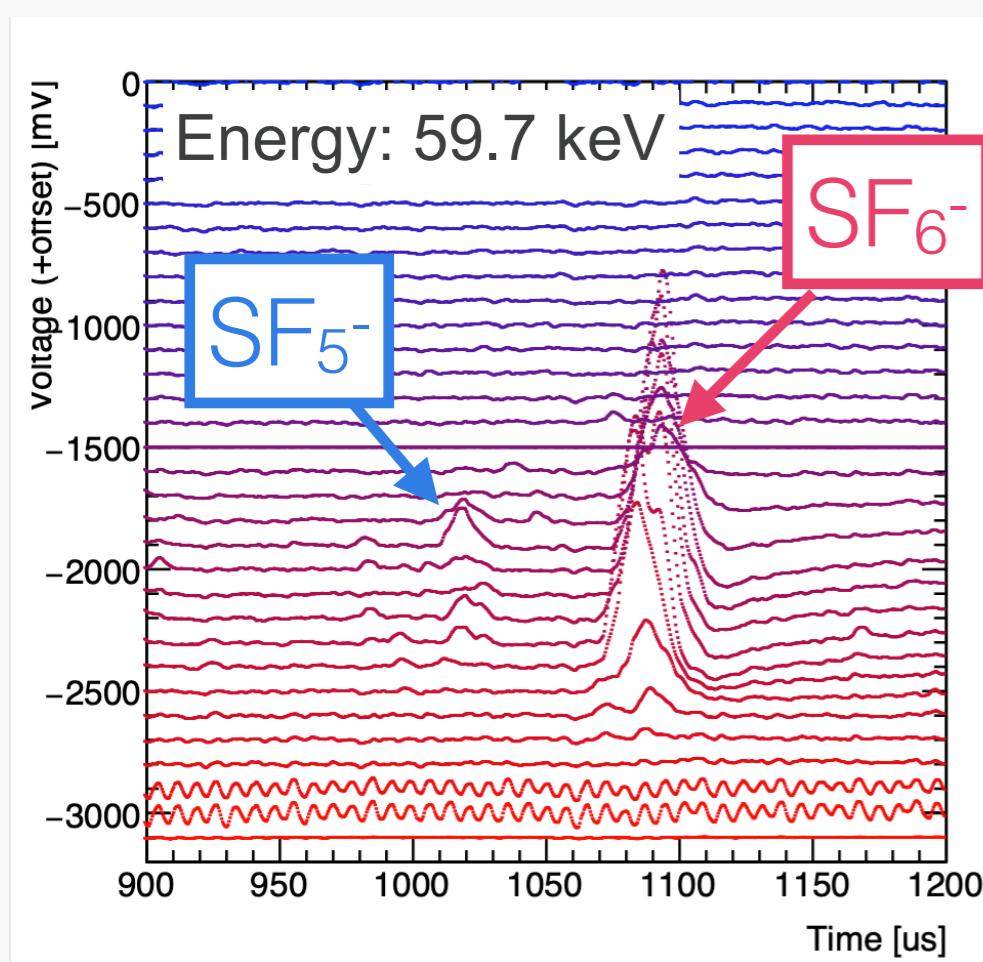
低拡散な陰イオンガスのstudy

- 暗黒物質探索への適用はまだされていなかった

- 専用のエレクトロニクスのファームウェア開発
- 原子核反跳の絶対位置での3次元飛跡再構成を初実証

► arXiv: 2302.10725 / 2023 JINST 18 C06012

- 角度分解能等の評価に向けて研究継続中



新バージョンのボード
(早稲田大メインに共同開発)

NEWAGEロードマップ

2024

2025

2026

2027

...

