

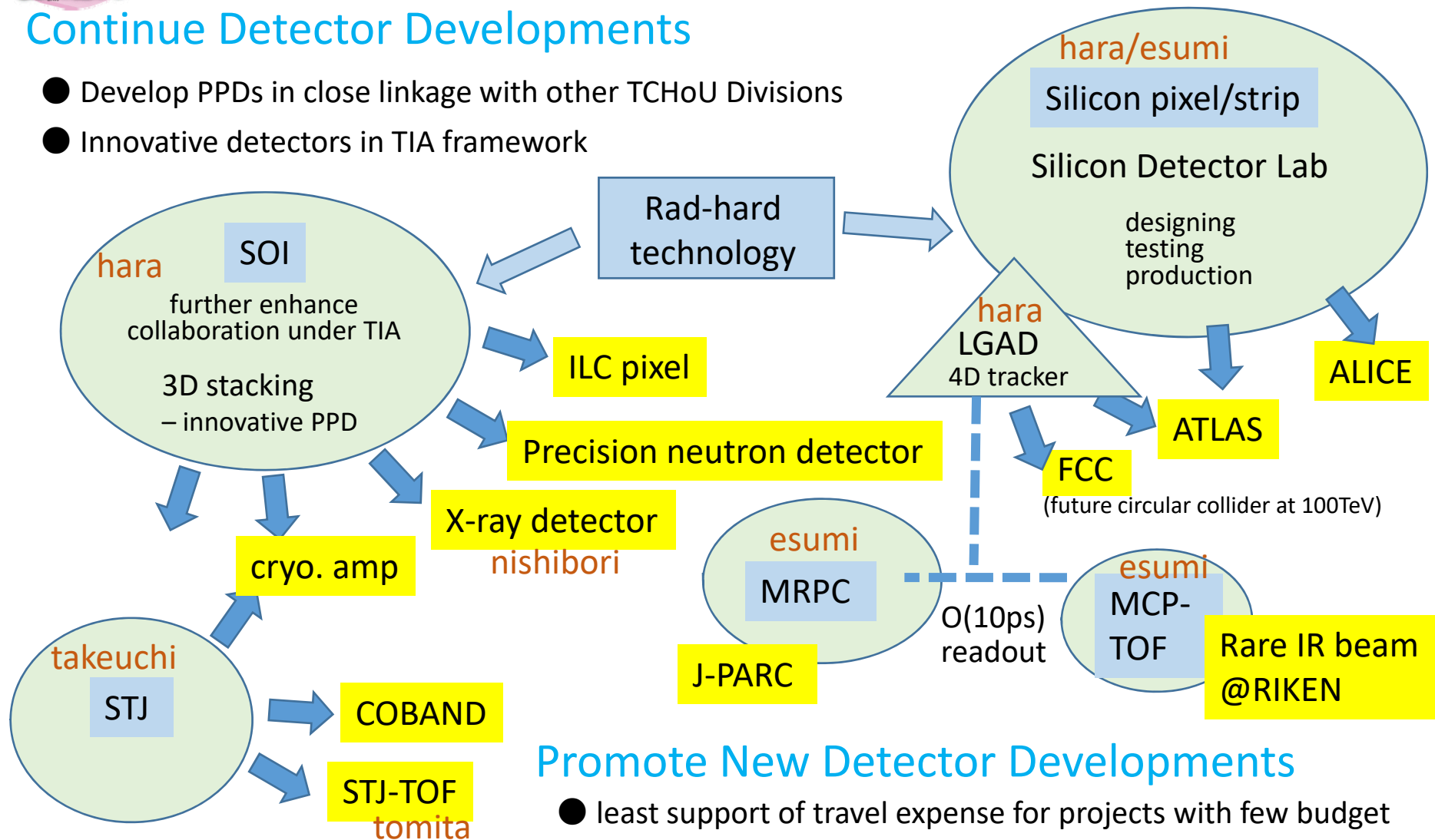
光量子検出器開発部門の活動から

原 2018.6.4

- 宇宙線ミュー粒子による福島第一原発燃料デブリ
- SOI: 読み出し回路一体型ピクセル検出器
- HL-LHC ATLAS
 - ストリップ型センサー
 - ピクセル型センサー
- LGAD
- まとめ

Continue Detector Developments

- Develop PPDs in close linkage with other TCHoU Divisions
- Innovative detectors in TIA framework

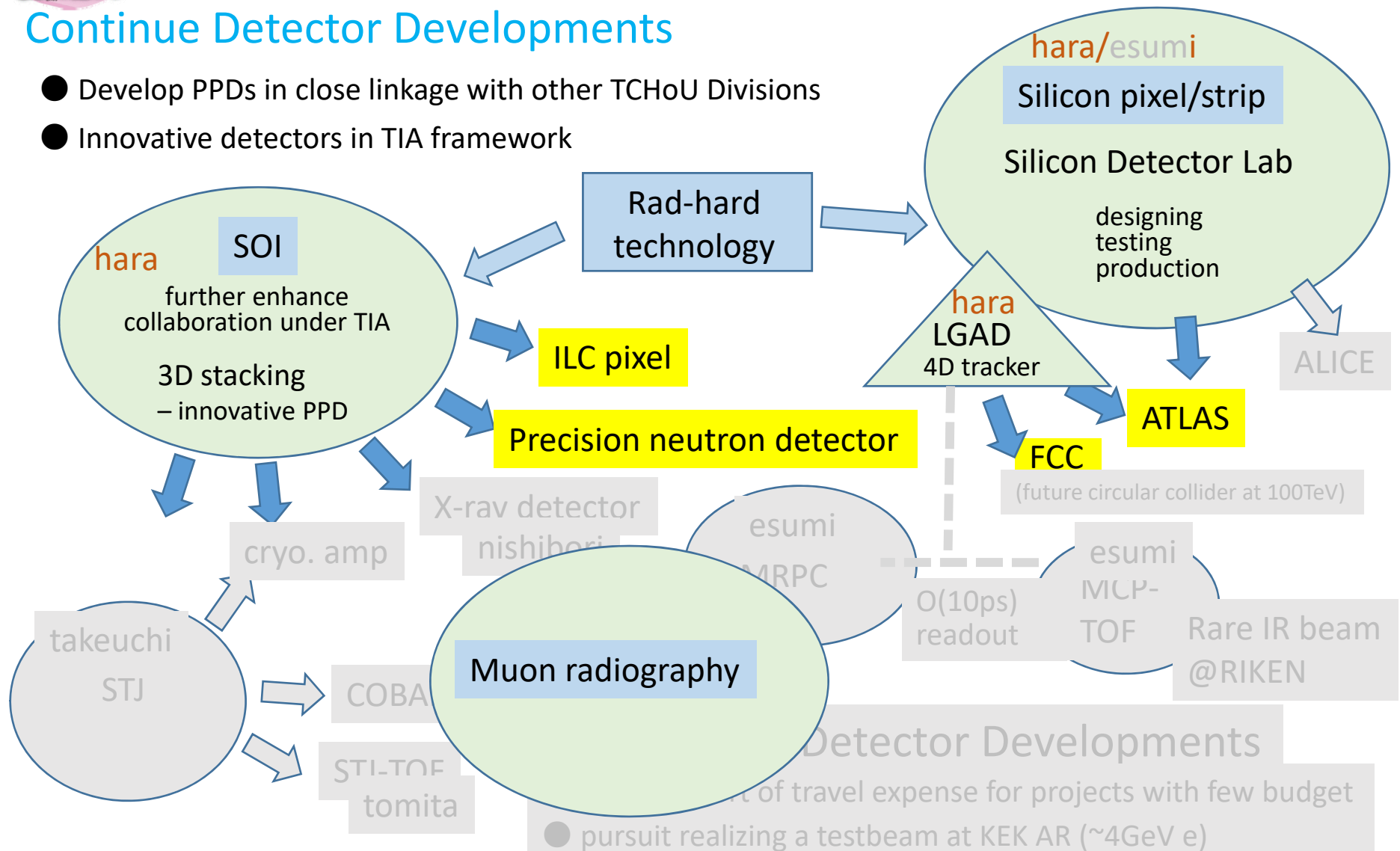


Promote New Detector Developments

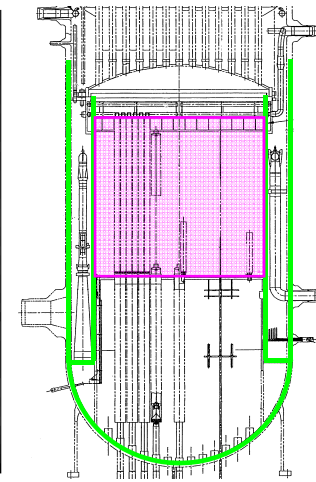
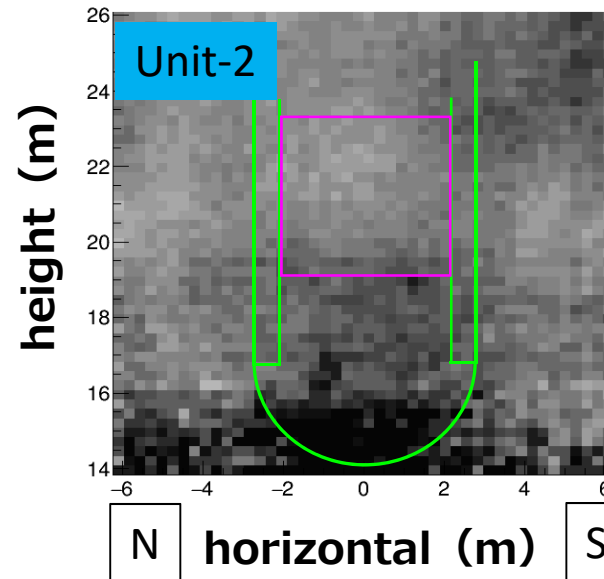
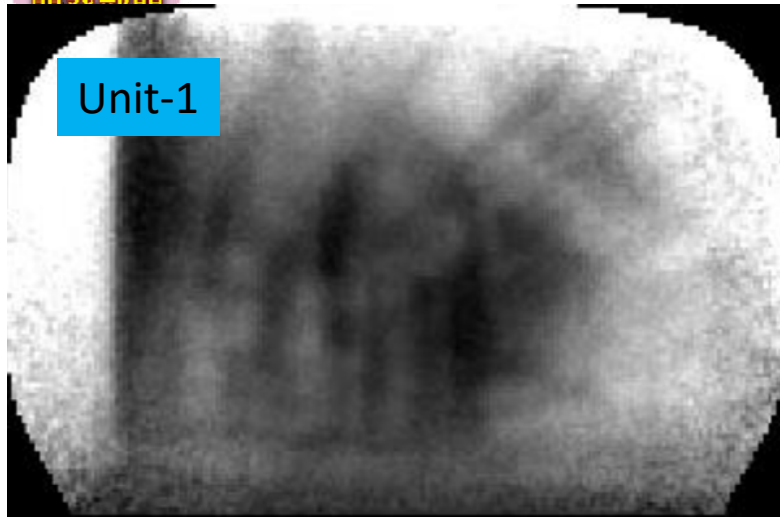
- least support of travel expense for projects with few budget
- pursuit realizing a testbeam at KEK AR (~4GeV e)

