

# SOIセンサを用いた J-PARC muon g-2/EDM 実験用ビームモニター

計測システム研究会  
2020年11月27日(金)  
三好敏喜(KEK)

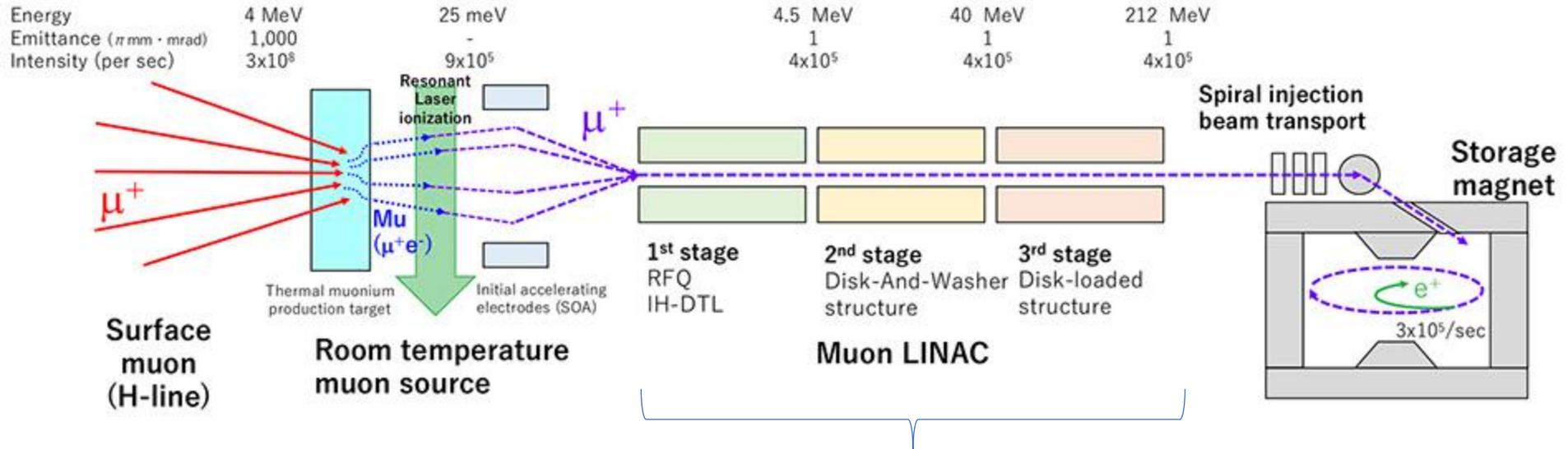
## Table of contents

**g-2/SOI joint group: T. Mibe, T. Youssef,  
M. Otani, T. Yamazaki, K. Shimomura,  
Y. Miyake, T. Miyoshi, Y. Arai,  
R. Nishimura, T. Tsuboyama**

- 概要
- 評価試験
- 今後の予定
- 課題
- まとめ

# Muon g-2/EDM experiment at J-PARC

<https://g-2.kek.jp/portal/>



Goal

Magnetic moment 0.1ppm

EDM  $10^{-21}$  e.cm

ミュオンビームモニター

提案されている手法

MPC-Phosphor-CCD combination

Muon LINAC

3つのステージがある

それぞれの出口で

ビームをモニターする

4.5 MeV, 40 MeV, 212 MeV

それぞれのエネルギーで

Energy depositが異なる

# Energy deposit in silicon

6/30 坪山氏スライド

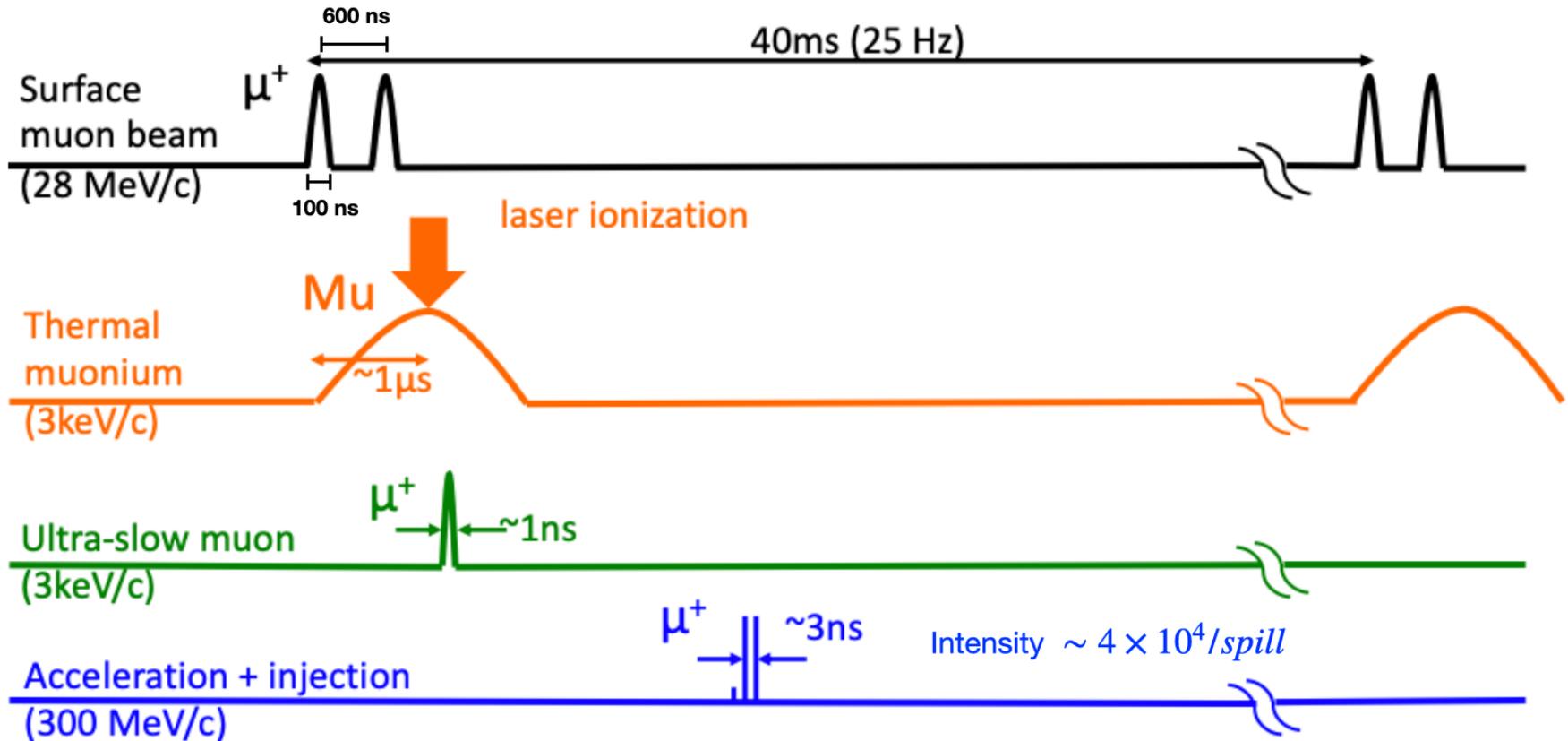
	Energy@exit (MeV)	velocity (% speed of light)	dE in silicon (keV/50 $\mu$ m)	Electrons /50 $\mu$ m
<b><math>\mu</math> source</b>	0.0056	1	5.6	100
<b>RFQ</b>	0.34	8	690	100000
<b>DTL</b>	4.5	30	70	10000
<b>DAW</b>	40	70	23	3400
<b>DLS</b>	212	94	17	2600

