



SOIPIX
Silicon-On-Insulator Pixel Detector Project

X線天文衛星搭載へ向けた イベント駆動型SOIピクセル検出器の開発

核融合・加速器科学分野合同計測技術ワークショップ @ 核融合研

2016年10月28日

武田 彩希

京都大学 理学研究科 物理学第二教室

atakeda @cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

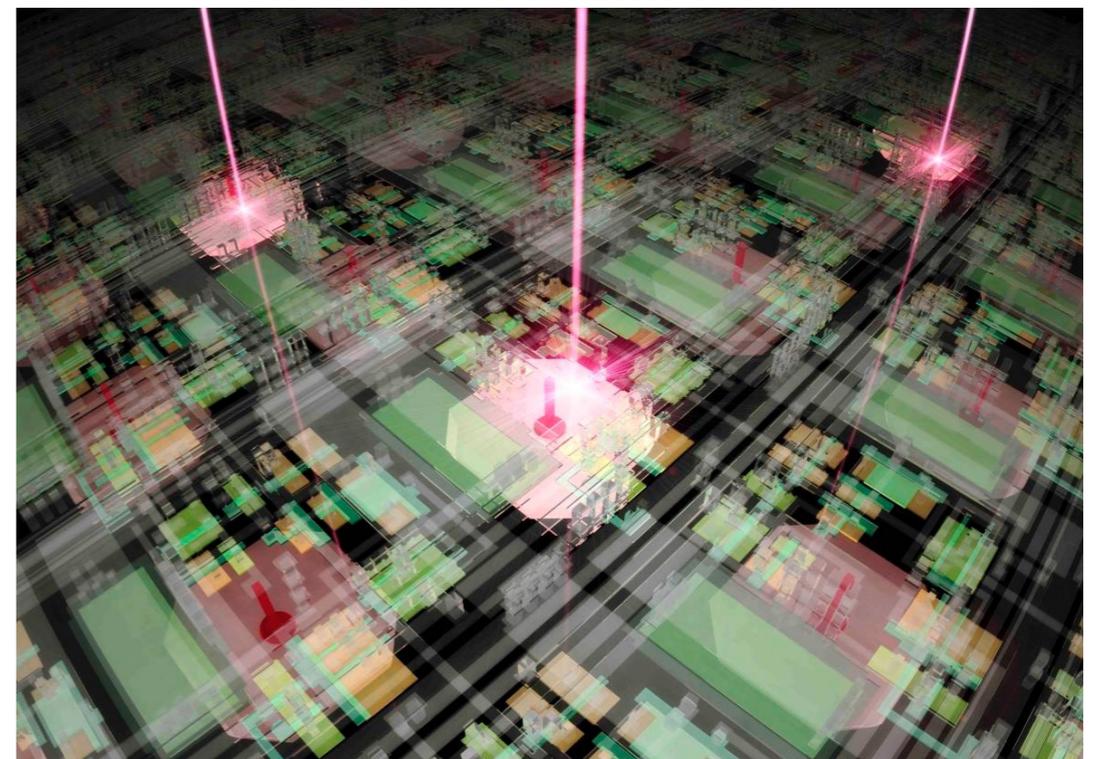
SOIPIXグループ : <http://rd.kek.jp/project/soi/>

京都大学 宇宙線研究室 : <http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp>

OUTLINE

- 宇宙X線観測における次世代への要求
- イベント駆動型SOIピクセル検出器
 - > XRPIXシリーズ
- これまでの研究開発について
- まとめ

宇宙X線観測における次世代への要求



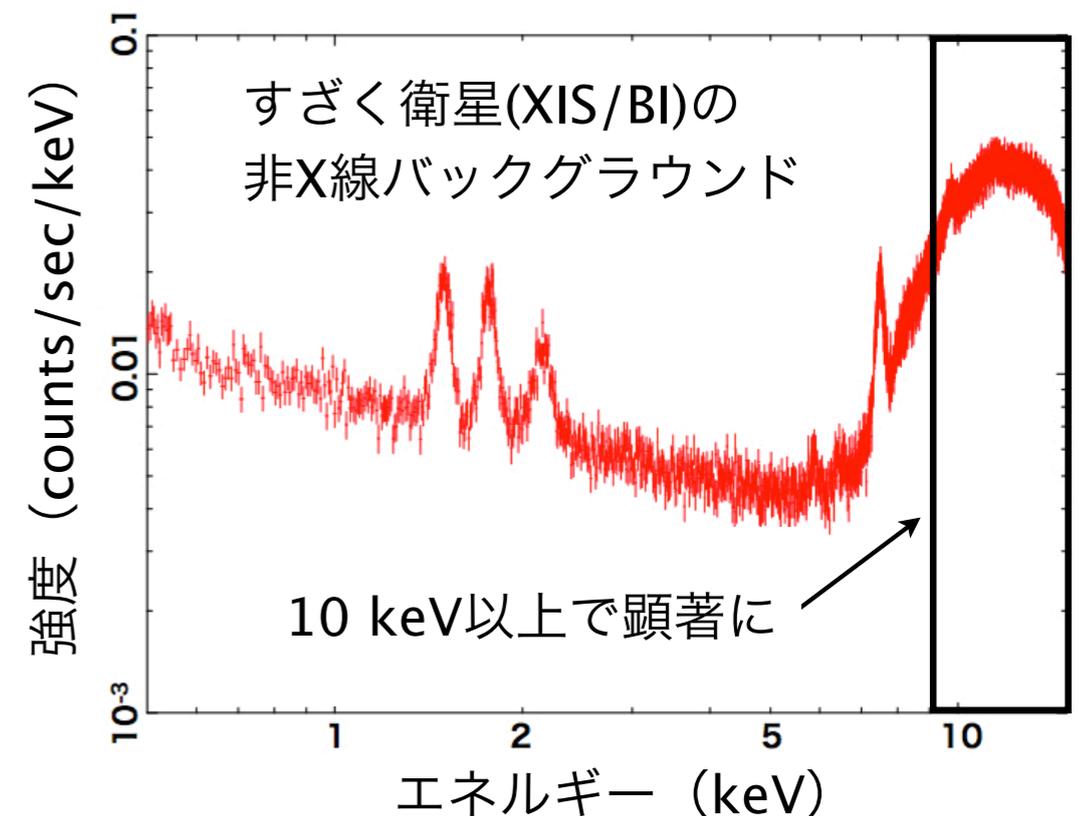
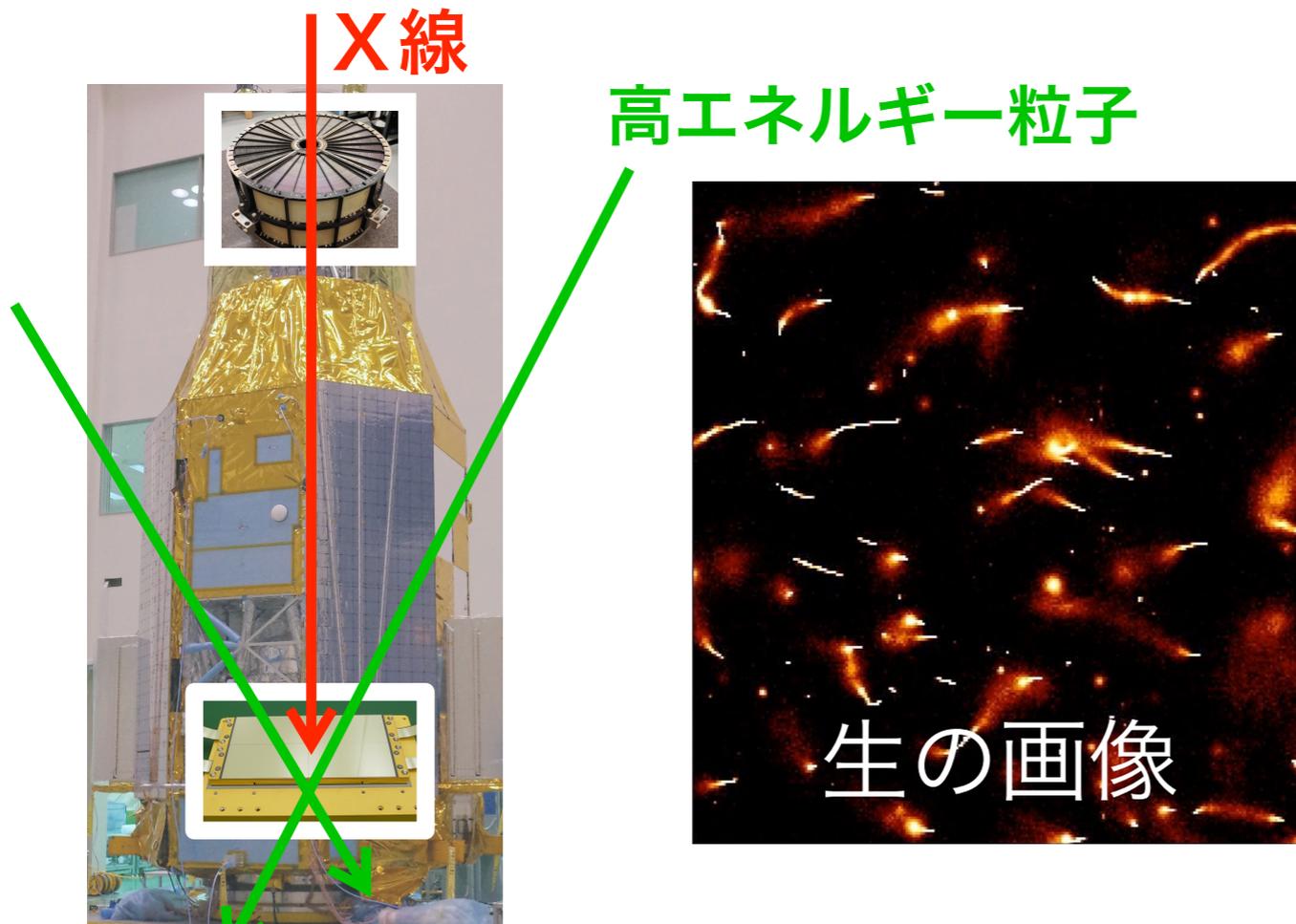
X線天文衛星 | 現在の主力検出器と問題点

◆ 現在の主力検出器 | X線CCD

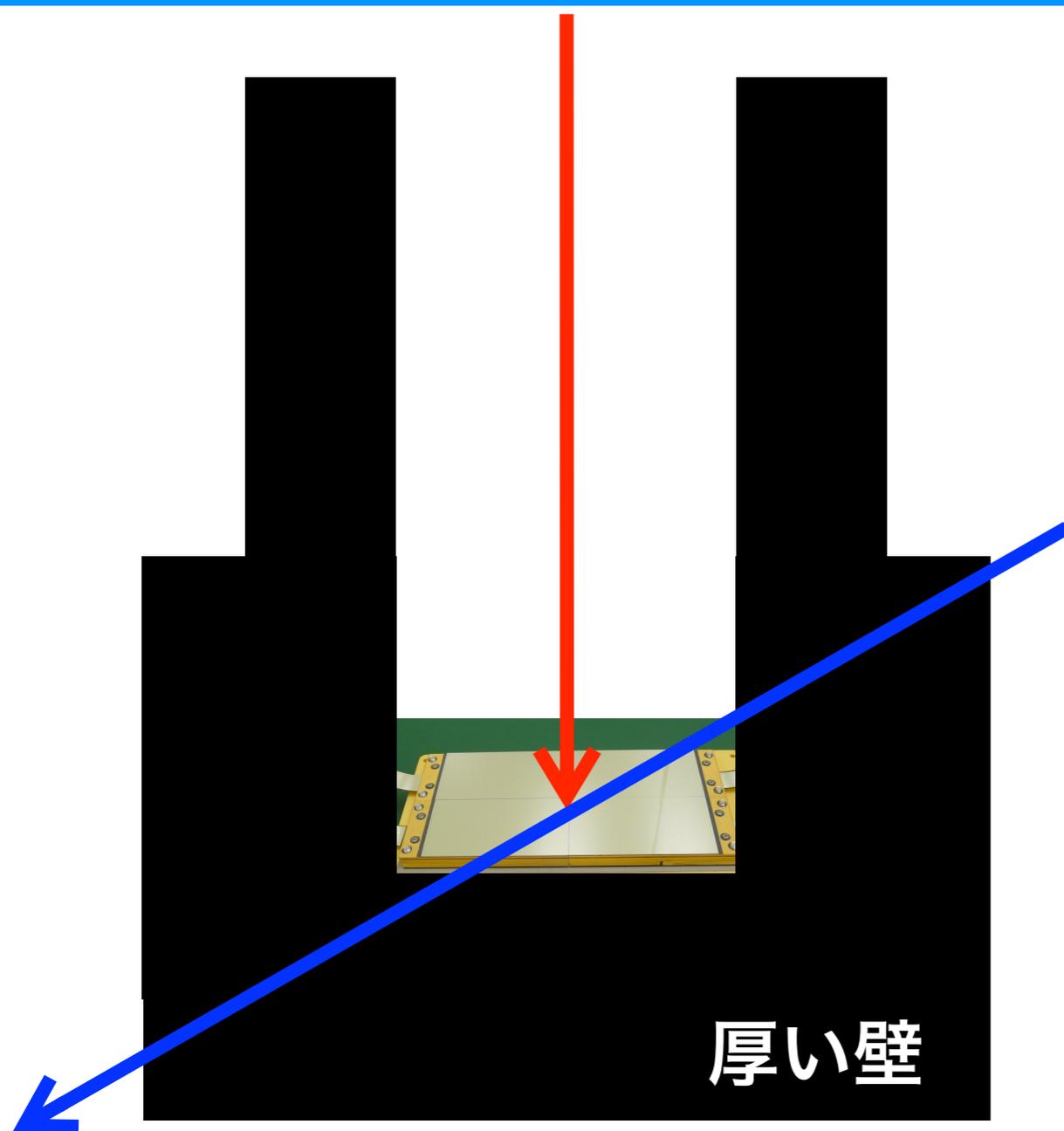
広視野 (~20–30 mm角) ・ 精密撮像 (~30 μm 角)
ファノ限界の分光性能 (読み出しノイズ: ~3 e^- rms)

