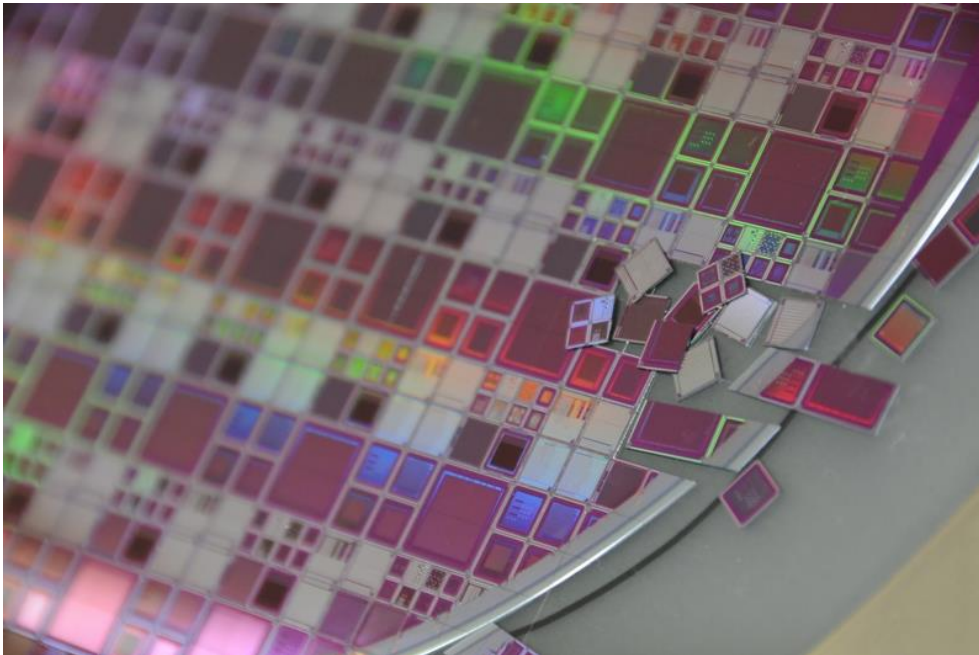


KEKにおけるSOI検出器開発

～基礎科学研究に必要不可欠なピクセルセンサ開発～

三好敏喜
(KEK)



SOIコンソーシアム設立記念研究会
2019年6月7日（金）

概要

KEK紹介・SOIセンサ開発

KEK SOI検出器紹介

- 積分型
- ILC実験向け
- 計数型

まとめと今後の展望

* ILC=International Linear Collider

加速器を使って基礎科学を推進する

Super KEKB → Belle II 実験

円周3km



J-PARC

周長
300m 3GeV
1.6km 30GeV

素粒子・原子核
物質・生命科学
核変換

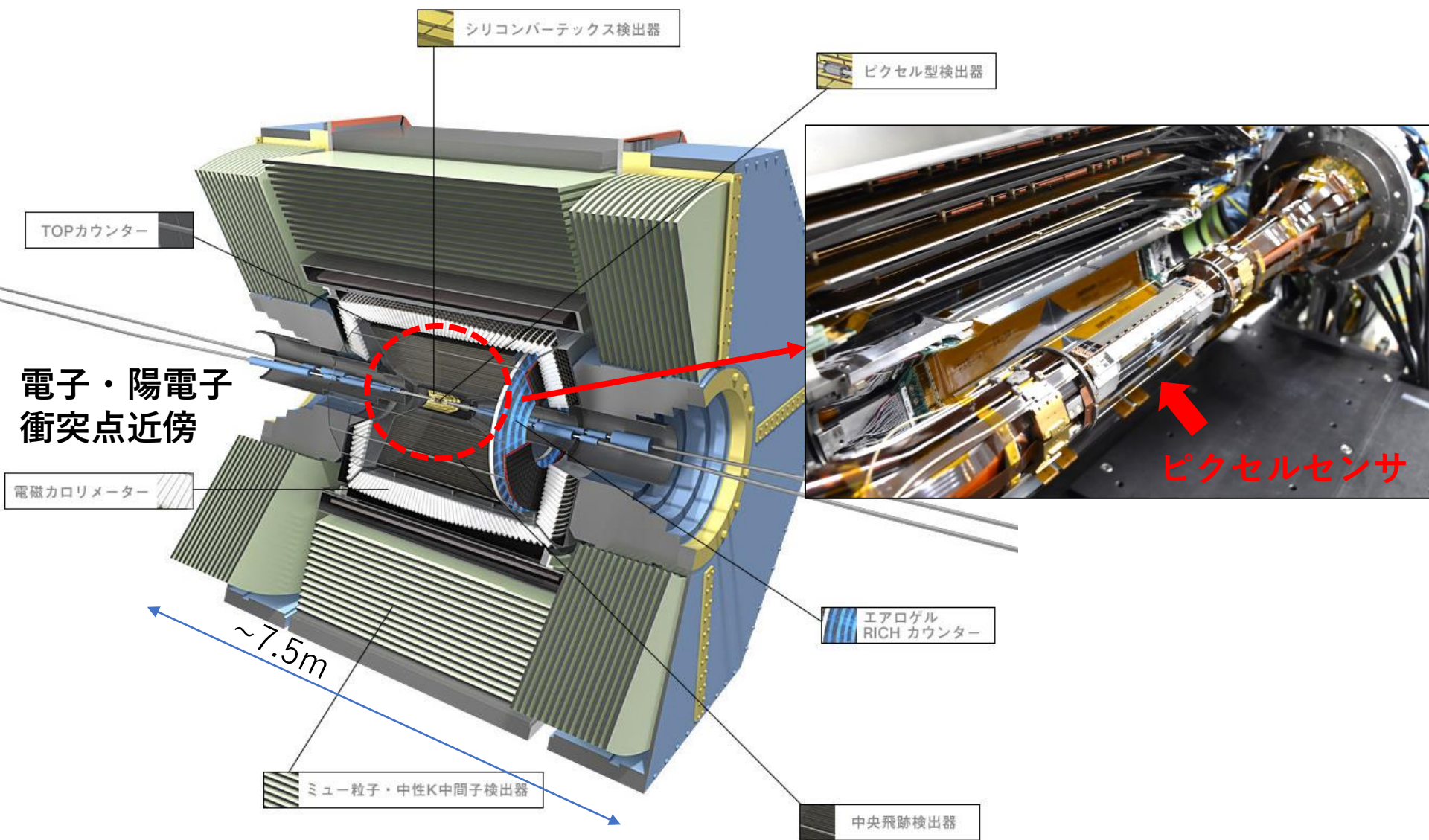
放射光施設

PF-AR

PF

物質科学研究

ピクセルセンサが活躍する場所は？



BelleII検出器の最内層→非常に計測が難しい場所

ピクセルセンサへの期待

ビーム強度が強くなる → 検出器への要求も厳しくなる

(ex.) SuperKEKB

ピークルミノシティ:

目標 $8 \times 10^{35} / \text{cm}^2/\text{s}$ (2025年)

現在 $2 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$

→ 目標は現在の強度の40倍!