Continue Detector Developments

- Develop PPDs in close linkage with other TCHoU Divisions
- Innovative detectors in TIA framework

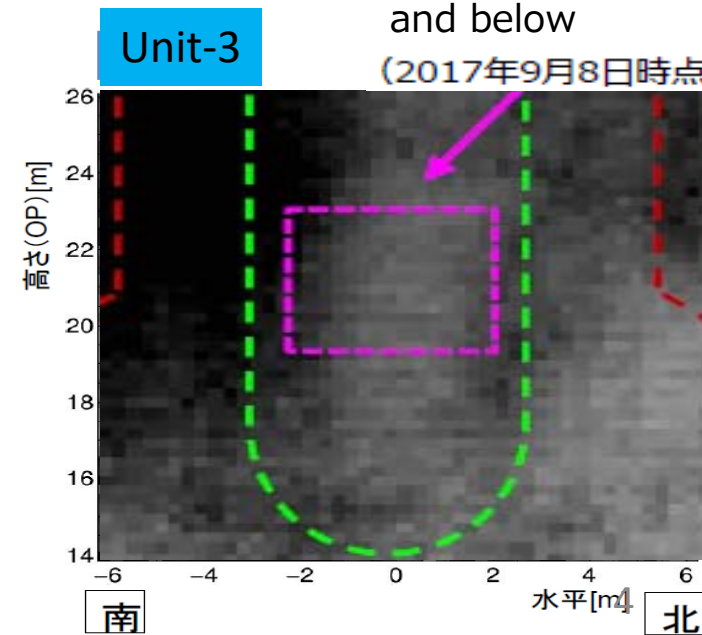


Muon Radiography



Structure of pressure vessel loading zone and below

(2017年9月8日時点)



Summary 2011年の大震災直後からKEKらのグループと福島第一原発の燃料デブリの状況把握のために宇宙線ミュオン粒子を用いた検出法を開発。

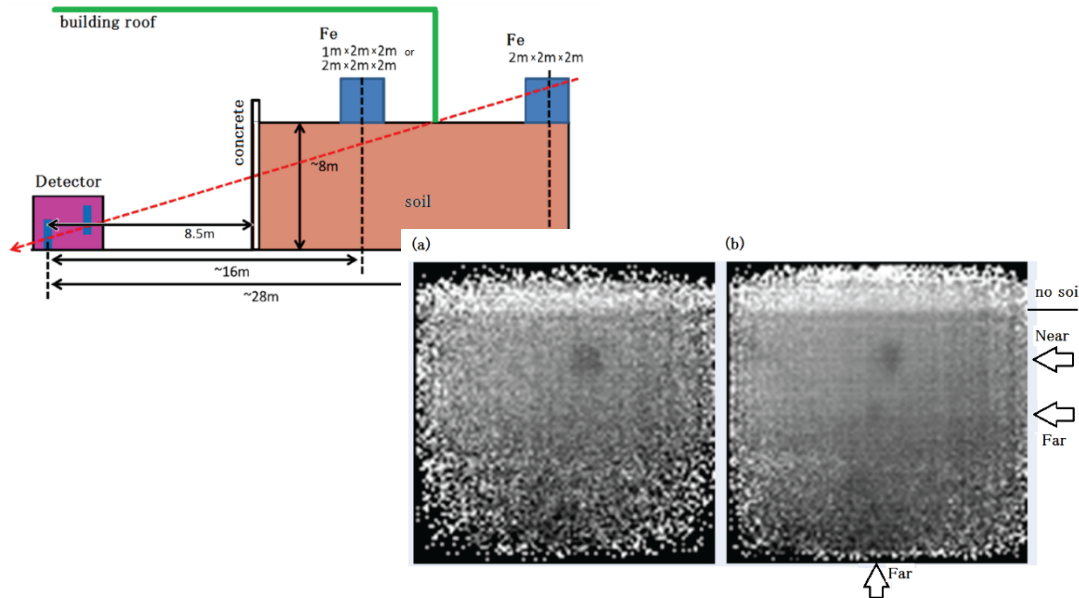
筑波大(原)は検出器の設計・建設・データ解析を担当。

予備評価と3年間の観測を経て

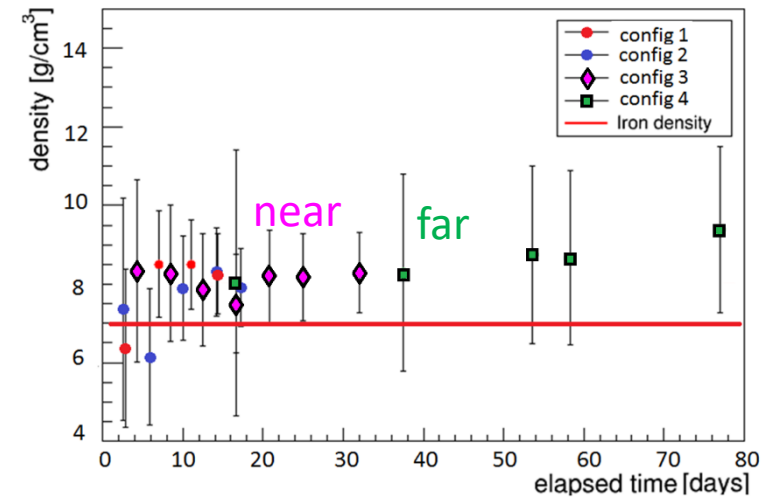
- ❖ 1号炉：燃料装填位置には殆ど残っていない
- ❖ 2号炉、3号炉：小型化した検出器を建屋壁直近置くことで、圧力容器下部の評価も行えた
ともに燃料装填位置には殆ど残っていない。2号炉では圧力容器下部に強い吸収があり、燃料デブリの可能性が高い。
- ❖ 初期の目標を達成し終了。燃料デブリ量を評価できる手法として成果が特筆される。

Muon Radiography

溶け落ちたデブリを下から観測できないか？



2m立法の鉄の観測に何日かかるか？



Detection of on-surface objects with an underground radiography detector system using cosmic-ray muons

Hirofumi Fujii, Kazuhiko Hara ✉, Kohei Hayashi, Hidekazu Kakuno, Hideyo Kodama, Kanetada Nagamine, Kazuyuki Sato, Kotaro Sato, Shin-Hong Kim, Atsuto Suzuki Kazuki Takahashi, Fumihiko Takasaki

2014卒業論文

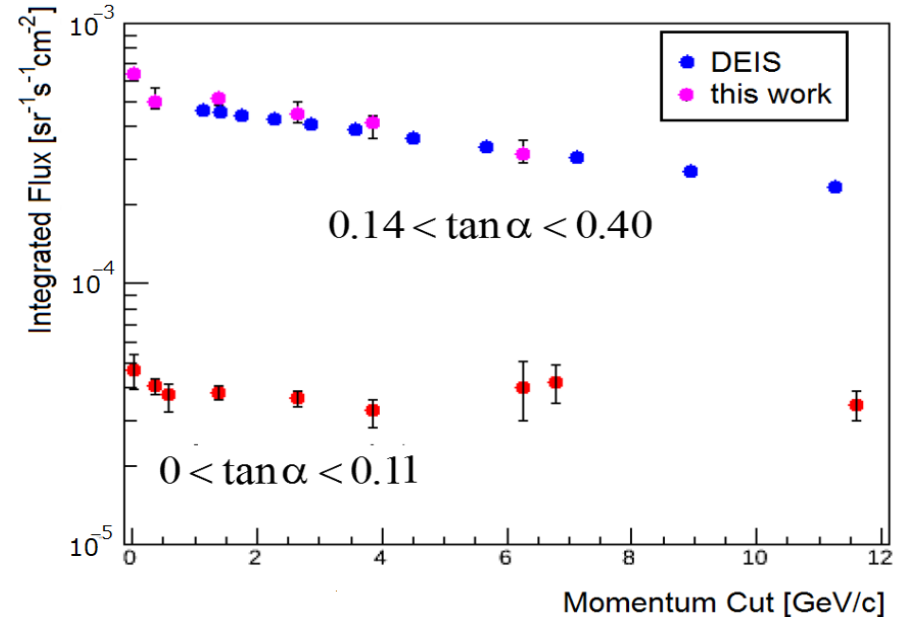
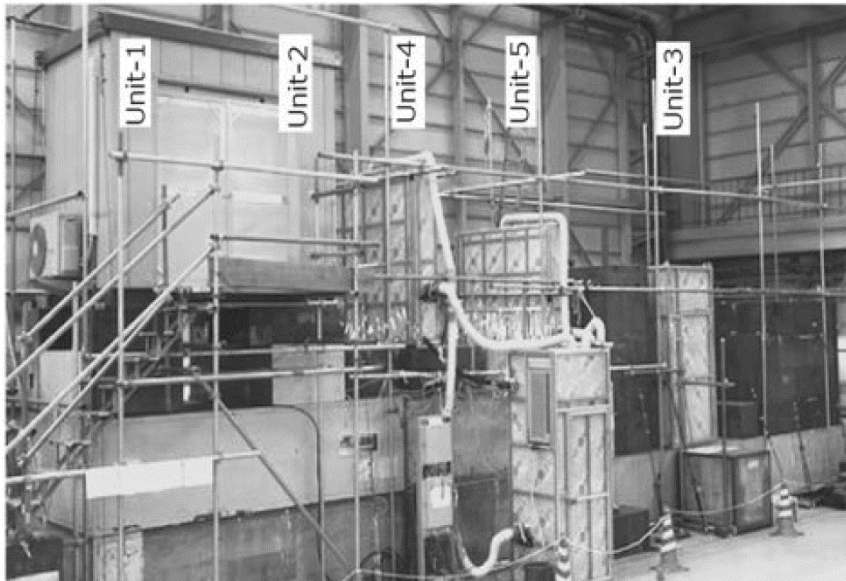
Journal of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2017, Issue 5, 1 May 2017, 053C01,