必要となるセンサ：

“低感度”センサ

ゲインをコントロールできるセンサ

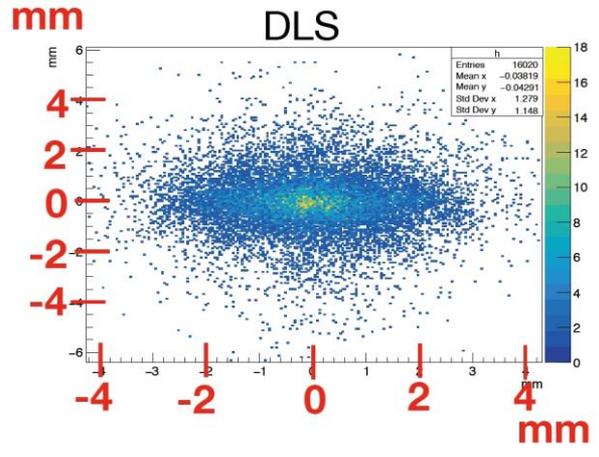
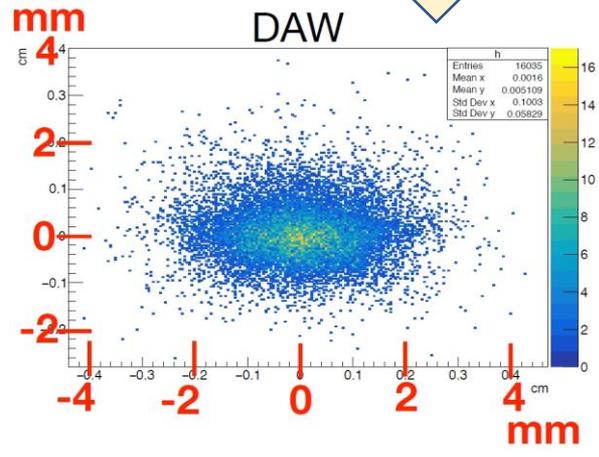
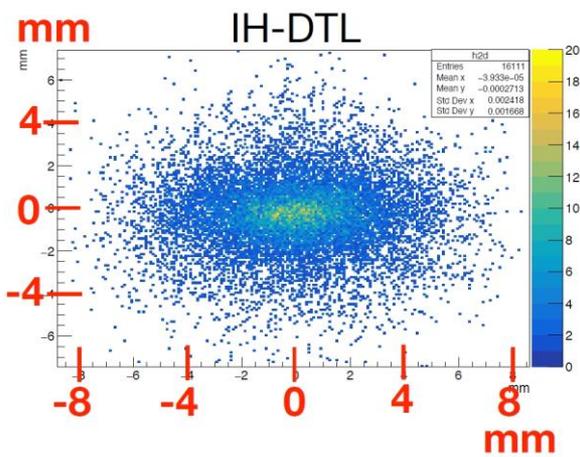
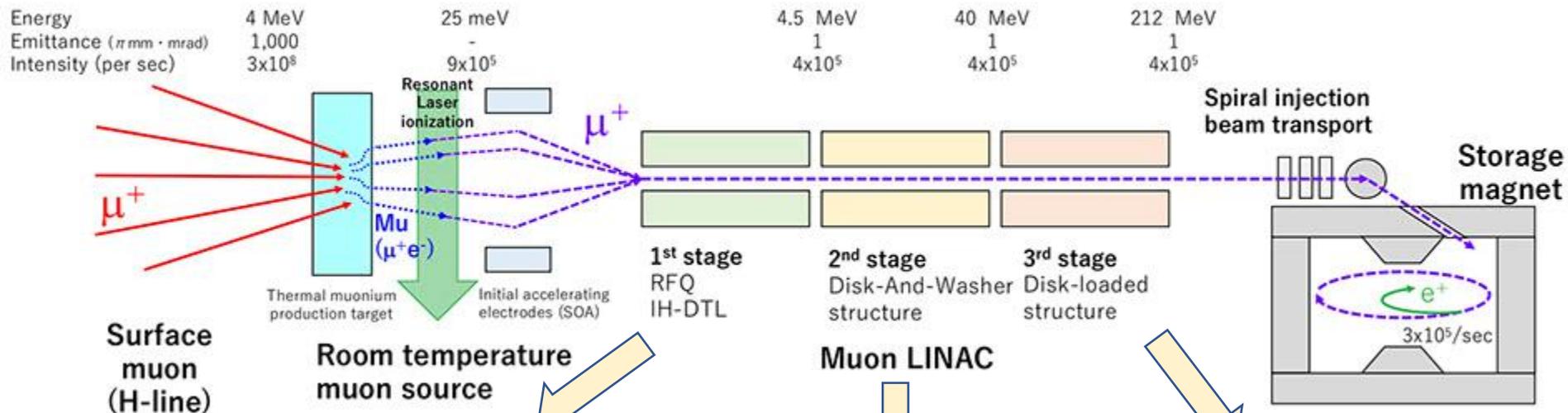
# Beam structure



25 Hz :  $4 \times 10^4 / \text{spill}$   $\rightarrow 10^6$  Hz

最終的に1-3nsのオーダーなので、積分ゲートは100nsあれば十分  
市販のカメラの積分ゲートはそこまで短くはない(最小でus-msのオーダー)

# Beam size



※大谷氏のシミュレーション結果

有効面積10 mm x 10 mm あれば十分

# ビームモニター用検出器選定条件

センササイズ ~10 mm x 10 mm 難しい条件ではない

Exposure time 10ns 以上 (パルス幅と比較して)