ピクセルサイズを小さく

センサを薄く

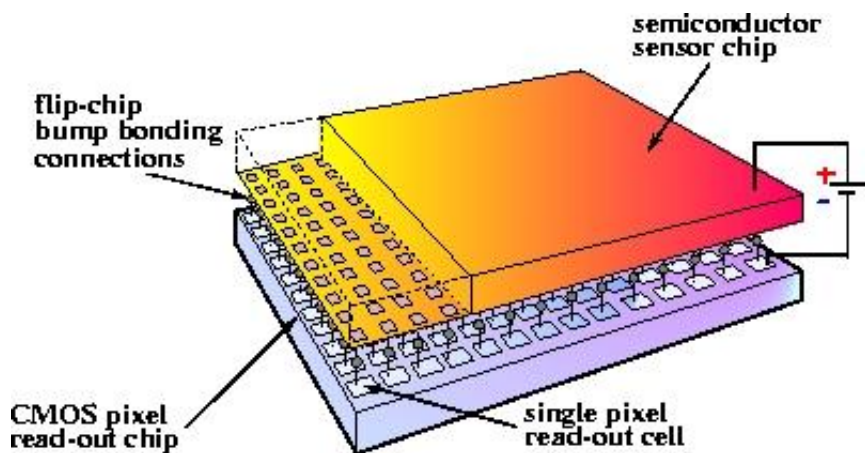
回路を速く

低消費電力

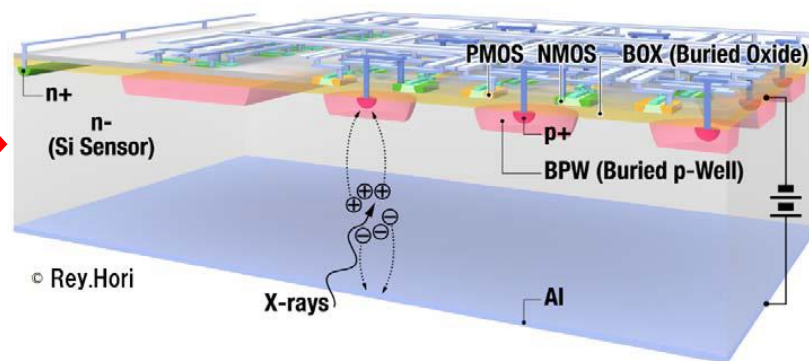
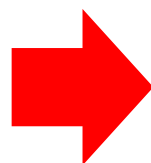
...

→ 将来どのようなテクノロジー・手法で
目標を達成するか?

→ SOI検出器開発がスタート



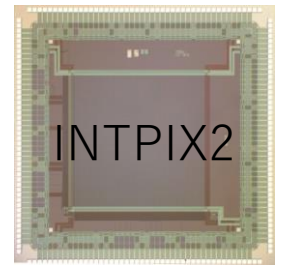
ハイブリットセンサー
現在使われているものの一例



SOIモノリシックセンサー
(2005-)

一番最初のSOIセンサ

積分型SOI検出器 - INTPIX -



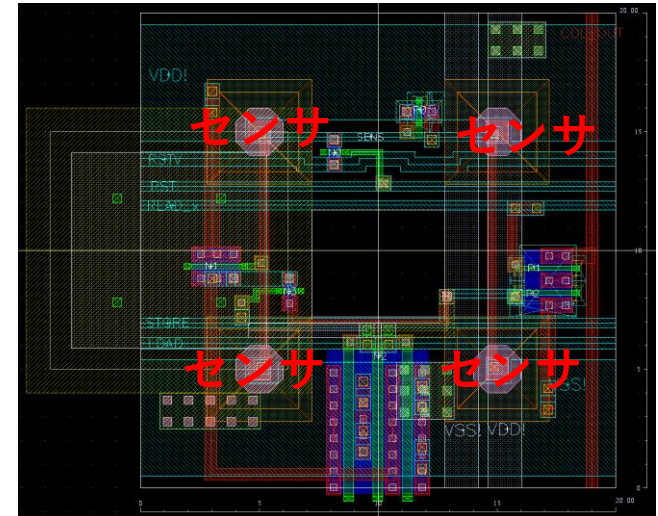
ピクセル内にセンサと少数(10個前後)の素子が含まれるシンプルな構造の
2次元ピクセル検出器

用途: 基本特性評価試験・応用試験

2008年 INTPIX2

2Vしかかけられない

X線を当てると残像が残る



20um



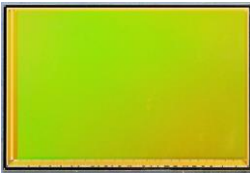
2018年 INTPIX4-8 , FPIX, SOFIST, CNPTEG1, etc...

全空乏化(数百V)

高機能化(位置、時間、計数測定...)

X線応用や高エネルギー荷電粒子ビーム試験

INTPIX 積分型ピクセルセンサ

	INTPIX4	INTPIX5	INTPIX6	INTPIX7	INTPIX8
					
Process	MX1350 (FY09-1)	MX1501 (FY11)	MX1594 (FY12-2)	MX1655 (FY13-1)	MX1786 (FY14-1)
Pixel size (正方形の一边)	17 um	12 um	12 um	12 um	16 um
# of pix. (VxH, 合計)	512 x 832 (425, 984)	896 x 1408 (1, 261, 568)	896 x 1408 (1, 261, 568)	1408 x 1408 (1, 982, 464)	640 x 1024 (655, 360)
Chip size[mm2]	10.2 x 15.4	12.2 x 18.4	12.2 x 18.4	18.4 x 18.4	12.2 x 18.4
有感面積[mm2]	8.7 x 14.1	10.7 x 16.9	10.7 x 16.9	16.9 x 16.9	10.9 x 17.4
Global Shutter	yes	yes	yes	yes	yes
Rolling Shutter	no	yes	yes	yes	yes
Frontend Amp	PMOS S. F.	PMOS S. F.	PMOS S. F.	PMOS S. F.	PMOS Charge Amp
CDS	In Pixel CDS	Column CDS	Column CDS	In Pixel CDS	In Pixel CDS
Sensor gain	~14uV/e-	~2.5/15 uV/e-	~2.5/15 uV/e-	~16 uV/e-	~12/18/36/80 uV/e-