<https://doi.org/10.1093/ptep/ptx061>

Published: 25 May 2017 Article history ▼

Muon Radiography

水平方向宇宙線ミュー粒子の頻度分布をレンジ法により測定
従来の測定($\theta=75^\circ$)と矛盾ない結果と水平方向の新しいデータを追加した



**Integrated cosmic muon flux in the zenith angle range
 $0 < \cos\theta < 0.37$ for momentum threshold up to 11.6 GeV/c**

Hirofumi Fujii, Kazuhiko Hara, Kohei Hayashi, Hidekazu Kakuno, Hideyo Kodama, Kanetada Nagamine,
Kazuyuki Sato, Kotaro Sato, Shin-Hong Kim, Atsuto Suzuki, Kazuki Takahashi, Fumihiko Takasaki

2016研究科長賞

2015茗溪会賞

Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 167, Issue 12, 1 December 2017, 123C01,
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptx164>

Published: 23 December 2017 Article history ▼

SOI pixel devices

SOI: SILICON-ON-INSULATOR

CMOS circuitry fabricated on
buried oxide (BOX)
LAPIS 0.2 μ m FD-SOI

Features:

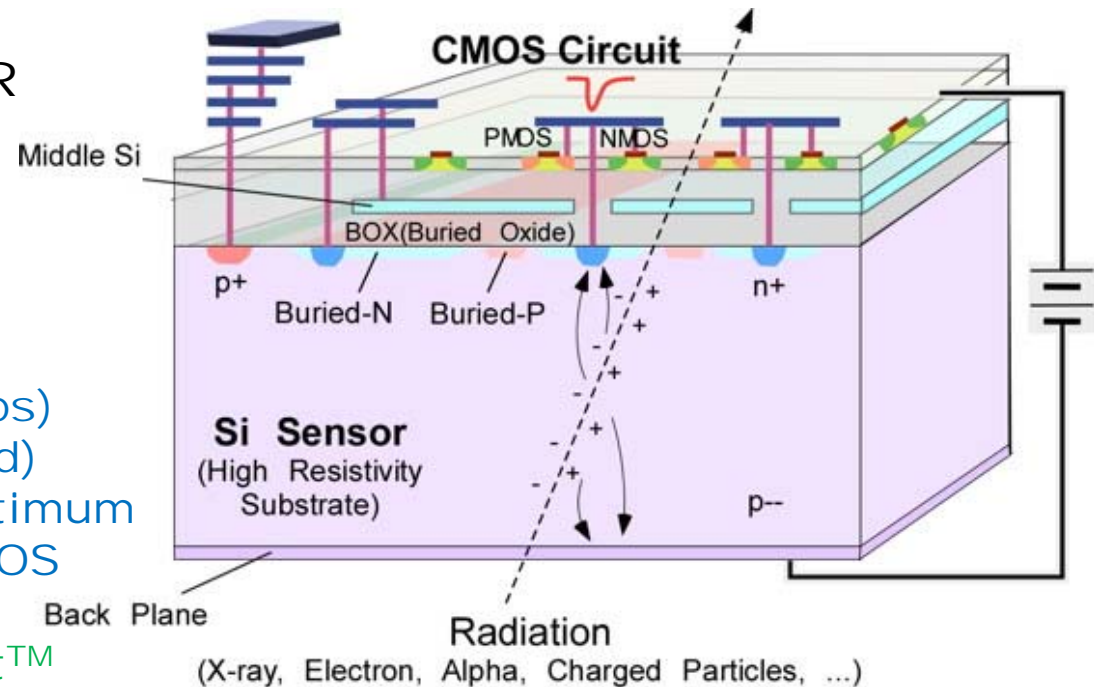
- monolithic (no metal bumps)
- SOI-CMOS (FETs fully isolated)
- Can choose* substrate of optimum resistivity (fully depleted CMOS sensors possible)

*SOITEC SmartCut™

many excellent features

- Material budget
- S/N
- power dissipation
- speed
- cost
- **Pixel size**
- single event effects
- latch up
- Operation temp. (0.3K~570K)

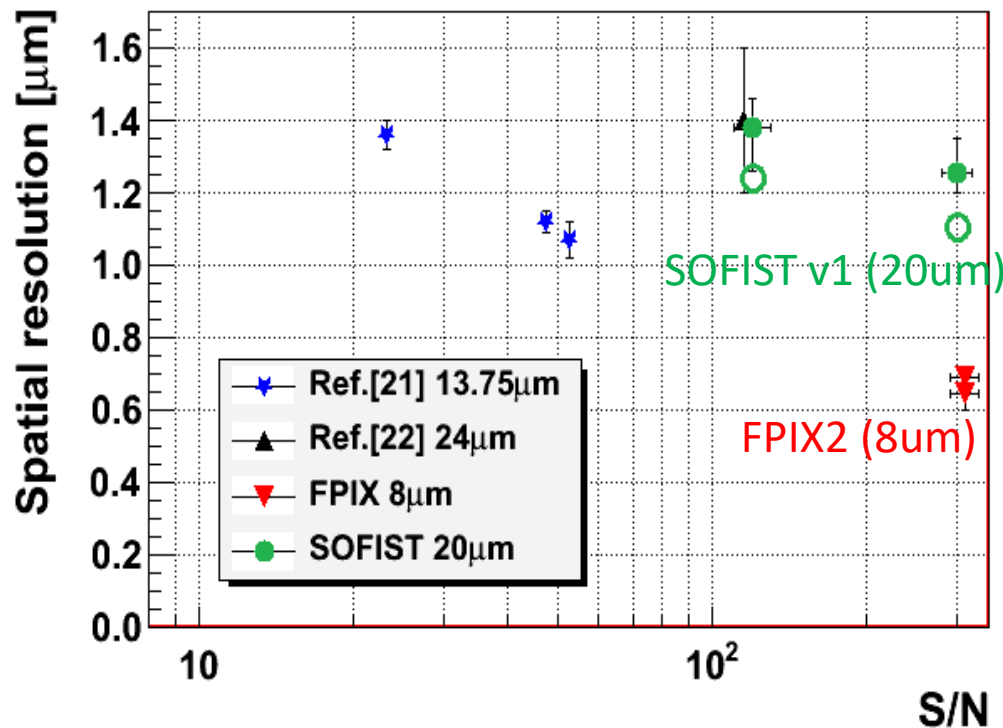
TID tolerance improved to 1MGy by introducing double SOI wafer



SOI FPIX2 –World best Spatial Resolution

半導体検出器で0.65 μm (世界最高性能)を達成

関川(修論2016)



TIPP2017 (Beijing, 2017 May) 原

Press release (June 23, 2017)

お知らせ・情報

世界最高精度の放射線測定センサーを開発

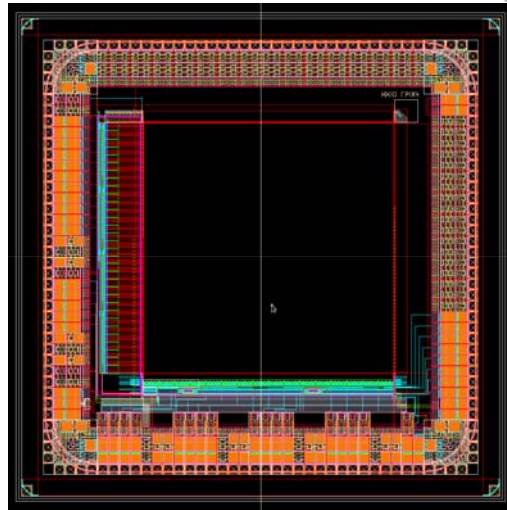
2017/06/23

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、筑波大学、大阪大学、東北大学のSOIピクセル共同開発研究チームが、世界で初めて1 μm 以下という超高精度の位置測定が可能なSOI (Silicon-On-Insulator) ピクセルセンサーの開発に成功しました。従来のシリコン半導体センサーに比べ、位置測定精度が1桁改善しました。素粒子反応の正確な観測には欠かせない技術となります。このセンサーを使って、高い放射線検出効率を持った信号処理回路一体型の微細ピクセルセンサーを実現しました。

図 SOIピクセルセンサーの断面図。SOI構造下部のシリコン層は集積回路から絶縁されており素粒子センサーとして利用できる。センサーからの電気信号を基板上部の集積回路に直接伝えることで損失や雑音の少ないシステムを実現。集積回路は現代のエレクトロニクスを支える高度な技術で、センサーの信号処理にはうってつけの組み合わせ。こうしたセンサーと信号処理回路が一体となった構造は「モノリシック・ピクセル」と呼ばれる。今回開発したセンサーは放射耐性を強化するため、通常のSOI構造に加え、中間にさらにもう1層のシリコン層を加えている。(画像提供 Rey.Hori)

