



Imaging Devices Laboratory



SOIPIX
Silicon-On-Insulator Pixel Detector Project

次世代宇宙 X 線観測へ向けた SOIピクセル検出器の開発

計測システム研究会 2021 @ 九州大学

2021年 10月28日 - 29日

武田 彩希 (宮崎大学)

takeda @ astro.miyazaki-u.ac.jp

SOIPIXプロジェクト : <https://soipix.jp>

次世代宇宙X線観測へ向けた「イベント駆動型SOIピクセル検出器」を紹介します。

- 次世代宇宙X線観測用「イベント駆動型 SOI ピクセル検出器」
 - > XRPIXシリーズの紹介
- 分光性能
- on-chipパターン処理回路
 - > on-chip パターン処理回路の紹介
- まとめ

次世代宇宙 X 線観測用

「イベント駆動型 SOI ピクセル検出器」

宇宙X線観測 | 現在のセンサと問題点

◆ 現在の主力検出器 | X線CCD

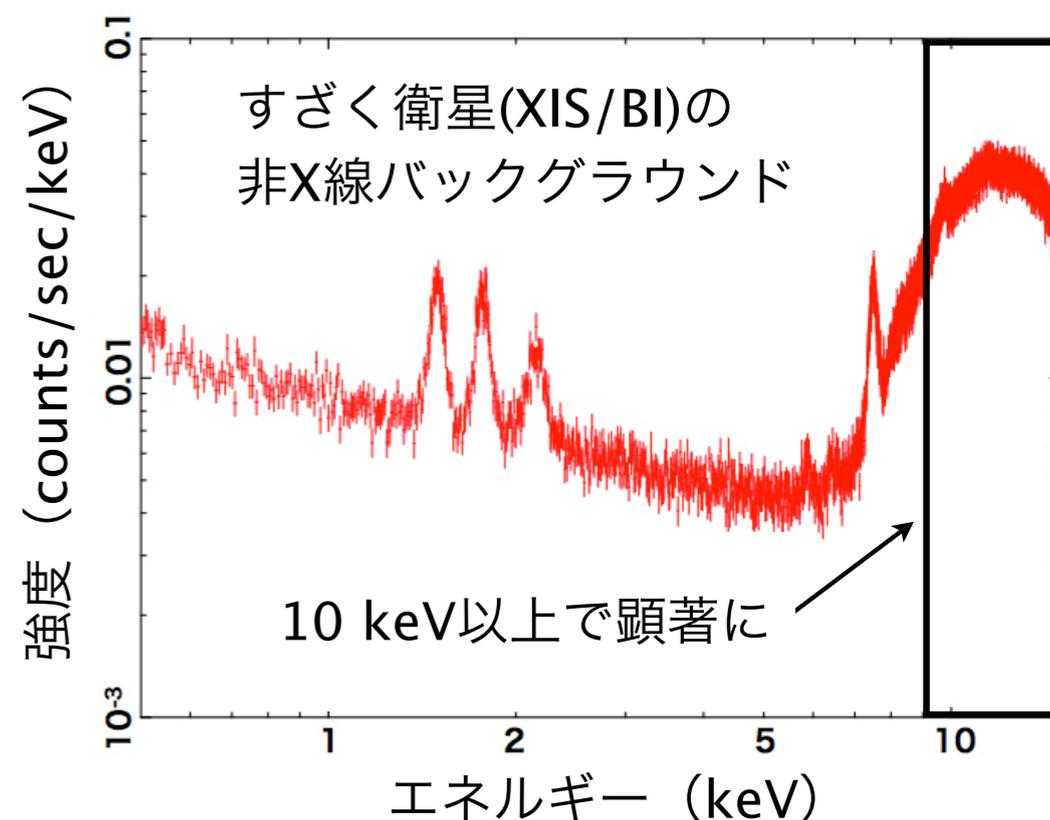
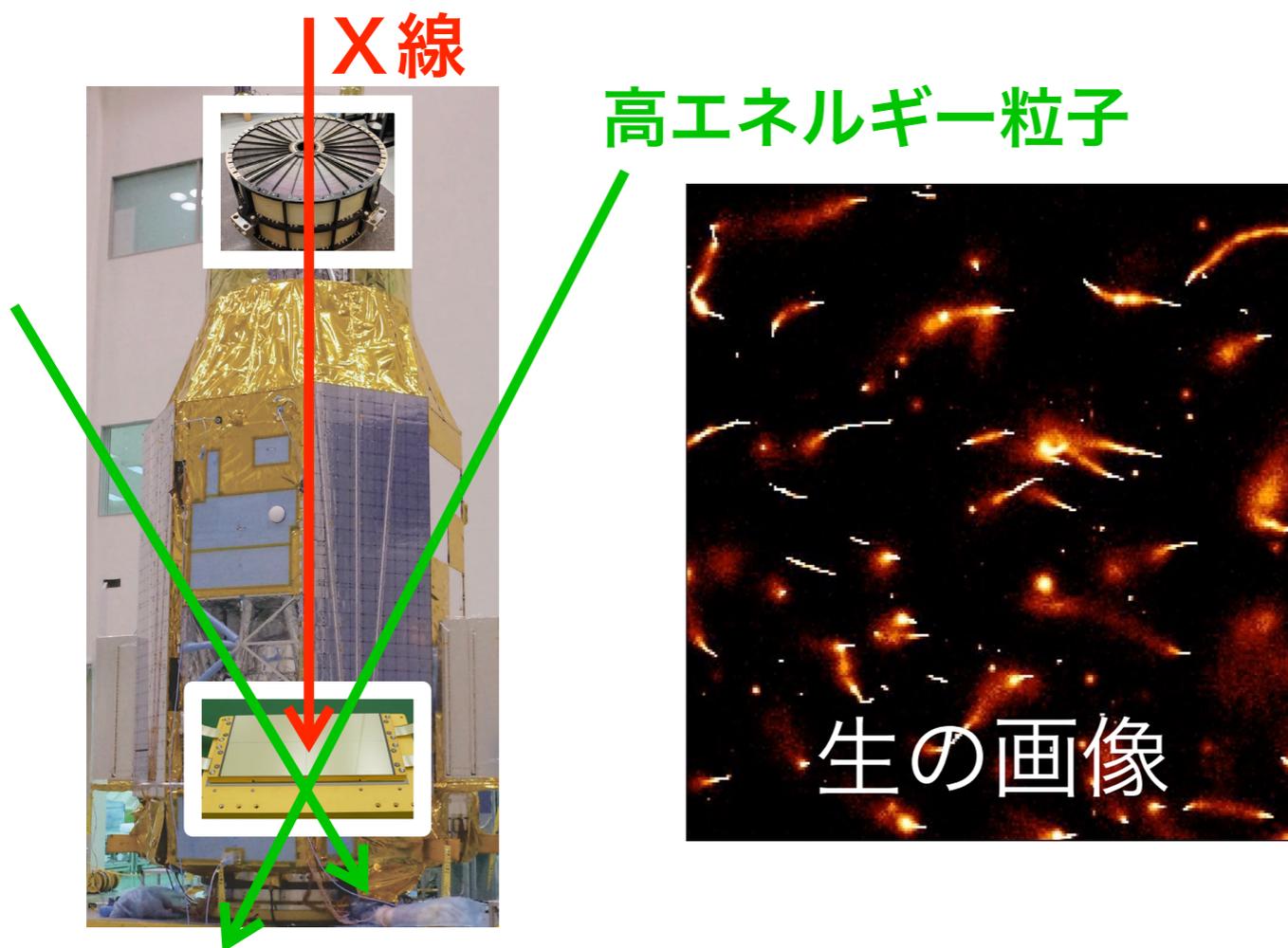
広視野 (~20–30 mm角) ・ 精密撮像 (~30 μm 角)

ファノ限界の分光性能 (読み出しノイズ: ~3 e⁻ rms)

