

J-PARC muon g-2/EDM 実験における シリコンストリップ検出器の実機製作に向けた 開発状況

佐藤 優太郎

KEK

2018/10/31

Flavor Physics Workshop @IPMU

ミュオン磁気・電気双極子能率

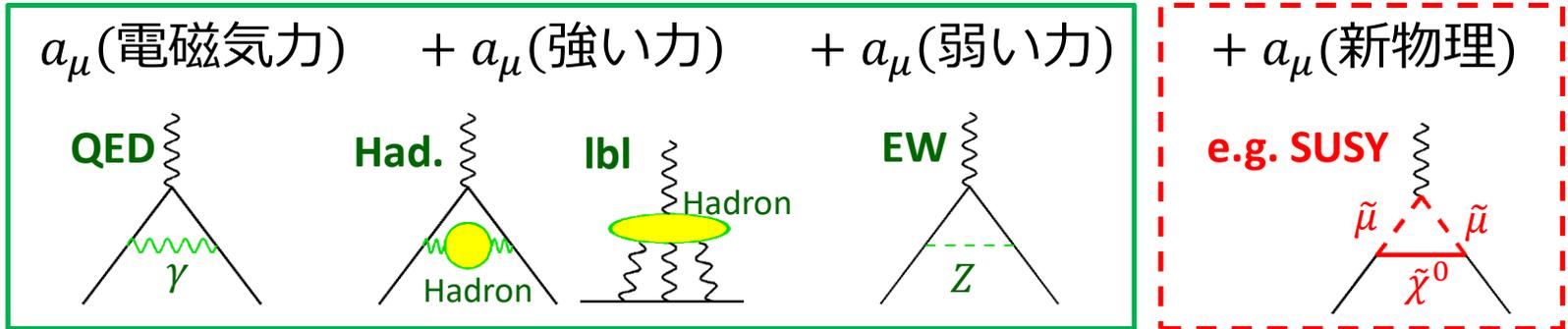
異常磁気能率 $a_\mu = (g - 2)/2$

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

- Dirac 方程式の最低次では、 $g = 2$ 。
- 実際は量子補正で2からわずかにずれる。
- 2からのずれを**異常磁気モーメント a_μ** と呼ぶ。

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

$$a_\mu = a_\mu(\text{電磁気力}) + a_\mu(\text{強い力}) + a_\mu(\text{弱い力}) + a_\mu(\text{新物理})$$

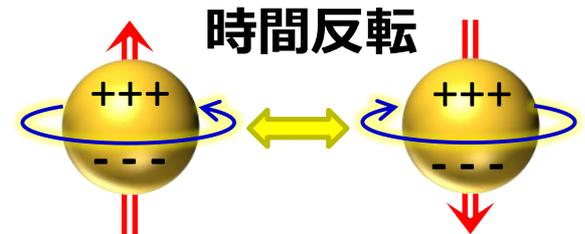


- BNL E821 実験と標準理論の計算値の間に3 σ 以上のずれ \rightarrow **新物理の兆候?**
 - Belle II による標準理論計算値の精度向上に期待(\rightarrow 前田さんのトーク)。

電気双極子能率(EDM)

$$\vec{d}_\mu = \eta \left(\frac{e}{2mc} \right) \vec{s}$$

- 時間反転対称性を破る。CPT 定理を仮定すると、CP 対称性を破れと同値。
- 標準理論では強く抑制されており、0でないEDMは新物理の証拠となる。

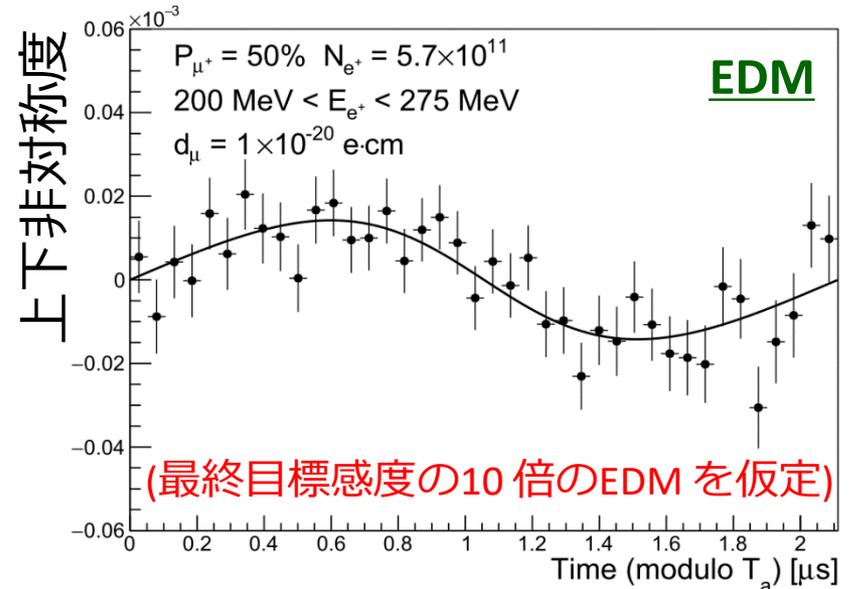
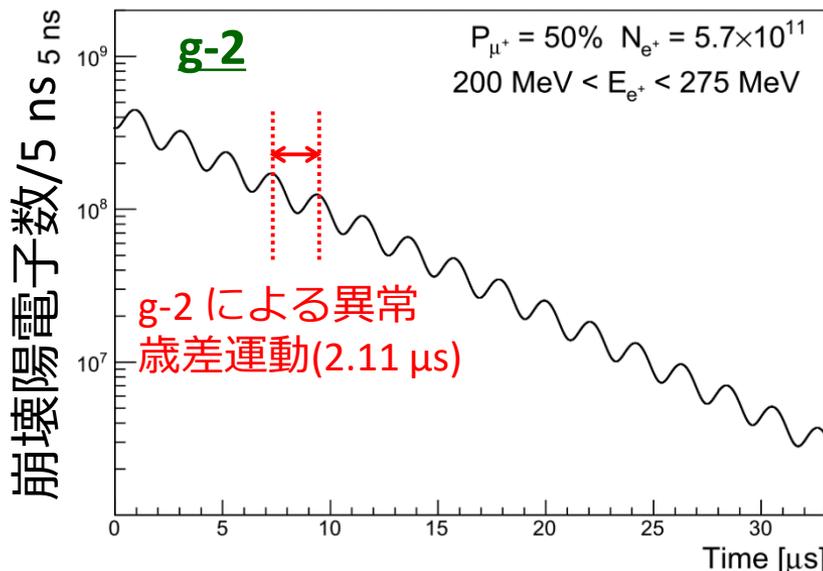
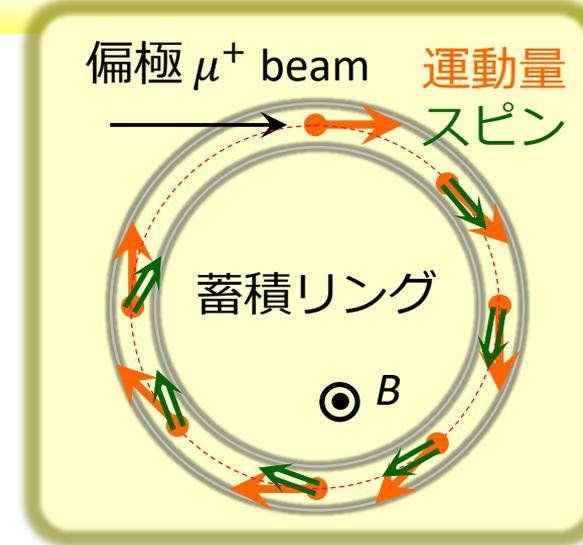


muon g-2/ EDM の測定原理

“ある条件の下での” 異常歳差運動

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

- ミューオン崩壊($\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu}$)ではミューオンのスピンの向きに陽電子が出やすい。
 - 高運動量の陽電子を検出することで、スピンの向きと運動方向の差の情報が得られる。
 - EDM は磁場の向きに対して上下非対称度を生じさせる。



精密なg-2測定 = 「振動の周波数」と「磁場」の精密測定

測定アプローチ

異常歳差運動

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

$g-2$
EDM

第二項を相殺する
2つのアプローチ

1. 魔法運動量

$$\gamma = 29.3 \quad (P = 3.09 \text{ GeV}/c)$$

2. Zero E-field

$$E = 0 \text{ at any } \gamma$$

BNL E821 (先行実験)

& FNAL E989 (後継実験)

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

➤ FNAL E989 の実験が進行中。

J-PARC E34 (新手法)

