



J-PARC $g-2$ /EDM実験: シリコンストリップ検出器の性能評価

東大理 D3 / 西村 昇一郎
計測システム研究会2016 @KEK東海キャンパス

Outline

- J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 精密測定実験 (E34実験) 概要
- 陽電子飛跡検出器の研究開発
 - シリコンストリップセンサー (SSSD) 基礎特性評価
 - センサー・読み出し回路試作機の接続評価試験
 - センサープロトタイプの開発
- まとめ

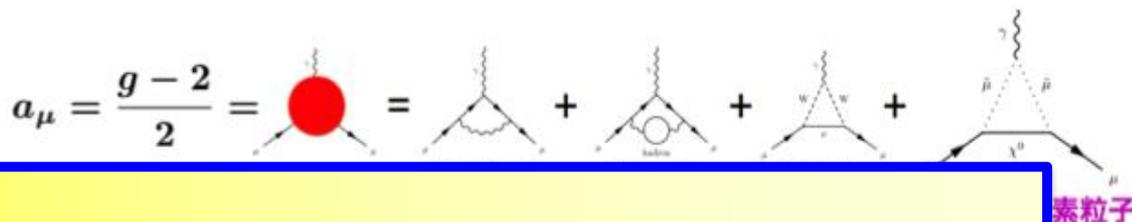
磁気・電気双極子モーメント

J-PARC
muon g-2/EDM

異常磁気モーメント(g-2)

$$\vec{\mu} = g \left(\frac{q}{2m} \right) \vec{s}$$

- 標準理論の予測値と
実験値に3.3σの乖離



目標精度

$$g-2 : 0.54 \text{ ppm} \rightarrow 0.1 \text{ ppm}$$

$$\text{EDM} : 1.8 \times 10^{-19} \text{ e} \cdot \text{cm} \rightarrow 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

\vec{s}

- 時間反転対称性を破る
 - CPT定理よりCP対称性を破る
- 有限のEDMは未発見

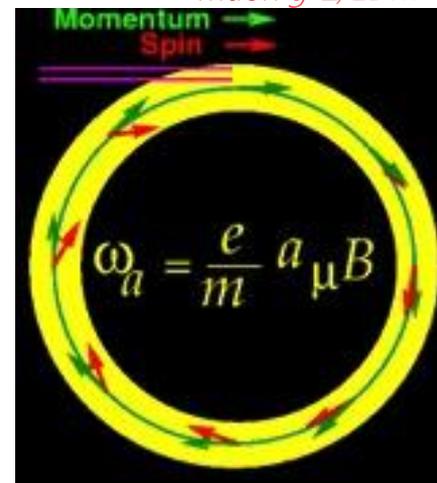


ミュオン $g-2$ /EDM 精密測定実験

J-PARC
muon $g-2$ /EDM

- スピンの方向に陽電子が多く放出される
 - 陽電子数を測定し、スピンの向きを測定
- 一様磁場中でのスピン歳差運動

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} - \left(a_{\mu} - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right] \quad a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$



BNL E821 approach
 $\gamma=29.3$, (3.094 GeV/c)

J-PARC new approach
 $E=0$

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

FNAL E989

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} \right) \right]$$

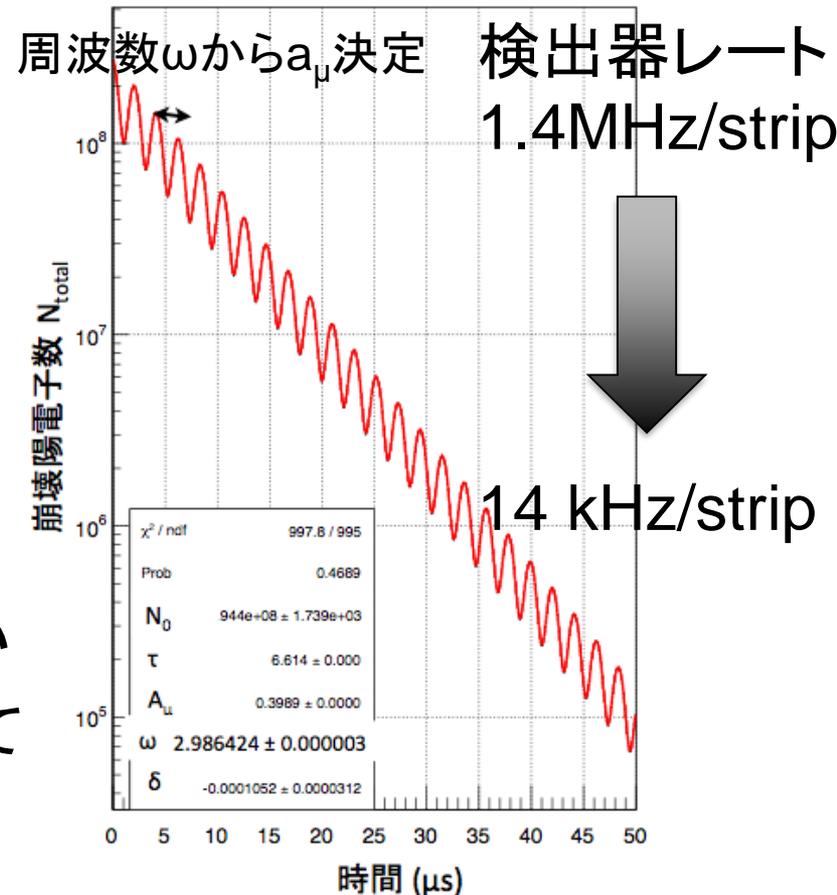
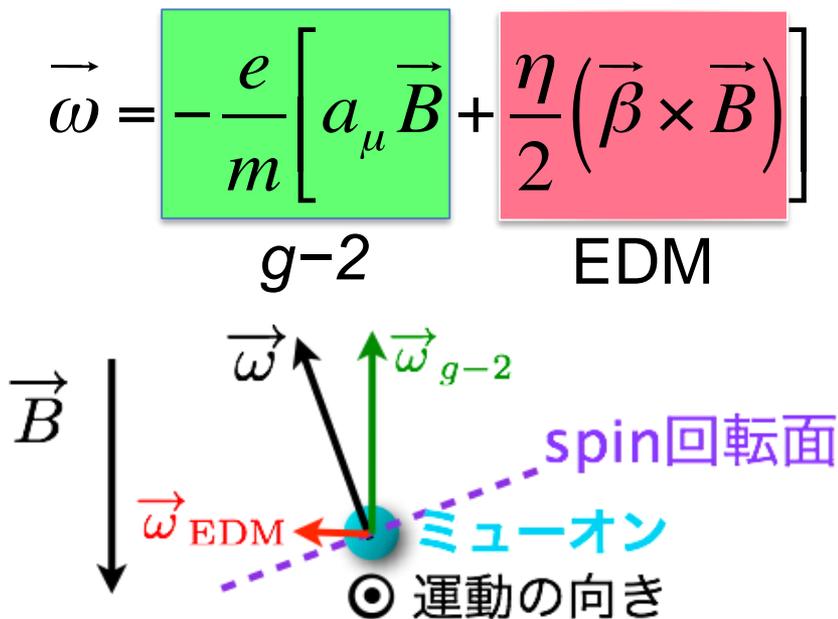
J-PARC E34

J-PARC E34実験 新しい手法を用いて異なる系統誤差で測定

$g-2$ /EDMの測定原理

一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

$$N_{total} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A_\mu \cos(\omega t + \delta))$$



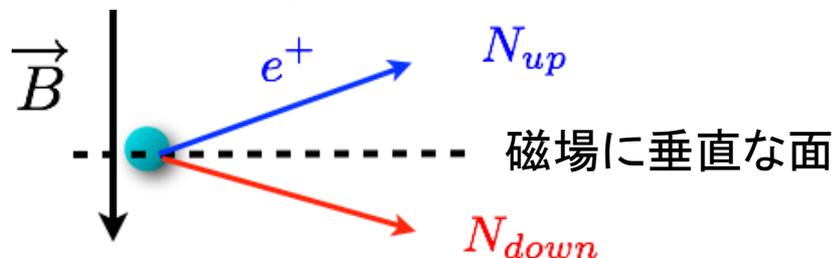
- ω_{EDM} は ω_{g-2} に比べて非常に小さい
- 周波数 ω と磁場 B を精密に測定して a_μ を決定