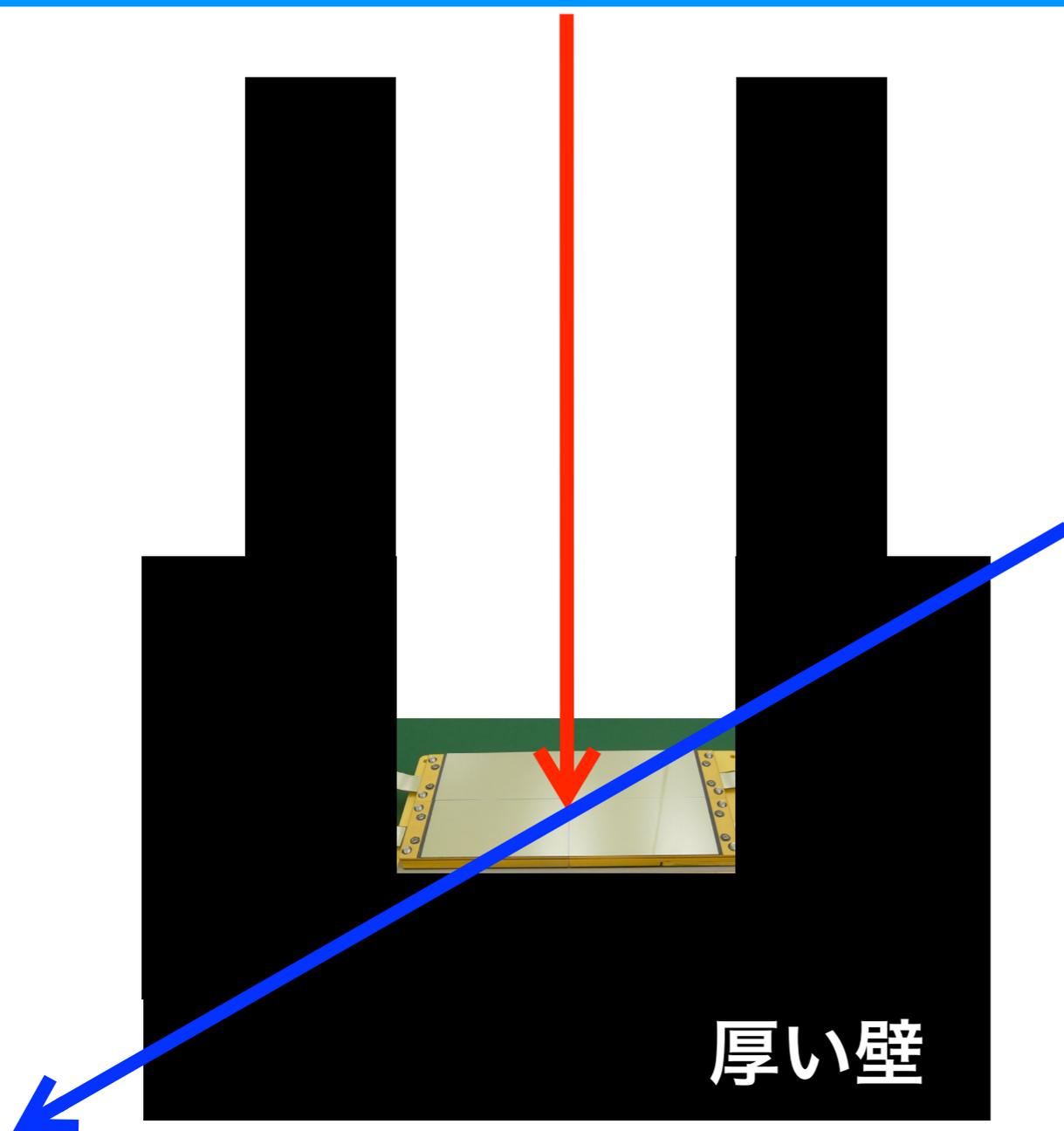
◆ X線CCDの問題点

読み出し速度が遅い (~sec) -> 高速現象が観測できない

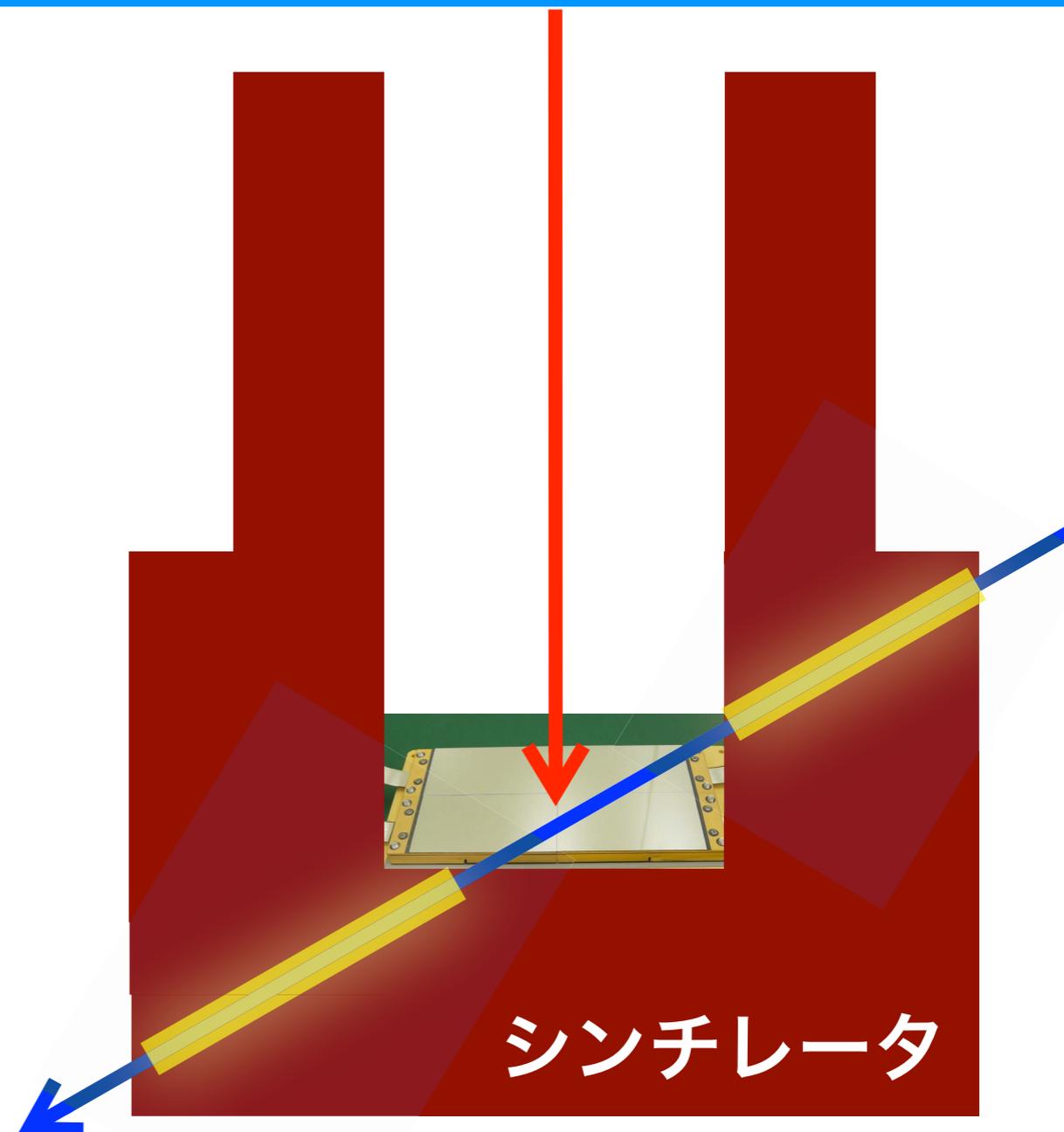
非X線バックグラウンドが高い -> 暗い(= 遠方の)天体が観測できない



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

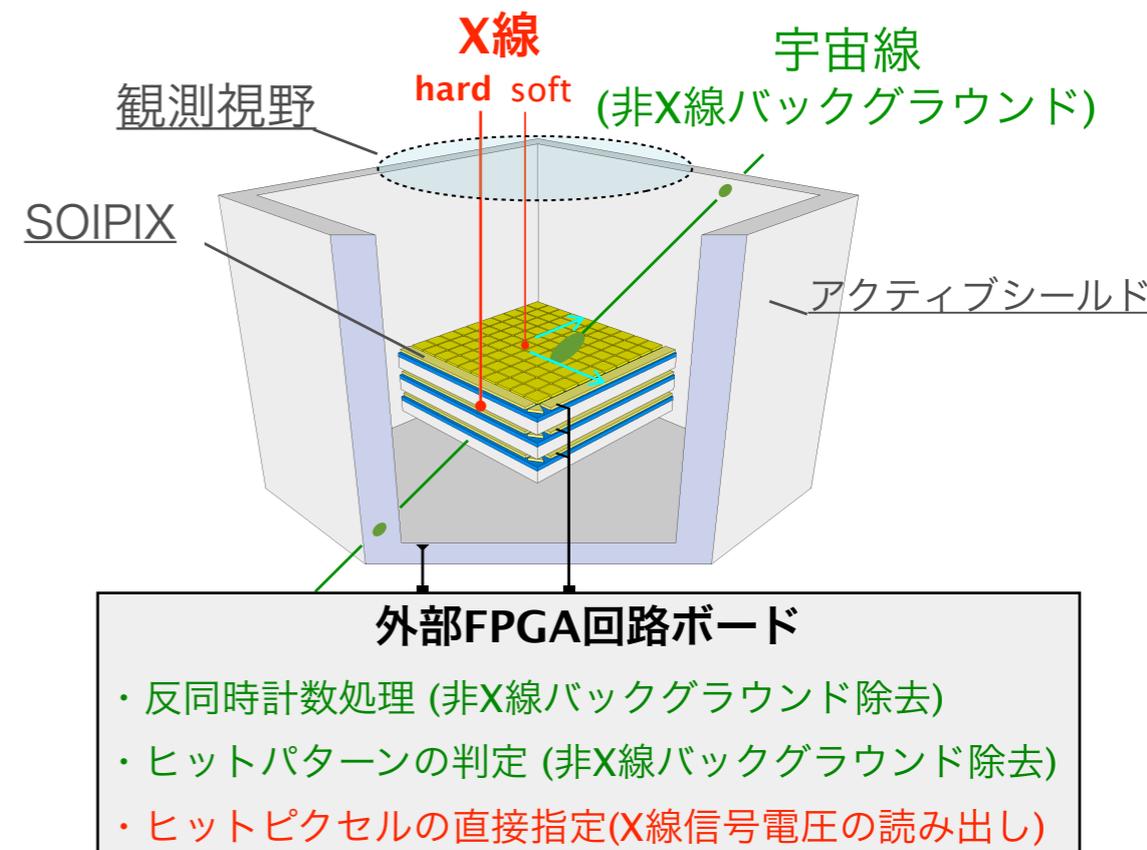
-> センサの時間精度は1kHz以上が要求される

次世代のカメラシステムに対する要求

次世代の観測カメラとして…

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： $< 10 e^-$ (rms)
- > 時間分解能： $< 10 \mu s$
- > 位置分解能： $< 100 \mu m$



◆ イベント駆動型SOIピクセル検出器 [XRPIXシリーズ]

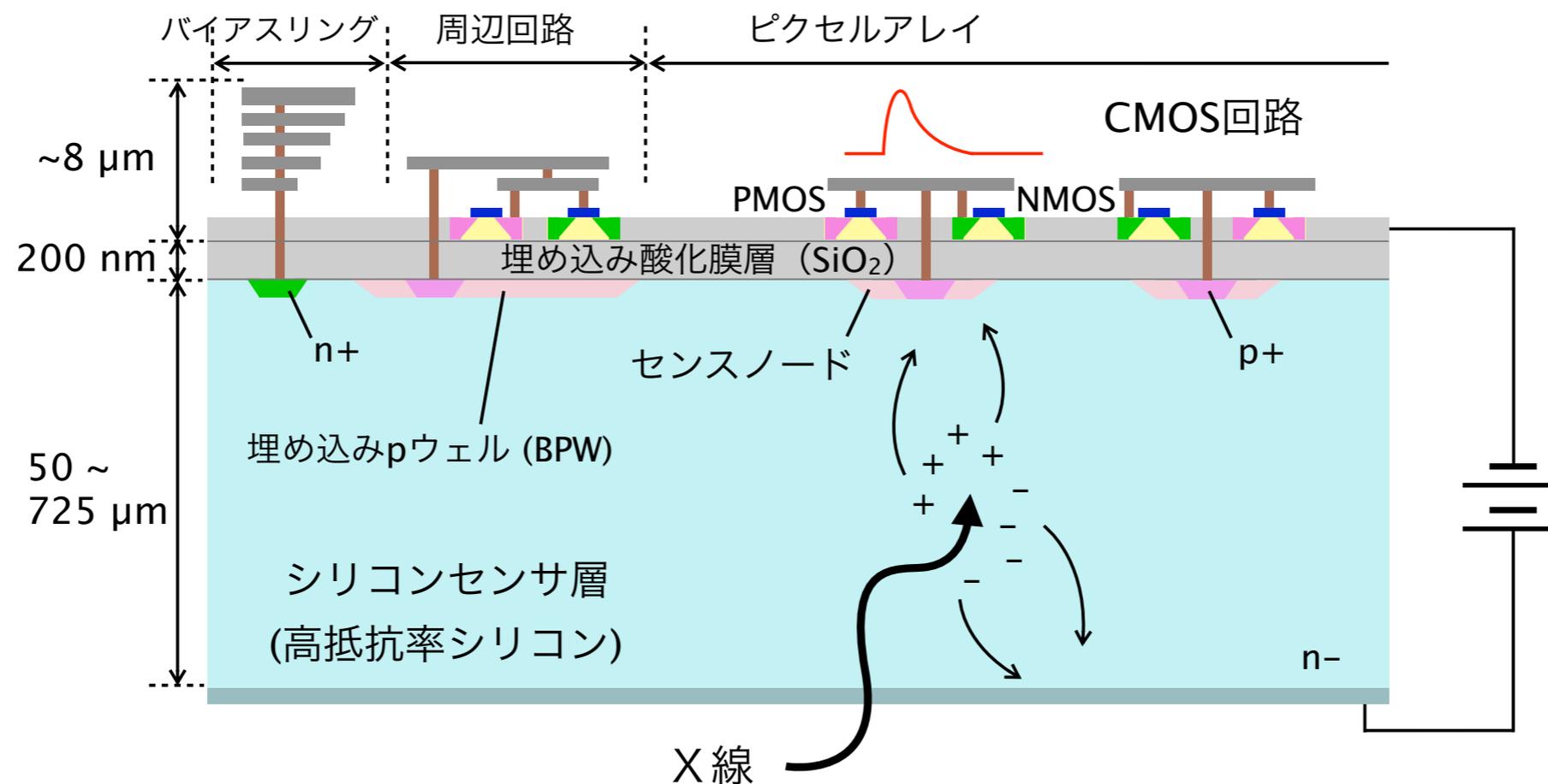
各ピクセルにコンパレータ回路を組み込み， イベント検出時の
トリガ情報出力機能 (タイミング・ヒット位置) を実装する。

- > 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

SOIピクセル検出器

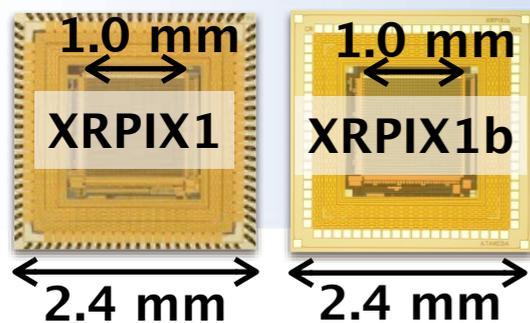
- Silicon-on-Insulator (SOI)技術を基盤とする読み出し回路部・センサ部
一体型放射線CMOSイメージセンサ (<https://soipix.jp/>)
*SOIピクセル検出器, SOIセンサ, SOIPIX, などともよばれている。
- 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) SOIPIXグループが中心に研究開発
- ラピスセミコンダクタ社 0.2 μm FD-SOIピクセルプロセス