◆ X線CCDの問題点

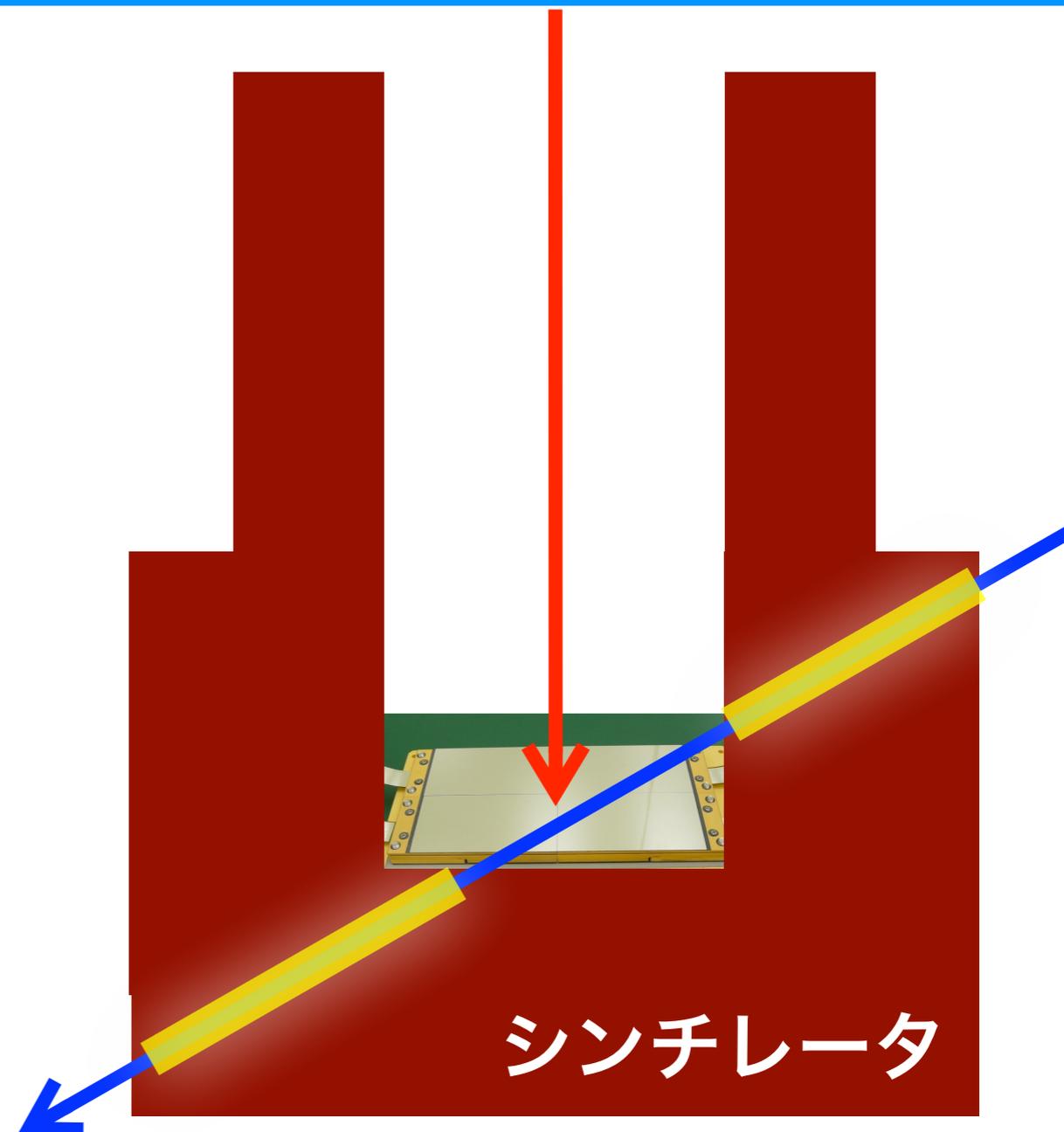
読み出し速度が遅い (~sec) -> 高速現象が観測できない
非X線バックグラウンドが高い -> 暗い(= 遠方の)天体が観測できない



非X線バックグラウンドの除去



ほとんど役に立たない



同時に検出 -> 宇宙線

シンチレータ：1kHz頻度で光る

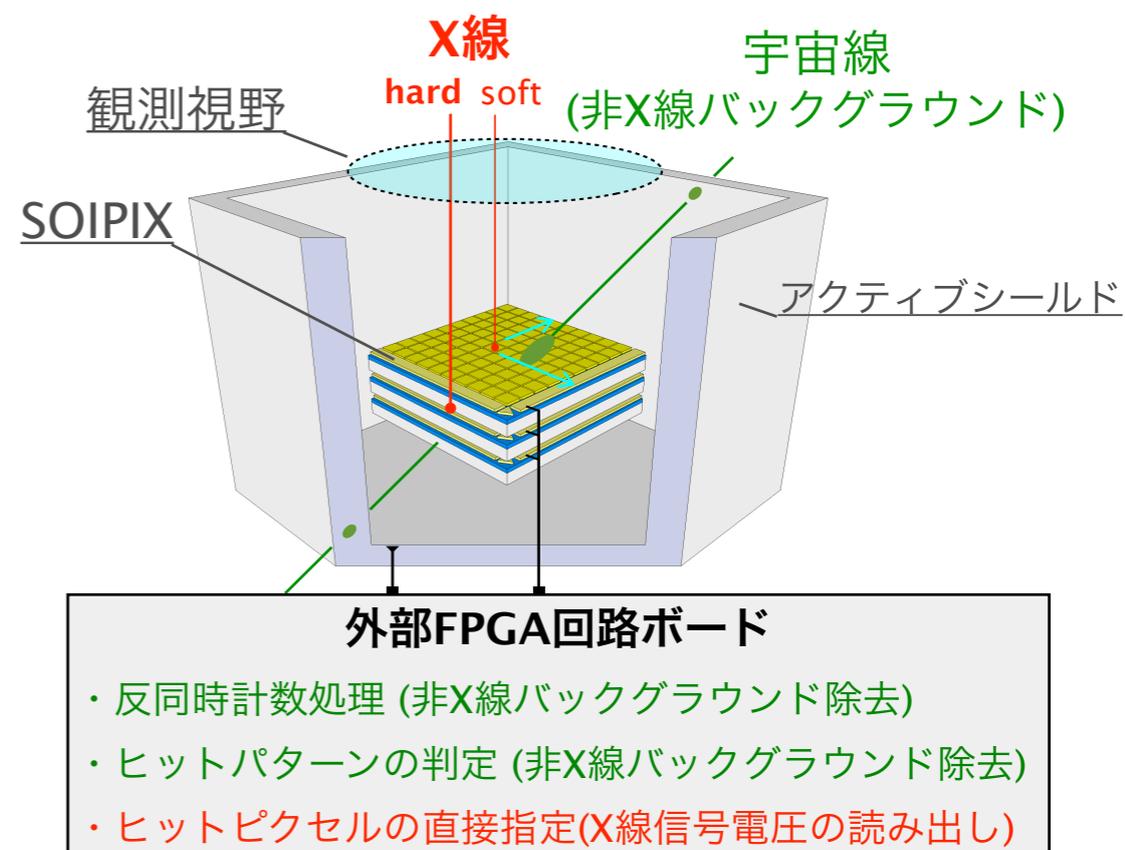
-> センサの時間精度は1kHz以上が要求される

次世代のX線天文衛星を目指して

次世代の検出器として…

高時間分解能・低バックグラウンドな
X線イメージャーが熱望される。

- > 読み出しノイズ： $< 10 \text{ e- (rms)}$
- > 時間分解能： $< 10 \mu\text{s}$
- > 位置分解能： $< 100 \mu\text{m}$



◆ イベント駆動型SOIPIX (XRPIXシリーズ)

各ピクセルに比較器回路を導入し， イベント検出時の
トリガ情報出力機能 (タイミング・ヒット位置) を実装する。

- > X線イベントの信号のみを選択的に読み出すことが可能

μs の時間分解能 反同時計数処理でバックグラウンドを2桁落とす
高速の天体現象も観測が可能となる

次世代X線天文衛星

◆ 次世代X線天文衛星の主力検出器を狙う

XRPIXを主力検出器とした衛星計画を提案中。(2014~)

FORCE Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution

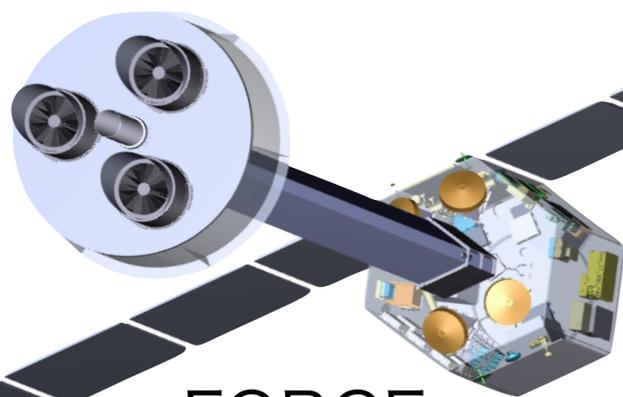
科学目的

宇宙のあらゆる階層において未だ見つかっていない

「ミッシングブラックホール」を探索し、宇宙形成史を解明する。

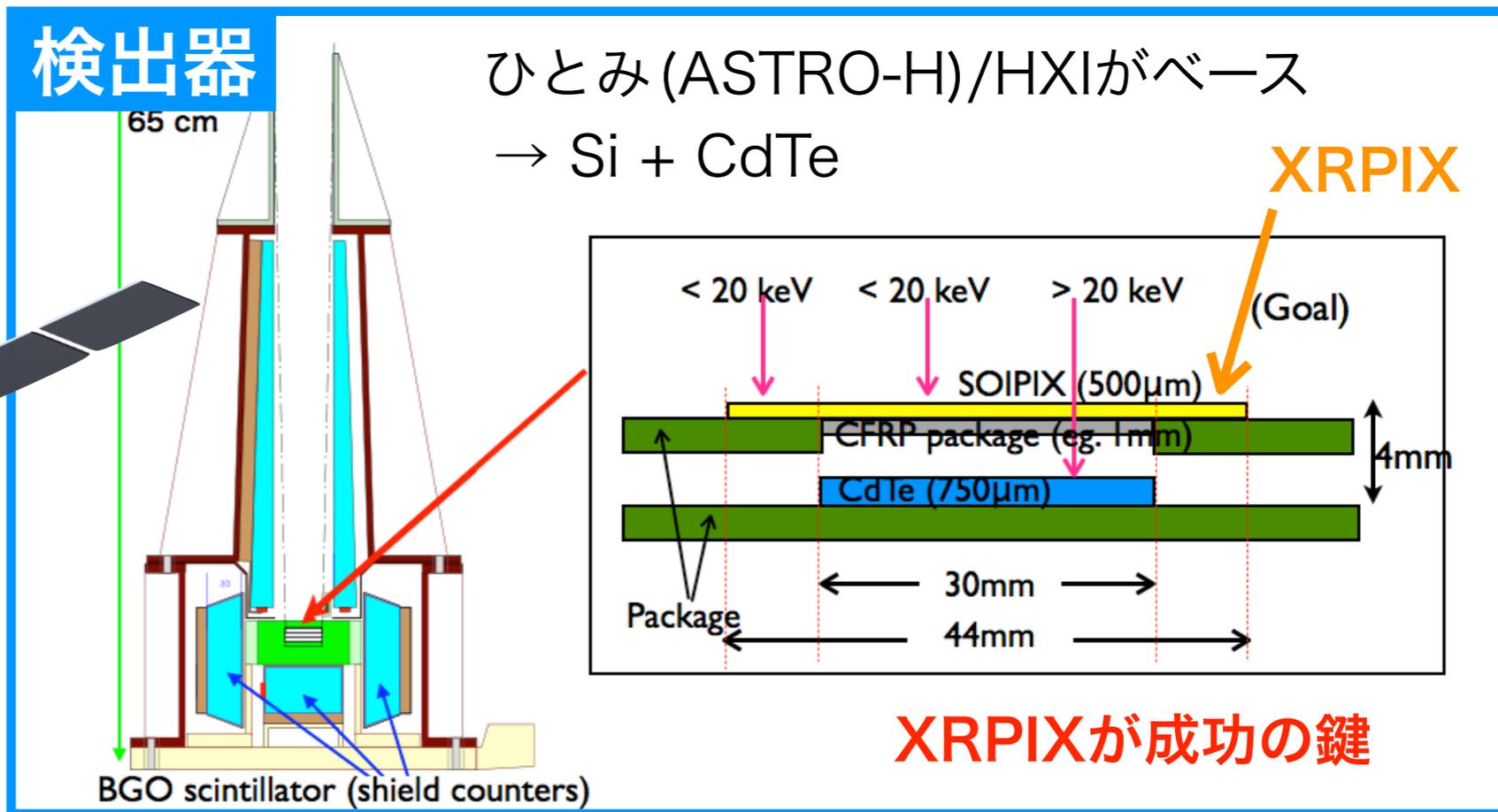
特長

- ◆ 角度分解能 < 15秒角
- ◆ 1-80 keVの広帯域観測



FORCE
(2020年代)

検出器



SOIピクセル検出器

- Silicon-on-Insulator (SOI)技術による読み出し回路部・センサ部一体型半導体ピクセル放射線検出器
- KEK測定器開発室 SOIPIXグループが中心に研究開発
- LAPIS セミコンダクタ 0.2 μm FD-SOIピクセルプロセス
 - > SOIピクセル検出器をプロセスするために開発しているプロセス手法