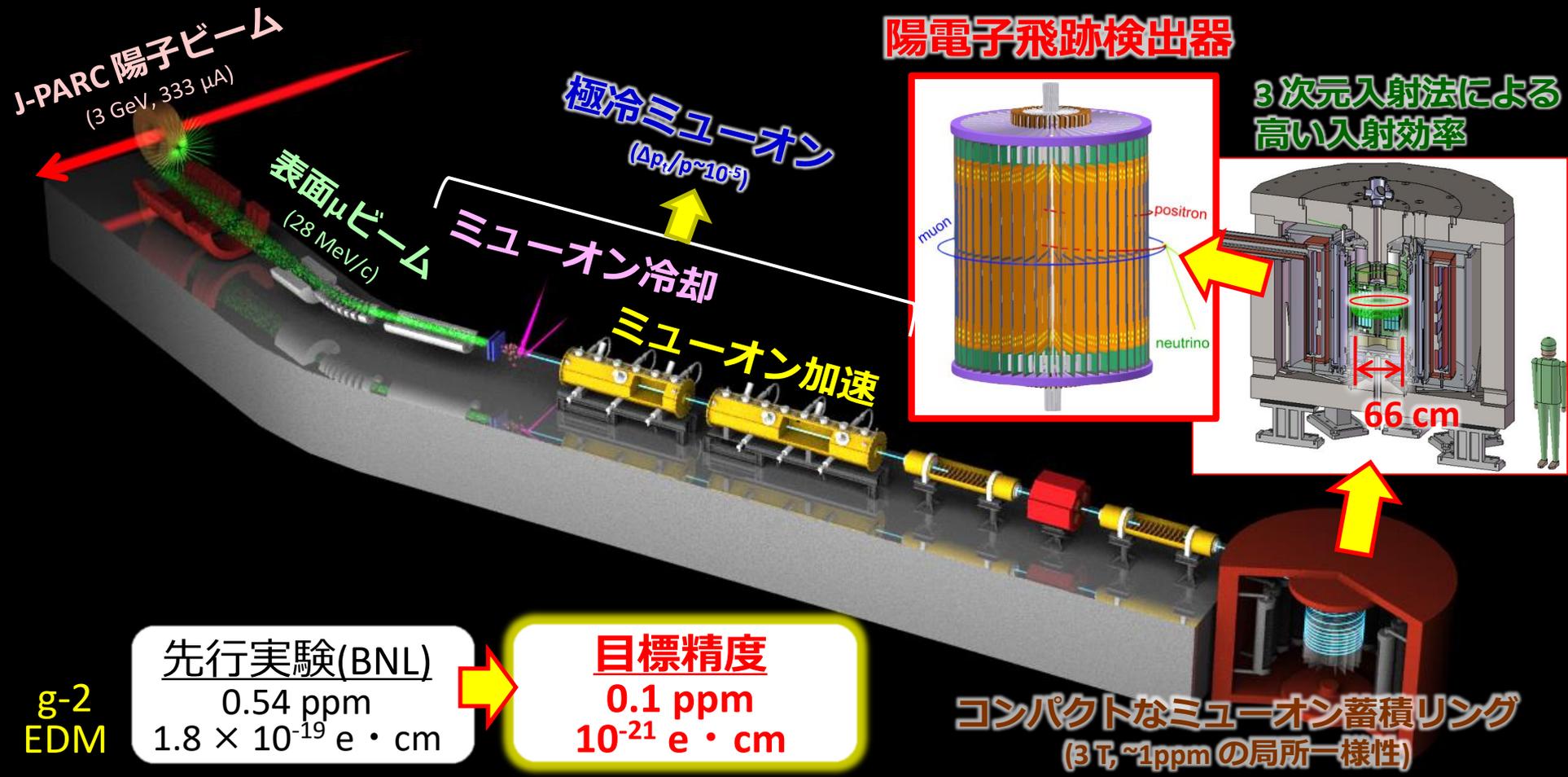
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

- BNL/FNAL の実験とは全く異なる手法による測定。

	BNL/FNAL		J-PARC
ミューオン運動量	3.09 GeV/c	$\times 1/10 \rightarrow$	300 MeV/c
磁場	1.5 T	$\times 2 \rightarrow$	3 T
蓄積リング直径	14.2 m	$\times 1/20 \rightarrow$	66 cm
ビーム収束	収束電場		弱収束磁場
メイン検出器	カロリメータ		シリコン検出器

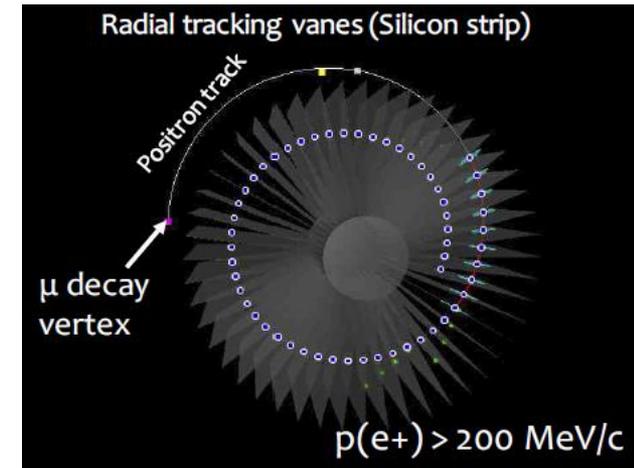
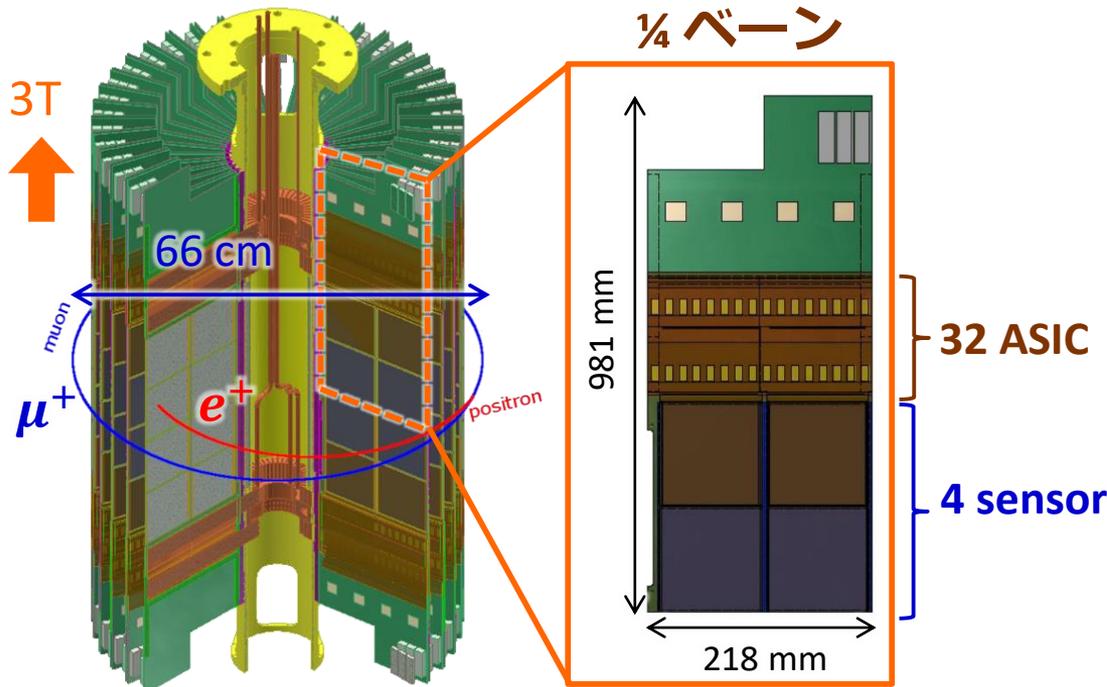
J-PARC muon g-2/EDM 実験

- ミューオンの異常磁気能率($g-2$) と電気双極子モーメント(EDM) を精密に測定し, 標準理論を超える物理を探索する。
- J-PARC の大強度パルスビームから生成する低エミッタンスミューオンビームを使用。



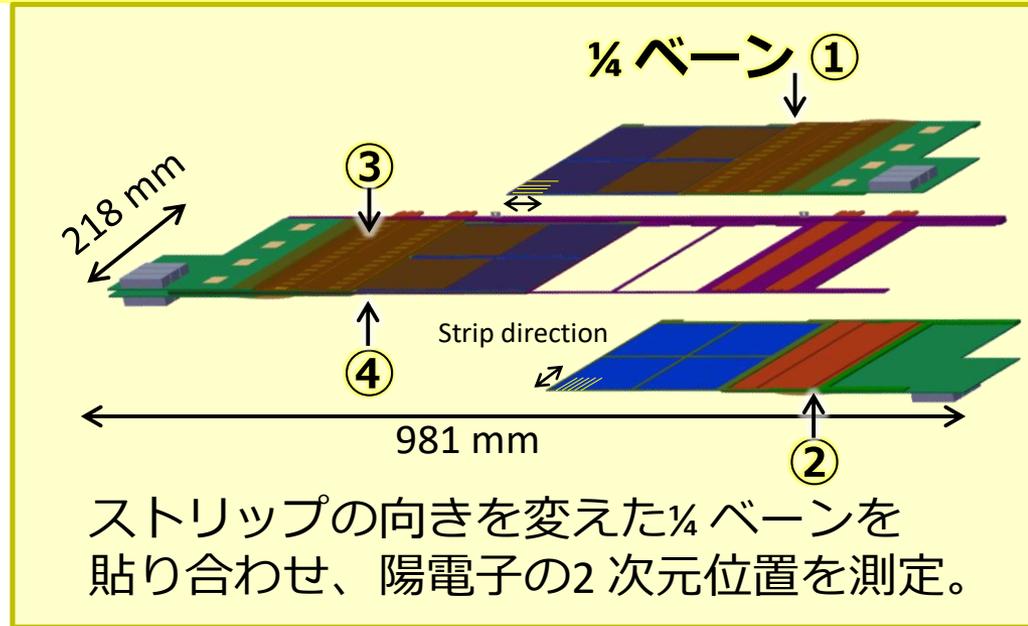
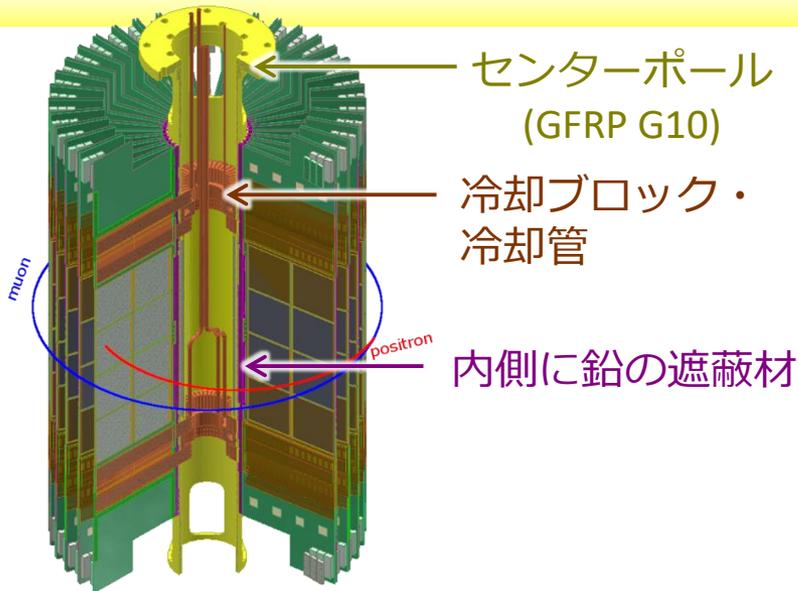
陽電子飛跡検出器

- シリコンストリップ検出器(ベーン) を放射状に配置して, ミューオン崩壊から生じる陽電子の崩壊時刻, 運動量, 放出角度を正確に測定。
- J-PARC の大強度パルスビームに対応。
 - Granularity(細分割性) の高さ・高速応答
 - 5 ns の間に最大30 個のミューオンが崩壊
 - 最大ヒットレート : 1.4 MHz/strip
 - ヒットレート変化に対する高い安定性
 - 150 倍のヒットレート変化@寿命5 周期分