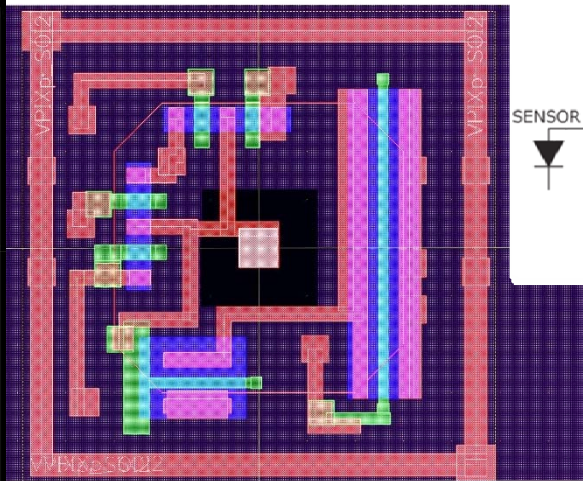
VERTEX2017 (Las Caldas, 2017 Nov) 原

SOI Fine Pixel Detector FPIX4

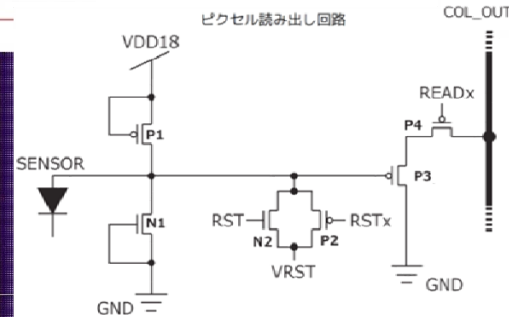


FPIX4 layout
256x256 pixels
16 parallel outputs

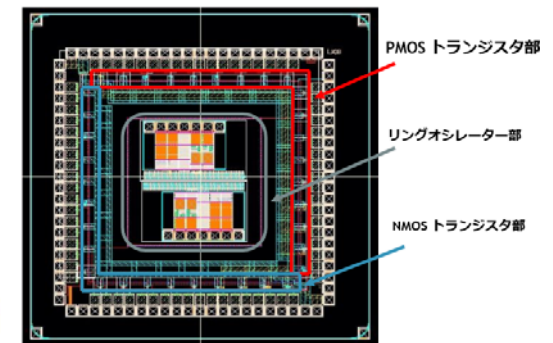
Sub-board ⇒ SEABAS



PIXEL Size 9x9um (same as FPIX3)
8x8 um : minimum achieved in FPIX2



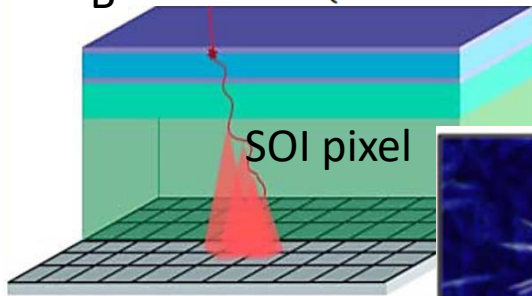
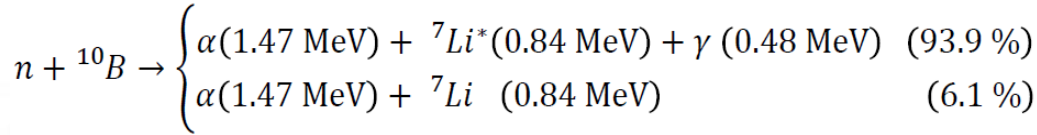
- VLSI design (原)
- Sub-board design/fab (岩波、卒論2017)



VLSI design (TrTEG9)
(安部、岩波、卒論2017)

Precision neutron detector

FPIXの精密測定で~1umの中性子検出が可能かの基礎研究

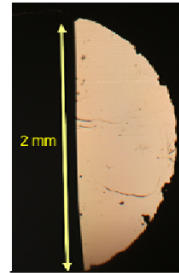
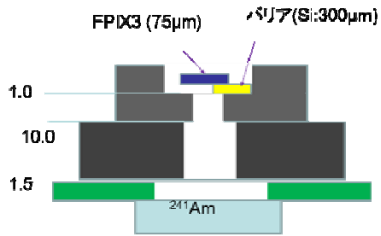
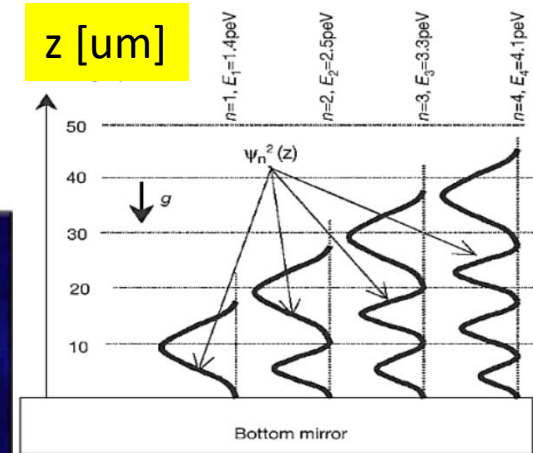


- ✓ 超冷中性子の重力場中の量子状態
- ✓ ウラン濃縮度(JAEA “核査察”)

従来はプラスチックにつく傷をエッチングで拡大し顕微鏡観察(~数日必要)

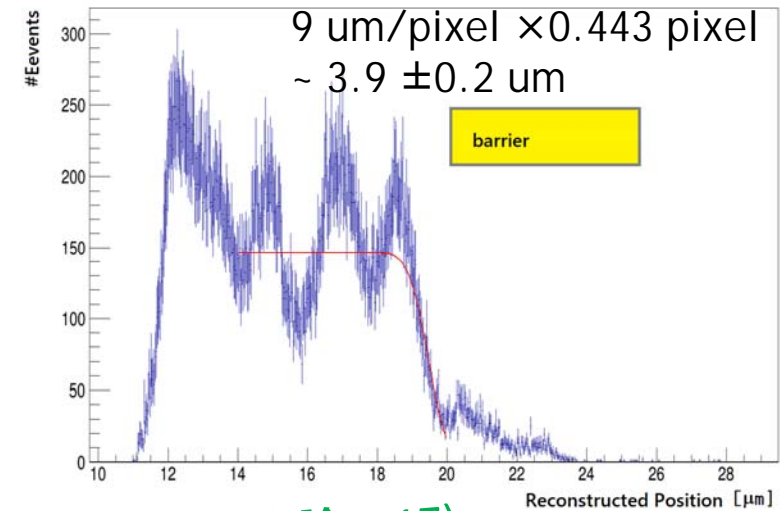
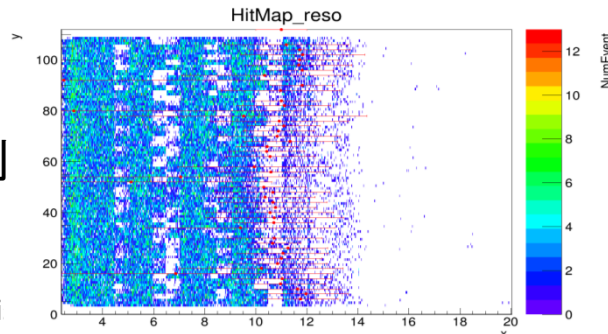


(a) 天然ウラン (NU) (b) 10%濃縮ウラン (c) 85%濃縮ウラン



エッジの非直線性、エッジでの散乱を含む

Am-α線を用いて、バリアエッジを観測



安部、岩波(卒論2017)

SOI Testbeam@FNAL (2018 Feb/Mar)

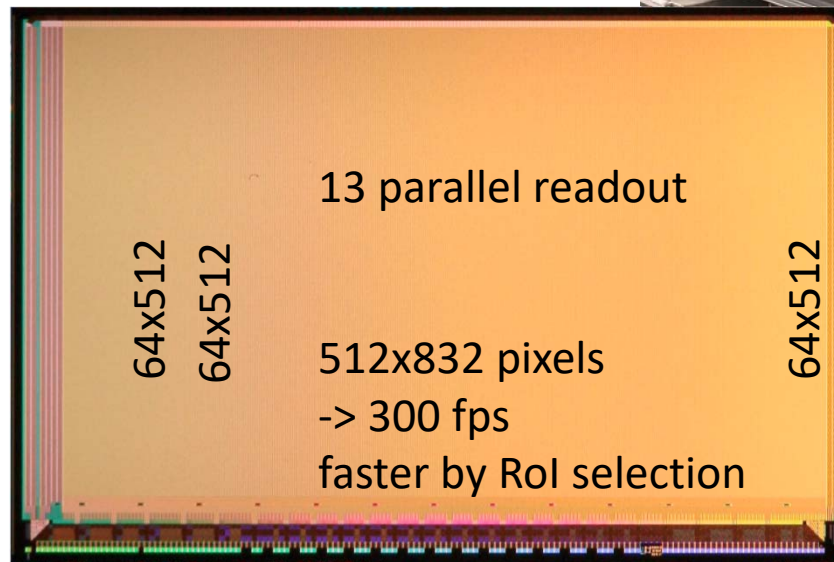
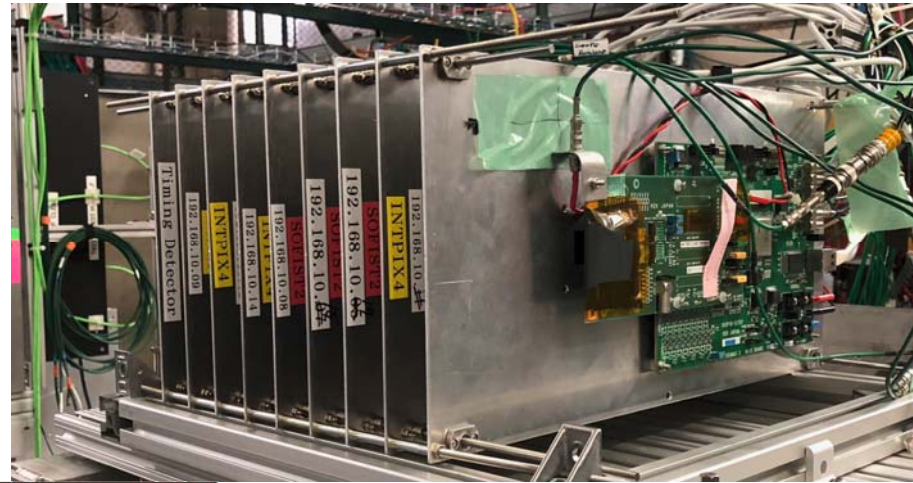
SOFISTのビーム試験

大面積 INTPIX4 を4台用いて
ビーム飛跡再構成

Pixel size : 17x17um

Sensitive area (8.7x14.1mm)

山内(データ解析中)



このようなシステムは他には欧州のEUDETのみ
(Mimosa 18.4um pitch, 576x1152 pix)