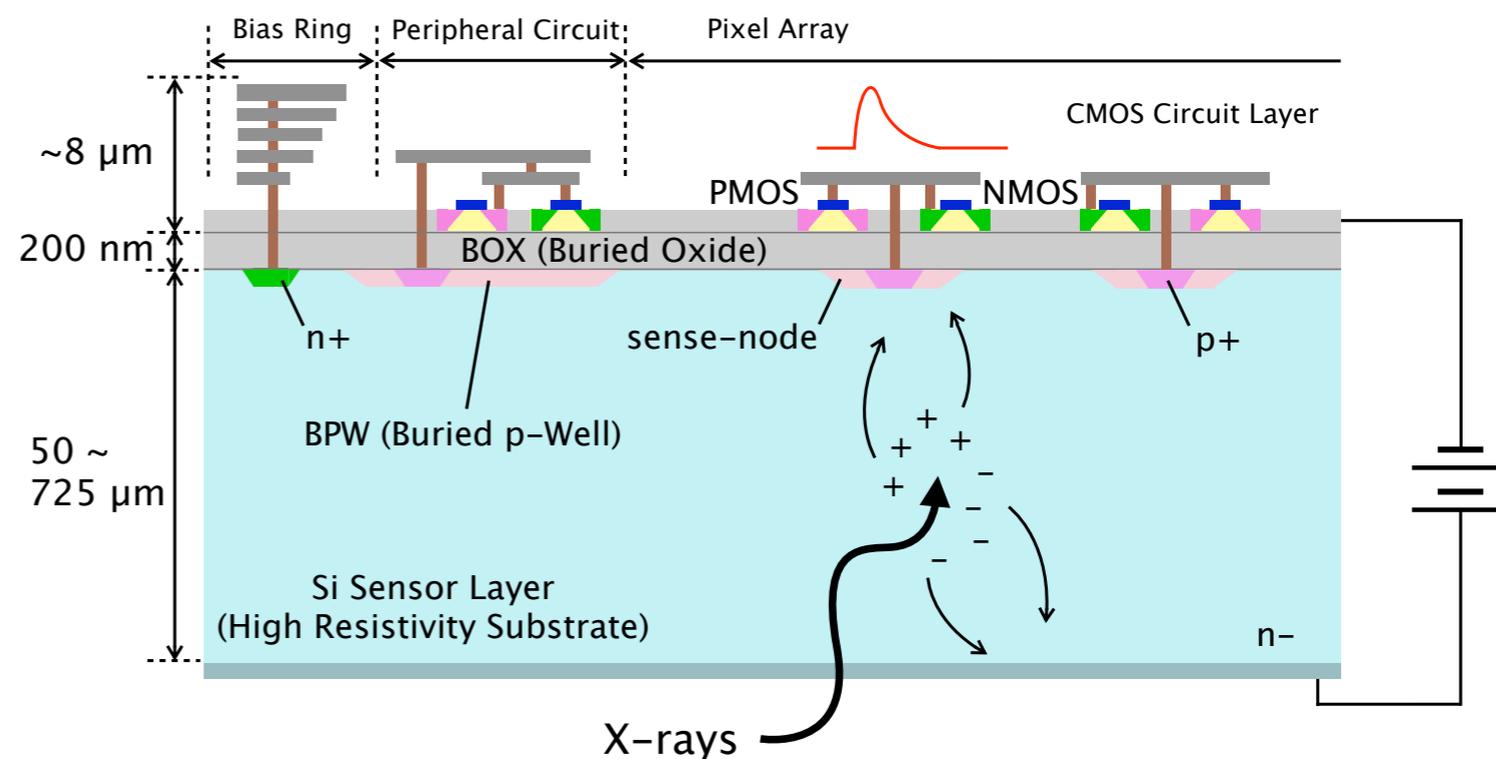
SOIピクセル検出器の特徴

金属バンプボンディングがない

-> 高密度・低寄生容量・高感度

一般的なCMOS回路により構成

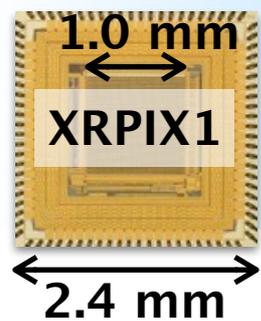
一般的な産業技術を基盤とする



高いX線感度と高度な信号処理を両立

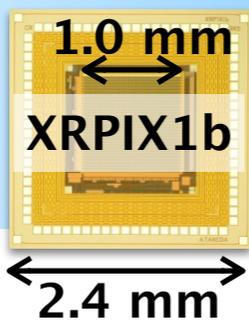
XRPIXシリーズ

2010



First Model
Trigger Output
(Event-driven readout)

2011

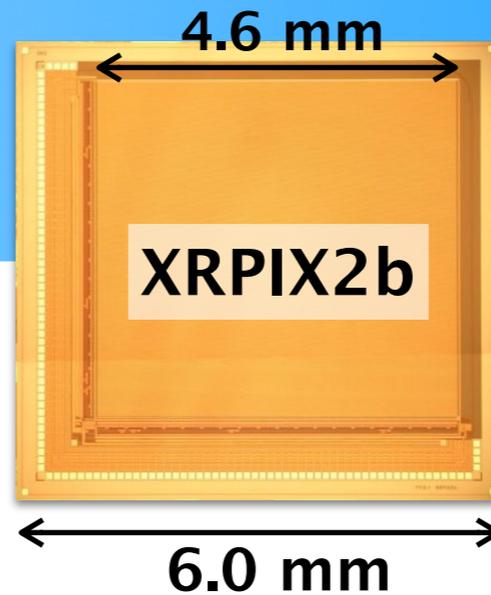


2012



Middle Size

2013

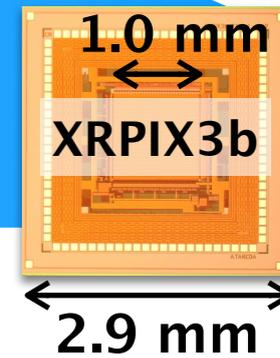


Buttable

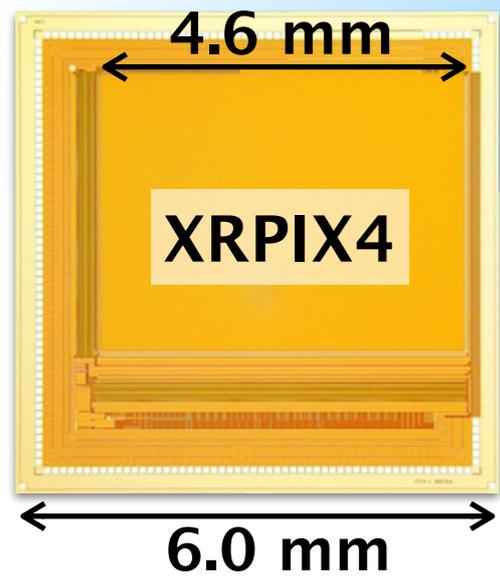
2014



Charge Sensitive
Amplifier

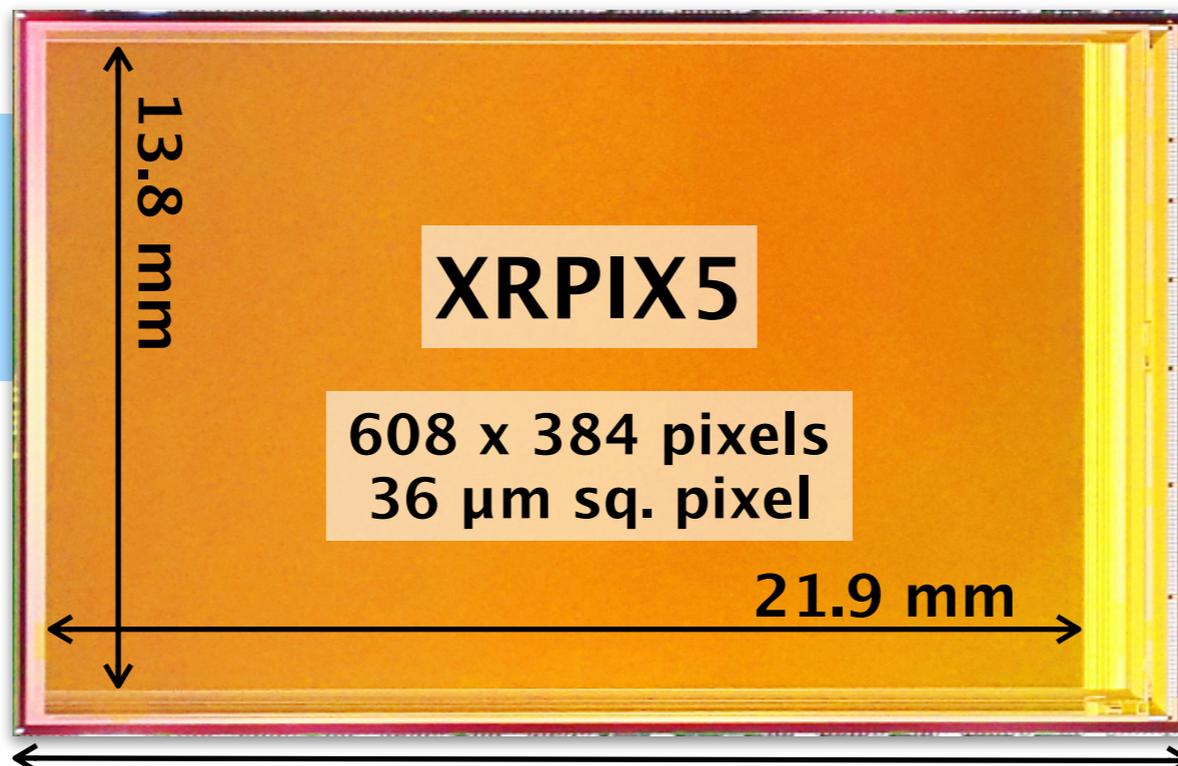


2014



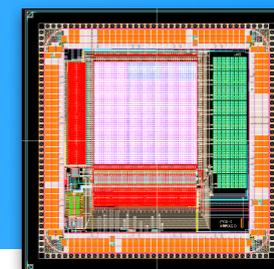
New Readout Circuit

2015



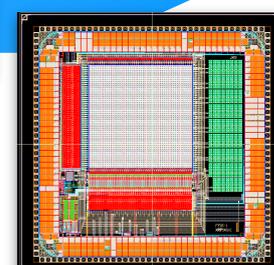
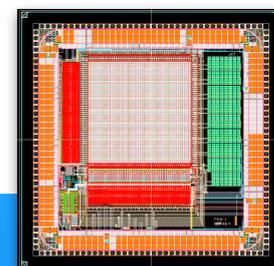
Large Size !!

