

J-PARC muon $g-2$ /EDM実験 に用いる陽電子飛跡検出器の開発

伊藤 拓実
(九大理 修士2年)

2017/10/03
計測システム研究会 @ 函館

J-PARC muon g-2/EDM実験

◆ 異常磁気能率(g-2)

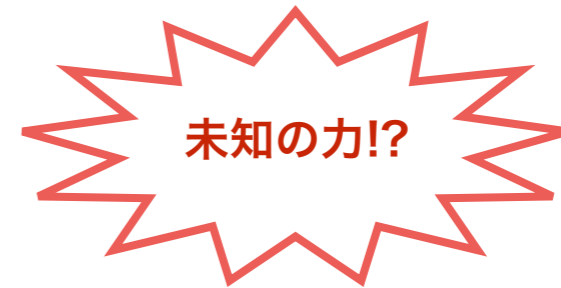
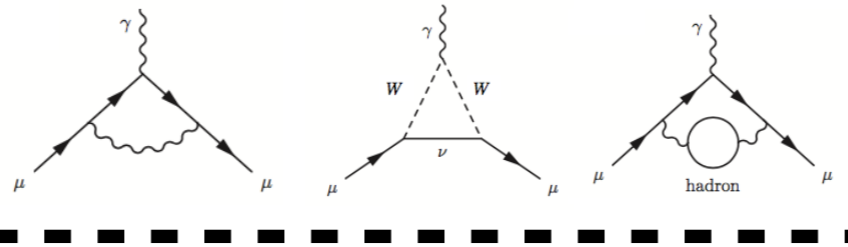
• 磁気能率: $\vec{\mu} = g \frac{e}{2m_\mu} \vec{s}$

• 磁気能率のg因子: ディラック方程式から $g = 2$

標準模型から

$g \neq 2 \rightarrow$ 異常磁気能率(g-2)

$$a_\mu = \frac{g-2}{2} =$$



標準模型:	$11\,659\,182.8(4.9) \times 10^{-10}$ (0.42 ppm)
先行実験:	$11\,659\,208.9(6.3) \times 10^{-10}$ (0.54 ppm)
実験-標準模型:	$26.1(8.0) \times 10^{-10}$ (3.3 σ)



0.1 ppm の精度で測定することを目指す

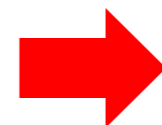
◆ 電気双極子能率(EDM)

電気双極子能率: $\vec{d} = \eta \frac{e}{m_\mu c} \vec{s}$

• EDMは時間反転対称性を破る物理量 \rightarrow CP対称性を破る物理量 (∵CPT定理)

• 物質優勢宇宙の解明 (∵ サハロフの条件)

• 有限のEDMは未発見 ($< 10^{-19} e \cdot \text{cm}$)



$10^{-21} e \cdot \text{cm}$ の感度で探索することを目指す

3 GeV陽子ビーム

陽電子飛跡検出器

ミュオン生成

ミュオン蓄積リング
(3 T一様高磁場)

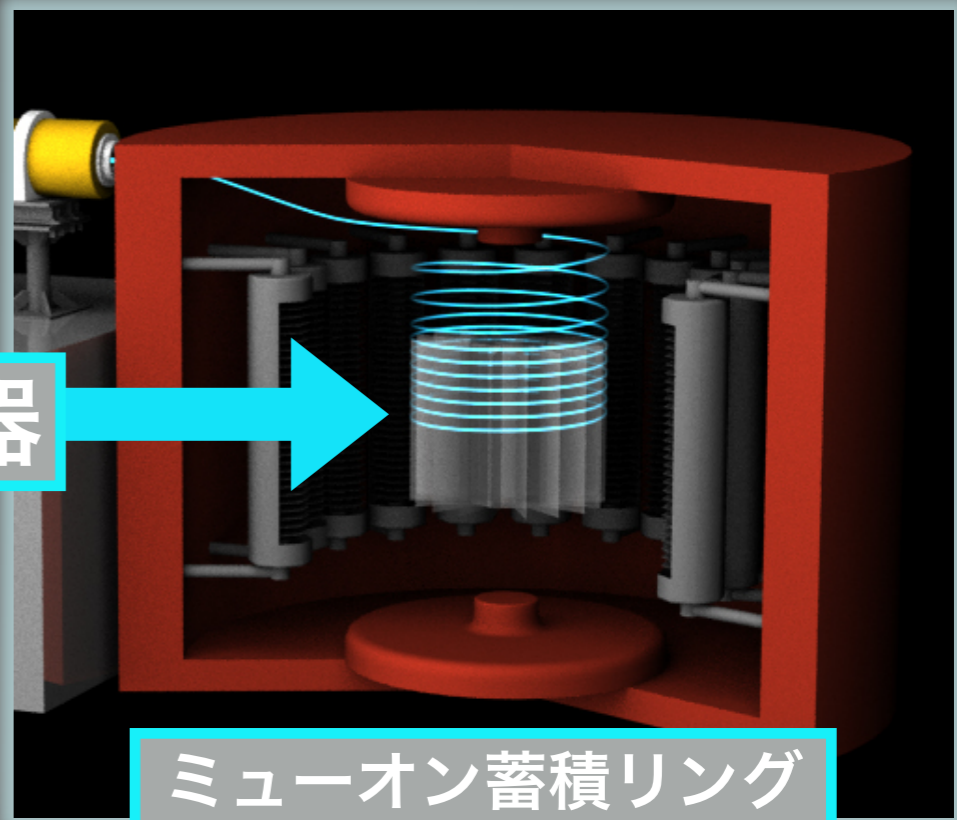
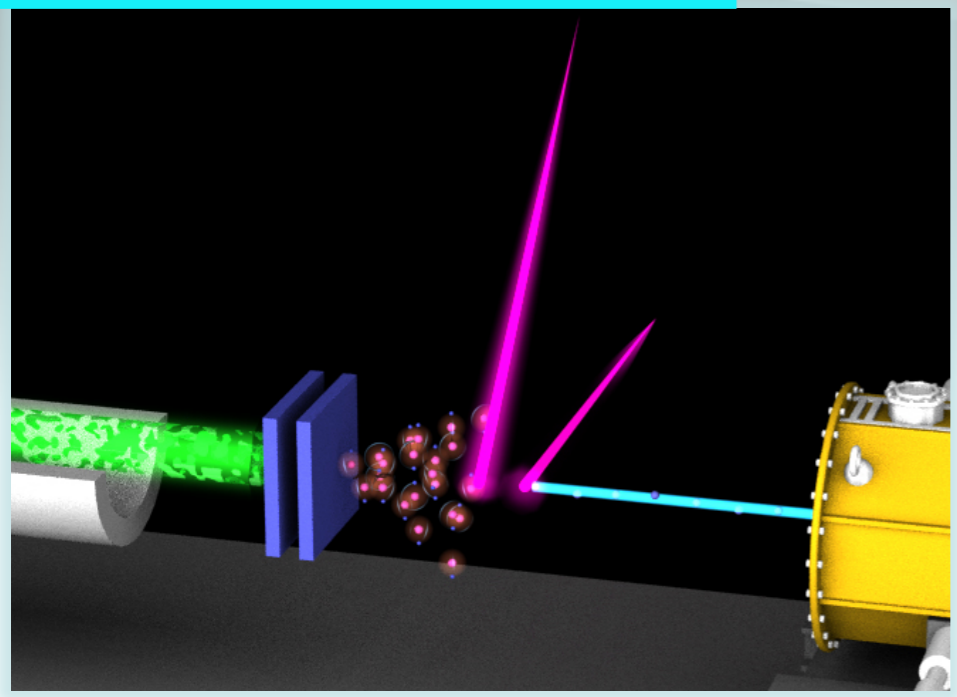
表面ミュオンビーム
28 MeV/c

Ultra cold μ^+ source

Muon LINAC (300 MeV/c)

極冷ミュオンビーム
300 MeV/c

g-2 : 0.54 ppm \rightarrow 0.1 ppm
EDM : $1.8 \times 10^{-19} e \cdot cm \rightarrow 10^{-21} e \cdot cm$

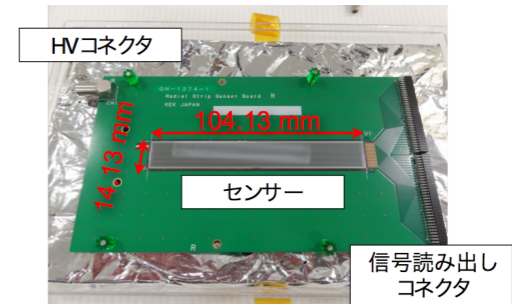


検出器開発の流れ

2014年

- センサー試作機(64 strip)と読み出し回路試作機(32 ch)の接続試験

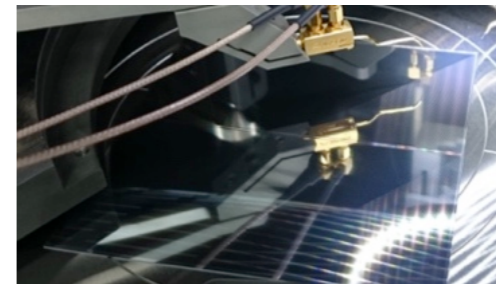
- J-PARCでのレート耐性試験
@西村(東大理), JPS2014秋 20aSH-9
- 東北大での陽電子信号測定
@長澤(九大理), JPS2015春 24aDF-4



2016年

センサー実機・新仕様読み出し回路(SiIT128A)の製作・評価

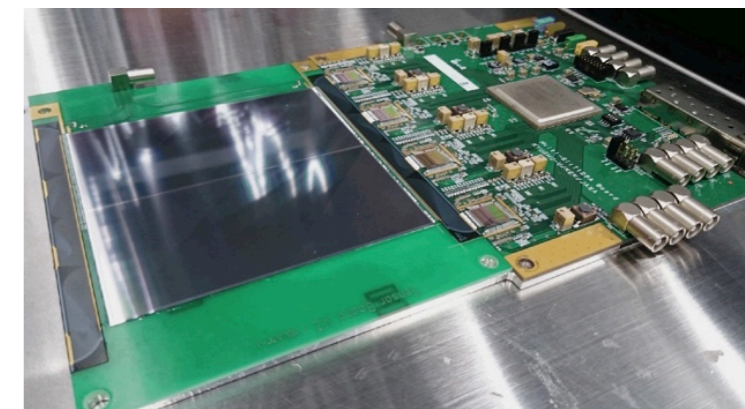
- センサー基礎特性評価
@西村(東大理), JPS2016秋 23aSF-4
@伊藤(九大理), JPS2017秋 12pS36-6
- SiIT128A性能評価
@眞玉(九大理), JPS2016秋 23aSF-5
- SiIT2016TEG性能評価
@堤(九大理), 12pS36-7



2017年

センサー実機とSiIT128A複数枚による接続試験

- テストパルス信号での性能評価
@佐藤(KEK IPNS) JPS2017春 17pA12-8
- ビームでの性能評価
@西村(東大理), 12pS36-8



2018年

- ベーンプロトタイプ製作へ

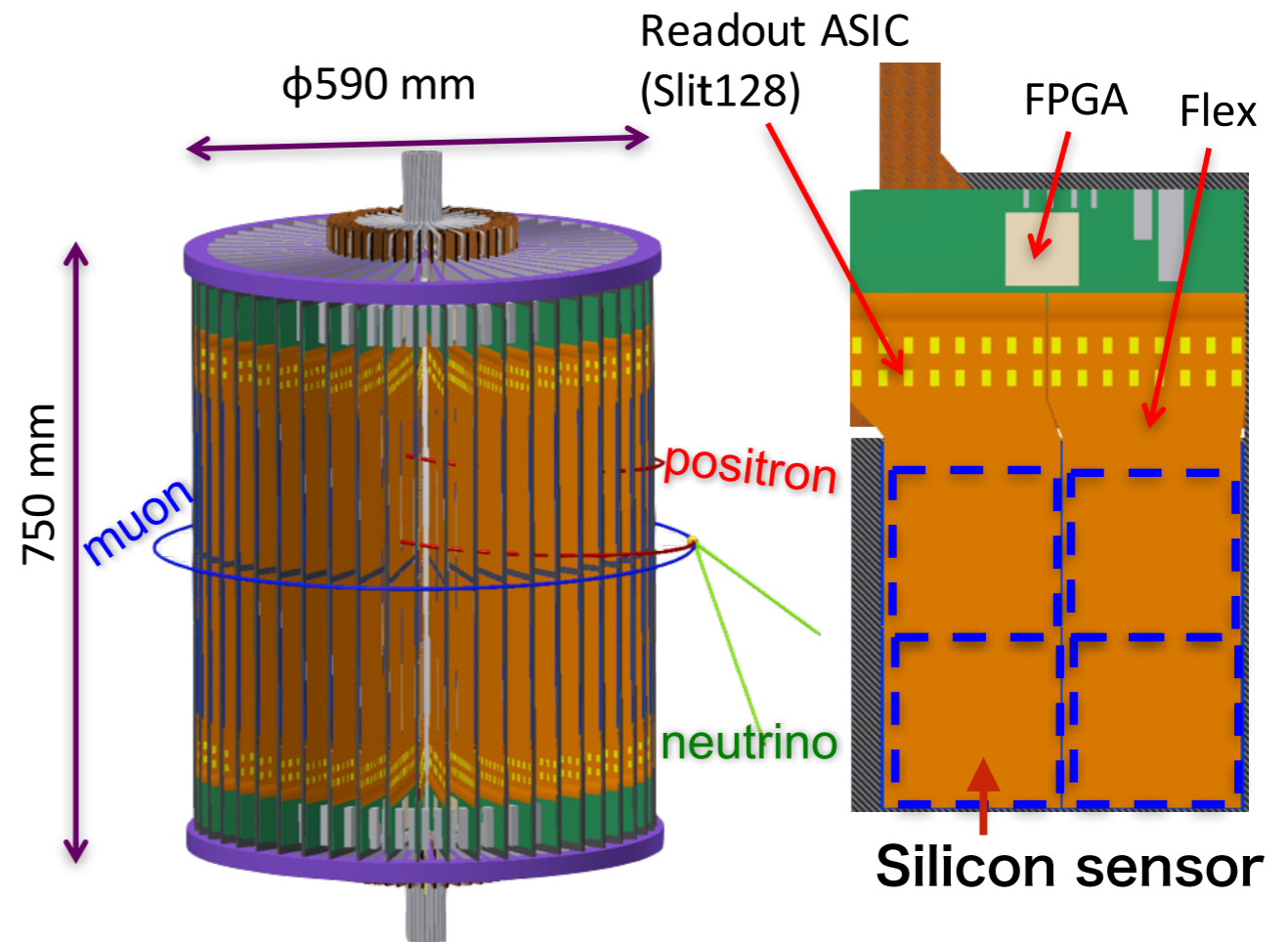
各パートで開発が進行中

陽電子飛跡検出器

- 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
- 大強度パルスビームに対応
(最大rate : 1.4 MHz/strip)
 - 高granularity
 - 高速応答
 - rate変化の中での安定動作

シリコンストリップセンサー(SSSD)によって実現！！

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



読み出しASICの特徴

- 5 nsタイムスタンプのバイナリ読み出し
- イベントバッファ長(40.96 μ s)
- 高集積化(128ch/chip)

Outline

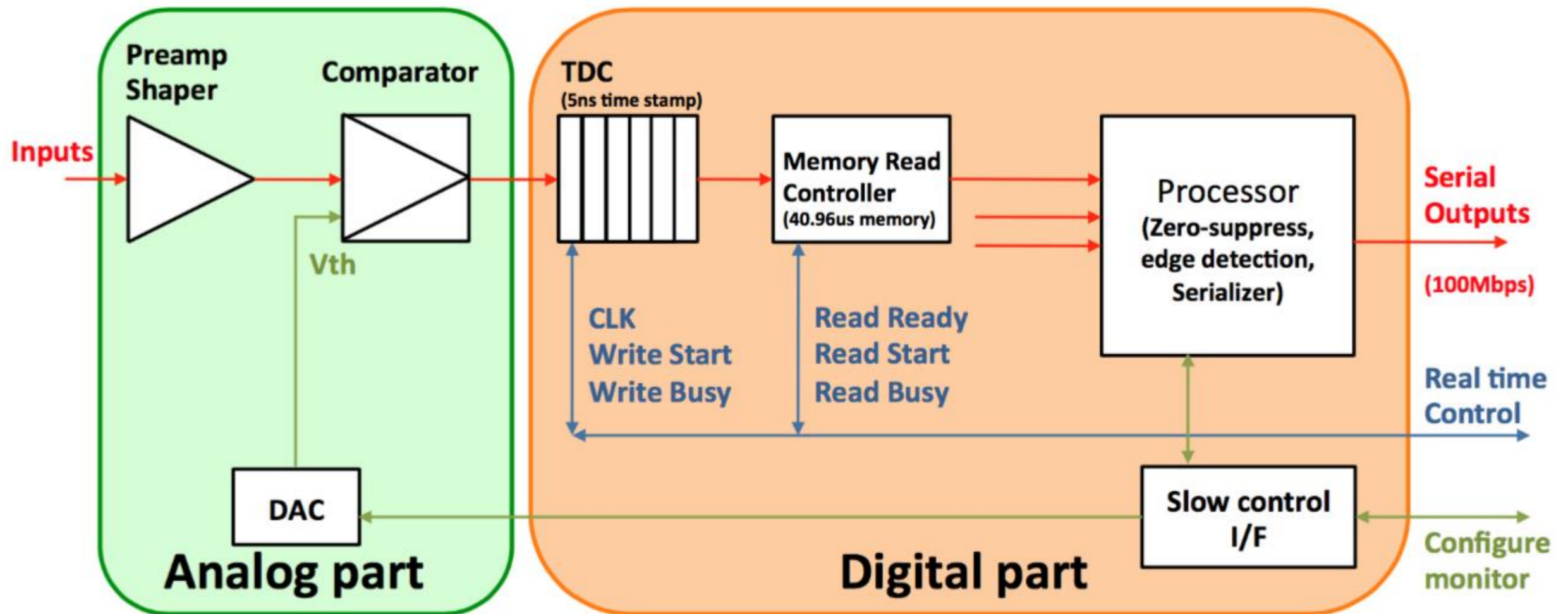
- ◆ ASIC
 - SiIT2016TEGの性能評価
 - 次期評価用TEG開発に向けて
- ◆ Silicon strip sensor
 - 基礎特性評価と品質保証システム開発
- ◆ ASIC、sensor接続試験
 - ワイヤボンディングによりASICとsensorを接続
 - ”検出器”の開発
- ◆ DAQ
 - ビーム試験によるDAQシステムの運転結果
 - g-2/EDM実験に向けたDAQ試験(HDDの書き込み速度)