Tomonaga Center for the History of the Universe June 4, 2018



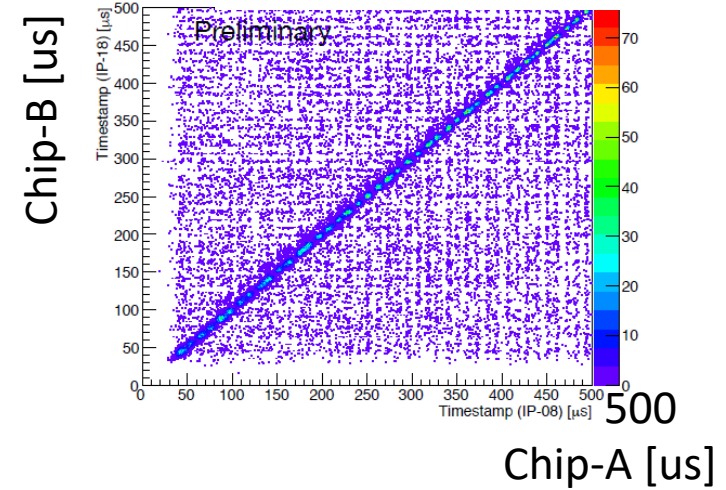
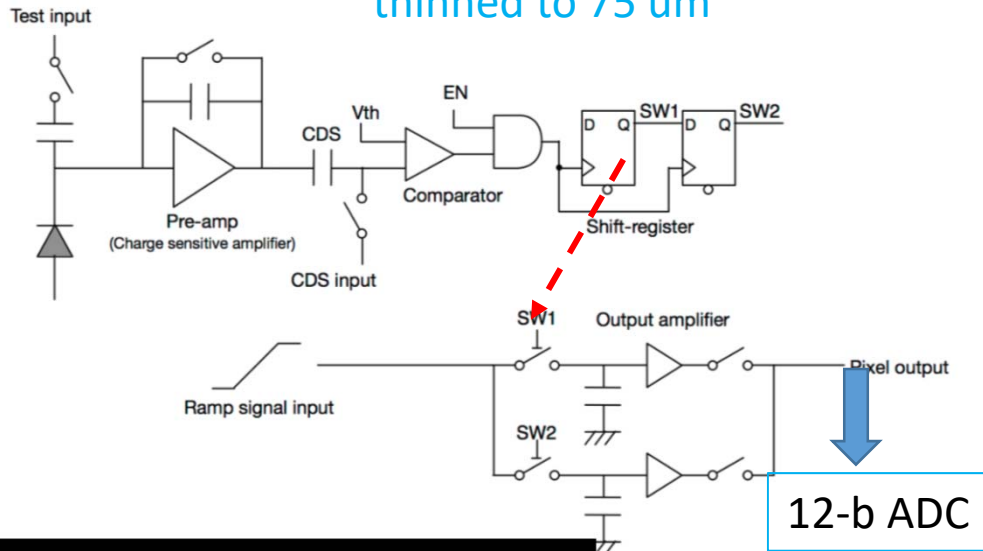
SOI Testbeam@FNAL

(2018 Feb/Mar)

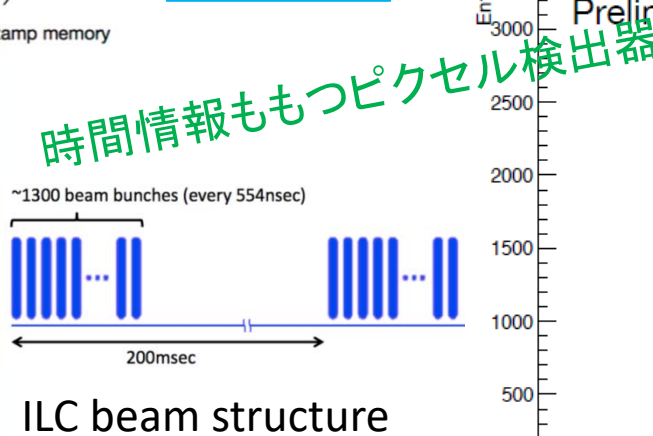
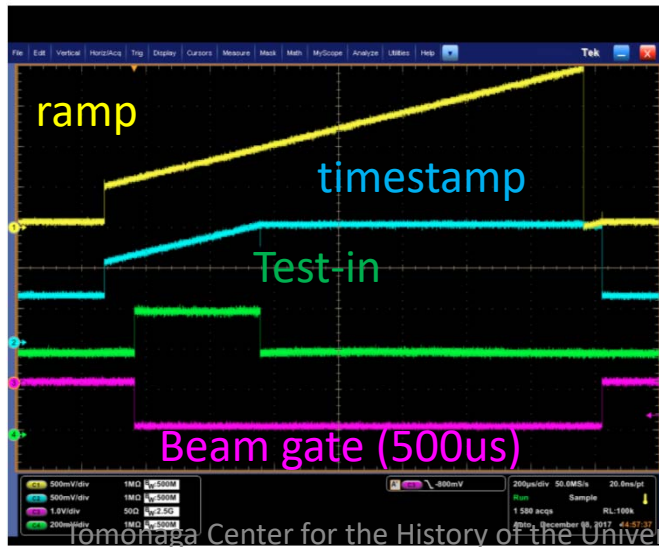
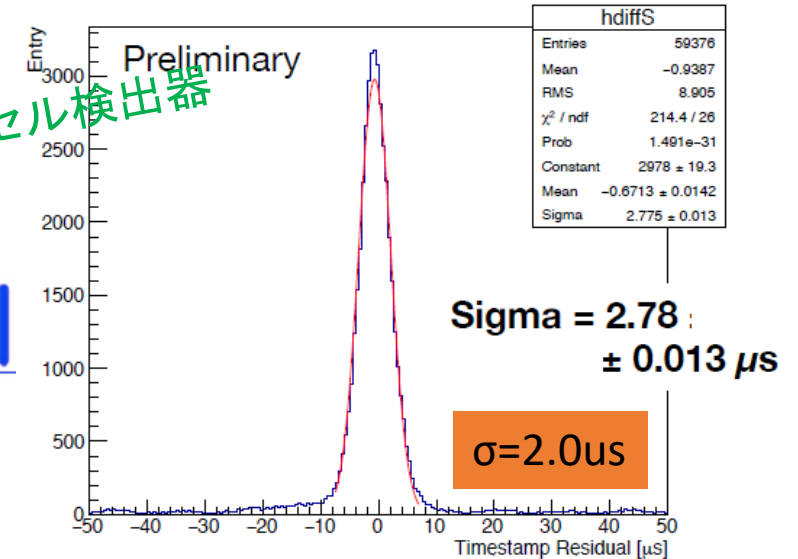
SOFIST: SOI Fine measurement of Space and Time