- ベーン数 : 40
- センサー枚数 : 640 枚
- 総ストリップ数 : 655,360
- センサー総面積 : 6.24 m²
(有感領域 : 6.06 m²)

陽電子飛跡検出器の開発



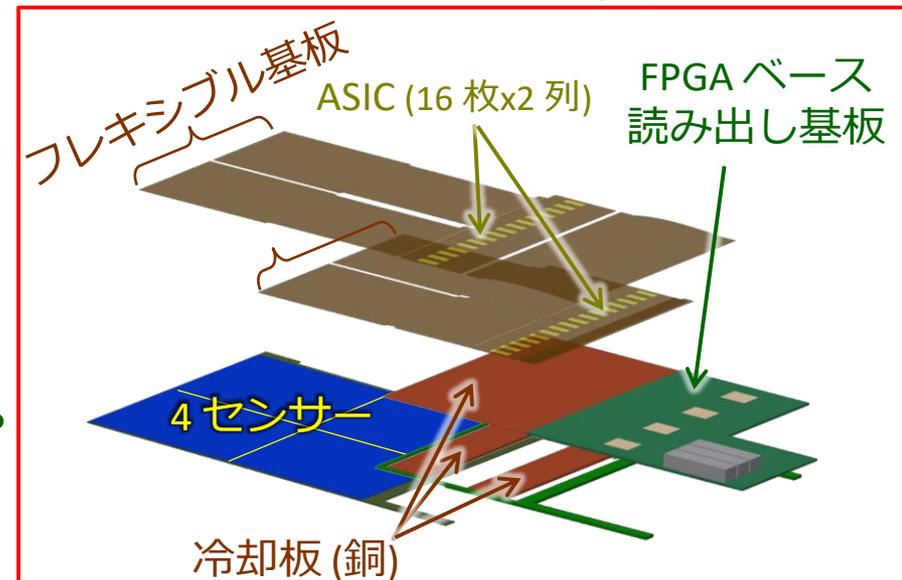
● 各パーツの開発が進み、 製作フェーズへ移行中。

- シリコンストリップセンサー
- 読み出しASIC
- フレキシブル基板
- FPGA ベース読み出し基板

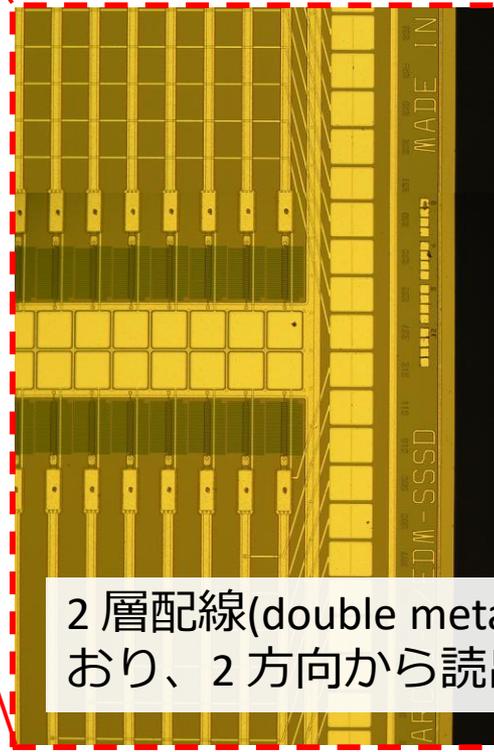
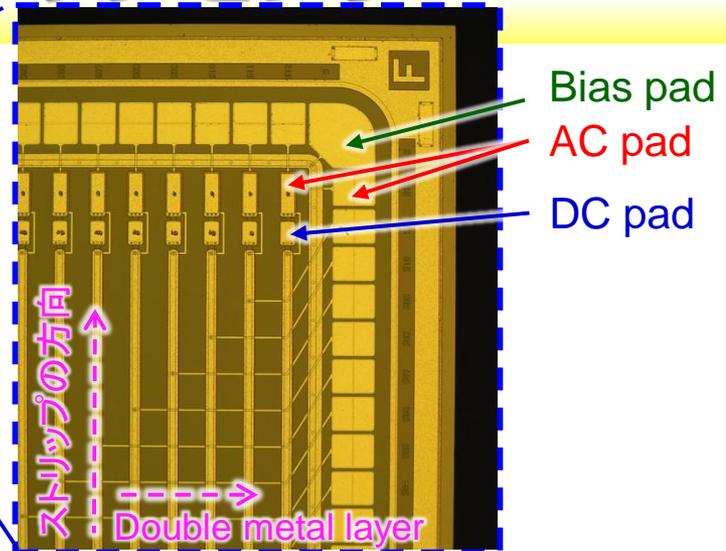
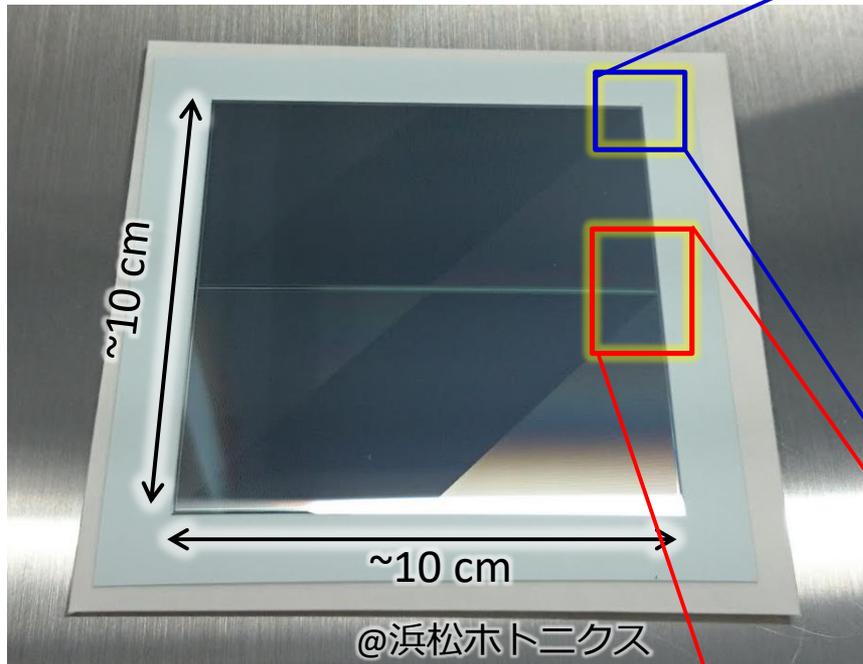
● 実機製作に向けて、構造設計・ 具体的な組み立て方法を検討している。

- 試験モジュールの製作
- 冷却システムの開発(→ 牛澤君poster)

1/4 ベーンの構造



実機シリコンストリップセンサー



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	320 μm
検出器容量	17 pF

2層配線(double metal layer)になっており、2方向から読み出し可能。

- 約190枚の実機センサーを製造済み。
 - 40 vanes には640枚のセンサーが必要。

読み出しASIC “Slit”

J-PARC muon g-2/EDM 実験専用の読み出しASIC “Slit” の開発。

読み出しASICの特徴

- 高ヒットレート耐性(立ち上がり時間 ~ 50 ns)
- ヒットレート変化(2桁)に対する高安定性
- 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(128 ch/chip)

読み出しASICの開発の歴史

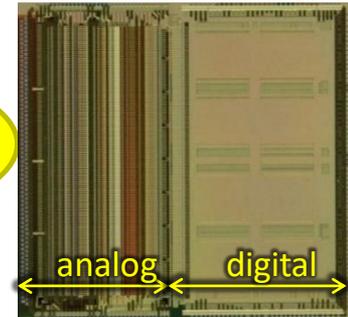
- “SlitA” (16 ch, アナログ回路のみ)
 - “SlitA2013” (64 ch, アナログ回路のみ)
 - “Slit128A” (128 ch, アナログ・デジタル混載回路)
 - 試験モジュールの組み立てに使用。
 - “Slit2017TEG” (64 ch, アナログ回路のみ)
 - 評価試験が終了して、最終版ASICのデザインへフィードバック。
- **最終版ASIC : “Slit128B”** (128 ch, アナログ・デジタル混載回路)
- レイアウトが完了。最終レビュー中。
 - 今年度中に製作予定。

アナログ回路の最適化。
チャンネル数の増加。

実機仕様

Time-walk, 立ち上がり時間の改善のために、微分回路を追加。
チップサイズを最適化

Slit128A



Slit2017TEG

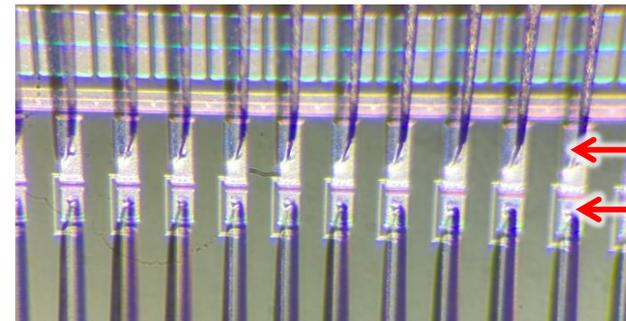
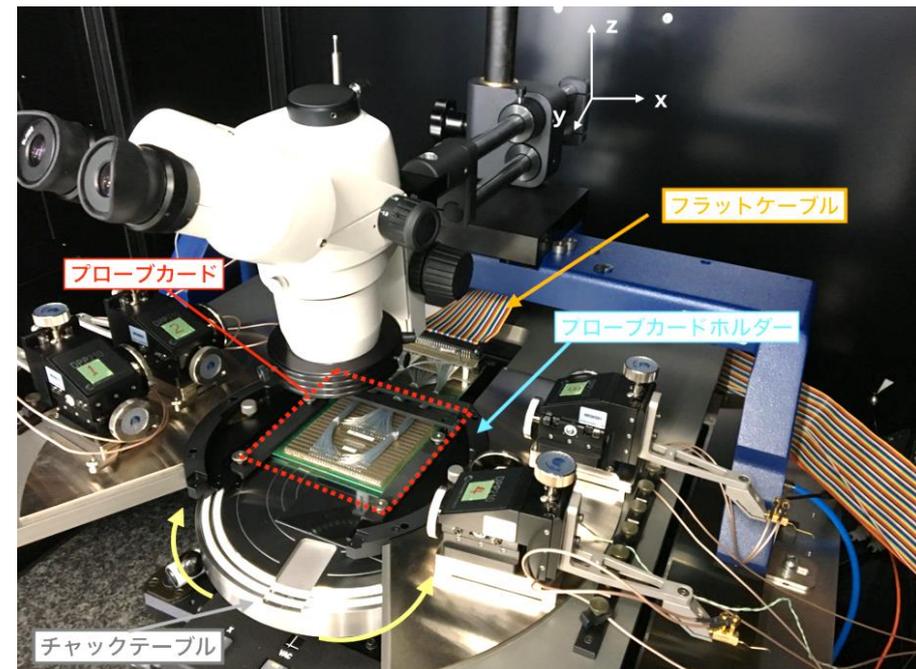