高いX線感度と高度な信号処理を両立

XRPIXシリーズ

2010



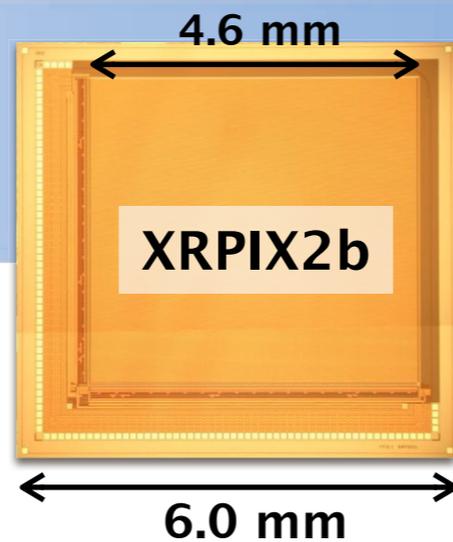
First Model
Event-driven
readout

2011



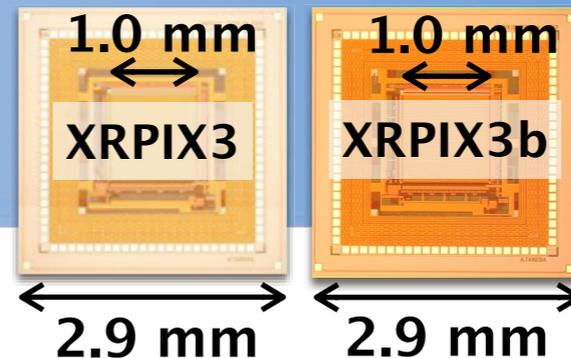
Middle Size

2012



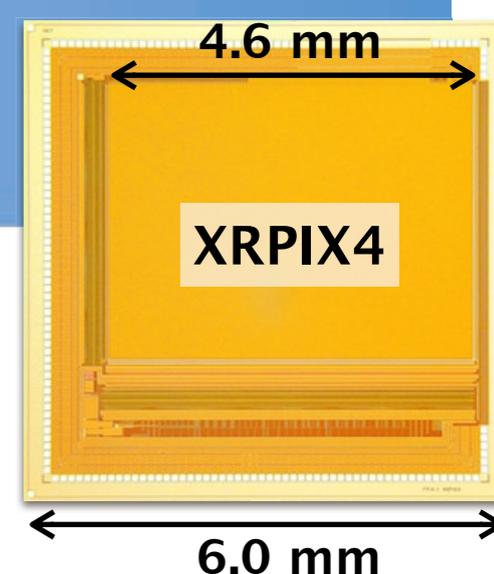
Buttable

2013



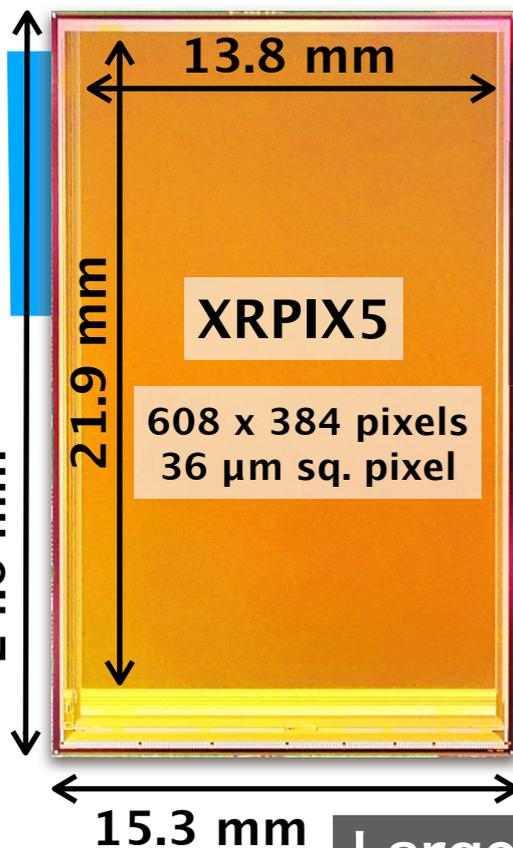
Charge Sensitive
Amplifier

2014



New Readout
Circuit

2015



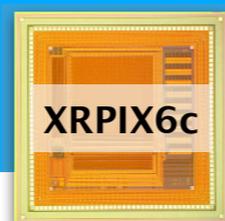
Large Size

2016



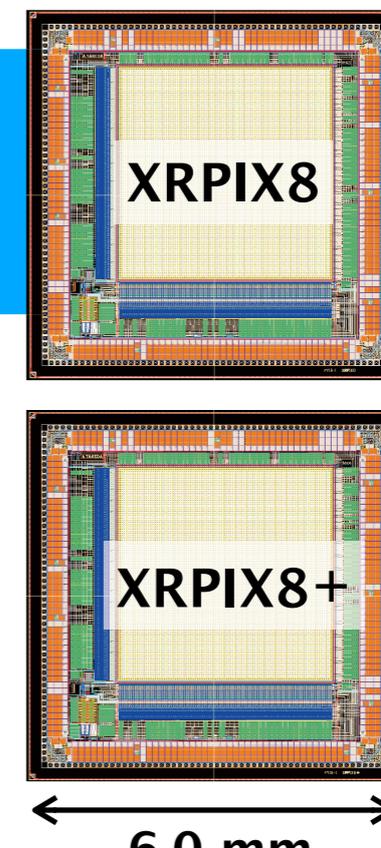
Pixel Structure

2017



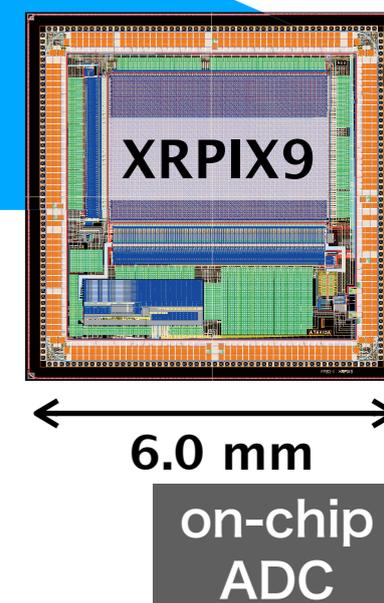
D-SOI
Structure

2018

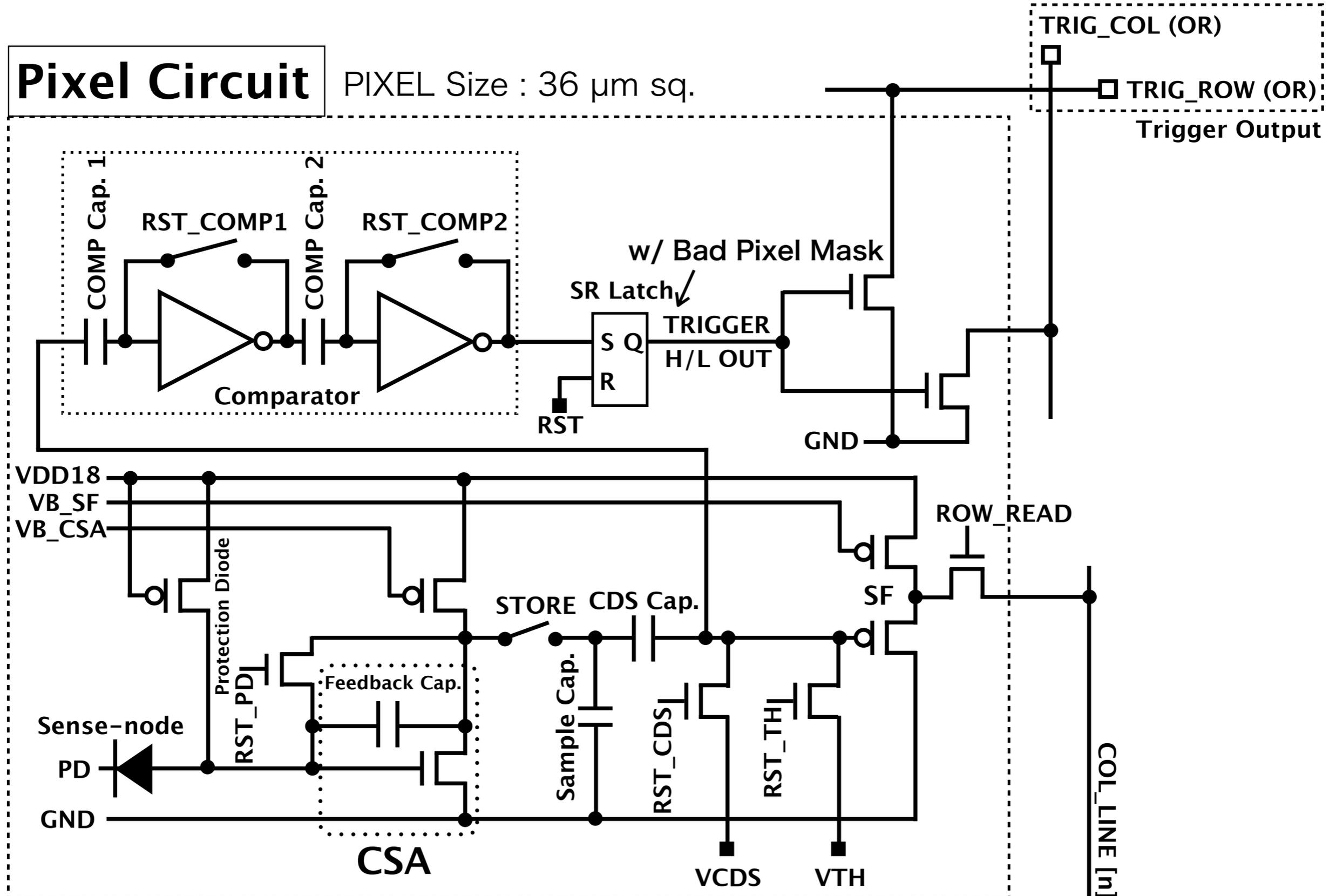


PDD
Structure

2020



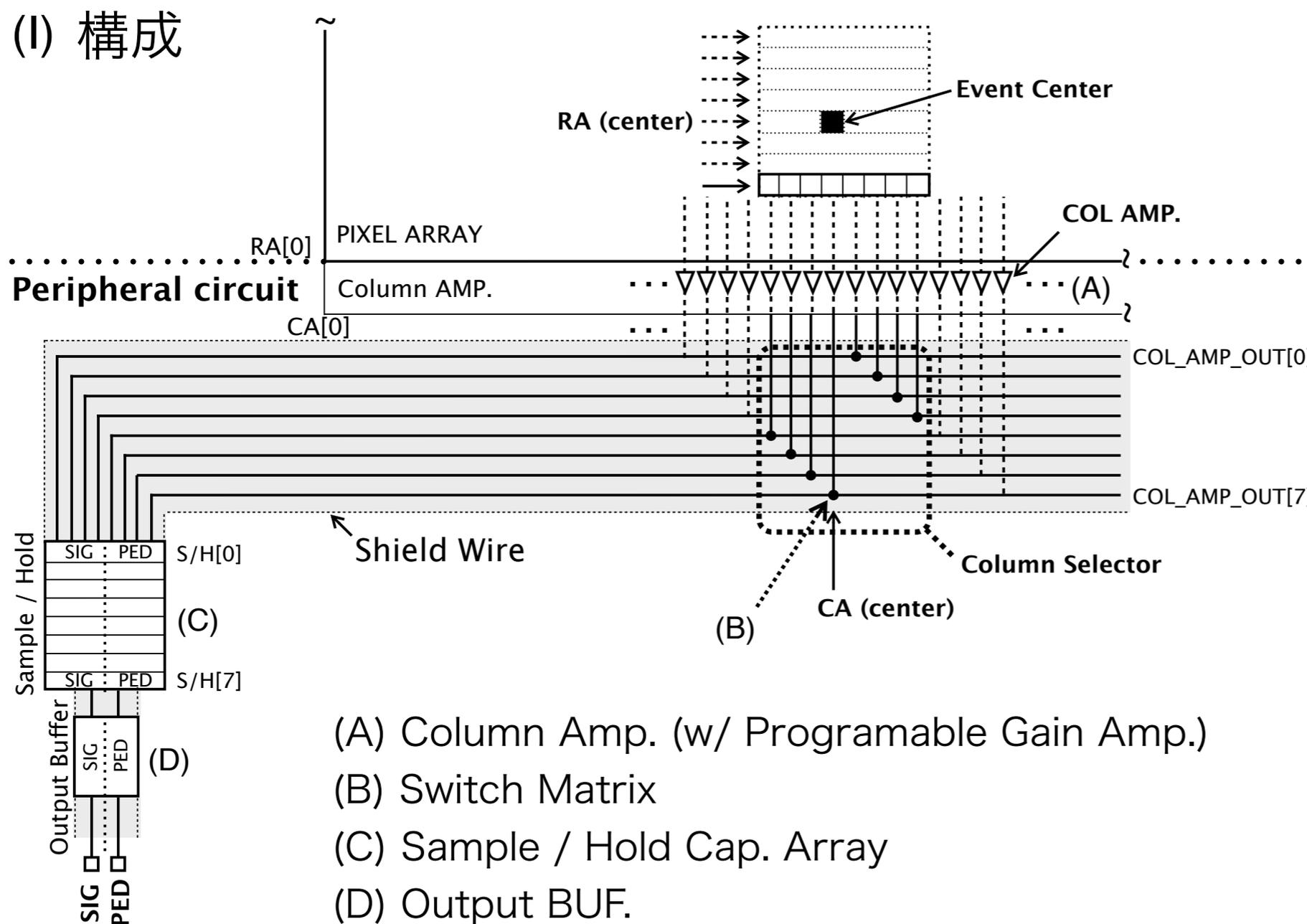
ピクセル回路



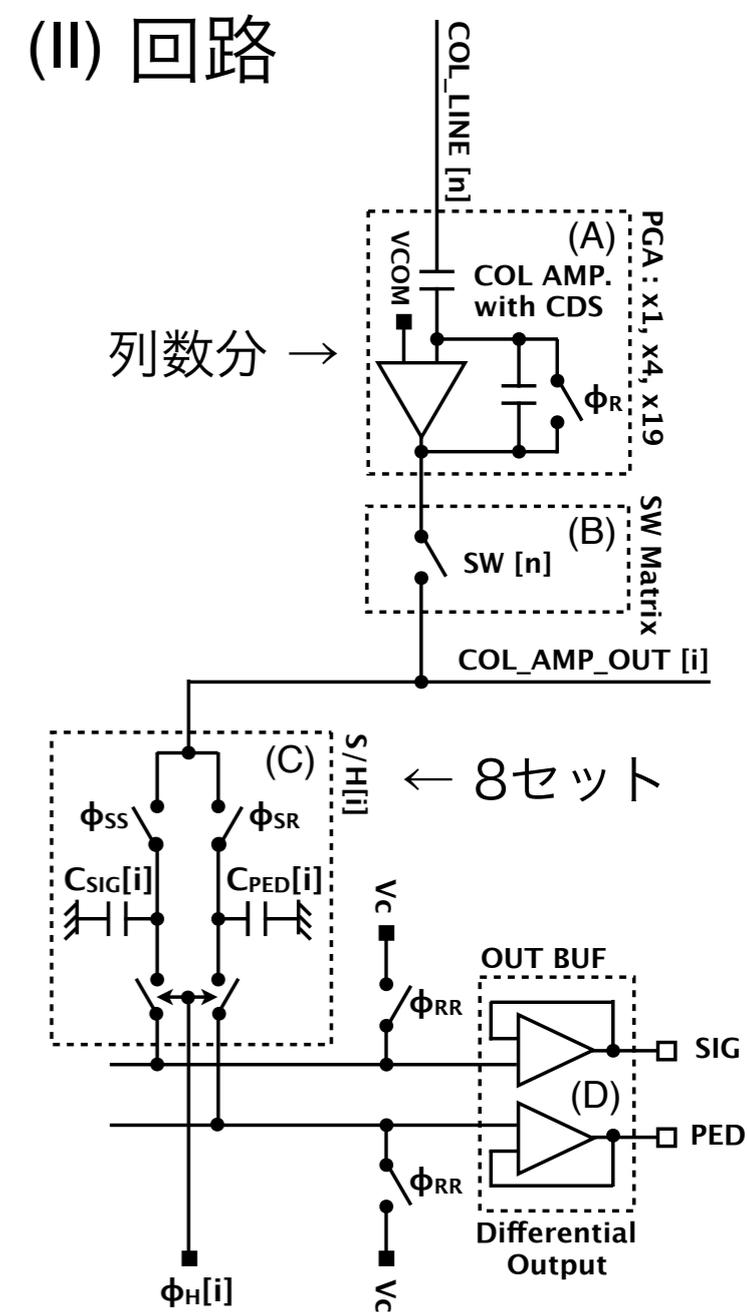
アナログ信号読み出し回路

8列ずつ選択可能。読み出し行数分だけ選択する。X線を対象とするため、 8×8 ピクセル以下の読み出しを想定している。

(I) 構成



(II) 回路



分光性能

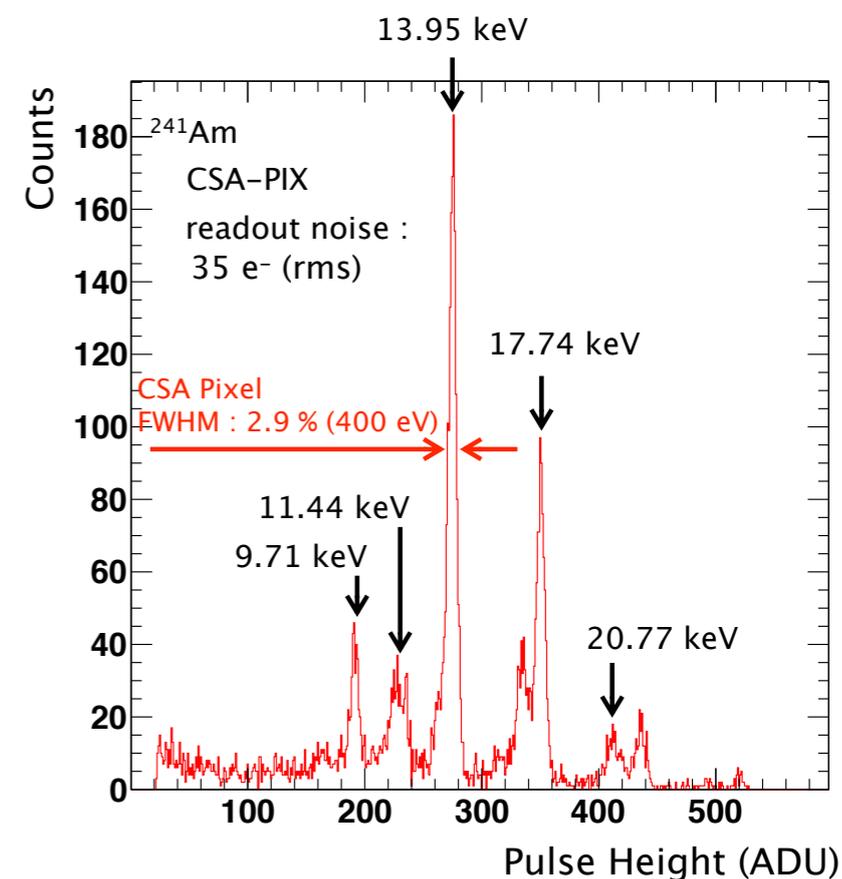
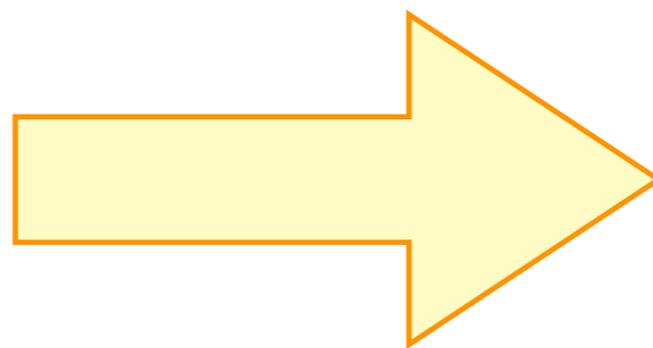
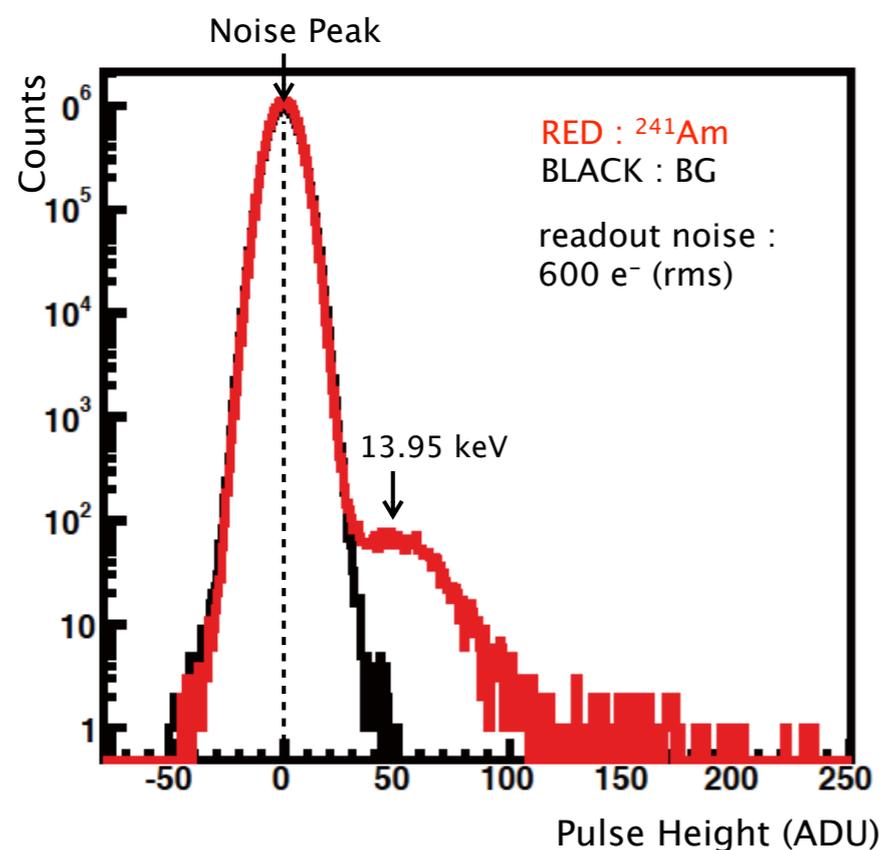
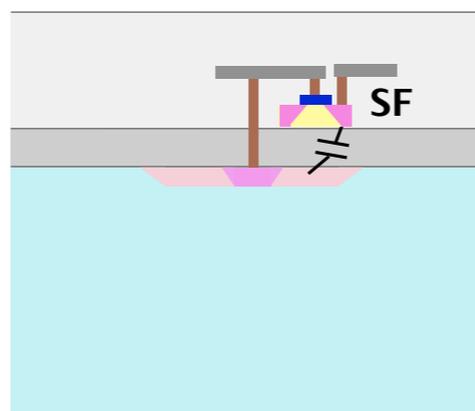
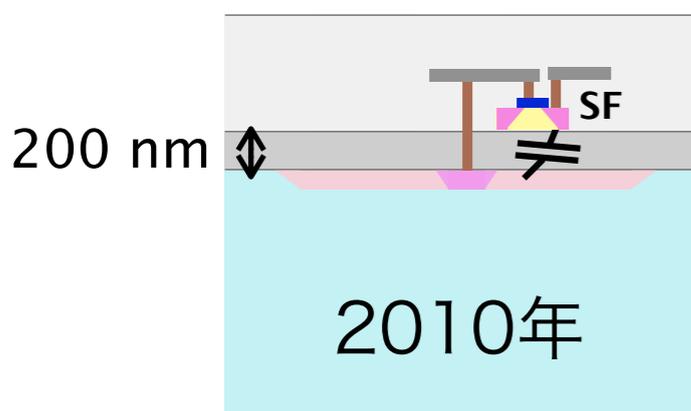
分光性能の向上