$g-2$ /EDMの測定原理

一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

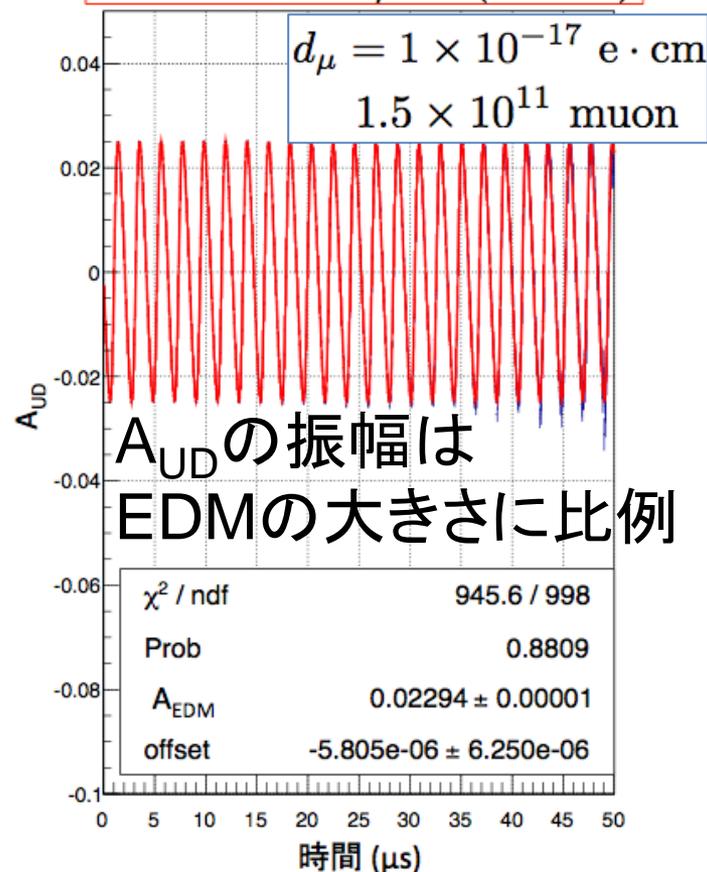
$g-2$
EDM



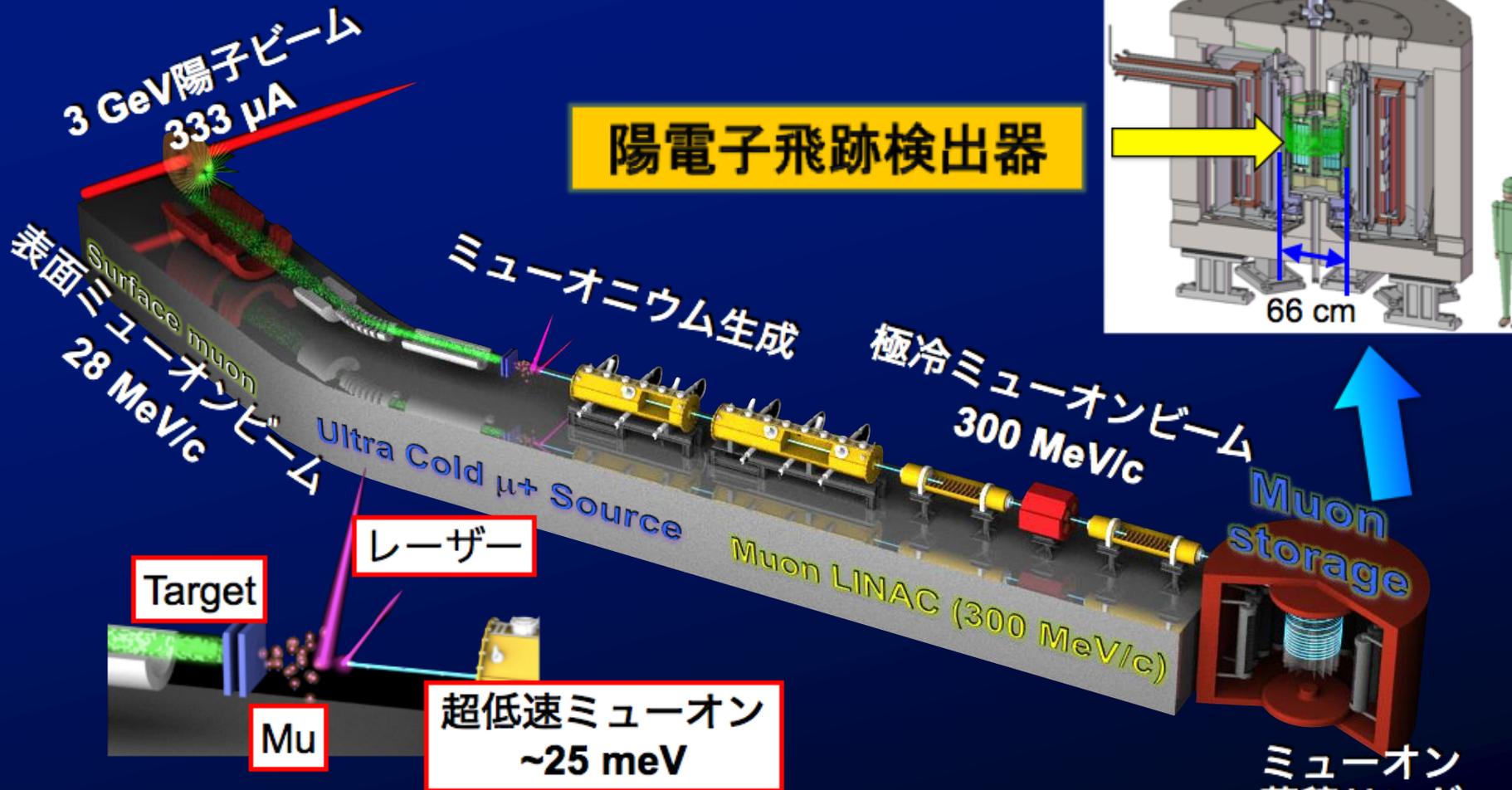
- ω_{EDM} によってスピン回転軸が傾く
 - EDMが $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の時、 $\vec{\omega}$ と磁場 \vec{B} のなす角: $10 \mu\text{rad}$

- 上下の非対称度 $A_{UD} = \frac{N_{up} - N_{down}}{N_{up} + N_{down}}$ からEDMを求める

$$A_{UD} = \frac{-A_{\text{EDM}} \sin(\omega t + \delta)}{1 + A_{\mu} \cos(\omega t + \delta)}$$



J-PARC E34実験



物質生命科学実験施設 (MLF)
 ミュオン基礎物理ビームライン (H-Line)
 極冷 μ^+ ビーム: 強度 $10^6/\text{sec}$
 運動量 300 MeV/c ($\gamma = 3$)
 $p_T/p_L \sim 10^{-5}$
 偏極度 > 50%

指向性の高い極冷ミュオンビームで
 集束電場 $E=0$ を実現

陽電子飛跡検出器

J-PARC
muon g-2/EDM

- 崩壊陽電子と時間を正確に測定し、同時に運動量と角度を測定する必要があるのである
- 大強度パルス (最大レート10000/s)
 - 高granularity
 - 高速応答
 - 高安定性

検出器モジュール
(上下2 set × 48枚)

Readout ASIC
(Slit128)