ASIC要求性能

Parameter	Requirement	SiIT128A TEG Simulation	SiIT128A TEG Result	SiIT128A Result
Dynamic range	~ 3 MIP	~ 4 MIP	~ 3 MIP	4 MIP
ENC	< 1600 e	1210 e	1070 e	960 e
Pulse width	< 100 ns	53.5 ns	96.0 ns	155 ns
Time walk	< 5ns	6.5 ns	14.6 ns	11.5 ns
Power consumption	5 mW/ch			3.44 mW/ch

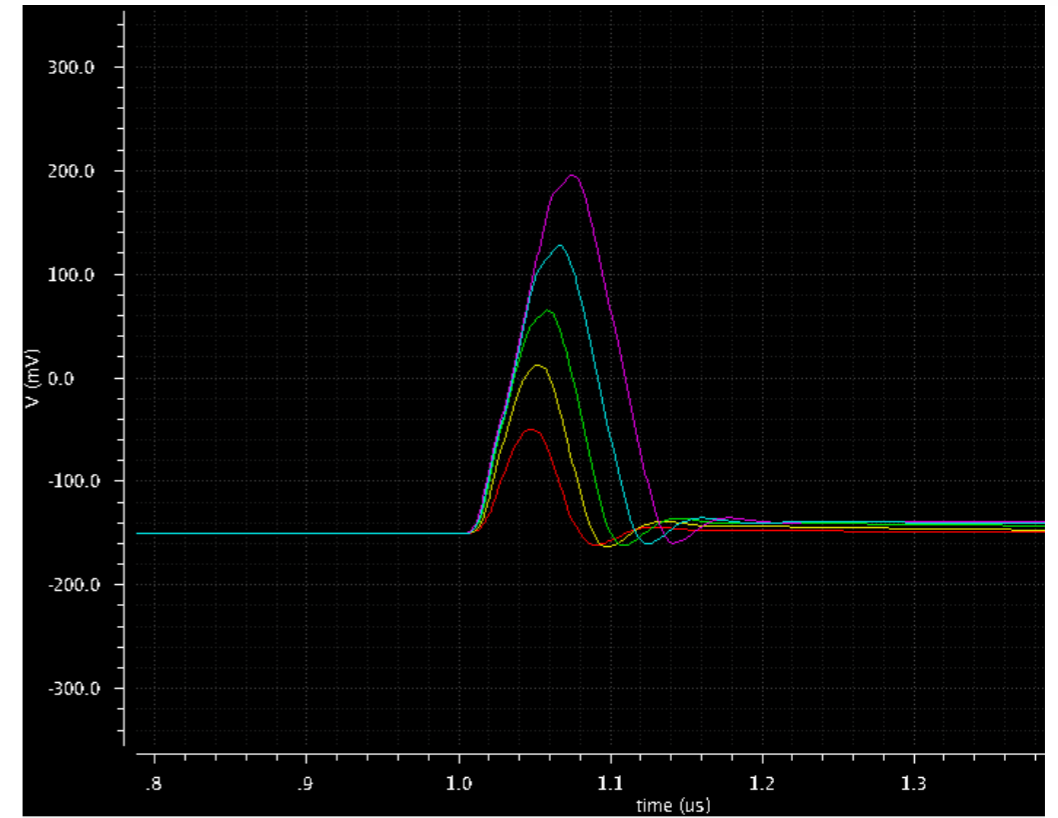
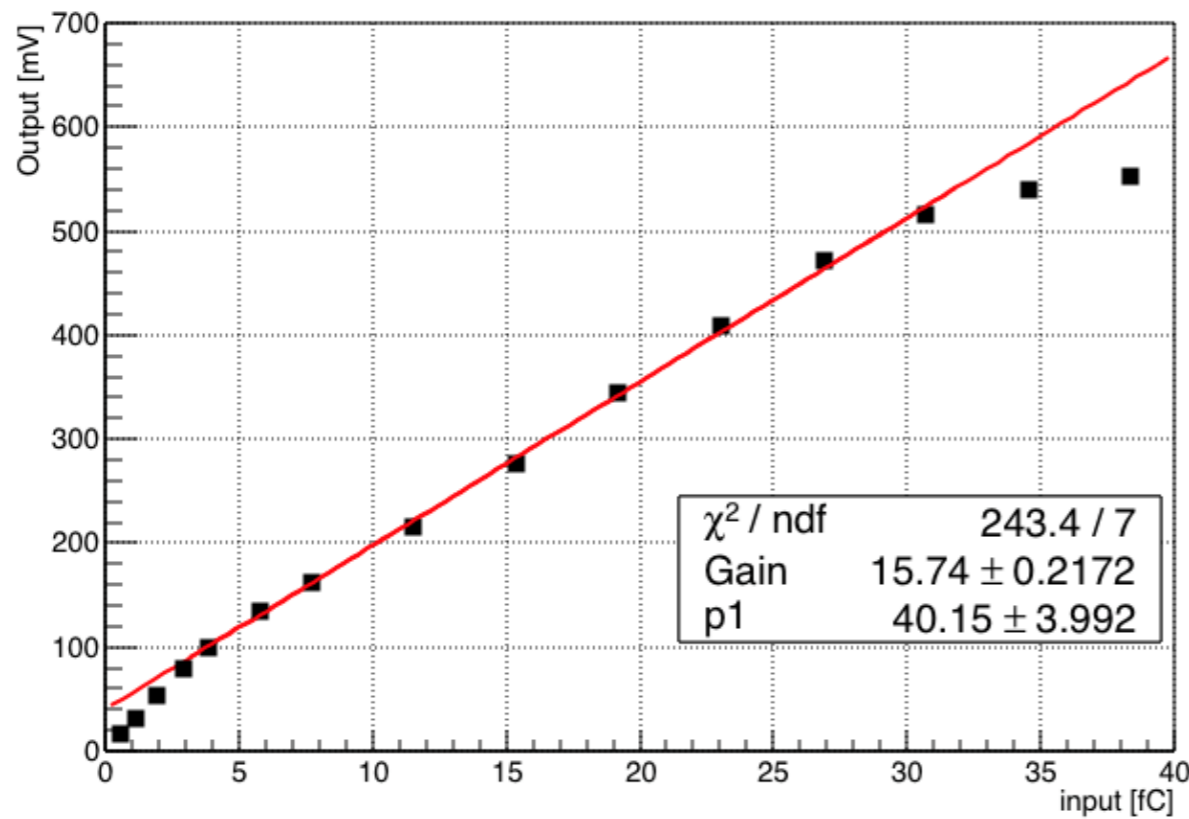
- ◆ Pulse width とTime walkの改善が必要な状況
→ 次期評価用ASIC : **SiIT2016TEG**を製作

ASIC回路



性能評価用のASICであるSiIT2016TEGは
アナログ部のみを実装

Dynamic range

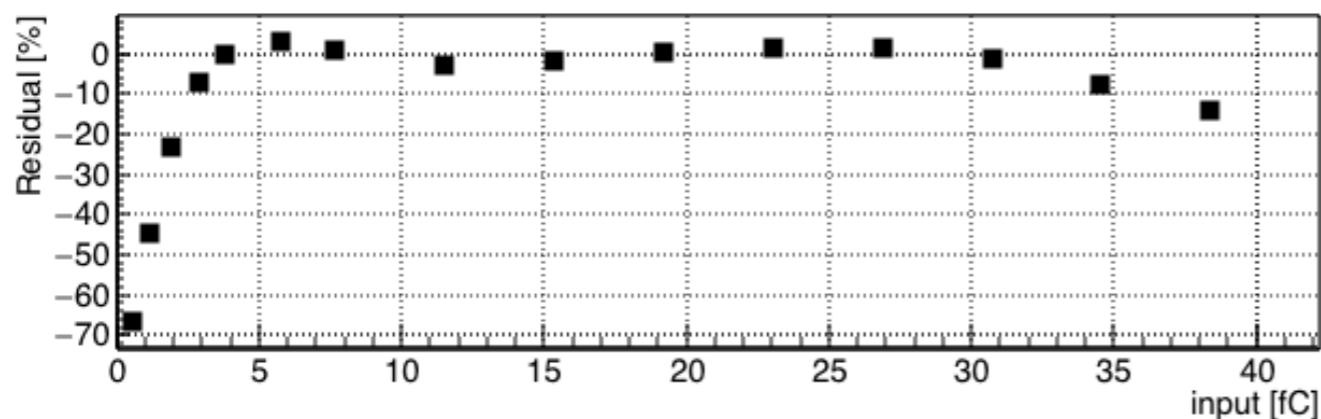


Pulse height を測定

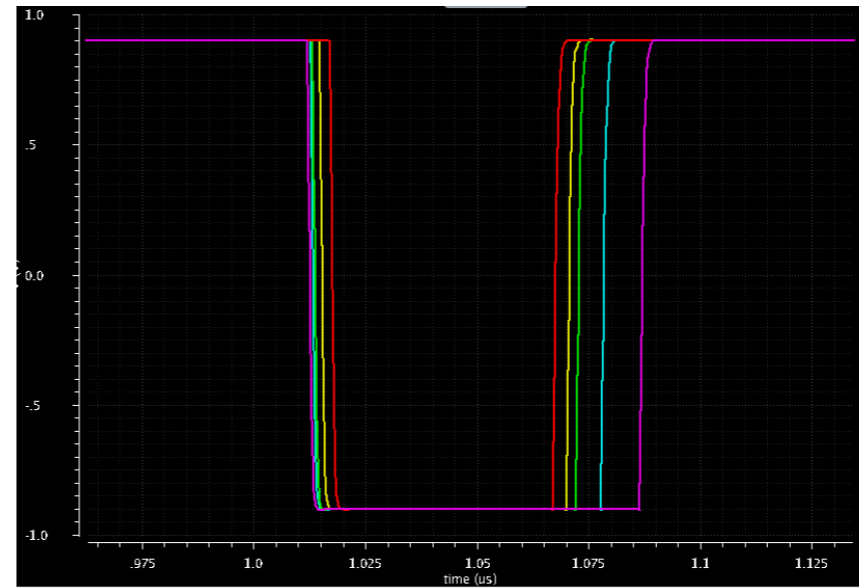
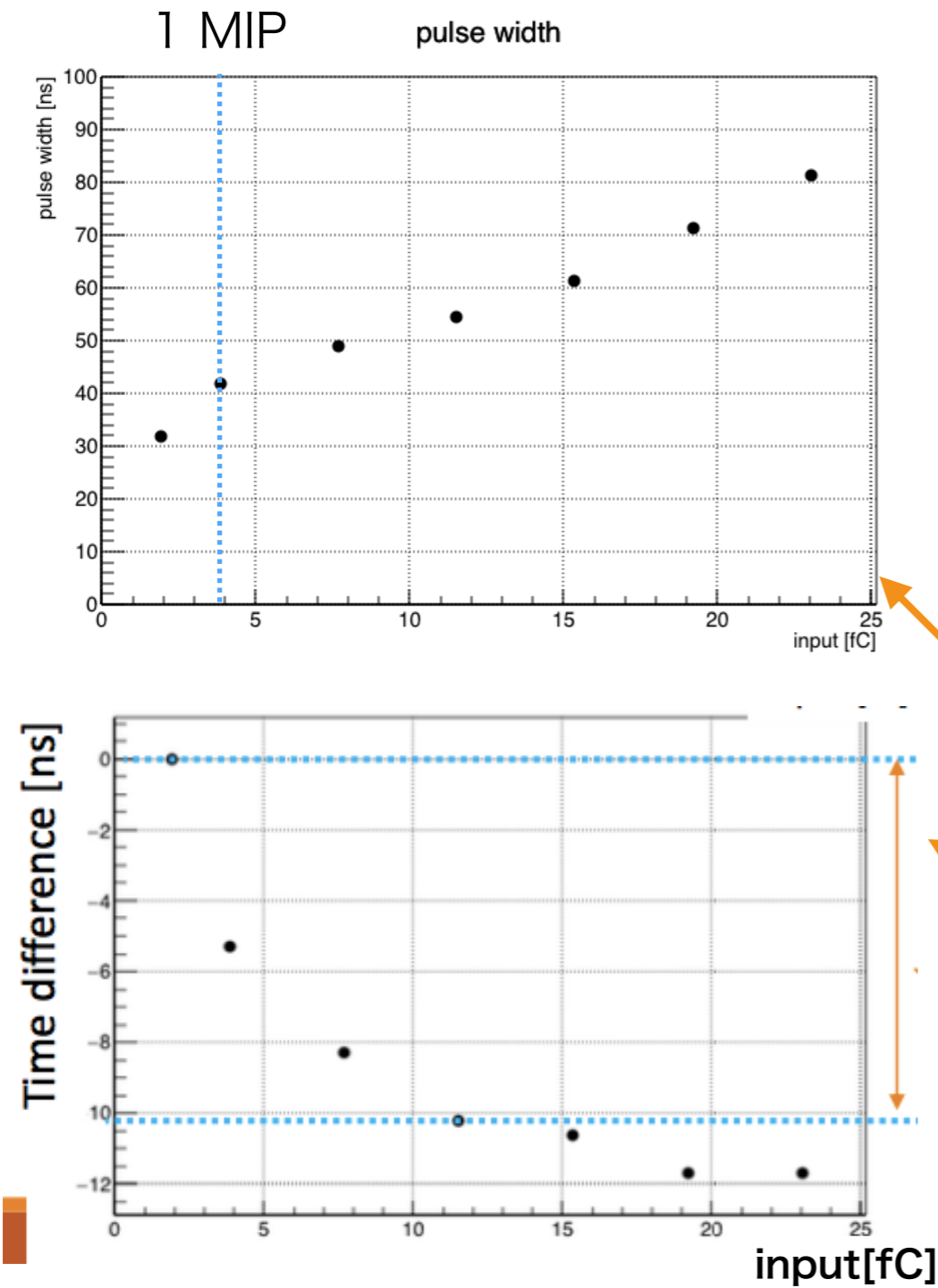
3 fCから32 fC(1MIP~8MIP)の領域でfit

fitした直線からの誤差 $\pm 5\%$ 以内
の領域は1~8 MIP(3.84~30.72fC)

GAIN = 15.7 mV/fC
(要求性能19mV/fC)