Single SOI(SSOI)
N-type only

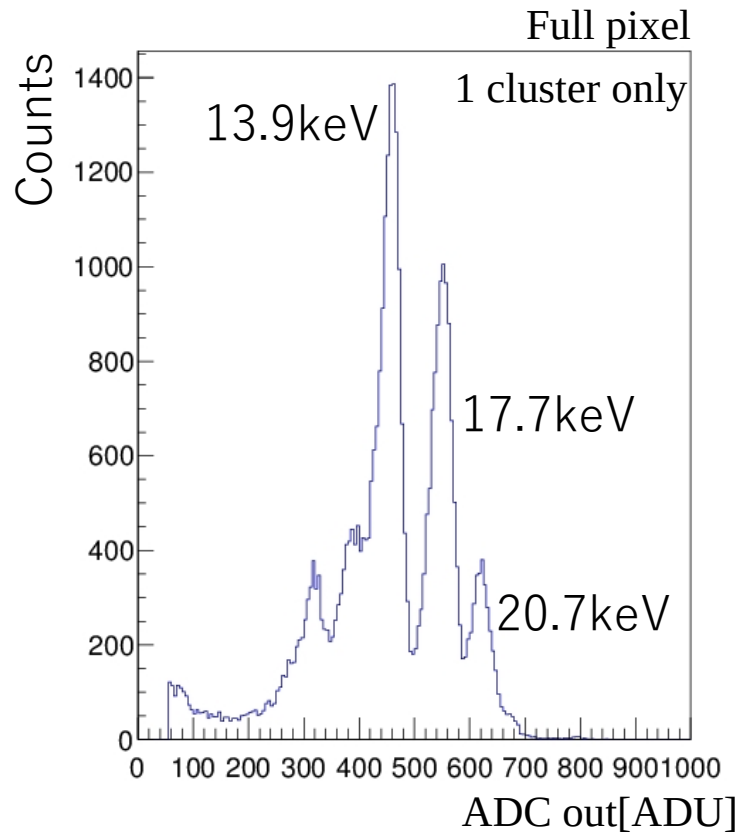
Single SOI(SSOI)
N-type/P-type

Single SOI(SSOI)
Double SOI(DSOI)
N-type/P-type

年々使用できるウエハが増えていった

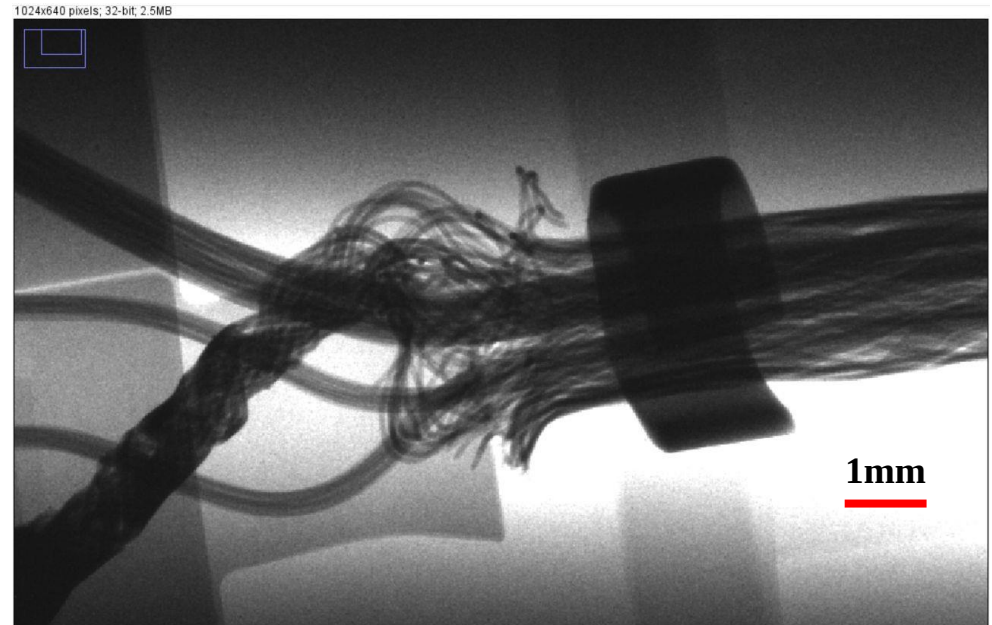
INTPIX 応用例

X線スペクトル測定



Double SOI INTPIX8
Am-241 spectrum
Gain 61uV/e- (high gain ("g00") mode)
Readout Noise 41e-@-50deg.C

X線イメージング応用例



INTPIX8

Low gain mode (g11)

1ms x 500 frame

40 keV Monochro. X-ray

KEK PF-AR NE-7A

Beam size :40mm(H) x 4mm(V)

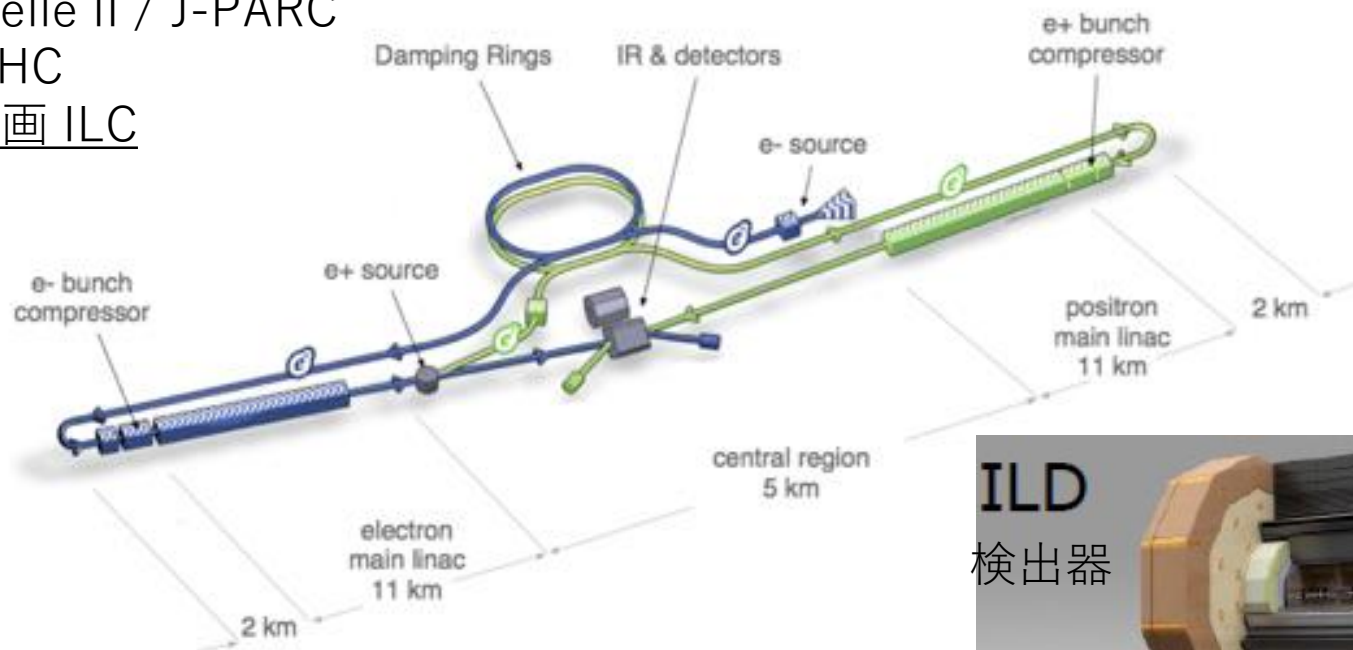
ILC向けSOI検出器

KEKが関わっている加速器実験(抜粋)