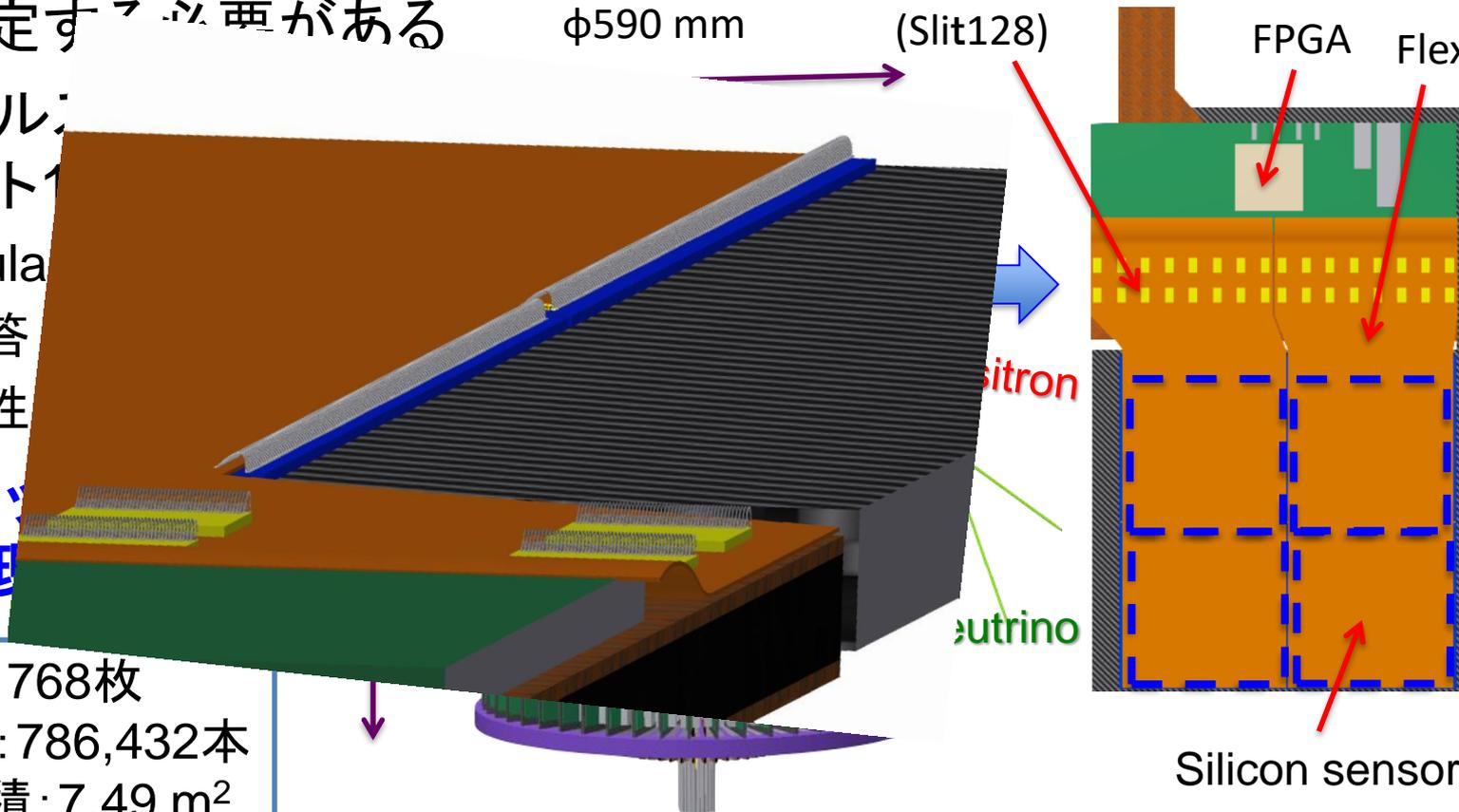
φ590 mm

FPGA Flex

silicon

muon

Silicon sensor



シリコンストリップ
(SSSD)で実現

センサー枚数: 768枚
 総ストリップ数: 786,432本
 センサー総面積: 7.49 m²

陽電子飛跡検出器開発状況

J-PARC
muon g-2/EDM

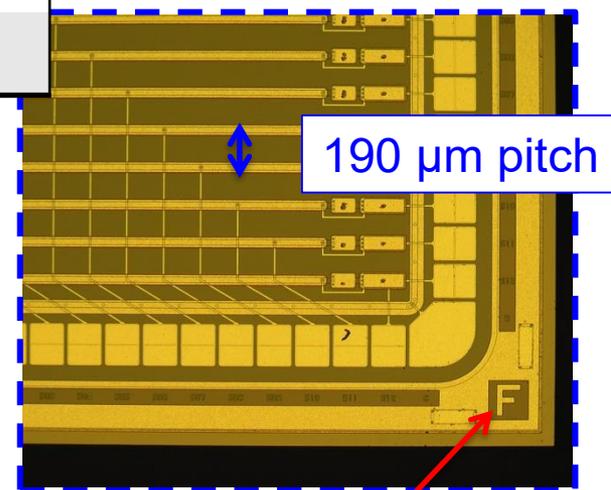
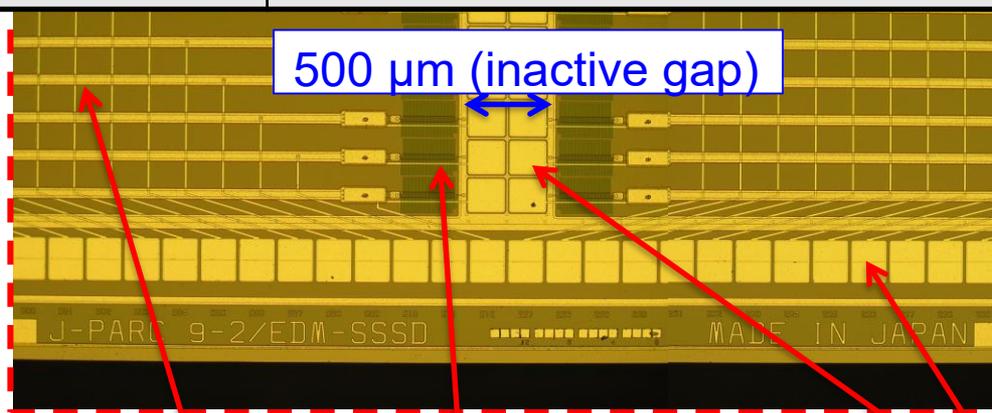
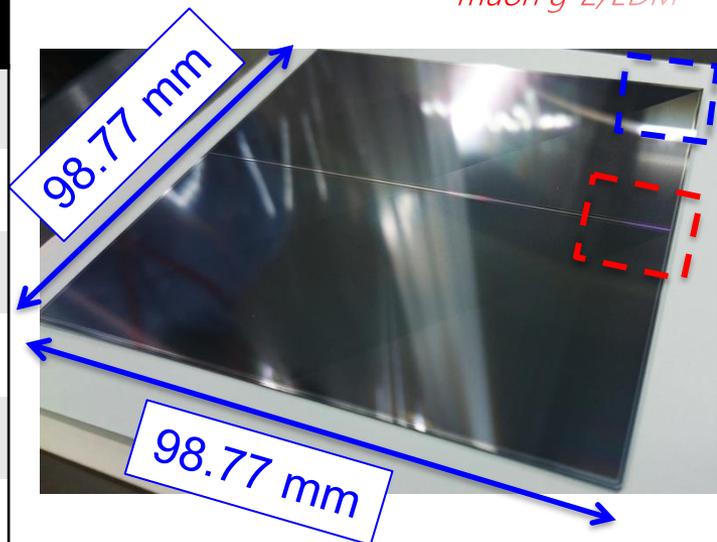


SSSD 基礎特性評価

Silicon Strip Sensor

J-PARC
muon g-2/EDM

項目	仕様
センサータイプ	p+ on n
サイズ	98.77 mm × 98.77 mm
有感領域	97.28 mm × 97.28 mm
ストリップ間隔	0.19 mm
ストリップ長さ	48.575 mm
ストリップ数	512 × 2 blocks
厚さ	0.32 mm



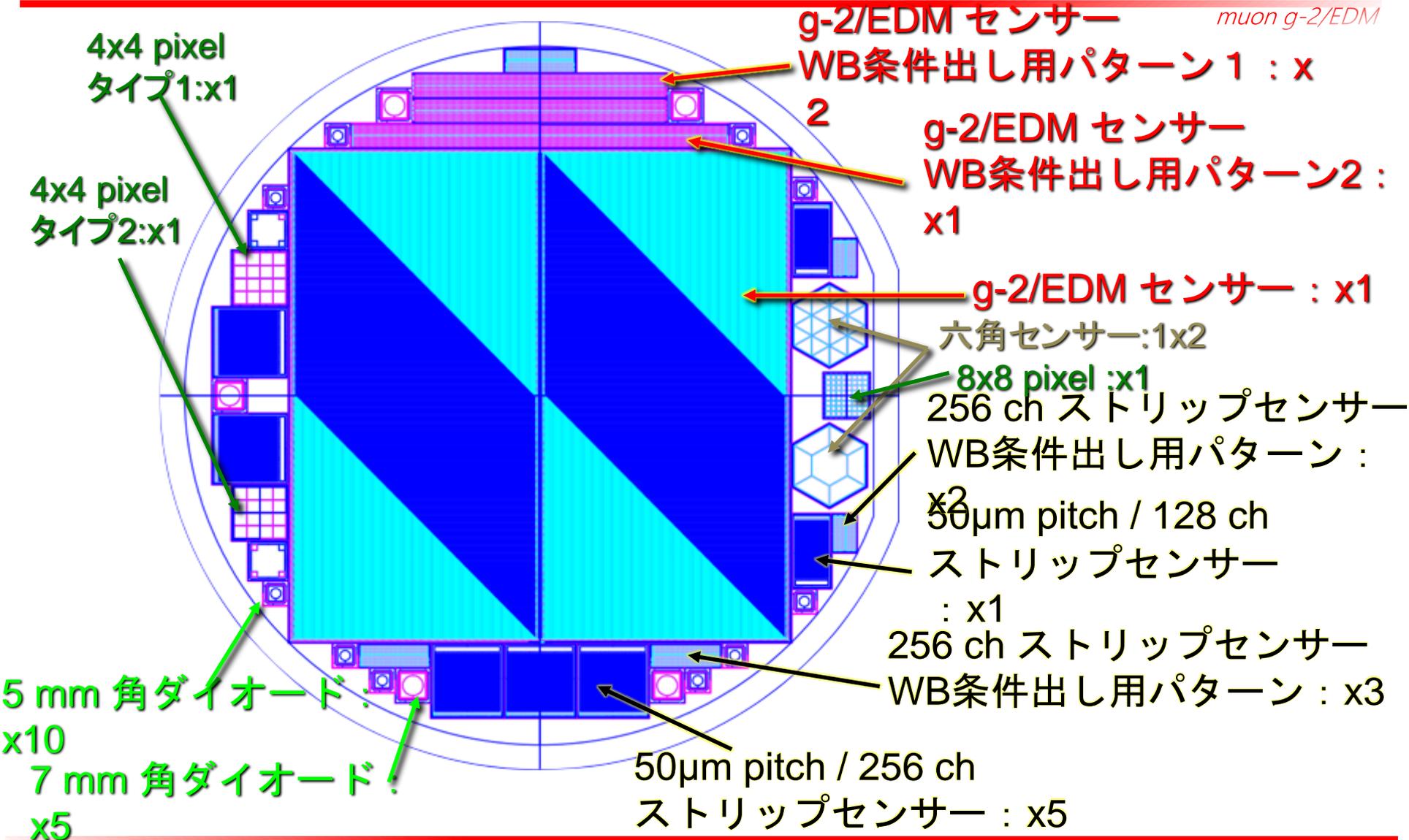
Double metal structure

Polysilicon resistance

AC pad

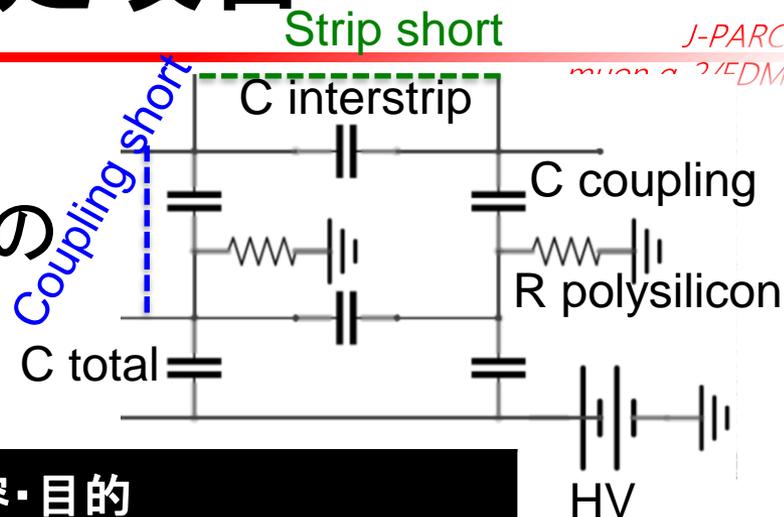
Alignment mark

Baby sensors



基礎特性評価目的・測定項目

- センサーの電気的特性評価
- 量産時センサー品質検査手法の確立

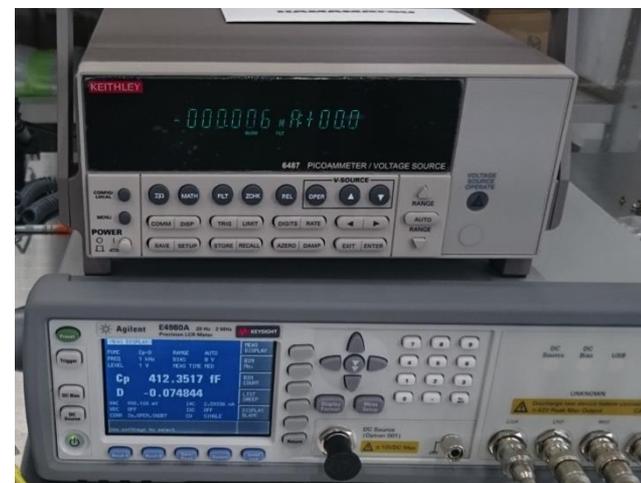
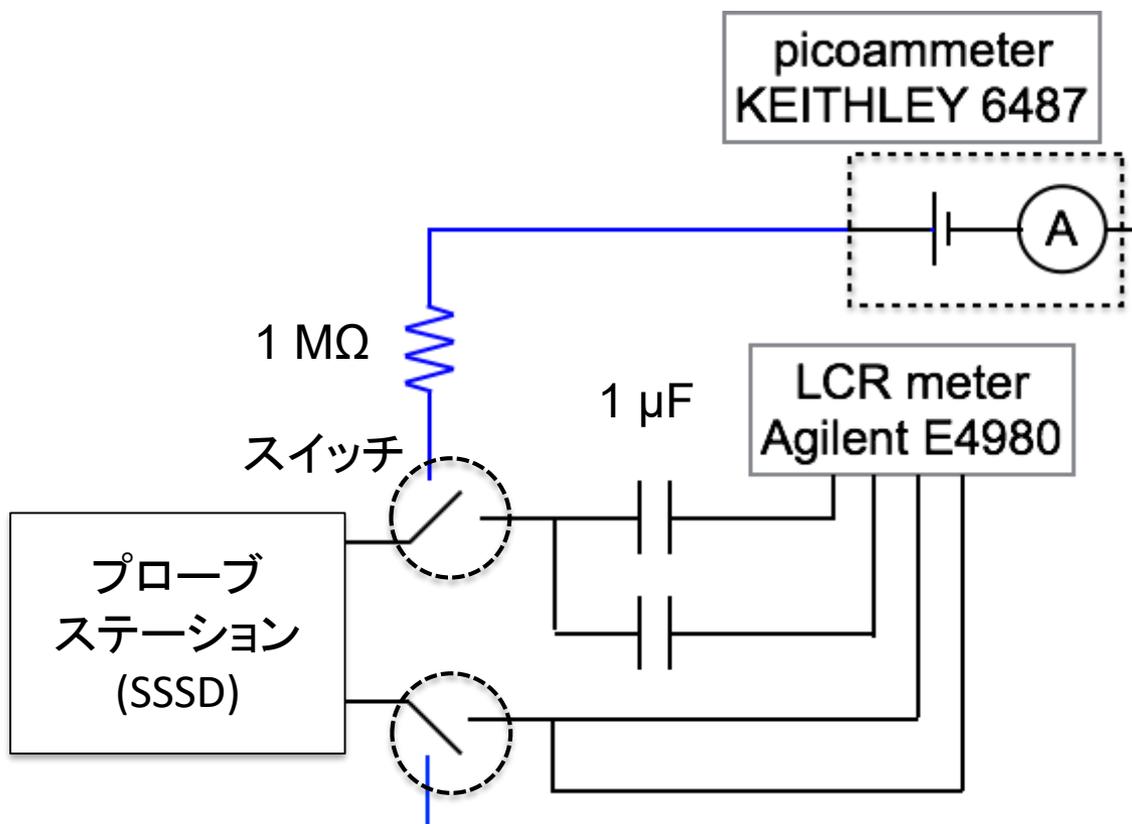