コンパレータ出力



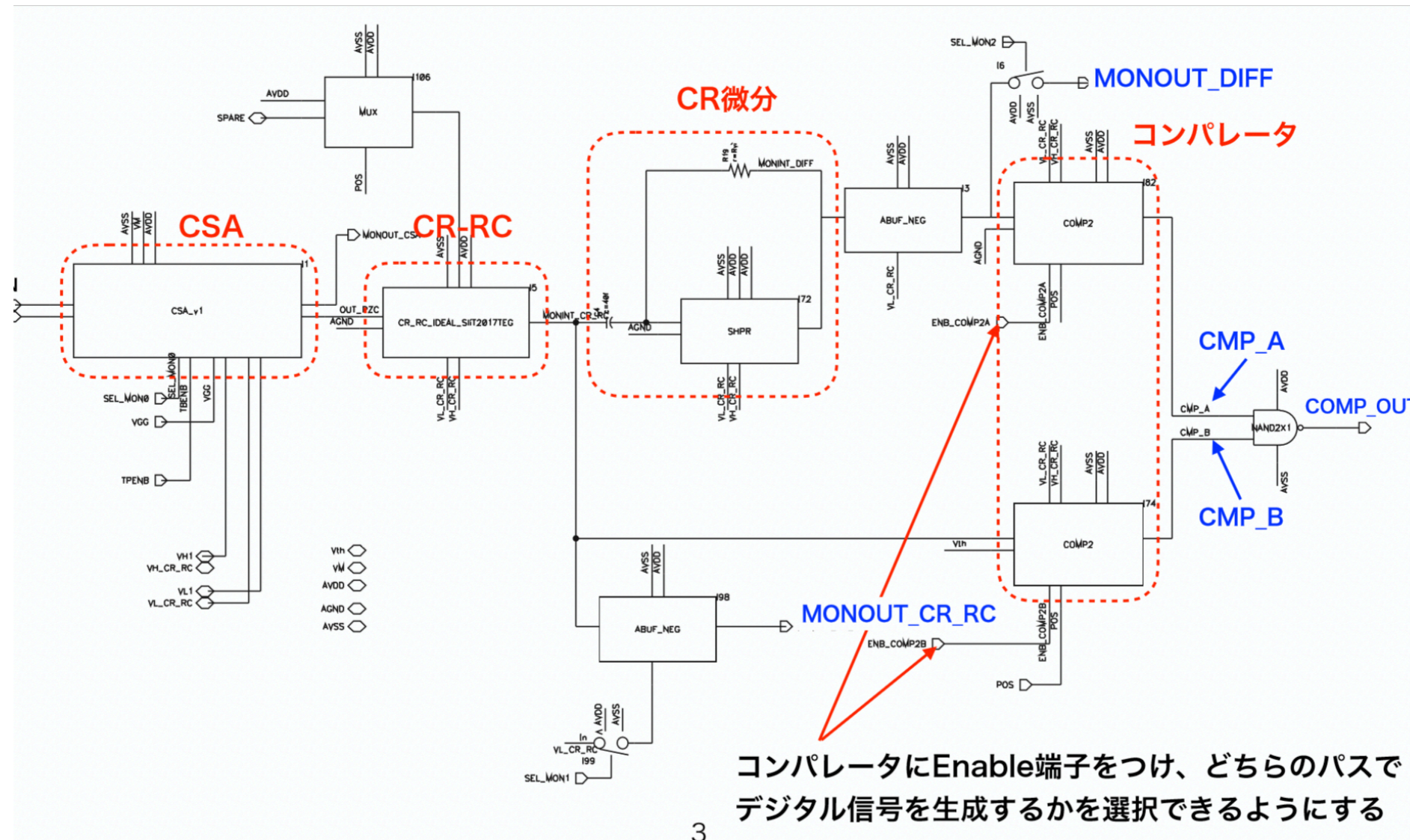
スレッシュヨルド 0.3 MIP (33 mV)

pulse width < 100 nsを実現している

- Time Difference -> 1.92 fCの時の立ち上がり時間を基準にする
- 0.5~3 MIPでのTime Walkは 10.2 ns (> 5 ns)

要求を満たすことができない

次期TEG回路



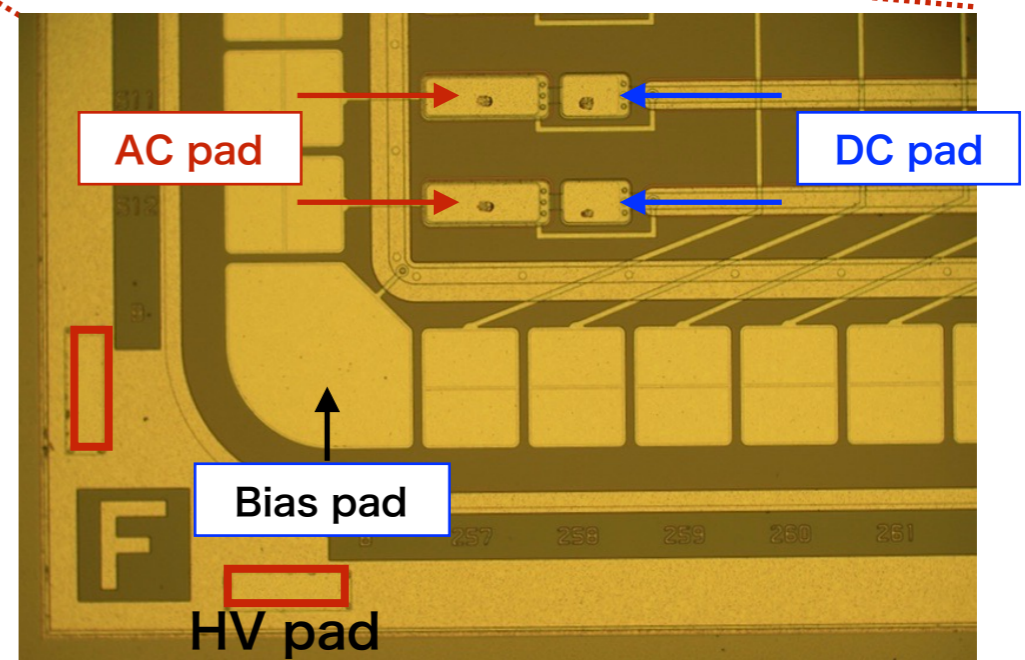
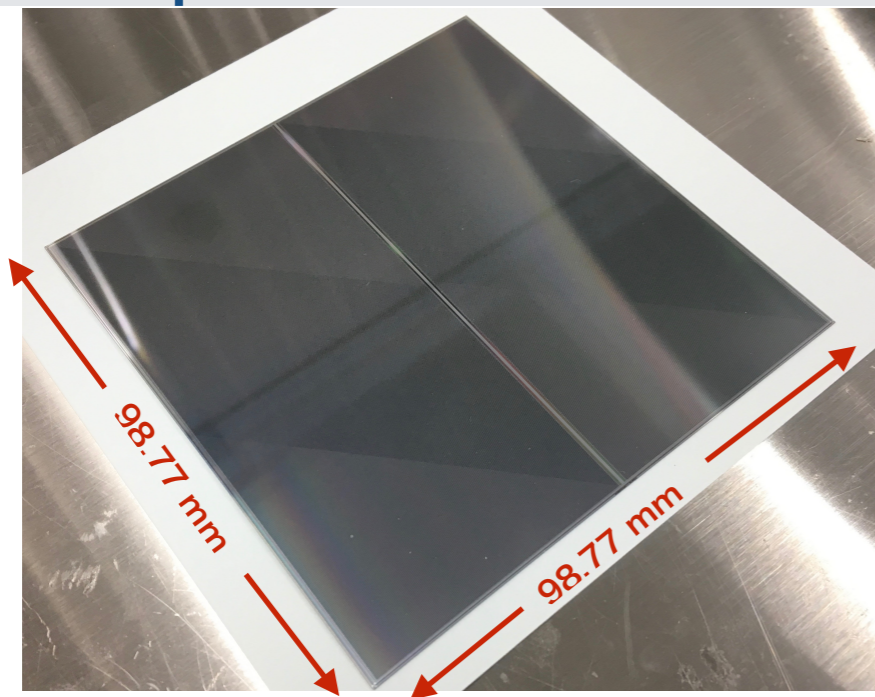
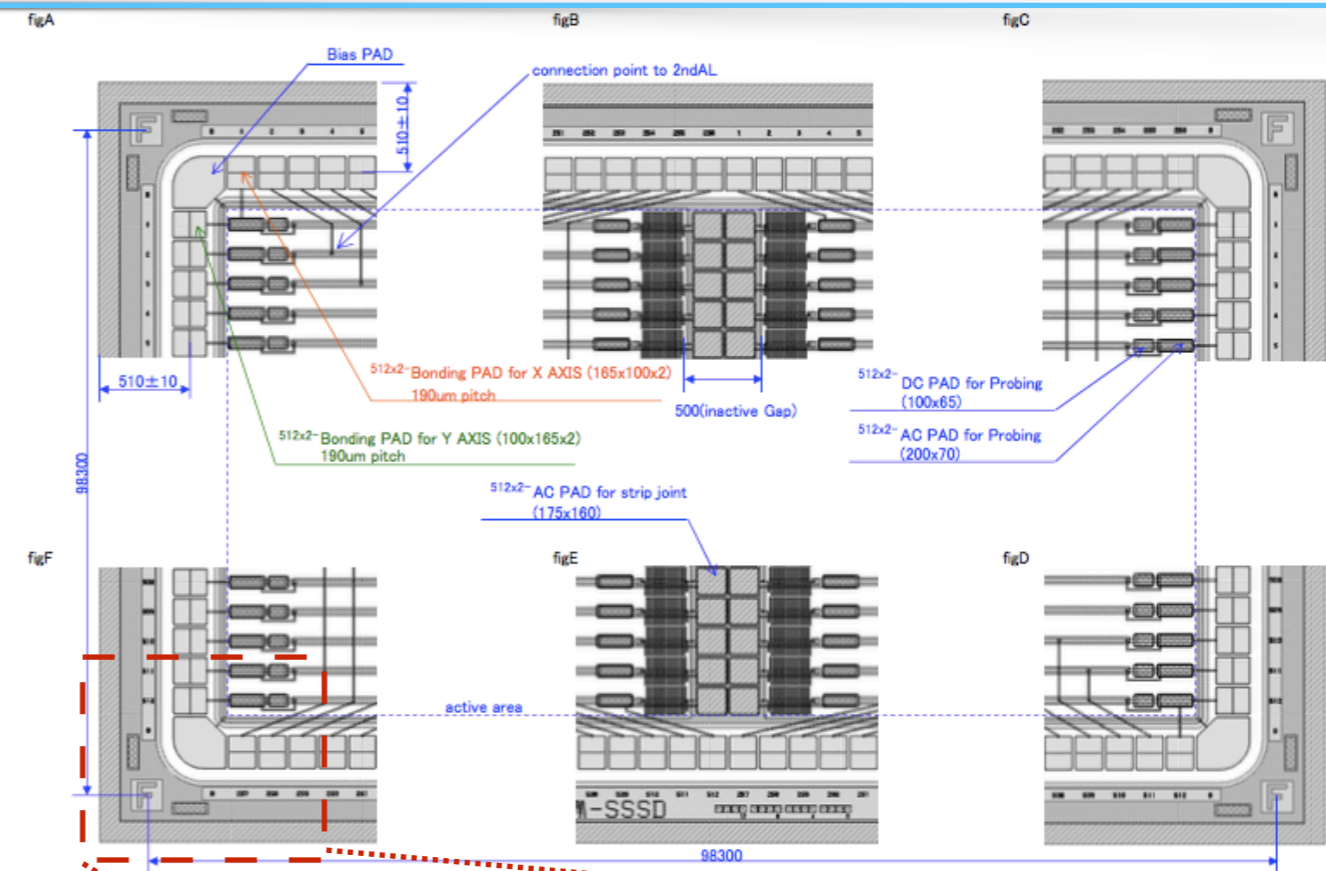
3

CR-RC回路のみでは
Time walk 5 ns 以下の達成は
困難

→ CR微分回路を追加

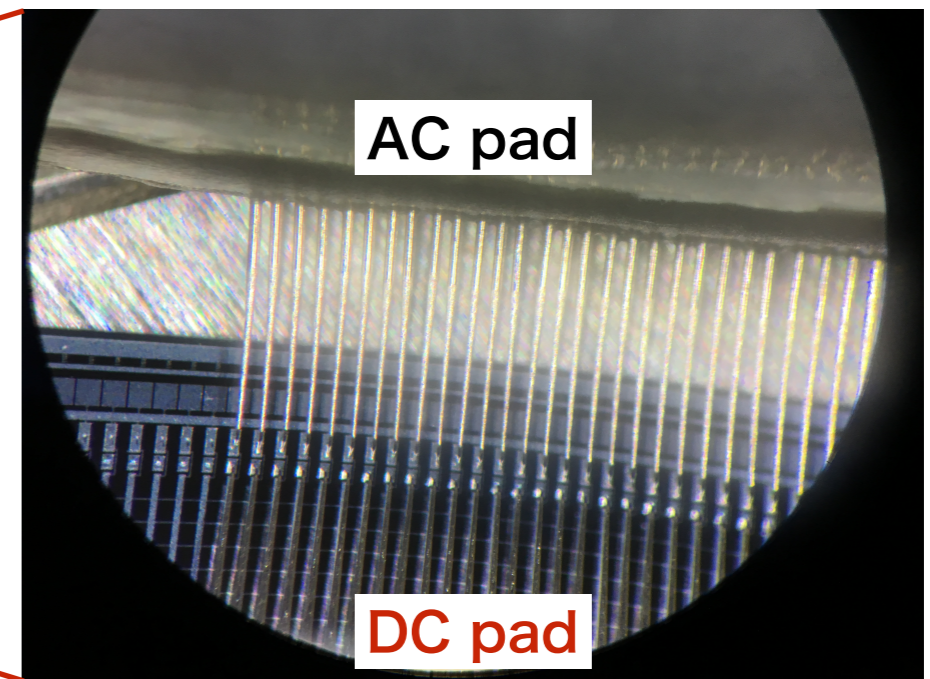
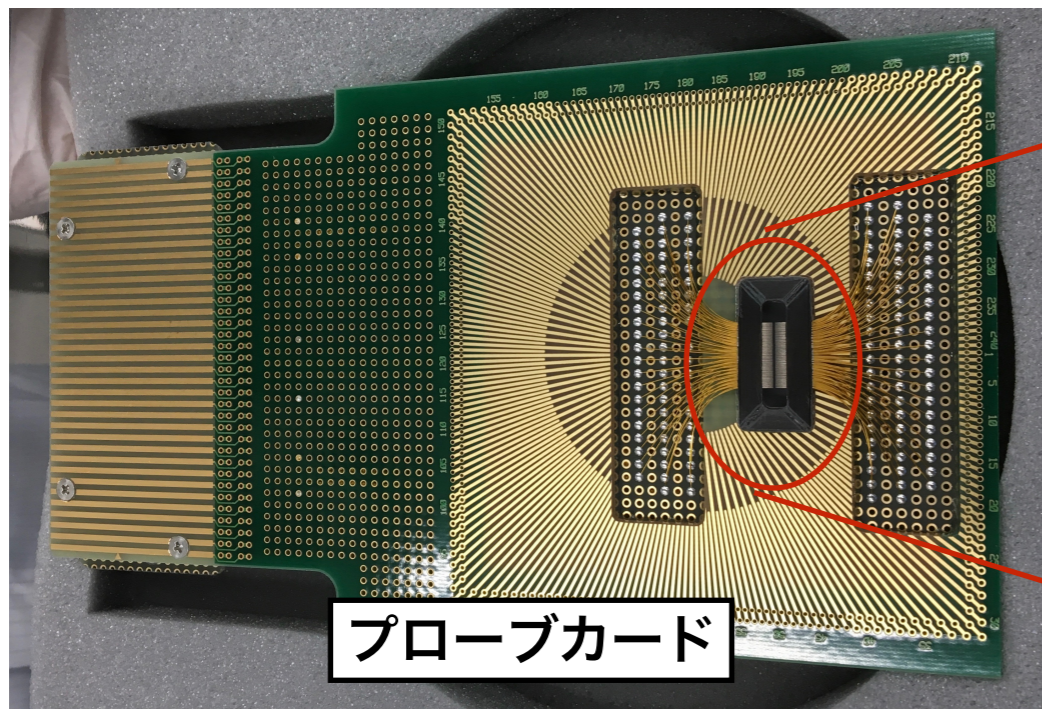
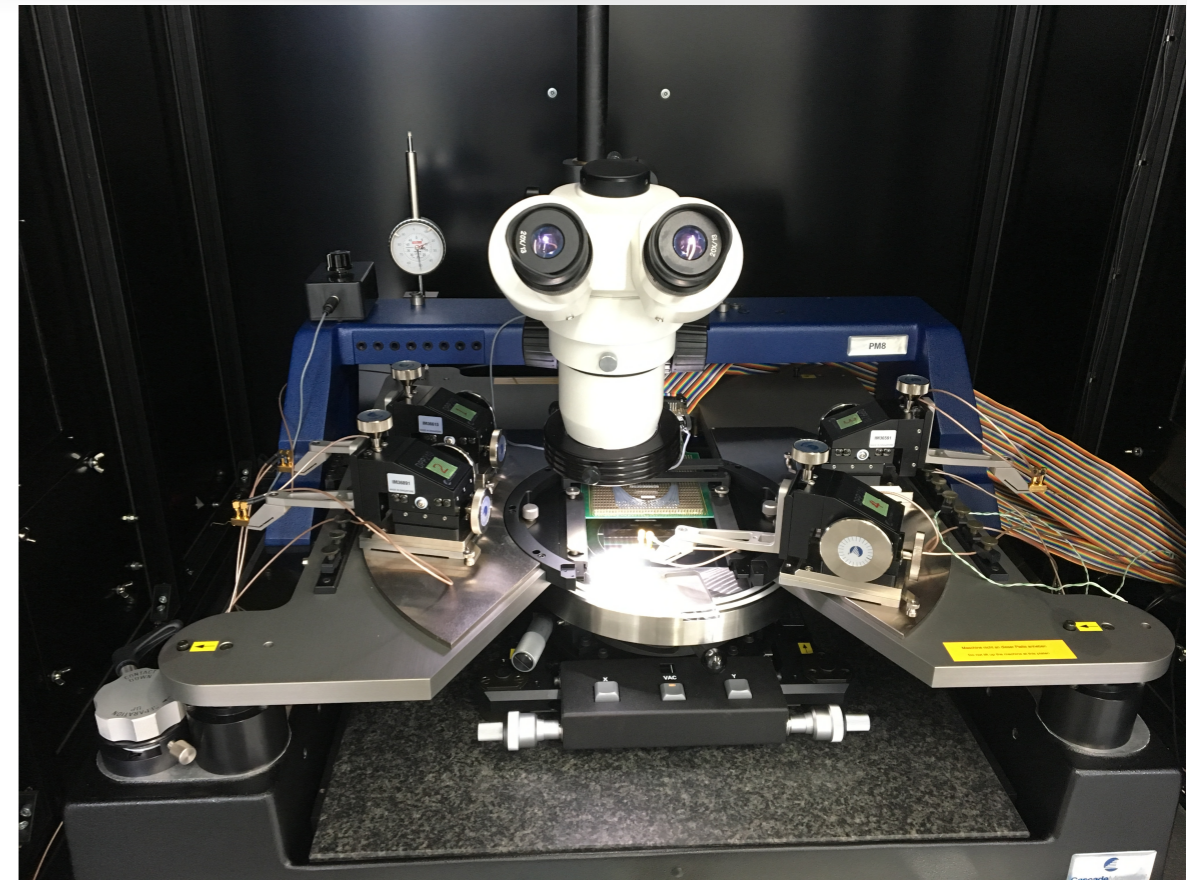
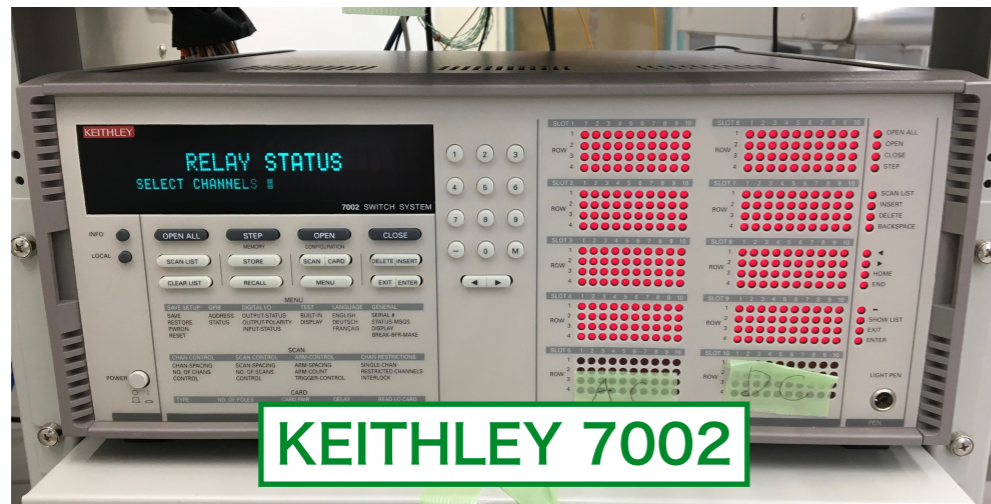
シリコンストリップセンサー