品質保証(QA) システム

実機ベーンの製作に向けて、センサー・ASIC の品質保証システムを開発中。

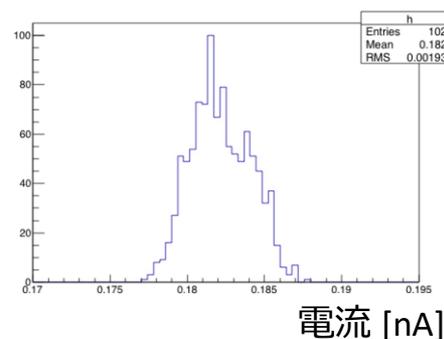
センサー用品質保証システム

- 640 枚のセンサーを使用(@40 vanes)。
- I-V, C-V 特性に加えて、ストリップごとの特性を測定する。
 - ストリップ漏れ電流, ストリップ抵抗, カップリング容量, ストリップ間容量

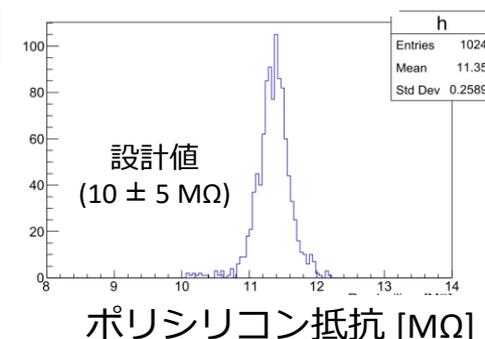


測定結果の例

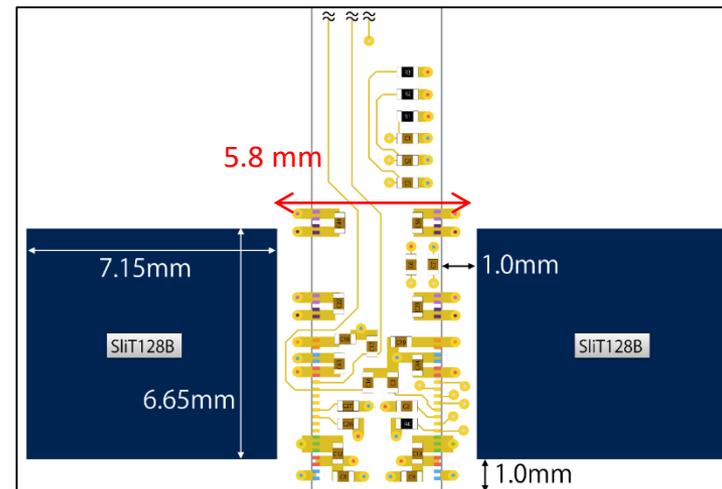
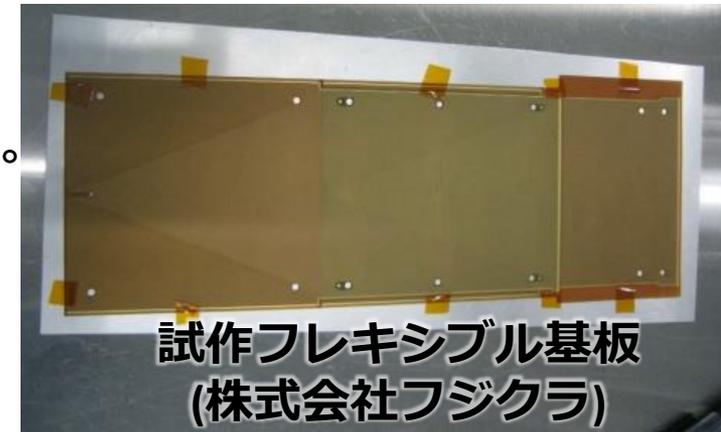
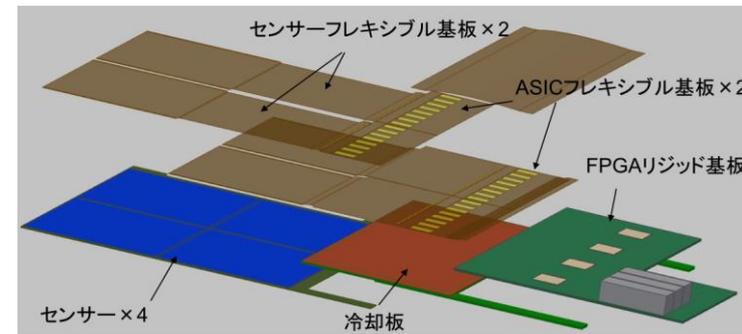
漏れ電流



ストリップ抵抗

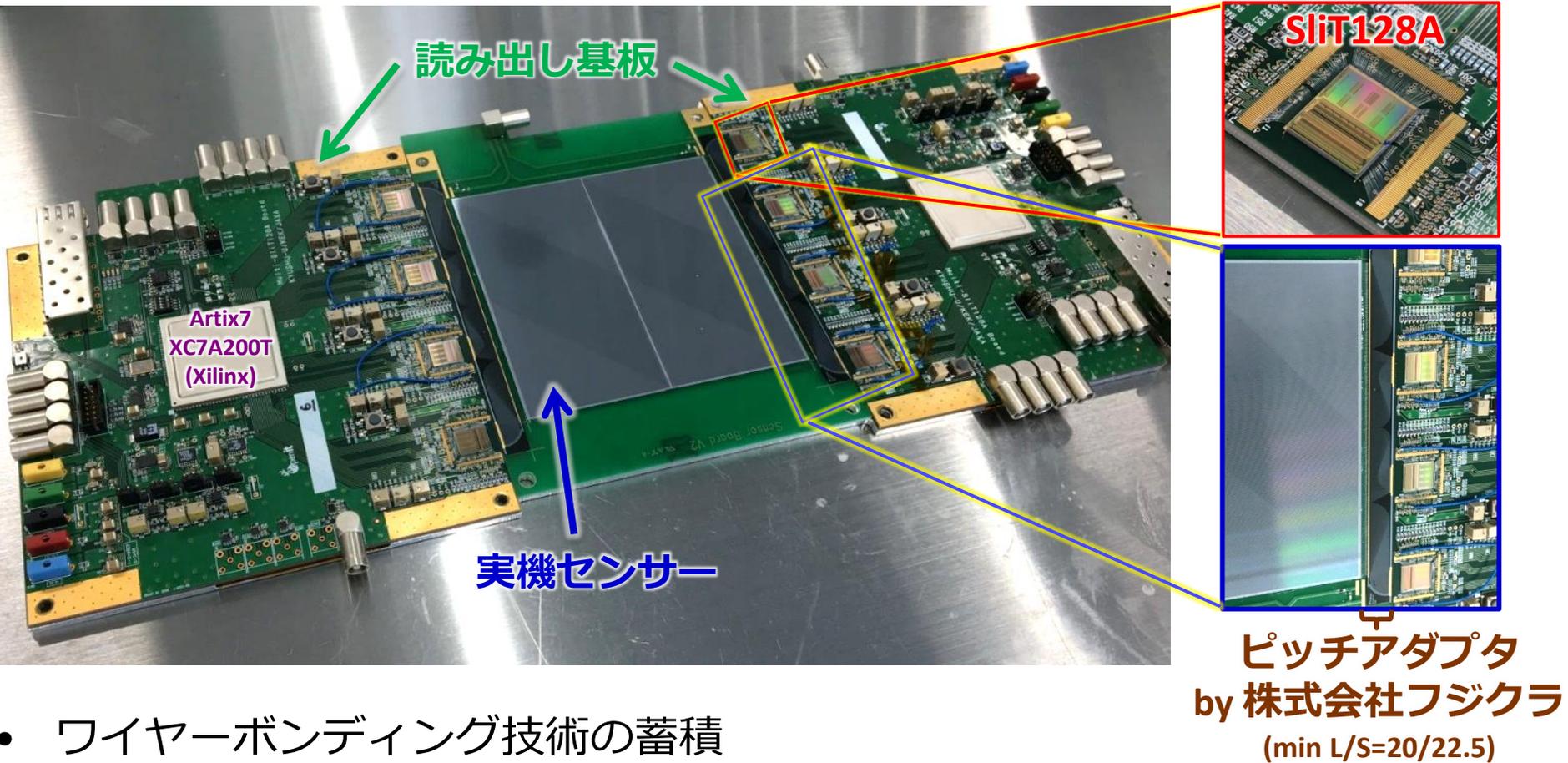


- ¼ ベーンではフレキシブル基板を介して、センサーの信号をASICへ送る。
- **センサー用フレキシブル基板**
 - 狭ピッチ(最小L/S ~ 34/35 μm) かつ長距離配線 (~200 mm) がチャレンジング。
 - 試作品で容量が許容範囲であることを確認。
 - 最長配線で14 pF。
 - 11月に量産開始予定。
- **ASIC用フレキシブル基板**
 - 高い実装密度がチャレンジング
 - 密に並んだASICの隙間に必要なパズコン・バイアス回路を配置する必要がある。
 - 現在、設計中、最終版ASICに合わせて、来年度製造予定。