◆ 読み出しノイズの低減

[Takeda + JINST (2015)]

センサ部容量の低減

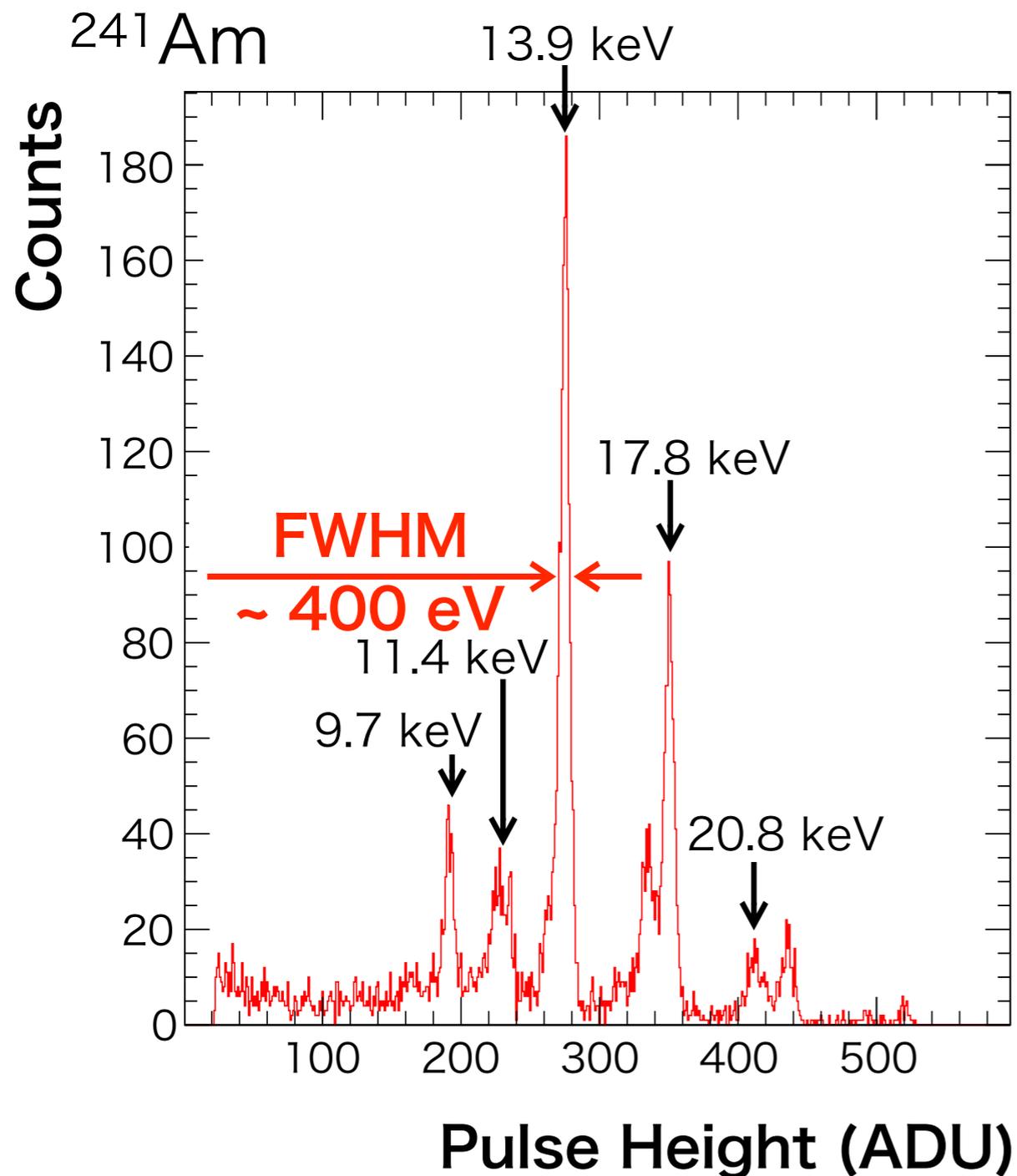
電荷感応アンプ(CSA)の導入



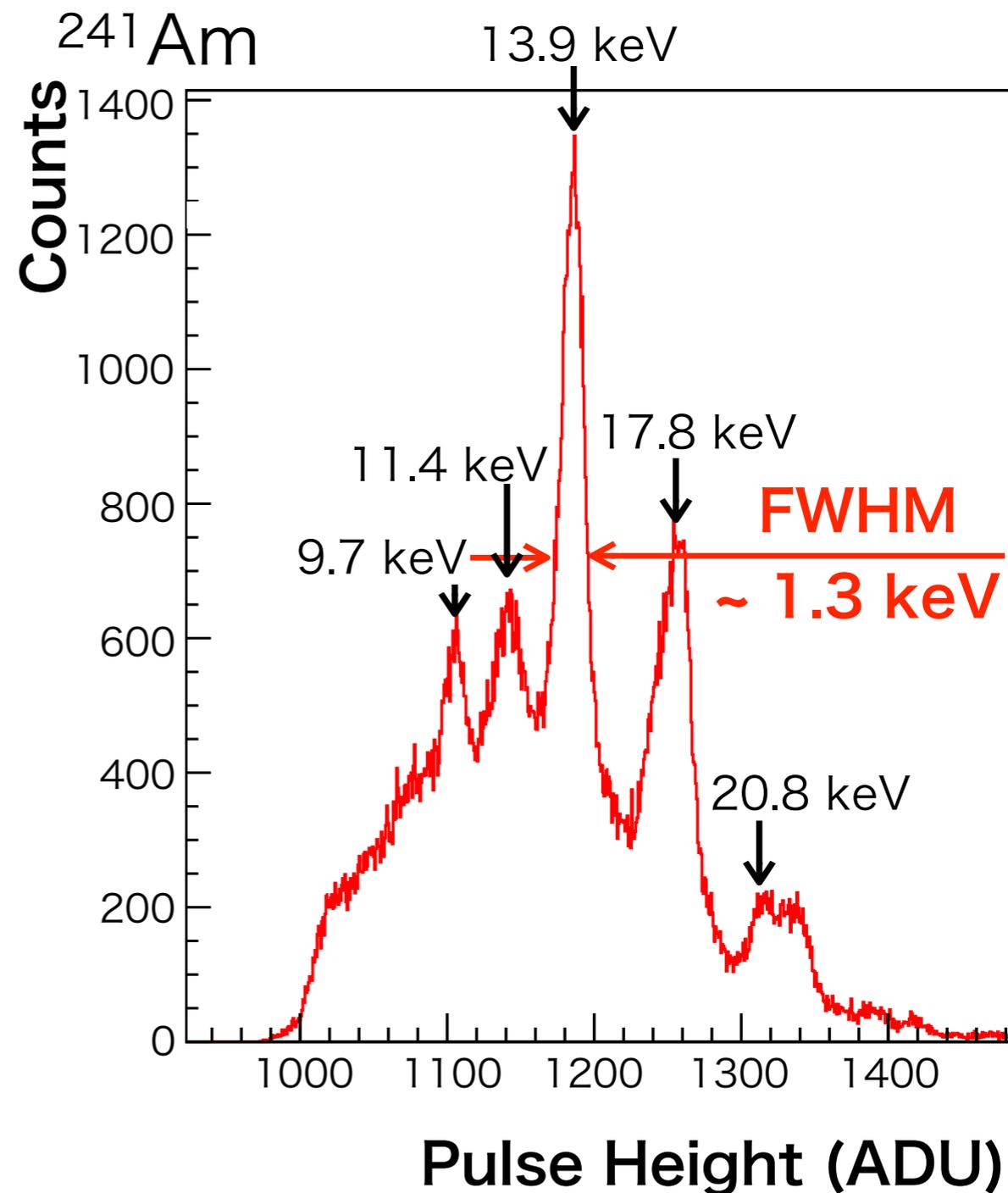
ノイズレベルを1桁低減 [~600 e⁻ (rms) → 35 e⁻ (rms)]

イベント駆動によるスペクトルの劣化

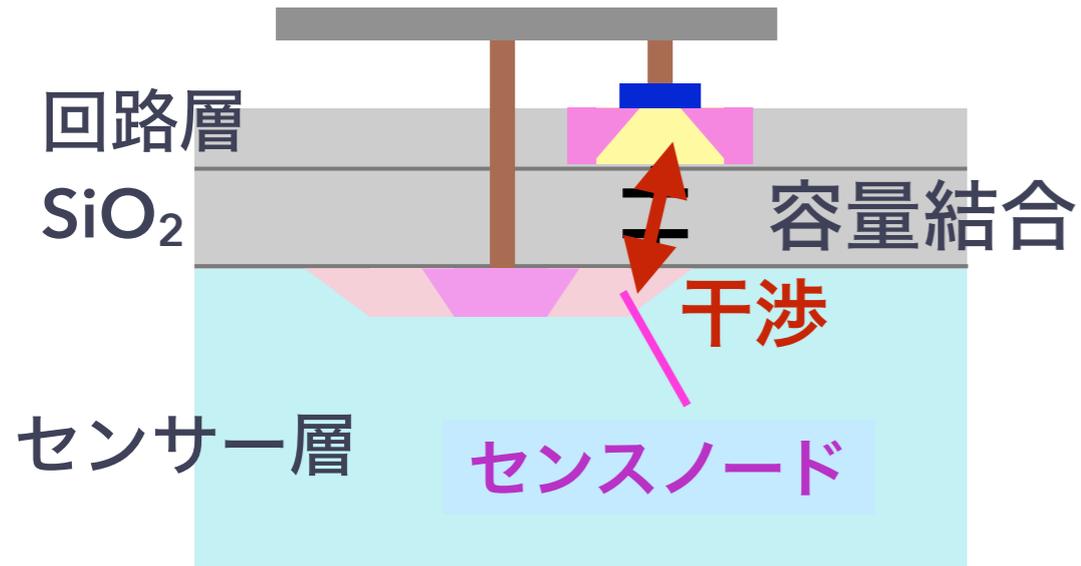
フレーム読み出し (トリガなし)



イベント駆動読み出し (トリガあり)



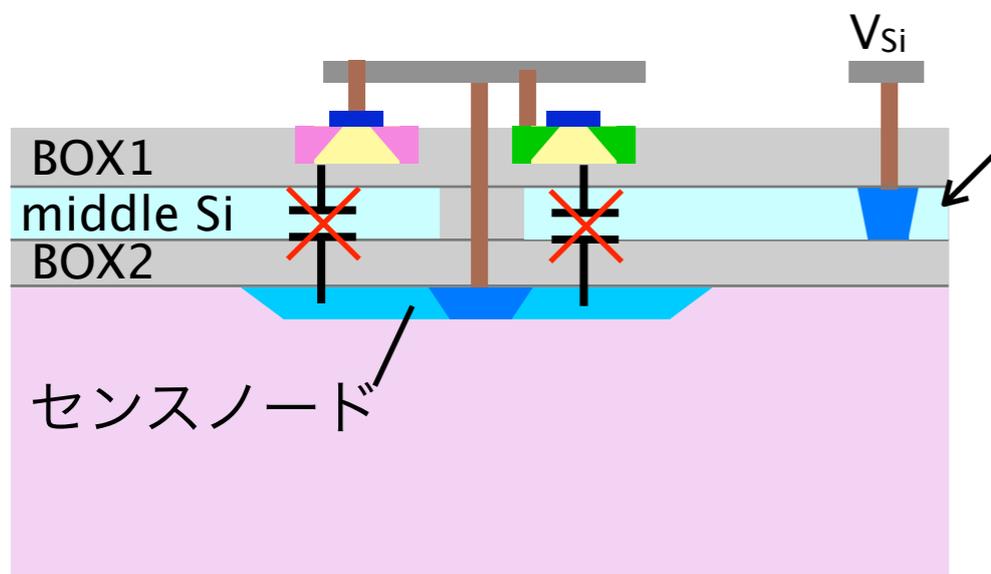
分光性能向上のための研究開発



寄生容量を介して，トリガ出力時の信号変化が干渉し，アナログ信号に影響を与えていた。

-> 容量結合を抑制することが重要
(Takeda+2014, Ohmura+2016)

