



陰イオンガスTPPCの ピクセル読み出し計画

東野 聡^{A,D}

身内賢太郎^{A,D} 中山郁香^{A,D} 宮原正也^{B,D} 庄子正剛^{B,D} 田中真伸^{B,D} 房安貴弘^{C,D}

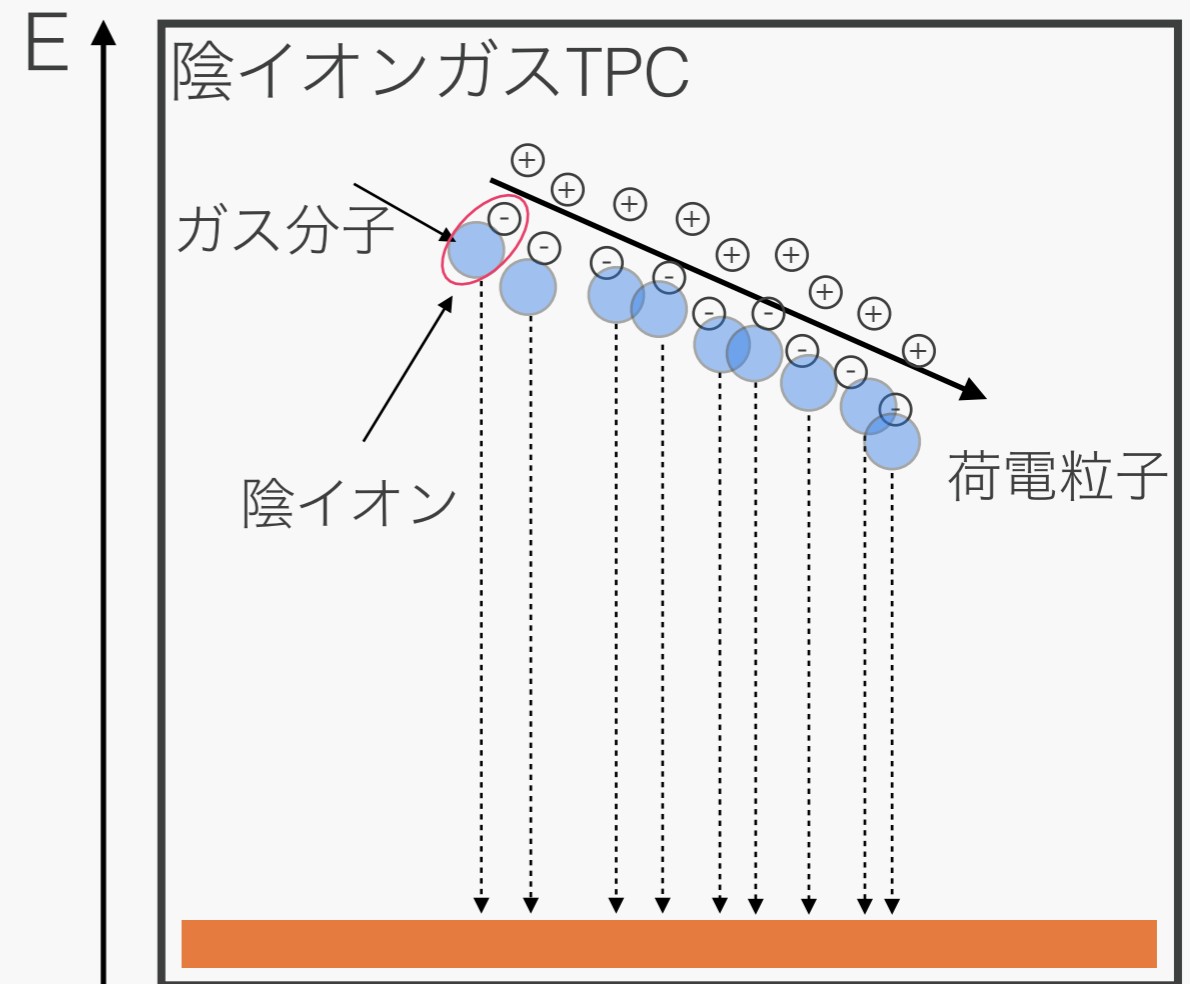
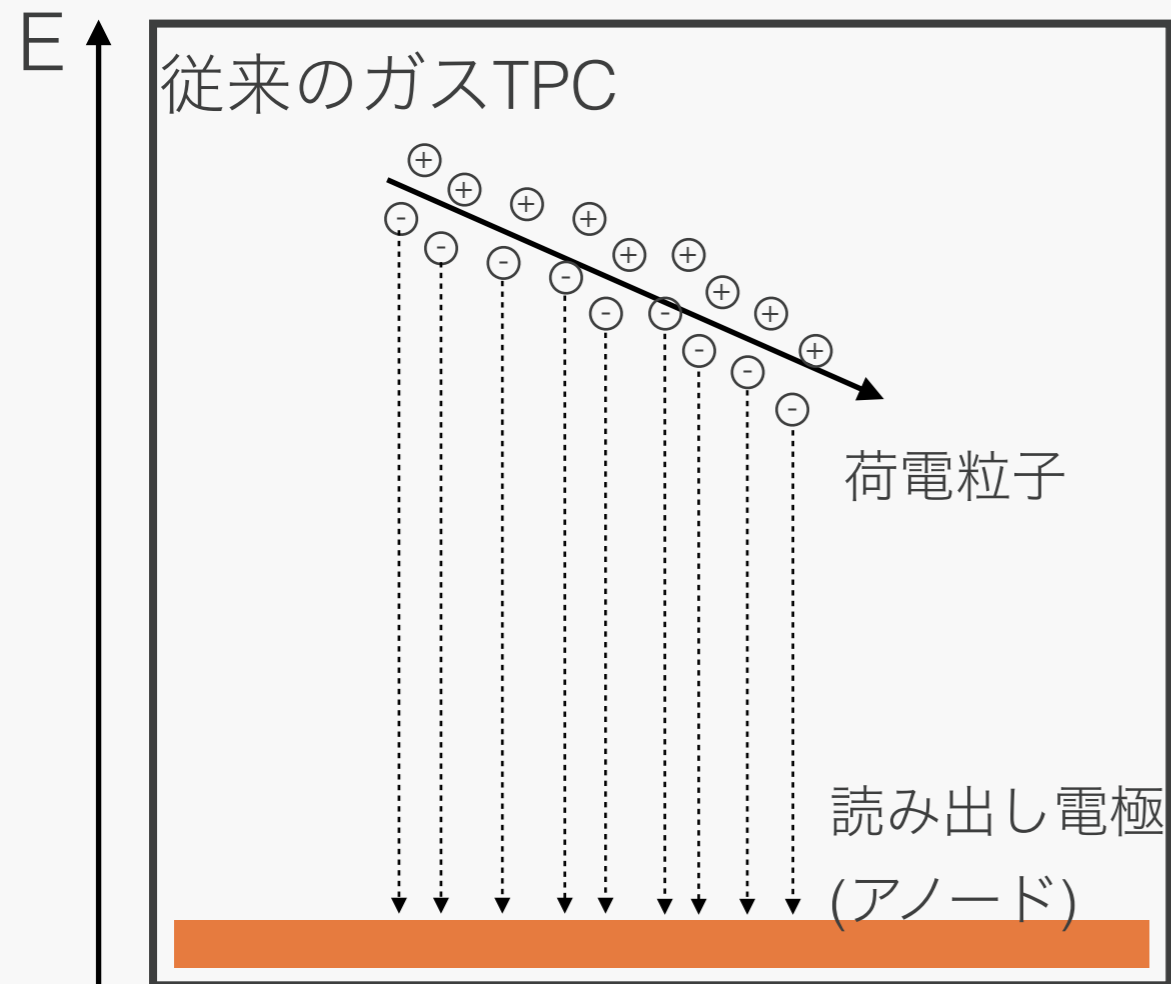
神戸大理^A、KEK^B、佐賀大理工^C、Open-It^D

2023年 3月 23日

イントロダクション

陰イオンガスTPC

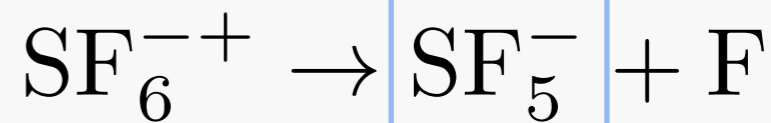
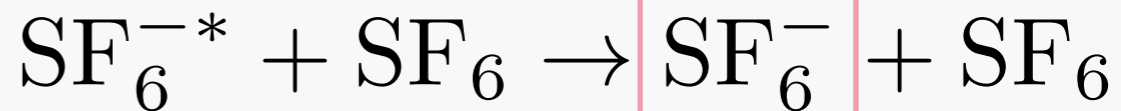
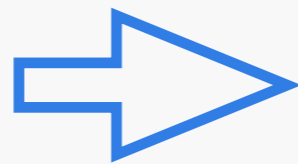
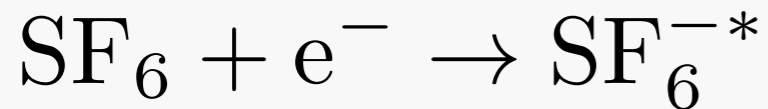
- 電離電荷のドリフト時間を”投影”して位置情報を知る
 - ➔ 陰イオンガス：電離電子の代わりに陰イオンが形成されドリフトするガス