試験モジュール 1

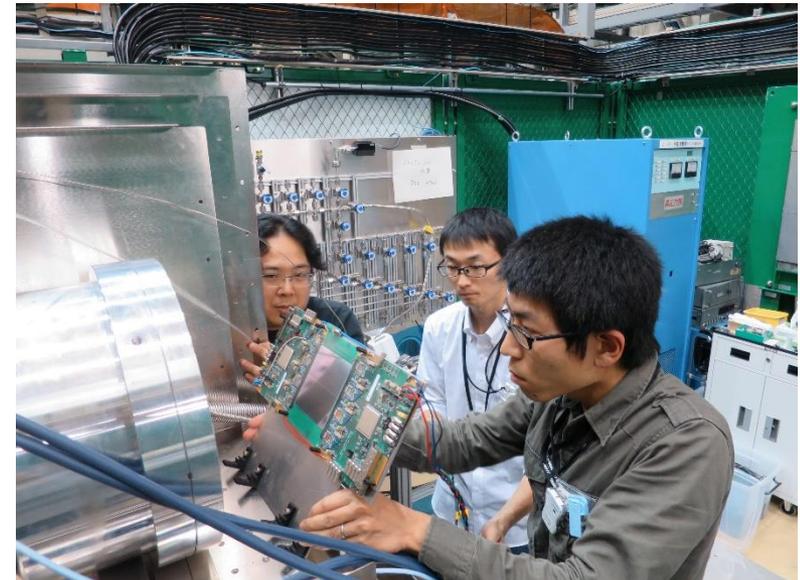
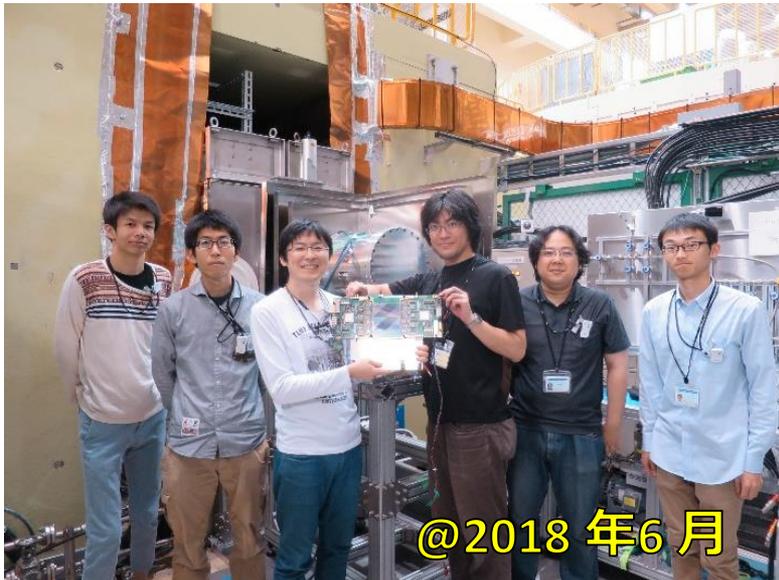
- 検出器としての性能を評価するため、**実機センサー**と**実機仕様読み出し回路SiIT128A**を用いた試験モジュールを製作。



- ワイヤーボンディング技術の蓄積
- ピッチアダプタのライン/スペースの最適化
- これまでに計4回, J-PARC のパルスミュオンビームを用いて試験・物理データの取得(2017年2月+6月, 2018年3月+6月)。

MuSEUM ビームテスト

- ミューオン超微細構造定数の精密測定実験([MuSEUM@J-PARC MLF](#))

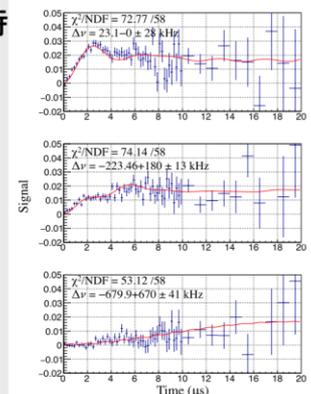


- ビームテストを通して、DAQ システム、閾値電圧の校正システムなどを開発。
- 先行実験に迫る精度でミューオン超微細構造定数の測定に成功(preliminary)
 - [@西村, JPS2018春 14aS20-5](#)

時間微分解析

ミュオンスピン反転による時間微分信号を確認

- シミュレーション通りの時間スペクトルのマイクロ波周波数応答
- シミュレーションと同じ Fitting 関数を使用
- それぞれ単独の測定周波数から Mu HFS を決定



試験モジュール2の製作

- 実機ベーン製作に向けて、試験モジュール2を現在、製作中。

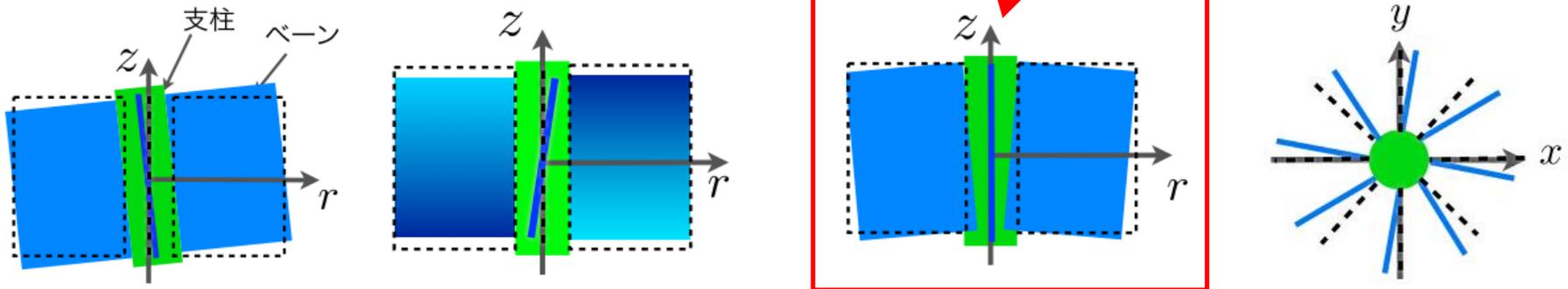
試作モジュール1との主な違い

1. 実機ベーン製作に向けた組み立て方法の検討。

- 目標の感度($10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$)でEDMを測定するためにはセンサーの位置を **10 μrad の角度精度(1 μm レベルの設置精度)**で組み立てる必要がある。

(西村 @JPS 2013 秋, 20pSL06)

この傾きがEDM測定に特に影響する。



→ 3次元計測器を用いて、センサーの位置を調整する。

2. 電源強化した改良版読み出し基板の新規設計・製作。

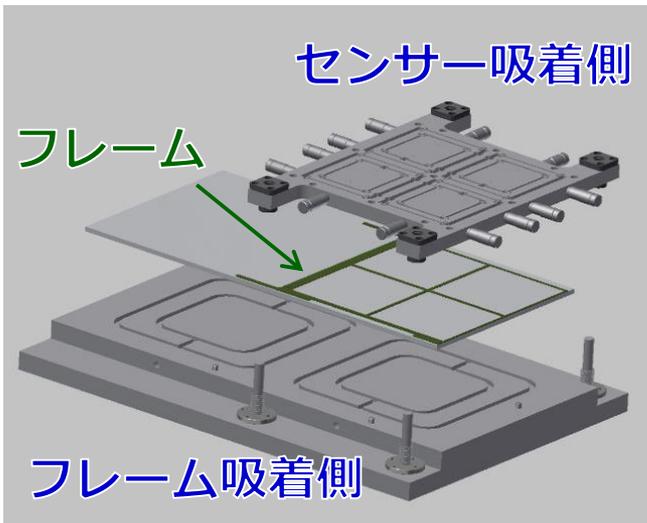
- ASICの近傍にレギュレータを配置して、安定した電源をASICに供給。

3次元計測器を用いたセンサーの位置調整

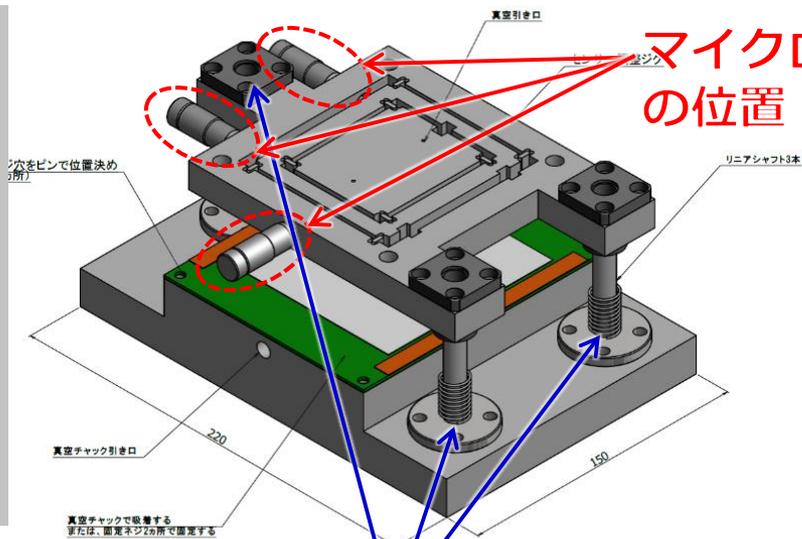
- 実機 ¼ ベーンでは3次元計測器を用いて、4枚のセンサーの相対的な位置を調整する。
- 試験モジュール2の組み立てにおいて、センサーとフレームの位置を3次元計測器(ATLAS KEKグループのMitsutoyo 250-PRO)を用いて、調整して接着する。



実機ベーン用治具 (案)



試作モジュール2用治具

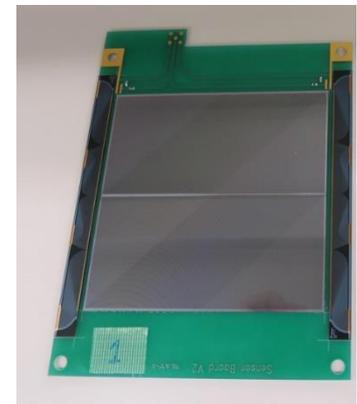
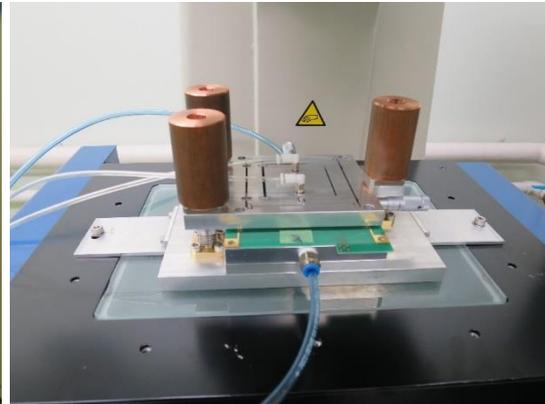
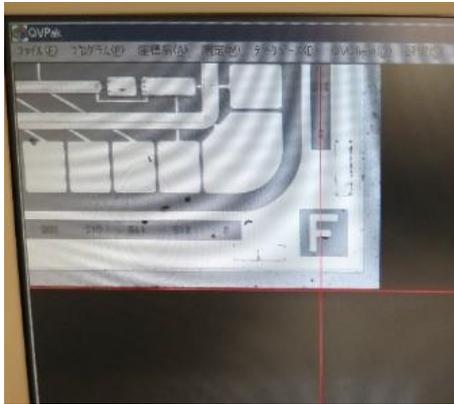