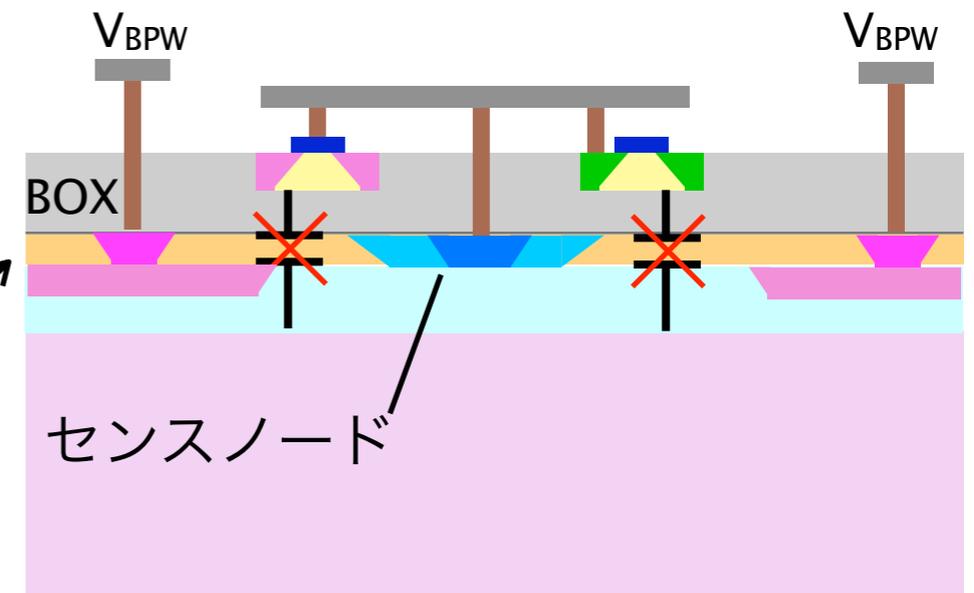
容量結合を抑制する手法



Double SOI構造
-> XRPIX6D

中間 Si 層

固定電位層



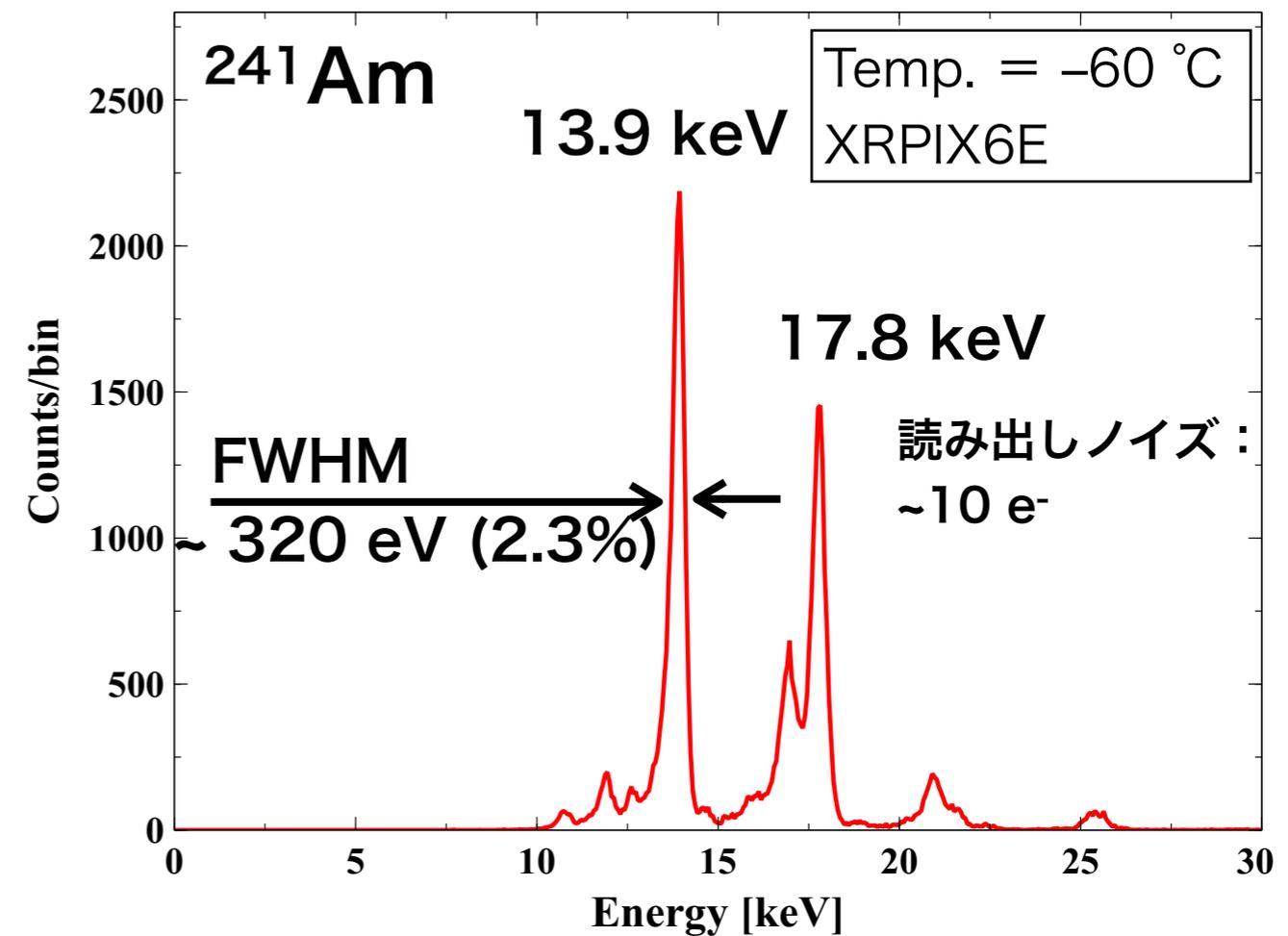
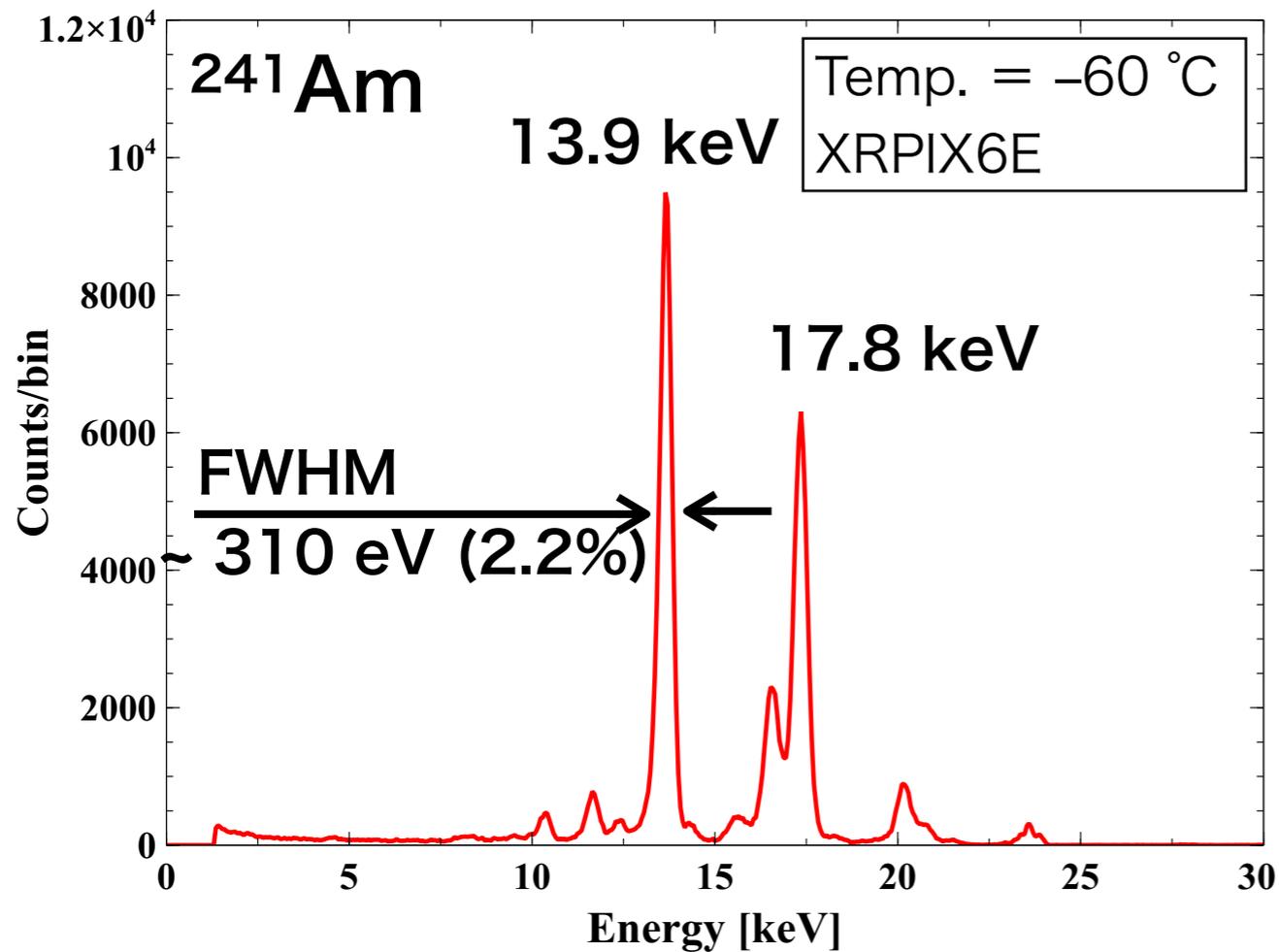
Pinned Depleted Diode 構造
-> XRPIX6E

X線スペクトル

*ゲイン補正なし

フレーム読み出し (トリガ 不使用)

イベント駆動読み出し (トリガ 使用)