2030

地下測定 (~300実測日)

CF₄、SF₆ガスでの基礎研究



30 × 30 × 41 cm³

2023年12月
低BG μ-PIC実装

低BG μ-PIC
C/N-1.0に実装

ピクセル検出器試験
(小型検出器)



1 m³

2025年中
Module-1実装
地上測定開始

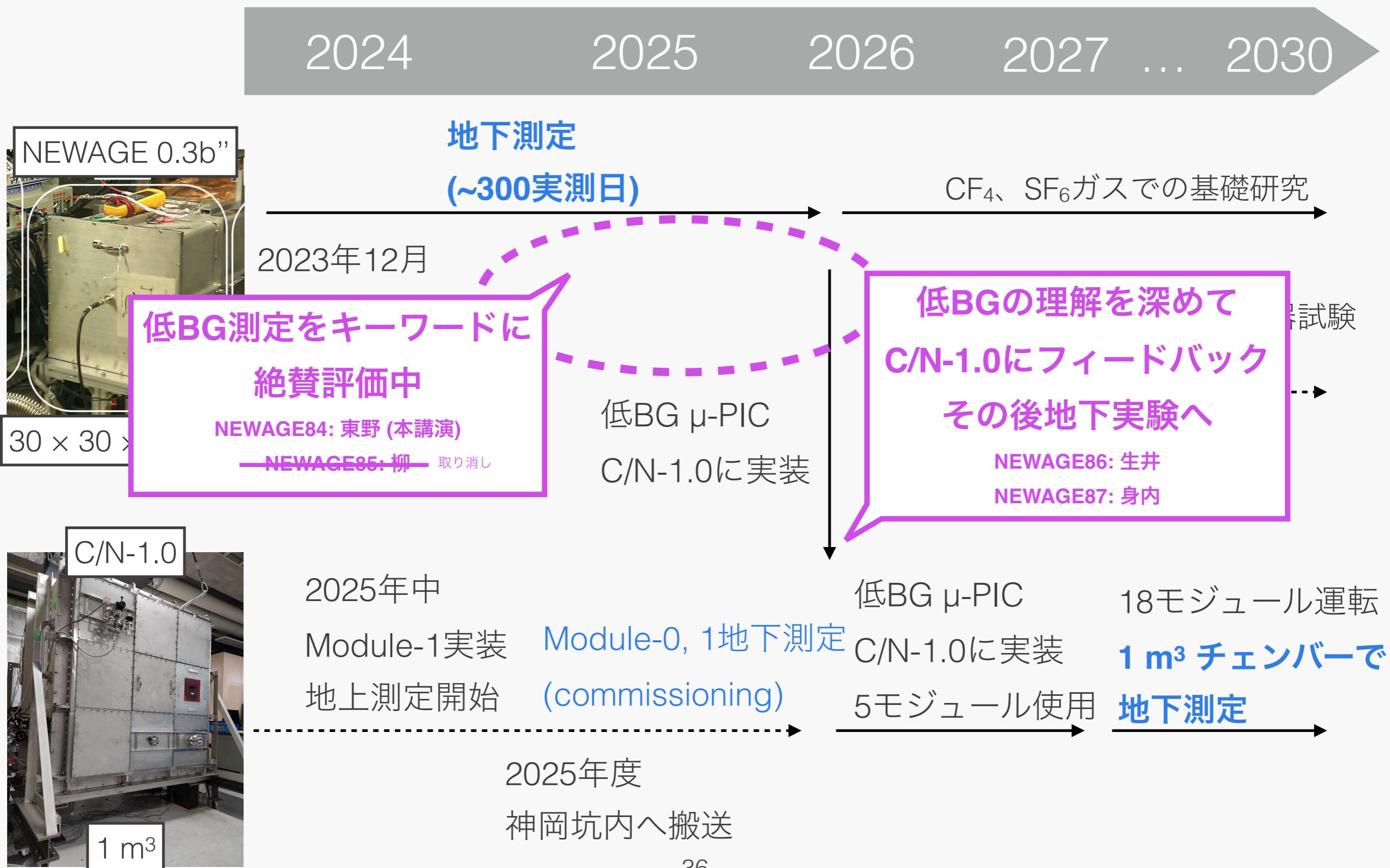
Module-0, 1地下測定
(commissioning)