長い検出器はたくさんあるが短くできる検出器は少ない  
長すぎるとノイズの影響を受ける

Readout time 25Hz (ビーム周期) 難しくはないが速い読み出しが必要

Spatial resolution 特にクリティカルな条件はないが100um程度

SN >20 エネルギースペクトル測定の典型的な条件

これらはバックグラウンドと弁別するためには重要なファクター

**Dynamic range: a few to  $10^4$  muons per bunch**

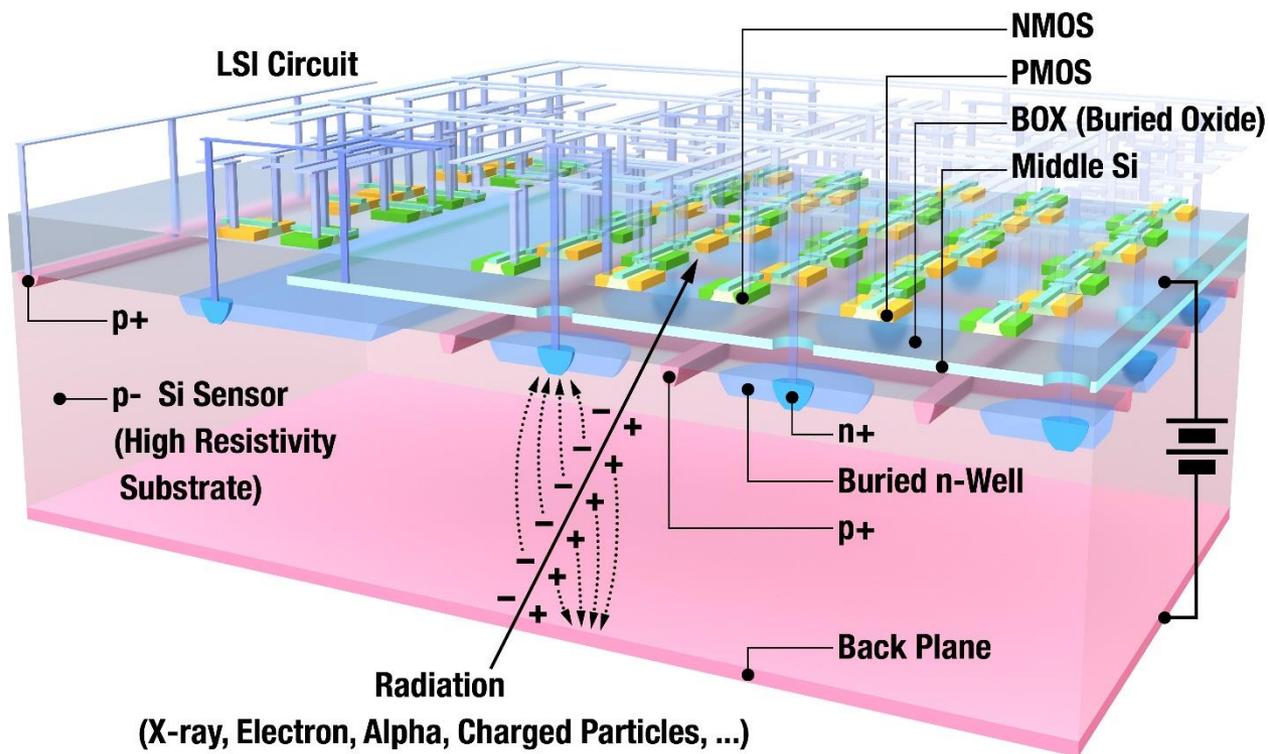
→ 一番難しい条件

ただし、設置場所(3か所)毎にレンジが違っていてもよい

必ずしも、1フレームのDynamic range が大きい必要はない

ゲイン可変のsoi-cmosセンサ: SOI INTPIX8 センサを選んだ

# Silicon-on-insulator (SOI) sensor



厚いSi層 センサ; 薄いSOI層 回路

Si間絶縁酸化膜, センサと回路は金属ビアで繋げる

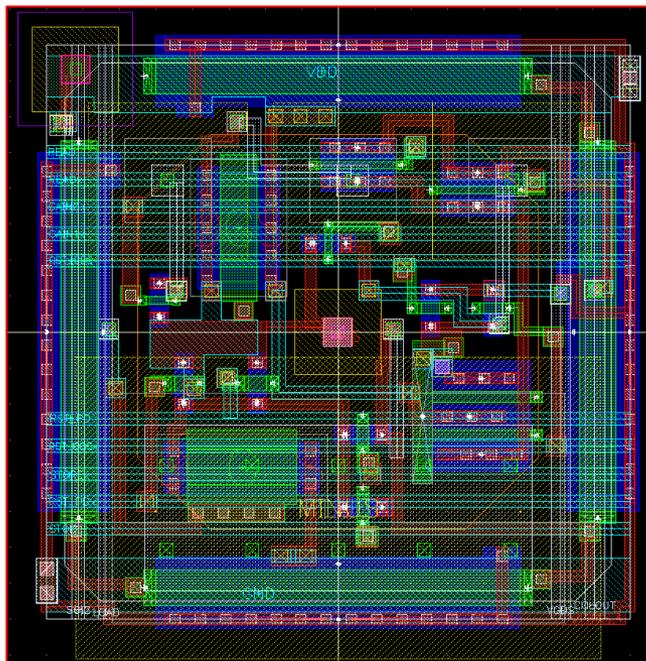
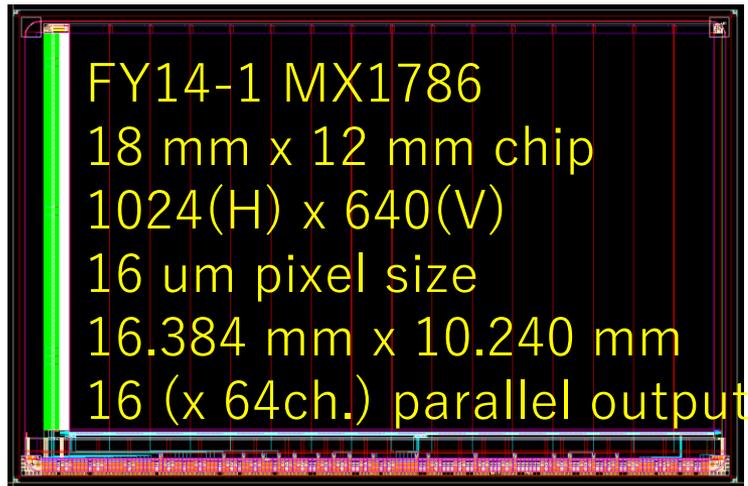
ハイブリットセンサ (回路とセンサは別々に作る) で必要なバンプ (>数um) 不要

SOI-CMOSプロセス(0.2um Lapis)で一括して製作

2005年から測定器開発室のSOIPIXプロジェクトがスタート

面積: マスクサイズが25x30mmだがステッチング露光技術で大きくできる

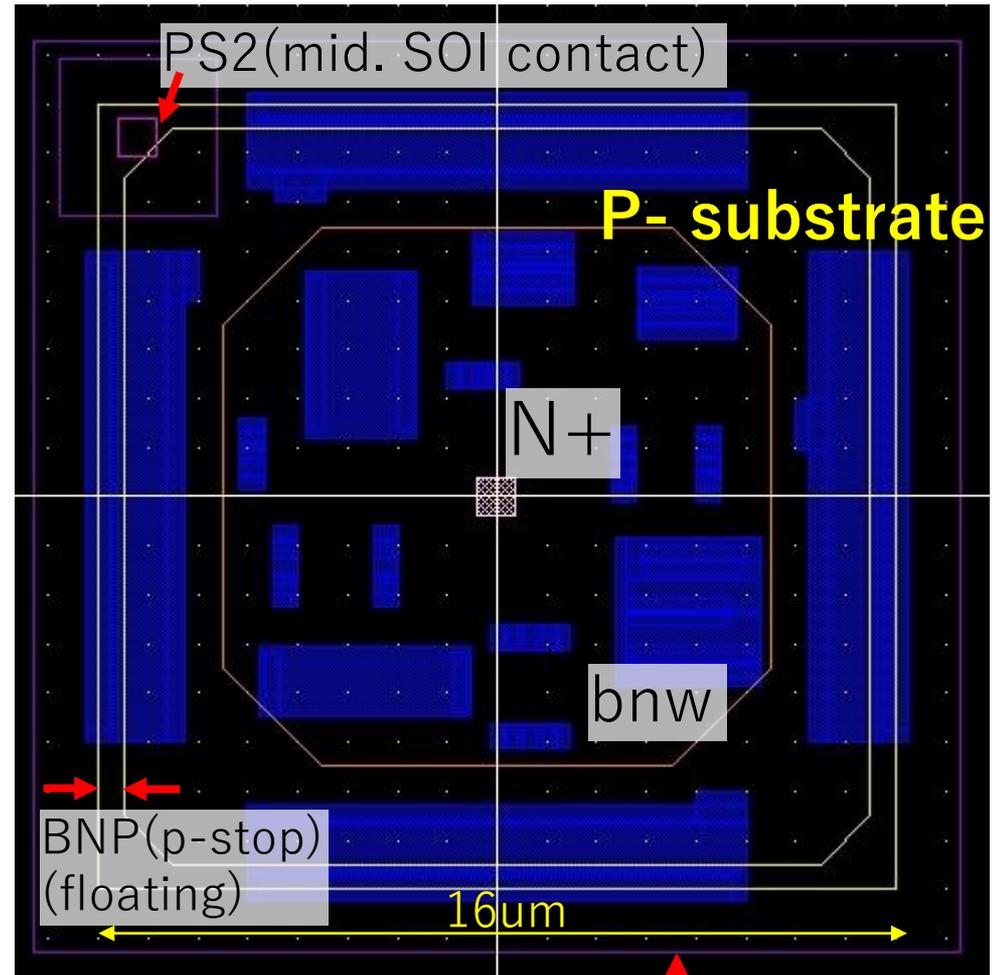
# Integration-type p-type SOI sensor - INTPIX8 (FY14-1)