2016



XRPIX6h
XRPIX6e
XRPIX6D

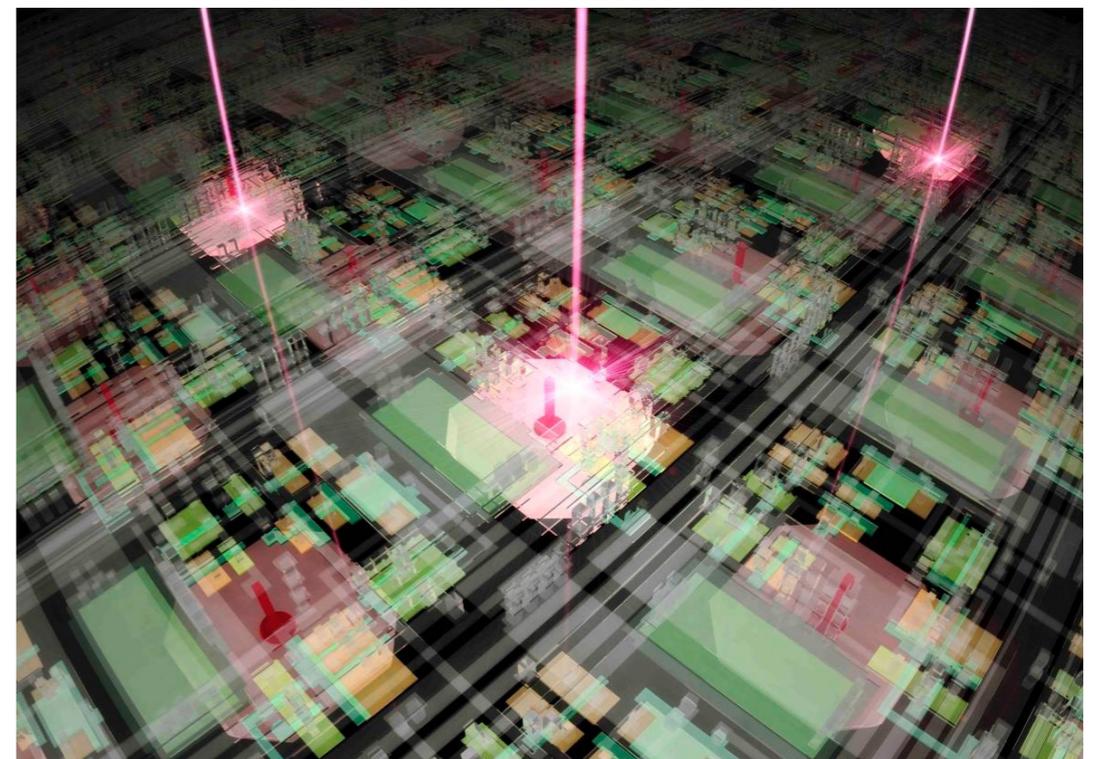
Pixel Structure



4.45 mm

XRPIXの設計

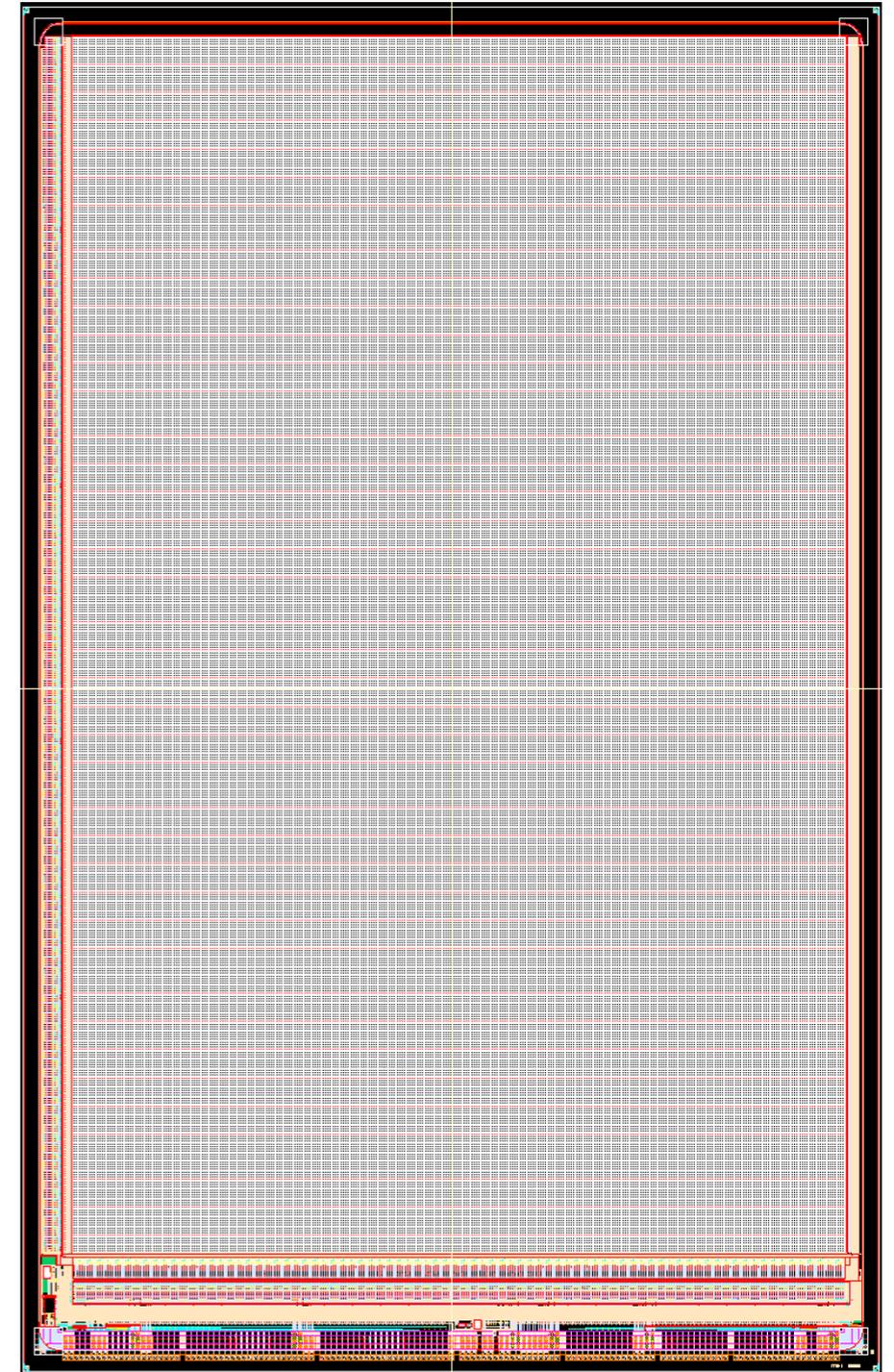
～大面積素子へ向けたプロトタイプを例に～



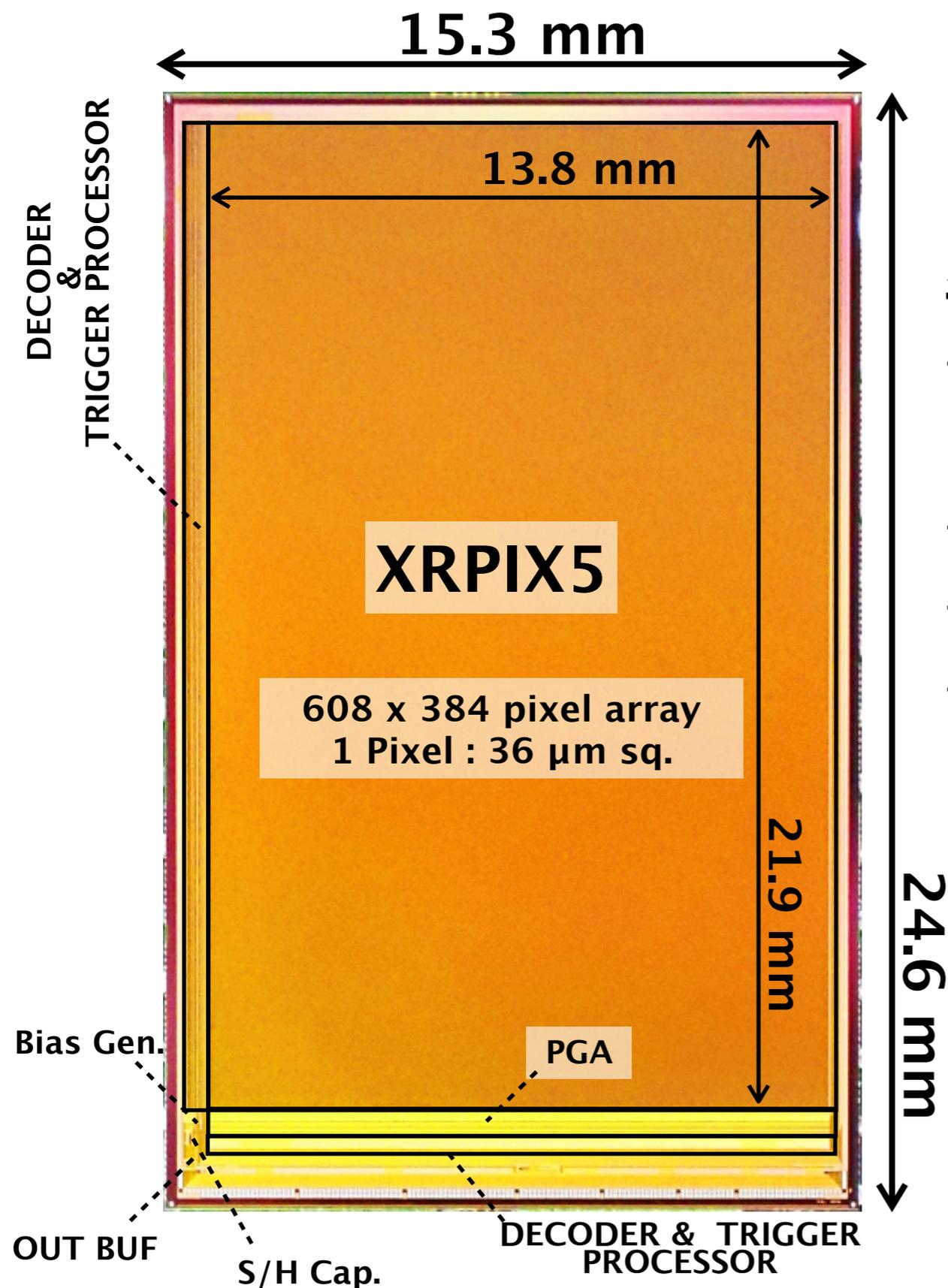
大面積素子へ向けた設計

- XRPIX5 (FY15-1) : 6 mm角の面積10倍の大型素子.
 - > 大型化の課題を把握する.
- このサイズのデザインは次元が変わる？
 - > 回路の負荷増
 - > 配線抵抗・容量増
 - > グローバルリセット時の挙動
 - > 歩留まり減(?)
 - > メタル面積制限
 - > densityルール

...いろいろと気にすべきことが増える
- 回路・プロセスの専門家に助言を得た.
- 周辺デジタル回路の作業を業者に一部委託し回路設計や検証の時間を確保した.
 - > 設計の効率性アップ



XRPIX5の概要



大面積化へ向けた最初のプロトタイプ

2015.06 Submit

2015.12 納品

基本構成

- チップサイズ : 24.6 mm x 15.3 mm
(有効領域 : 21.9 mm x 13.8 mm)
- ピクセルサイズ : 36 μm sq.
- ピクセル数 : 608 x 384 (= ~233k)
- センサ層厚 : 310 μm (CZ wafer)
500 μm (FZ wafer)

回路構成の特徴

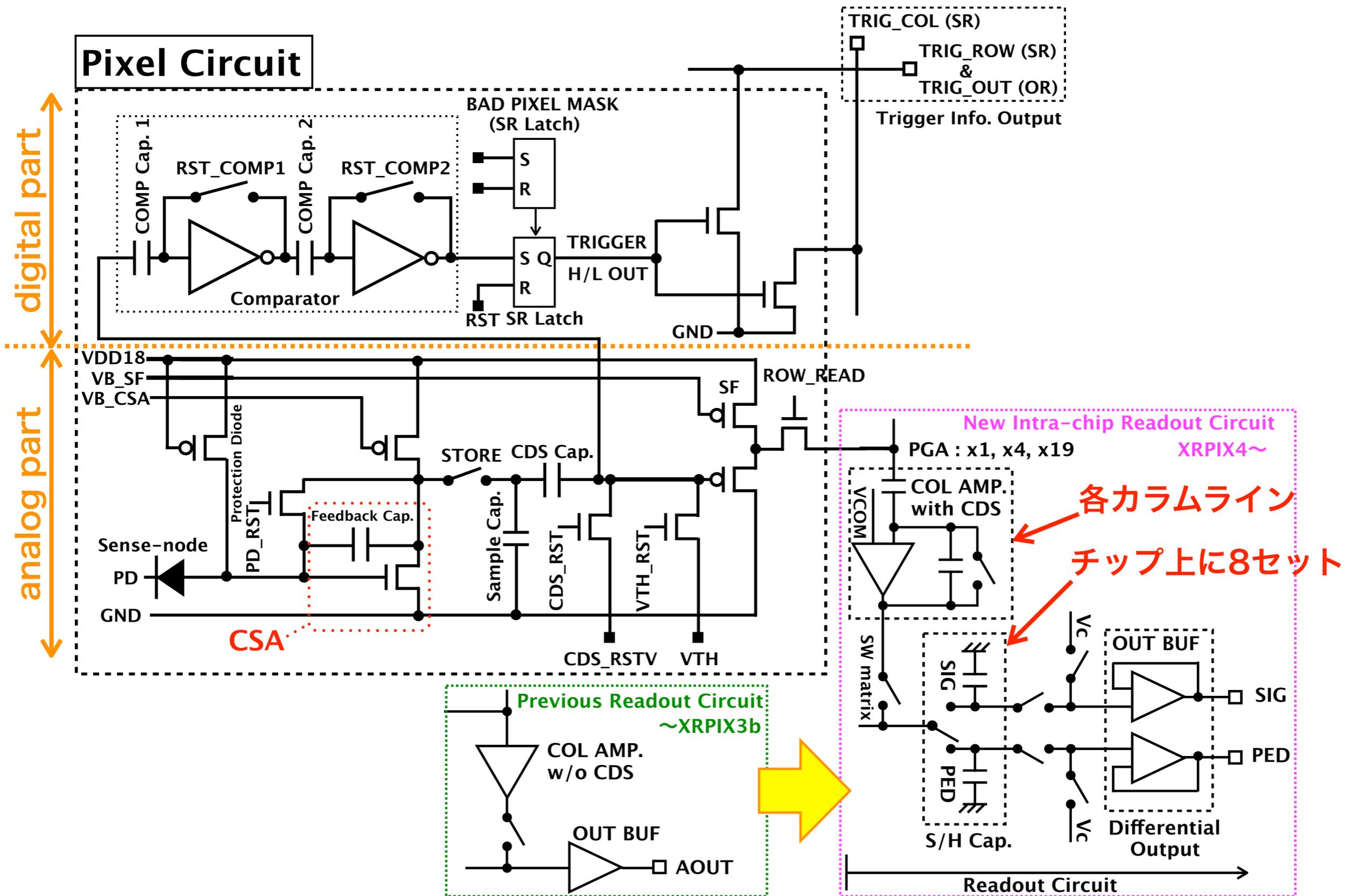
各カラムラインにProgrammable Gain Amplifier (PGA)回路を搭載している。

信号レベルとペDESTALレベルを差動出力する。

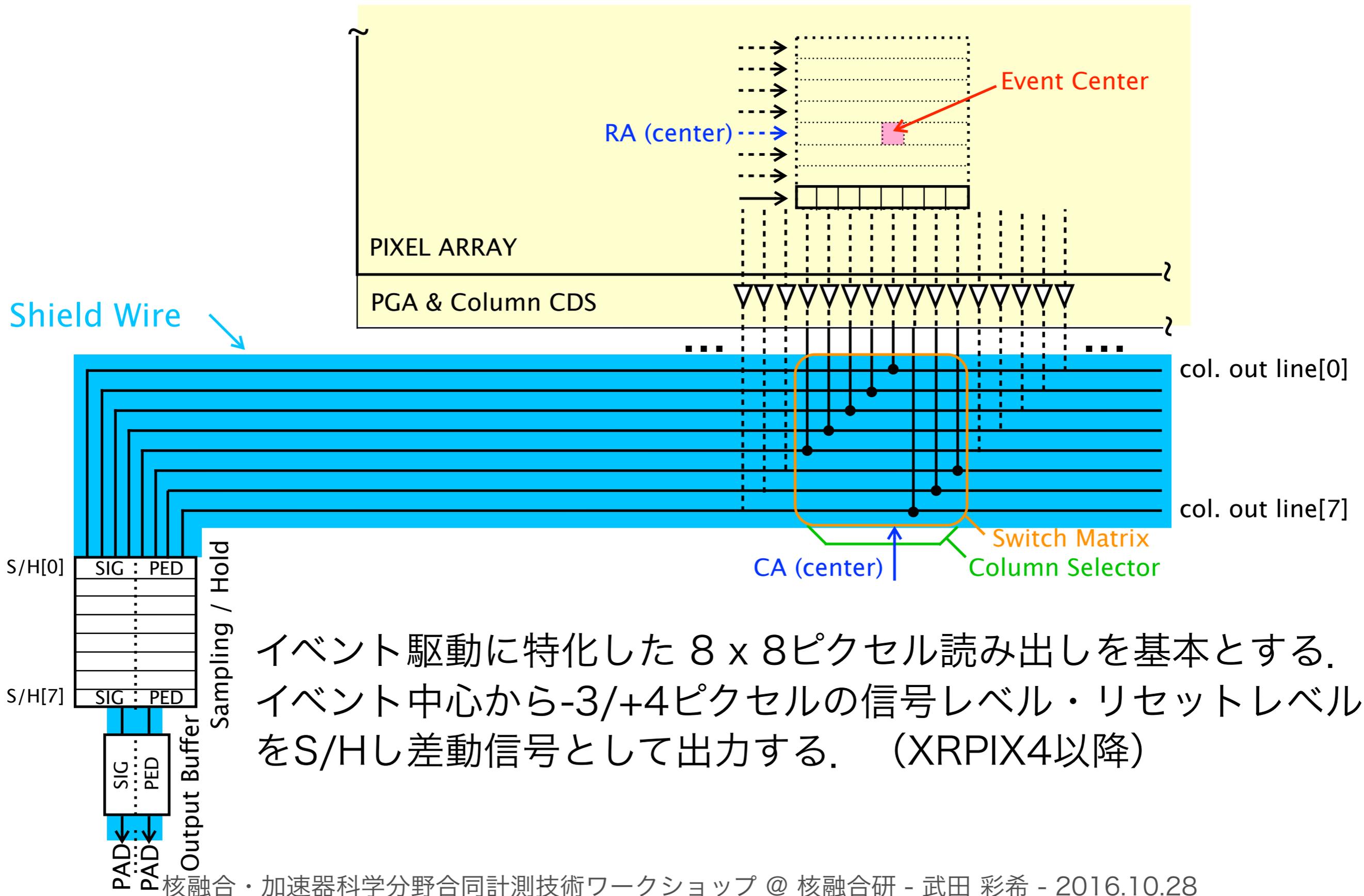
イベント駆動読み出しに最適化したアーキテクチャ。
→ 8 x 8 ピクセルをユニットとして読み出す。