J-PARC
muon EDM

測定項目	測定内容・目的
I-V total	IV測定・break down voltage検査
C total	CV測定・検出器容量の計算に必要
Full depletion voltage	CV測定・完全空乏化電圧(FDV)を測定
C interstrip	ストリップ間容量測定・検出器容量の計算に必要 (検出器容量 = $C_{total} / strip + 2 \times C_{interstrip}$)
C coupling	Al strip – p+ strip間の容量測定・ 絶縁層不良(coupling short)、strip open-short検査
R polysilicon	ポリシリコン抵抗値測定

測定回路

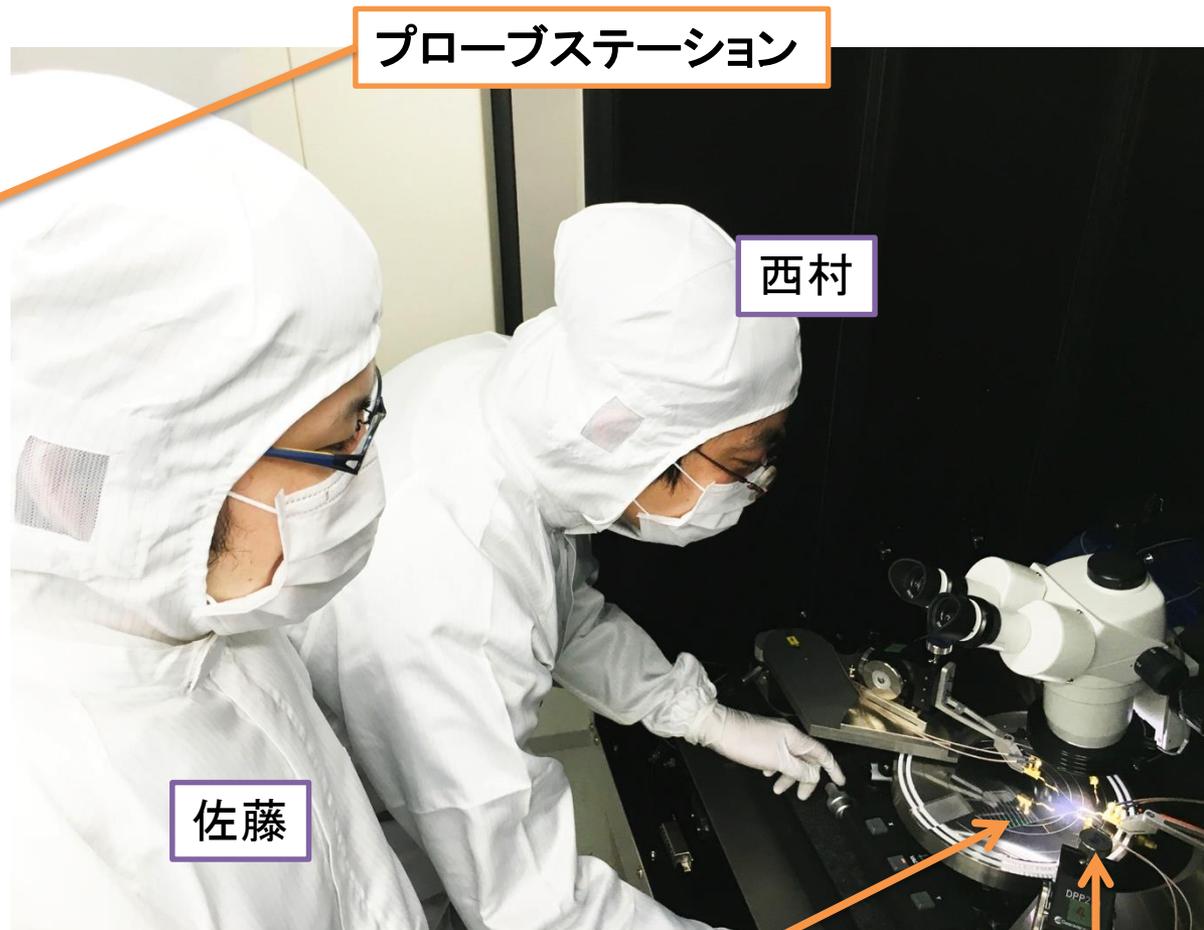
- スイッチで電流測定/容量測定を切り替え
 - 将来的にスイッチをソフトウェア制御に変更予定