2025年度
神岡坑内へ搬送

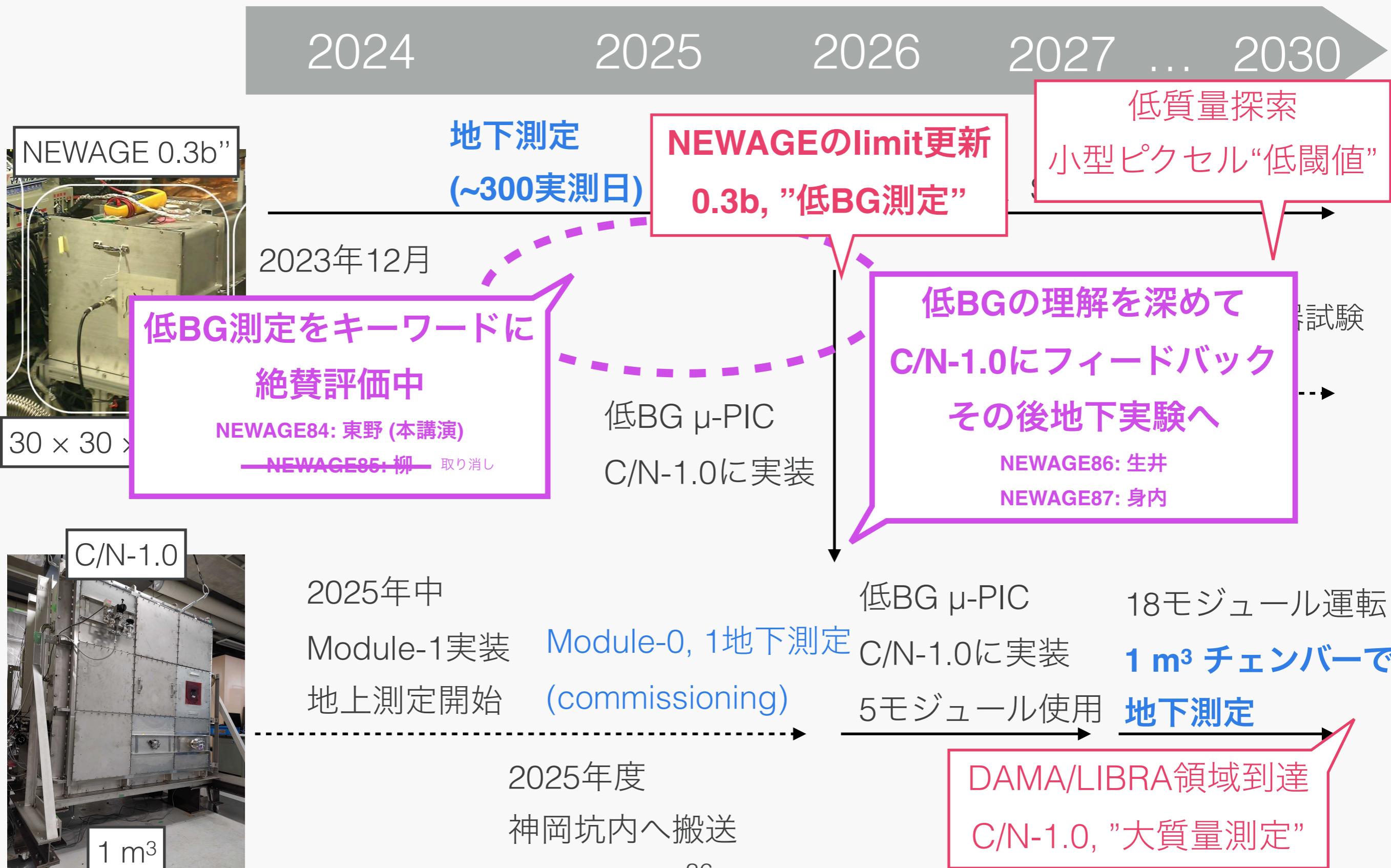
低BG μ-PIC
C/N-1.0に実装
5モジュール使用

18モジュール運転
**1 m³ チェンバーで
地下測定**