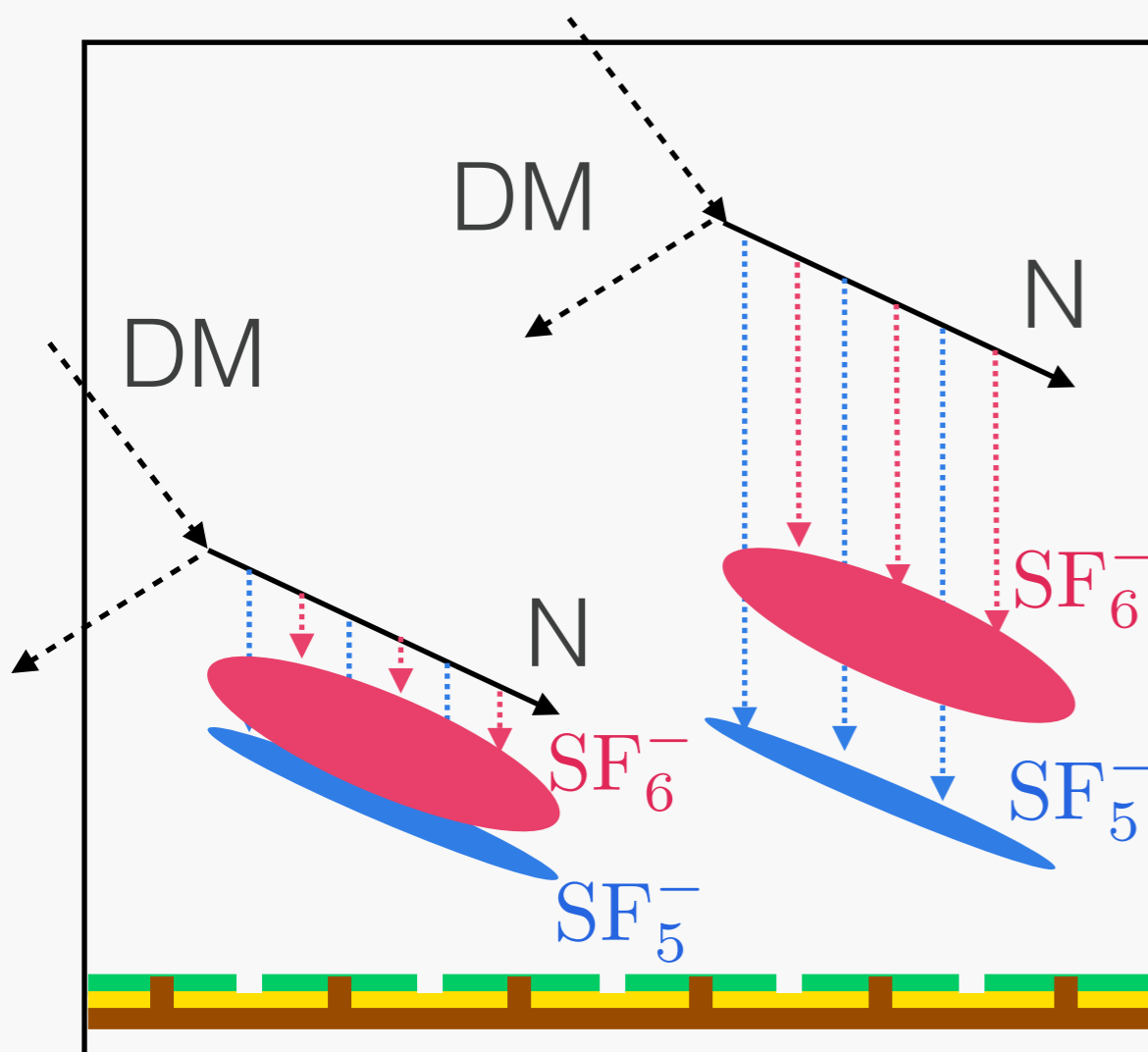
重たいのでゆっくりドリフト、低拡散

e.g. SF₆ガス

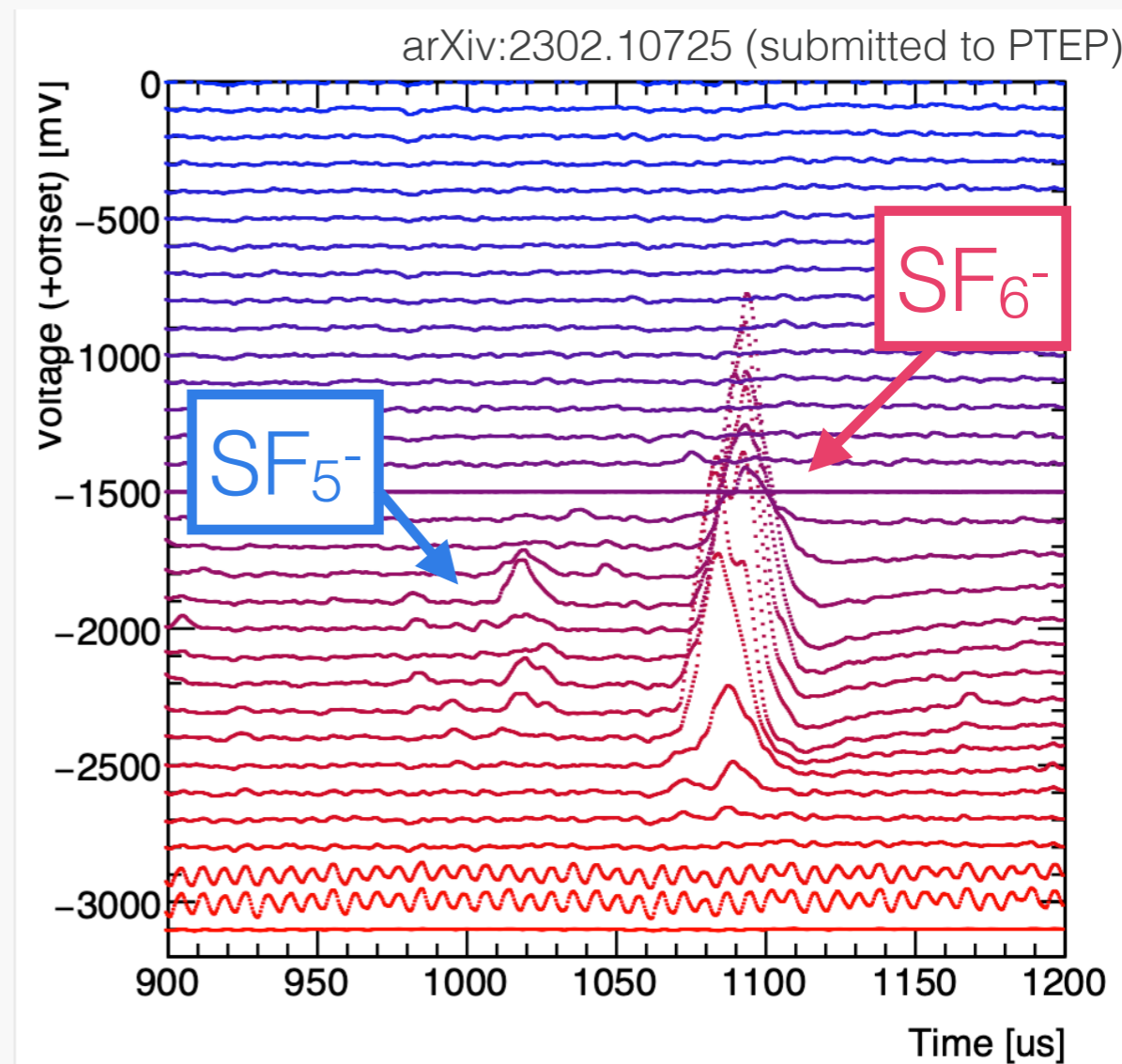
電離した電子がアタッチ



2種類の陰イオン形成



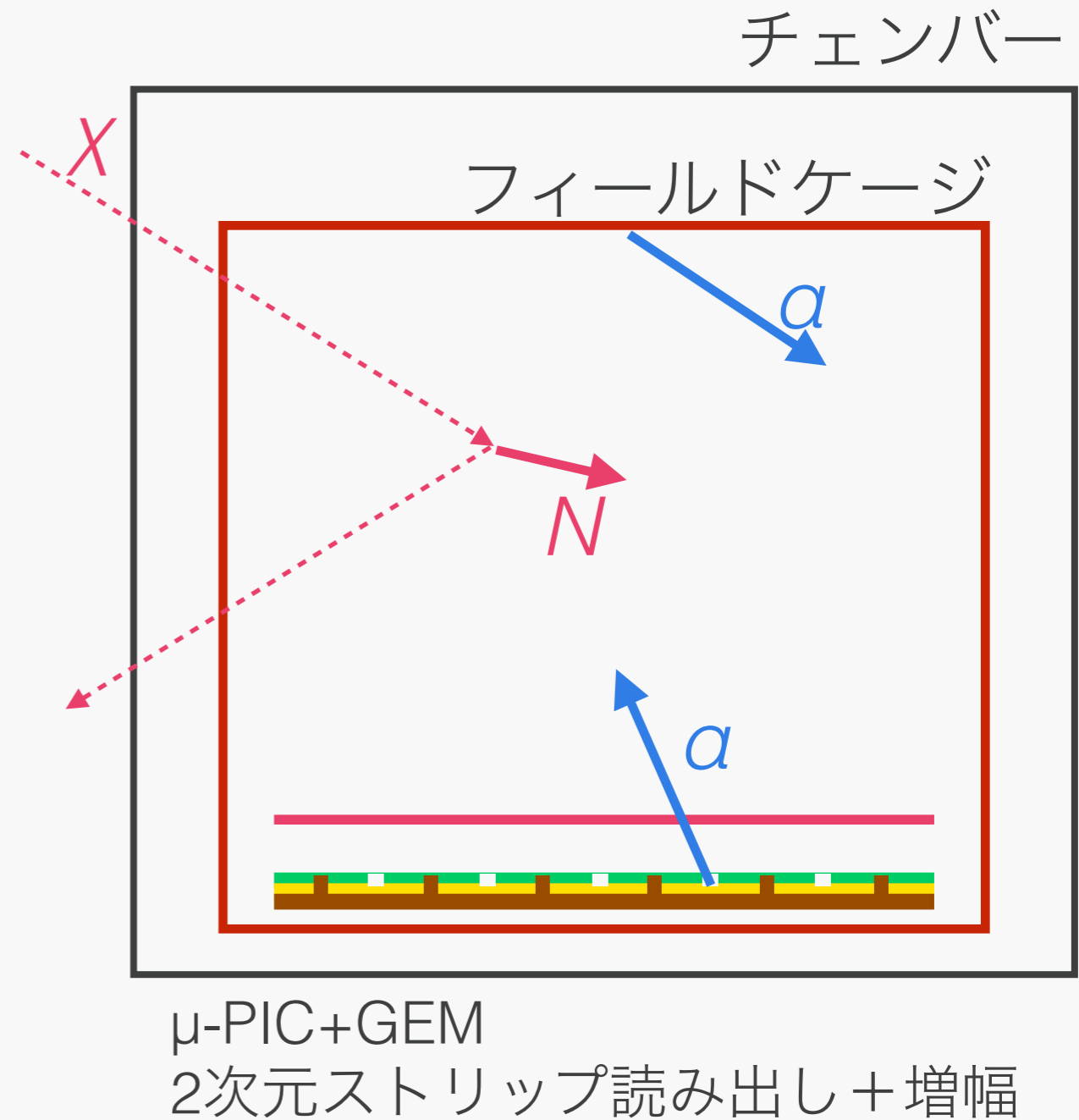
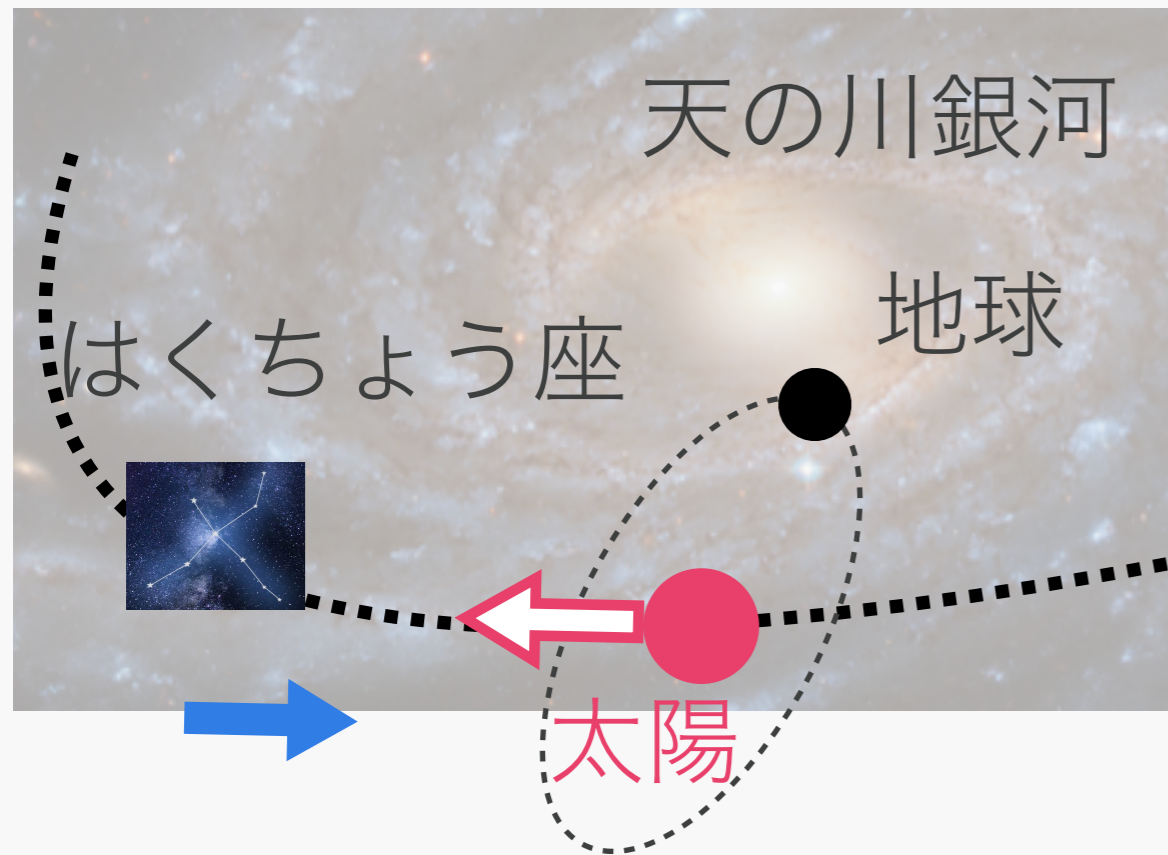
時間差を見ればドリフト方向の
絶対位置も測定可能



読み出しは一工夫必要

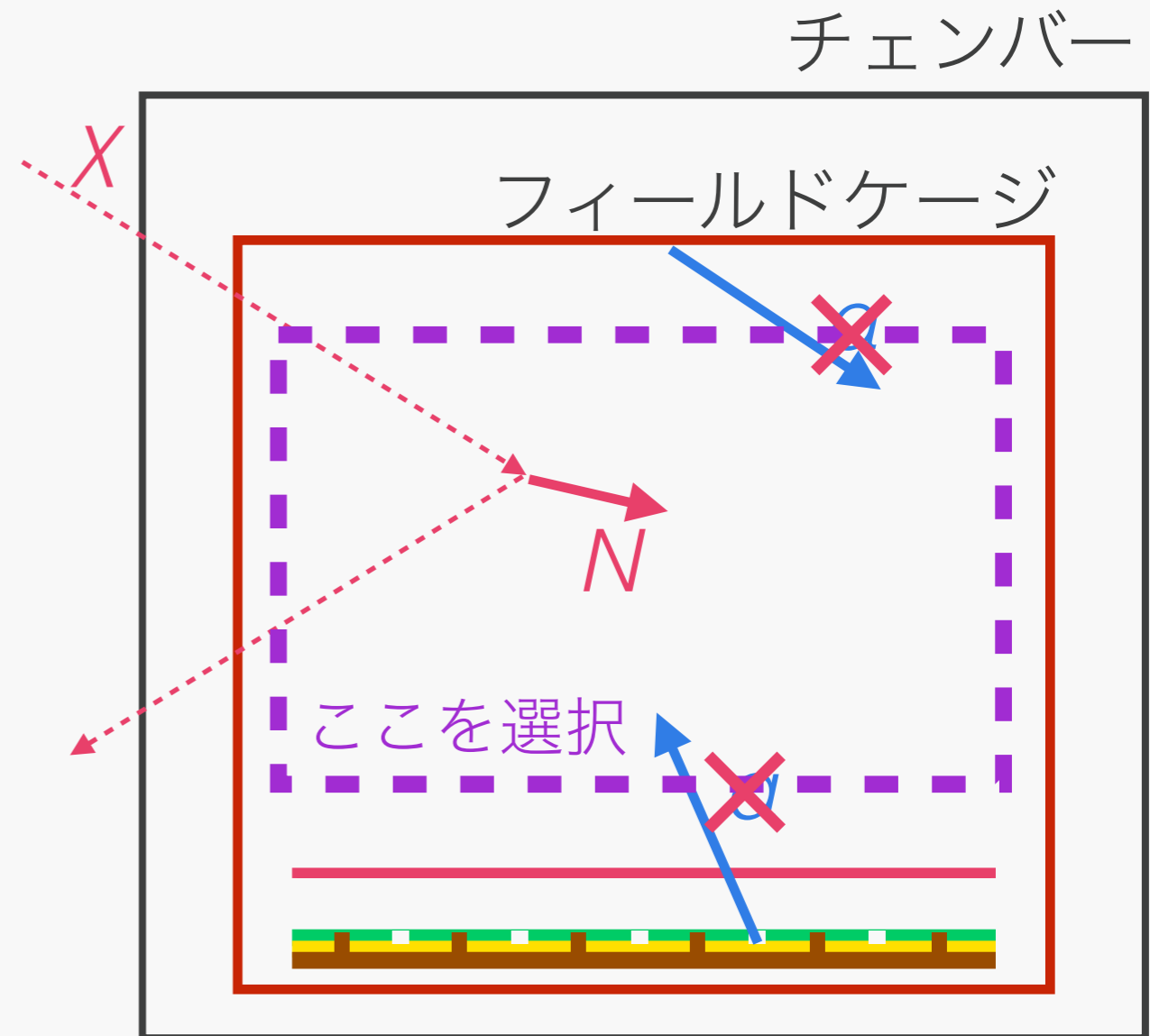
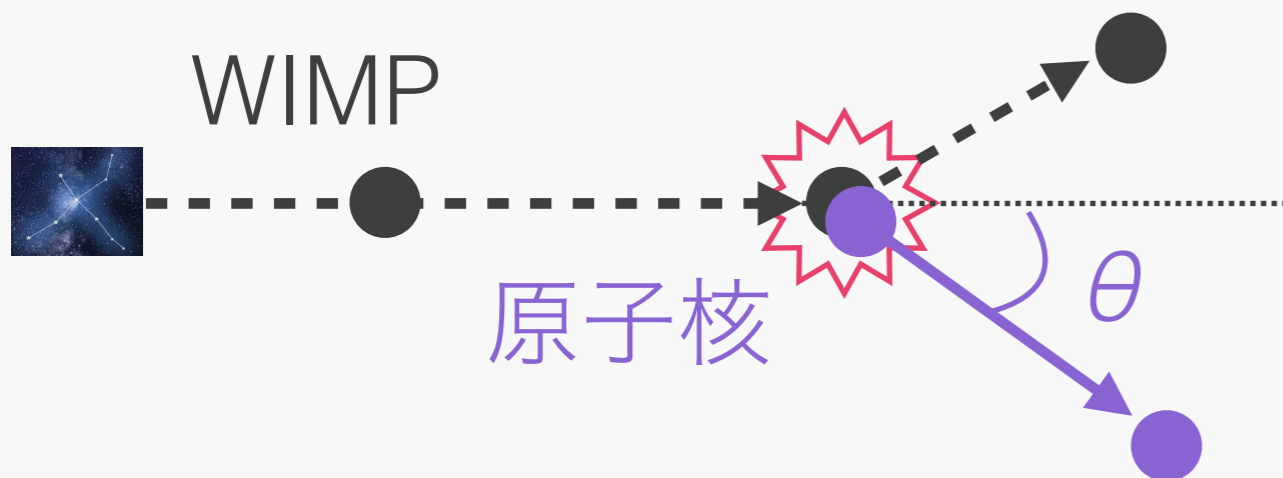
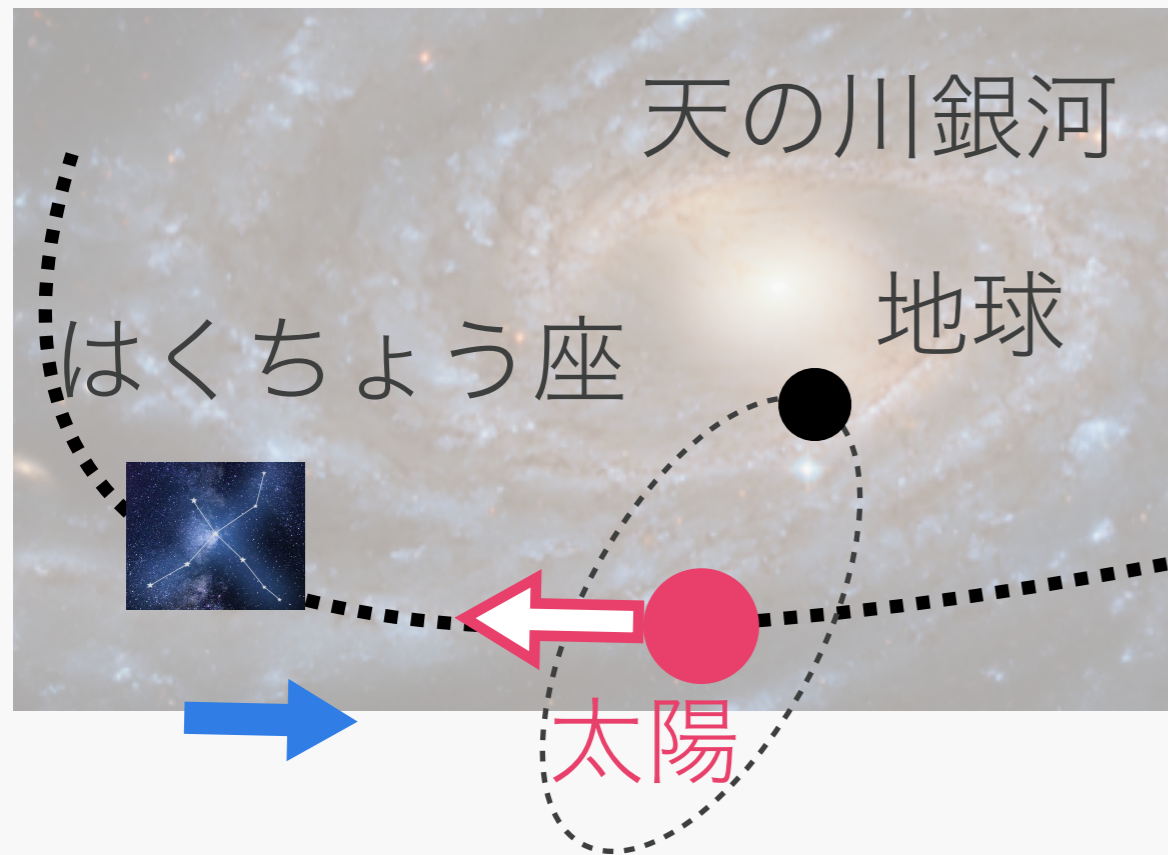
利用例：方向感度をもつDM探索 (NEWAGE)