ヒットパターン情報出力機能を搭載。

ピクセル回路・アナログ信号読み出し回路の構成



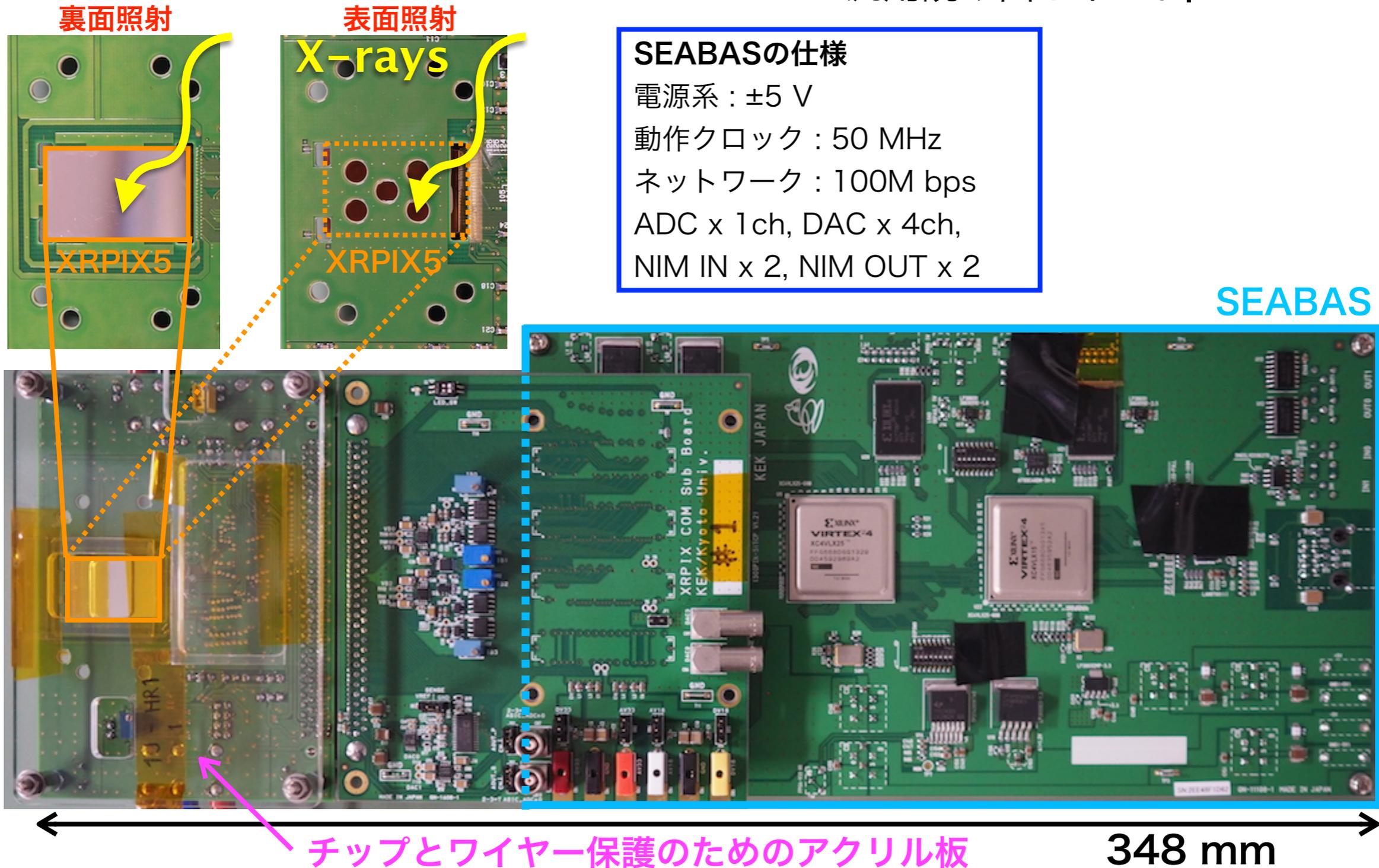
アナログ信号読み出し部の構成



イベント駆動に特化した 8 x 8ピクセル読み出しを基本とする。
イベント中心から-3/+4ピクセルの信号レベル・リセットレベルをS/Hし差動信号として出力する。(XRPIX4以降)

XRPIX5 実験ボードのセットアップ

Soi EvAluation Board with Sitcp (SEABAS) : SOIピクセル検出器で使用する汎用読み出しボード.



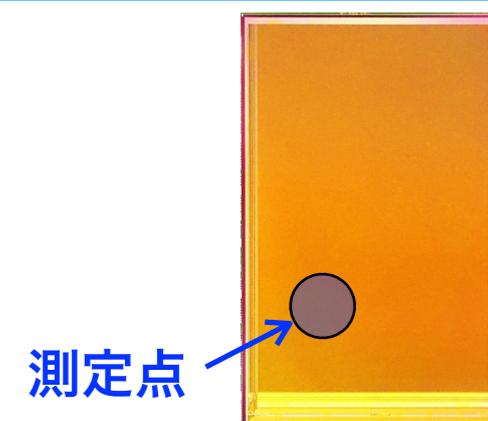
XRPIX5によるスペクトル取得

- ^{241}Am 線源からのスペクトル取得を行った。

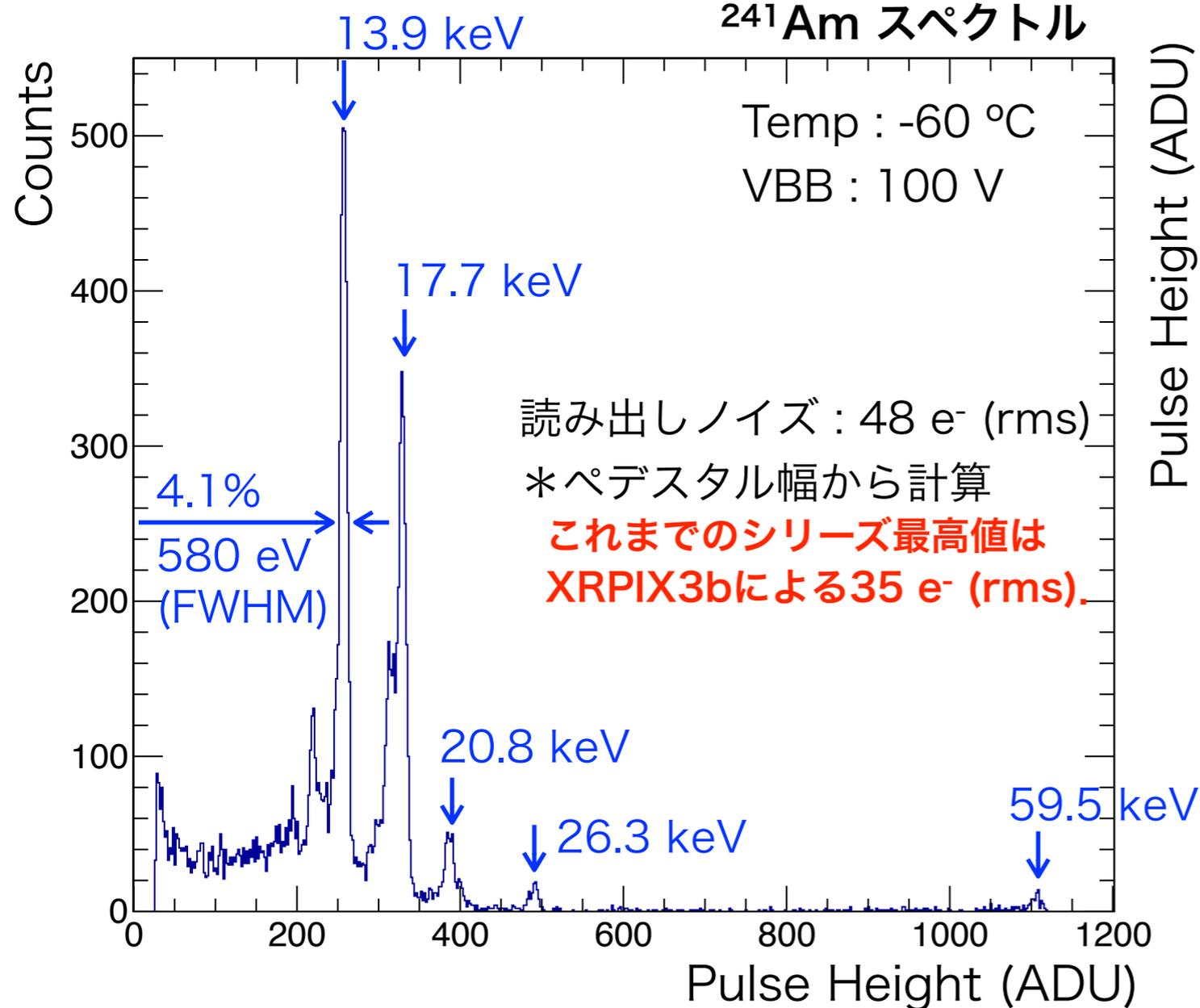
-> XRPIX5で初めてスペクトル取得に成功した。

* フレーム読み出しによる (イベント駆動読み出しではない)