Pixel layout 16 x 16 um



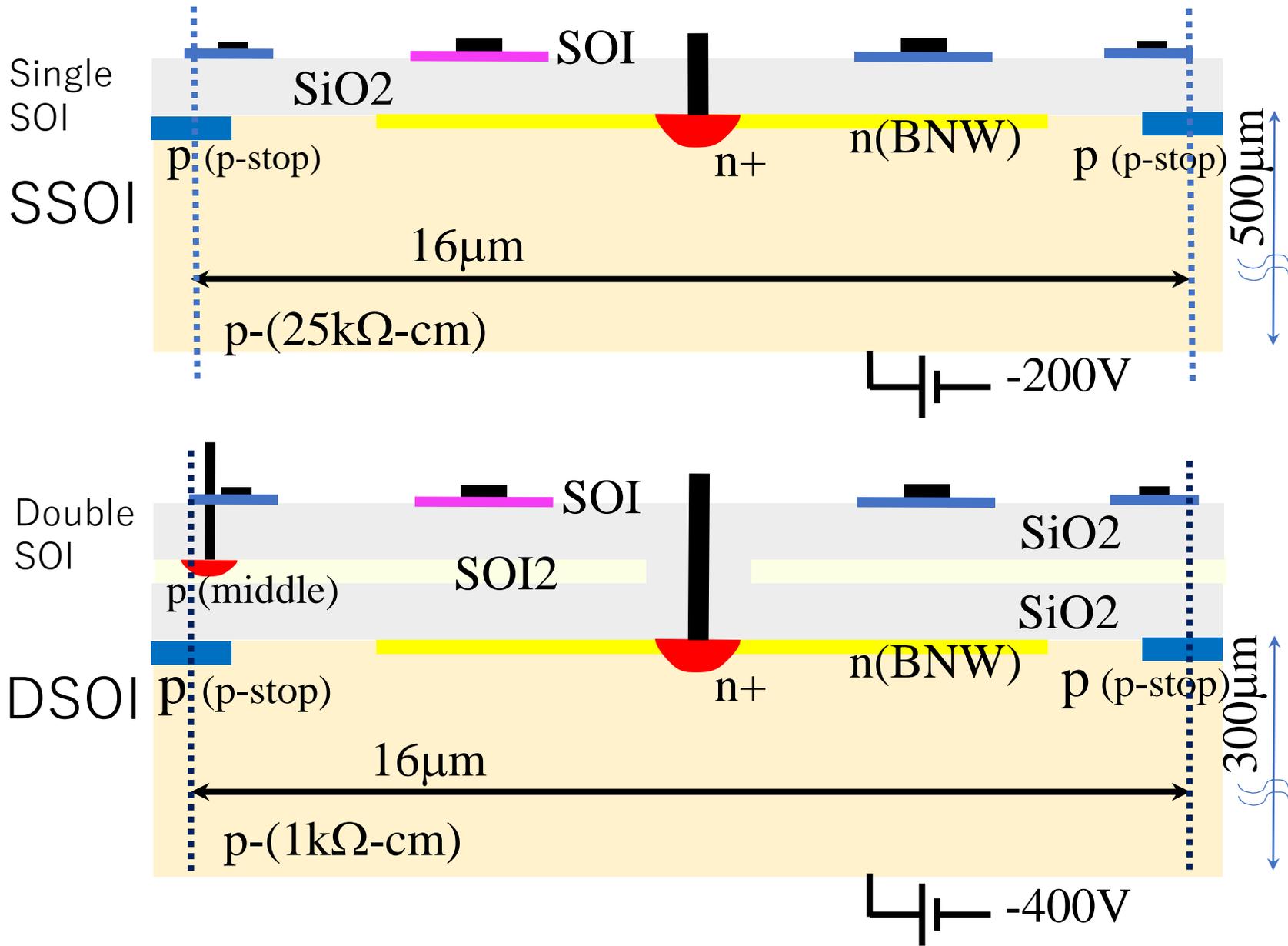
active,  
ps1,  
ps2,  
soi2



Active layer (blue)