マイクロメータでセンサーの位置・傾きを調整。

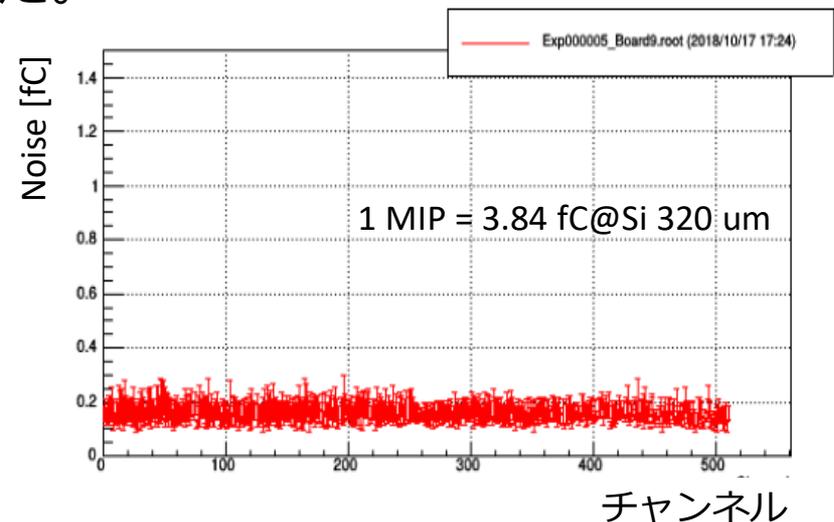
リニアシャフト・リニアブッシュでセンサーを降ろして、フレームと接着。

試験モジュール2の製作状況

- センサーの位置調整治具の基本的な機能を確認した。



- センサー1枚と読み出し基板1枚をワイヤーボンディング接続して、良好なノイズ性能($S/N(\text{mean}) > 20$)を確認した。



- J-PARC muon g-2/EDM 実験用シリコンストリップ検出器の開発・製作を進めている。
- 各パーツの開発が進み、製造フェーズへ移行中。
- 実機製作に向けて、構造設計・具体的な組み立て方法の検討も進めている。
- 試験モジュールを製作。
 - 試験モジュール1 はJ-PARC MLF において、物理データを取得し、ミューオニウム超微細構造定数の測定に成功している。
 - 実機ベーンの製作に向けて、試験モジュール2 を製作中。
 - 3次元計測器を用いたセンサーの位置調整。
 - 電源を強化した改良版読み出し基板の新規設計・製作。
- 今年度、メカニカルモックアップを製作、来年度、 $\frac{1}{4}$ ベーンの製作を目指している。

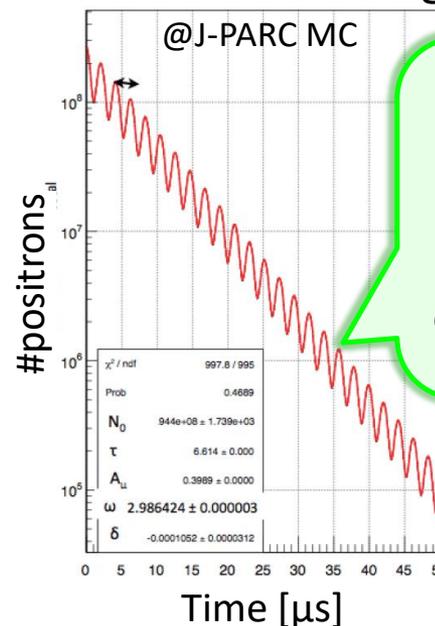
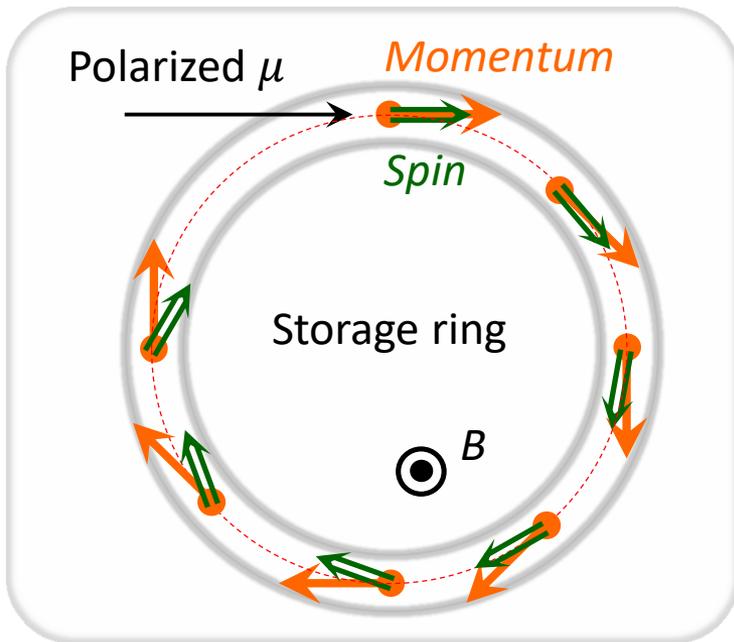
Backup

Principle of muon g-2 Measurement

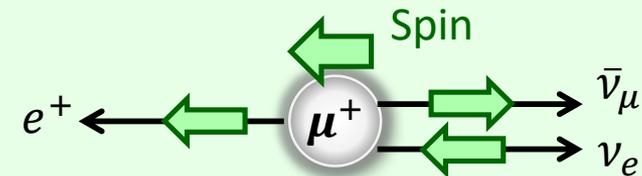
- Inject **polarized muons** to the storage ring.
 - $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ decay
- Muon spin precession relative to momentum in cyclotron** is proportional to g-2 under “special” condition.

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_{\text{spin}} - \vec{\omega}_{\text{cyclotron}} = \left(\frac{g-2}{2} \right) \frac{e\vec{B}}{m_\mu c} = \mathbf{a}_\mu \frac{e\vec{B}}{m_\mu c}$$

3. Detect high energy e^+ from μ^+ decay



e^+ direction is correlated to muon spin direction.

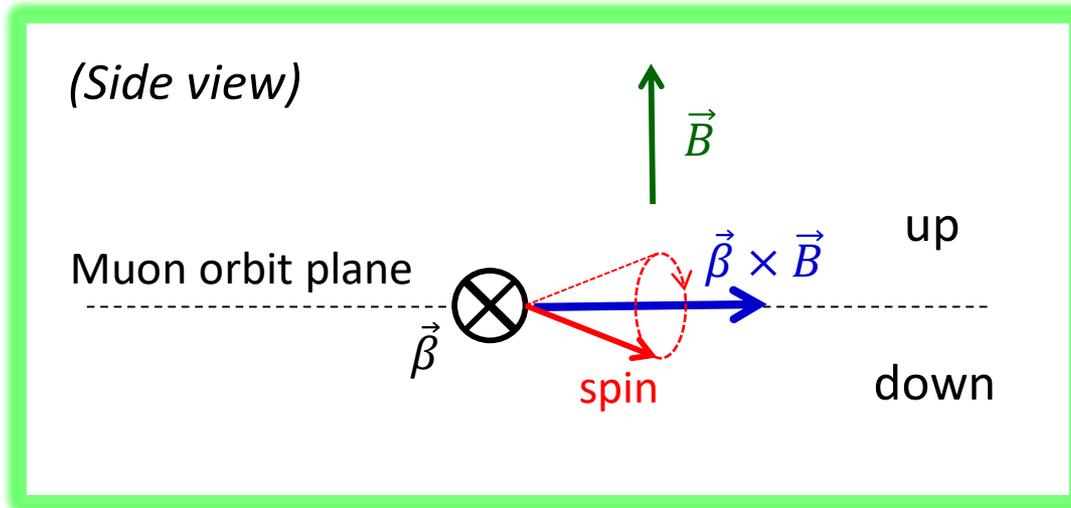


- Precise measurement of $g - 2$ needs **precise determinations of ω and B** .
- Muon-to-proton magnetic moment ratio is also used instead of e/m_μ .

Principle of muon EDM Measurement

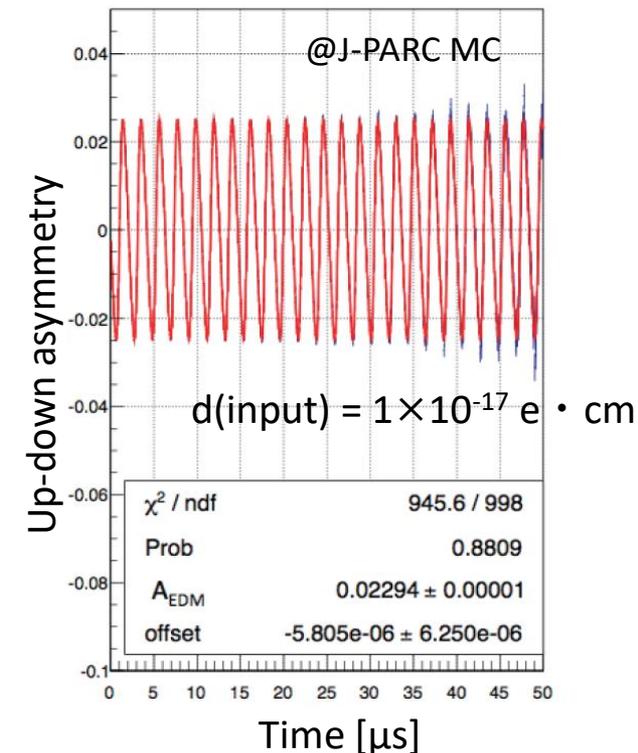
- Non-zero EDM contributes to spin precession.

$$- \vec{\omega}_{\text{EDM}} = - \frac{e}{m_{\mu}} \left[\frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