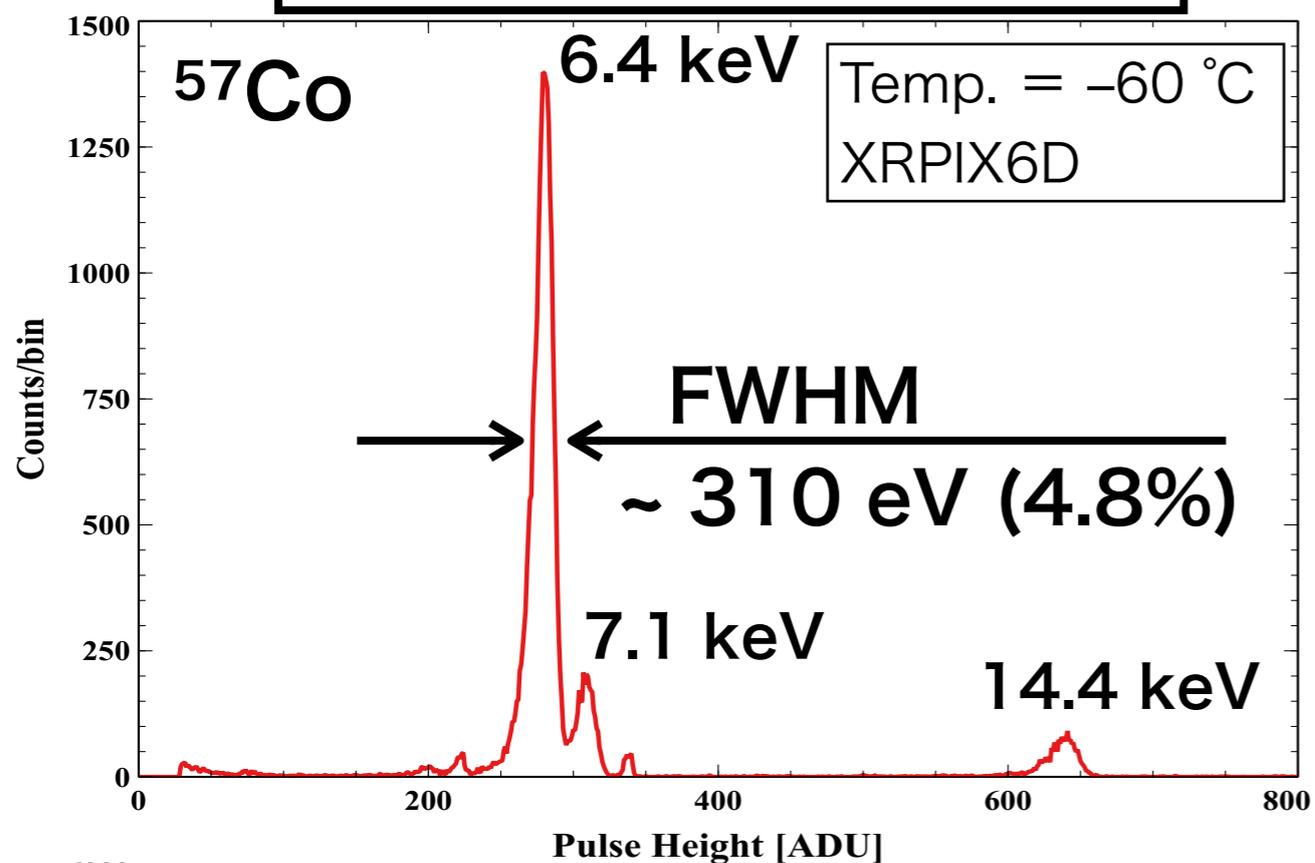


イベント駆動読み出しの大幅な性能の向上に成功！

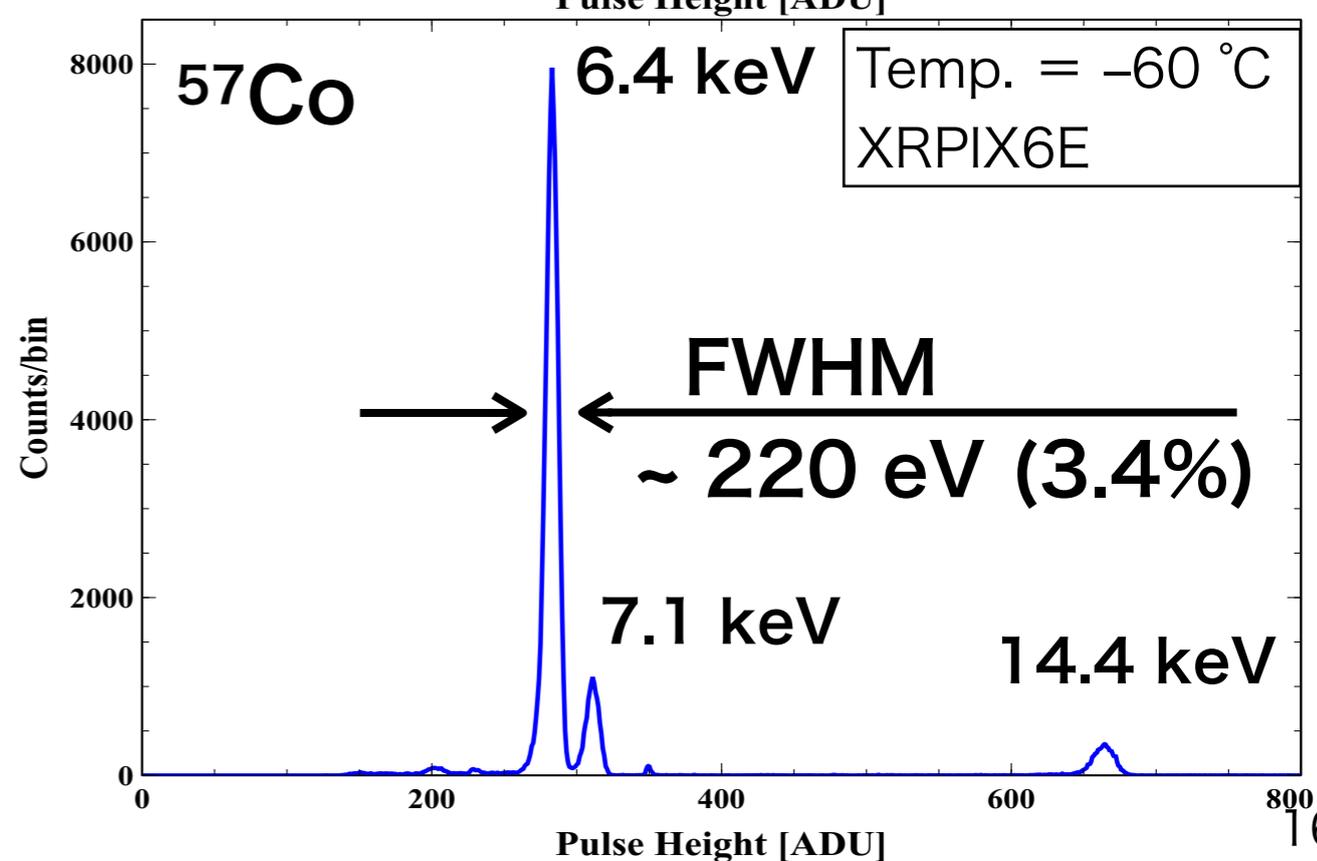
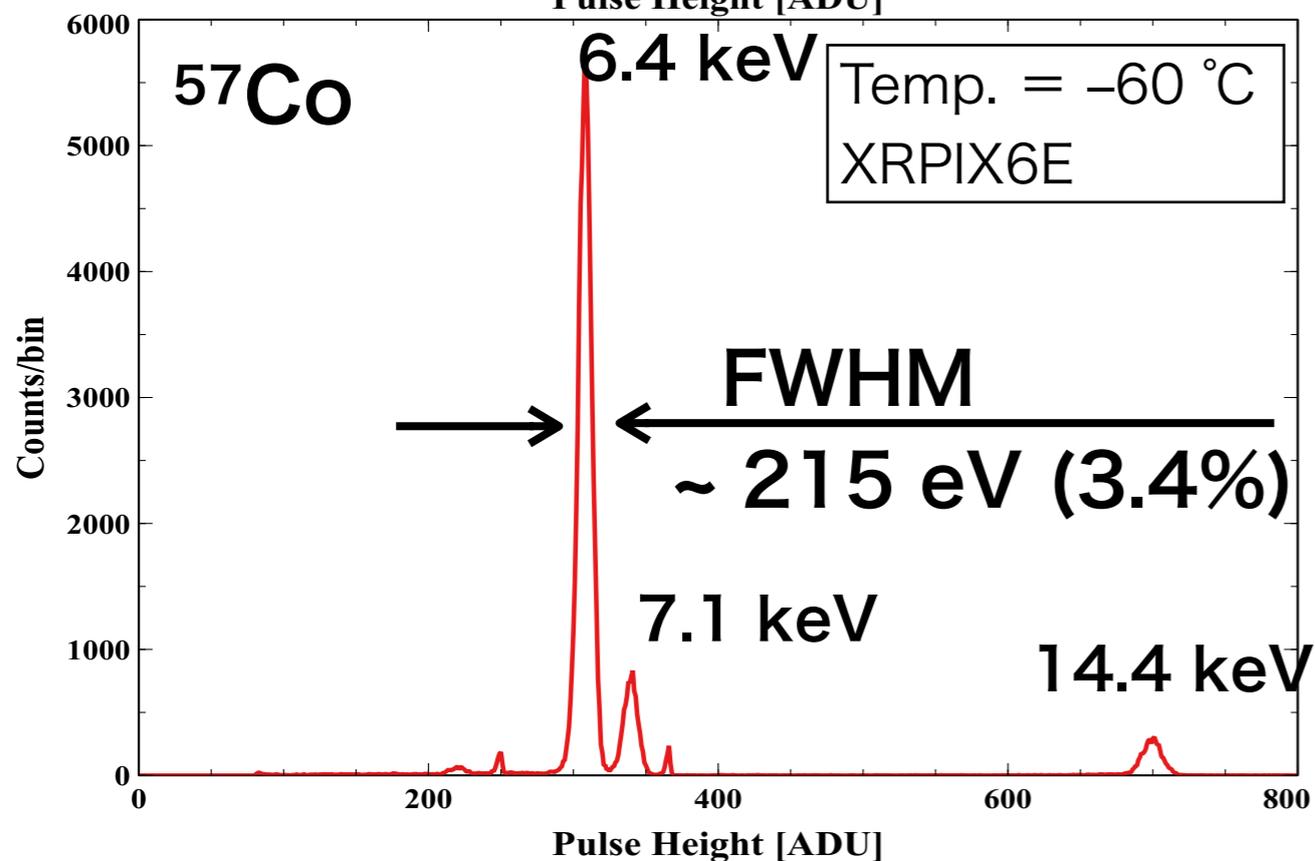
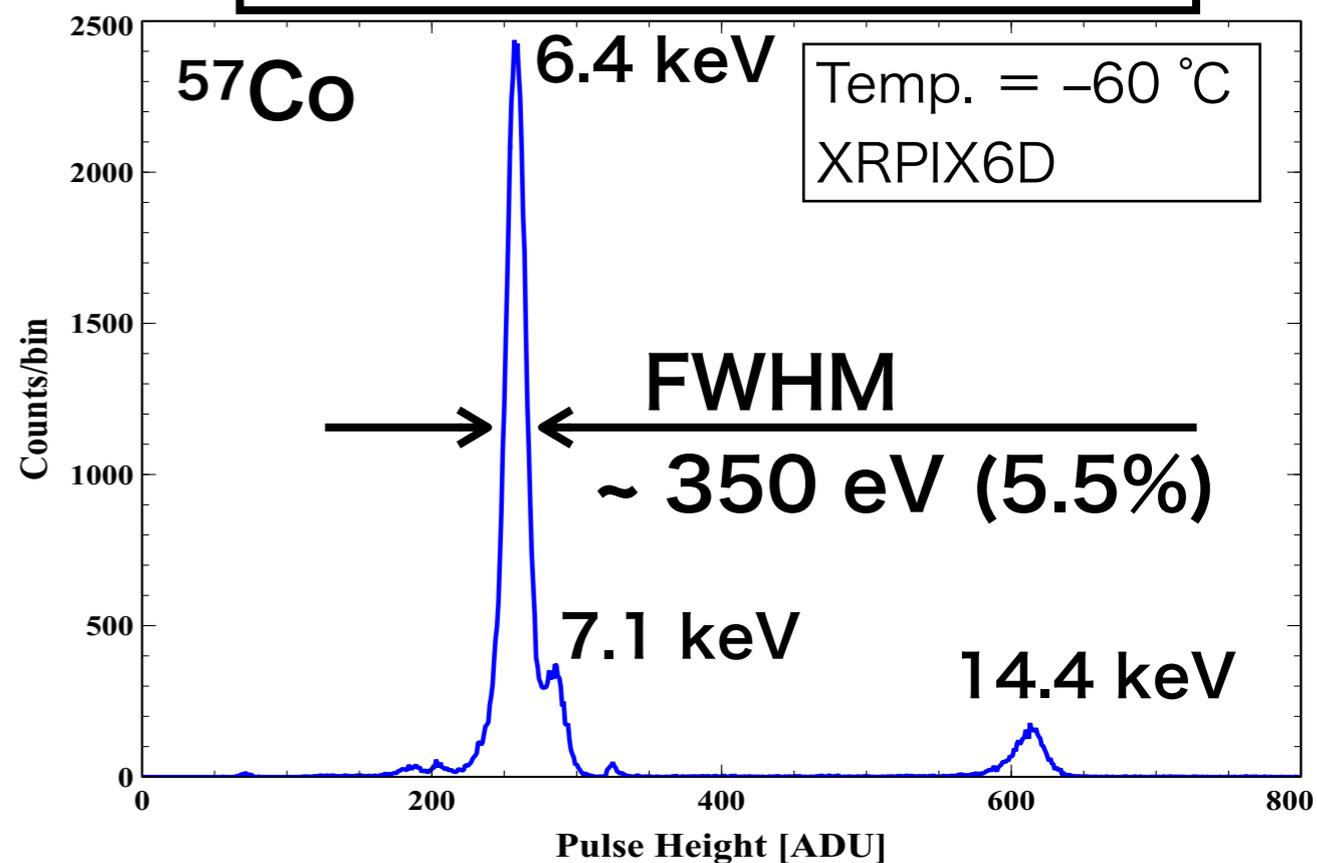
X線スペクトル | 構造の比較

*ゲイン補正なし

フレーム読み出し (トリガ 不使用)

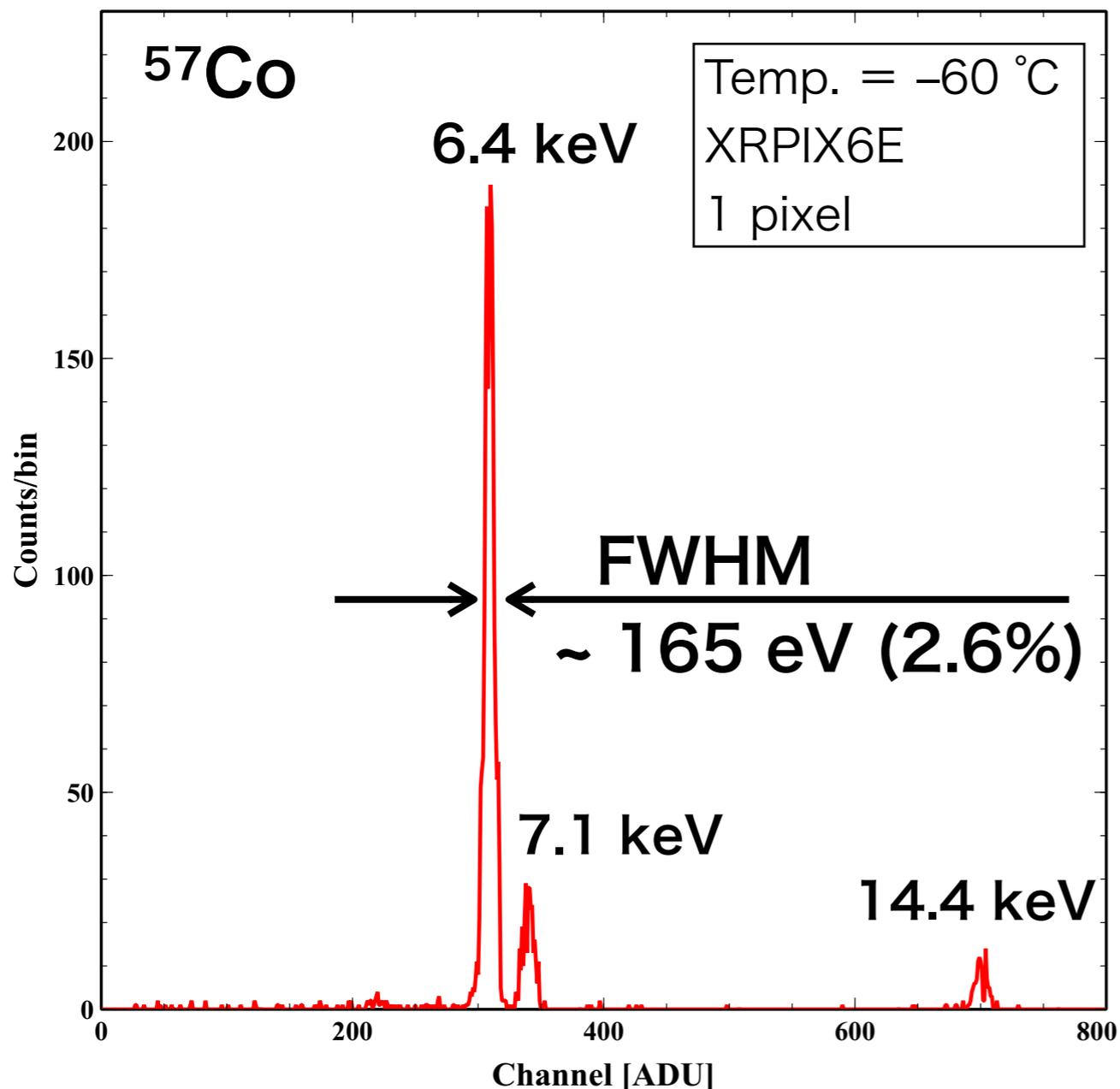


イベント駆動読み出し (トリガ 使用)

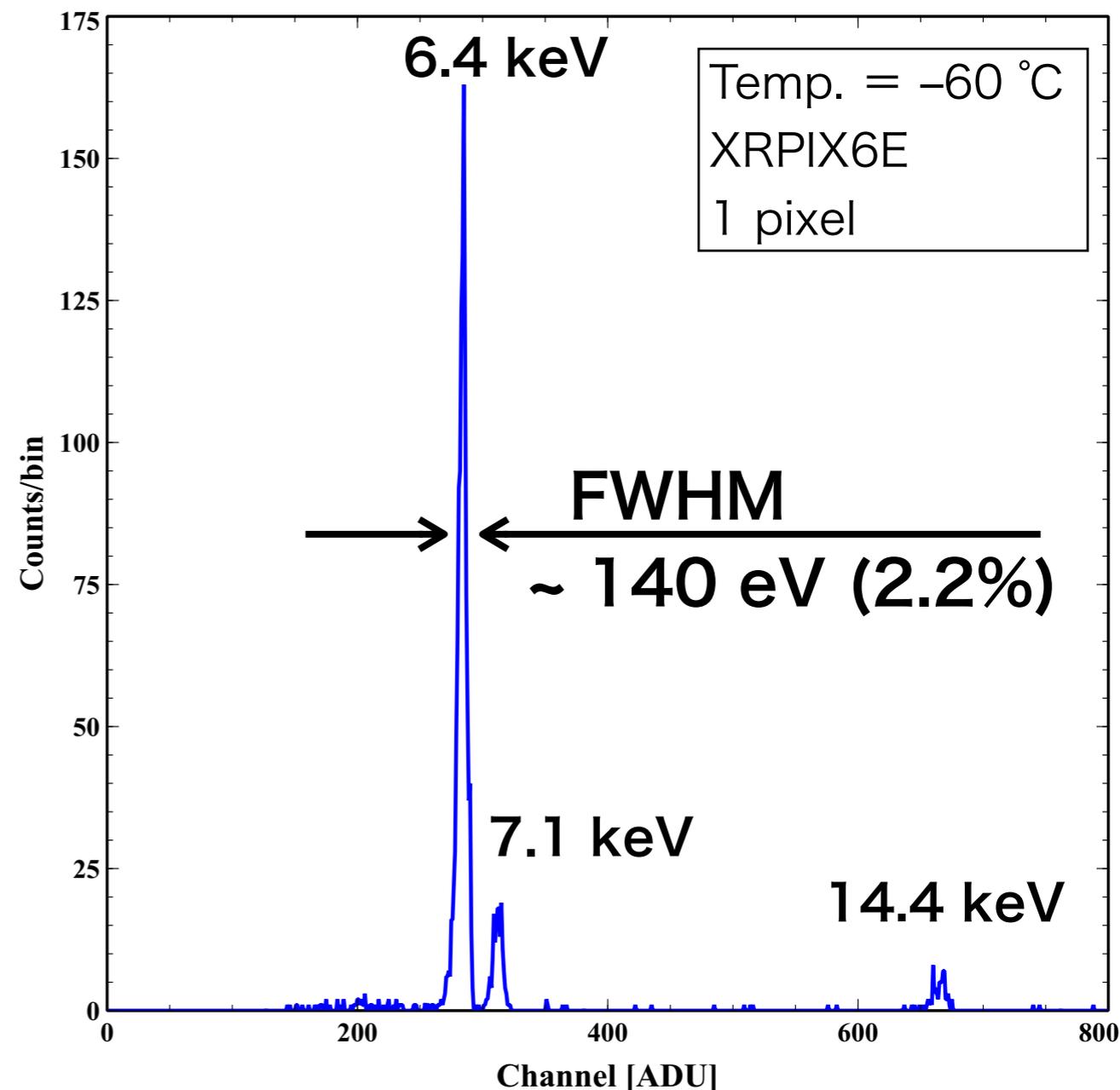


X線スペクトル | 1ピクセル

フレーム読み出し (トリガ 不使用)



イベント駆動読み出し (トリガ 使用)