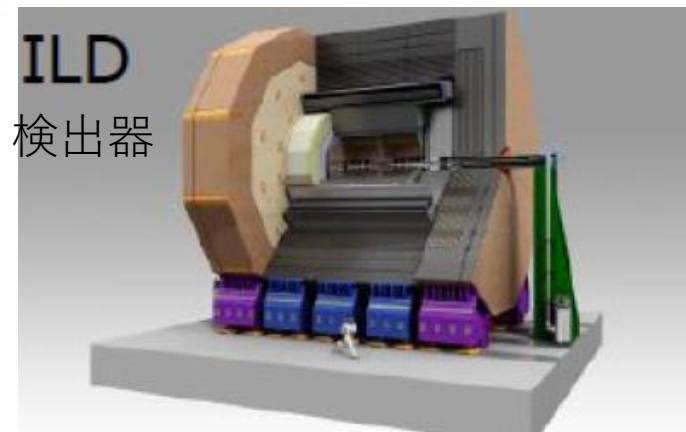
KEK Belle II / J-PARC

欧州 LHC

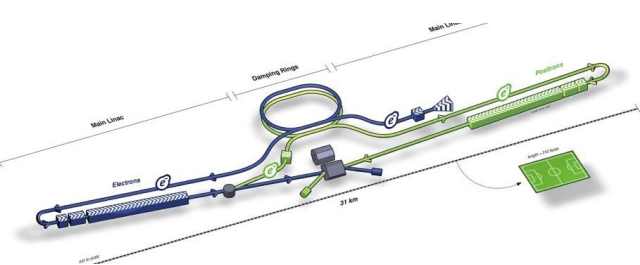
将来計画 ILC



International Linear Collider



最内層にピクセルセンサを設置



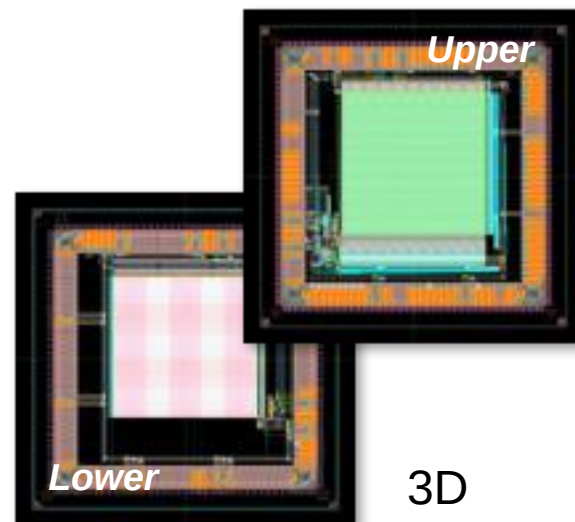
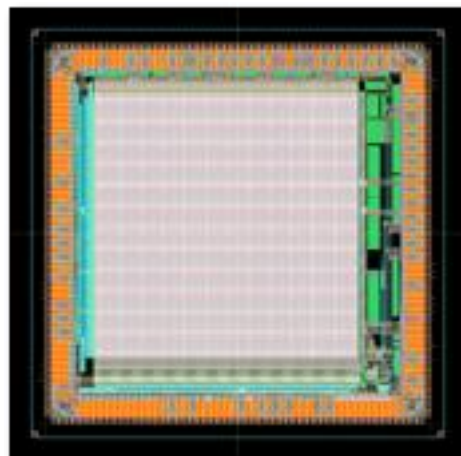
SOFIST

(SOI sensor for Fine measurement of Space & Time)
ILC向けSOI 픽셀 센서

S. Ono, M. Yamada

目標:
位置分解能 $< 3\mu\text{m}$
픽셀サイズ 20-25 μm
時間分解能 $> \sim 554\text{ns}$
픽셀内で位置と時間計測

2D



3D

	Ver. 3 (2D)	Ver. 4 (3D)
Chip Size	6mm x 6mm	4.45mm x 4.45mm
Pixel Size	30 μm x 30 μm	20 μm x 20 μm
Pixel Array	128 x 128	104 x 104
Circuits	CSA + Comp.+ 3 Analog Mem. + 3 Time Stamp Mem.	
Wafer	FZ p-type ($3 \sim 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) Double SOI	