測定の様子

J-PARC
muon g-2/EDM

@ 九州大学クリーンルーム



プローブステーション

西村

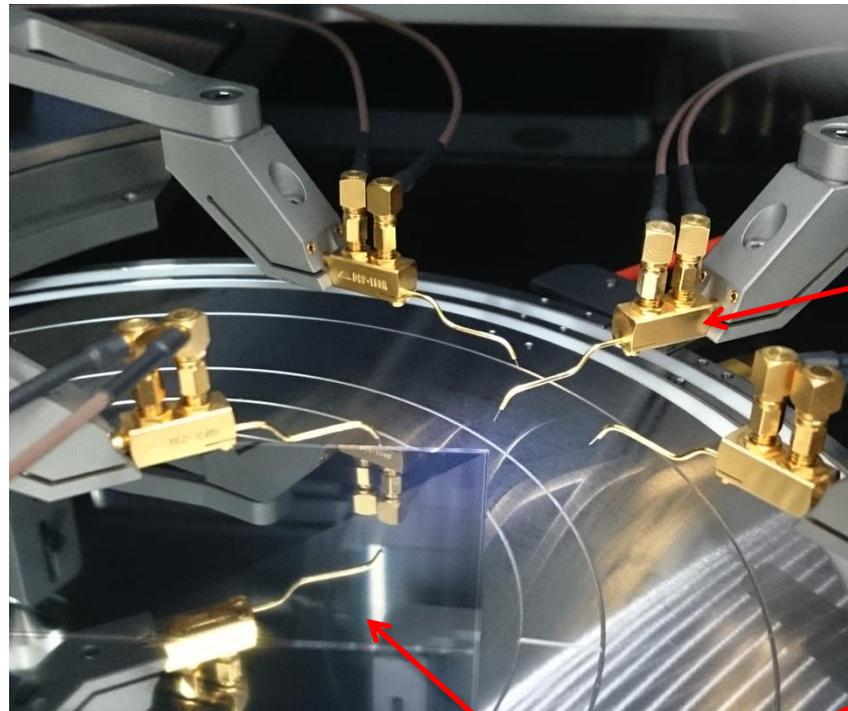
佐藤

J-PARC g-2/EDM SSSD

プローブ

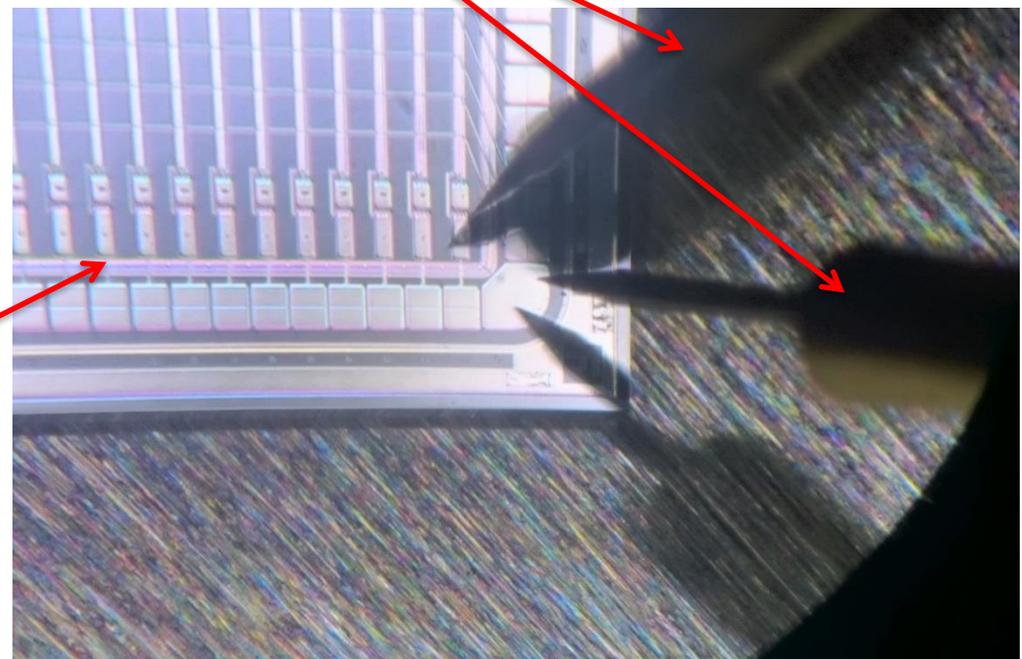
プローブステーション @九州大学

J-PARC
muon g-2/EDM



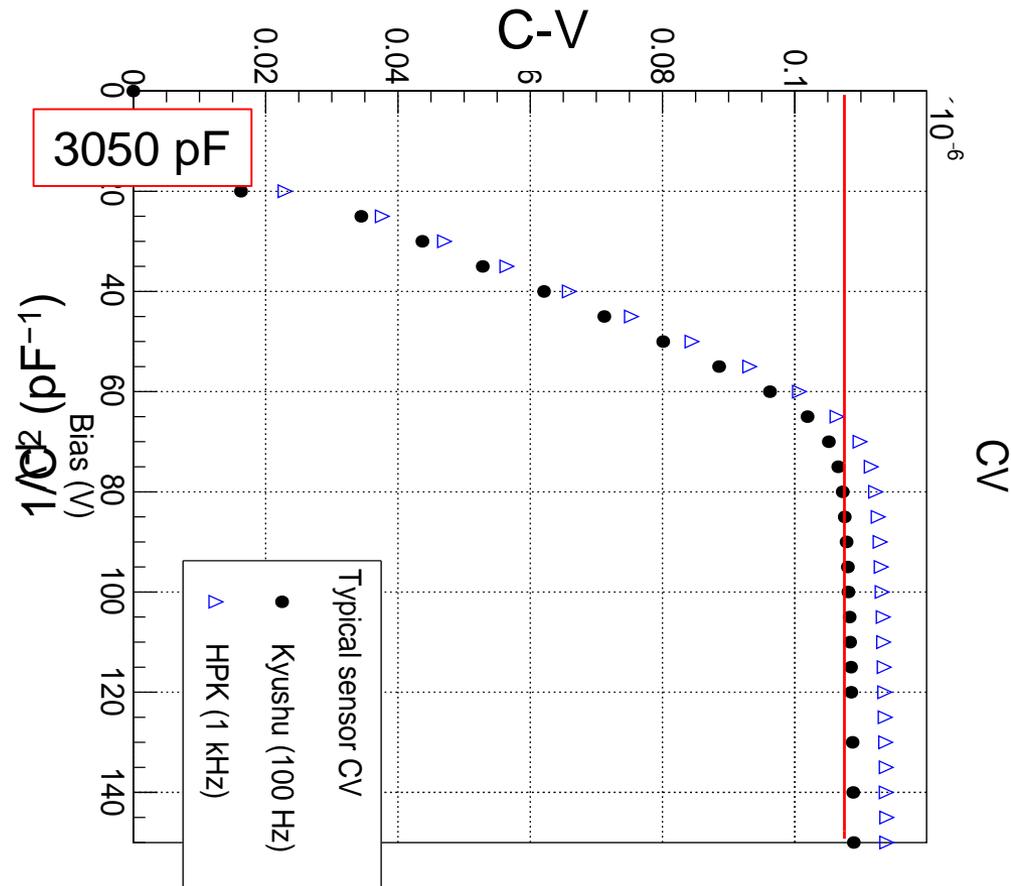
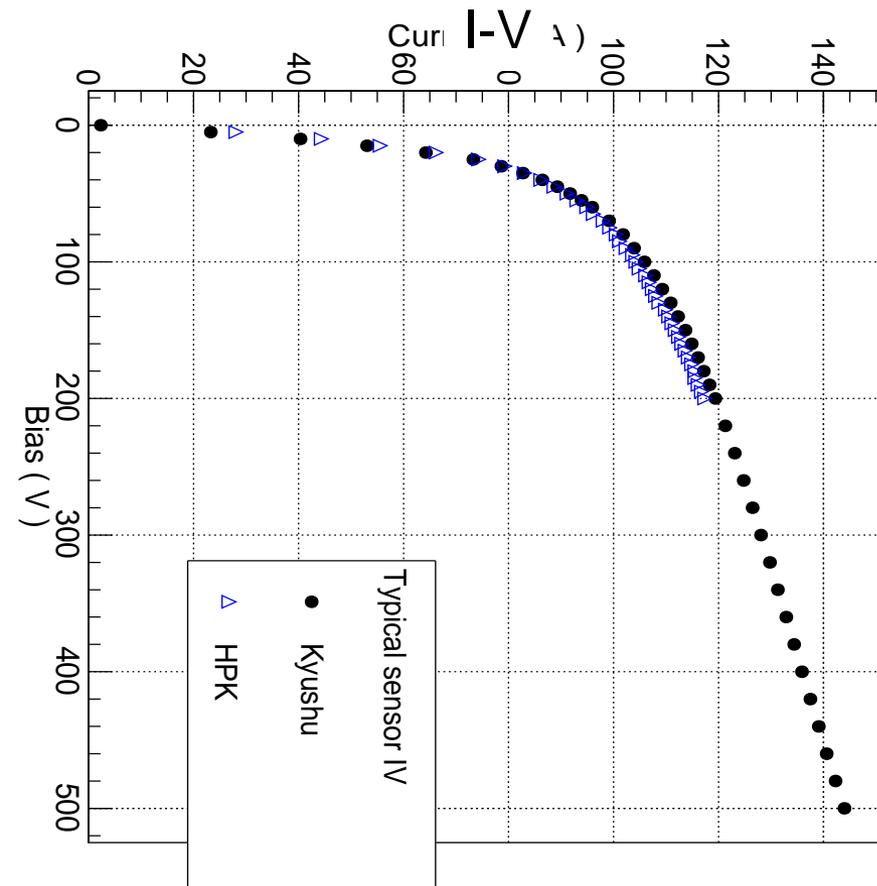
J-PARC g-2/EDM SSSD

probe

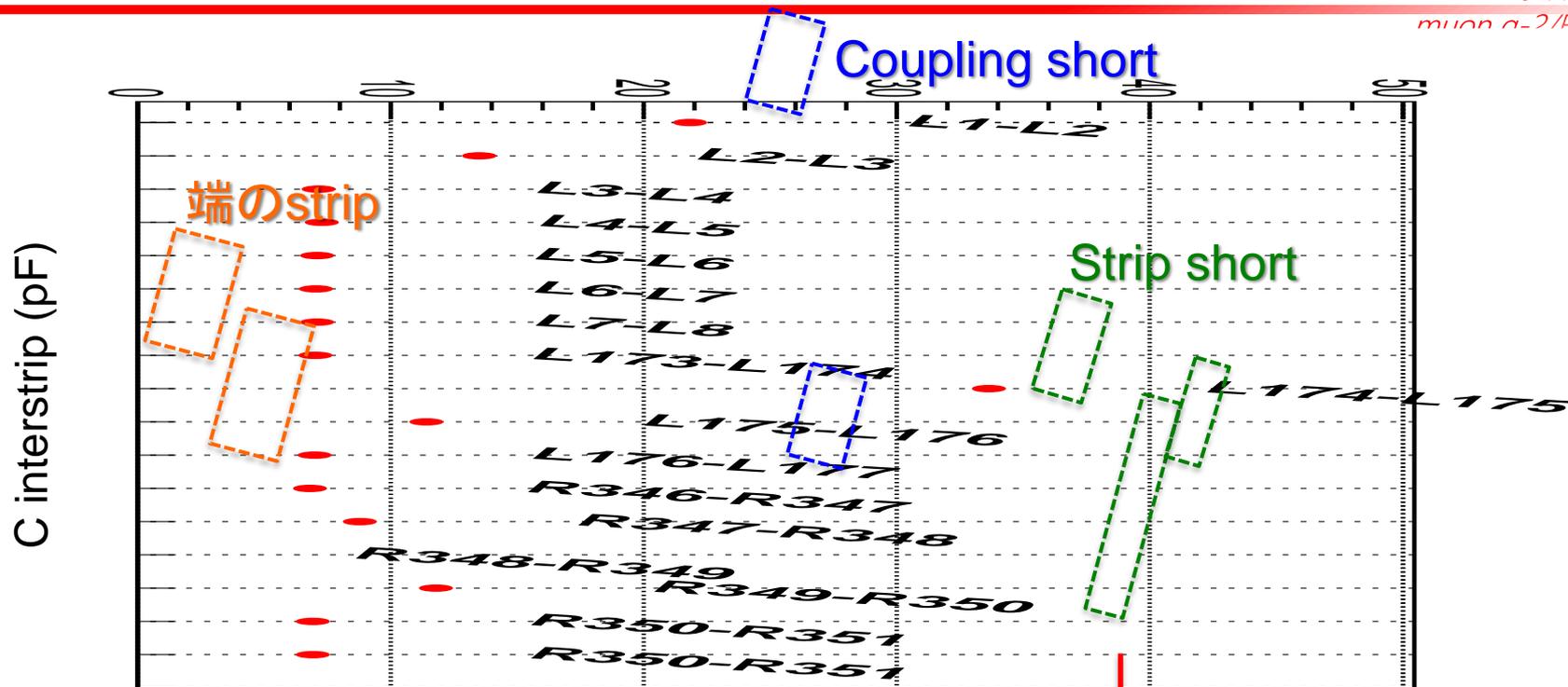


IV・CV測定結果

- 出荷時の測定を再現・確認
 - C total: 3050 pF、FDV: ~ 80 V



C interstrip測定結果



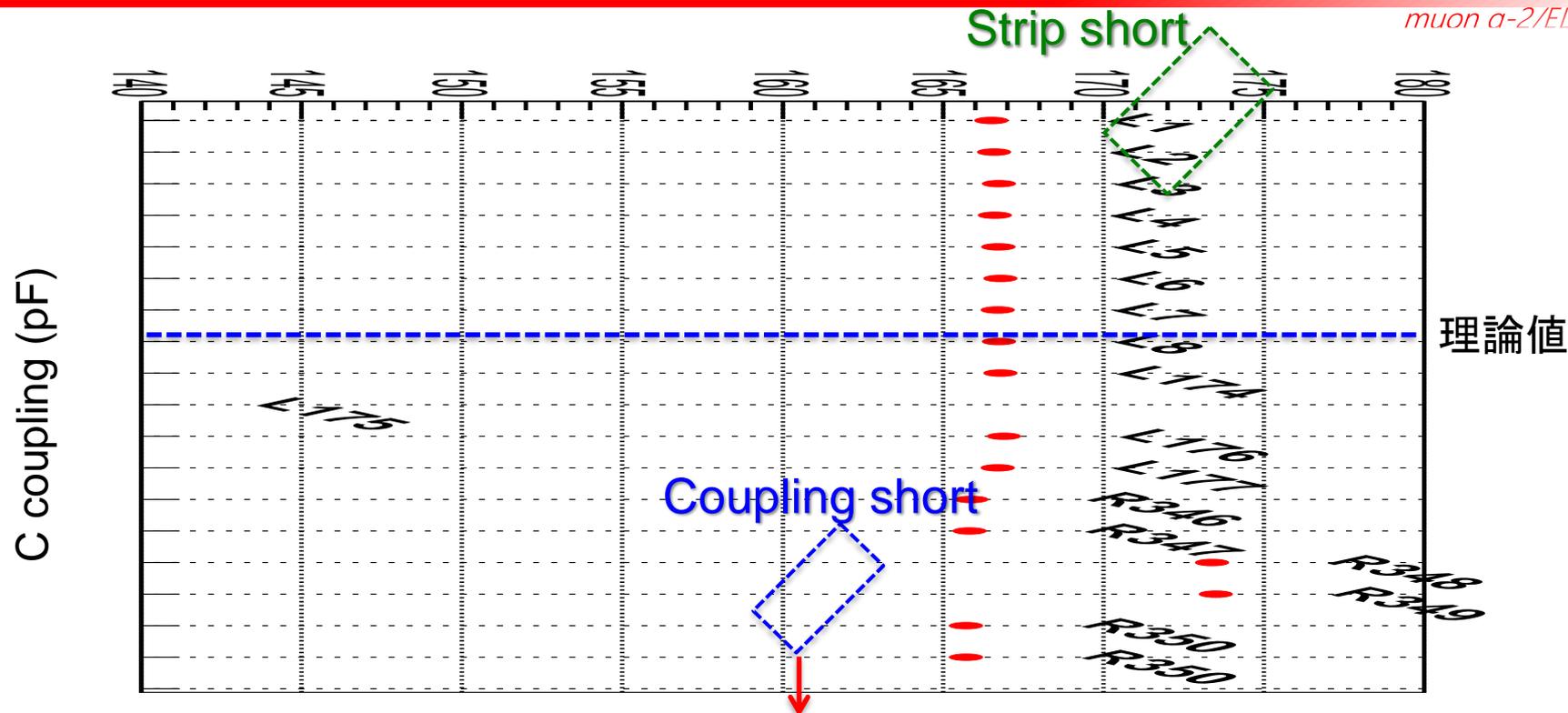
- 典型的なC interstrip:7.1 pF
 - 検出器容量から予想されるノイズ(ENC): 900 e
 - 信号電荷量:24000 e
→ 予想されるS/N~27 (>目標値15)
- 異常なstripを検知できた