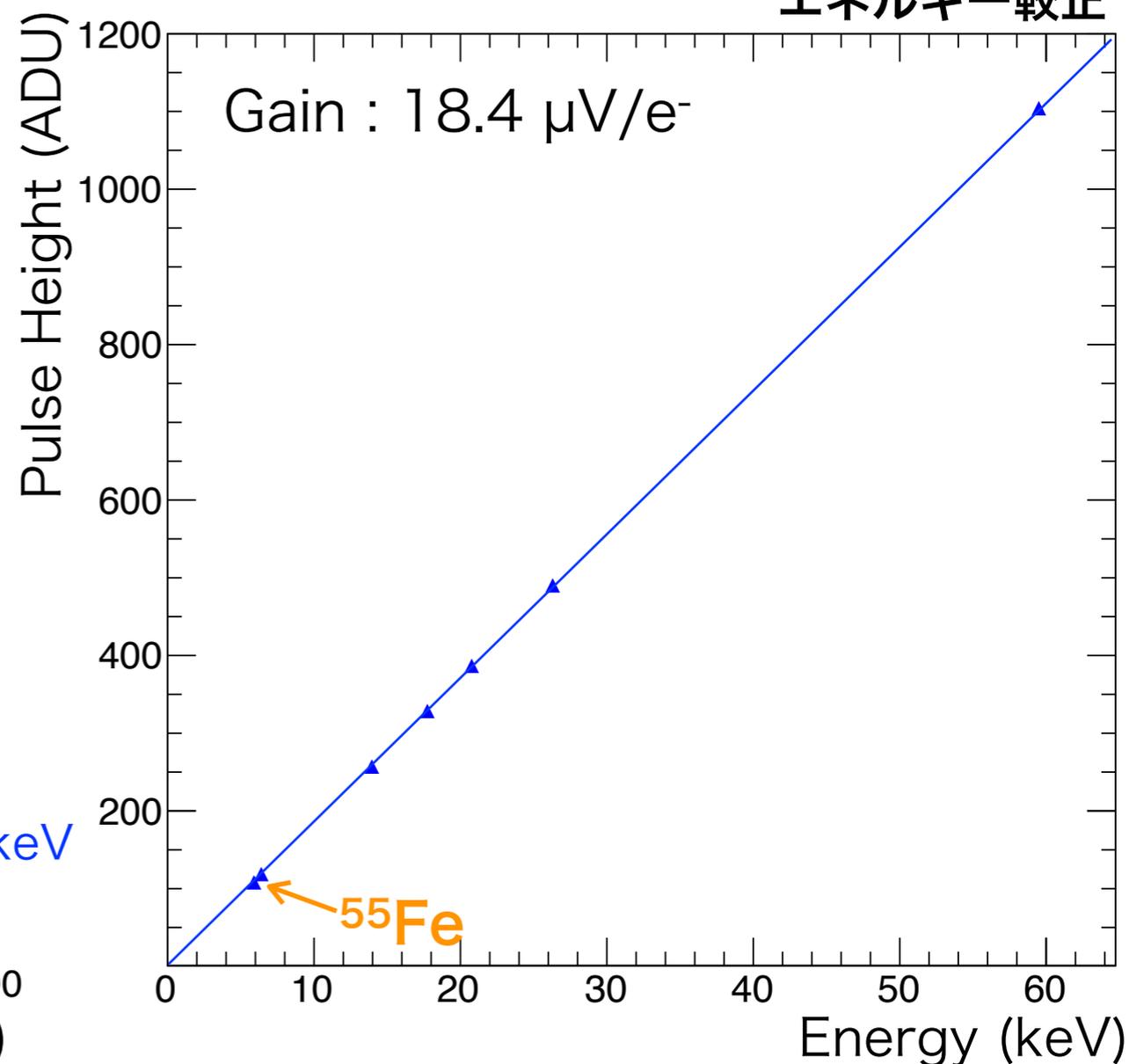
* スペクトルはシングルピクセルイベントのみ使用



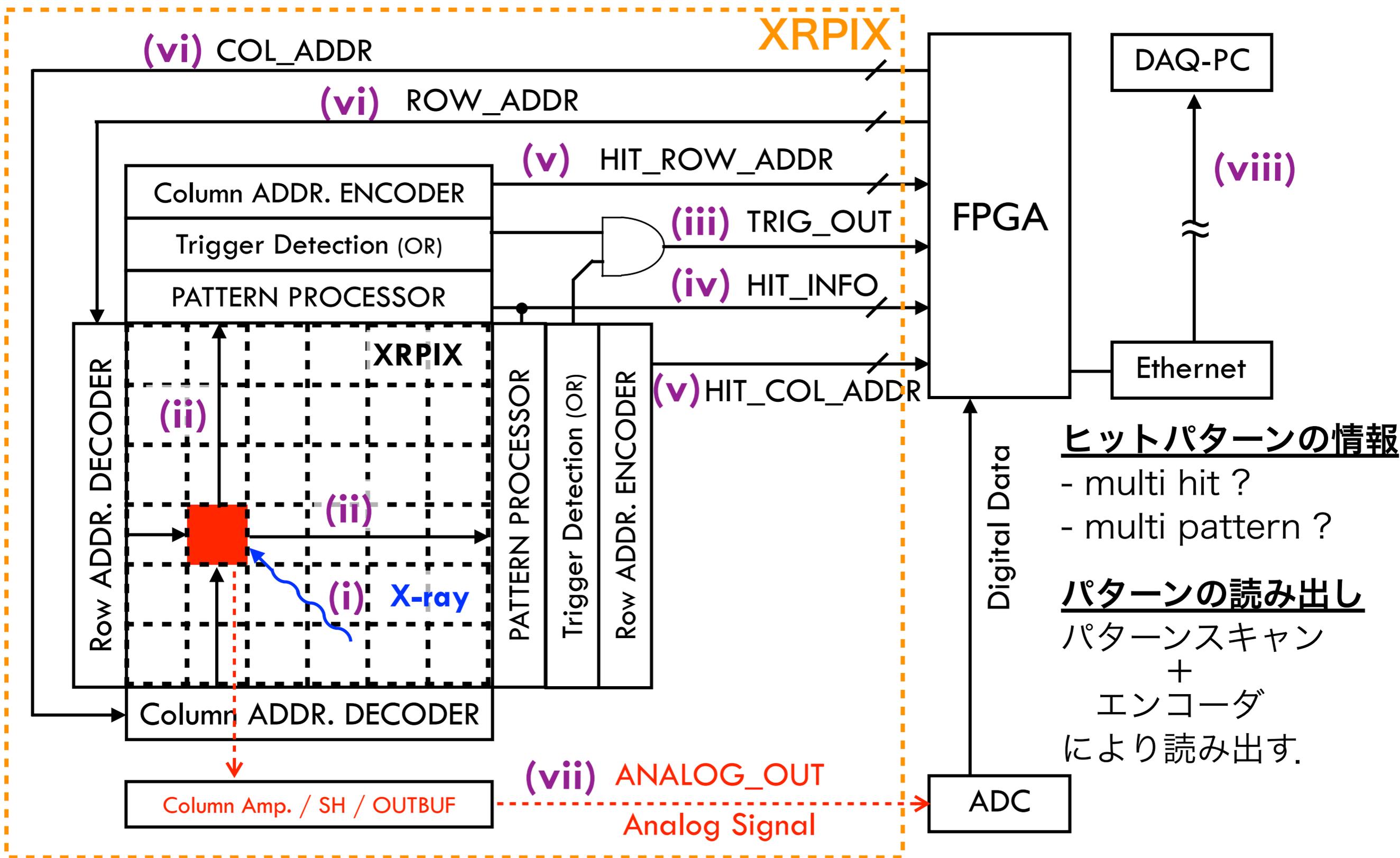
^{241}Am スペクトル



エネルギー較正



イベント駆動読み出し

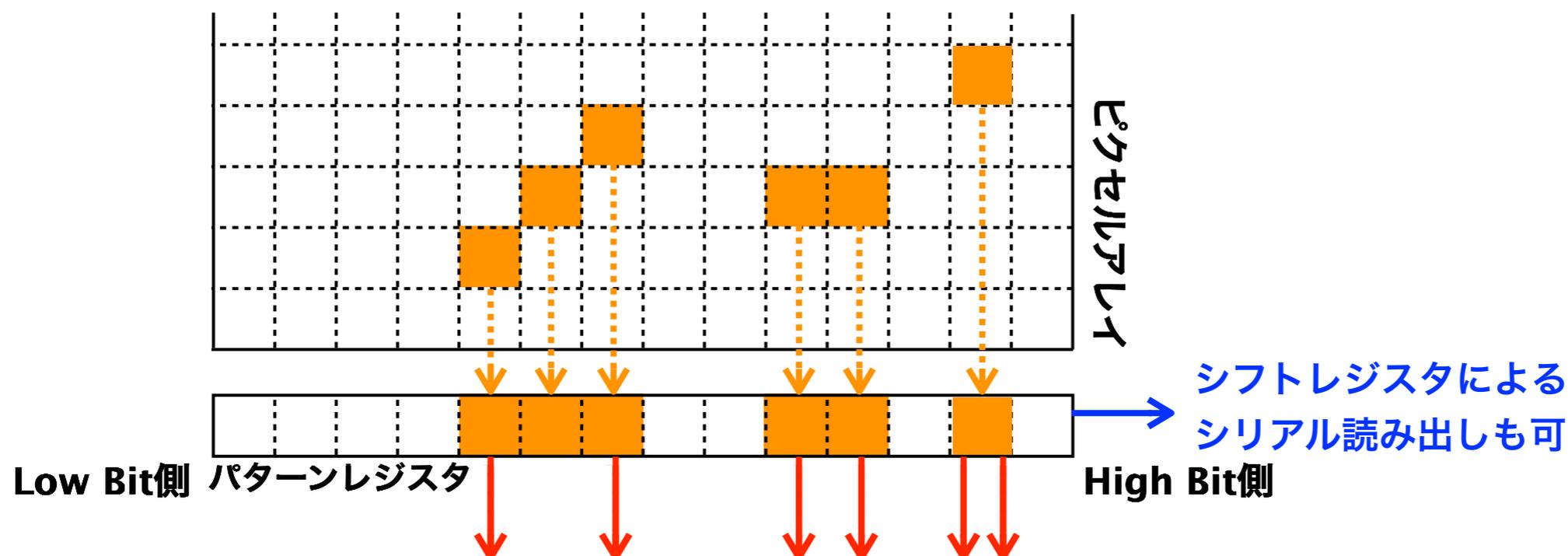


パターンスキャンによるアドレス読み出し

- ヒットパターンをシリアルに読み出すと時間がかかる。
- 全体は不要. ヒットパターンだけを効率的に読み出したい。
-> **パターンスキャナ+エンコーダ回路**
- L/H側のパターンエッジアドレス値を得ることで、ヒットパターンを再構成する。

*大面積化において不可欠な機能

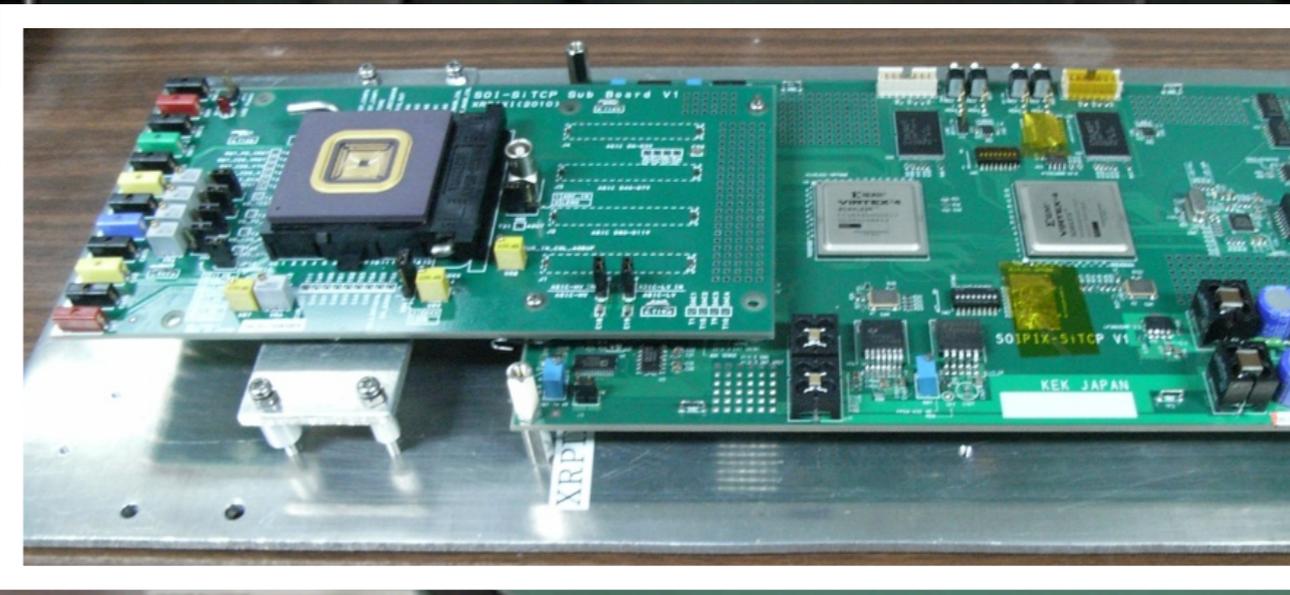
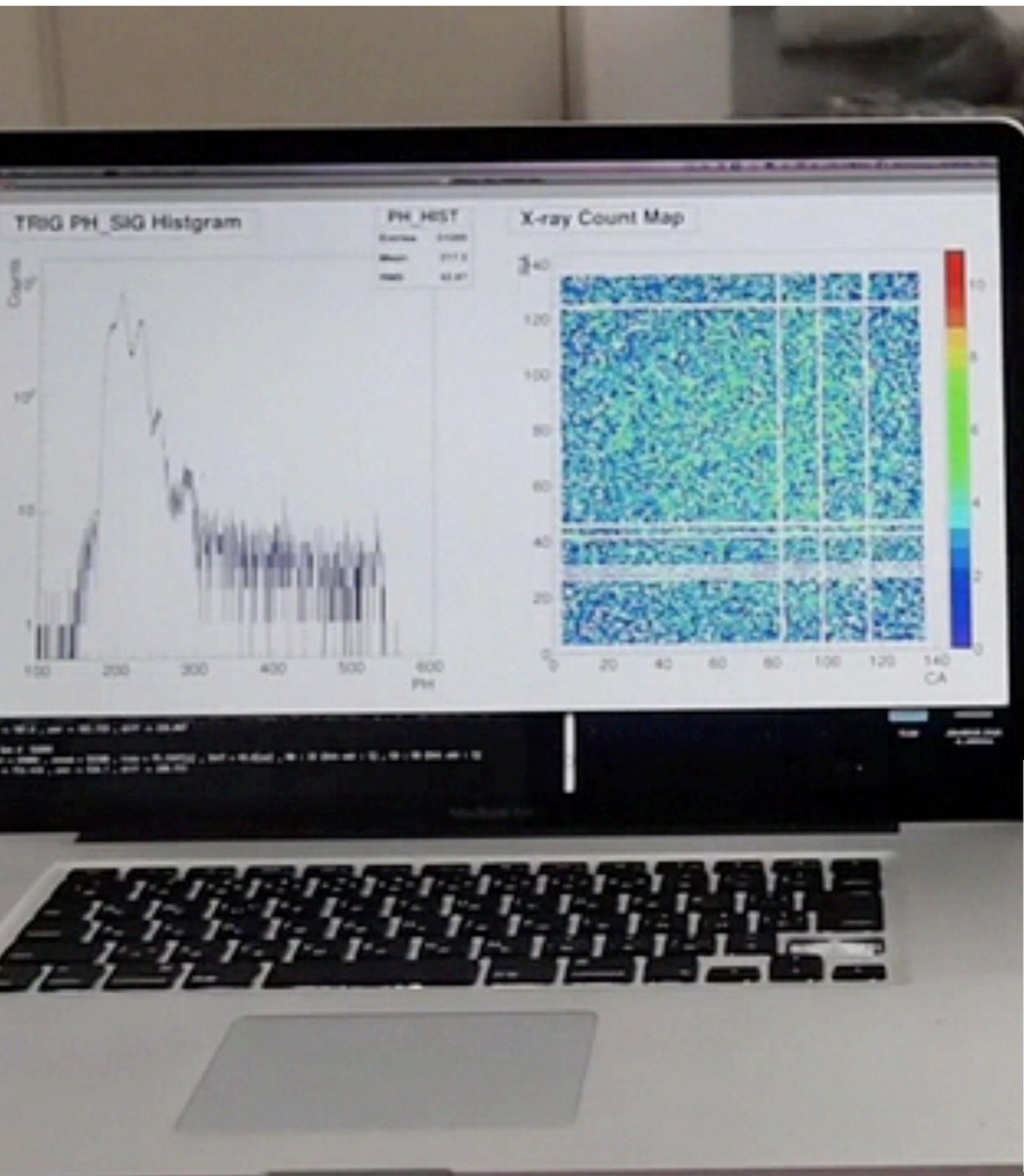
FPGA / ASICでどのような処理をすれば最適化を見極める必要がある。



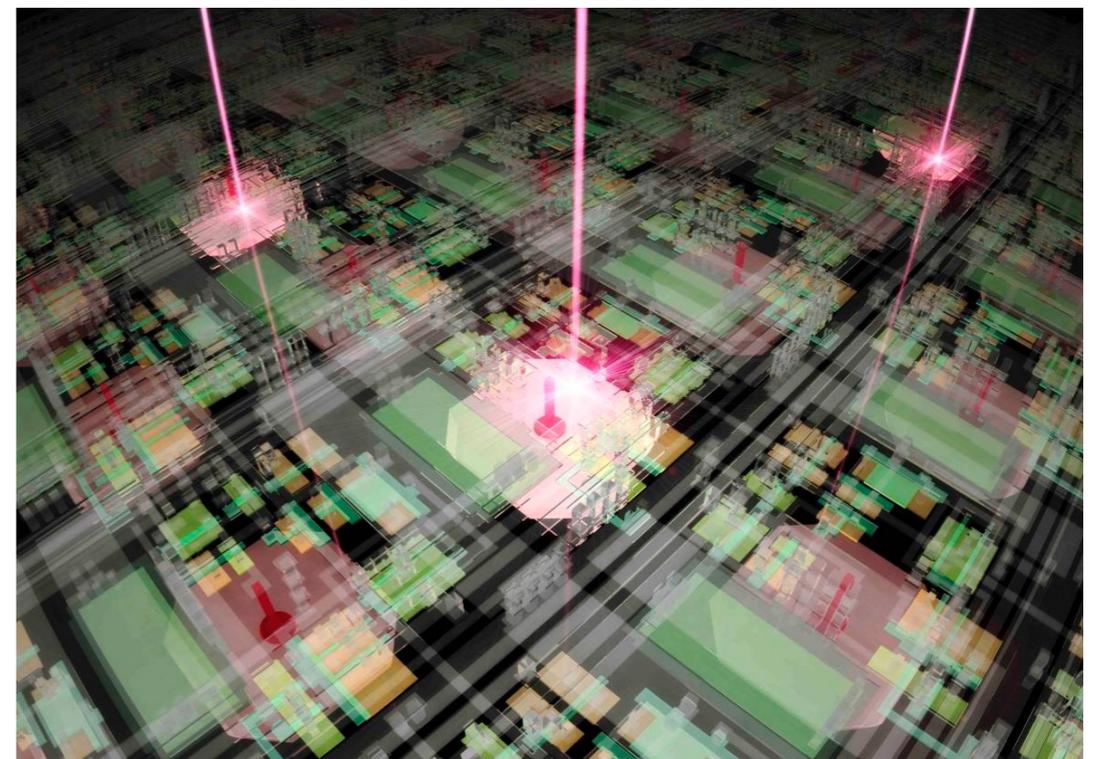
**パターンスキャナ+エンコーダ回路による
パターンエッジアドレス値の取得**

イベント駆動読み出しのデモ動画

蛍光灯下・常温でのイベント駆動読み出し, ^{241}Am 線源, センサ部電圧 5 V.