SOFISTv2 for timing study
thinned to 75 μm

Timestamp correlation

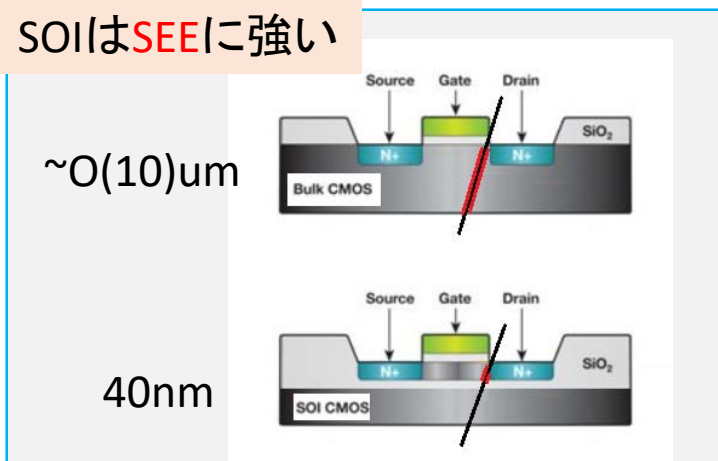


SOFIST ver.2 #1 and #2

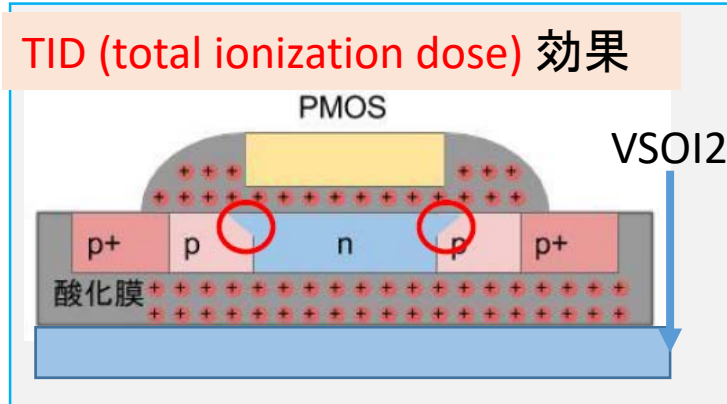


SOI Radiation-hardness

SOIはSEEに強い

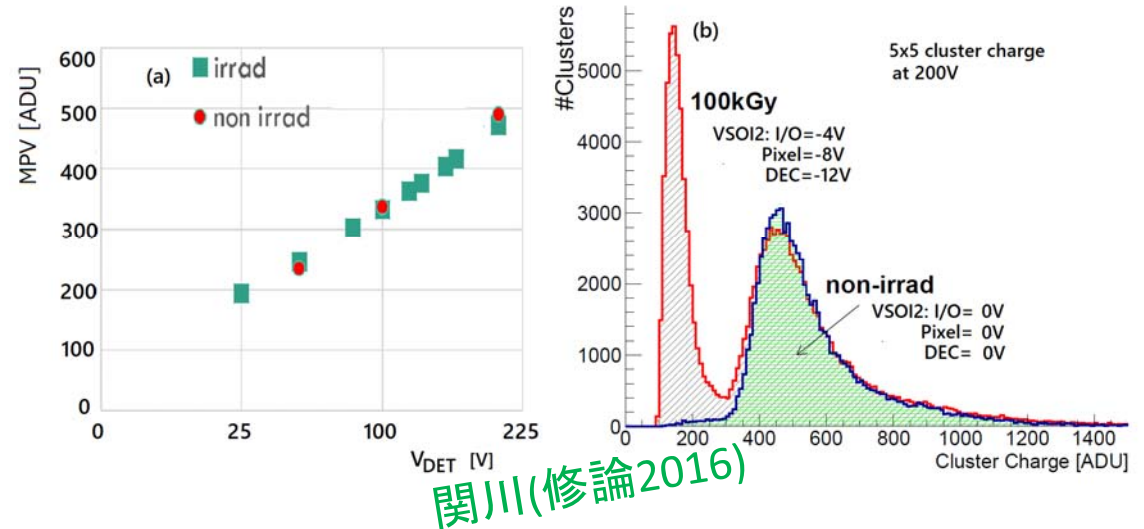


TID (total ionization dose) 効果

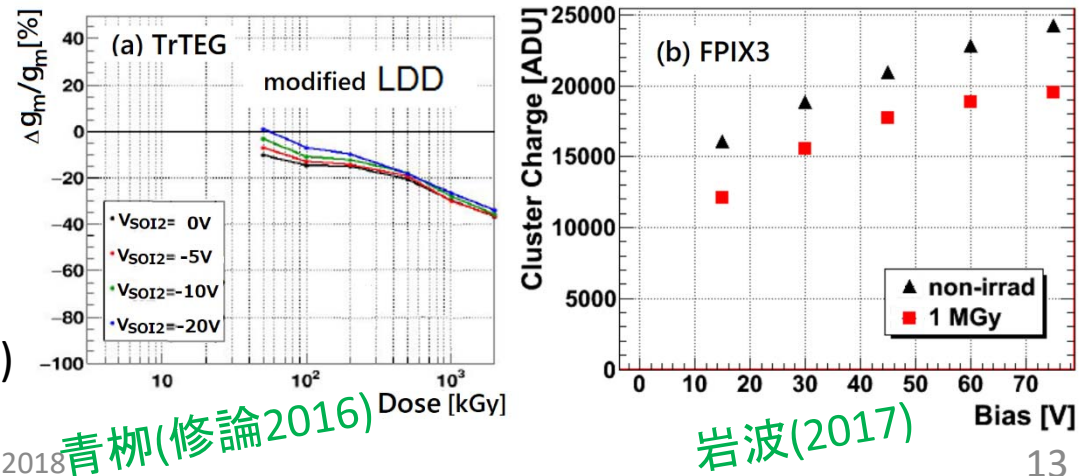


- introduce 2nd electrode (DSOI: 2011)
- optimize LDD for rad-hardness (2016)

● FPIX2 (100kGy) Testbeam: OK for ILC

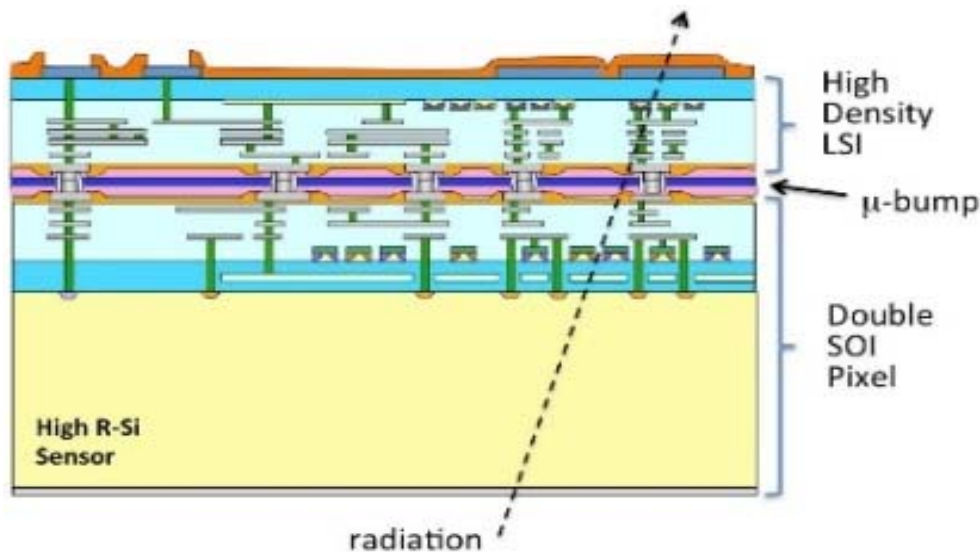


● FPIX3 (1MGy) IR laser: 一般のCMOS に匹敵する性能

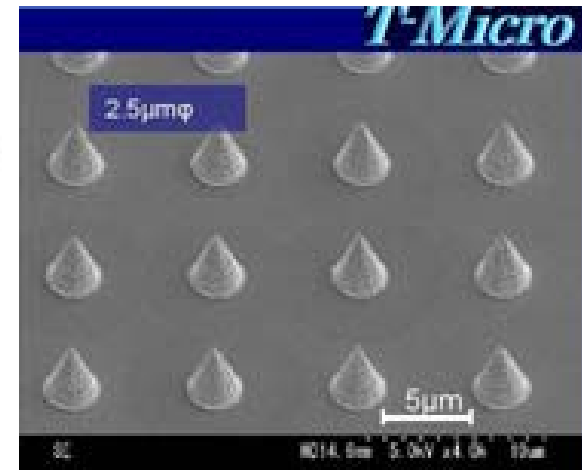


SOI-3D: more functionality

● Innovative detectors in TIA



Au-cone micro-bump



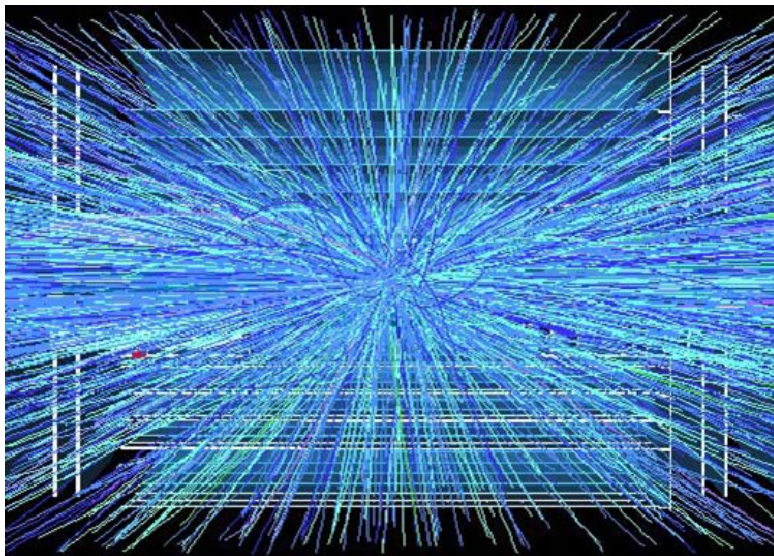
- 最新の VLSI 技術と融合できる -> 先端加速器実験(ILC、FCC他)
- 異種マテリアル(e.g. CdTe) との積層 -> X-ray detectors
- 検出器の多層化 -> Compton camera, 4D detector

2018年度 TIA-かけはし:「3次元構造半導体量子イメージセンサーの調査研究」採択
KEK(倉知)-AIST(菊池)-U Tsukuba(原)-U Tokyo(池田)

LHC \Rightarrow HL-LHC(2026)

Luminosity : 300 \Rightarrow 3000 /fb

放射線量 10倍
粒子密度 (~5倍)



事象数/ビーム交差=200のシミュレーション

内部飛跡検出器 \Rightarrow All silicon (ITk)

Strip detector (12cm \Rightarrow 4.8/2.4cm)

Pixel detector (50x250 \Rightarrow 50x50um)

1st pixel: 3D

2nd -5th : planar

センサー設計 原・池上

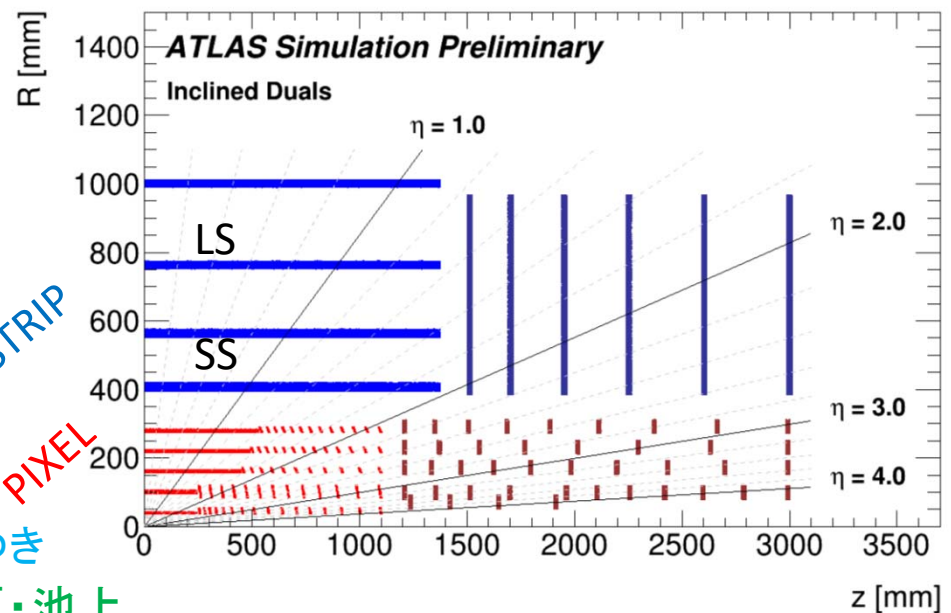
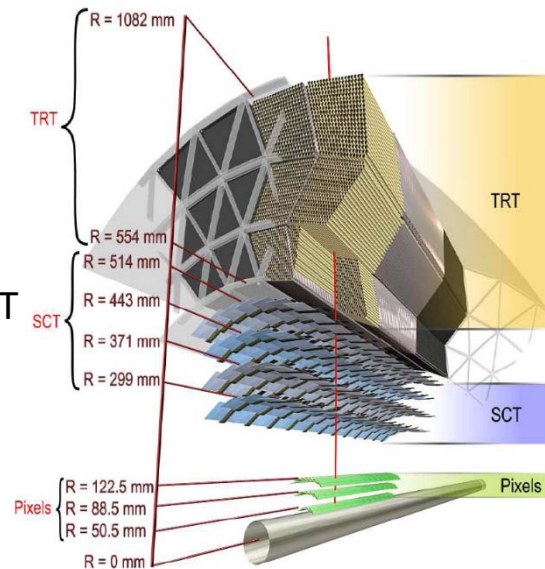
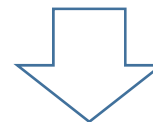
3rd-5thに設置できるバイアス構造つき