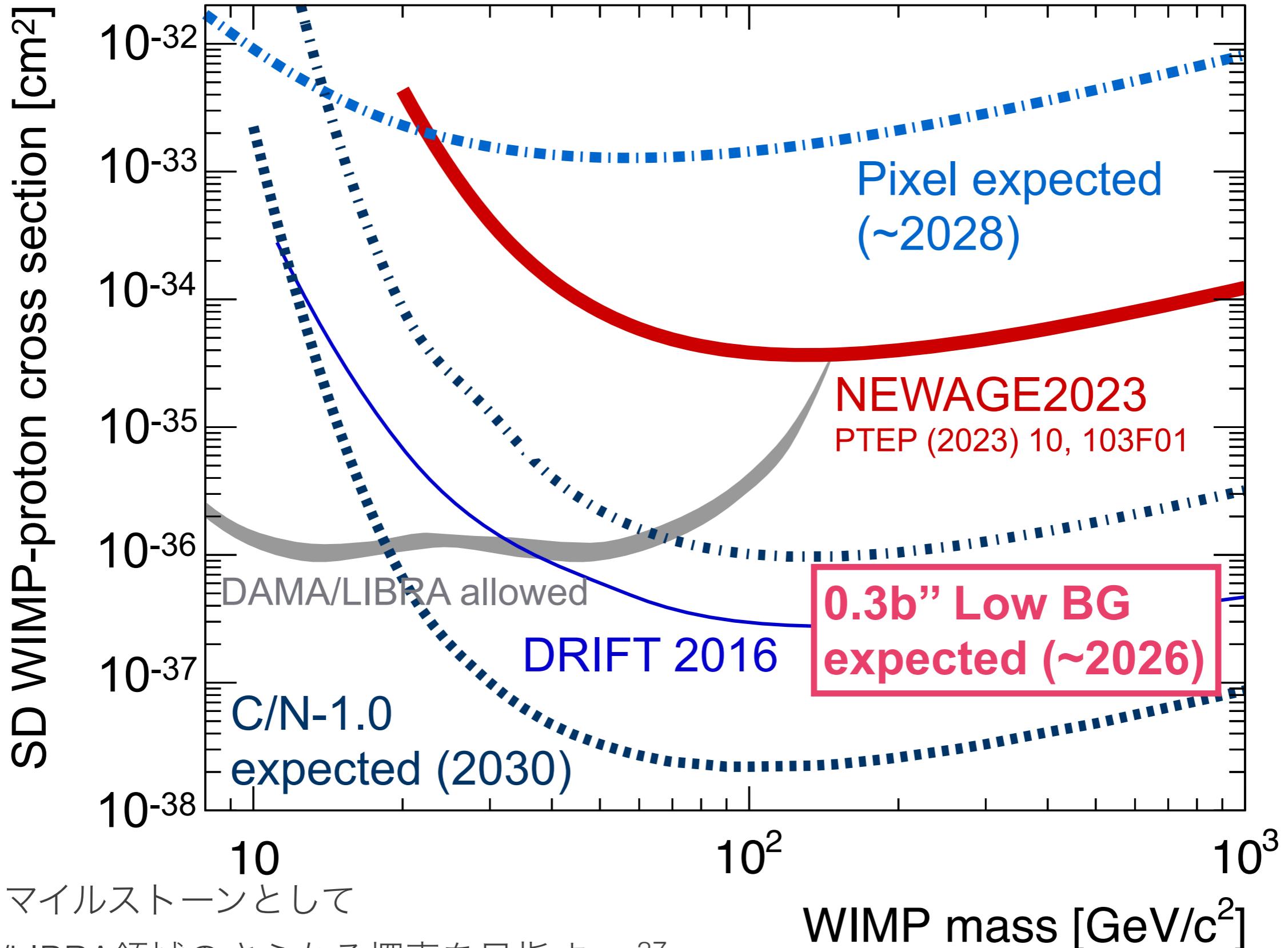
NEWAGEロードマップ



NEWAGEロードマップ

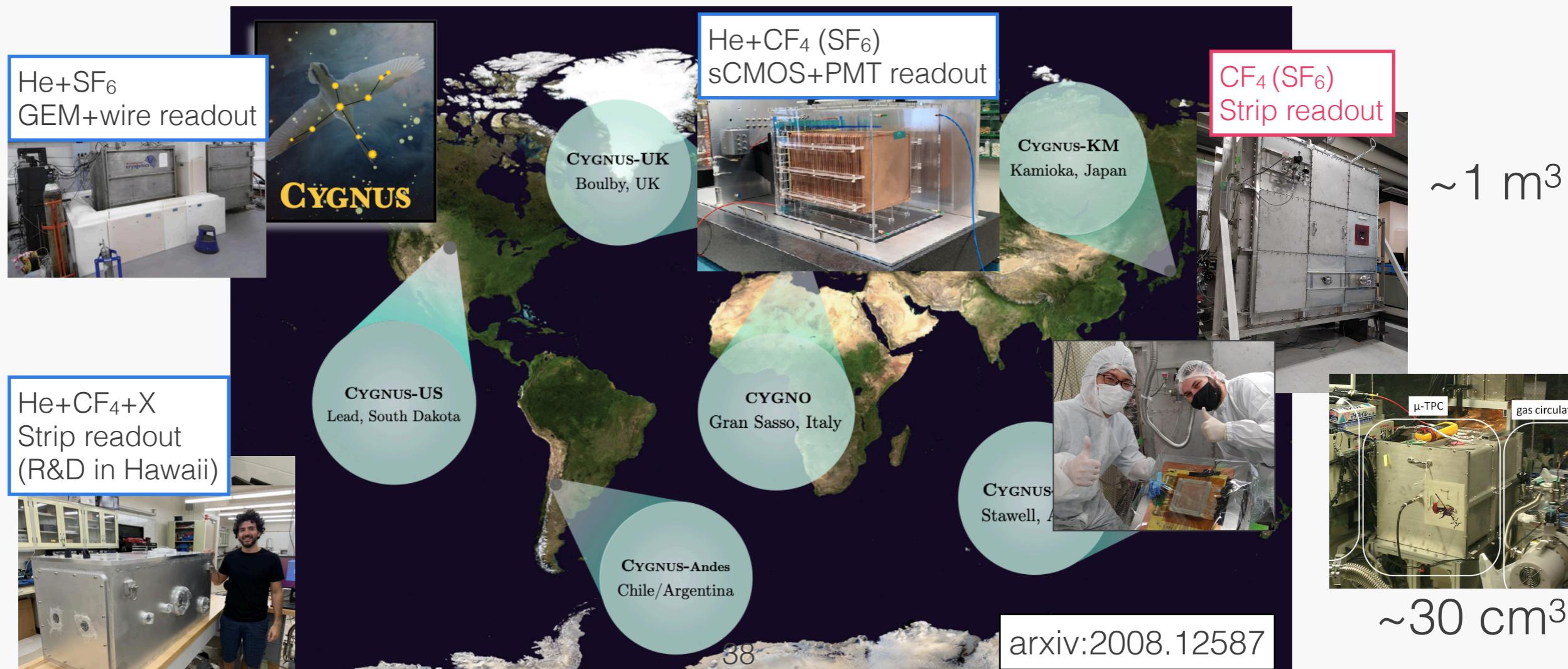


Expected limits



“CYGNUS” コンソーシアム

- 各地下実験施設で1 m³級のガスTPC開発中
- 将来的に結果をコンバインしてより感度を出す
→ 現在は進捗状況等をシェアしつつ各々が技術を磨いている
- 1 m³級を超えた規模では海外連携が必須、その基盤を確立



“CYGNUS / NEWAGE” ロードマップ