- はくちょう座に対する原子核反跳角測定→DMの強い証拠に



利用例：方向感度をもつDM探索 (NEWAGE)

- はくちょう座に対する原子核反跳角測定→DMの強い証拠に



μ -PIC+GEM
2次元ストリップ読み出し+増幅

有効体積カットによるBG削減

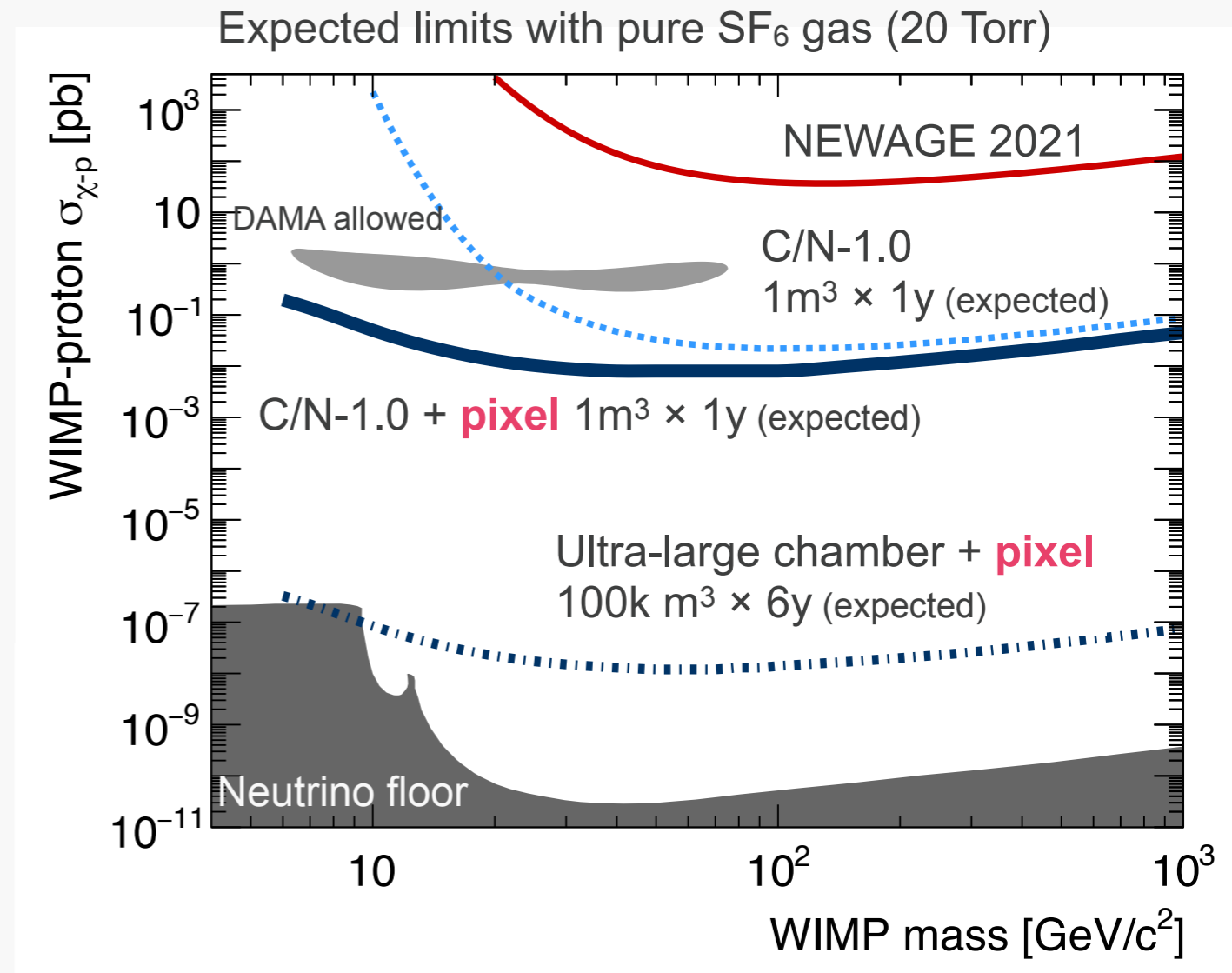
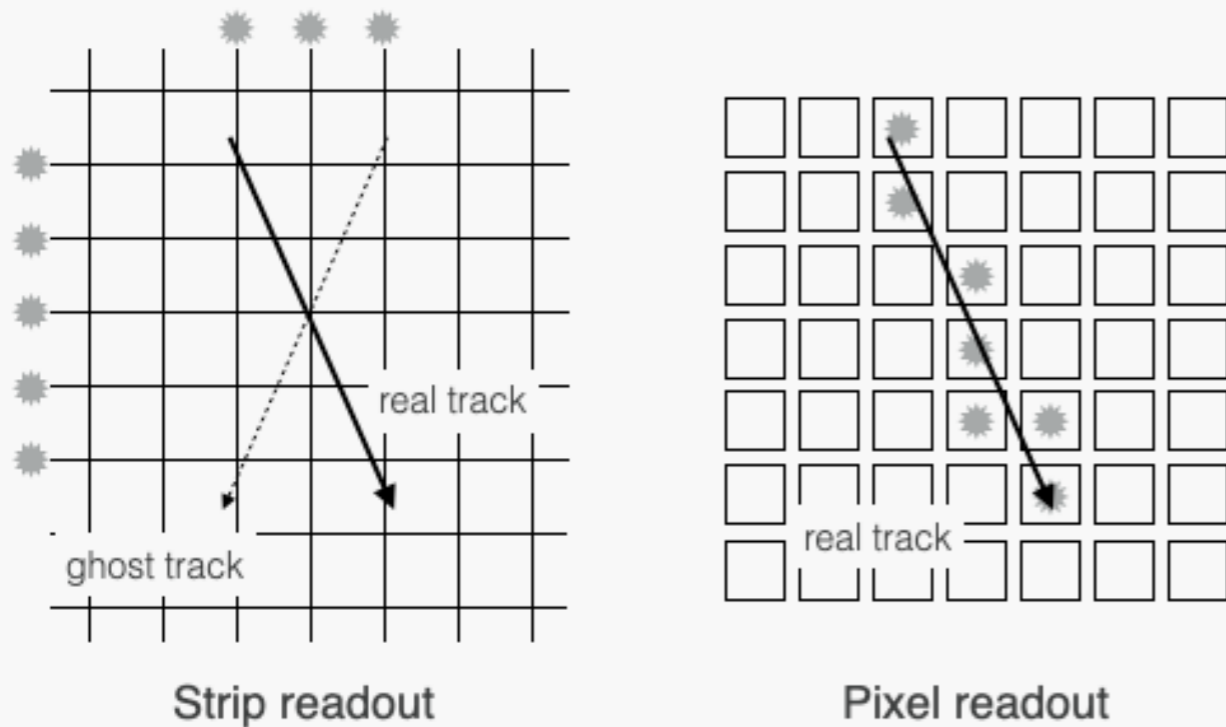
ピクセル＋微細読み出し計画