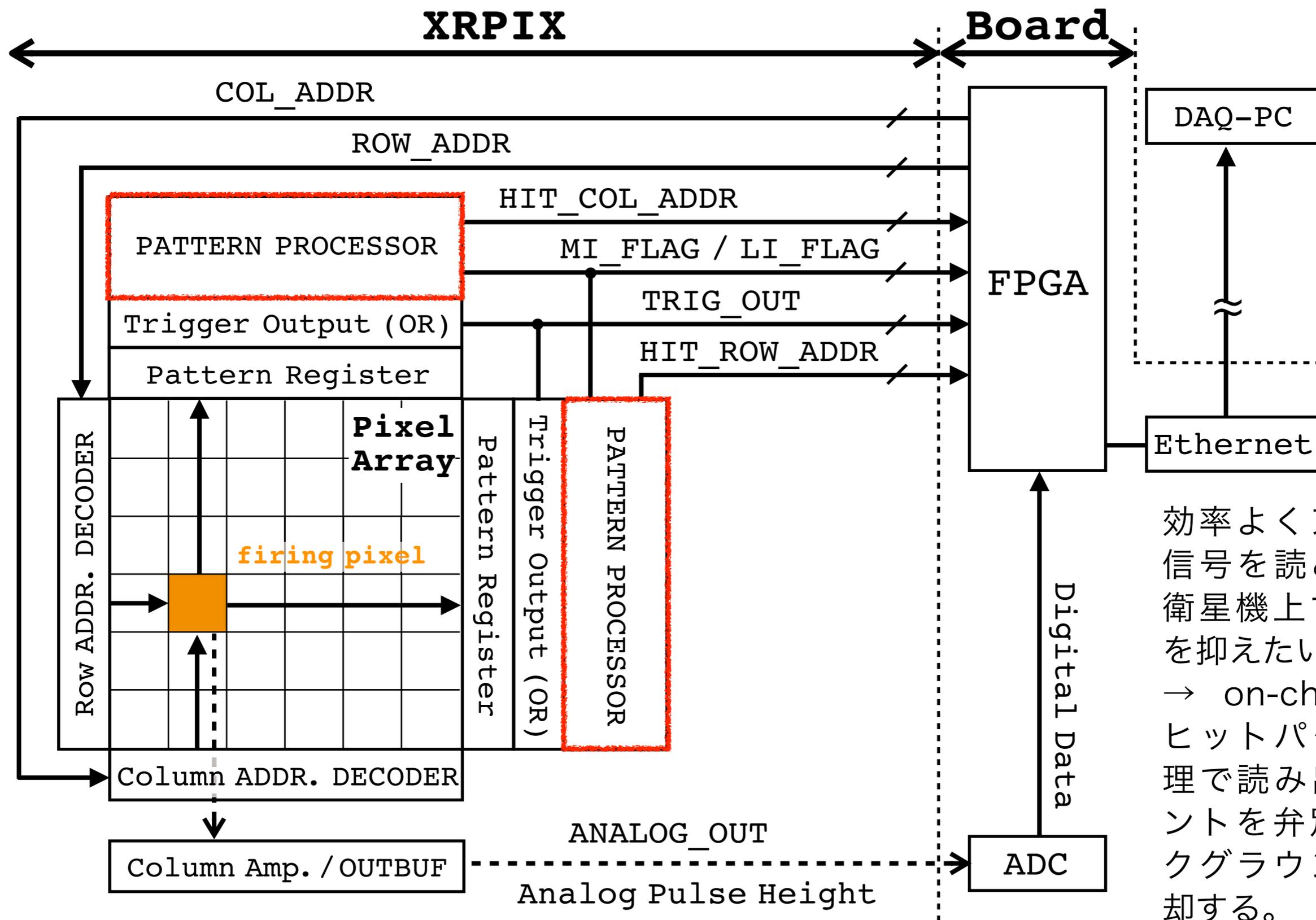


イベント駆動読み出しで分光性能 $\sim 140\text{ eV}$ (FWHM, 6.4 keV) を達成 !!

-> FORCE 搭載における要求性能 ($300\text{ eV FWHM @ }6\text{ keV}$) へ到達した

on-chipパターン処理回路

イベント駆動読み出し



効率よくアナログ信号を読み出す。衛星機上での処理を抑えたい。
 → on-chipによるヒットパターン処理で読み出すイベントを弁別しバックグラウンドを棄却する。

ヒットパターンによる検出粒子の弁別

ヒットパターンのデータは、射影されパターンレジスタに格納する。これらの情報は、検出粒子の弁別に利用することができる。

【パターンの例】

Multi-island (MI) flag : 複数の島の検出

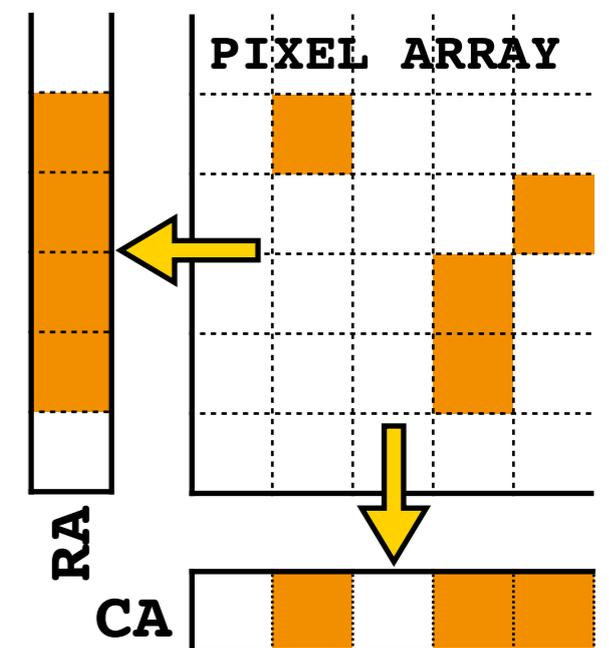
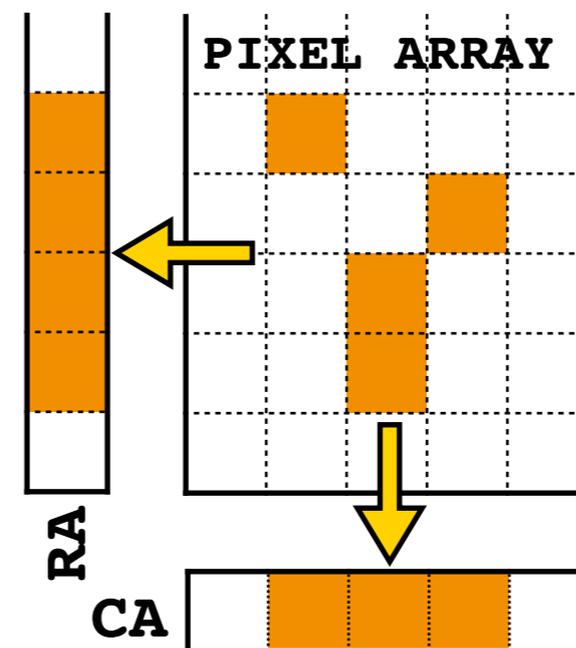
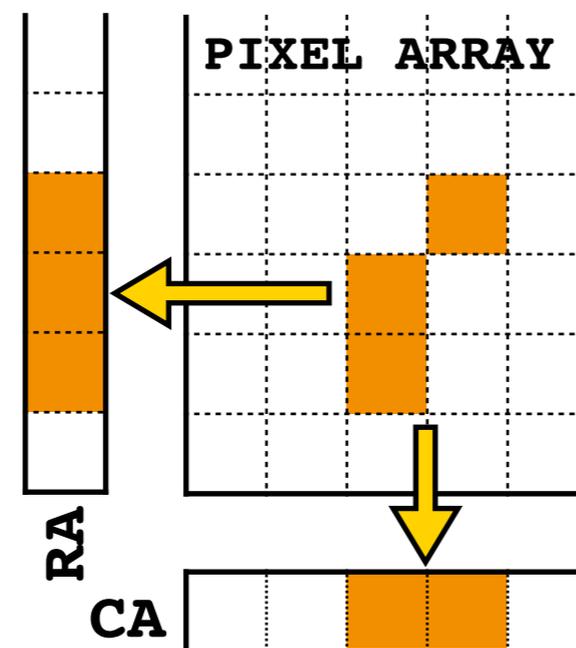
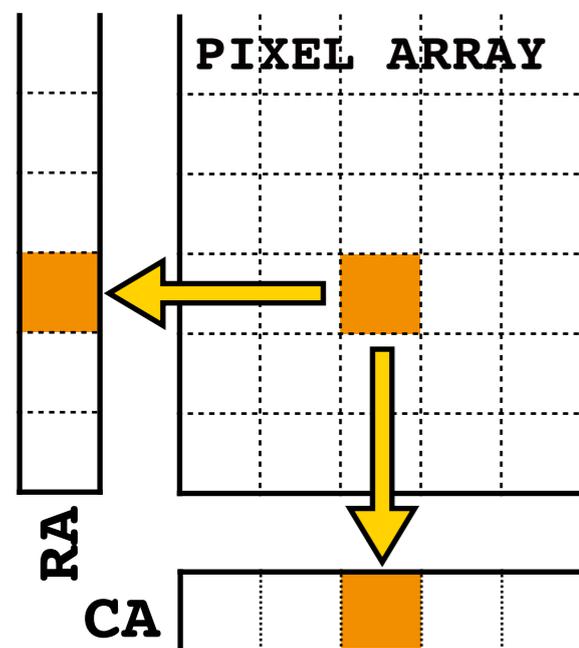
Long-island (LI) flag : 長い島の検出 (RA側+CA側の長さで判定) 長さ閾値 : 3 <

(a) MI flag [LOW]
LI flag [LOW]

(b) MI flag [LOW]
LI flag [HIGH]

(c) MI flag [LOW]
LI flag [HIGH]

(d) MI flag [HIGH]
LI flag [HIGH]

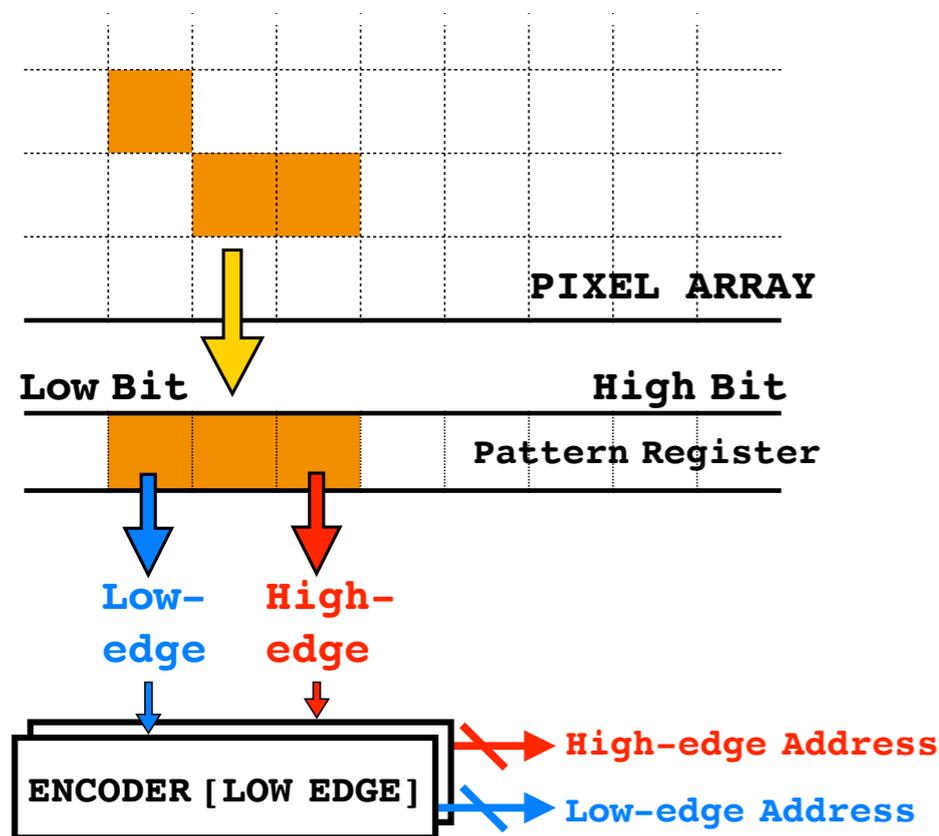


■ : 閾値レベルを超えた信号を検出したピクセル

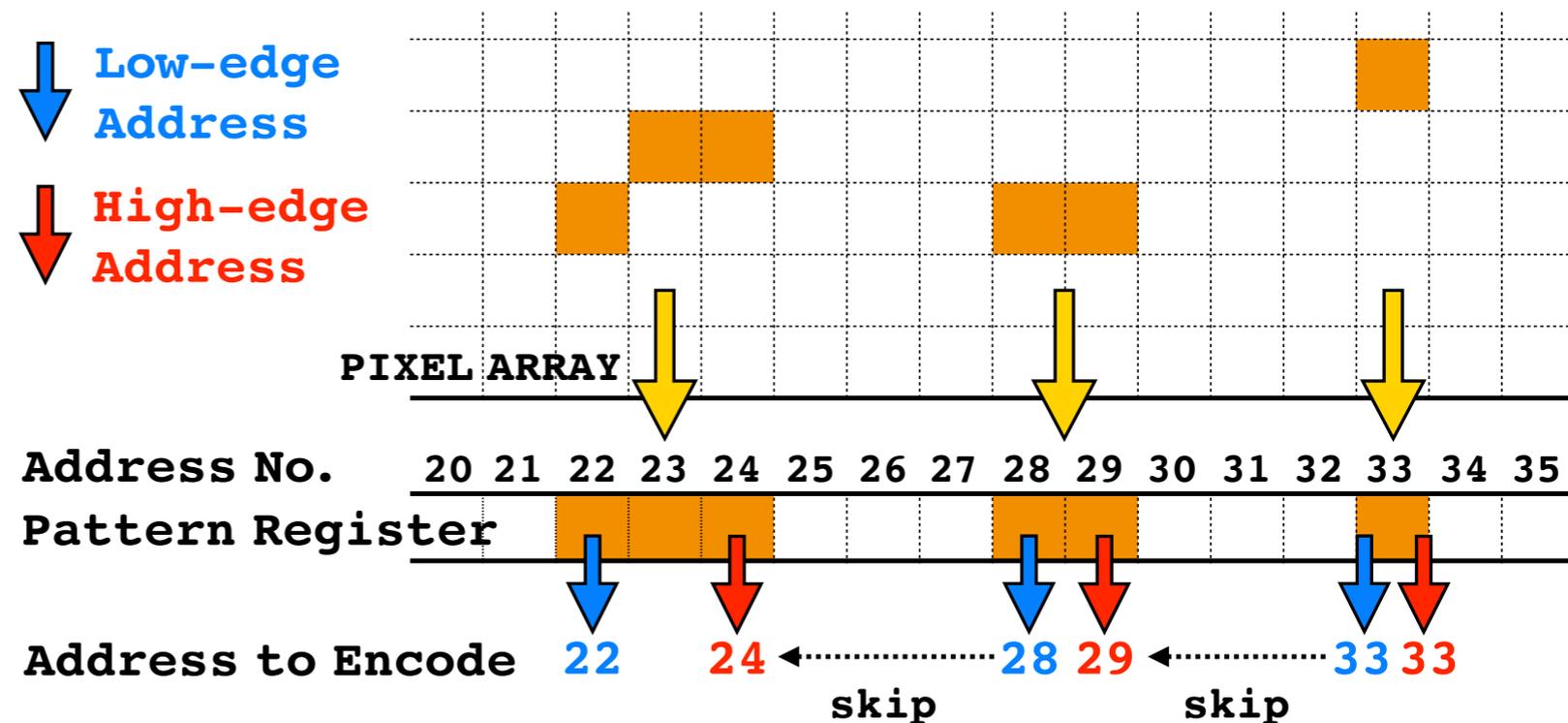
ヒットパターン座標の取得

パターンレジスタから、ビット列の端のアドレスを得る。この情報により、パターンの空間的な広がりサイズ（長さ）を得ることができる。複数ヒットがあった場合は、基本的に棄却するが、パターンスキナー回路により全てのヒットアドレスを得る機能も実装している。