これまでの研究開発

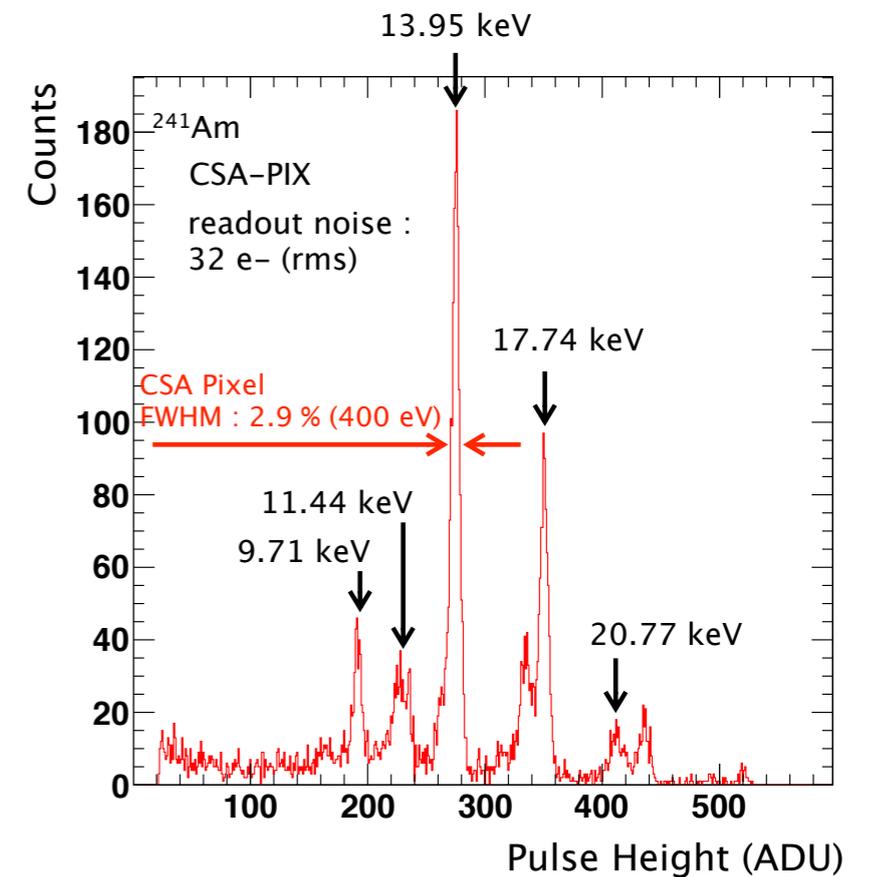
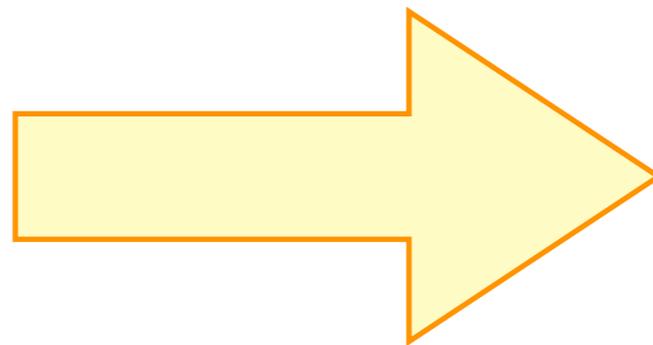
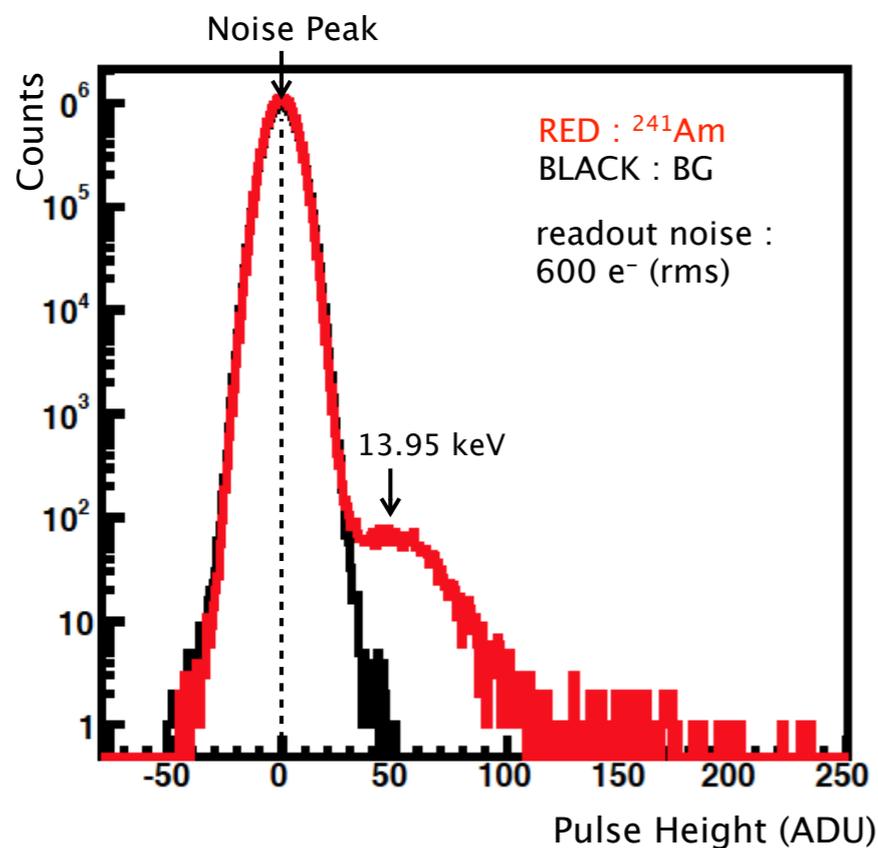
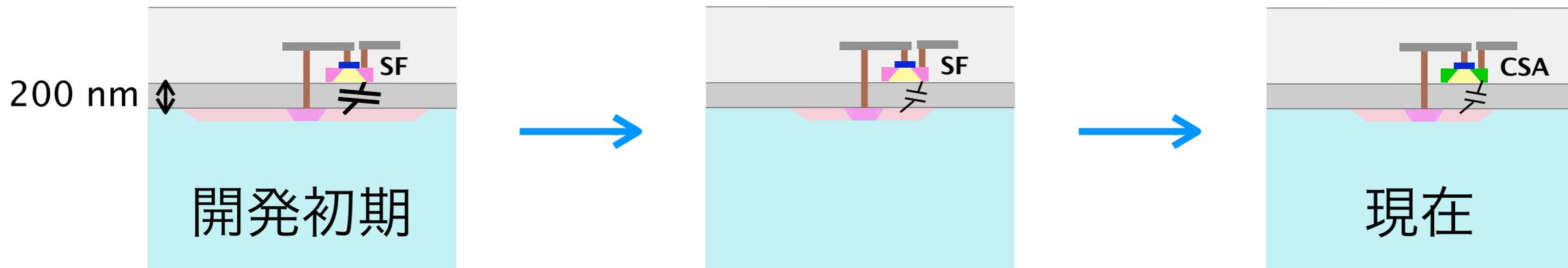


XRPIXの開発 | 分光性能

◆ 読み出しノイズの低減 [Takeda + JINST (2015)]

sense-node容量の低減

電荷感応アンプ(CSA)の導入

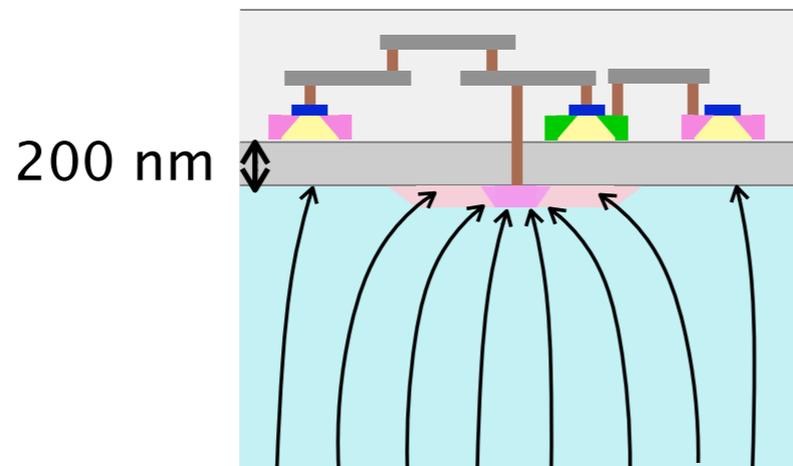


ノイズレベルを1桁低減 [~600 e⁻ (rms) -> 35 e⁻ (rms)]

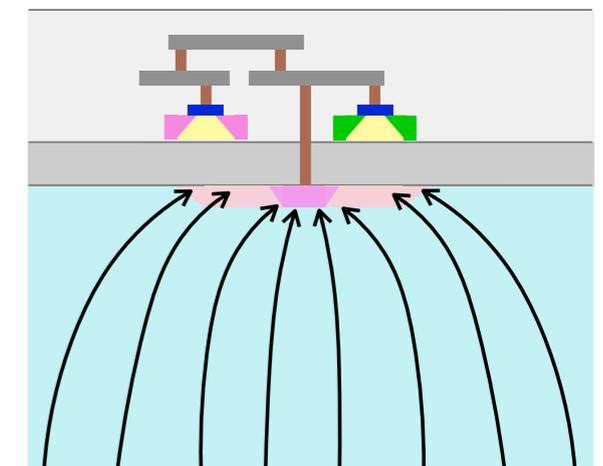
XRPIXの開発 | 電荷収集効率

◆ 電荷収集効率の向上

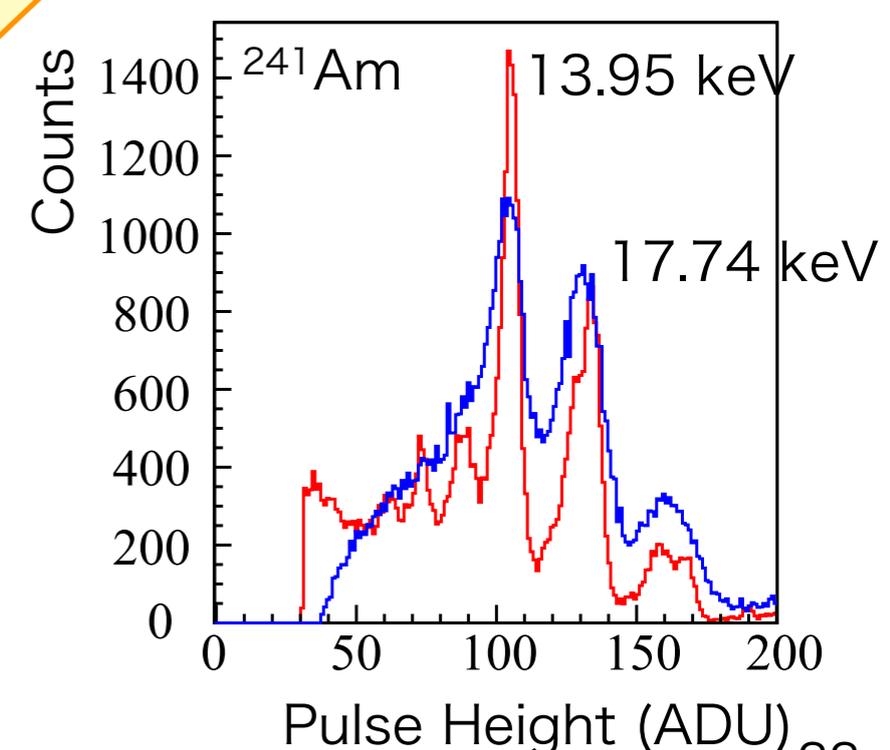
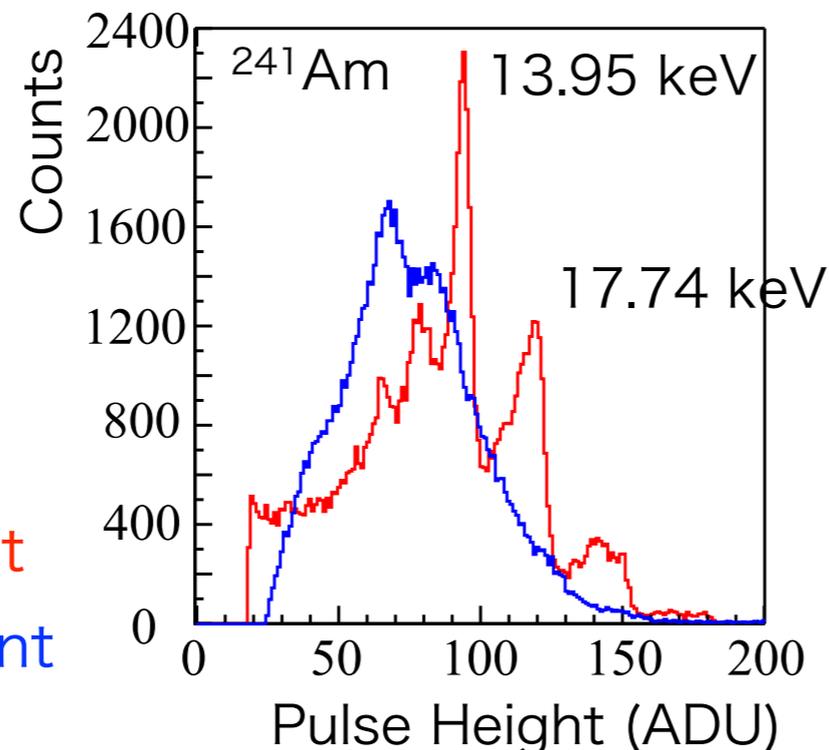
開発初期に電荷損失が起こるという現象を発見。
-> sense-nodeから外れたトランジスタが原因