- 「短飛跡」を「精度よく」が課題

→ 短飛跡 (= 低反跳エネルギー) 検出が低質量WIMP探索を切り拓く

▶ 現状**400 μm** ピッチの読み出し (+ストリップ検出器) により律速

→ かつピクセル読み出しによるゴーストトラックで削減



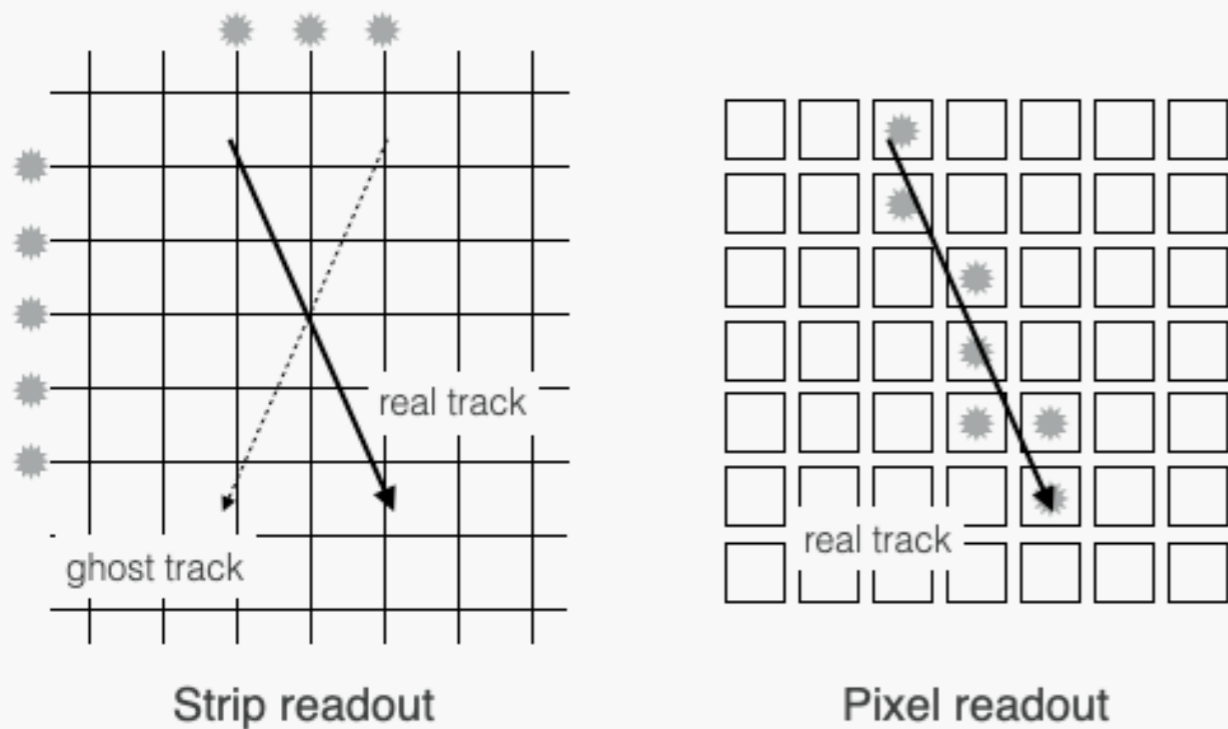
ピクセル+微細読み出し計画

- 「短飛跡」を「精度よく」が課題

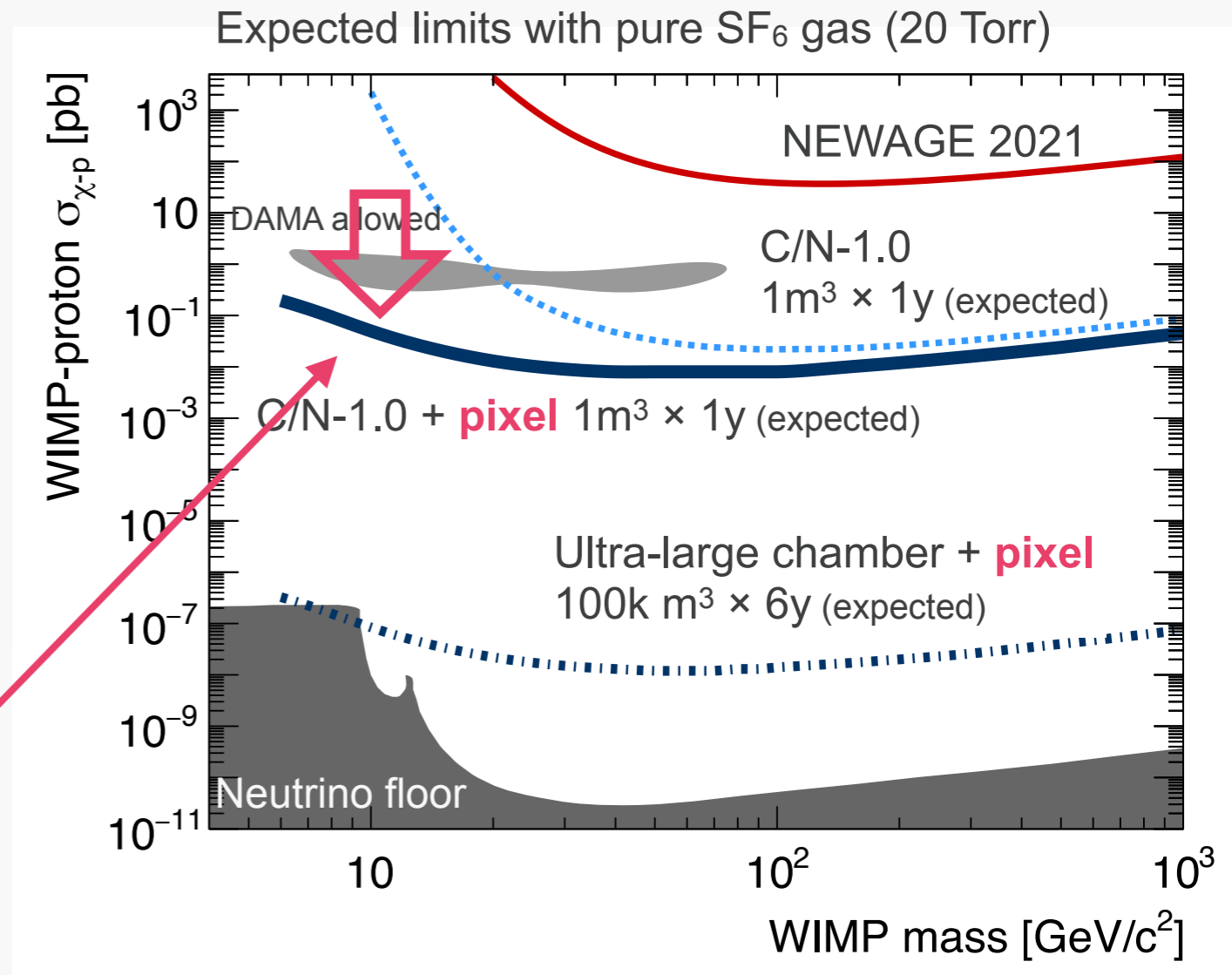
→ 短飛跡 (= 低反跳エネルギー) 検出が低質量WIMP探索を切り拓く

▶ 現状**400 μm** ピッチの読み出し (+ストリップ検出器) により律速

→ かつピクセル読み出しによるゴーストトラックで削減

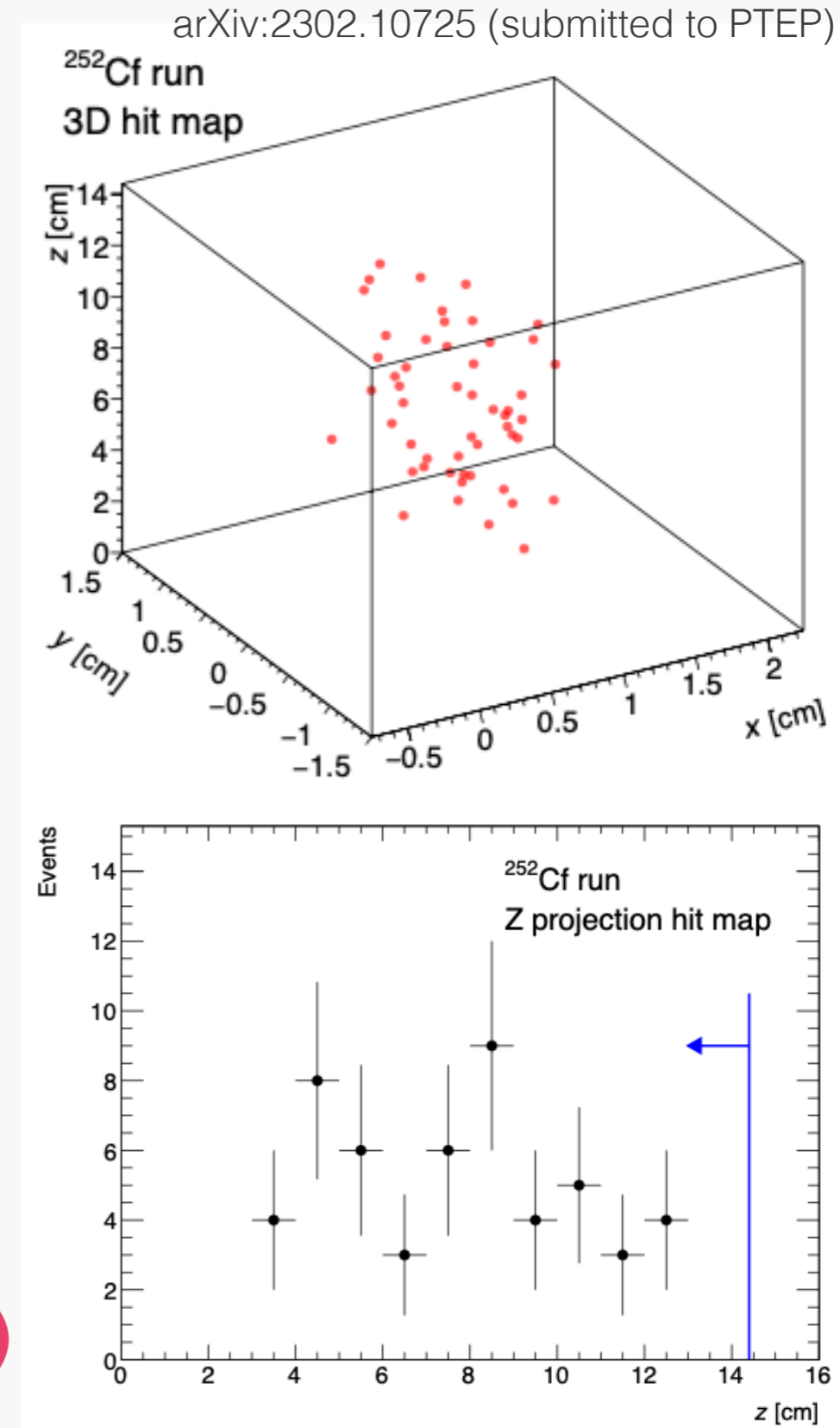


100 μm ピッチ読み出しが
実現した場合



陰イオンガスTPCのピクセル読み出し

- 陰イオンガスTPC自体は原理実証済み
 - ➔ μ -PIC (400 μm ピッチの2Dストリップ) 読み出し
- 100 μm ピッチのピクセル読み出しを目指す
 - ➔ 専用のエレクトロニクスが必要
 - ▶ 波形取得？遅い信号？バンプボンディング？
 - ▶ を微細ピッチで読み出さないといけない
- **まず読み出しASICを開発 (with KEK/Open-It)**



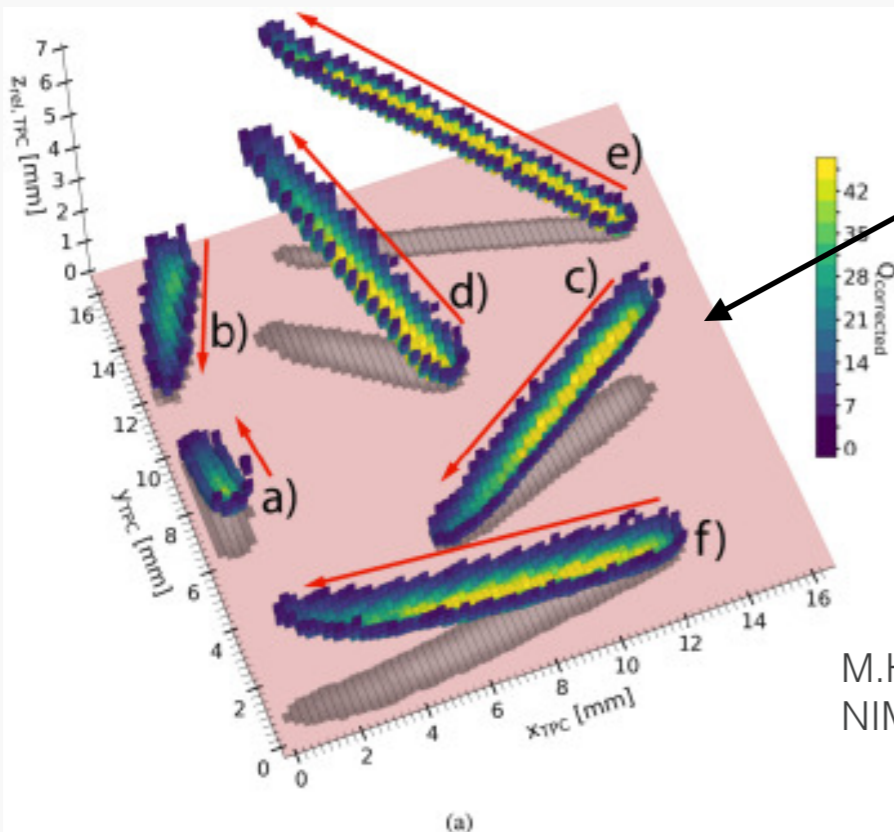
QPIX-NEO

ピクセル読み出し型ガス検出器情勢

- 世の中に存在しないわけではない

→ TPCとして機能する、かつ**マルチヒット対応**のASICは存在しないため**要自作**

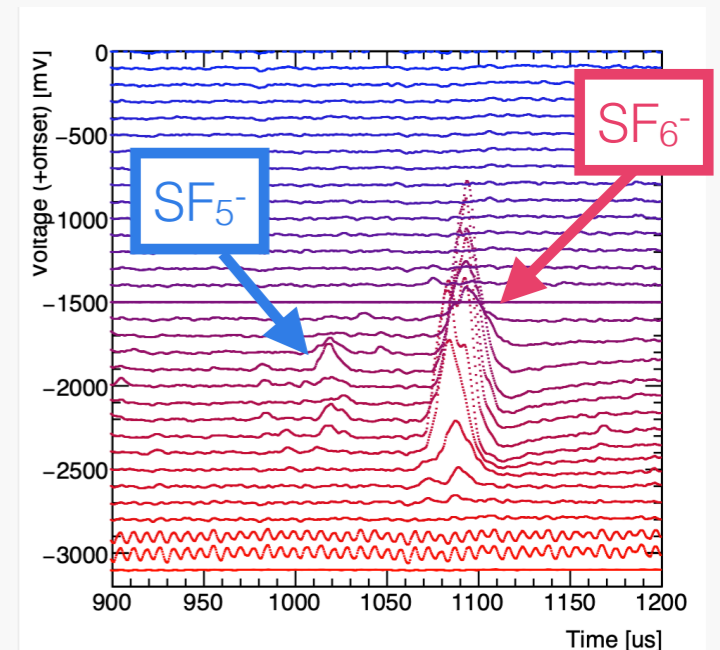
e.g.) ASIC	TimePix	FE-I4	LArPix	QPIX
Application	Gas TPC	Silicon (ATLAS) Gas TPC (SuperKEKB)	LAr TPC	Gas TPC
Digitization	Charge integral ADC Time over Threshold	Time over Threshold	Charge integral ADC	Charge integral ADC Time over Threshold
Pixel size	55 × 55 μm ²	50 × 250 μm ²	4 × 4 mm ² (Pad)	200 × 200 μm ² (ASIC) 400 × 400 μm ² (Pad)



TPC @KEK (w/ FI-I4)
中性子モニター用

きれいに再構成
できている

が...



マルチヒット非対応

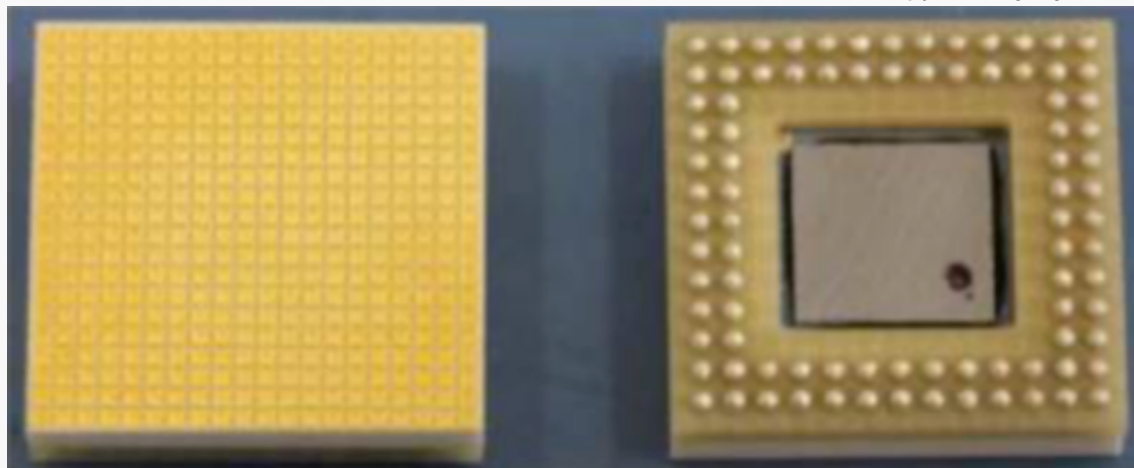
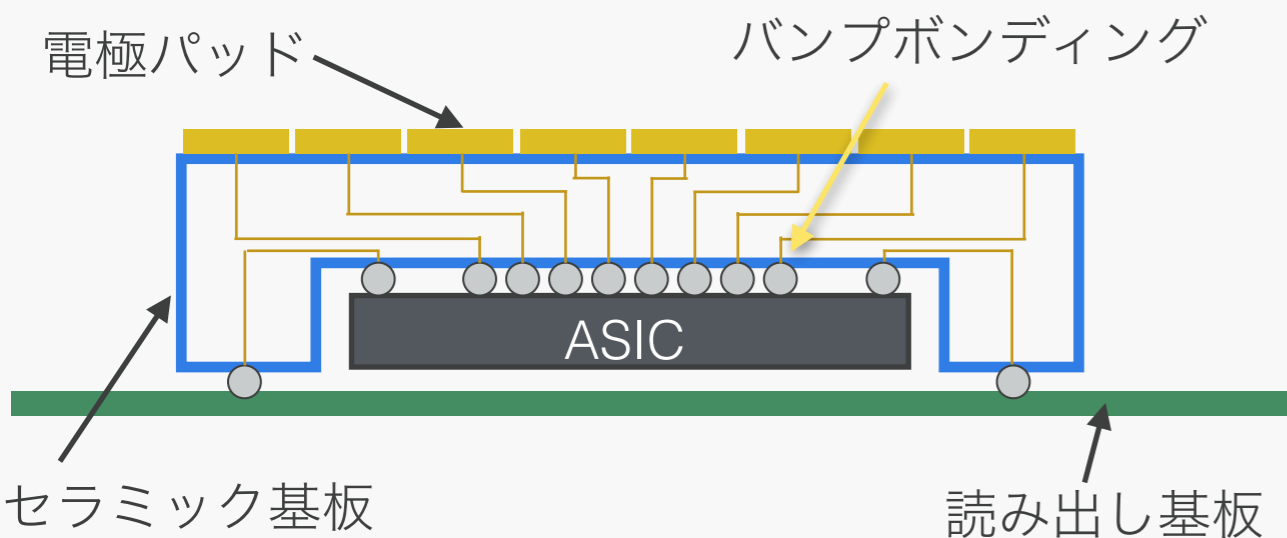
→ **新しいASICを作ろう**