SOFIST Ver. 3

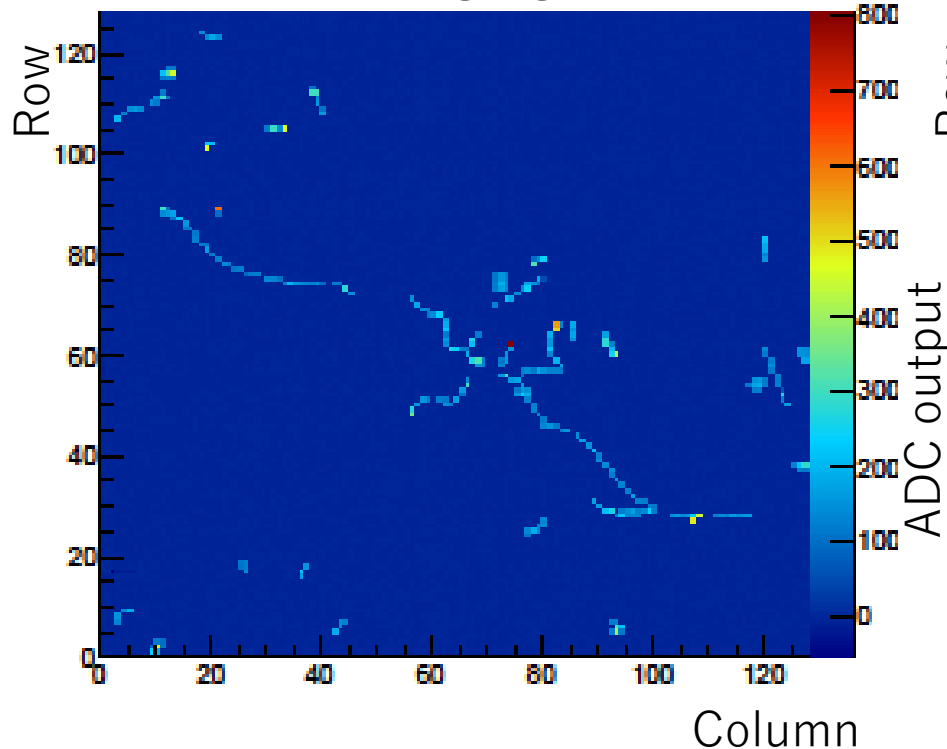
β -ray track from ^{90}Sr

Threshold: $V_{\text{th}} = 910 \text{ mV}$, $V_{\text{RST}} = 900 \text{ mV}$

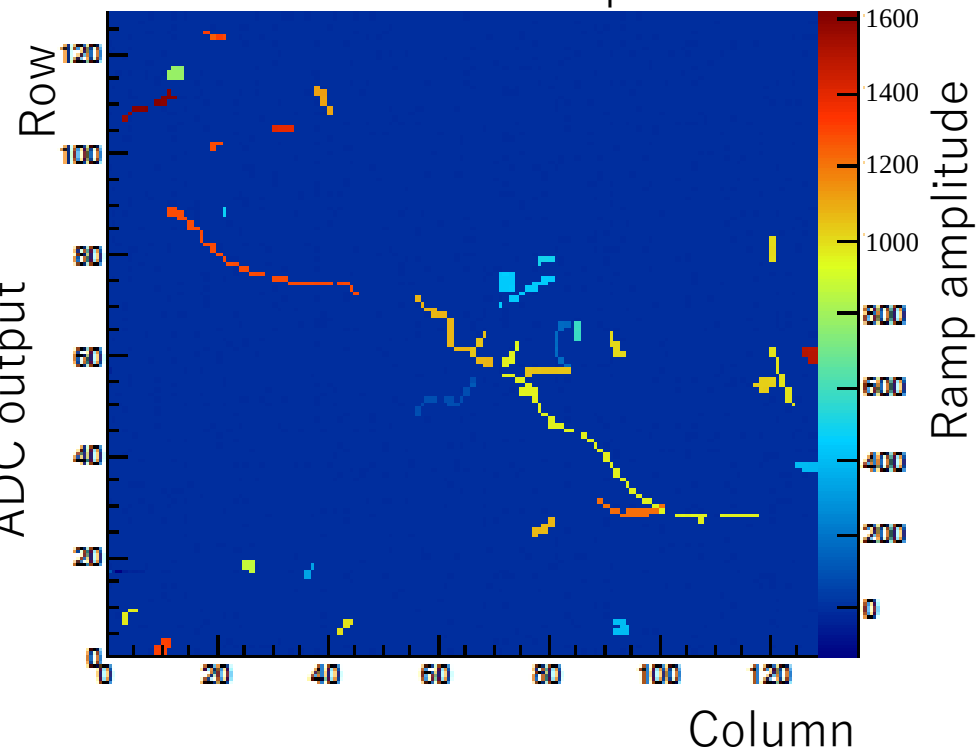
HV = -100 V

* Pedestal subtracted

Analog signal

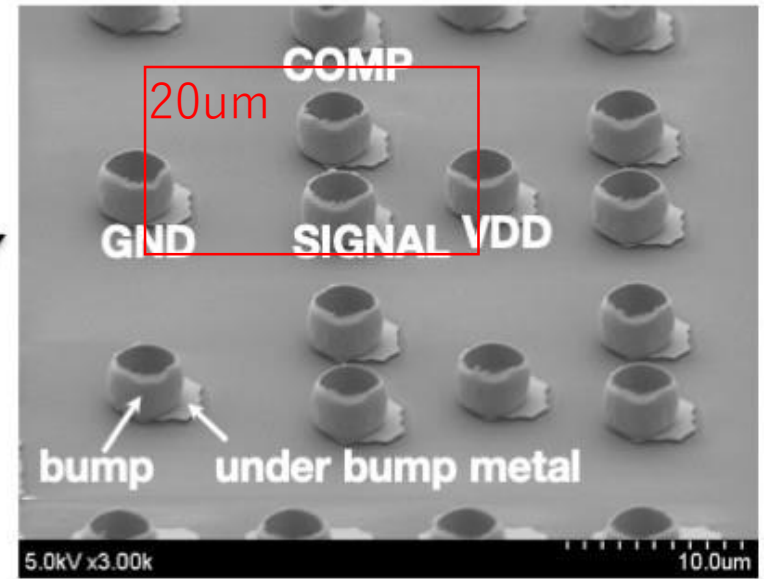
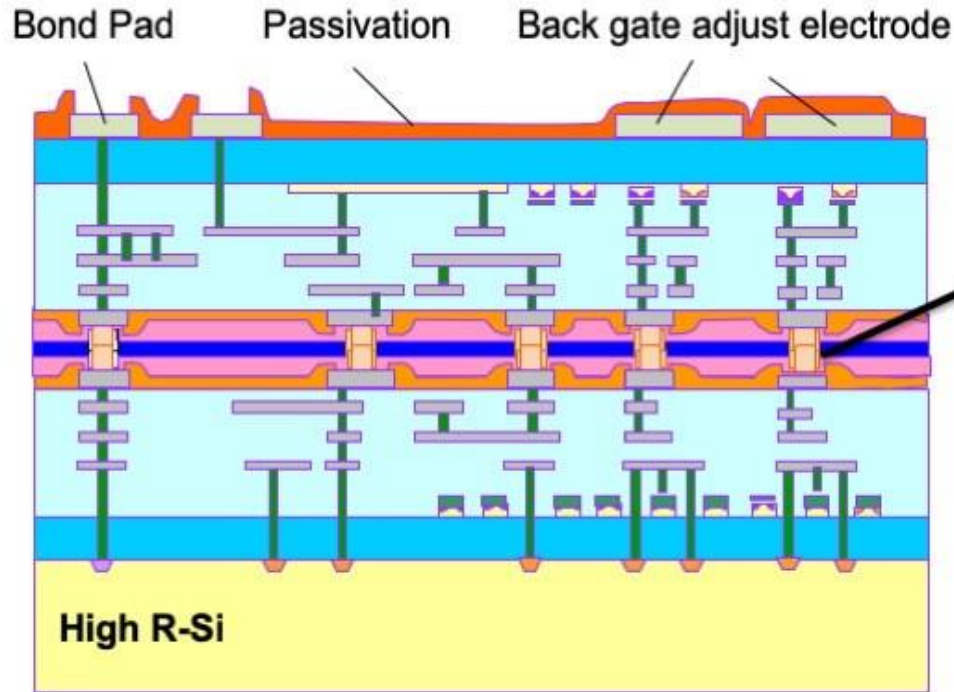