項目	仕様
タイプ	Single-sided、p on n、AC coupling
有感領域	97.28 mm × 97.28 mm
厚さ	320 μm
ストリップ間隔	190 μm
ストリップ長	48.575 mm
ストリップ数	512 × 2 blocks



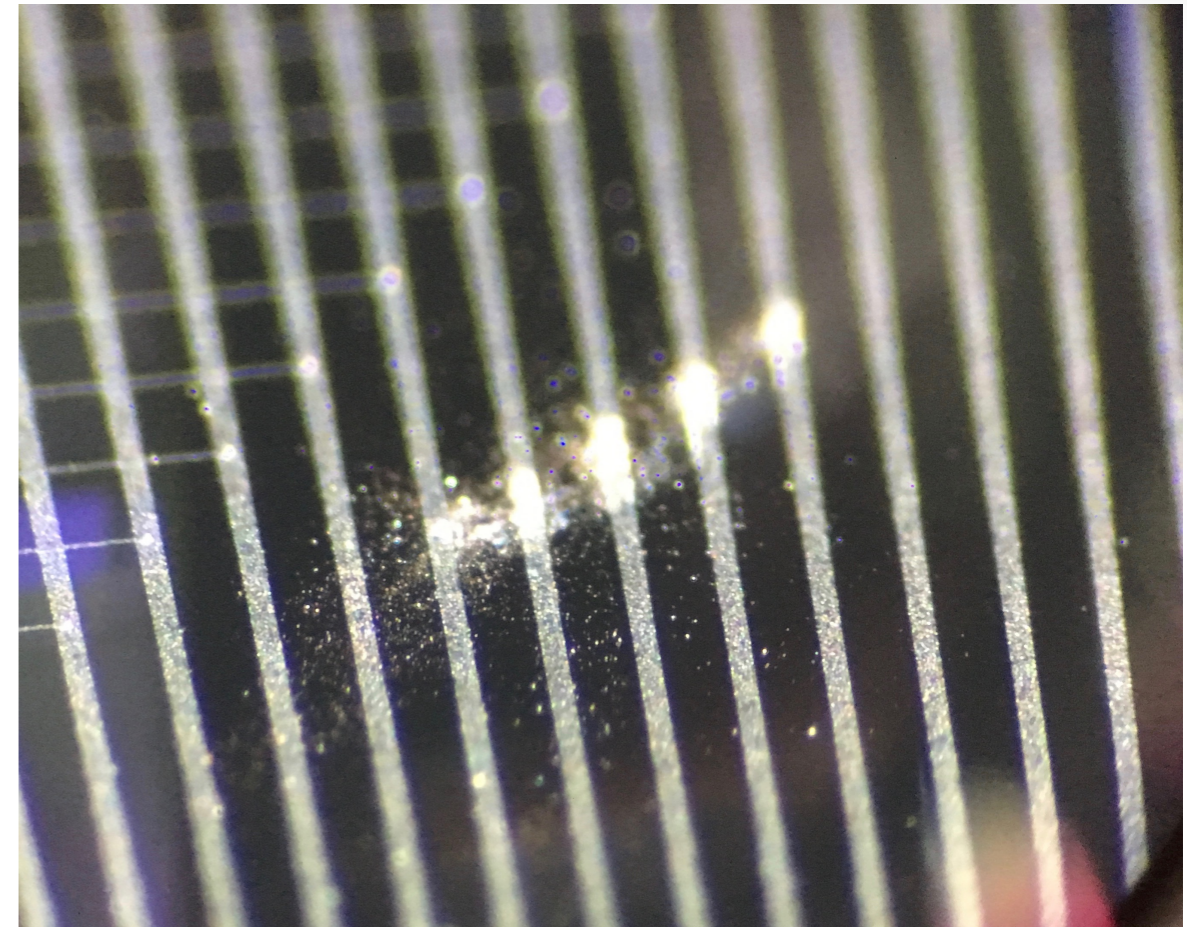
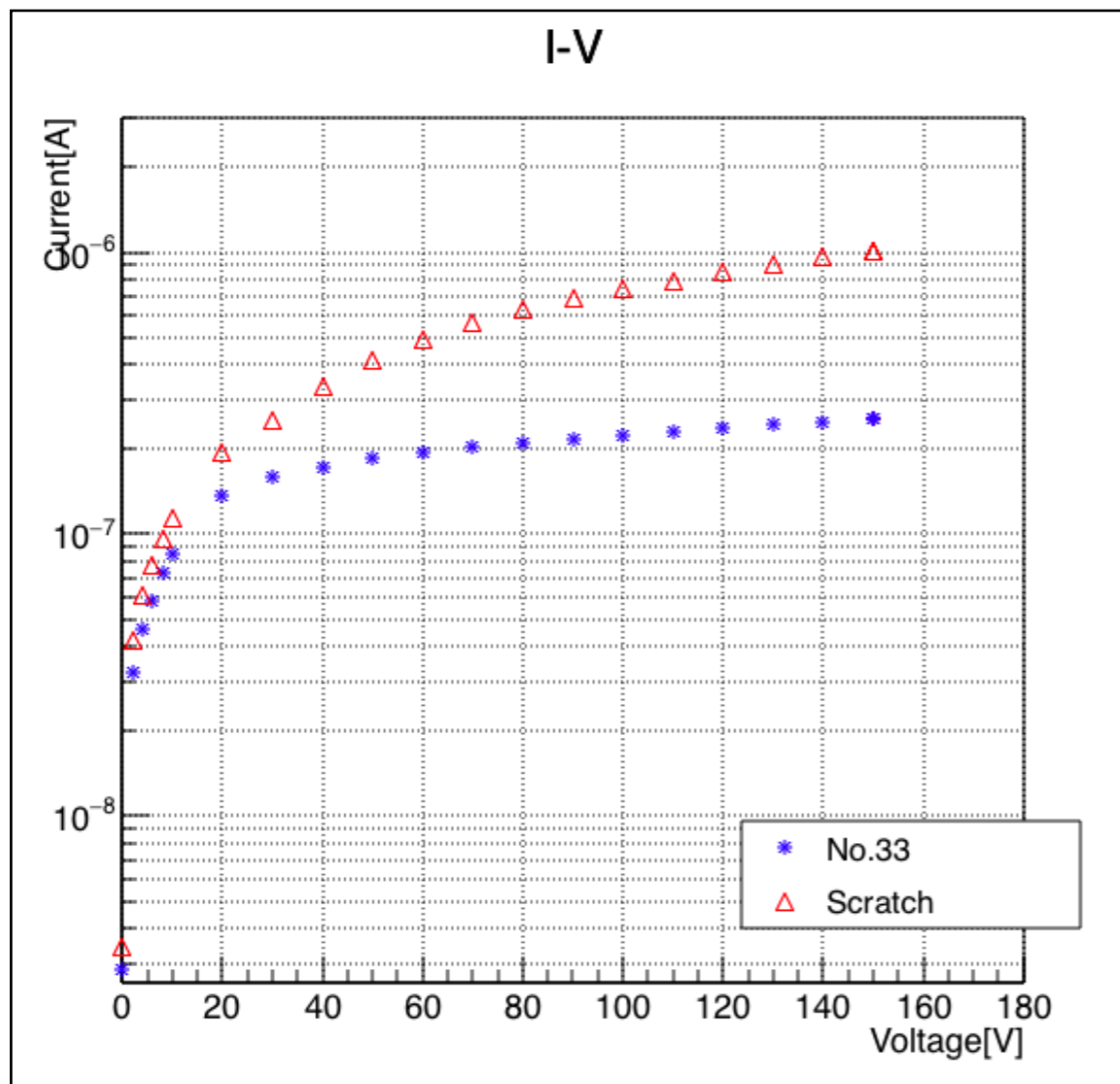
プローブステーション

- ・ プローブカードで一度に複数のストリップをプローブ
スイッチャーによって目的のストリップから読み出し
- ・ AC, DC パッドそれぞれ64chずつプローブ可能
- ・ 64ch測定したら次の64chをプローブ



目視検査

- ・ 顕微鏡を使つての目視検査
- ・ 断線しているものや導通しているストリップ、その他傷やダメージがないかの確認



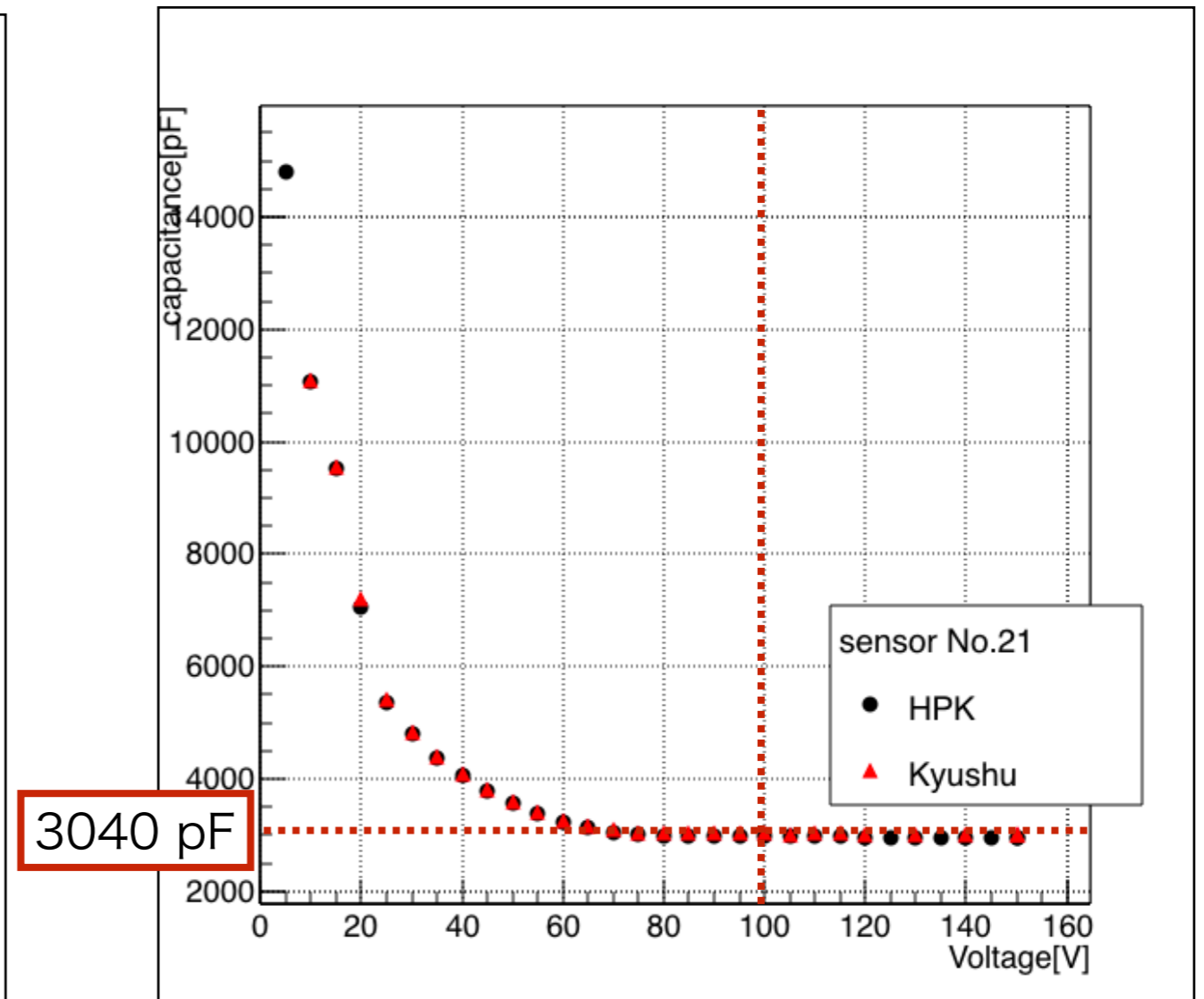
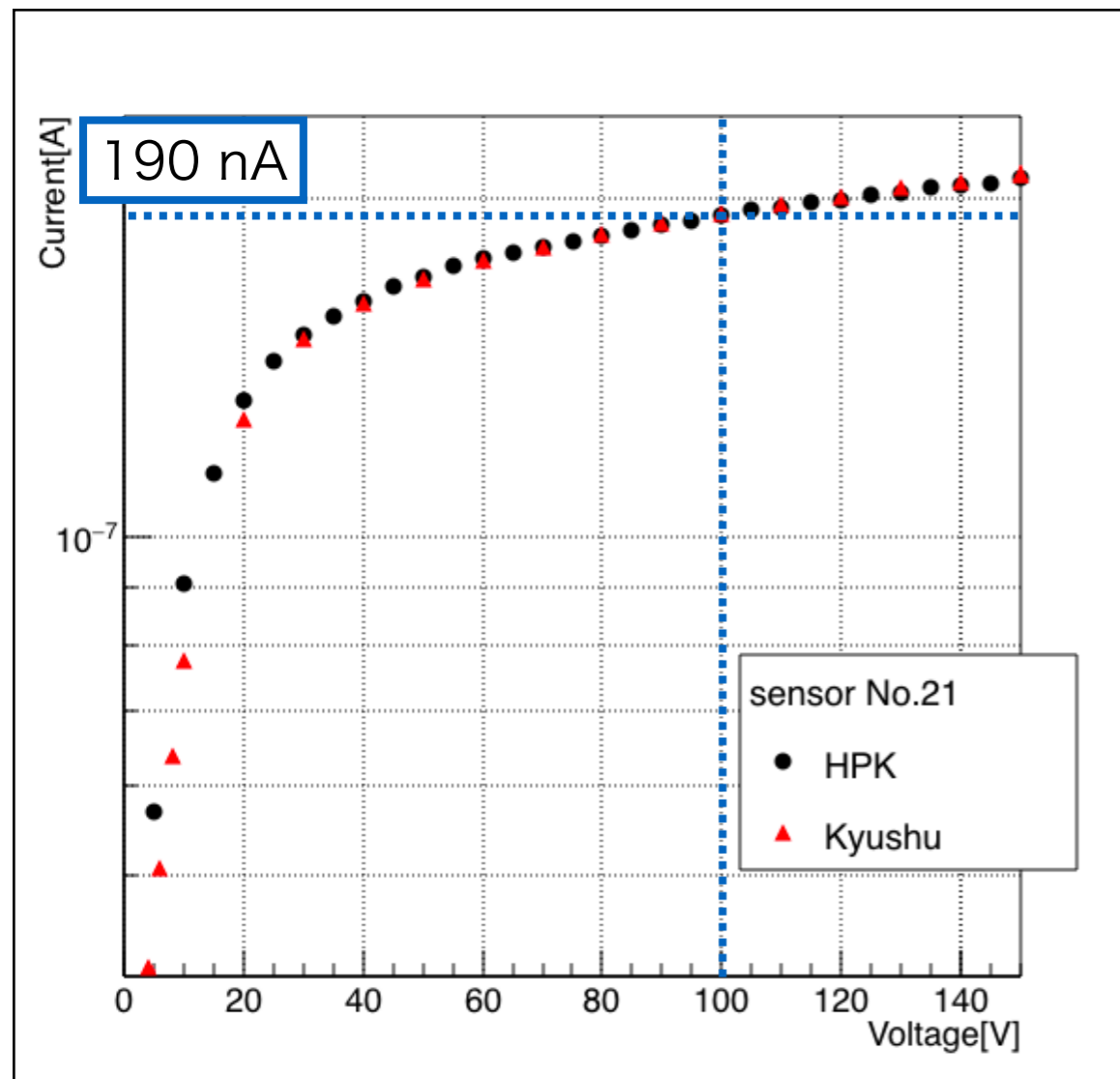
スクラッチ傷の見つかったセンサー