開発初期

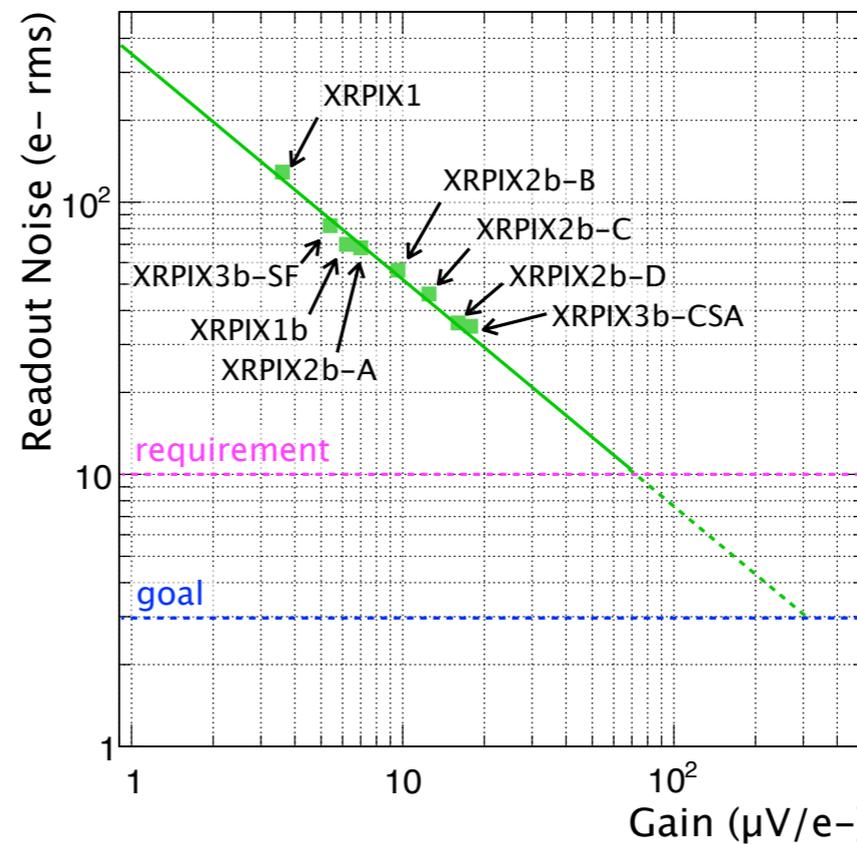
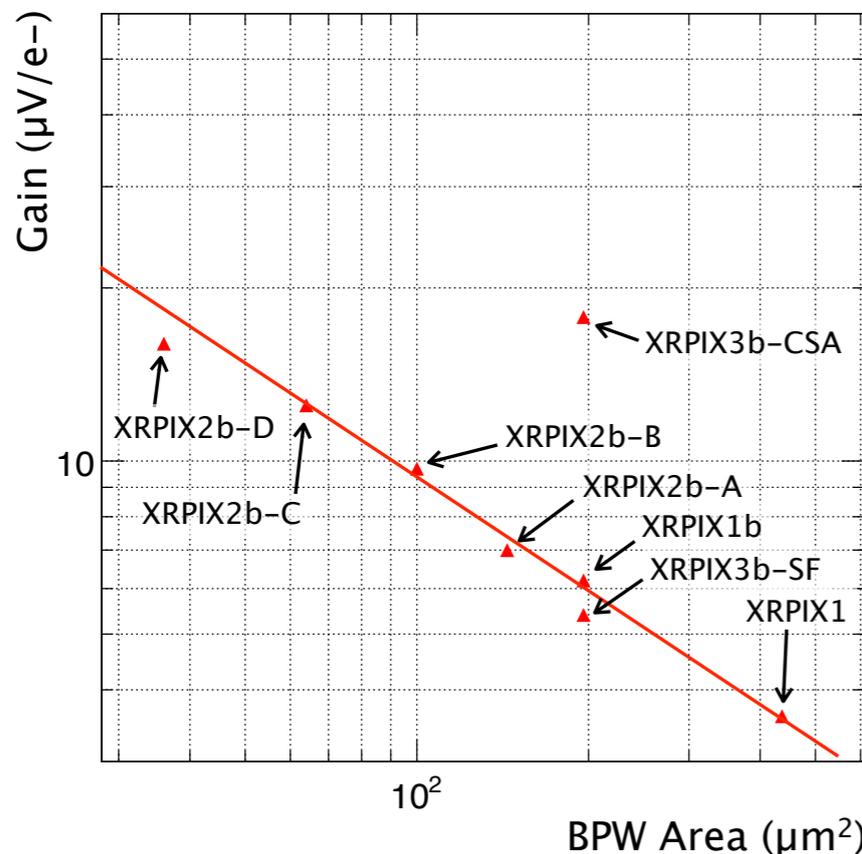
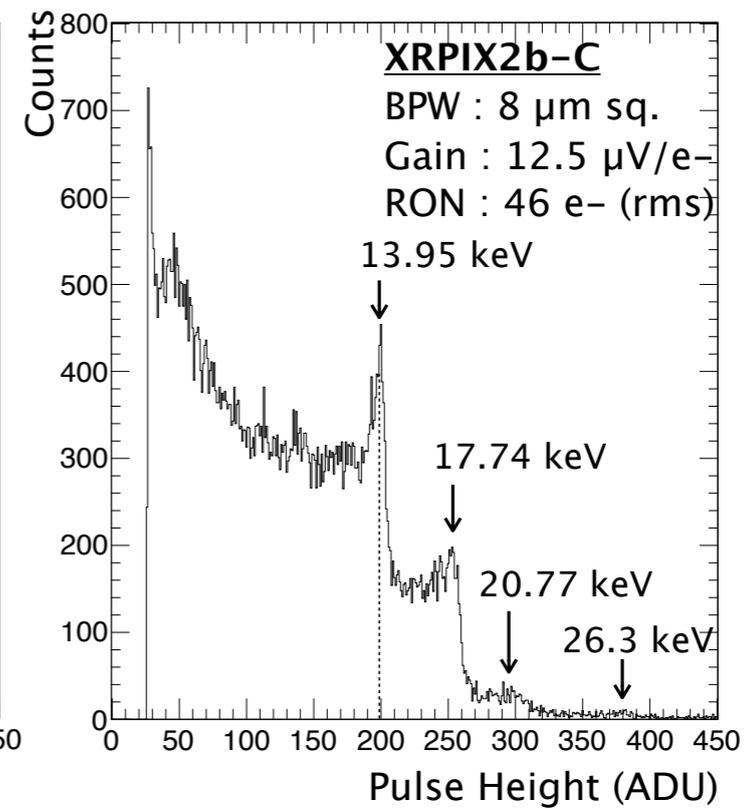
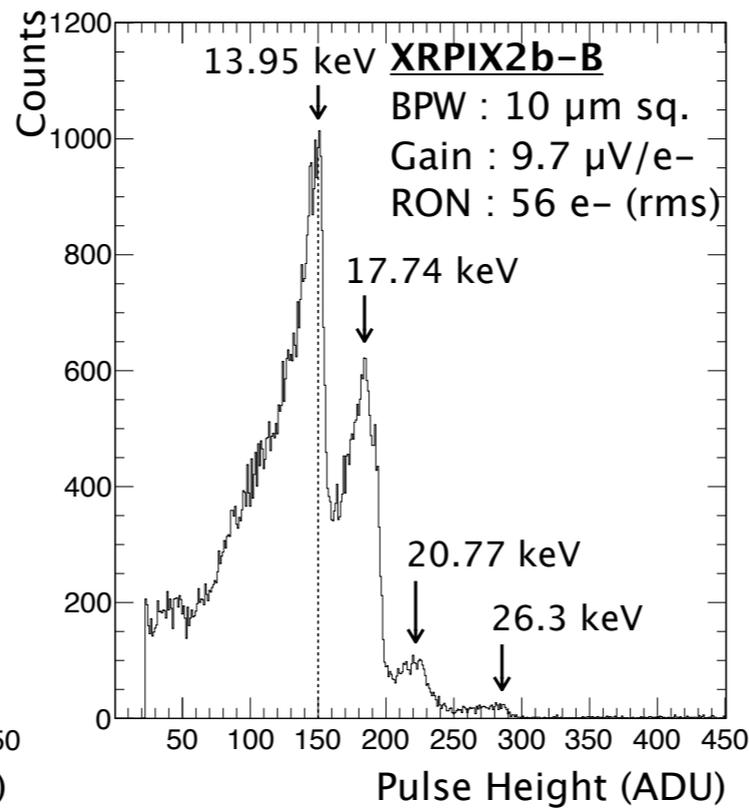
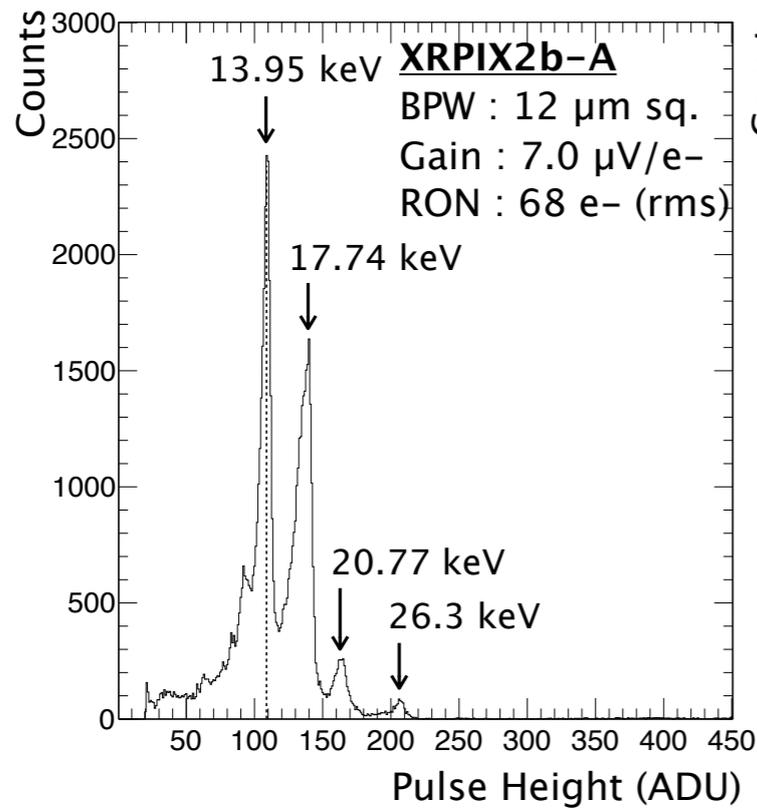


現在



赤線 : single pixel event
青線 : double pixel event

XRPIXの開発 | 分光性能+電荷収集効率



そろそろ頭打ち？
 -> 別の切り口が必要
 -> ピクセル構造の改良
 変換ゲインを上げる

XRPIXの開発 | クロストーク

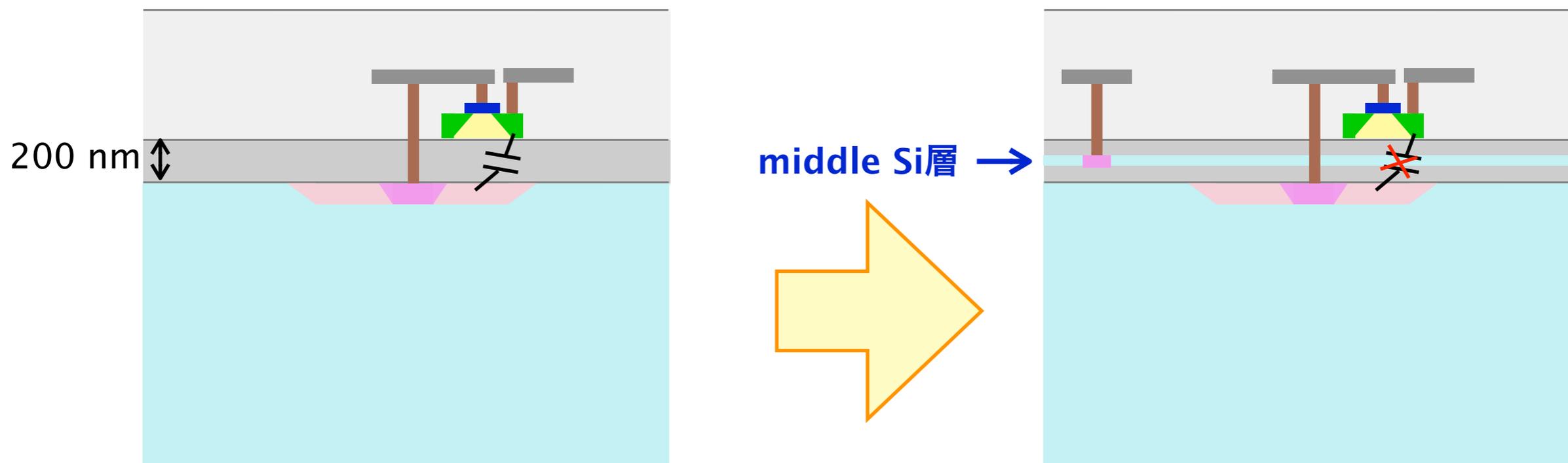
◆ イベント駆動時のクロストークの問題 [Takeda + PoS (2014)]

コンパレータ論理反転時にアナログ信号へ干渉があった。

-> 分光性能の悪化を引き起こした

-> middle Si層の導入で解決

-> さらに、センスノード容量低下も実現？



CMOS回路層・センサ層が近いことで様々な問題が起こったが、
研究開発が進み解決してきた。

将来計画を目指した開発

2015

2016

2017

2018~

軟X線応答

- ◆ 裏面処理 - XRPIX2b/3b

基本特性

- ◆ 基本性能評価 - XRPIX2b/3b
- ◆ 放射線損傷試験 - XRPIX2b

低ノイズ性能

- ◆ ピクセル回路・構造 - XRPIX6
- ◆ 素子内読み出し回路・システム - XRPIX4

イベント駆動読み出しにおける分光性能

- ◆ 低クロストーク構造 - XRPIX3b/6
- ◆ 周辺デジタル回路の改良 - XRPIX4/5

大面積化

- ◆ 大面積化素子の設計 - XRPIX5
- ◆ ステッチング露光技術

これまでの研究開発の
集大成となる素子として設計

衛星搭載品を目指した素子設計

まとめ

- 次世代のX線天文衛星搭載を目指し、イベント駆動型SOIピクセル検出器「XRPIX」の開発を行っている。
- XRPIXはピクセル内にコンパレータを持つことで、イベント検出時のタイミングとヒット位置情報を出力することが可能 -> トリガ情報出力機能
-> 制御・システムを変えることで**同時・反同時計数のどちらにも適用可**。
- イベント駆動読み出しは実現できている。
-> さらなる機能増強のため、パターン処理回路を導入。
- これまでの開発項目：分光性能の向上 -> 読み出しノイズ 35 e⁻ (rms)
大面積化 -> 24.6 mm × 15.3 mm, ピクセル 36 μm sq., 608 × 384.
- 今後の開発項目：分光性能の向上, 大面積化, 軟X線応答性能の向上, など
-> 研究開発の成果をまとめて衛星搭載品の設計段階へと進む。