検出器容量

$$\begin{aligned}
 &= C_{\text{total}} / \text{strip数} + 2 \times C_{\text{interstrip}} \\
 &= 3050 \text{ pF} / 1024 + 2 \times 7.1 \text{ pF} \\
 &= 17 \text{ pF}
 \end{aligned}$$

C coupling測定結果

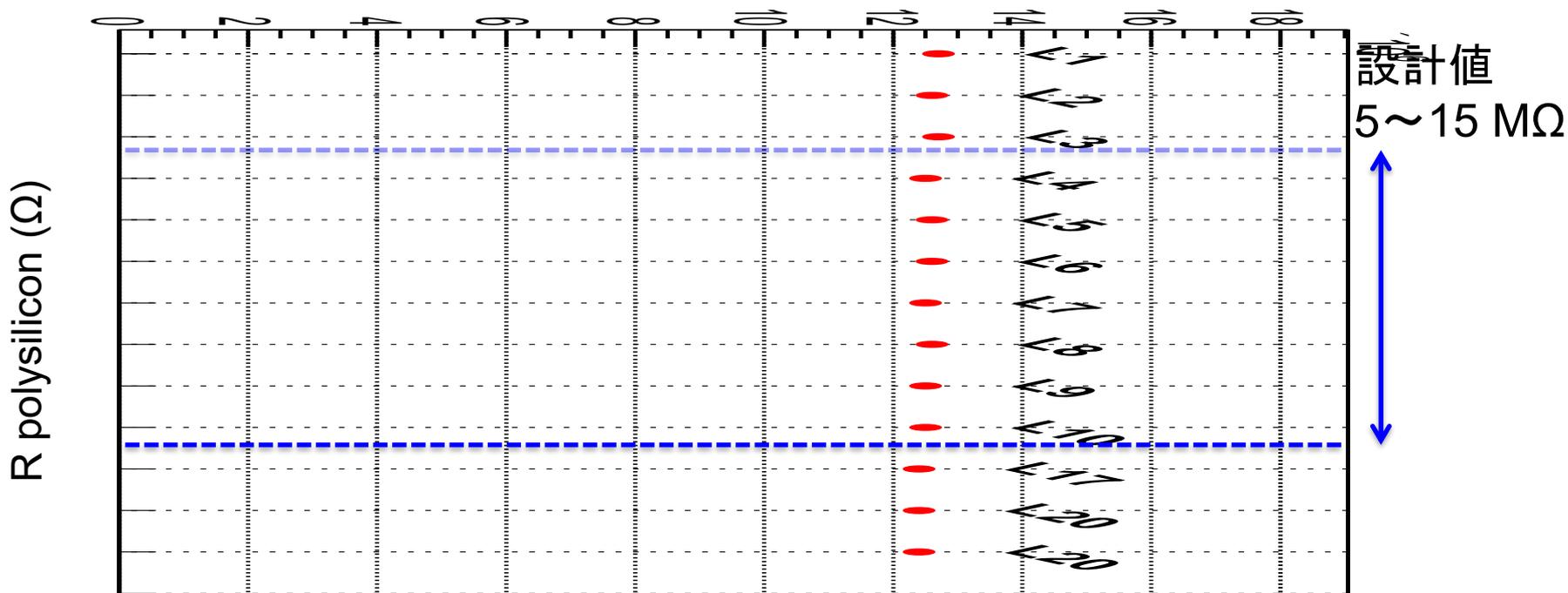
J-PARC
muon $a-2/EDM$



- 典型的なC coupling: 167 pF
 - C couplingの理論値 164 pF/strip ($113 \text{ pF/mm}^2 \times 1.45 \text{ mm}^2$) とほぼ一致
 - 異常なstripを検知できた

Polysilicon抵抗測定結果

J-PARC
muon g-2/EDM



- 設計値通りの結果が得られた

測定結果まとめ

J-PARC
muon e-2/EDM

測定項目	測定結果	理論値
I-V	plateau were observed	-
C total	3050 pF	3100 pF
Full depletion voltage	~ 80 V	~ 80 V
C interstrip	7.1 pF	3.0 pF + α
Detector Capacitance	17 pF	9 pF + α
C coupling	167 pF	164 pF
R Polysilicon	~12 M Ω	5~15 M Ω