M.Hedges, S.Vahsen, et. al.
NIM A, Volume 1026, 1 March 2022, 166066

ピクセル状パッド

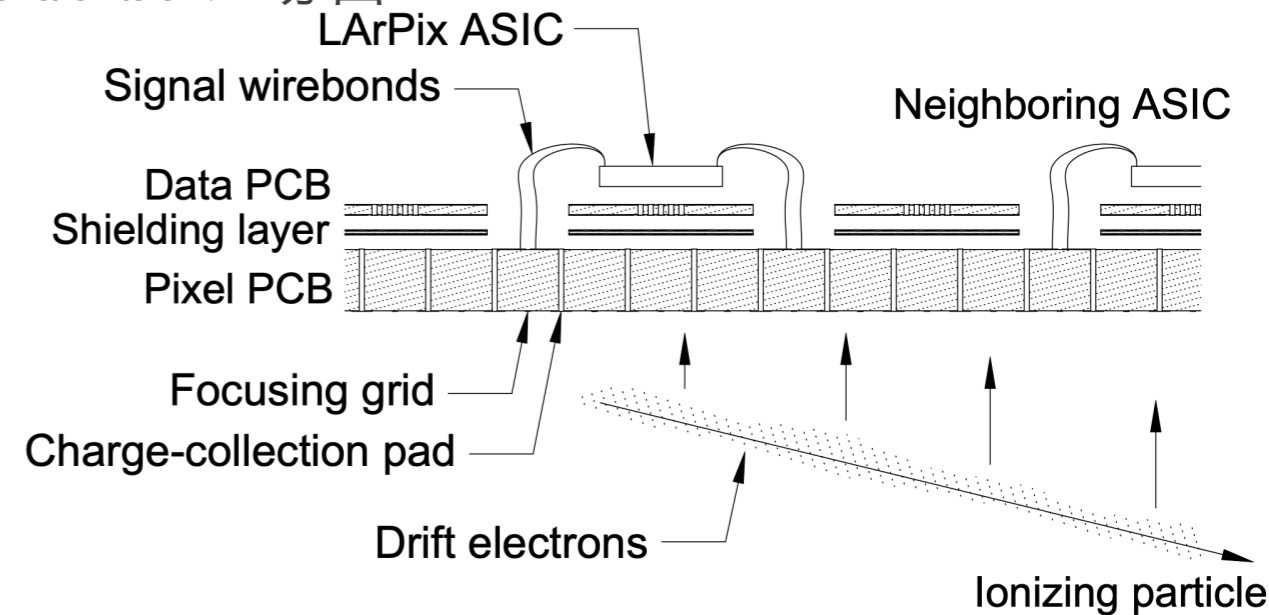
- バンプボンディングによる省スペース化が流行
 - ➔ 電極で引き伸ばす方針とすると、**100 μm ピッチの電極に対してより小さなASICパッド**
 - ➔ ゴールは~50 μm ピッチのパッドを持ったASIC

QPIXの場合



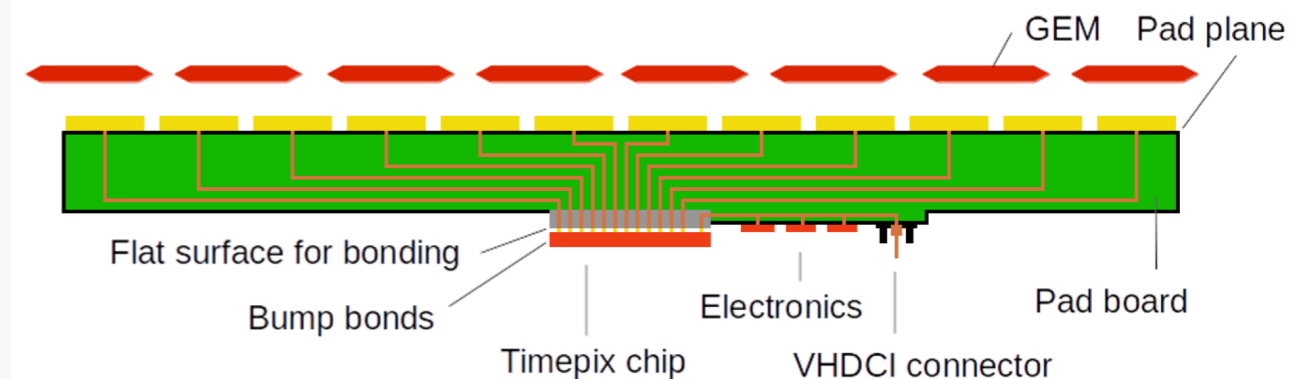
arXiv:1109.3099 (2011)

LArPixの場合



2018 JINST 13 P10007

TimePixの場合



arXiv:1801.07178 (2018)

QPIX-NEO

- KEKで開発したQPIXの息を吹き返す → **QPIX-NEO**

- 仕様を参考にする一方、設計はスクラッチから

- 仕様として重要なのは...

- マルチヒットが検出できること

- アナログ応答が遅い (積分時間が長い)

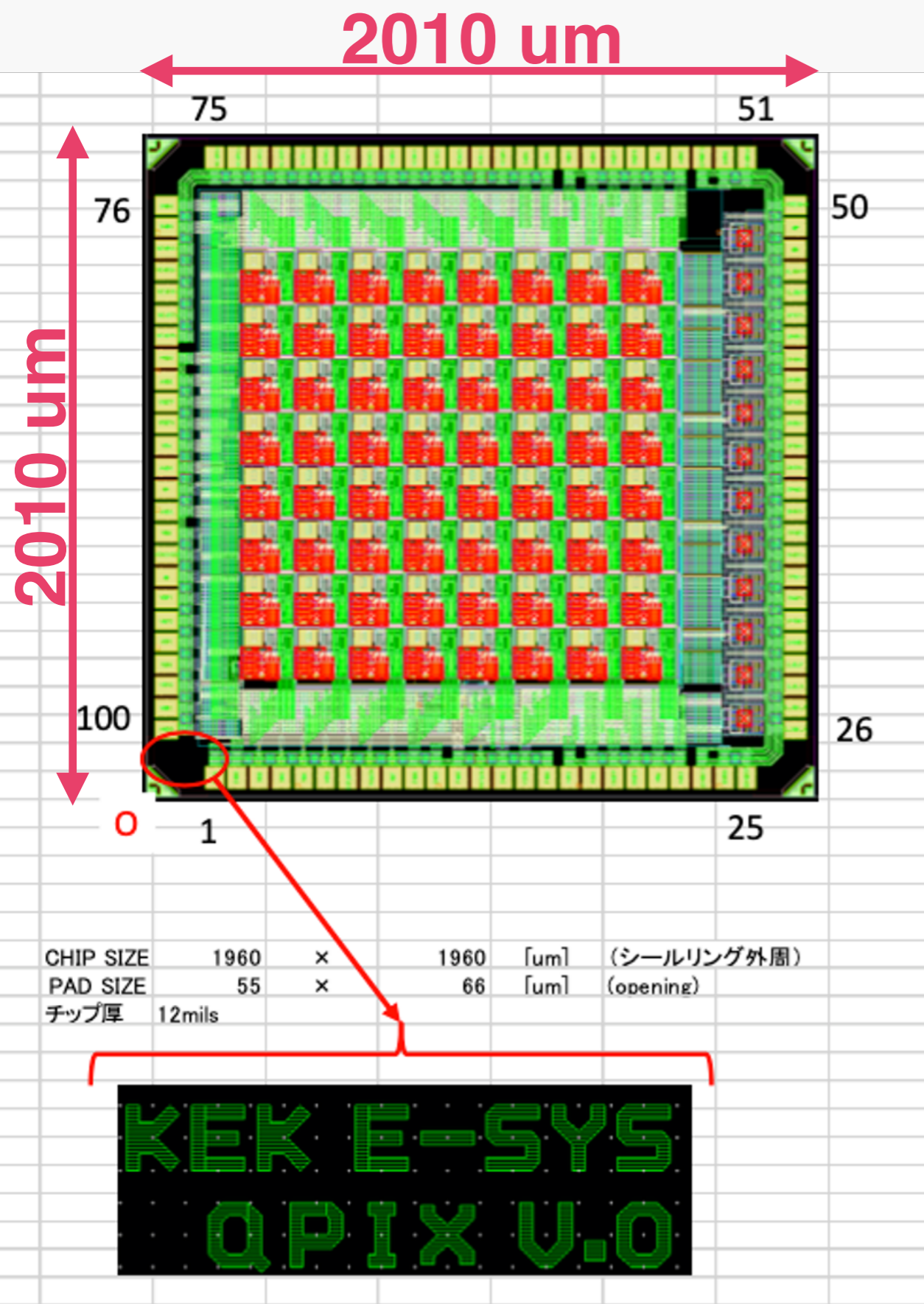
- 広いダイナミックレンジ

- 省電力

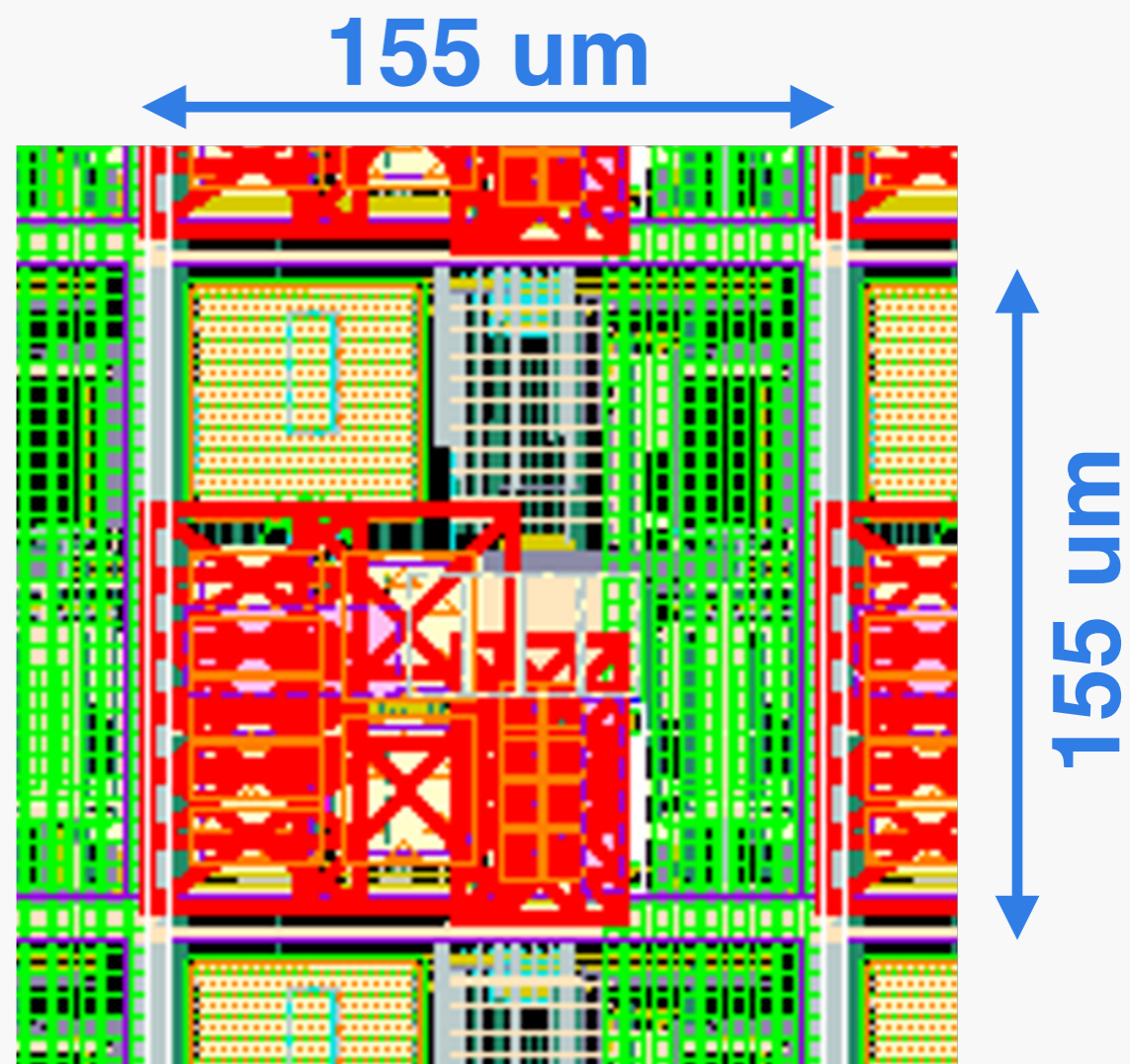
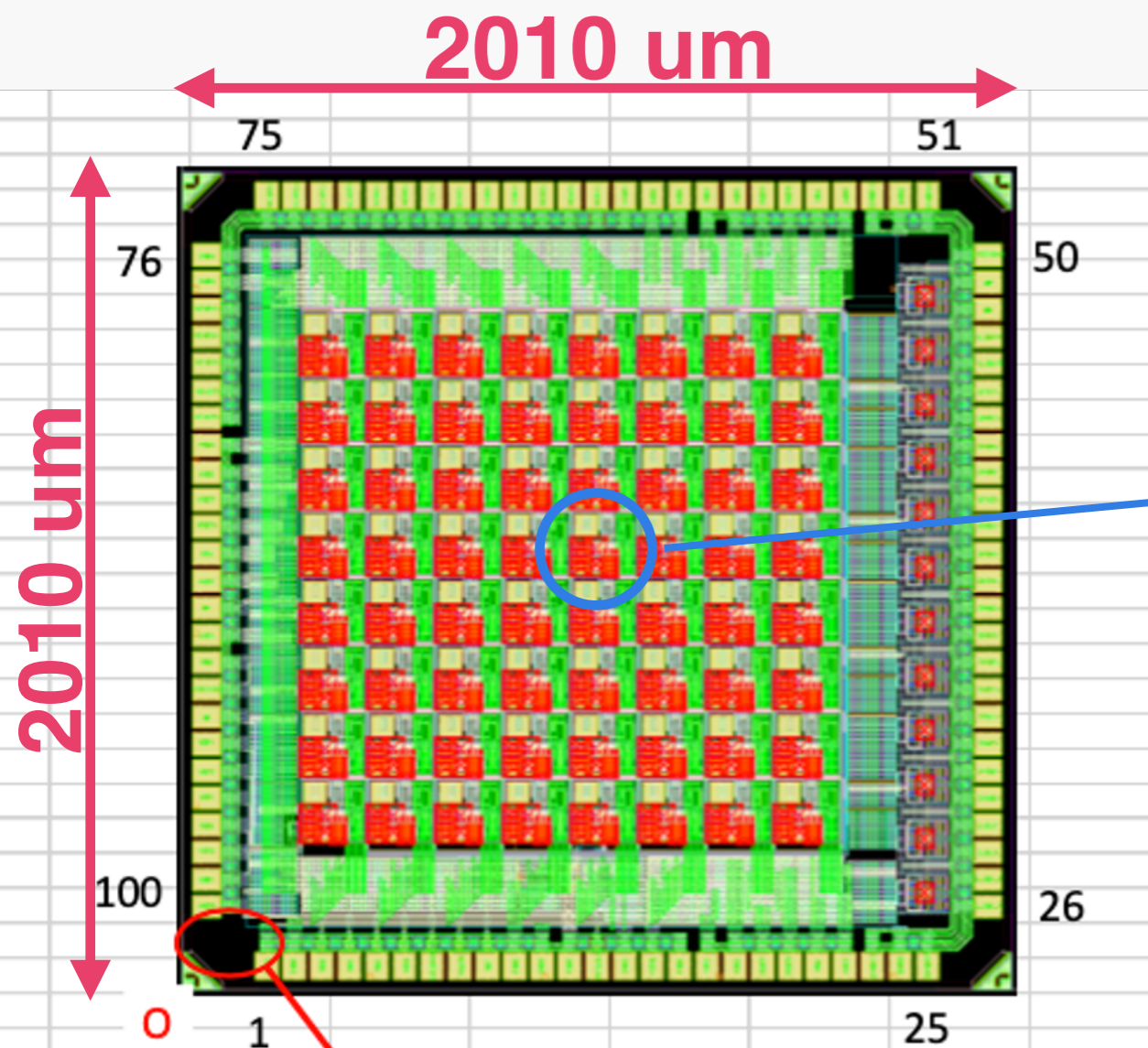
- などなど...