← スクラッチのあったセンサーと正常なセンサーとのI-V測定の比較
正常なセンサーとは違い過大電流が流れてしまっているのがわかる

IV・CV測定

I-V total : 190 nA

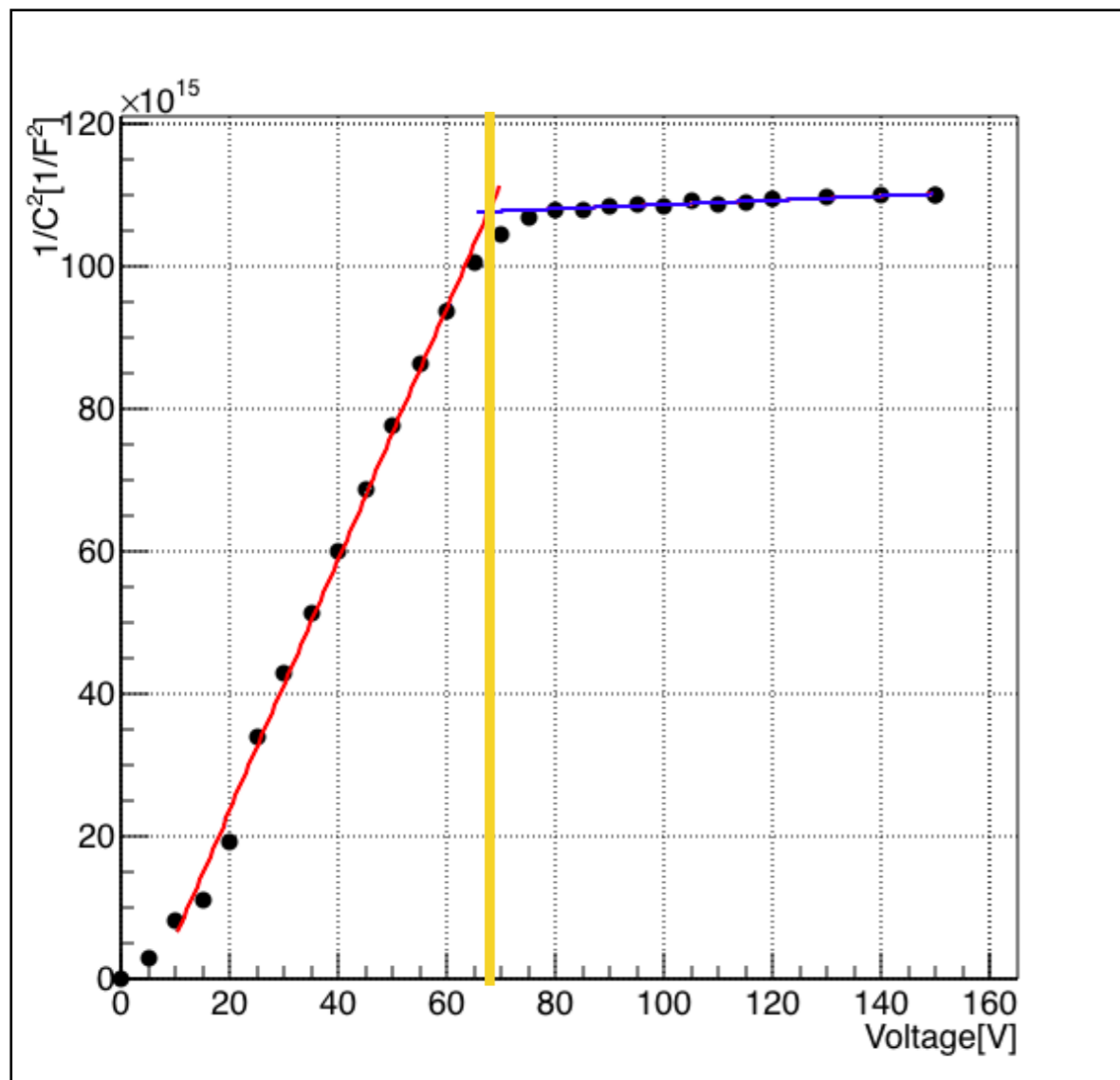
C total : 3040 pF (ともに100 Vにおいて)



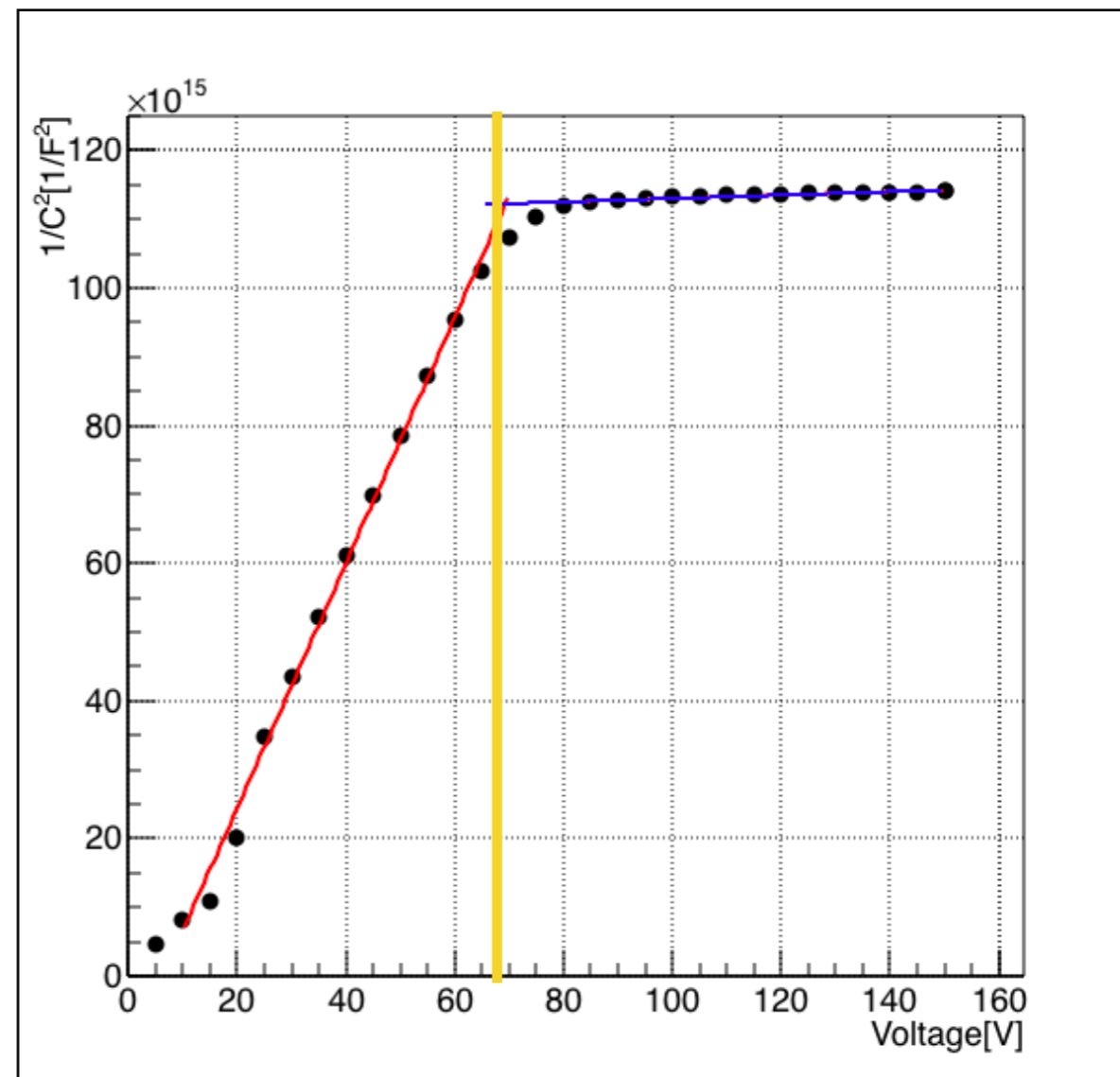
センサー出荷時の測定結果が再現されている
異常な挙動を示すセンサーはなかった

Full depletion voltage

Kyushu



HPK

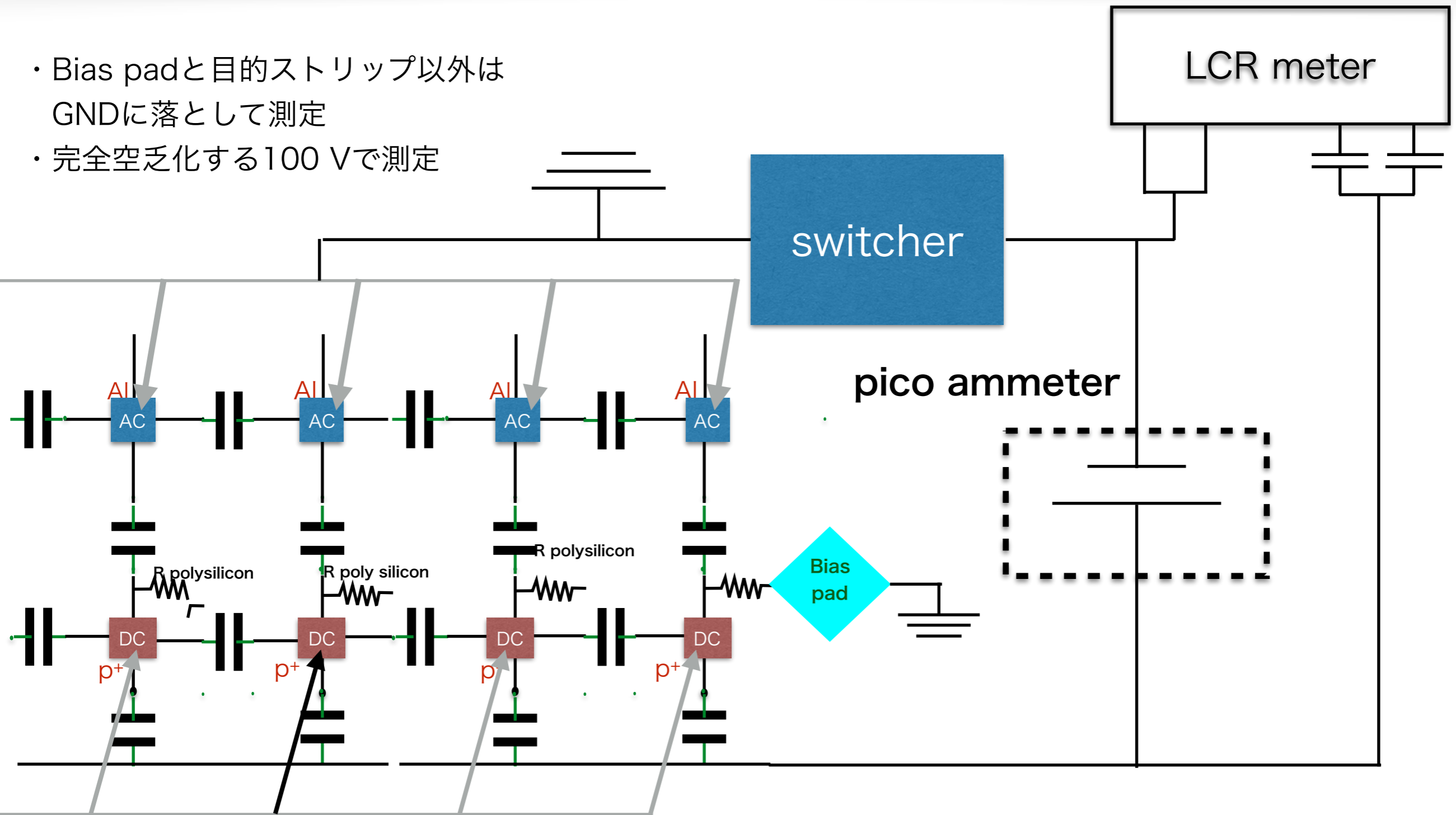


FDVはともに68 Vで一致している

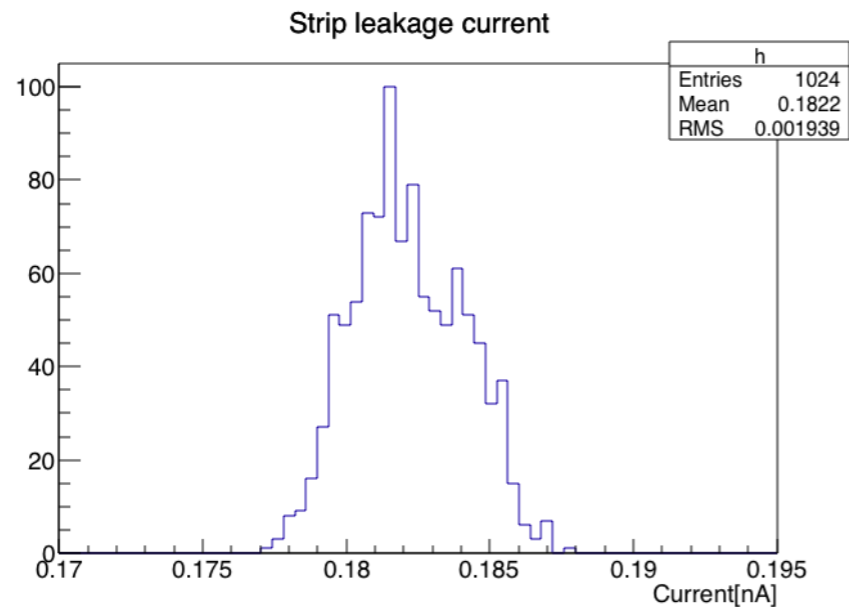
I-V total、C total、FDV測定においてHPKの結果と一致し異常なセンサーは見つからなかった
→ 単プローブでの測定に問題はなく、センサーも正常に動作している

Full strip scan

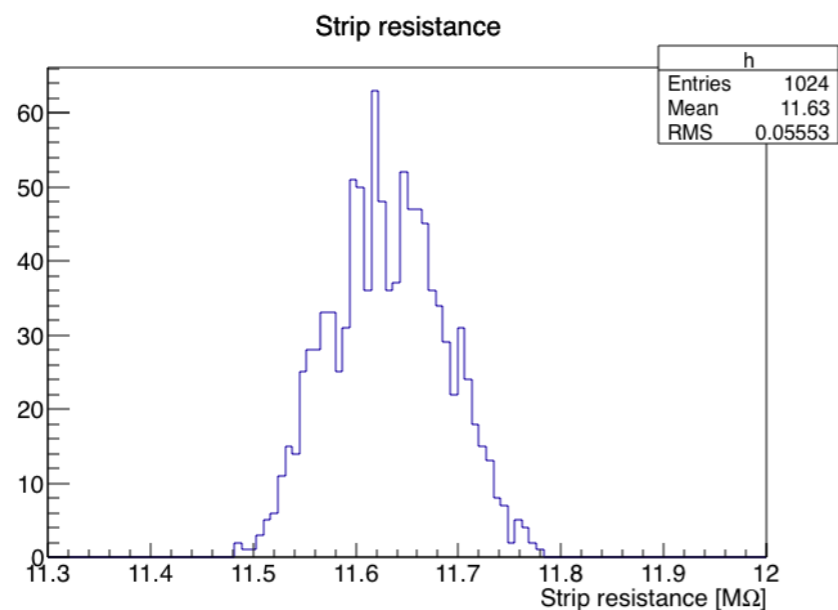
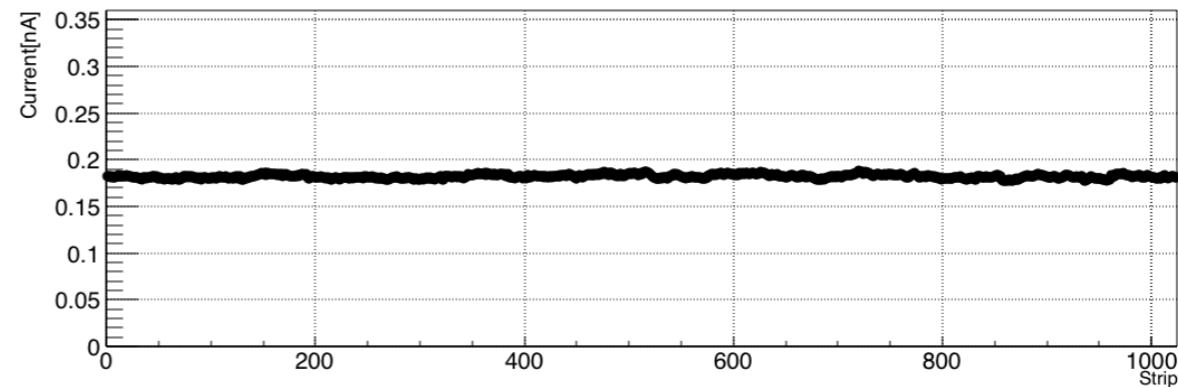
- Bias padと目的ストリップ以外はGNDに落として測定
- 完全空乏化する100 Vで測定