Soi2 for DSOI

# Side view of INTPIX8 pixel layout





# 要求性能とINTPIX8仕様比較

Gain 4 settings 4,6,8,12uV/e- → まだ大きいかもしれない

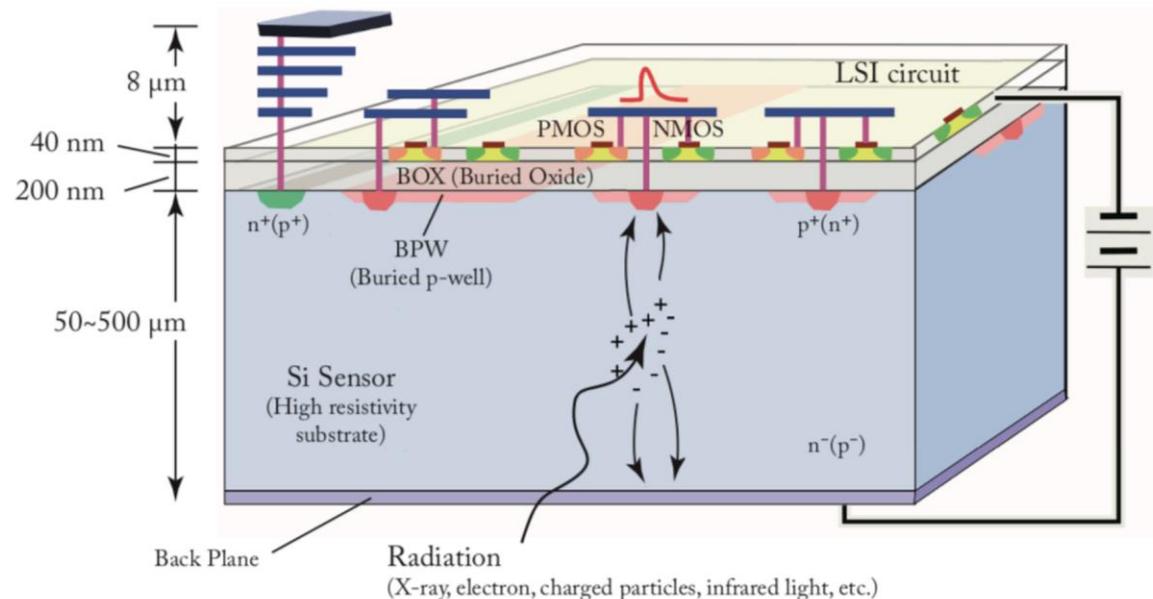
有感領域 10.9 mm x 17.4 mm → 十分な大きさ

厚さ SSOI 500um & DSOI 300um → 低い電圧で部分空乏化

放射線耐性 DSOI → 100k – 1MGy for TID

K. Hara et al., NIM A Vol. 924, 21 April 2019, Pages 426-430

ビームモニター用途だとすると1日24時間常駐ではないだろうから大丈夫か？



# SOIセンサ評価試験 at J-PARC (2020年3月)

Muon検出試験

バックバイアス依存性

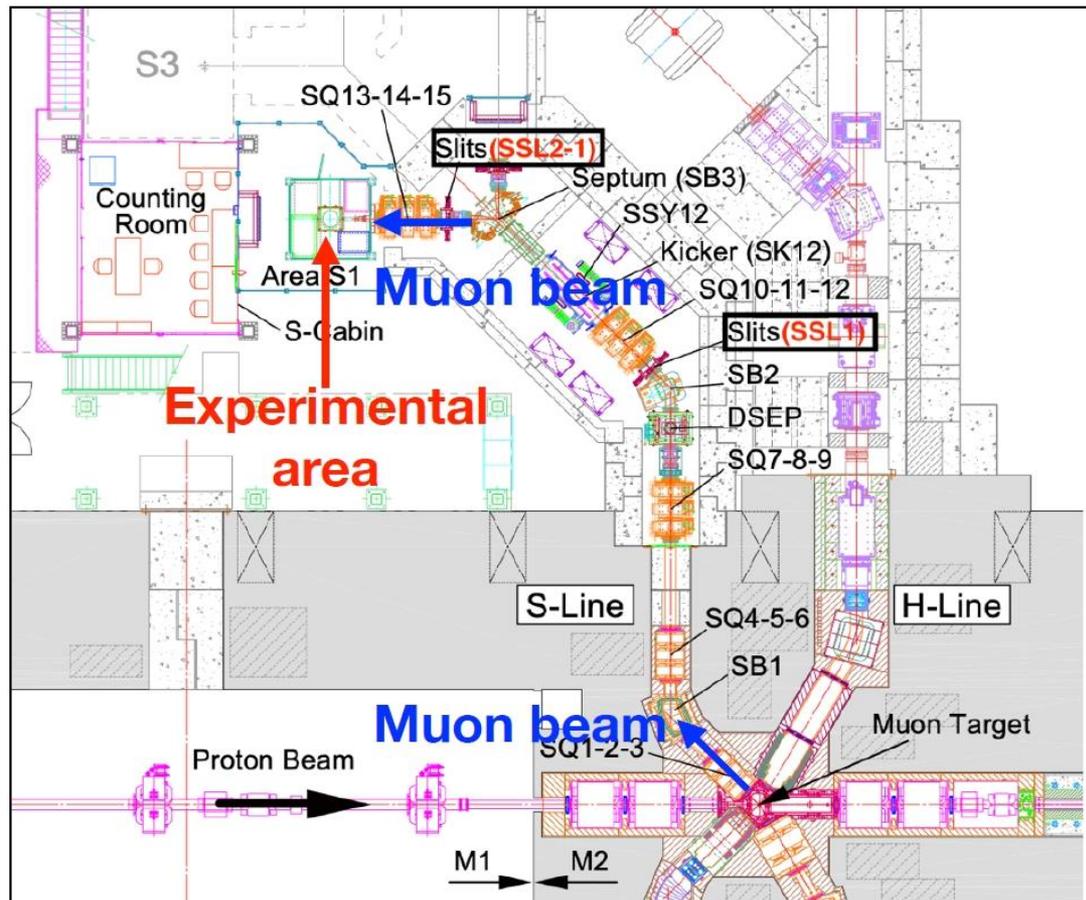
部分空乏状態での検出

SSOI/DSOI

各1枚使用

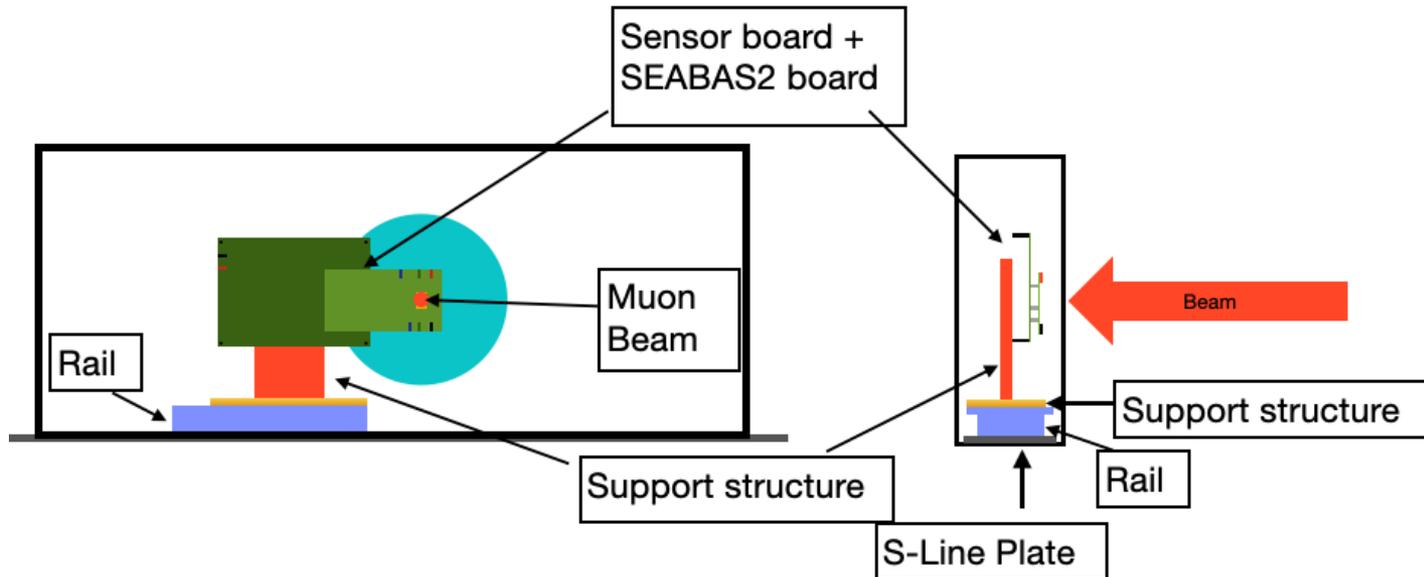
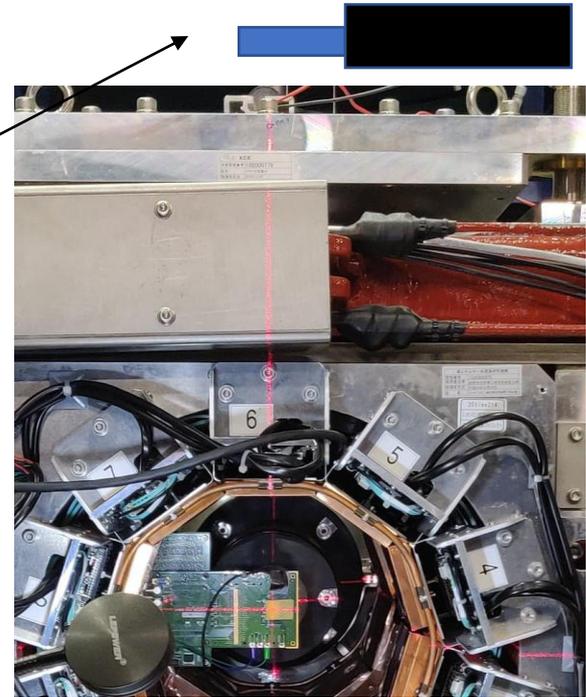
Intensity  $1.4 \times 10^5 \text{ Hz}$  ( $< 10^6 \text{ Hz}$ )  
Beam energy 4 MeV ( $\sim \text{IH-DTL}$ )  
Beam size  $\sim 2.5 \text{ cm } \phi$  ( $> \text{数mm } \phi$ )

ビーム密度が小さいので  
レートに関わるスタディは  
今回はできない

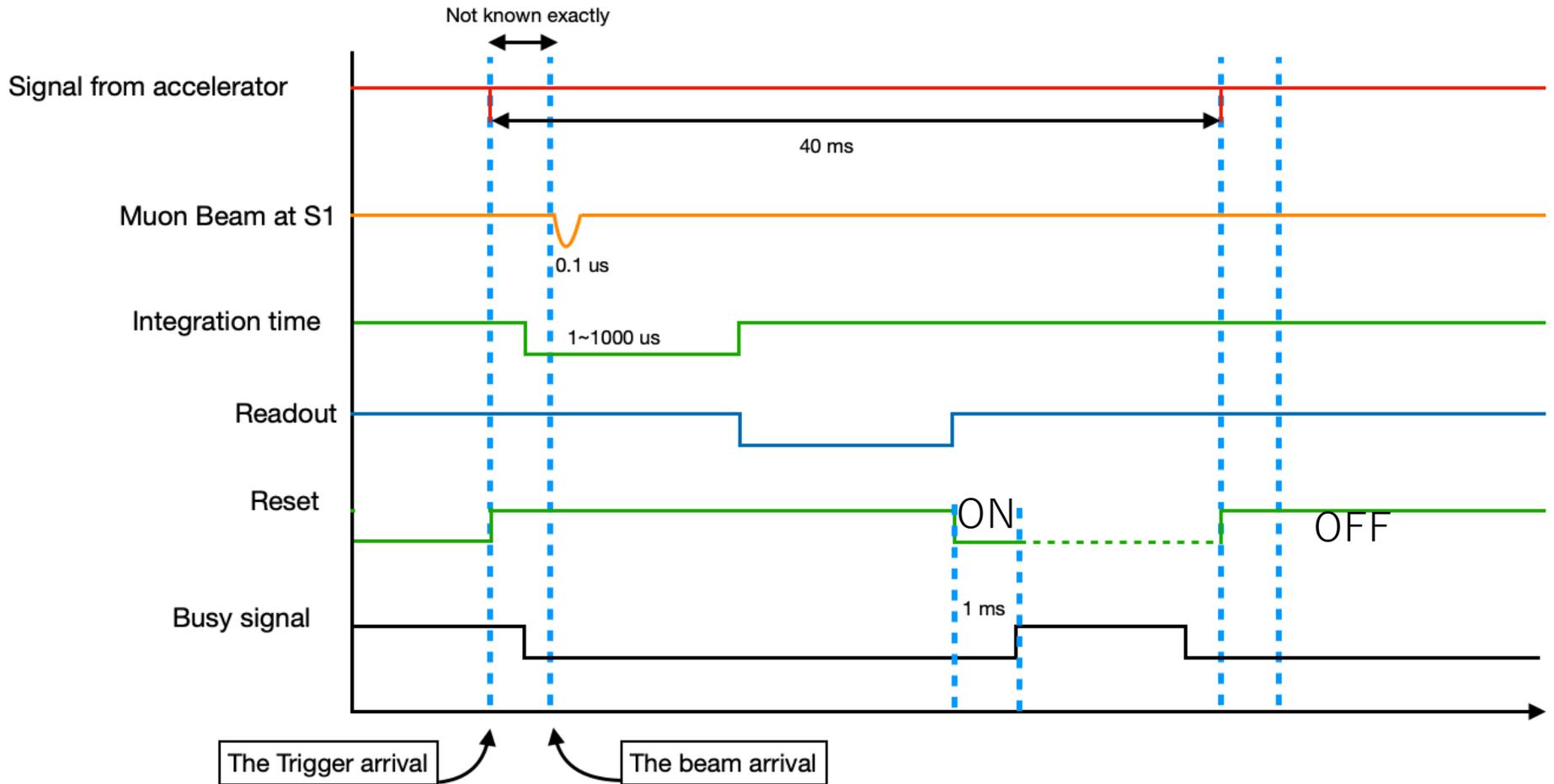


# セットアップ

真上にシンチレータ設置  
(タイミング合わせ)



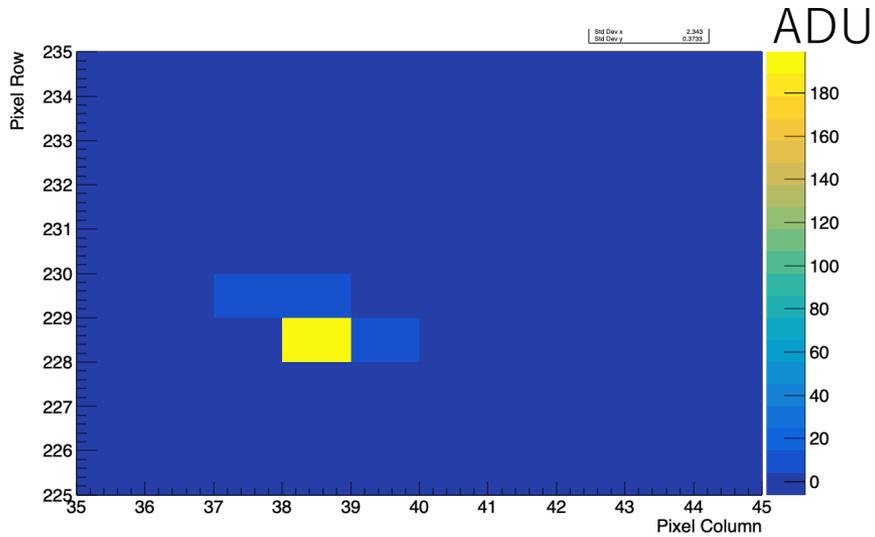
# Experimental condition: delay and integration time