**陰イオンガス-specificでも
だいぶチャレンジング**

レイアウト



レイアウト



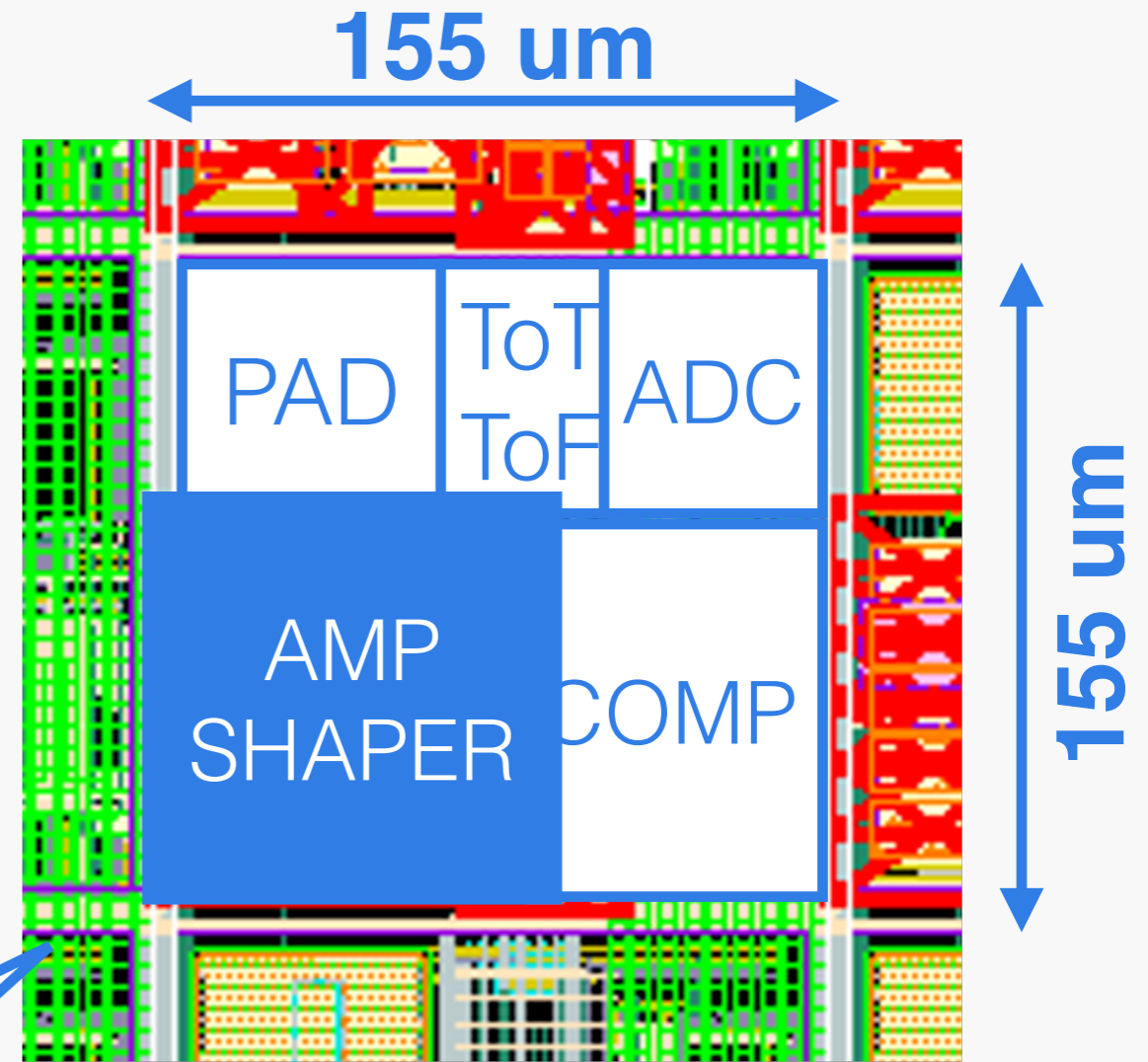
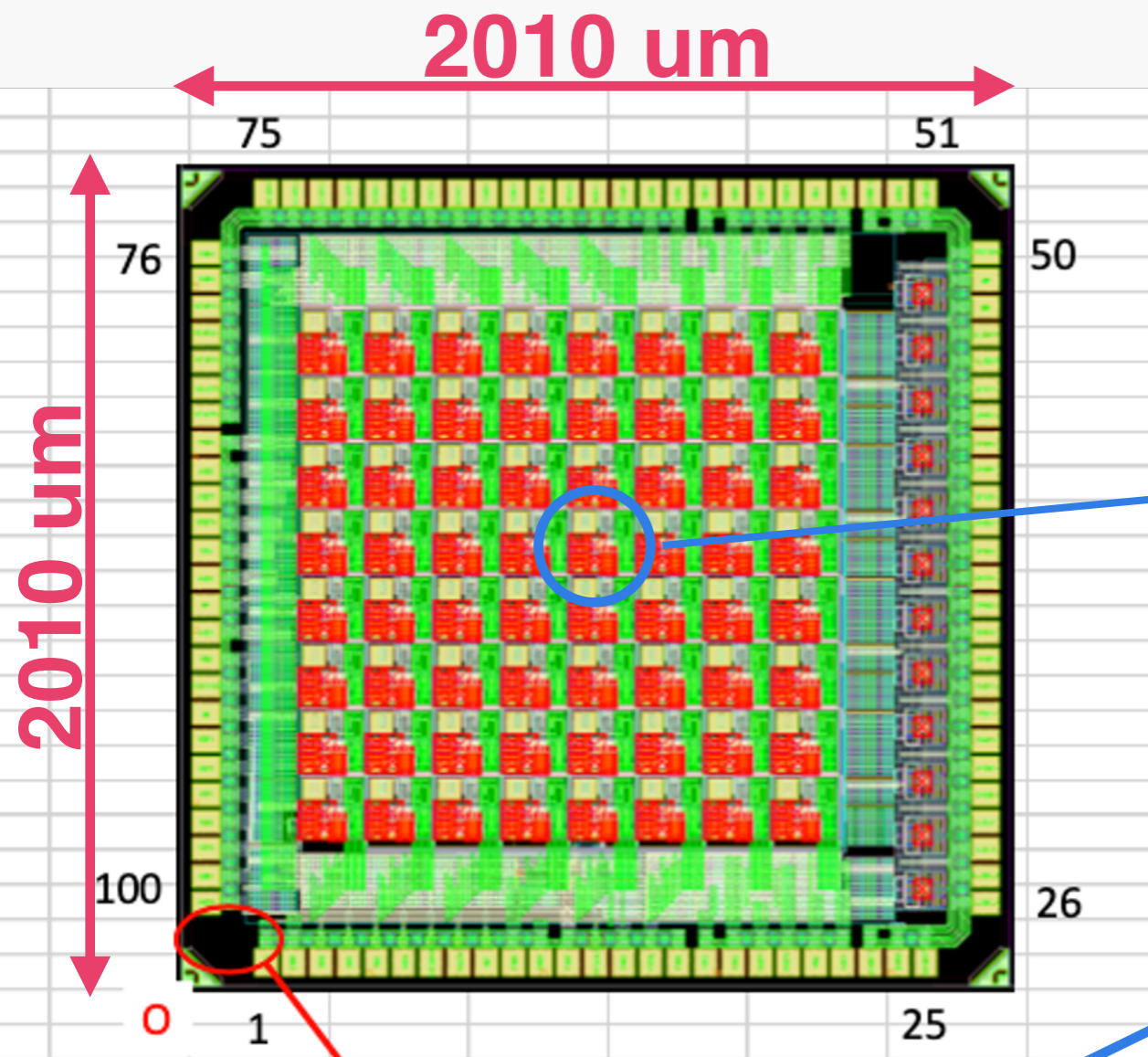
100 um角をいきなり超えてしまった読み出しパッドつけるともっと大きくなってしまふ...

が、**まずこれで原理検証を！**

CHIP SIZE	1960	x	1960	[um]	(シールリング外周)
PAD SIZE	55	x	66	[um]	(opening)
チップ厚	12mils				

KEK E-SYS
QPIX V.O

レイアウト



アナログ回路が大面積
(コンデンサーを
小さくできない)

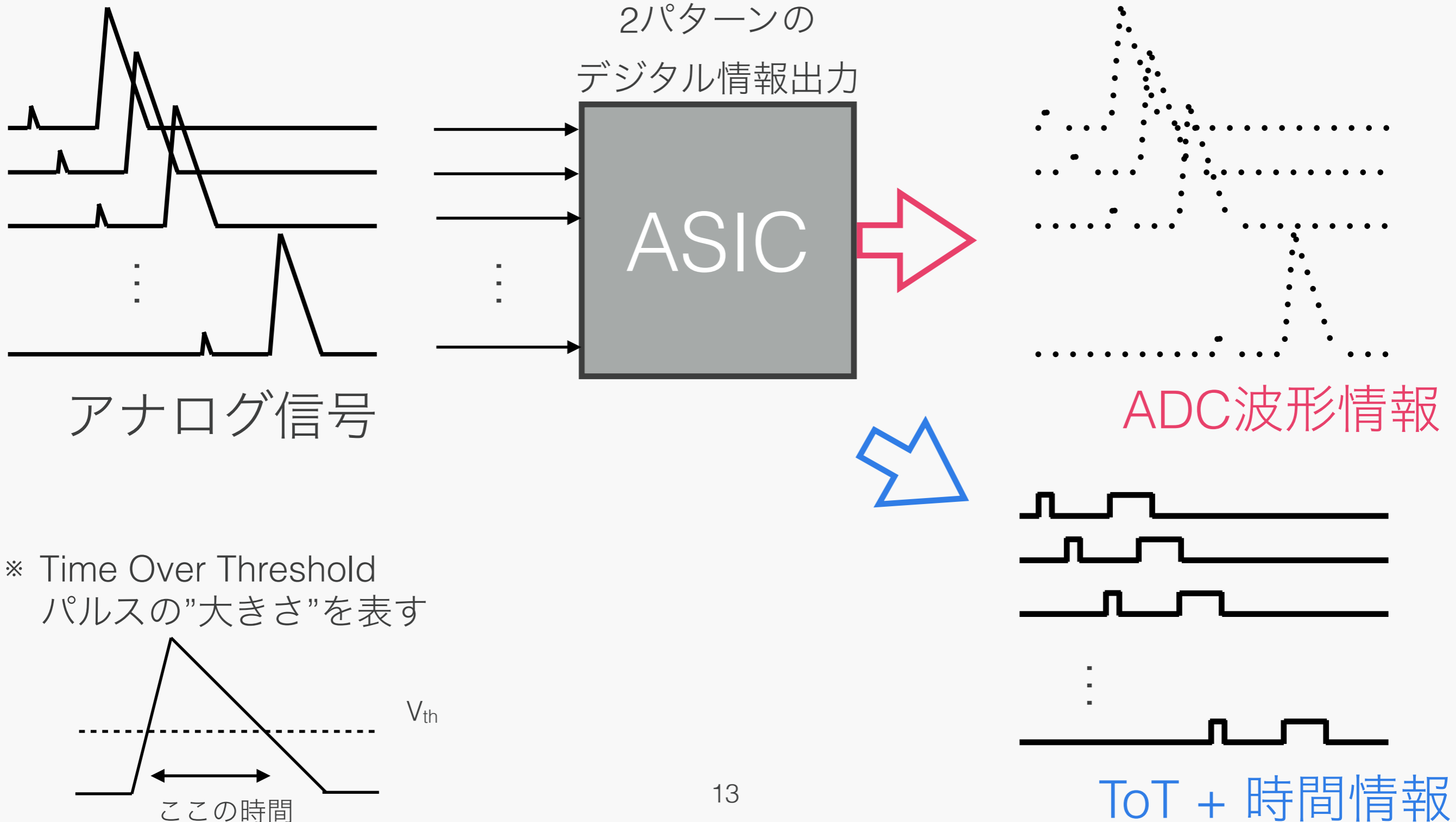
100 um角をいきなり超えてしまった
読み出しパッドつけると
もっと大きくなってしま...