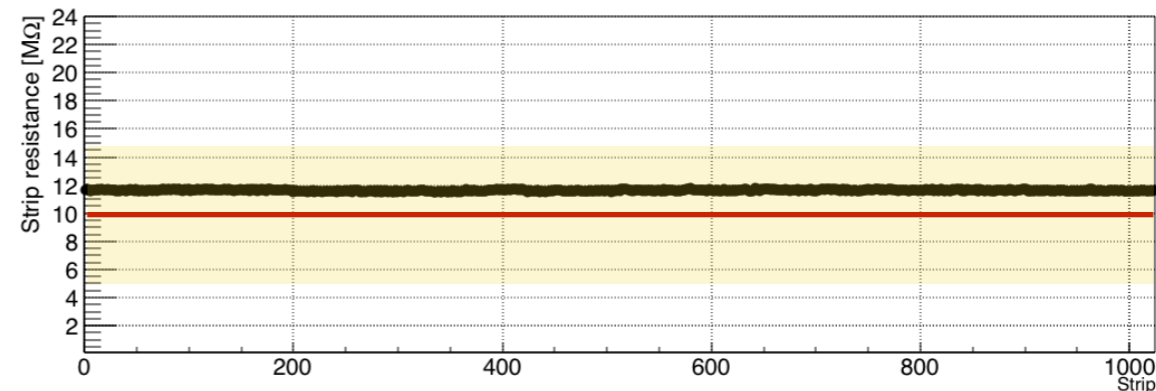
Full strip scan



単プローブによる測定値
平均値 : 0.181 [nA]

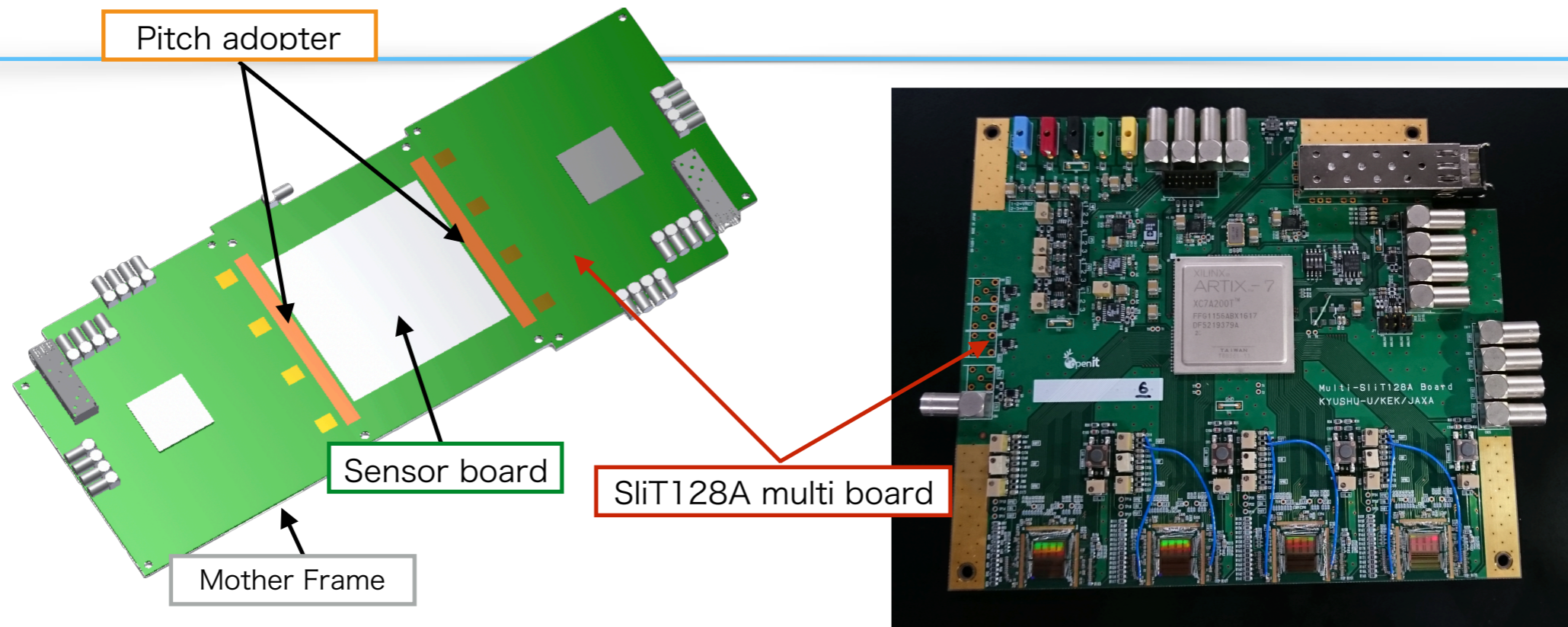


• Strip resistance設計値
→ $10 \pm 5 \text{ M}\Omega$
• 単プローブによる測定値
平均値 : 11.7 MΩ

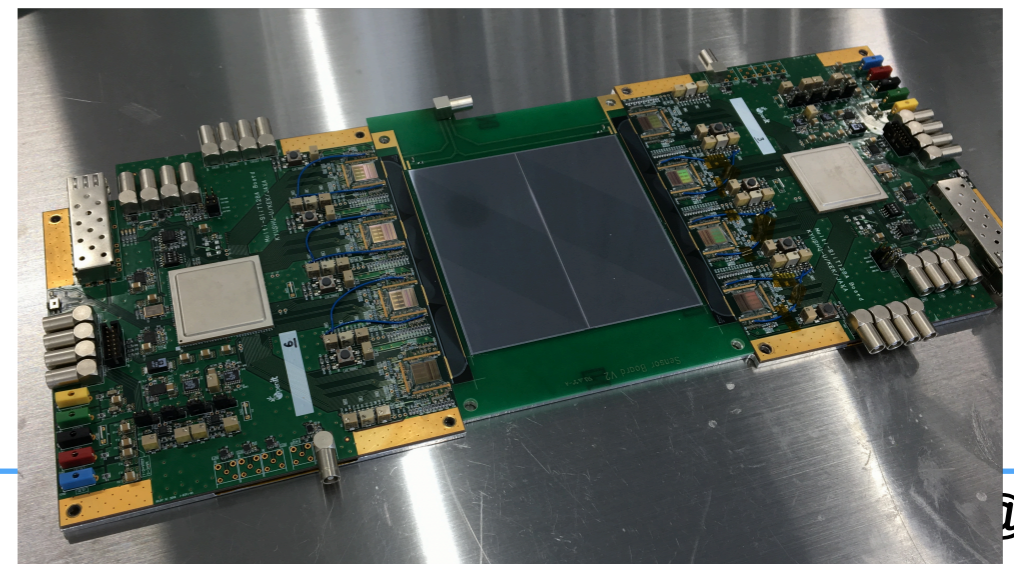
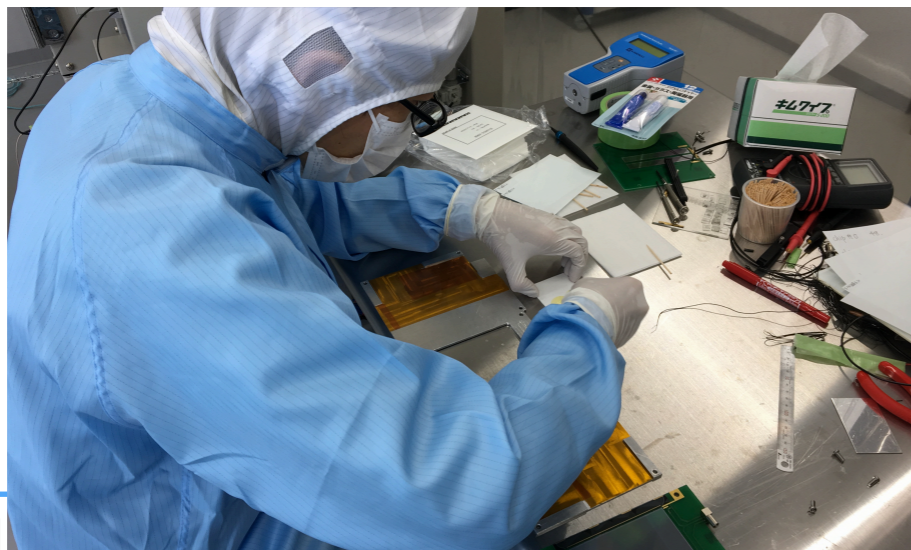


- 単プローブによる測定と総ストリップ測定で consistentな結果が得られている
→ 総ストリップ検査システムの構築ができた

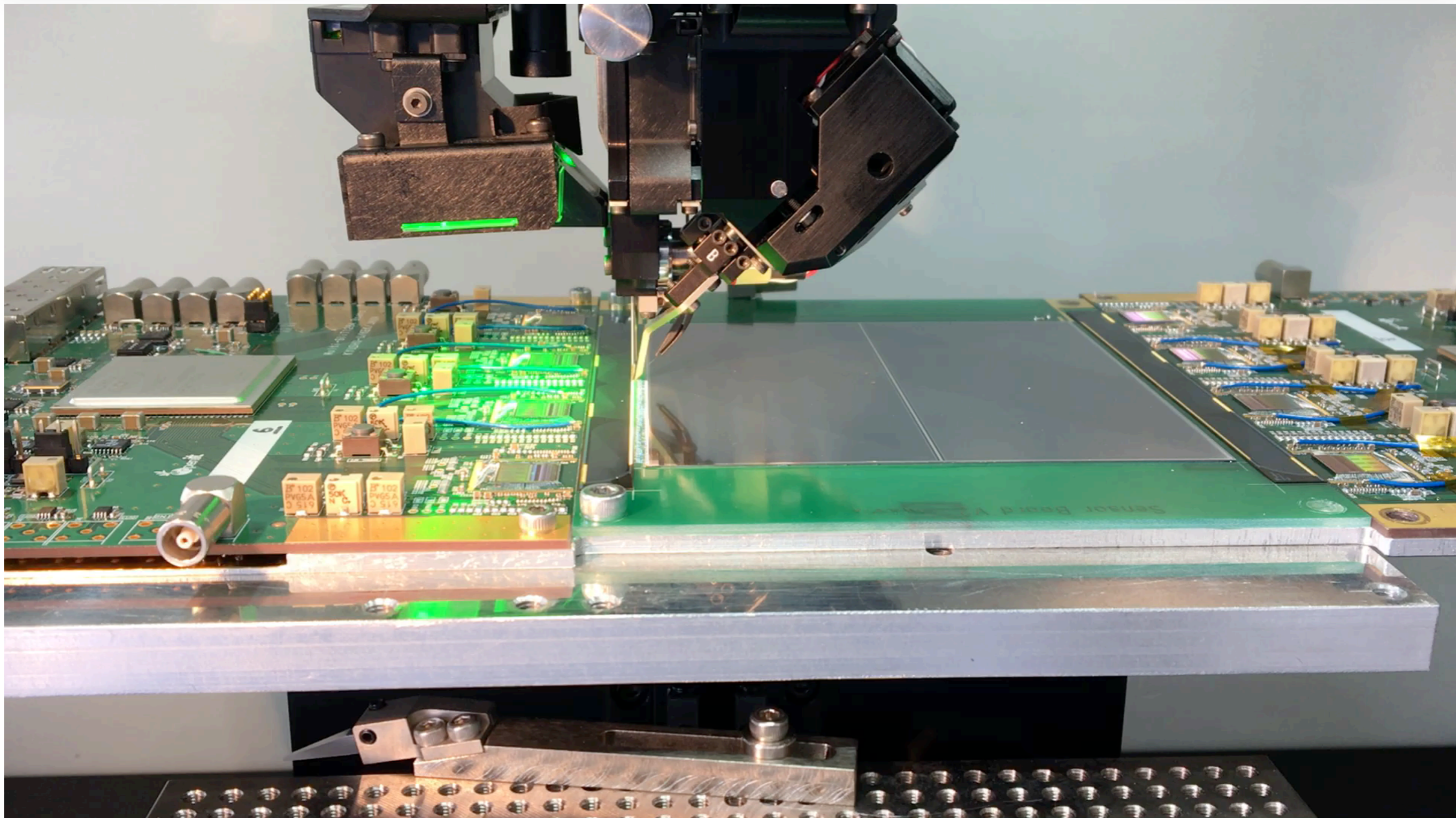
センサー接続(センサー + ASIC)



- ◆ Sensor boardにシリコンセンサーとPitch adopterを接着剤で貼り付け
- ◆ SliT128A multi boardにはASICを4枚ずつ導電性ペーストで貼り付け
- ◆ それぞれをMother frameに接着剤で貼り付けし、ワイヤボンディングをしてセンサーとASICを接続



センサー接続(ワイヤボンディング)



DAQシステム開発

DAQ-Middleware (<http://daqmw.kek.jp/>)

◆RT(robot technology) Middleware を使用した汎用のDAQ software framework

◆“DAQ コンポーネント”単位でシステムを構築する

→ 限られたマンパワーでも開発可能

◆ネットワーク分散が簡単にできる

→ ビーム試験からg-2/EDM 実験への拡張が可能

• 豊富な使用実績

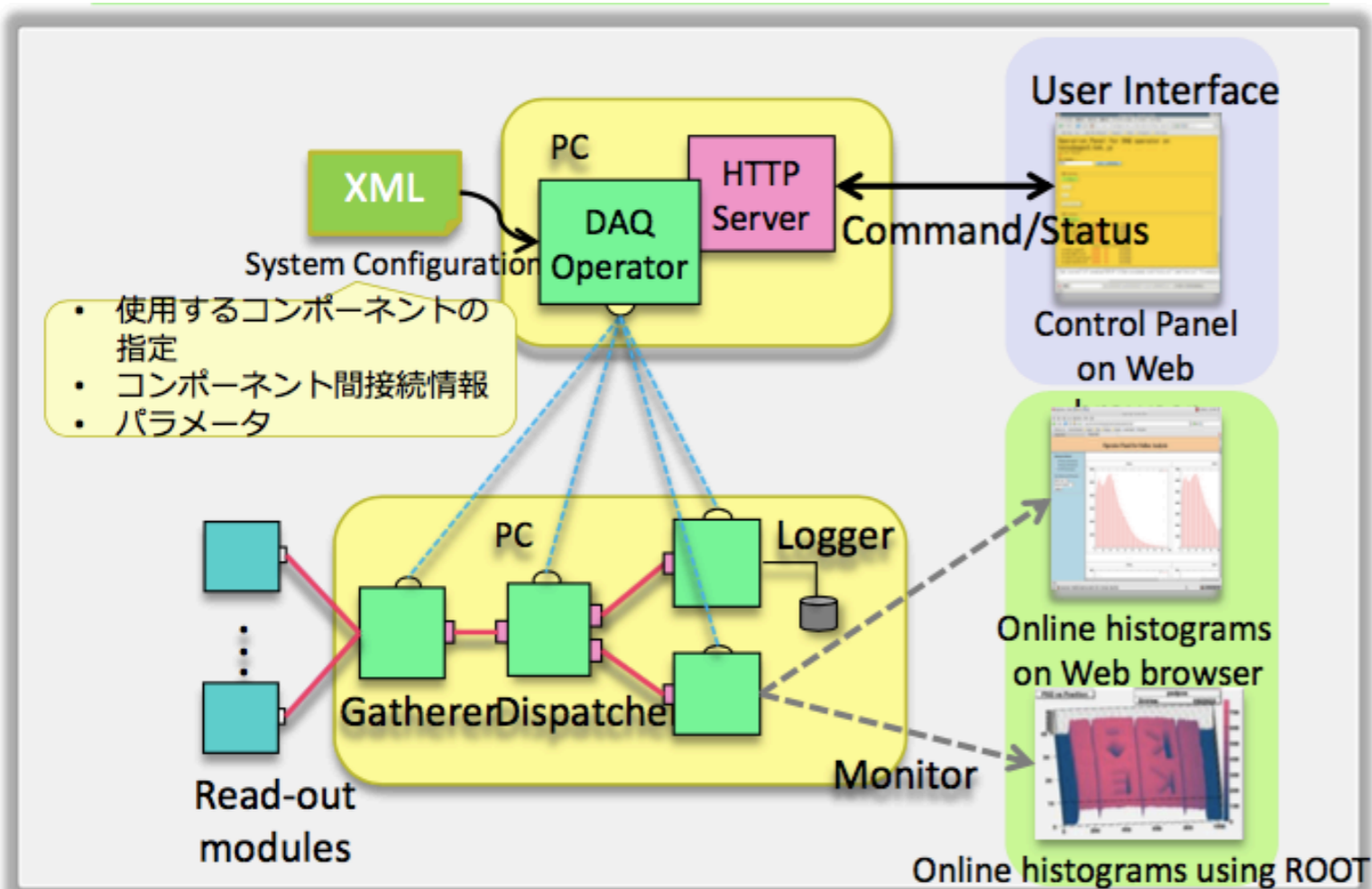
– J-PARC MLF

– J-PARC Hadron E16

– CANDLES

–

• 充実したサポート体制



**DAQ-Middleware をベースに
DAQ システムを構築していく**

DAQシステムの開発方針

- ◆ **ビーム試験に向けて、小さなDAQシステムを構築する。**
 - 実践を踏みながら、徐々に拡張して、g-2/EDM実験用DAQシステムを構築していく
- ◆ **DAQシステムを大きくした時の懸案事項を別途、試験する**