p型ピクセルモジュールを設計 原・池上

HL-LHC ATLAS ITk

現ATLAS

筑波大(原)はSCT
の設計・建設を
分担



STRIP

PIXEL

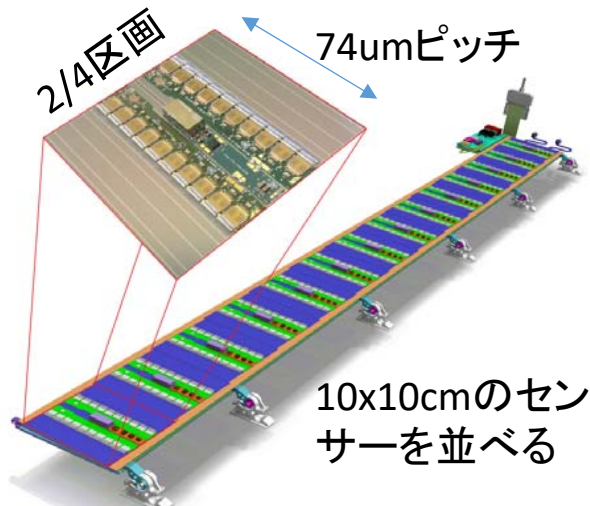
HL-LHC Strip Sensor

2005よりp型センサーを開発 海野(KEK)・原 他

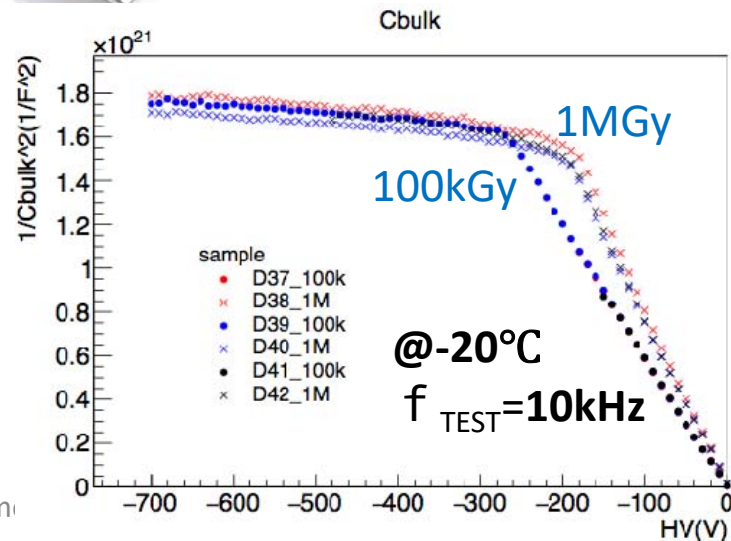
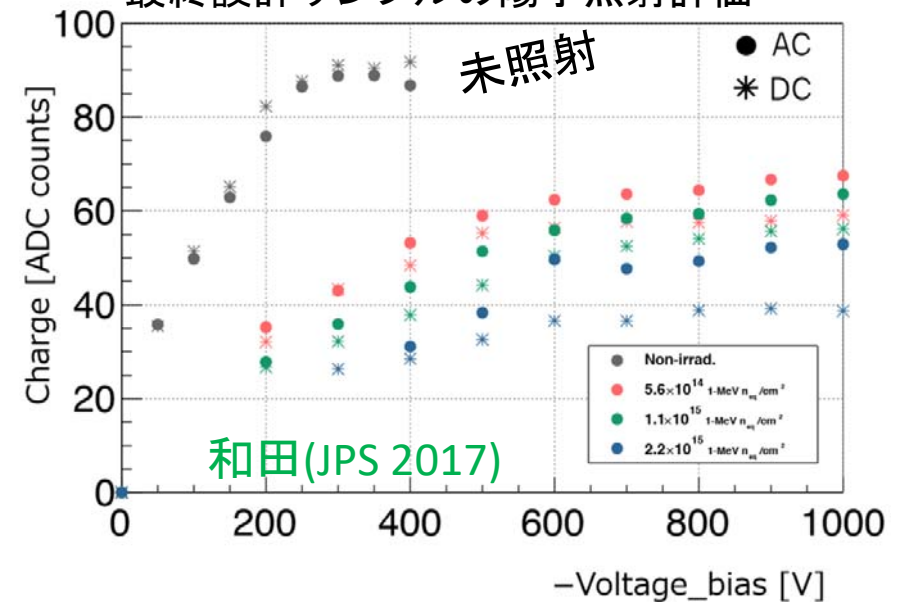
- Siは放射線を受けるとp型不純物を多く生成⇒p型は損傷後も同設計で稼働
- 高速な電子を収集する⇒損傷による捕獲が減少



ATLASで全面的に採用



最終設計サンプルの陽子照射評価



- ✓ 放射線損傷後も>50%(@500Vbias)の電荷収集
- ✓ DCタイプの試験:センサーは正常⇒将来の低コスト化

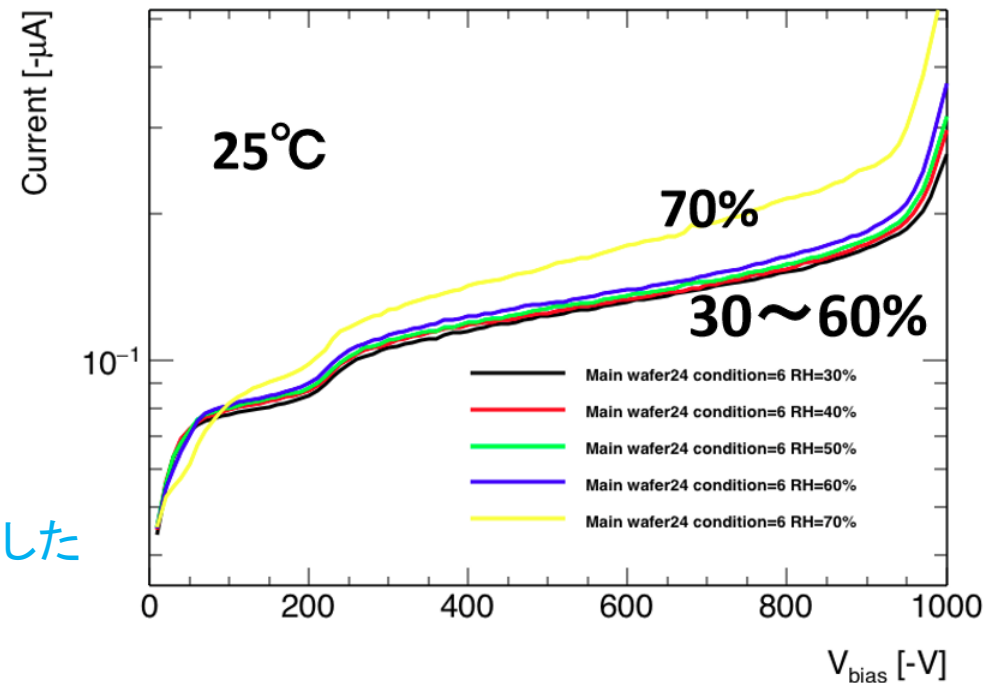
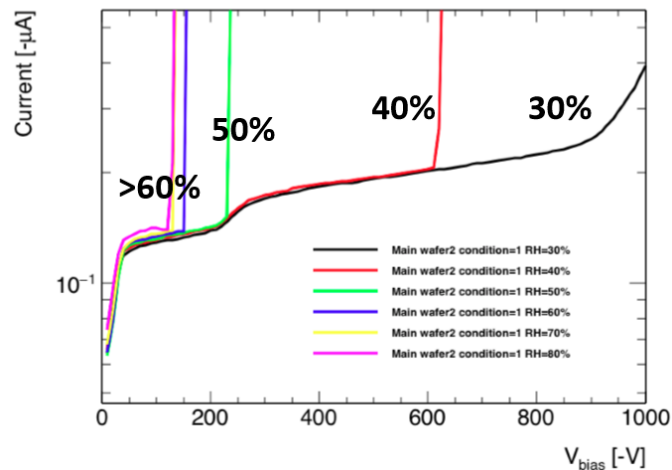
Co-γ線で空乏化電圧の低下
300V→250V(100kGy)⇒200(1MGy)
“acceptor removal”を実証?
大鳴・原田・和田 2018

HL-LHC Strip Sensor

いくつかのセンサーで暗電流の不安定性が観測された

- 湿度依存性があることを明確に示した(鈴木、和田) ➡ 表面保護膜の欠陥？
- 外的な傷のない場所での暗電流発生(鈴木)

従来条件



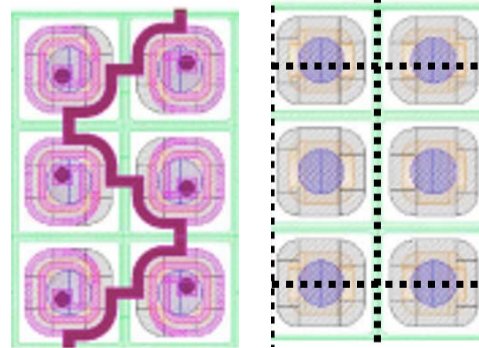
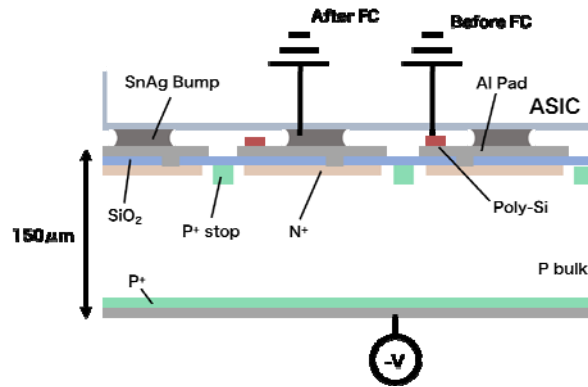
- ✓ 成膜条件を変えて(HPK)、暗電流が安定したセンサー製造
- ✓ 製造プロセスに反映し初期量産中

鈴木(修論2017、研究科長賞)

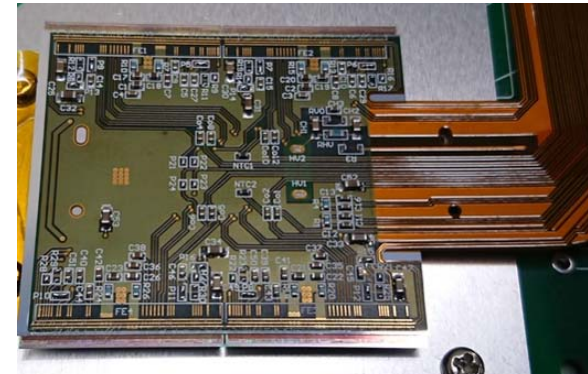
HL-LHC Pixel Sensor

3rd-5thに設置できるバイアス構造
つきp型ピクセルモジュールを設計

50x50um pixel
(25x100umも可能)