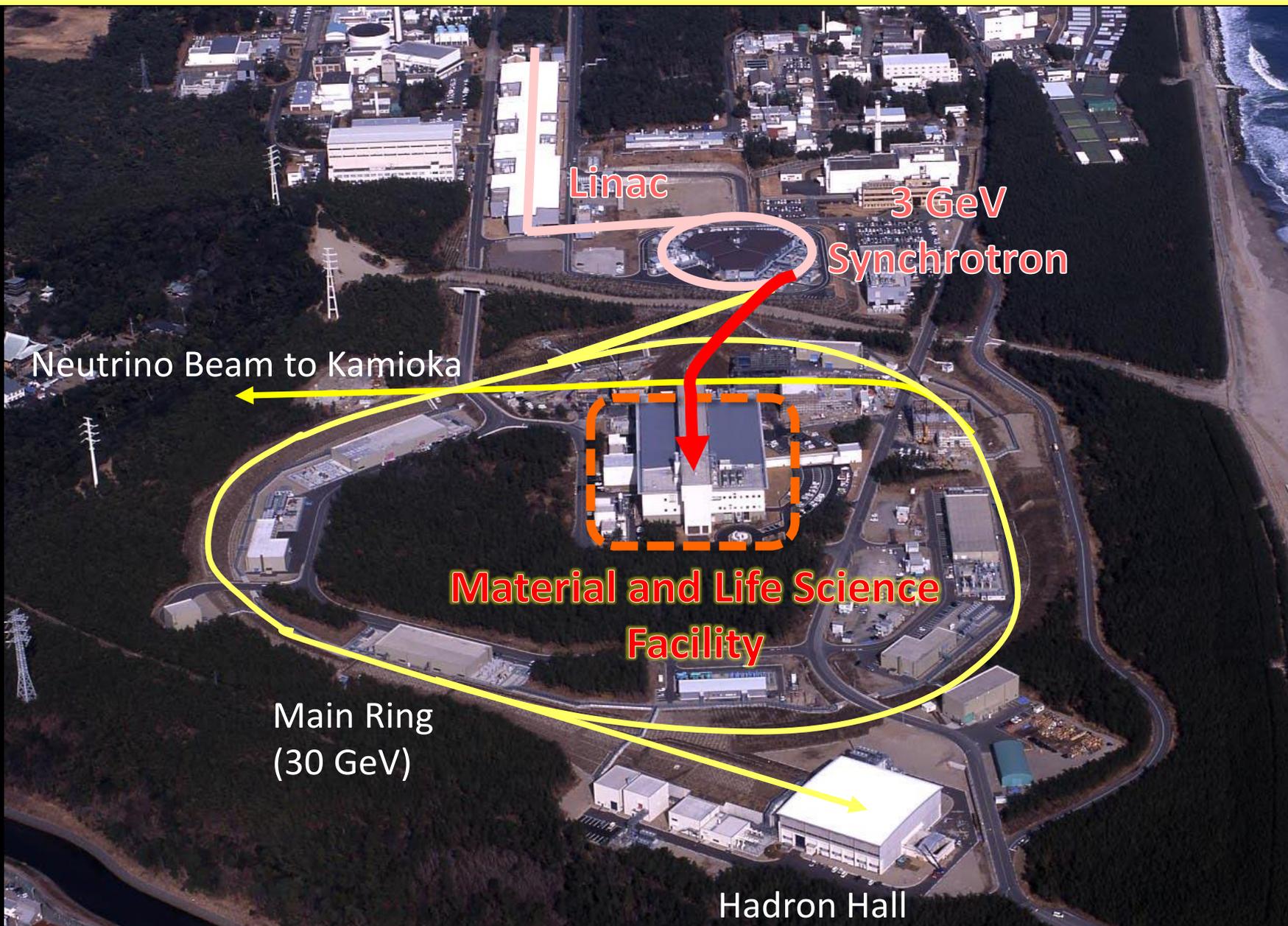


- EDM can be measured from up-down asymmetry.

$$- \mathcal{A}_{UD} = \frac{N_{\text{up}} - N_{\text{down}}}{N_{\text{up}} + N_{\text{down}}}$$



J-PARC Facility (KEK/JAEA)



New Muon Beam Line ~H-Line~

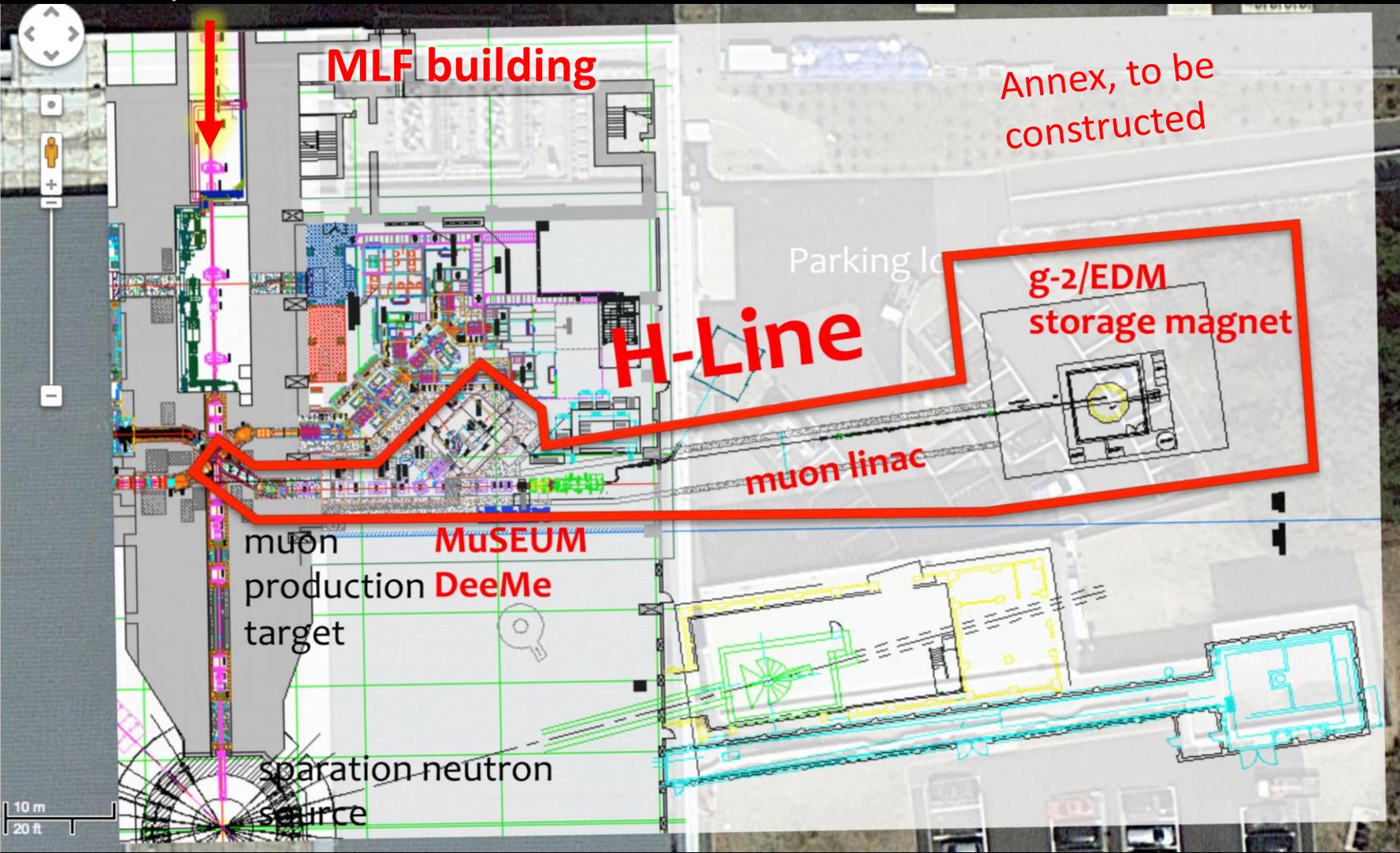
Three muon experiments

g-2/EDM

MuSEUM (Mu-HFS)

DeeMe (muon cLFV)

3 GeV proton beam



H-line being constructed!