1. ビーム試験用DAQシステム

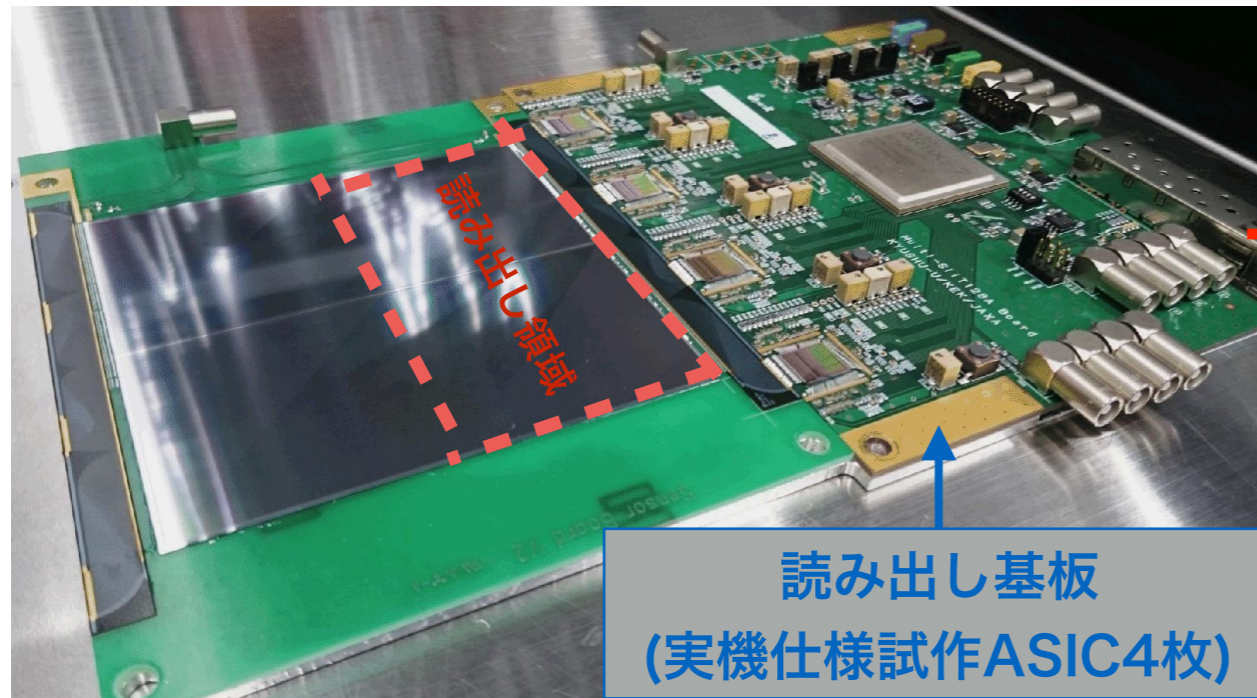
- システムの構築
- ビーム試験での運転結果

2. g-2/EDM 実験用DAQ システム

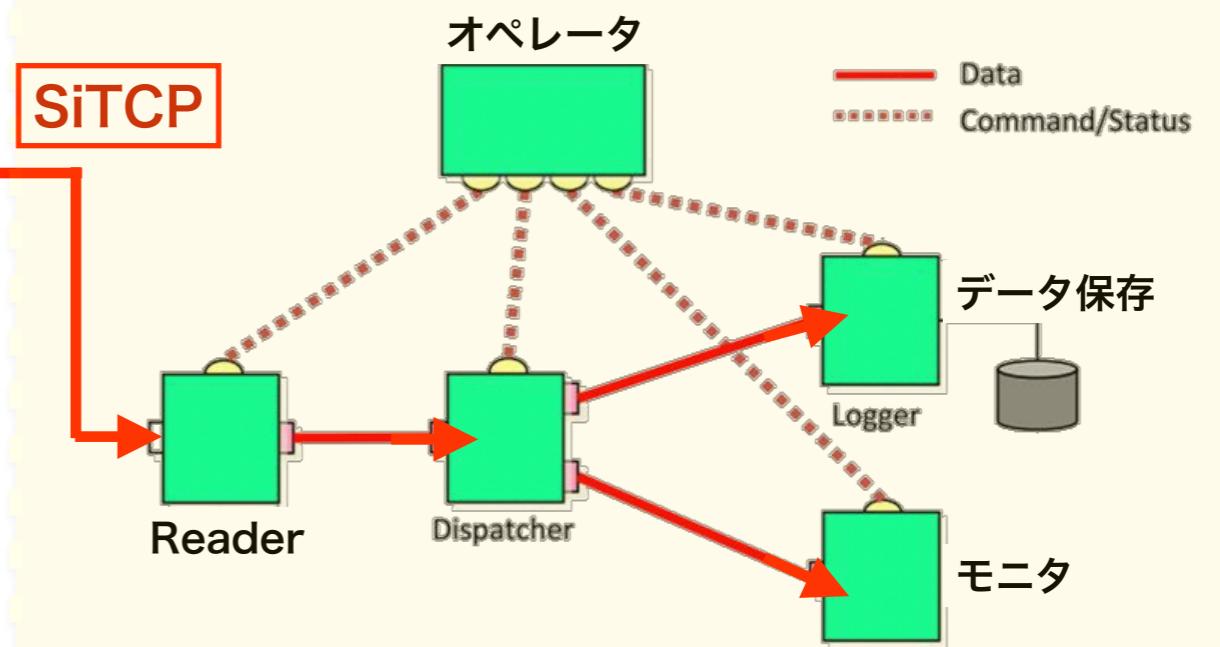
- 要求
- DAQ 試験(HDDの書き込み速度)

3. まとめ

ミュオンビームを用いたビーム試験(1回目)



DAQ Middleware モジュール構成図

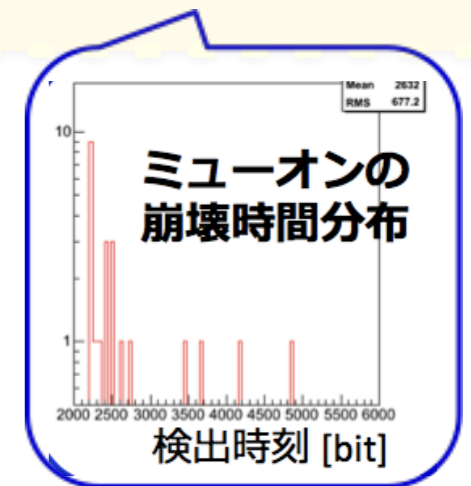


- ◆ 基本的なDAQシステムの動作を確認
 - データ保存、モニタ

◆ 課題

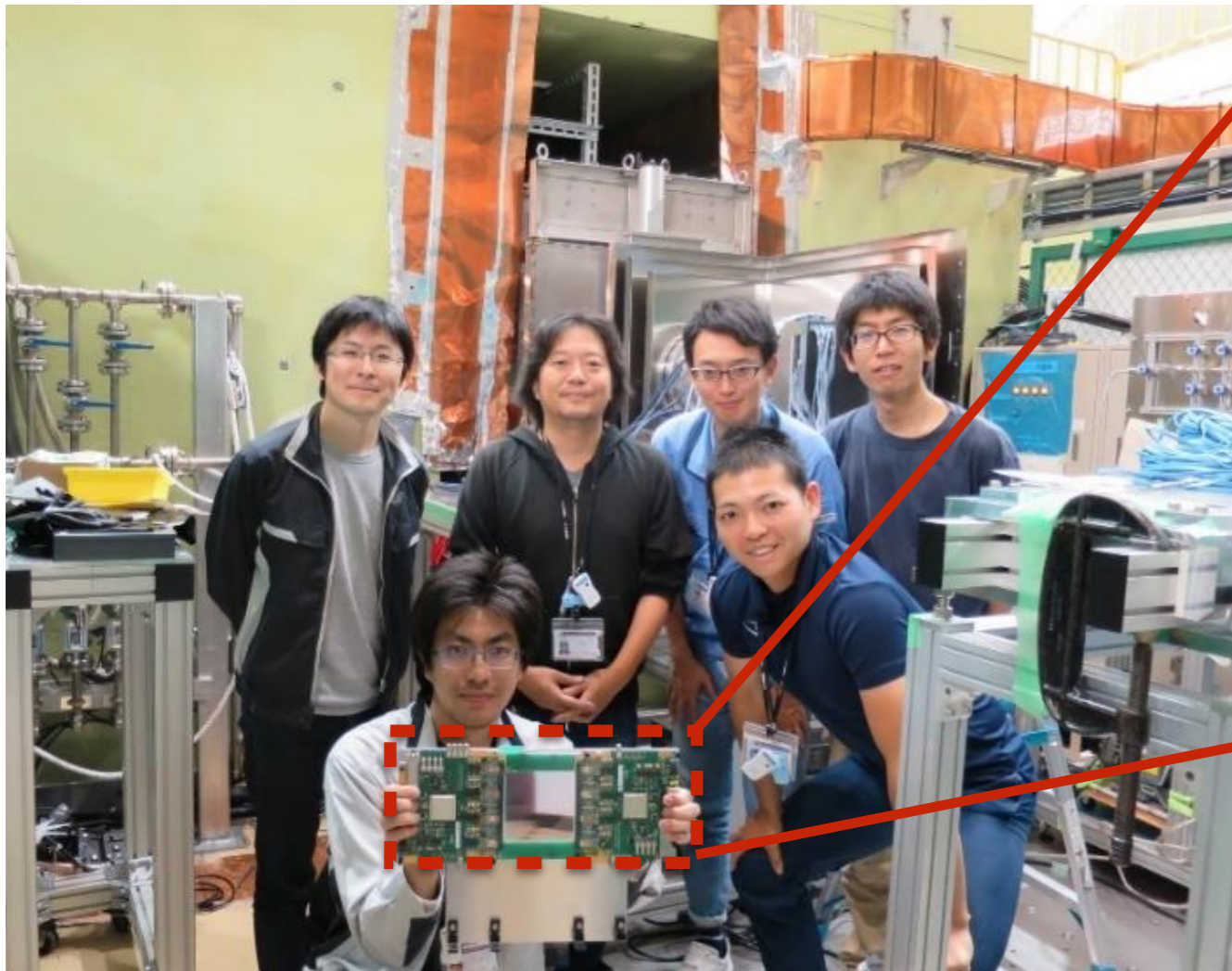
数分~数十分でDAQ が止まることが頻発した。

- DAQ PC の性能不足。
- 評価試験用FPGAfirmwareは、ビーム試験には使いづらい。



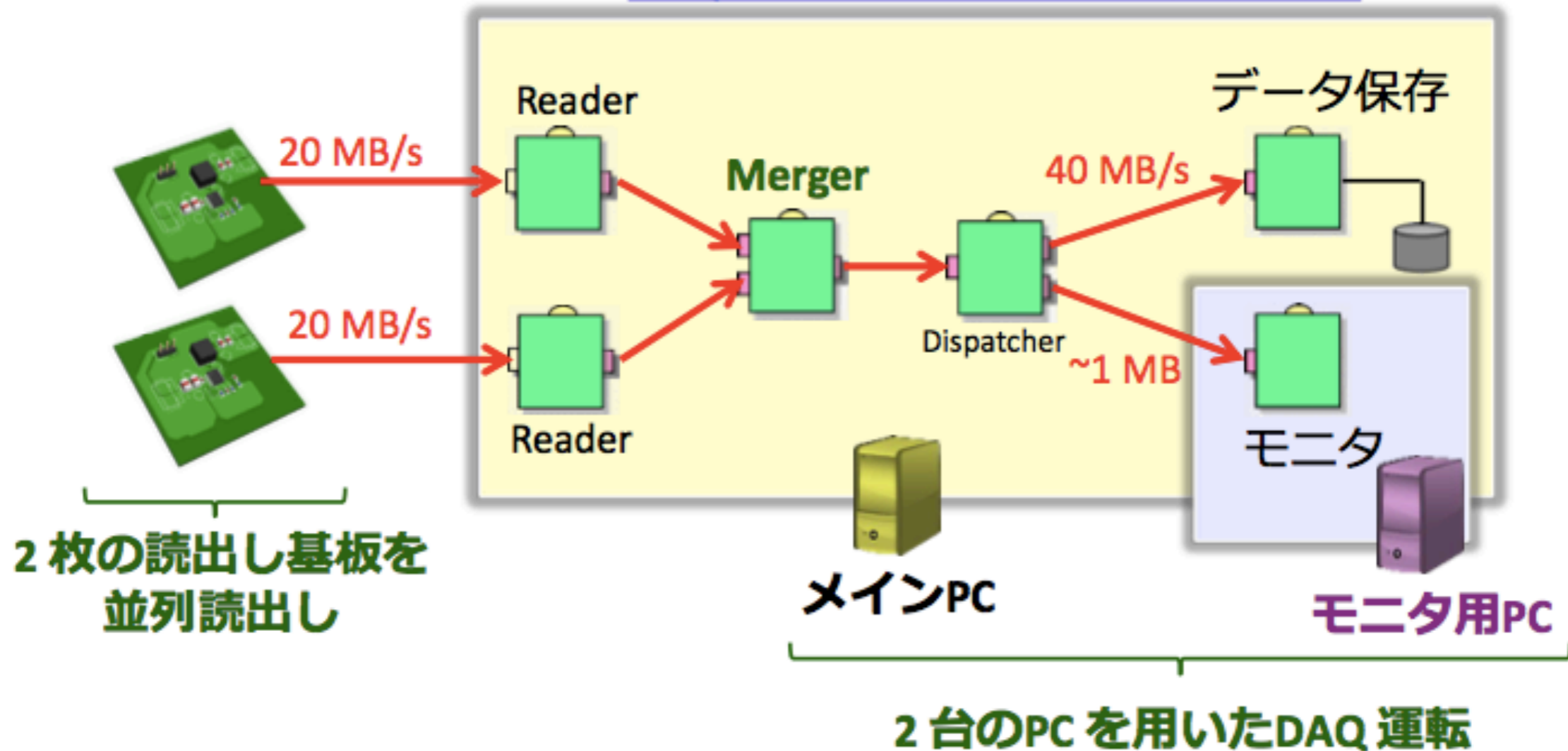
ミュオンビームを用いたビーム試験(2回目)

- ◆ 読み出し基板(2枚)とDAQ PC(2台)で**センサー全面を読み出し**
 - DAQ PCを新調
 - “実験用” FPGA firmwareを準備



ミュオンビームを用いたビーム試験(2回目)