Timestamp



位置と時間の同時計測を行うことができる

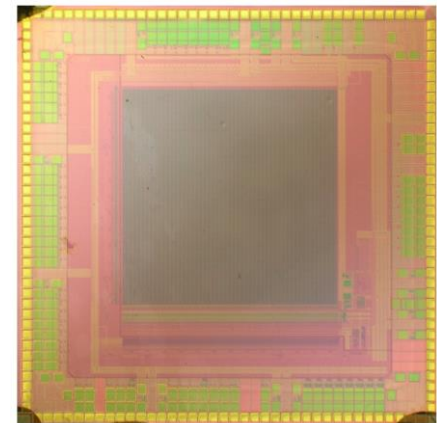
SOFIST ver.4



SOI+3次元積層でピクセルサイズ縮小

シリンダーバンプを使用

2018年度末に最初のチップが完成



SOFIST ver.4 bump-bonded chip

計数型ピクセル検出器

“Photon Counting”

ある一定の出力を超えた
パルスのみ数える

利点

ノイズフリー

広いダイナミックレンジ

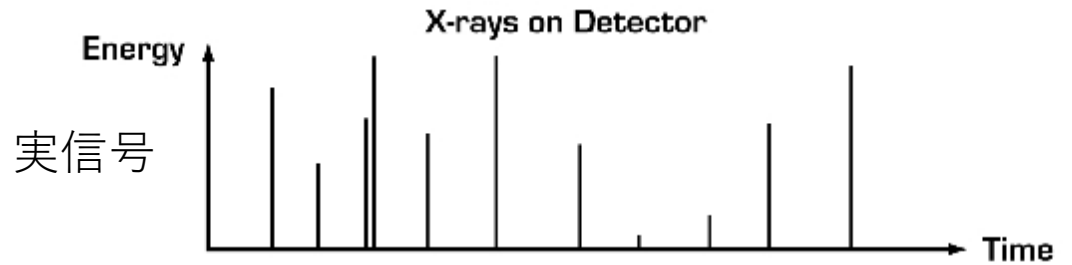
(カウンターbit数で決まる)

高速データ処理

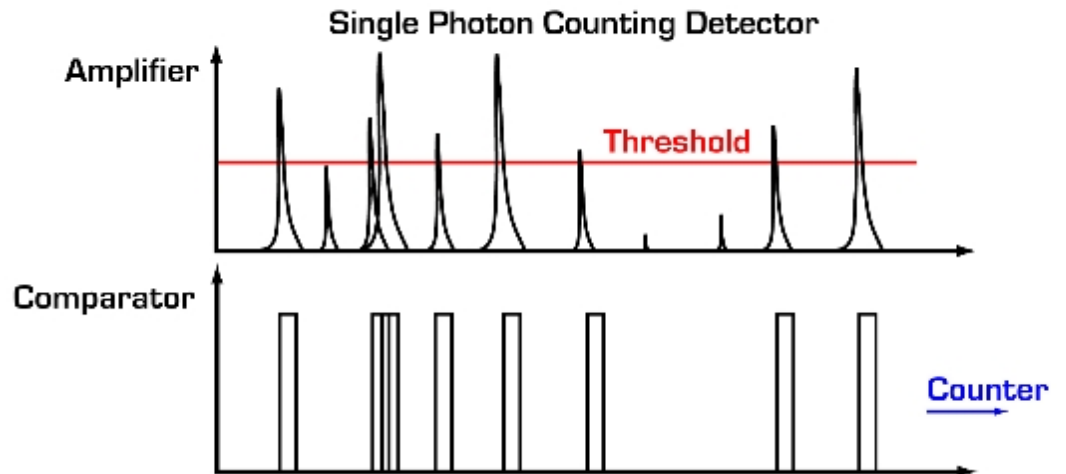
課題

・回路規模が大きくなるので
ピクセルサイズが大きくなる

・アナログ情報を持たない



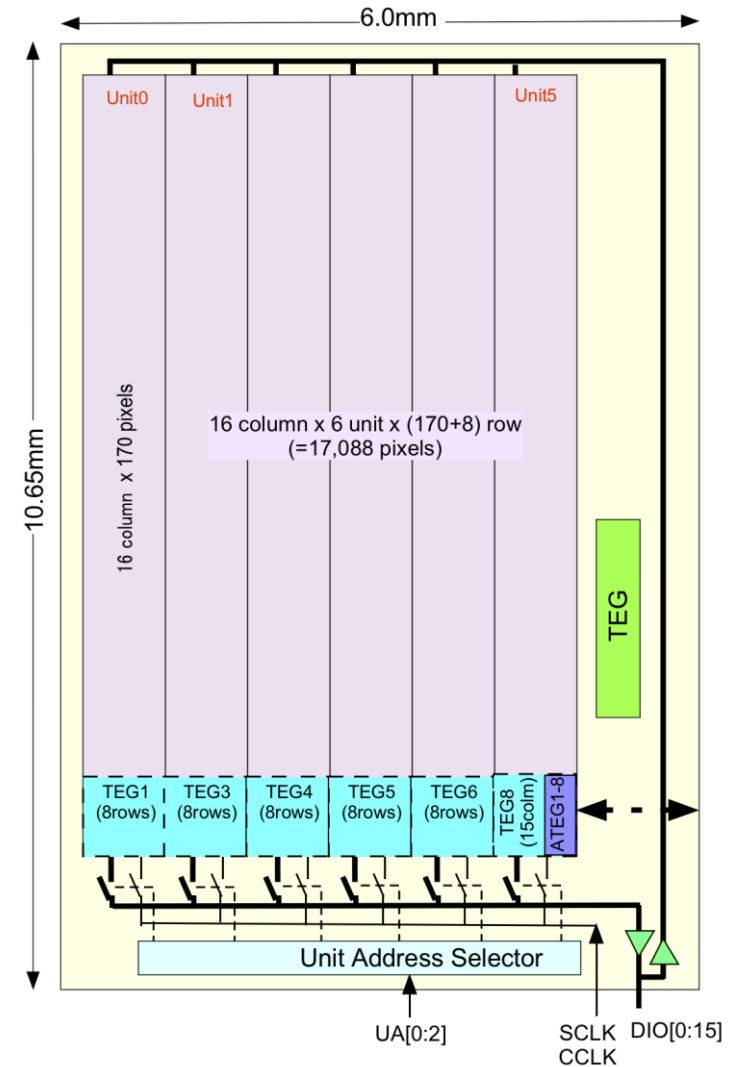
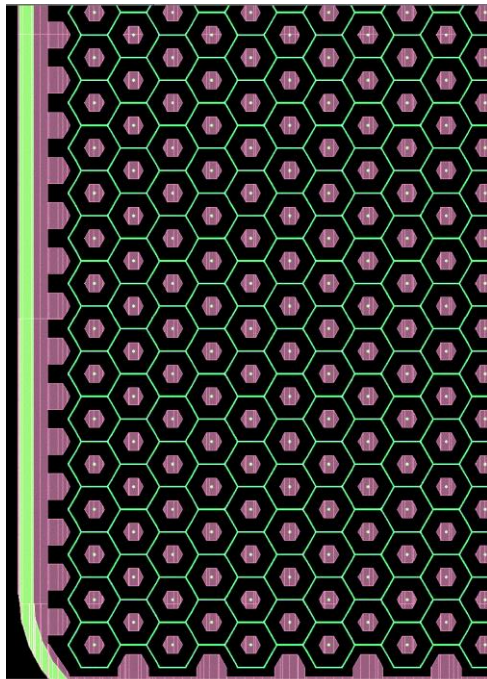
計数型