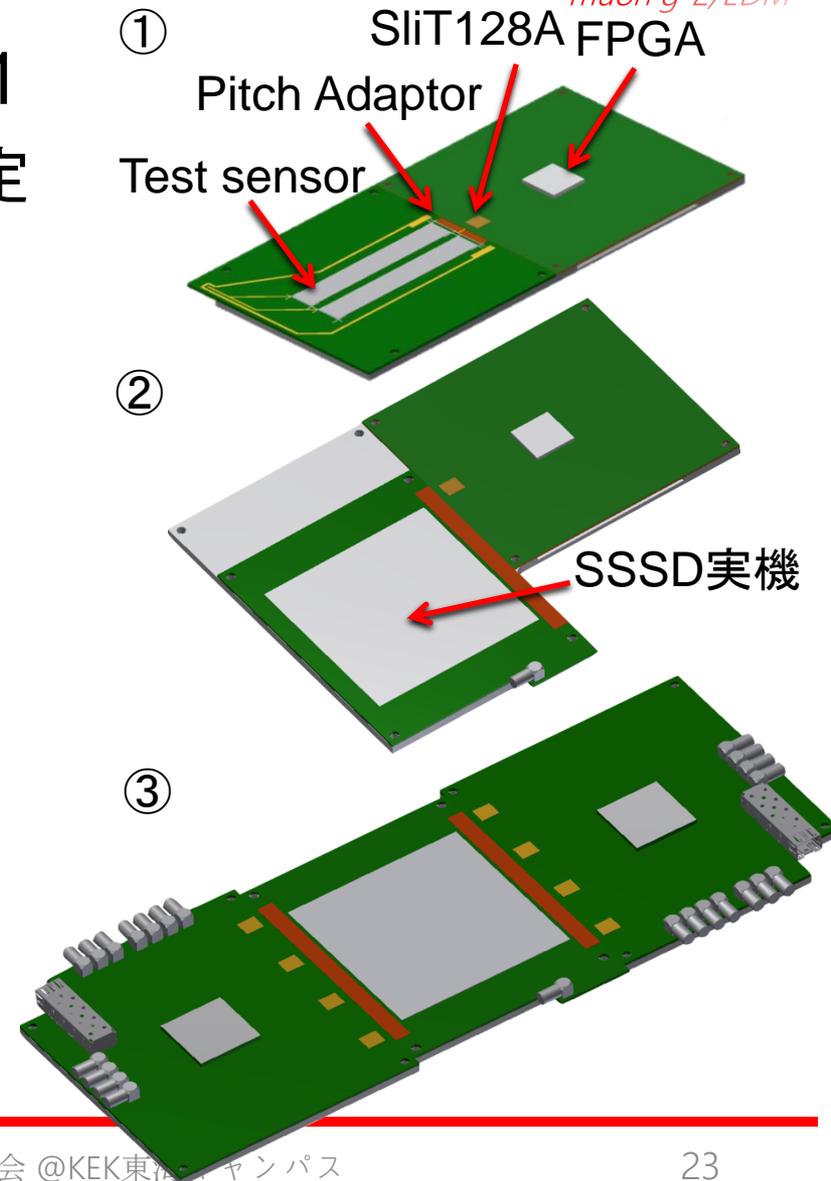
- 理論値に近い良好な結果が得られた

SSSD・SIIT128A接続評価試験

接続評価試験の流れ

J-PARC
muon g-2/EDM

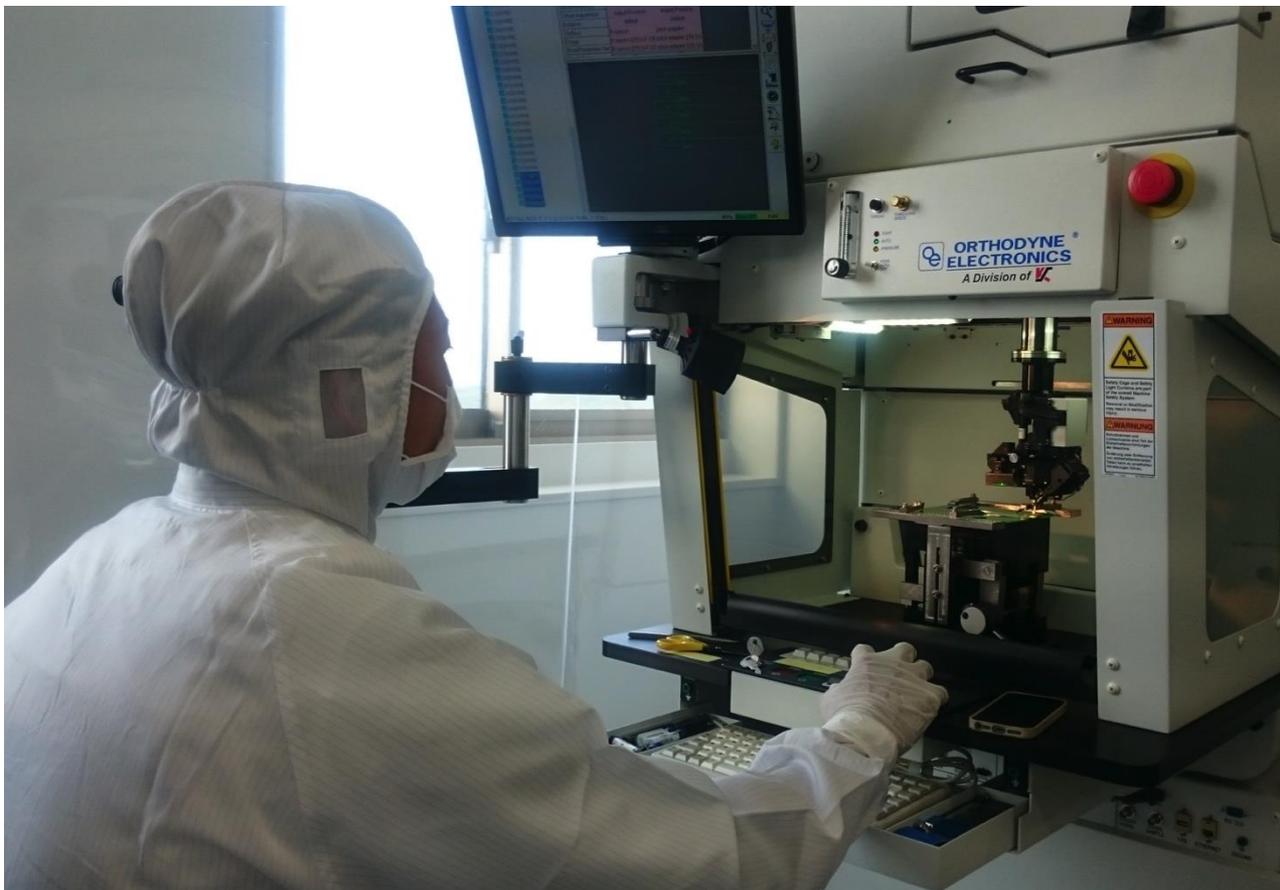
- ① Test sensor + SliT128A × 1
 - 検出器容量を含めたノイズ測定
 - センサーからの信号測定
- ② SSSD実機 + SliT128A × 1
 - 実機でのS/N測定
 - クロストーク有無の検査
 - チャンネル依存性検査
- ③ SSSD実機 + SliT128A × 8
 - センサー全stripを読み出し
 - MuSEUM実験に利用予定



接続(ワイヤーボンディング)の様子

J-PARC
muon g-2/EDM

- ・ Al 25 μ mワイヤー
- ・ ウェッジボンディング

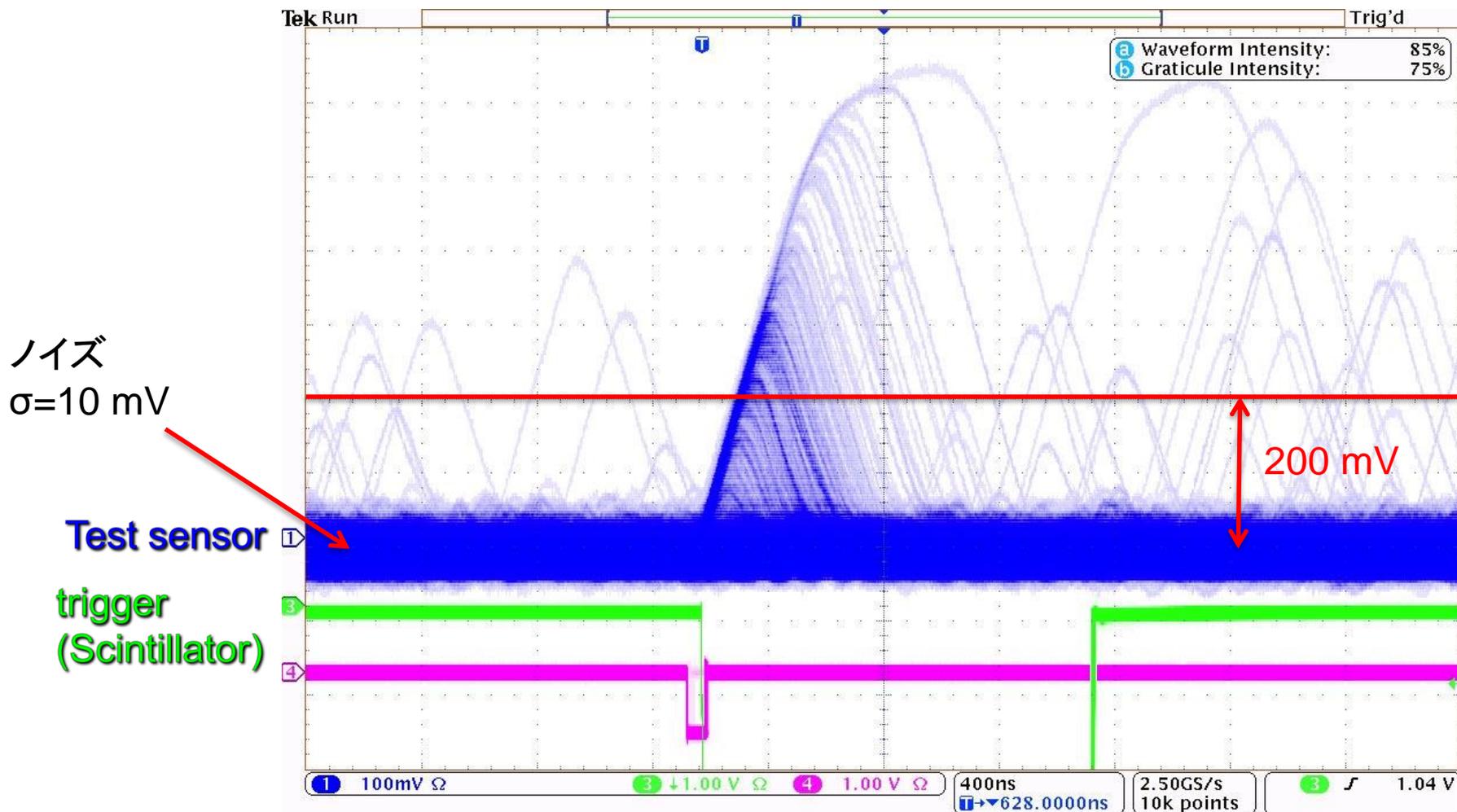


九州大学 M1 伊藤拓実

線源を用いたアナログ信号測定

J-PARC
muon g-2/EDM

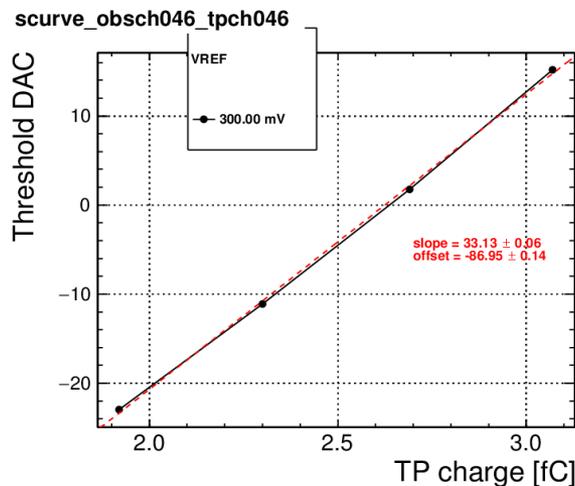
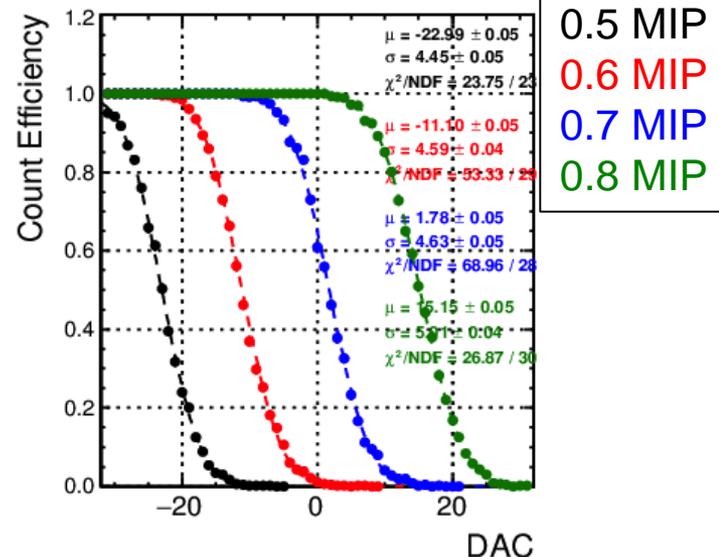
- Source: Sr-90



テストパルスを用いたS/N測定

J-PARC
muon g-2/EDM

- Test sensorにHVをかけ複数のinput chargeでS-curveを測定
 - Test sensorの検出器容量:
23.4pF
 - ENC: 839 e \sim 945 e
 - S/N: 25.4 \sim 28.6 (>目標値15)
- 良好なS/Nが得られた



まとめと今後の予定

- まとめ
 - J-PARC g-2/EDM実験に用いるセンサー実機を製作し、基礎特性評価を行った
 - 理論値とほぼ一致し、良好な結果が得られた
 - 異常stripが検知可能な手法を確立した
 - Test sensorとSliT128Aの接続試験を行い良好なS/Nが得られた
- 今後の予定
 - 128チャンネルのプロブカードを製作し、半自動化したシステムで全ストリップ検査を行う
 - SSSD実機とSliT128Aと接続した性能評価を行う
 - 今年度中にセンサー実機の量産を開始する

補足スライド

Signal measurement Setup

J-PARC
muon g-2/EDM

- Source: Sr-90

Back Sci.
(dual readout,
BS1, BS2)