DAQ-Middleware モジュール構成図

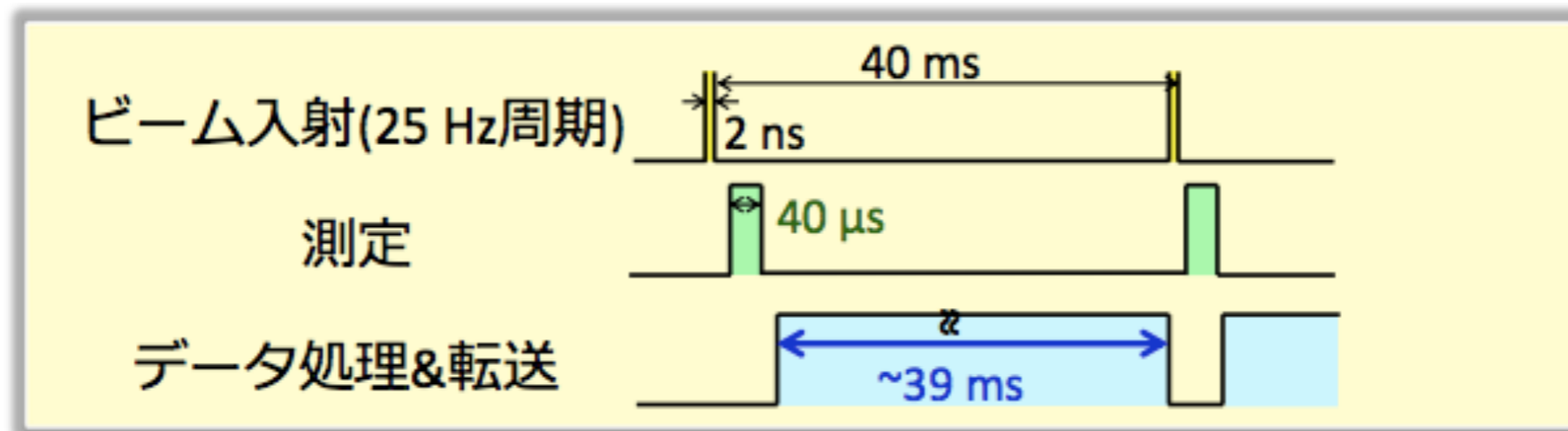


40 MB/sのデータ収集レートにおいて安定した運転を実現！

- エラーは数時間に一度程度
- 並列して行っていたデータ圧縮・転送処理が主な原因

J-PARC muon g-2/EDM実験用DAQシステムへの要求

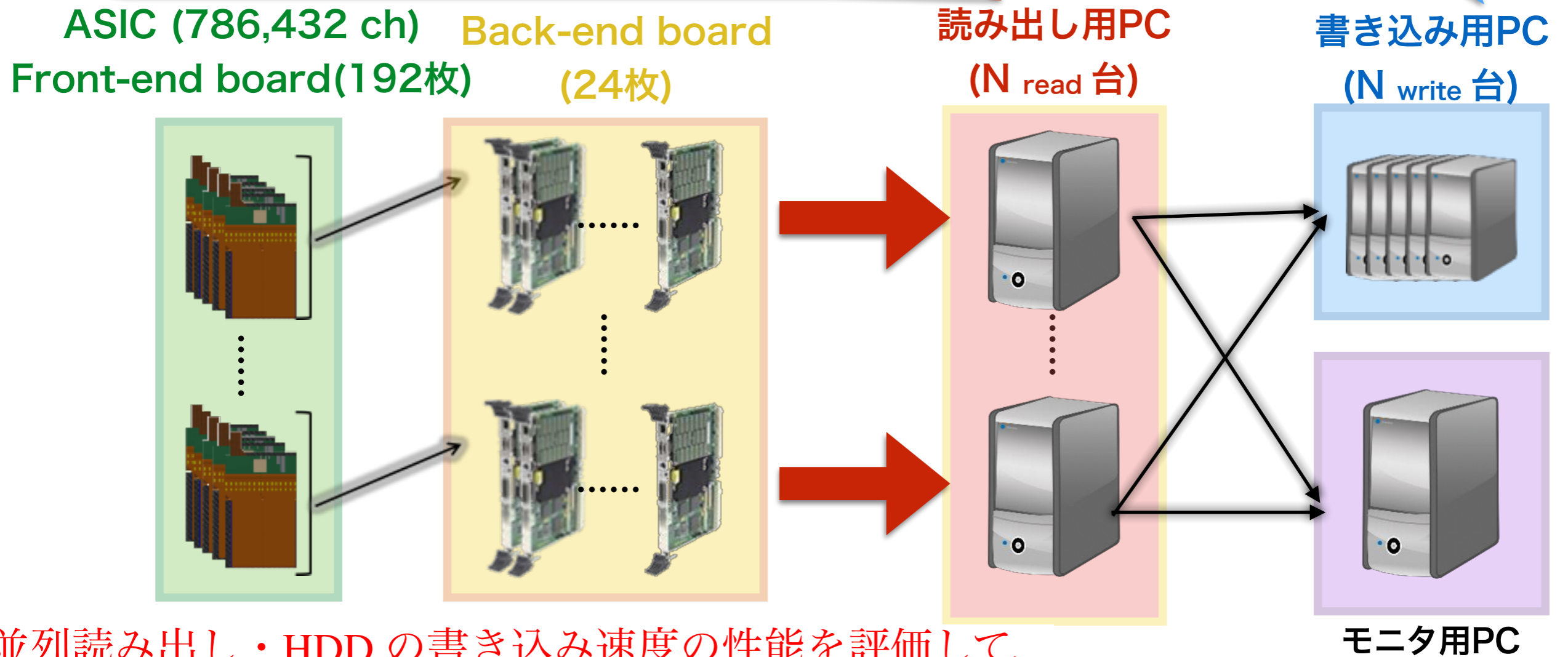
データ収集のサイクル



- ◆ 全てのデータを保存するため特殊なトリガーはなし
- ◆ 大容量のデータを出すのはシリコンストリップ検出器のみ
 - ー ビームモニタ等がDAQシステムに加わる可能性があるが、データ量は対して大きくない
- ◆ 一部のデータをモニタ用にサンプリングし、検出器の運転状況を確認する
- ◆ **予想データレートは440 MB/s**
 - ー $(2.2 \text{ Mhit /spil}) \times (8 \text{ bytes/hit}) \times 25 \text{ Hz}$
 - ー 1 spil 当たり40,000 ミューオン

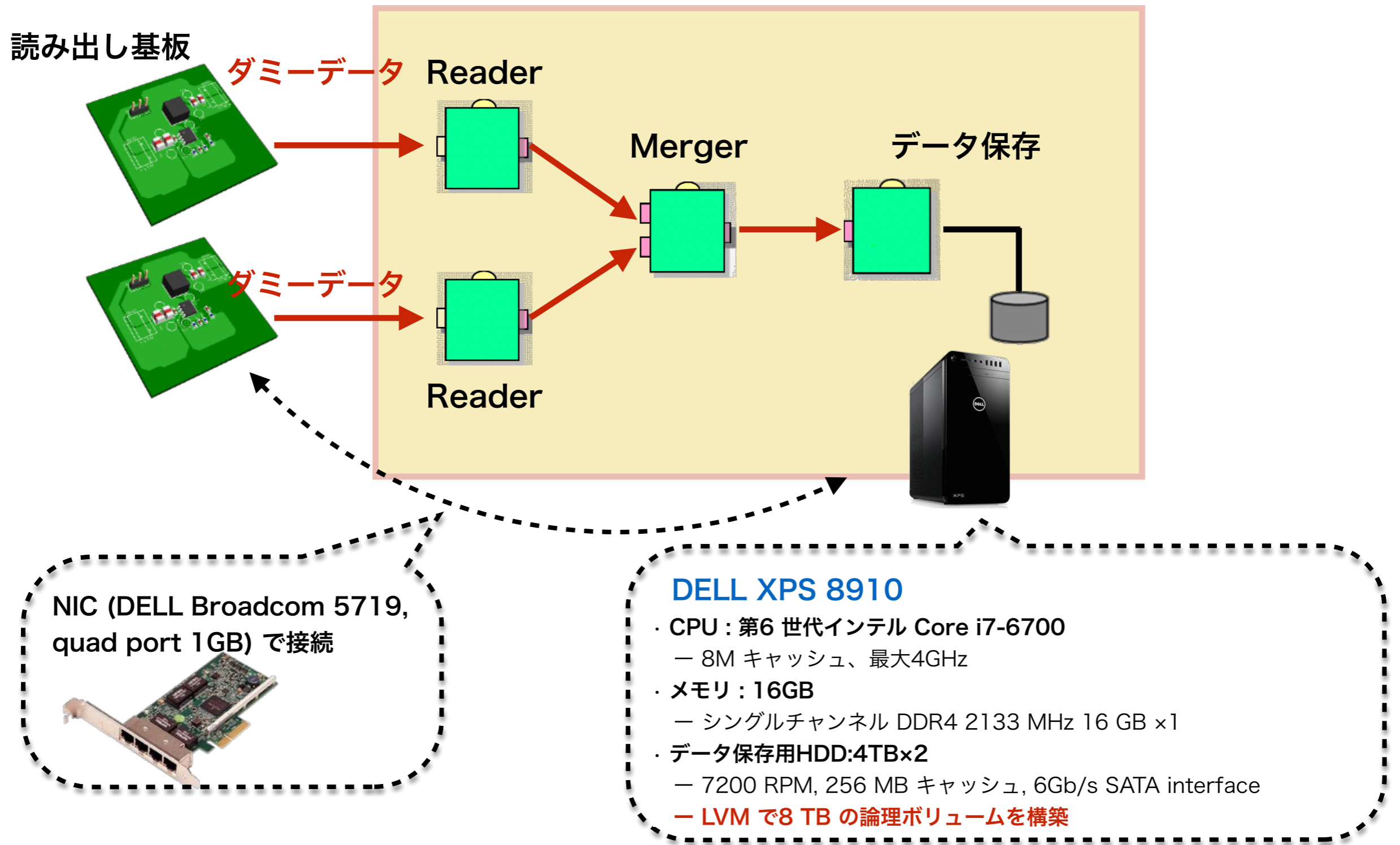
J-PARC muon g-2/EDM実験用DAQシステムのデータフロー

- ◆ 複数のback-end boardから読み出し
- ◆ データを1つにまとめて書き込み用PCへ送る
- ◆ 一部のデータはモニタ用PCに送る



DAQ試験(データ書き込み速度)のセットアップ

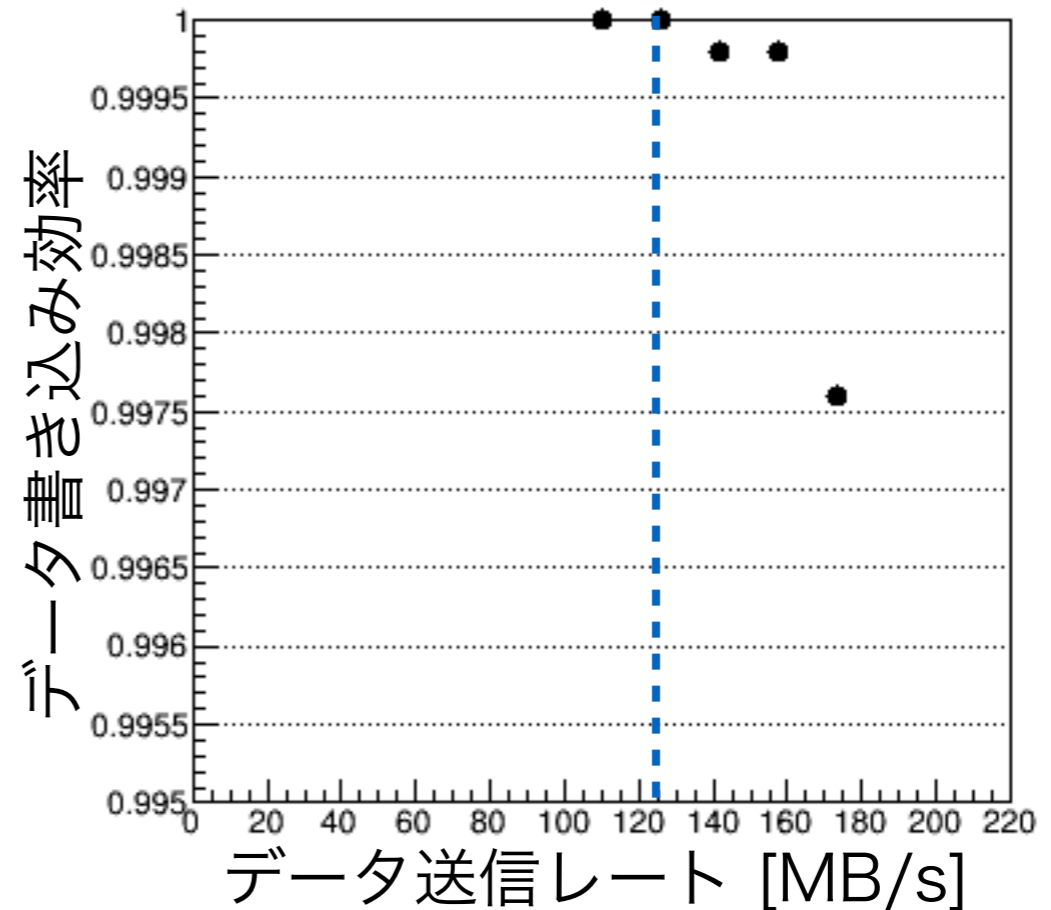
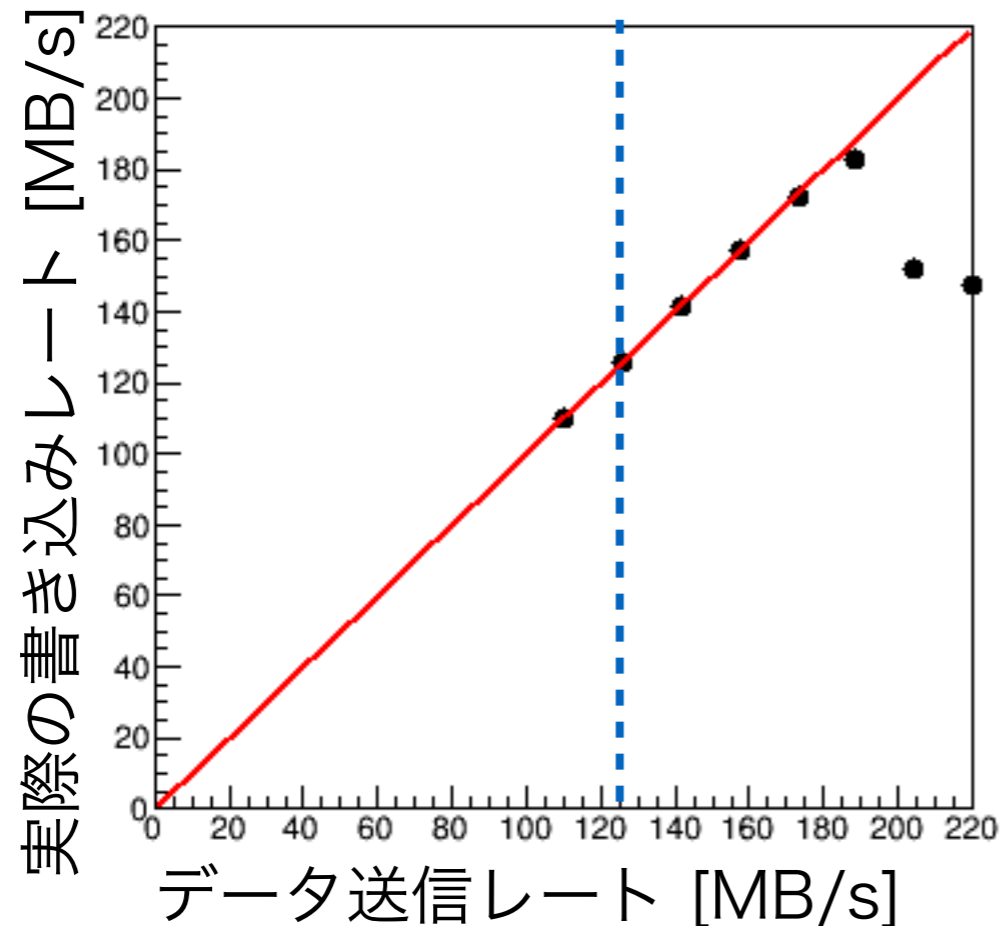
DAQ Middleware モジュール構成図



データ書き込み速度

読み出し基板のトリガーレートを変えながら、データ書き込み速度を測定

- 各点で50 GBのダミーデータを書き込み



- ◆ 120 MB/sまではデータロスなく書き込みできている
 - ◆ 120 MB/sで12時間運転して書き込み失敗していないことを確認
- **データ書き込み用のPCは最低4台必要!**

— g-2実験のレート : 440 MB/s

まとめ

- ◆ 読み出しASIC、Silicon strip sensorの性能評価、DAQシステムの開発等、各領域での研究・開発が進行中である
- ◆ ASICのシミュレーションではTime Walk以外は要求値を満たすような結果になっている
 - ー RC微分回路を用いた次期TEGを開発し、性能評価を行う
- ◆ センサーの性能評価を行い、総ストリップ検査での品質保障システムの開発も進行中である
 - ー 今後はさらに詳細な検査を行い、品質保証基準を設ける
- ◆ ASICとセンサーを接続した”検出器”の開発を行った
- ◆ ビーム試験用のDAQシステムを構築した
 - ー 2度のビーム試験で基本的なDAQの動作を確認した
 - ー g-2/EDM実験用DAQシステムを検討するためにHDDへの書き込み速度の測定を行い本実験に向けたシステムの開発が進行中である

BACK UP

センサー検査項目

検査項目	測定内容・目的	プローブ場所
目視検査	目視によるセンサーの傷等の検査	
I-V total	IV測定・breakdown voltage検査	Bias pad
C total	検出器容量の計算の計算	Bias pad
Full depletion voltage (FDV)	完全空乏化電圧の測定・確認	Bias pad
Strip leakage current	ストリップに流れる電流・断線等の検査	Bias pad、DC pad
Strip resistance	ポリシリコン抵抗値測定	Bias pad、DC pad
Strip capacitance	ストリップ容量測定	Bias pad、AC pad
C interstrip	ストリップ間容量測定・検出器容量の計算 (検出器容量 = $C_{total}/strip + 2 \times C_{interstrip}$)	Bias pad、AC pad
C coupling	Al strip - p+ strip間の容量測定・絶縁層不良検査	Bias pad、AC, DC pad

— 単プローブ測定

— 総ストリップ測定

単プローブ測定

センサー裏面からHVを印加する
Bias padをプローブしバルクの容量を測定する



LCR meter



pico ammeter