計数型SOI検出器 -CNPTEG1-

KEK、中国高能研 (IHEP)での共同開発

- $52\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの六角形ピクセル
(計数型では世界最小クラス)
- Charge sharing 対応回路を搭載



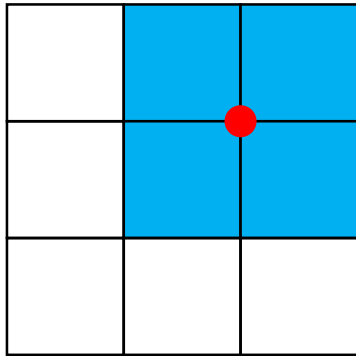
Block Diagram of CNPTEG1 Chip

2017.4.14 Y.Arai

CNPTEG1概要

ピクセルサイズが小さくなる→charge sharingが起こりやすくなる

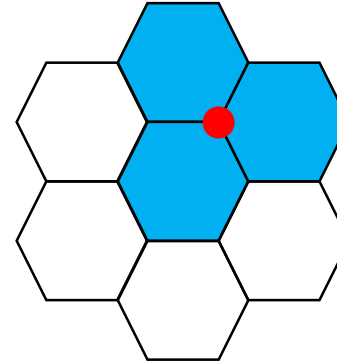
正方ピクセル



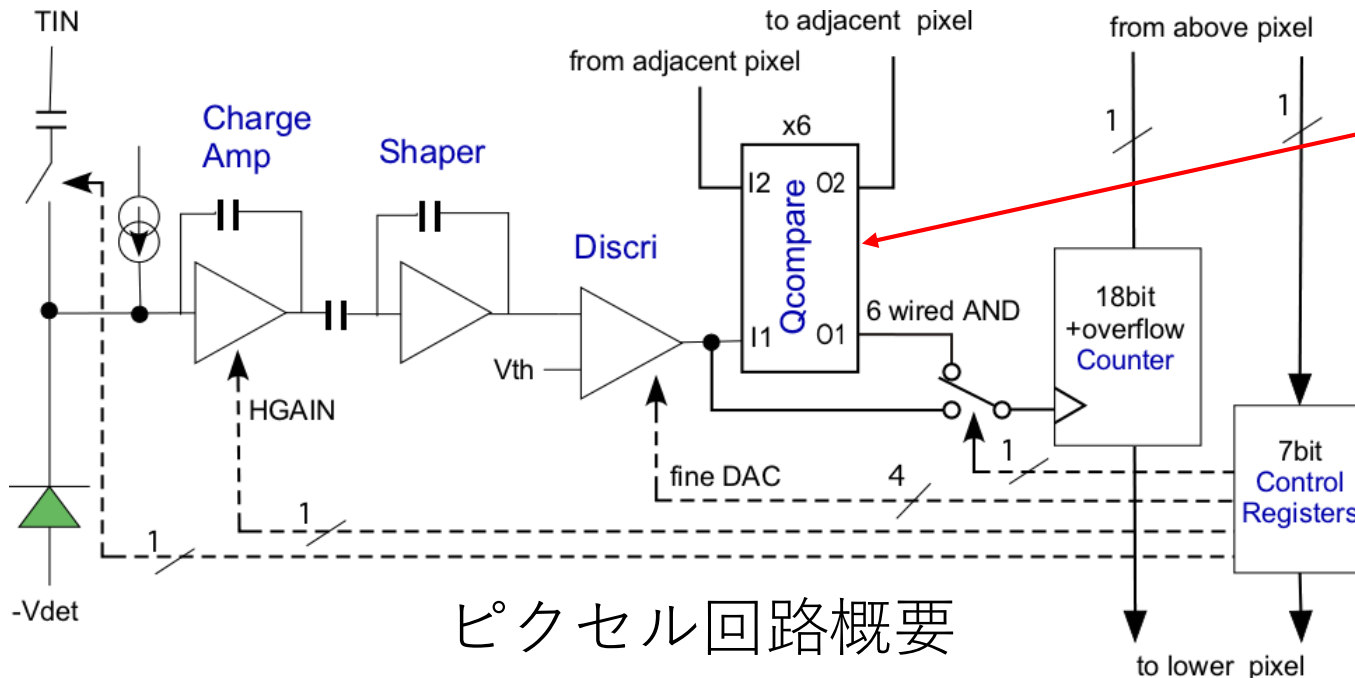
$E_{th} = 1/4 E_{X-ray}$
周囲 8 ピクセルと
信号比較