が、**まずこれで原理検証を！**

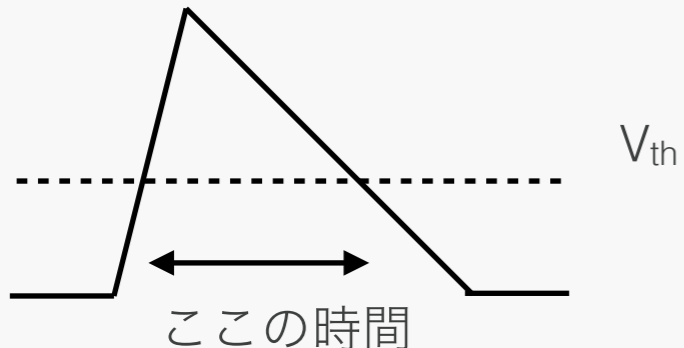
CHIP SIZE
PAD SIZE
チップ厚 12

ASICの仕様

- まずはプロトタイプを作るのでやや冗長に情報取得

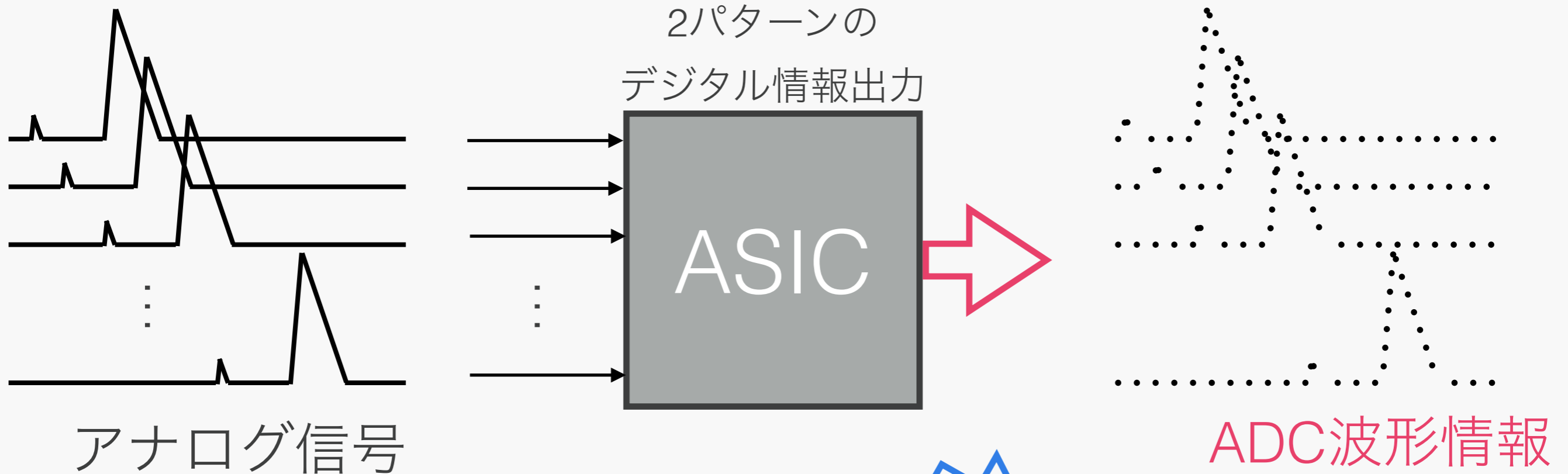


※ Time Over Threshold
パルスの"大きさ"を表す



ASICの仕様

- まずはプロトタイプを作るのでやや冗長に情報取得



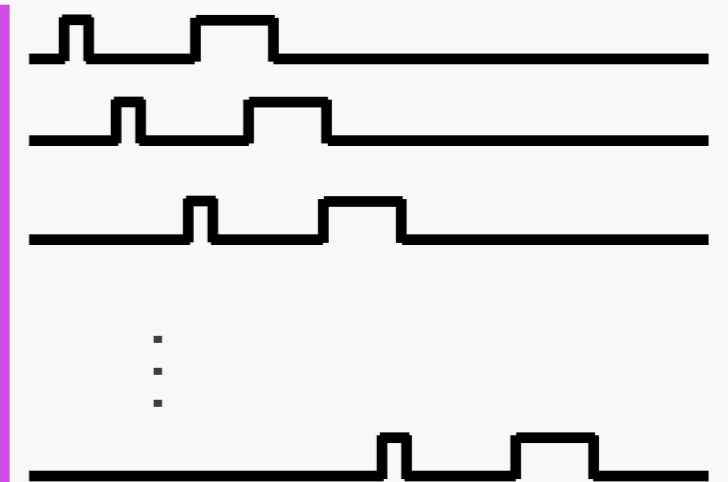
キーワード：マルチヒット対応

ADC波形取得→(メモリの許す限り) 何ヒットでも可

ToT+時間情報→ 最大4ヒットまで取得

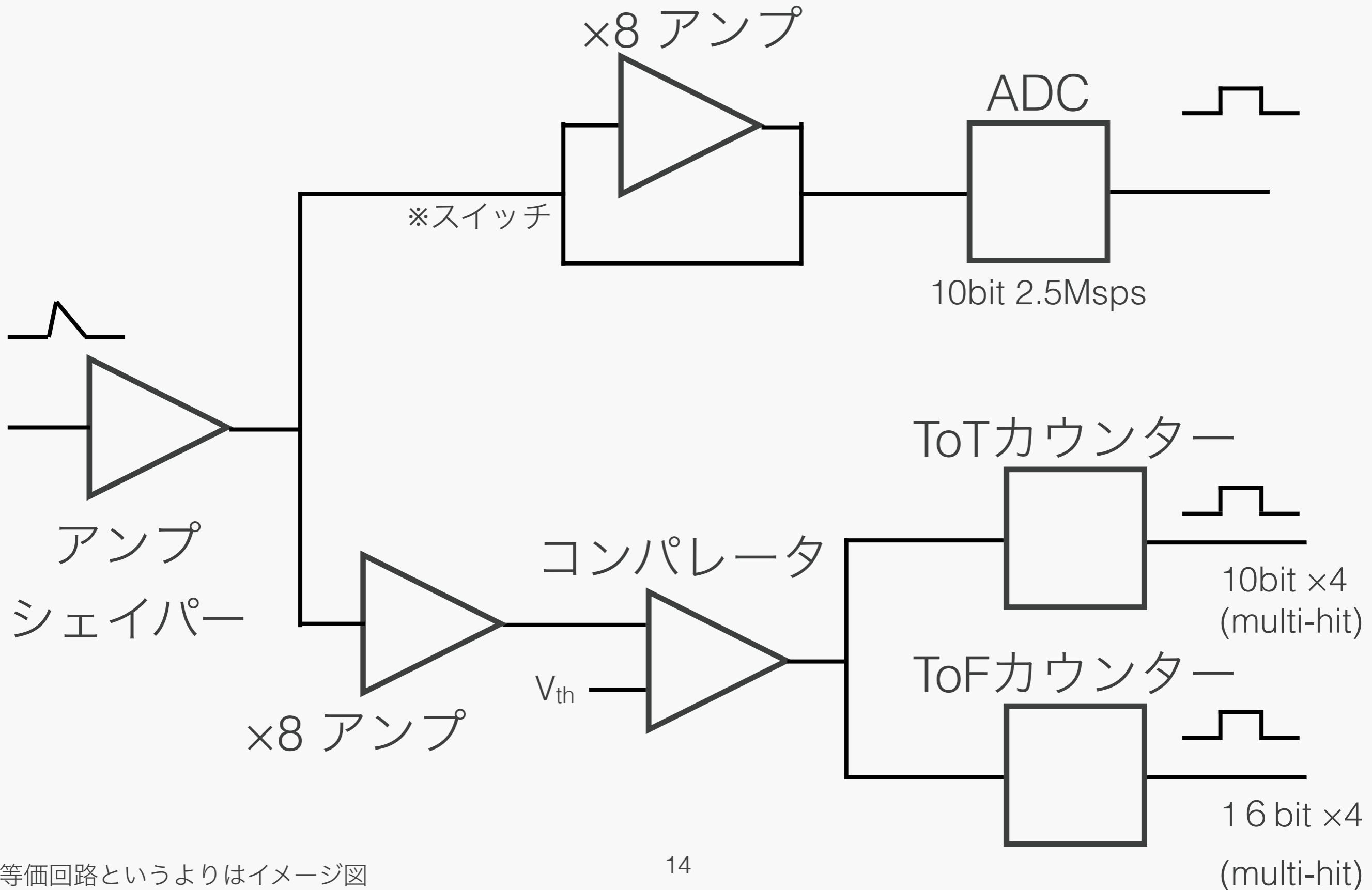
他の実験でも使えないか、アイデア募集中

この時間



ToT + 時間情報

c.f. 1ピクセルごとの回路

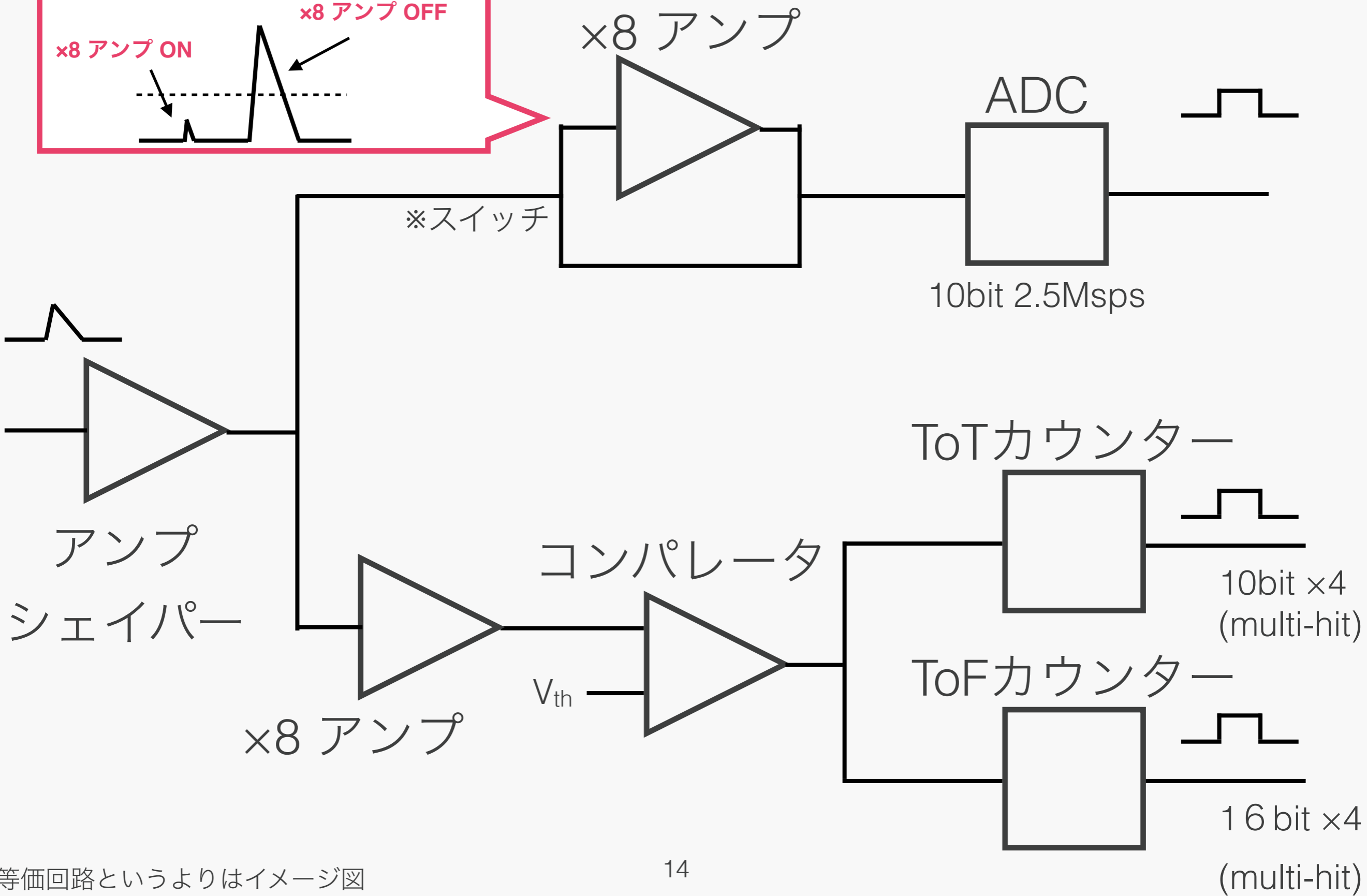
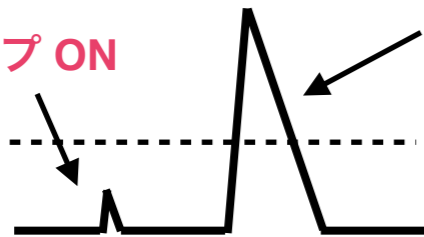


※等価回路というよりはイメージ図

1レピクセルごとの回路

高ダイナミックレンジ実現

x8 アンプ ON
x8 アンプ OFF

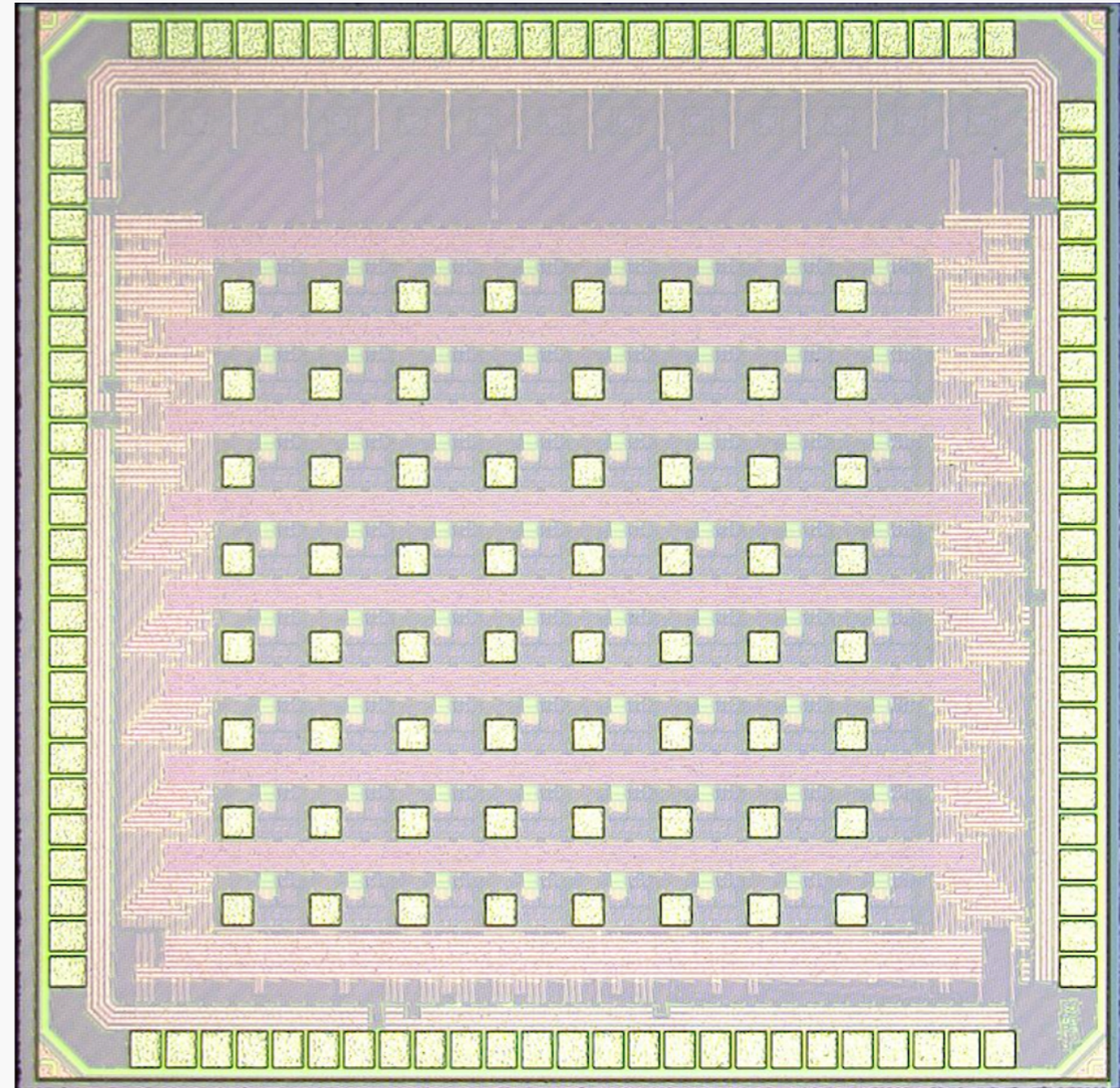


※等価回路というよりはイメージ図

QPIX-NEO仕様まとめ

- 155 μm \times 155 μm サイズ ピクセル
 - うちパッドサイズは55 μm \times 55 μm
- ピクセル数: $8 \times 8 = 64$ ch
- アンプ-シェイパー ピーキングタイム: 3-4 μs
- ダイナミックレンジ: 400 fC
- ENC: ~ 600 e
- 全チャンネルでADC 2.5Msps連続読み出し
- 全チャンネルでToF 16bit, ToT 10bit, 4ヒットぶんストア (10 MHz)
- ピクセル単位ではADC含めて100 μW 以下