7.18 $\mu\text{s}$  delay time and 200ns integration time

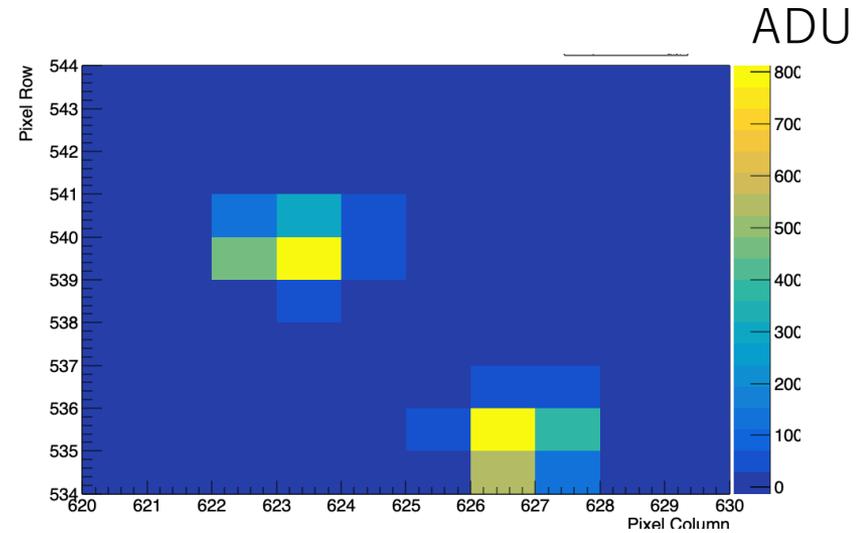
# Example of muon cluster hit

DSOI 5V



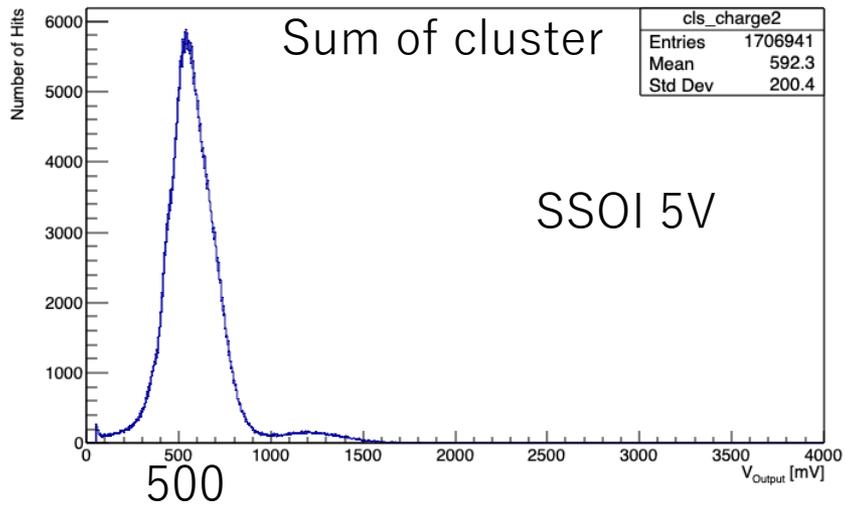
Muon を検出できた

SSOI 20V

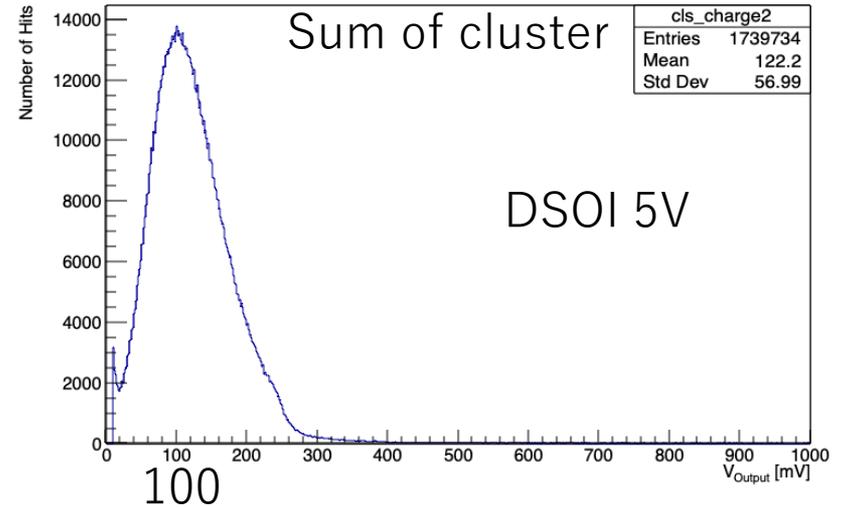


Noise level  
DSOI 1.4mV rms  
SSOI 1.5mV rms

# Muon spectra after clustering



抵抗率 25kOhm cm  
500um厚  
Saturation 380mV/pixel  
5V S/N 380



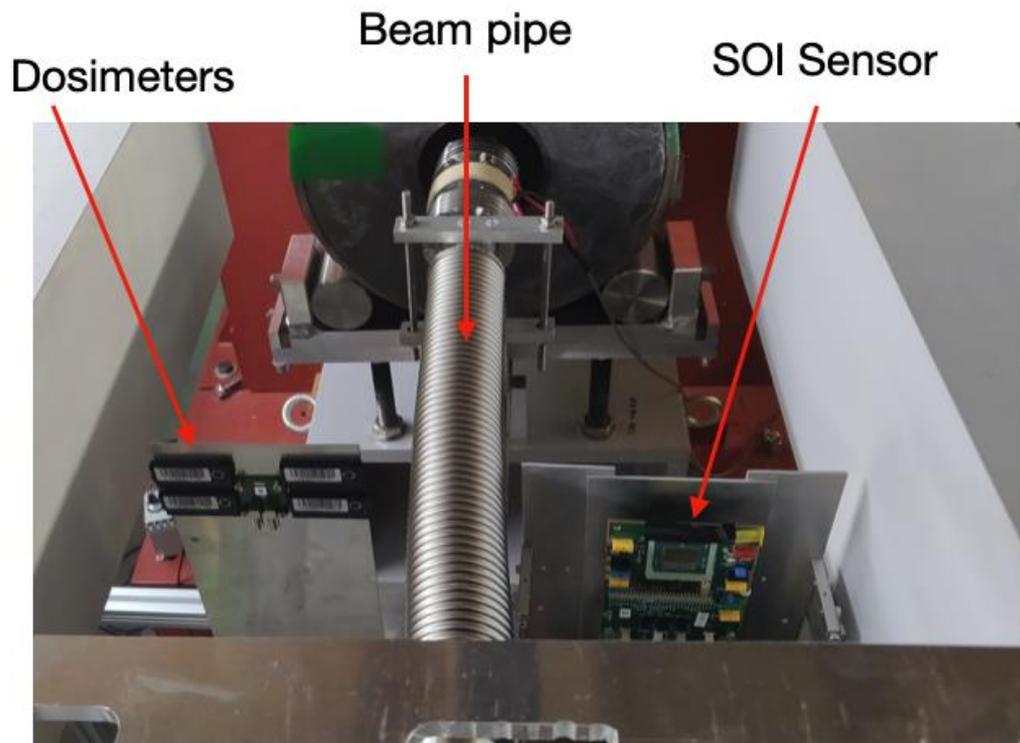
抵抗率 1kOhm cm  
300um厚  
Saturation 300mV/pixel  
5V S/N 90