Source

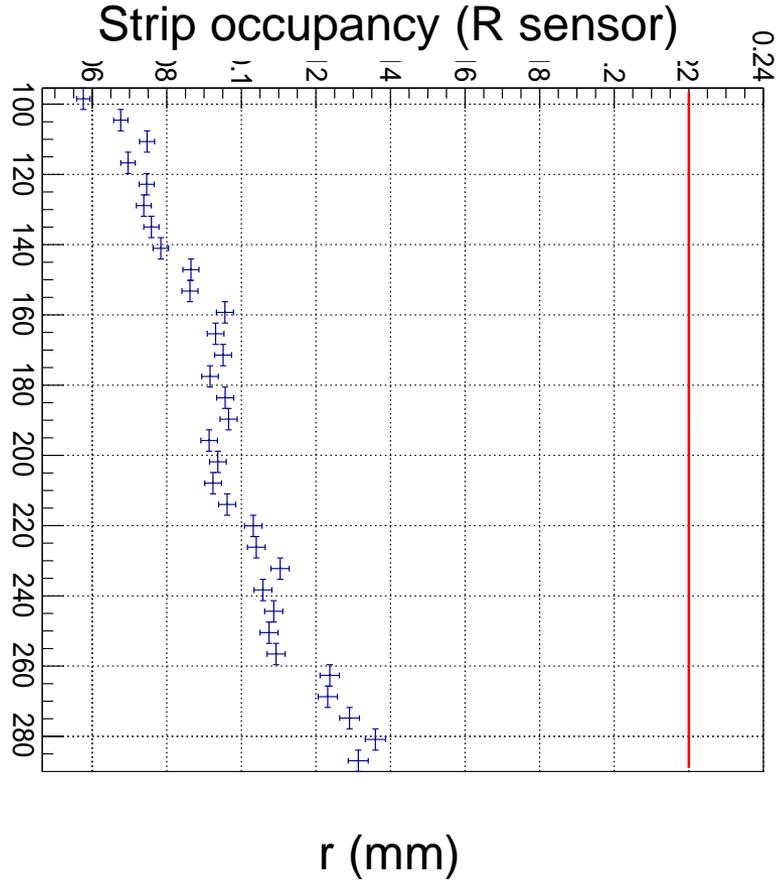
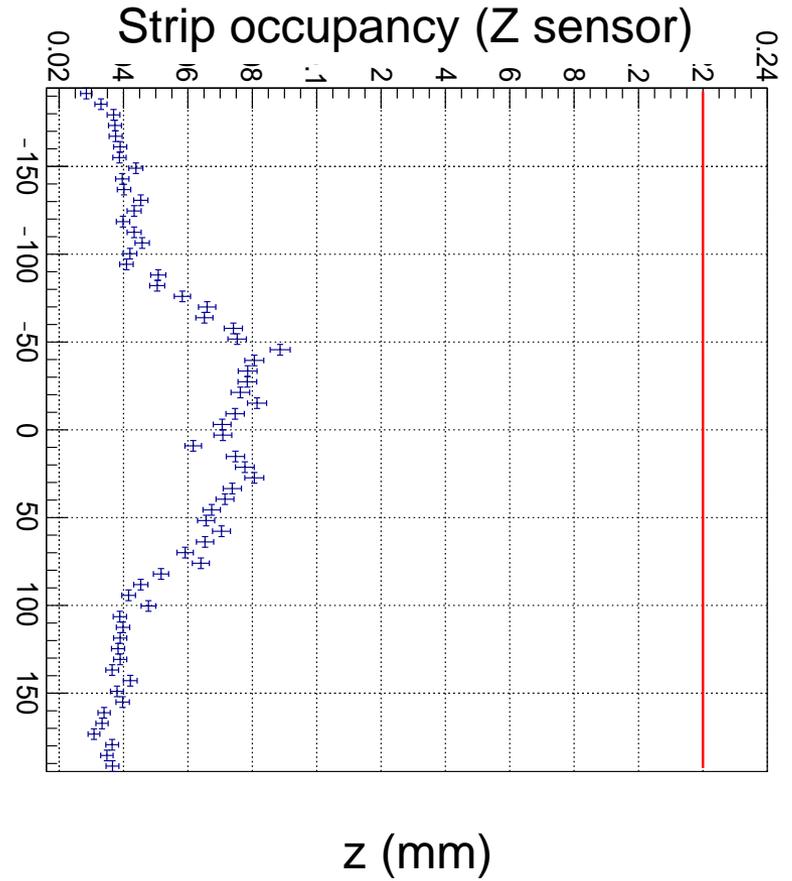


Silicon sensor



BS

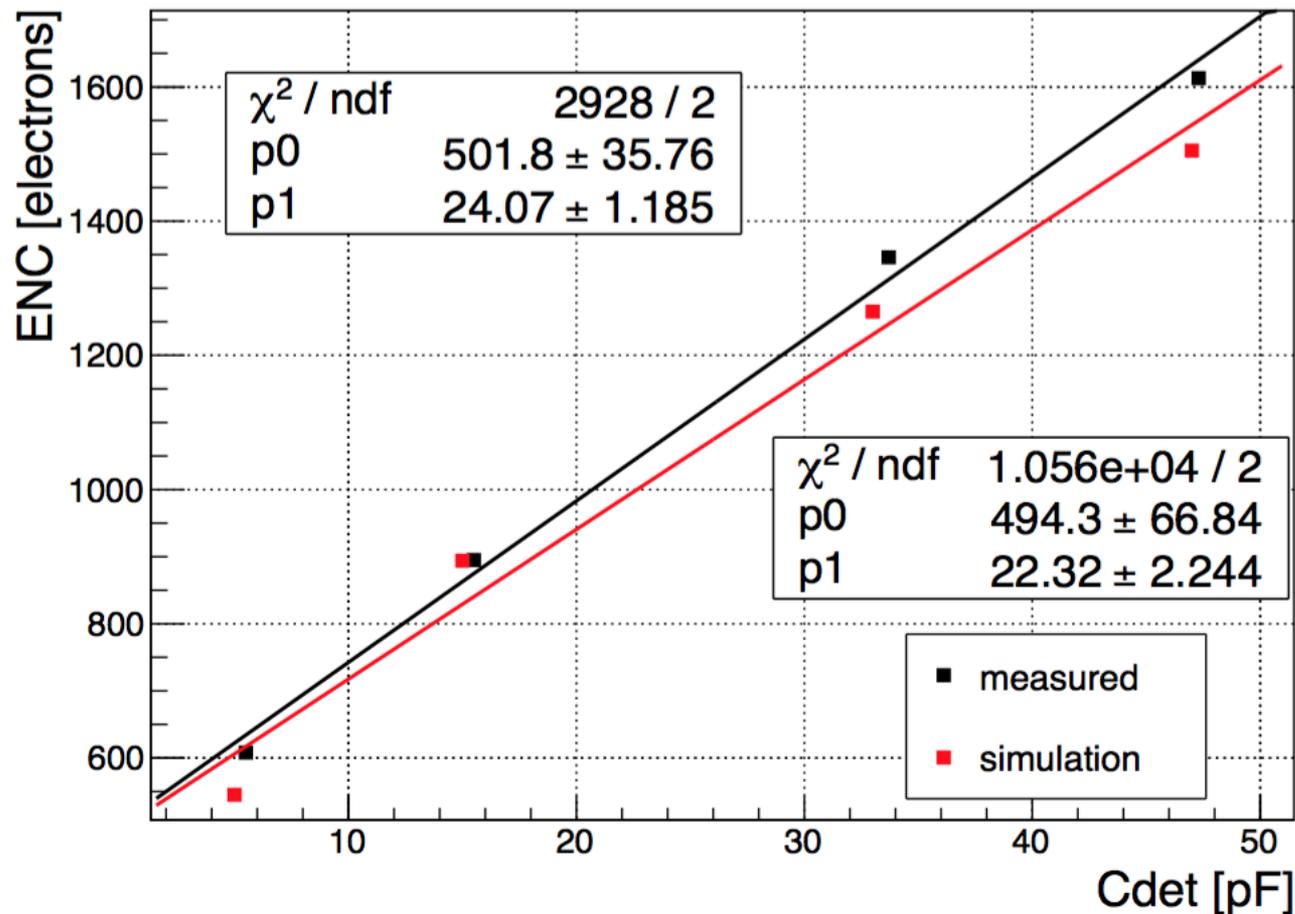




Slit前試作器(Slit2013A)でのノイズ評価

J-PARC
muon g-2/EDM

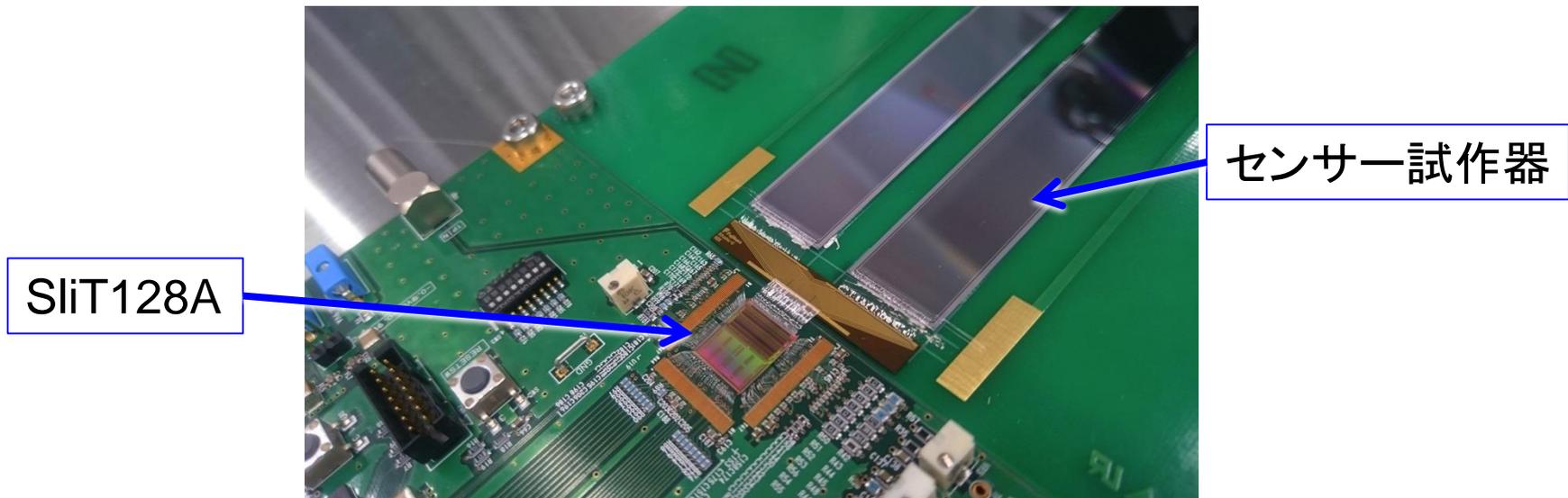
S. Shirabe, JPS 2014A



検出器容量 $C_{det}=17$ pF のとき、ENC = 900 e

ASICとの接続

- 読み出し回路とセンサーの接続動作試験
 - 複数SliT128Aとセンサー実機を接続した全チャンネル読み出し試験
 - SliT128Aとセンサー試作器の接続試験が進行中



ベーンアセンブリ

J-PARC
muon g-2/EDM