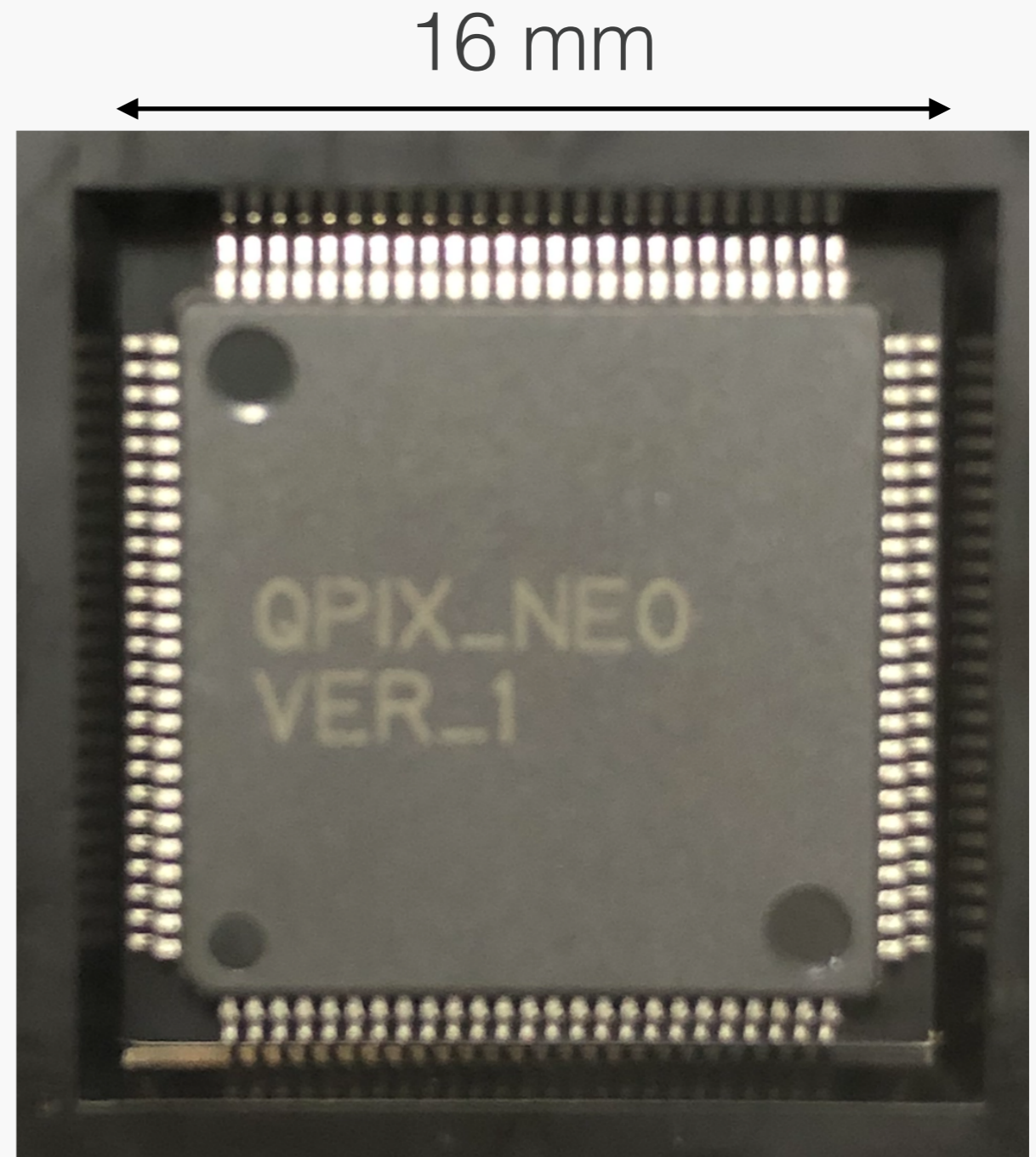
チップ納品



実際の顕微鏡写真

パッケージジニング

- まずエレキ検証に向けてパッケージジニング実施

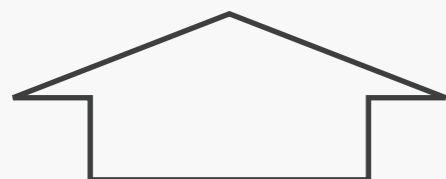


ASIC搭載基板 (MIQAN)

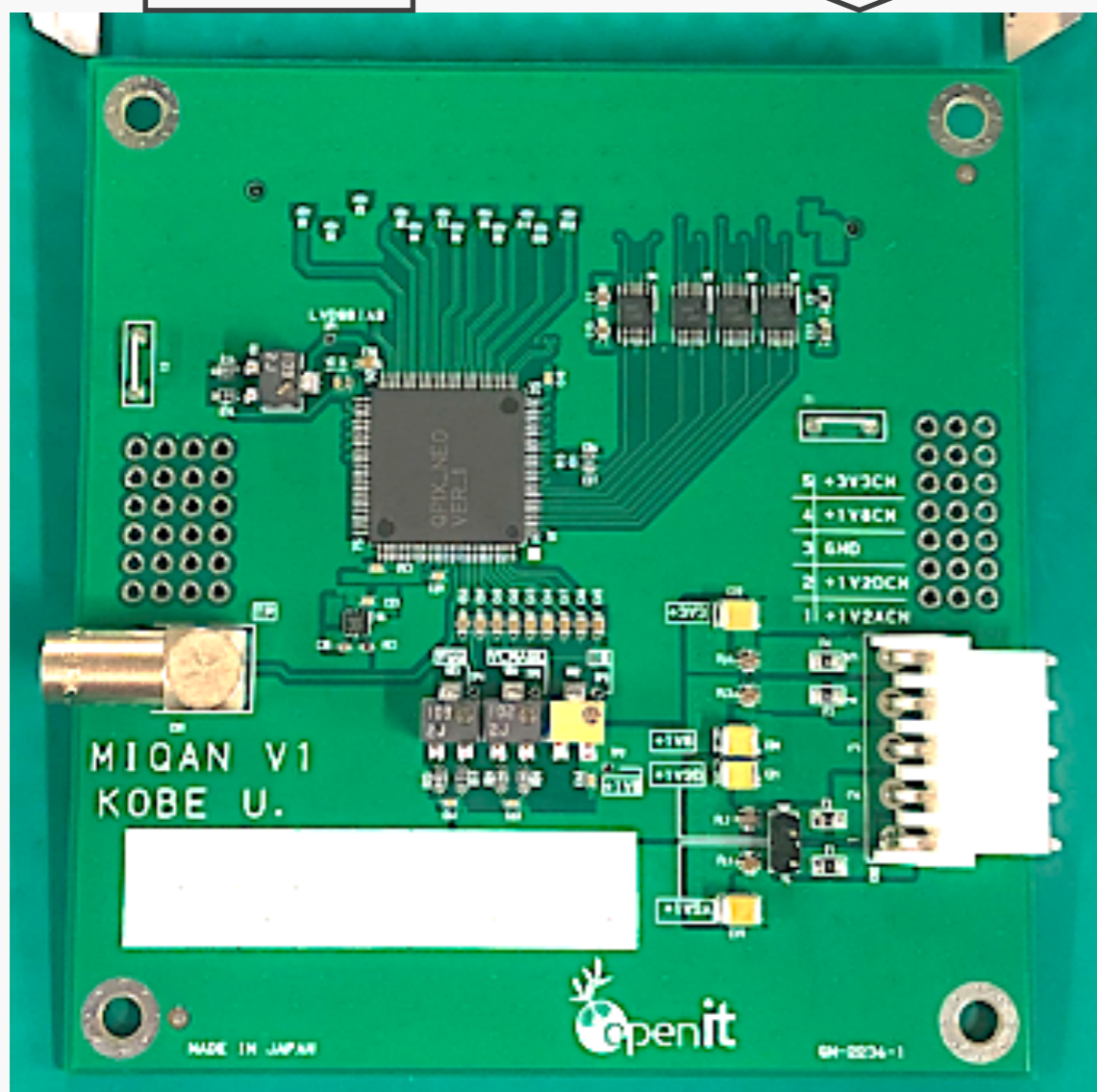
- **M**ulti-hit readout board using **Q**PIX NEO for **dA**rk matter experime**N**t

12 pair LVDS
(ADC, ToT, ...)

8 single-ended
(slow control)



↓ Test pulse



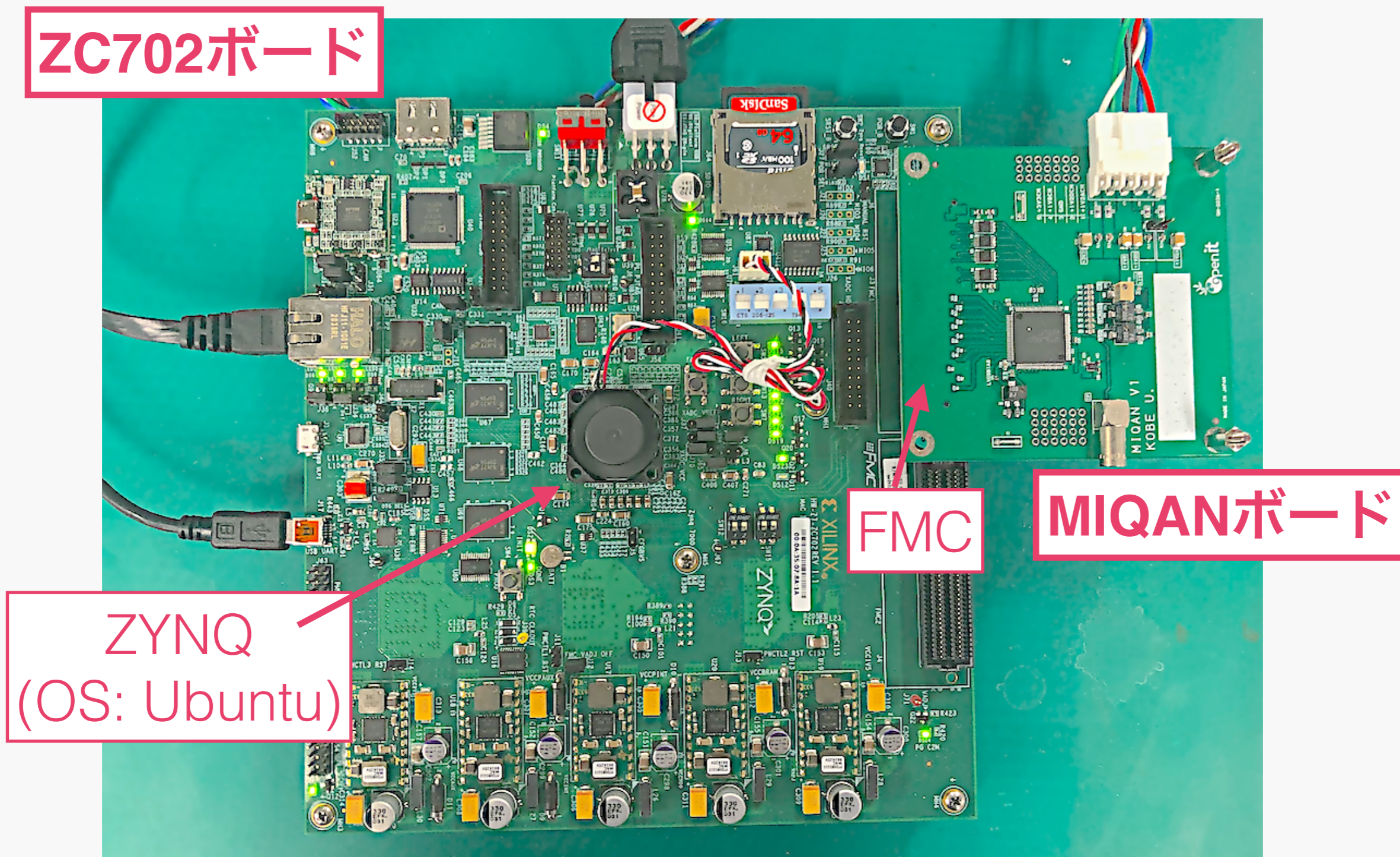
エレキテスト用のver.1開発

通電テストOK!

(やや消費電力高め→確認中)

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中



結論

- 陰イオンガスを用いたTPCのピクセル読み出し
 - ➔ 例としてガスTPCでのDM探索で効果発揮
 - ➔ 感度向上に向け、より微細&ピクセル読み出しへ
- 専用ASIC: QPIX-NEO開発、モノができて**本格的に始動**した
 - ➔ 搭載基板: MIQANも開発、DAQシステム構築へ
- **「DM探索専用」にはしたくない**
 - ➔ 他実験への応用も考えたい。アイデアある方教えてください！
 - ▶ 仕様を膨らませてver.2開発時に組み込めるかも？