バックバイアス20V以上→空乏層が厚い→データ飽和が見られる  
低いバックバイアス電圧でMuon spectrumを測定できた

現在進行中

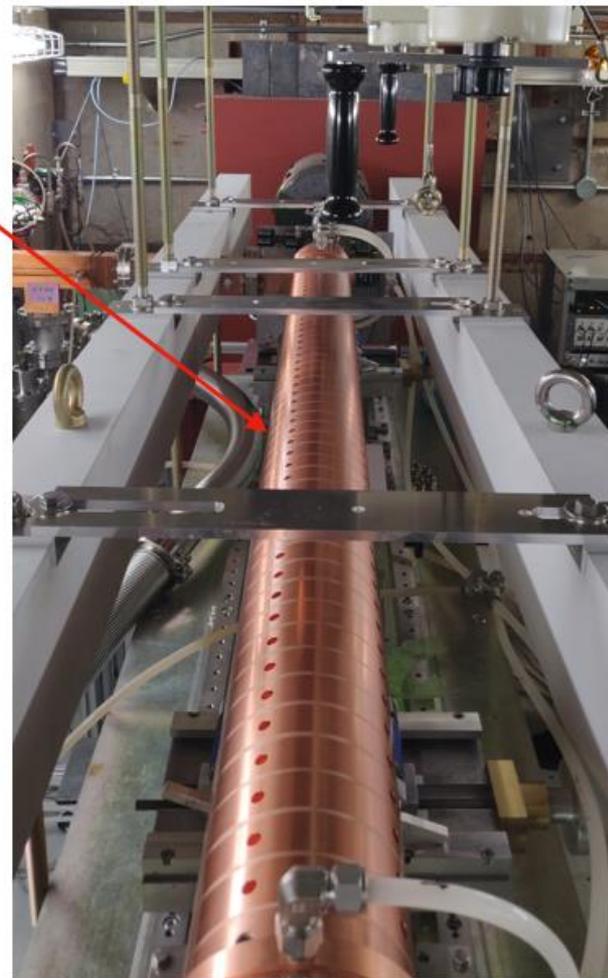
# 放射線耐性・バックグラウンド試験

$\gamma$ 線、X線の影響を見る



RF acceleration cavity  
2m  
RF power 80MW  
Duty 50Hz

ビームパイプから  
12cm 離れている



リーク電流測定完了 (データ取りまとめ中)  
12/8以降にバックグラウンド計測試験

# 今後の課題

## 放射線耐性

12/8の測定でバックグラウンドについての情報が得られる  
ビームセンターにもX線バックグラウンドがある

## 真空容器内設置

# 真空容器内構成案

真空実験の場合

FI-Rコネクタを使う

利点：コネクタが小さい

欠点：何度も抜き差しすると壊れやすい？

サブボード



Mezzanine-  
FI-R51  
変換基板

真空 大気

FI-R51-mezzanine  
変換基板



SEABAS2  
or  
other  
DAQ boards

FI-R51  
用ケーブル

航空電子製FI-Rシリーズ

FI-R51 x2  
ビルドアップ基板 (~5cm角)