六角形ピクセル

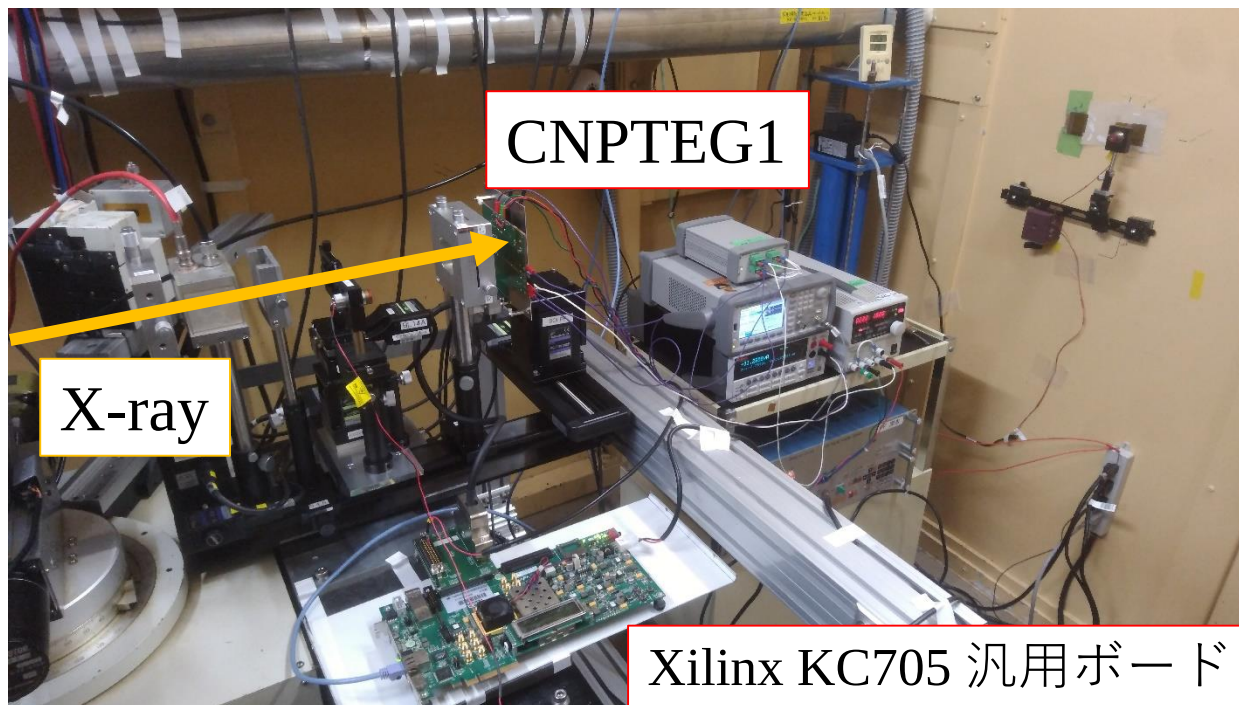


$E_{th} = 1/3 E_{X-ray}$
(よりノイズに強い)
周囲 6 ピクセルと
信号比較
(回路面積小)



ピクセル回路概要

ビームテスト@KEK PF BL14A



KEK
橋本、西村

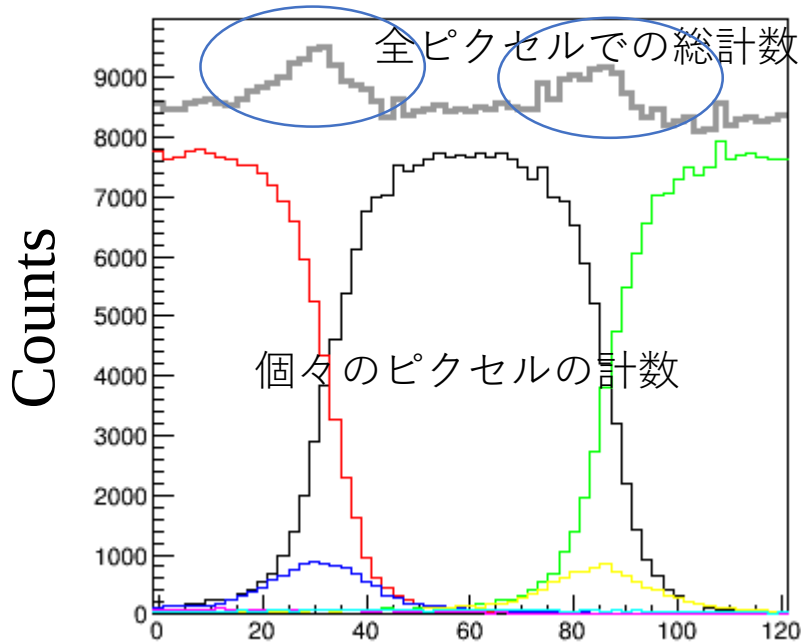
IHEP
Yunpeng
Longlong

- ・ ビーム強度:イオンチェンバーで常時モニター
- ・ ピンホール設置 $\sim 10\ \mu\text{m}$ 径マイクロビーム形成
マイクロビームで位置スキャン試験
- ・ 絶対ビーム強度: NaI で別途測定

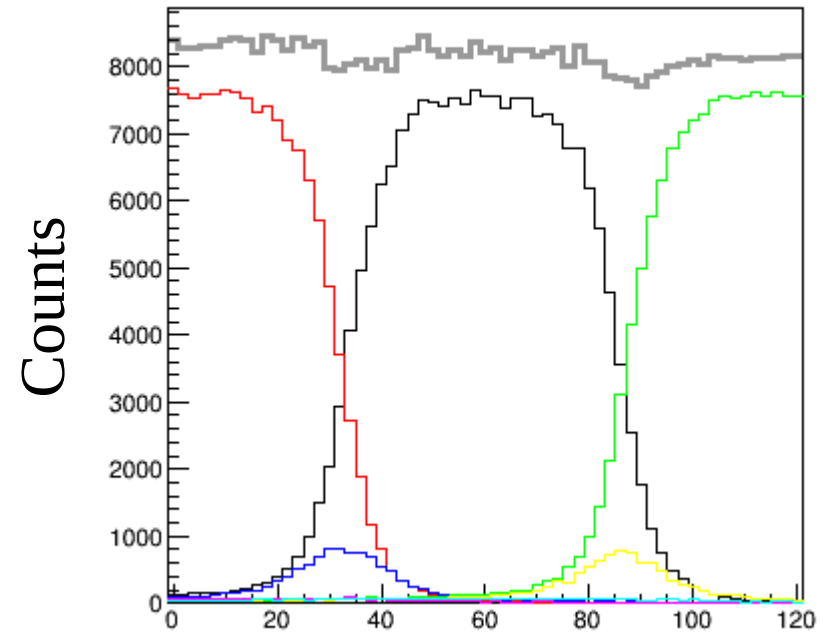
動作試験(比較回路)

18keV X線マイクロビームを用いて10 μ mステップ位置スキャン

比較回路 off

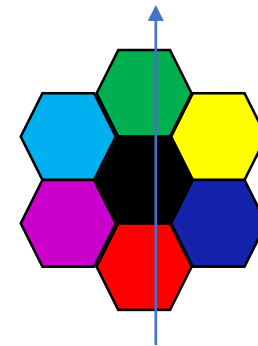


比較回路 on



X-ray position (μ m)

隣接ピクセル(x6)との信号比較回路
最も早く応答したピクセルでのみ出力される
→
計数重複を抑制できる



ヒストグラムの色
と対応ピクセル

センサー評価試験継続中

まとめ

- ・ KEKでは加速器を使った基礎科学研究を行っている
- ・ 研究推進のためにはピクセルセンサの性能向上が不可欠
- ・ 2005年からSOIセンサ開発を開始した
- ・ INTPIXを用いて基本特性を評価し改良を行ってきた
- ・ 今後はそれぞれの用途に応じた検出器開発：
多機能化・機能の選択が必要とされる
→SOFIST, CNPTEGを開発、試験を継続中

今後の展望

基本特性評価の継続: 電荷収集効率、歩留まり、放射線耐性 etc…
高機能化・多機能化: 各種目的に応じた仕様
検出器モジュール: 様々な設置制約・実験条件に合う形態
データ収集システムの改良

[コンソーシアムを通じて]

基礎科学研究向けに作ったセンサは世の中に役に立つのか？

→産学連携: 広く使われるアプリケーションの探索・実用化