ATLASに設置できるFlex基板
ピクセルモジュール(4x4cm)

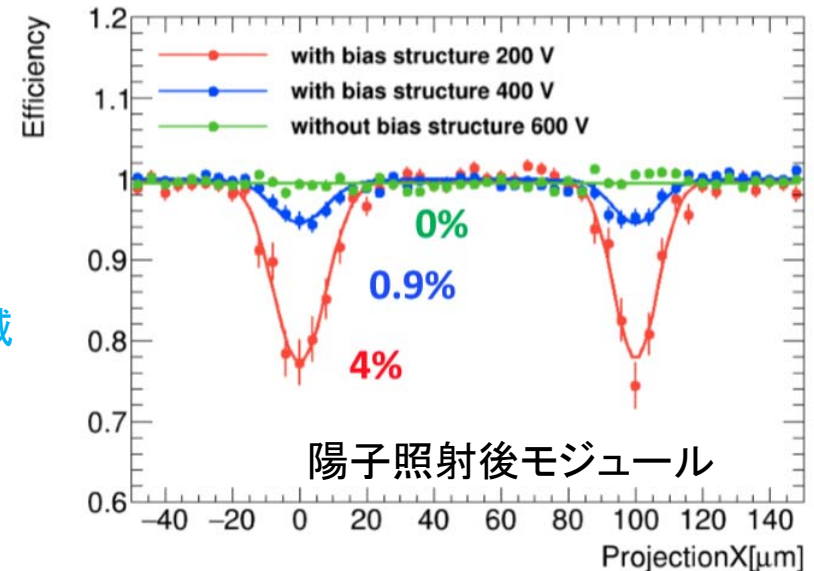


- ✓ バイアス構造はASICにBBする前のセンサー試験に必要(ATLAS-J独自の提案)
- ✓ バイアス構造によりノイズがやや増加

25x100umモジュールのビーム試験(鈴木、内田、和田)
⇒ピクセル境界で効率が劣るがバイアスを上げることで低減

- バイアス抵抗の高抵抗化(HPK)
- センサーの良品率は?(今年度)
- そもそも「しきい値」の値は?(内田JPS, 原田卒論2017)

⇒量産にむけたモジュール評価法の確立(今年度)



鈴木(修論2017、研究科長賞)

日仏FJPPL: 筑波大/KEK(原)ーLAL(Lounis)

原 Low-gain avalanche detector LGAD

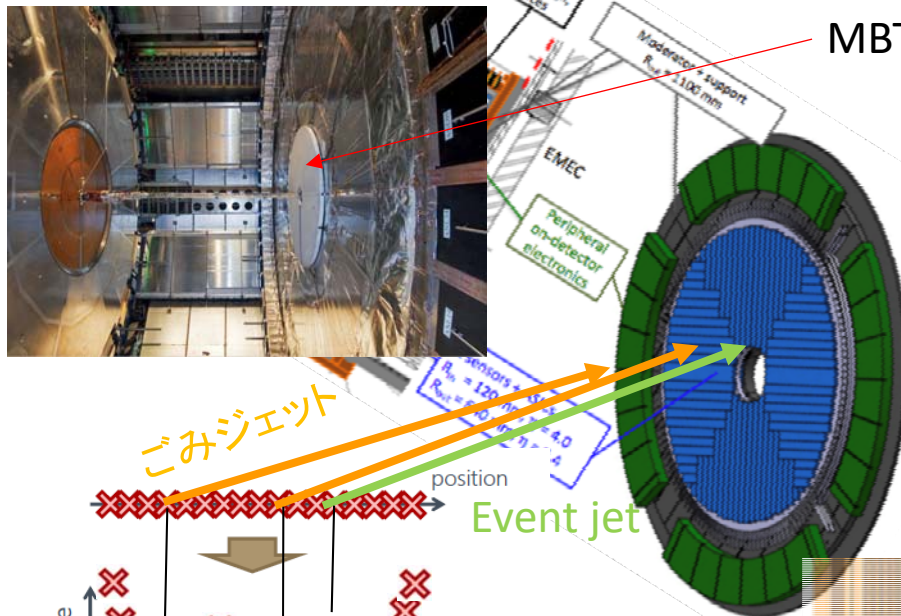
時間分解能(~30ps)を実現する高位置分解能検出器

LGAD

<P-typeのHL-LHC用照射研究から発見>

High granularity timing detector (1.3mm)

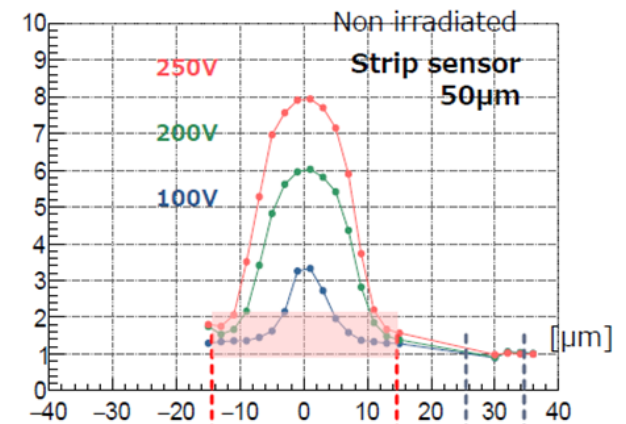
MBTSをHGTDに交換(@HL-LHC)



- 時間情報から事象(多重度 $\mu \sim 200$)を区別
- 将来のハドロンコライダーFCCの飛跡再構成に使える細分化ピクセル(4D検出器)を目指す
- PET能力を飛躍的に向上できる

- LGAD増幅の基礎研究
(和田卒論2016,理工学群長賞)

HSTD11での発表(和田)



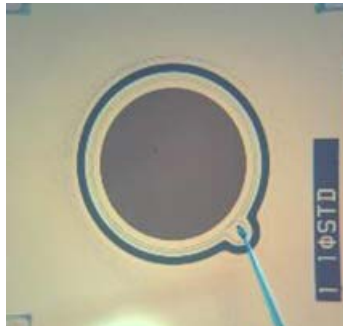
細分化されたLGAD増幅の研究
~ (大鳴卒論2017)

Low-gain avalanche detector LGAD

FNAL Testbeamを用いた時間分解能評価

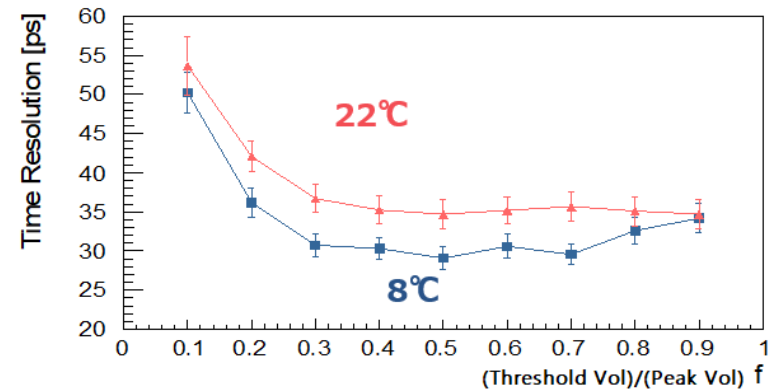
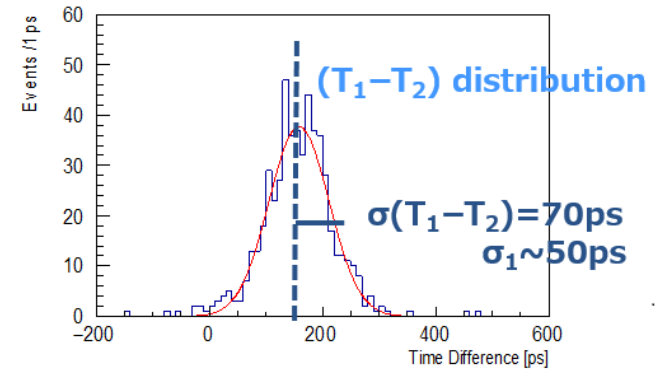
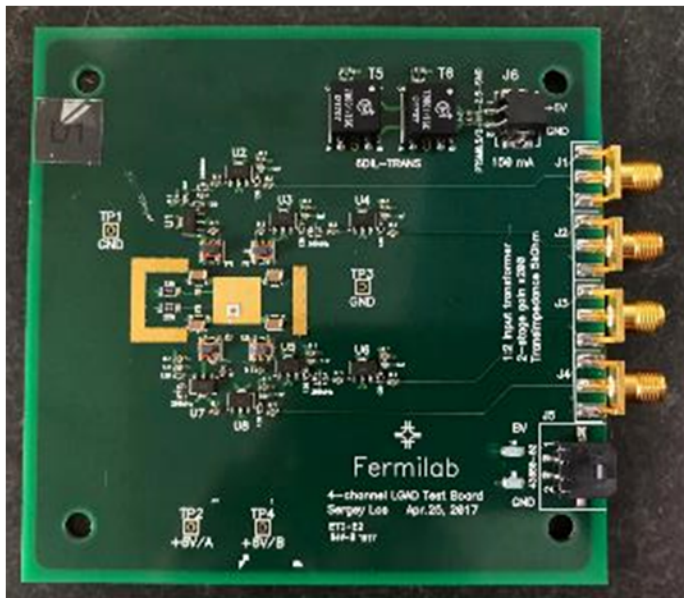
3個のDiodeを並べ、時間差分布から個別の分解能を評価

Monitor Diode



DRS4 VME

アンプボード



30psを切る時間分解能を達成 (和田, JPS)
⇒データ(5GHz)から時間測定法の最適化
⇒細分化読出し用アンプ



Summary and Outlook

Muon-radiography

2011に開始したプロジェクトは1~3号炉の燃料デブリの観測を完遂

SOI monolithic pixels

FPIX4 (次のtestbeam用tracker), TrTEG9(放射線耐性)の開発研究
SOFIST(ILC用)の高機能化
3D stacking (FCCへの応用?)

HL-LHC ATLAS strips

設計の最終化(保護被膜)を経て、初期量産開始←放射線耐性を主に品質評価

HL-LHC ATLAS pixels

設計の最終化中。FC前のセンサー評価法(bias構造付き/dummy metal/no test?)
モジュール製造と品質評価

LGAD

ストリップ時間読出し、読出し回路のコンパクト化、FCCを目指した研究、、、