ビット列端からアドレスを得る

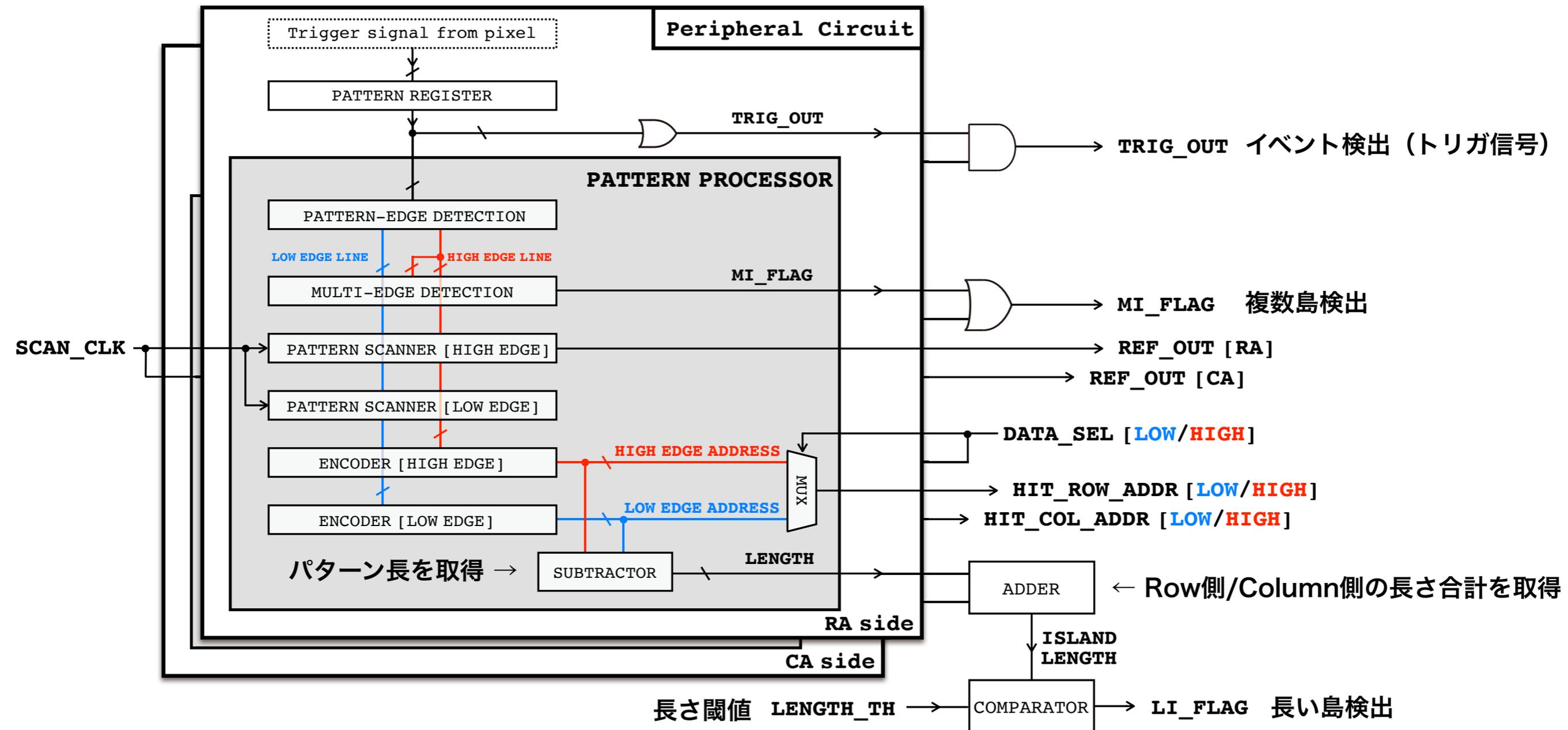


複数の島が検出された場合もアドレスを得るスキャン機能を実装している



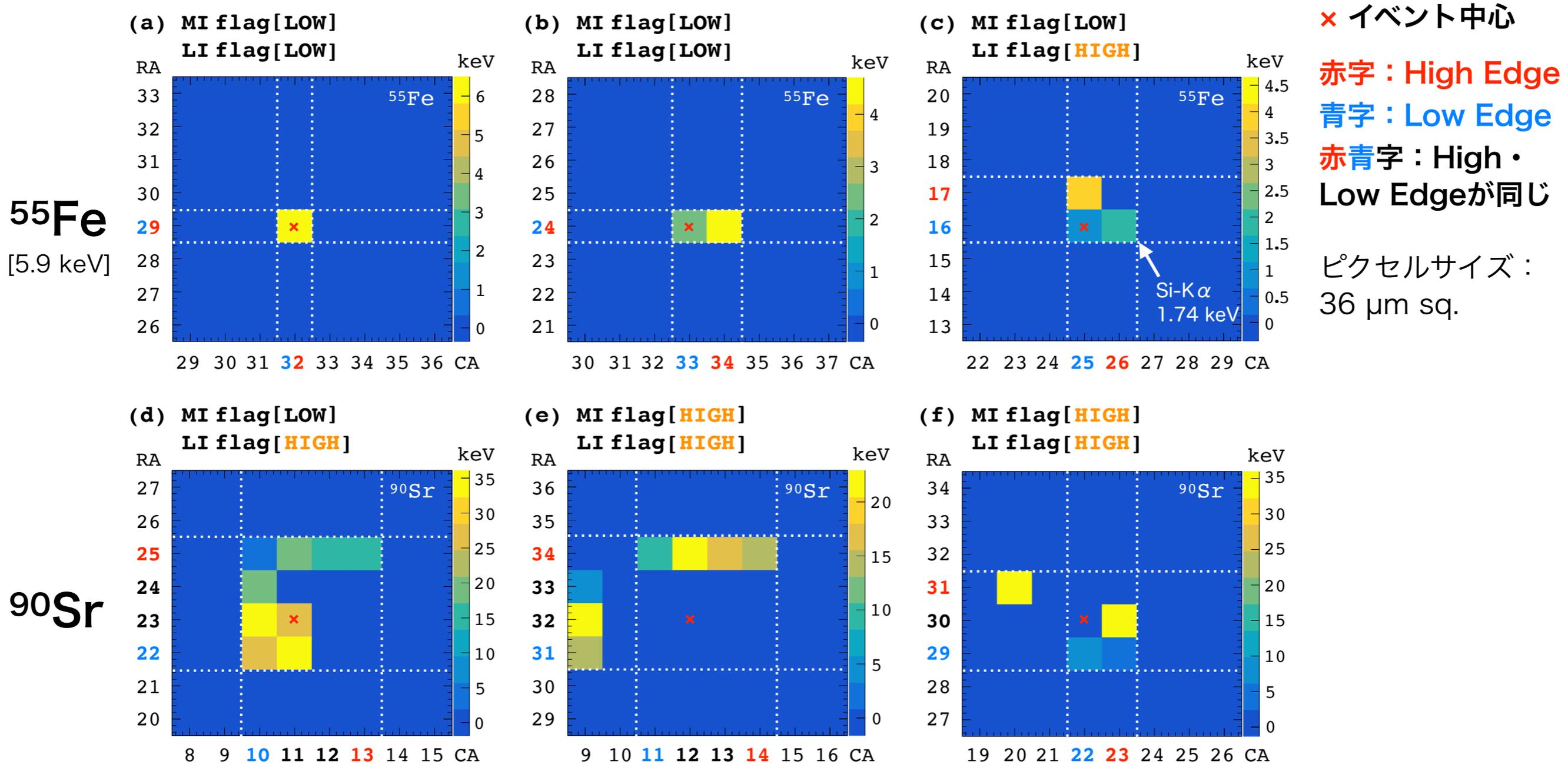
パターン処理回路

on-chipで実装しているパターン処理回路の構成ブロック図は下記の通り。
パターンレジスタの値をシンプルなデジタル回路で処理している。



イベント例

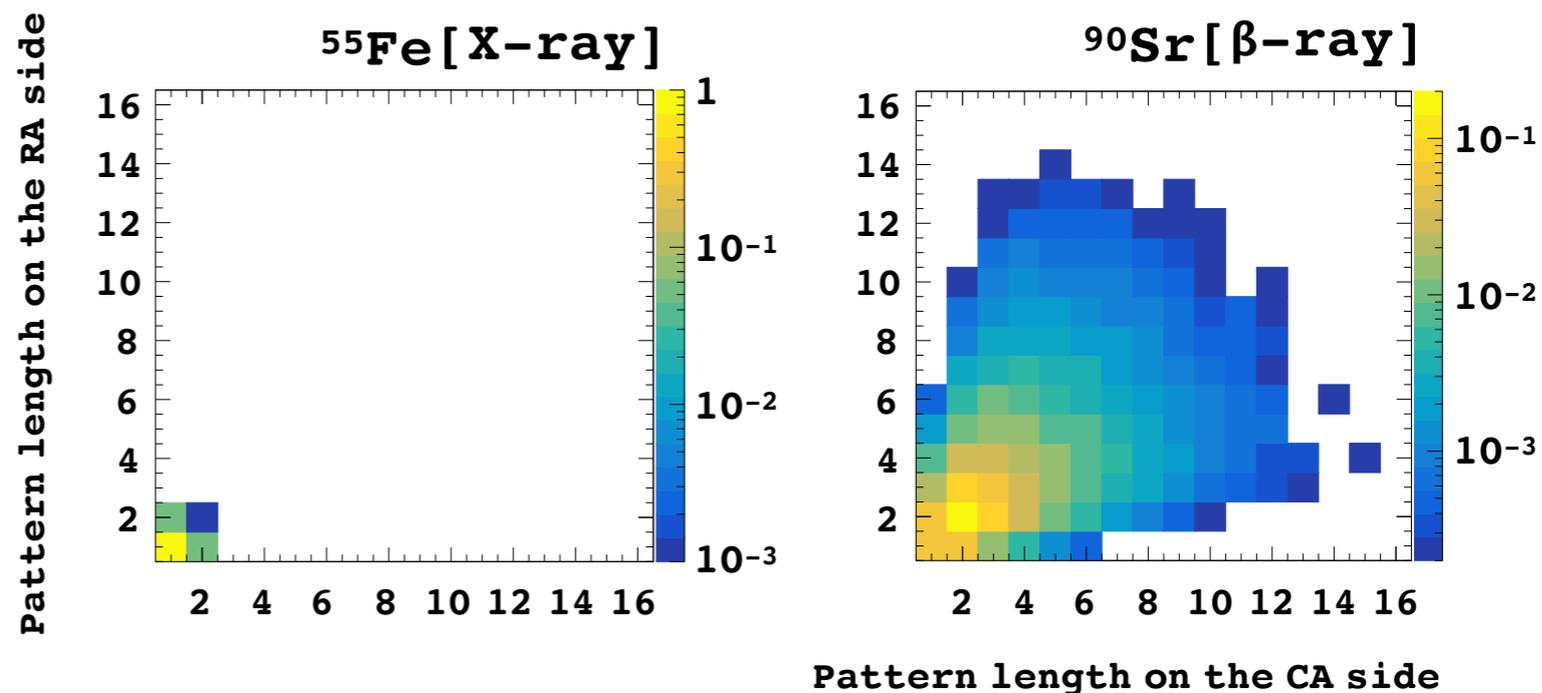
実機を用いたイベント取得例。イベント中心の情報に基づき 8 × 8ピクセルのアナログ信号を読み出している。



パターン長分布

パターン長分布から、X線「候補」の弁別が可能。
X線やバックグラウンドになる荷電粒子のエネルギーによる。

*あくまでデモンストレーション



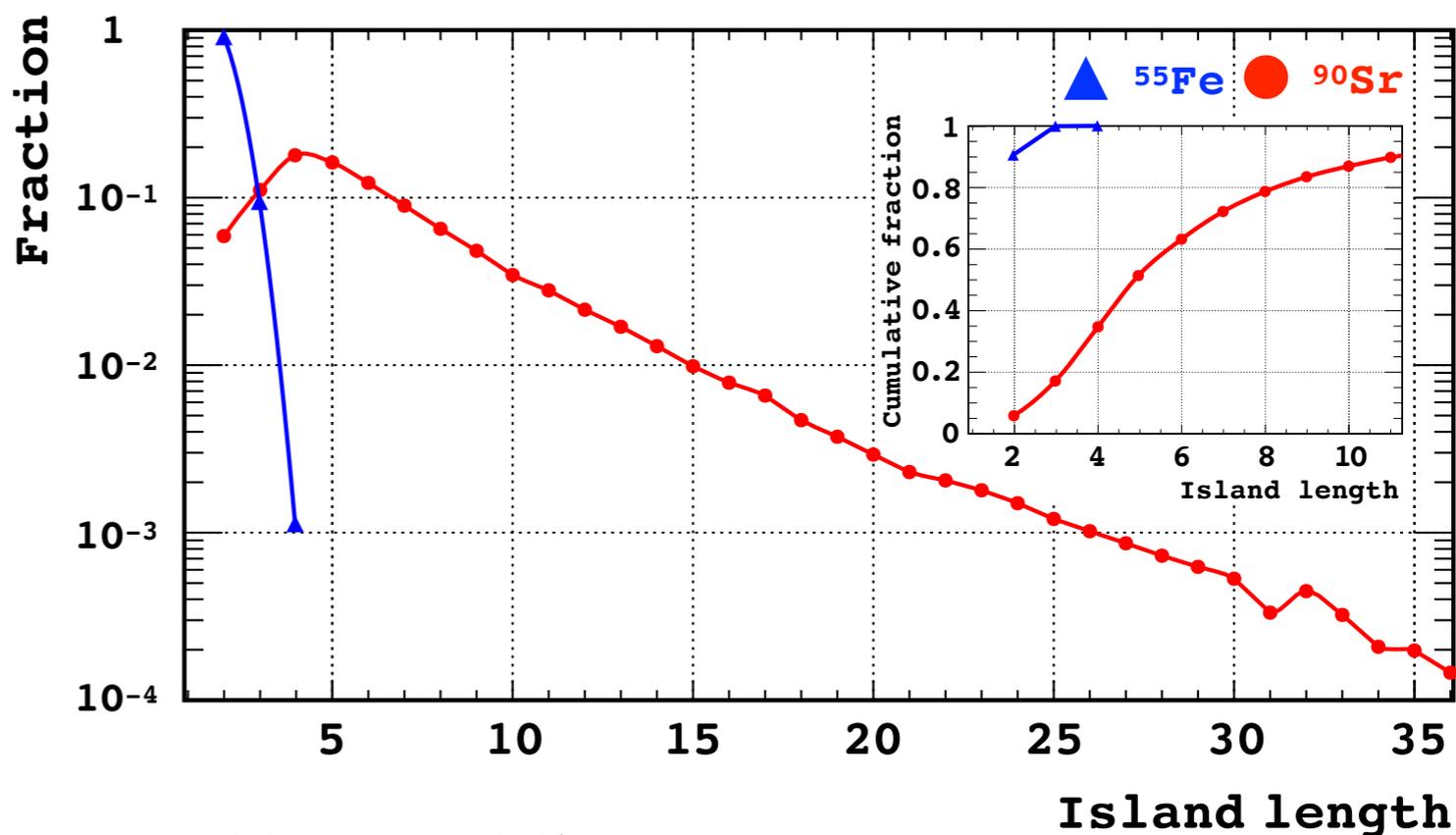
RA側+CA側を合計したパターン長分布。長さ閾値を3とした場合…

^{55}Fe は99.9%取得

^{90}Sr は17%取得

→ 83%を棄却

*あくまでデモンストレーション



まとめ

- 次世代宇宙X線観測へ向け「イベント駆動型SOIピクセル検出器」を開発している。
 - > タイミング・位置・パターン情報を出力できる
- 次世代宇宙X線観測における分光性能の要求値を達成している
 - > 220 eV @ 6.4 keV (ゲイン補正無) w/ イベント駆動モード
 - > 読み出しノイズ: $\sim 10 e^-$ (rms)
- 効率よくX線イベントを弁別し、荷電粒子のバックグラウンドを棄却するため、on-chipのパターン処理回路を組み込んでいる
 - > デモンストレーションにより、X線「候補」を弁別できる可能性を示すことができた
 - > on-chipパターン処理は、小型衛星など制約の大きいシステムにおいても有用となるかもしれない