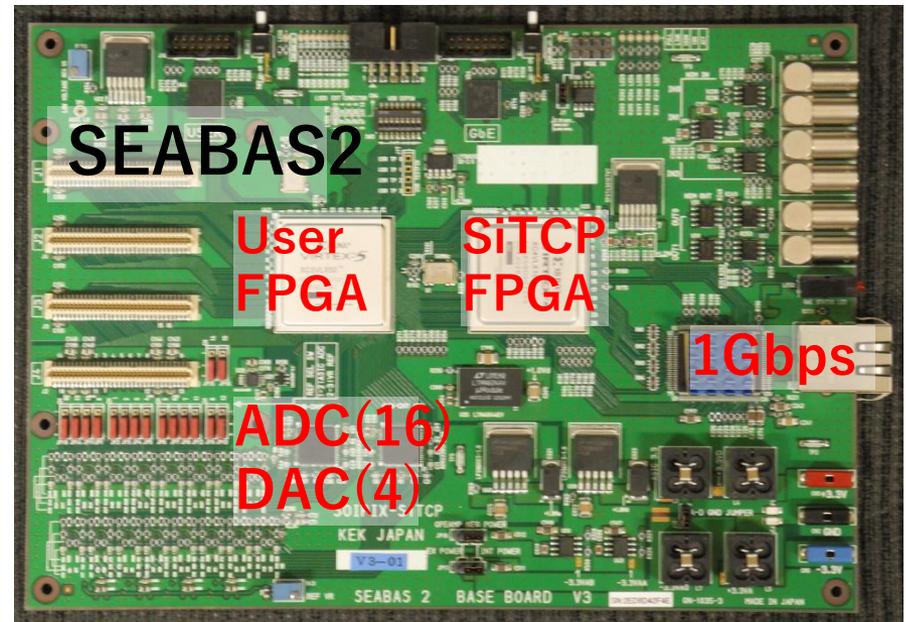
# DAQ system

午後の西村氏の話

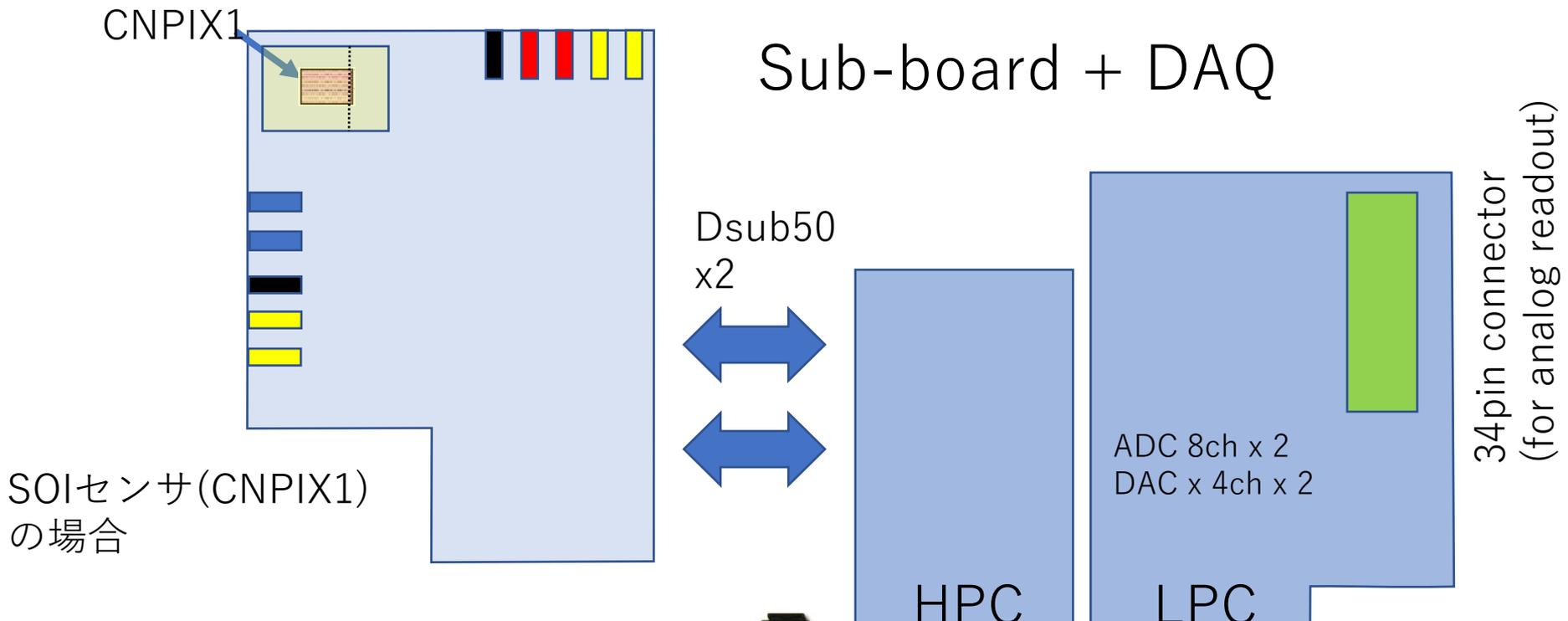
SEABAS2

Virtex4&5 → 生産終了  
新規に作れない

今後は代替ボードが必要



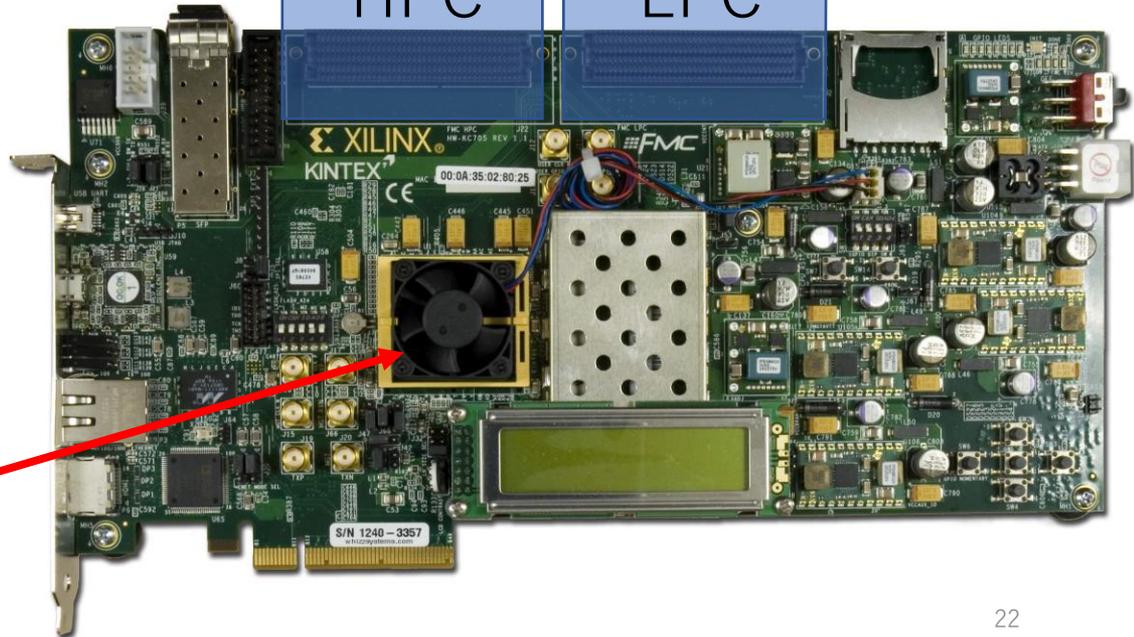
# Sub-board + DAQ



KC705

KC705(kintex7)  
Is commercially available

SiTCPを含める

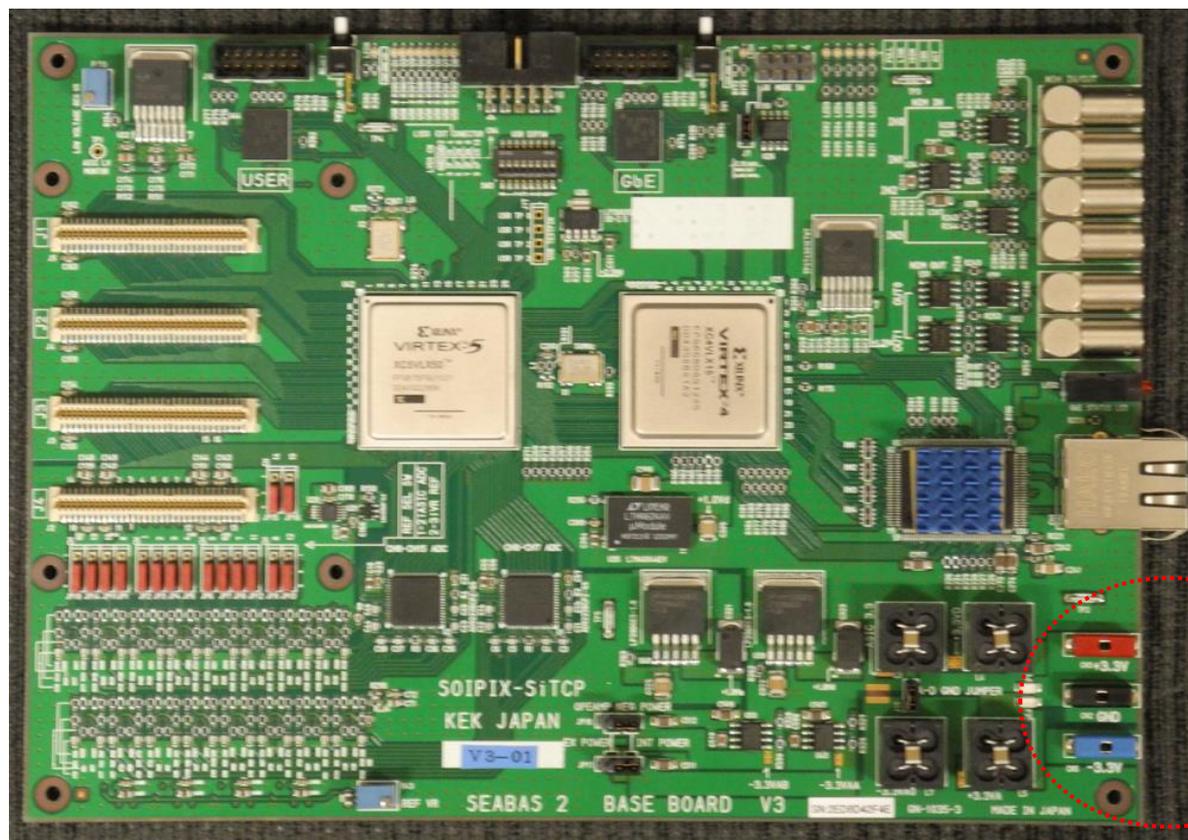


# 使いやすさと安全性

J-PARCのルール

抜けやすいコネクタNG

J-PARCで使う基板の部品選びのノウハウを共有できるとよい



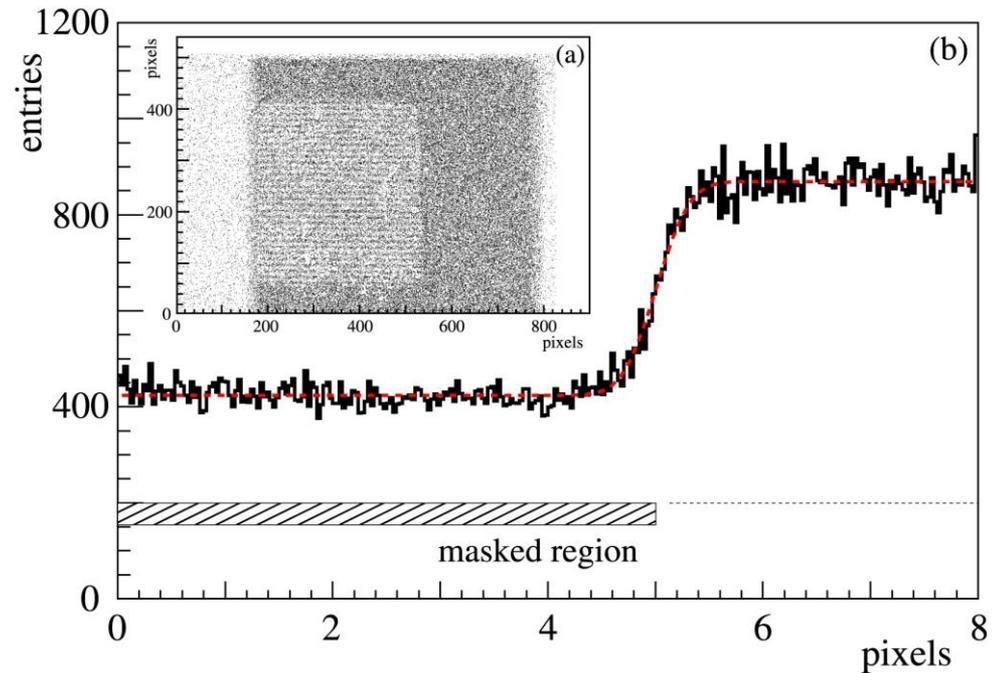
2mmφピンを  
使っていて、  
ここが抜けやすく  
NGになる  
(サブボードでも  
よく使っている)

# 将来展望、課題、新規技術の提案

SOIセンサは  
様々なビームラインで応用できる

MLF中性子施設でも使用経験あり  
裏面にボロンを蒸着

中性子ハッチでは放射線耐性が課題  
バックグラウンドが大きいので  
遮蔽方法をよく考えないといけない



MLF BL10 & 10B-INTPIX4

Kamiya et al., NIM A

Volume 979, 1 November 2020, 164400

# まとめ

SOIセンサをg-2/EDM実験ビームモニターに応用することを提案

3月のビームテストではその有効性を確認

予定：放射線耐性試験、3月のデータ解析継続、ダイナミックレンジ見積もり

課題：

飽和対策-ゲインコントロール方法の改良

真空システム

DAQアップグレード

J-PARC実験用SOI検出器システムデザイン

SOIセンサはJ-PARCの様々な場所で利用できるのではないかと考えています