Photo by T. Yamazaki



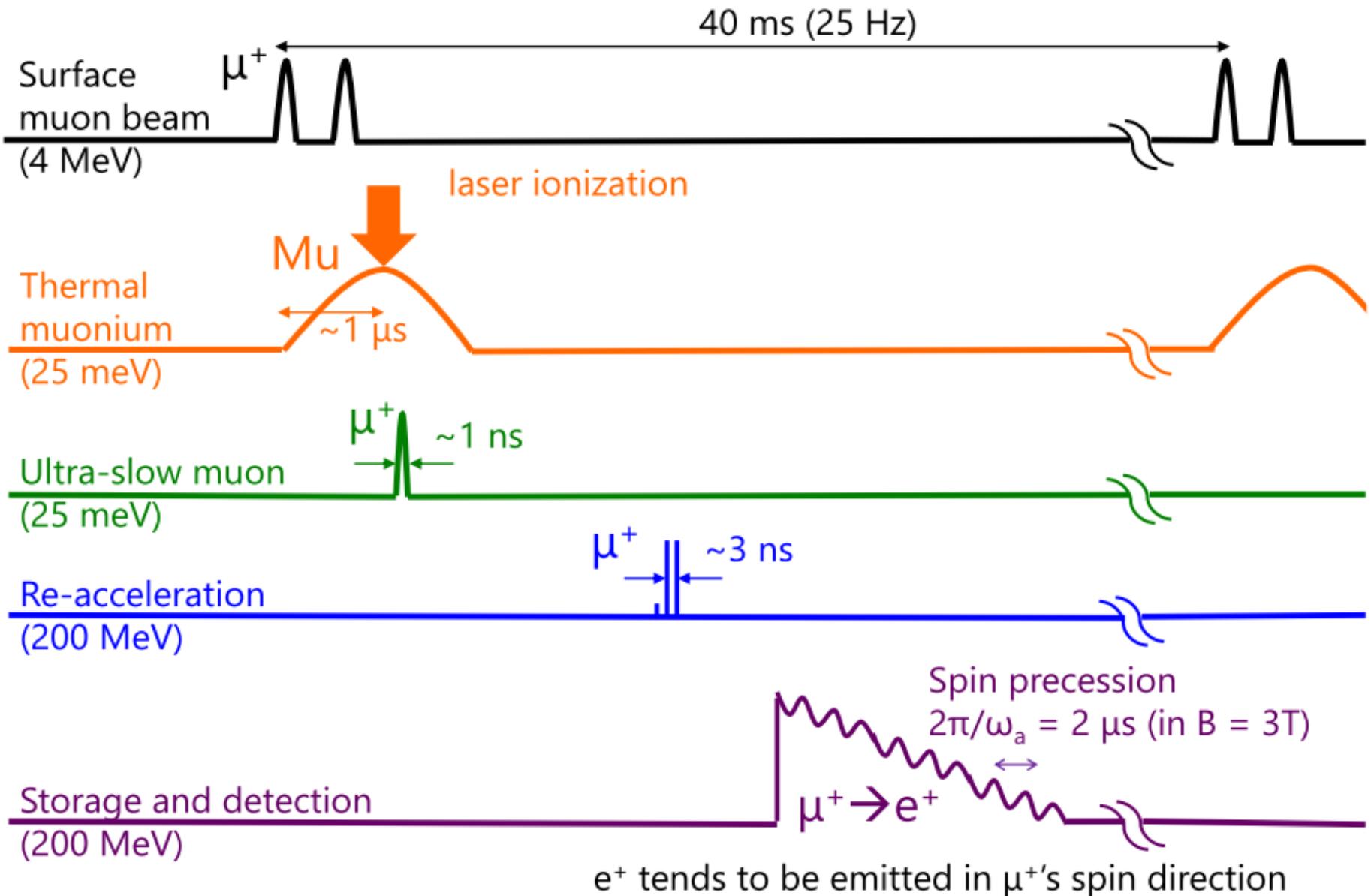
To g-2/EDM

New power station being constructed



Photo by T. Yamazaki

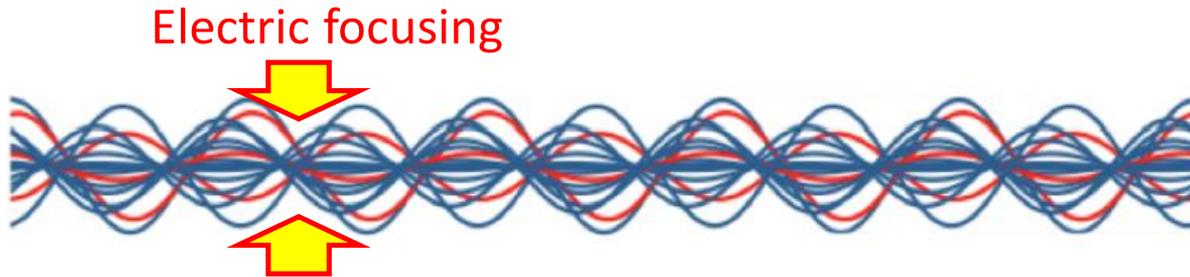
Experimental sequence



Low Emittance Beam

Methods to storage muon beam

- **BNL & FNAL (magic momentum approach)**
 - Electric quadrupole field focusing



- **J-PARC (zero E-field approach)**
 - Low-emittance “cold” muon beam.



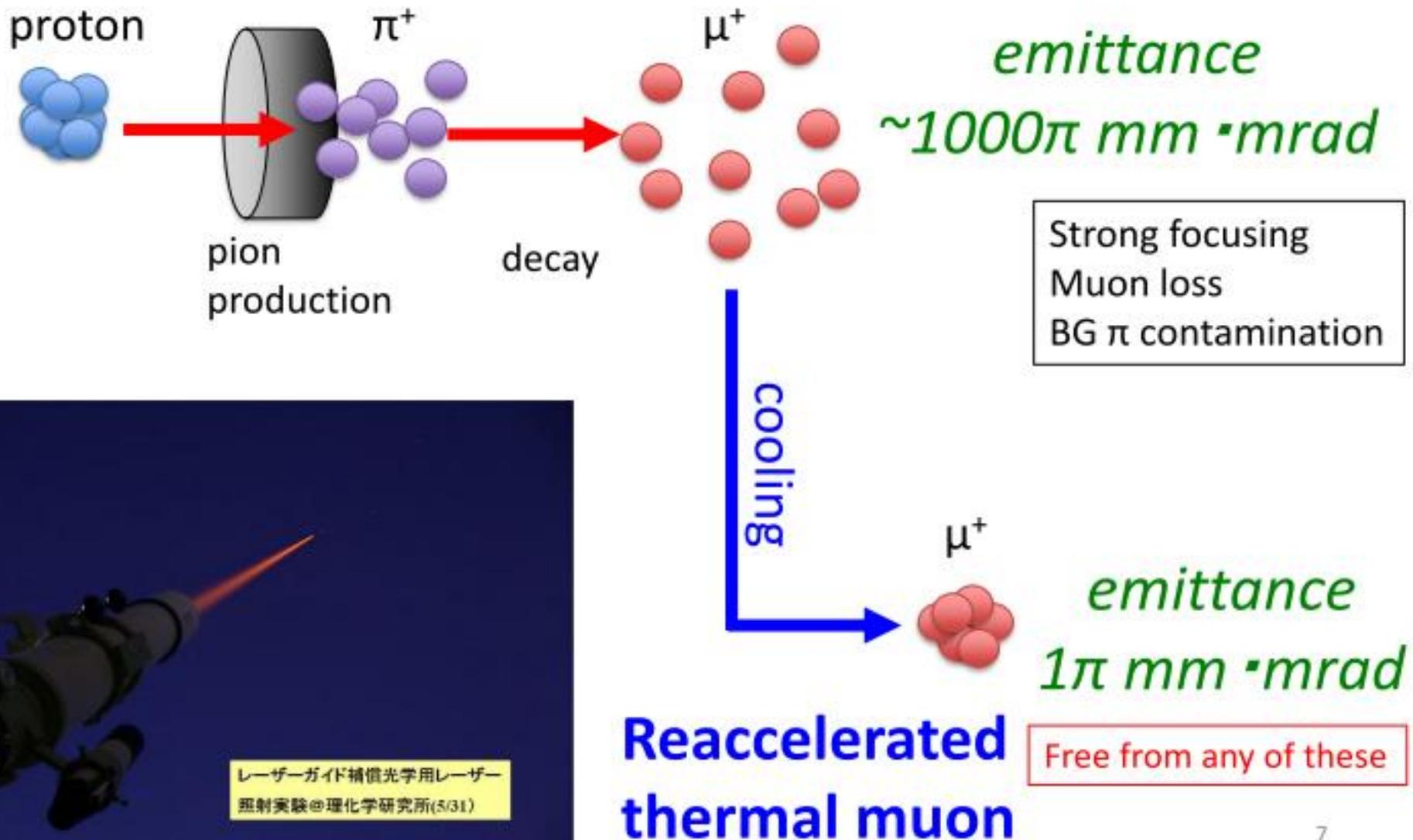
- $\frac{\sigma(p_T)}{p_T} < 10^{-5} \rightarrow 10 \text{ cm spread over } 10 \text{ km travel.}$

➤ Low emittance beam can avoid major syst. error at BNL.

Syst. Err. @BNL

Sources	ppm
Gain changes	0.12
Pile up	0.08
Lost muons	0.09
CBO	0.07
E and pitch	0.05
Total for ω	0.18

Muon beam at J-PARC



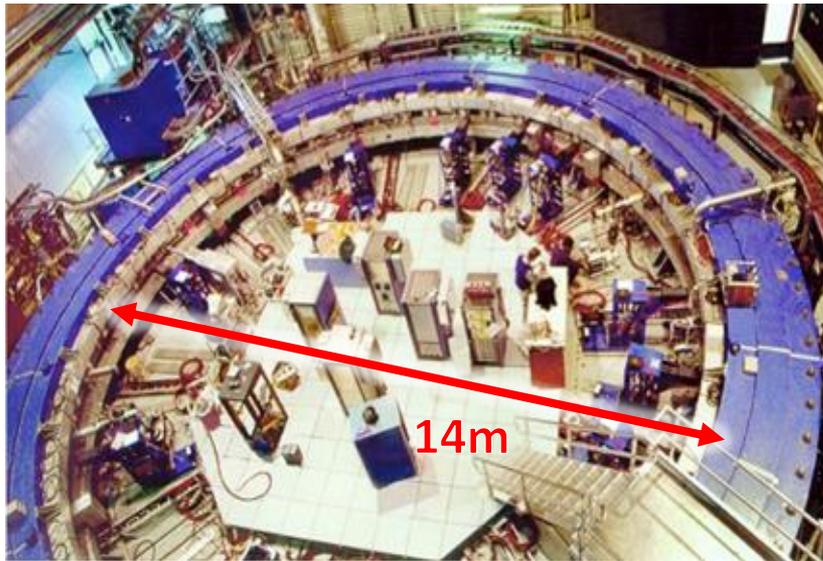
Off-magic momentum

Syst. Err. @BNL

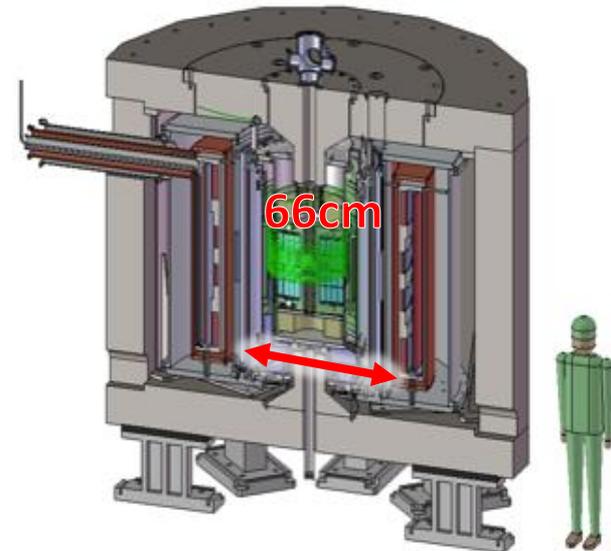
Sources	ppm
Total for ω	0.18
Total for B	0.17

- Off magic momentum at **300 MeV/c**
 - Compact storage ring provides **precise control of B-field**.
 - 3 T, ~ 1 ppm local precision.
 - Spin manipulation of μ beam** cancel various systematics.

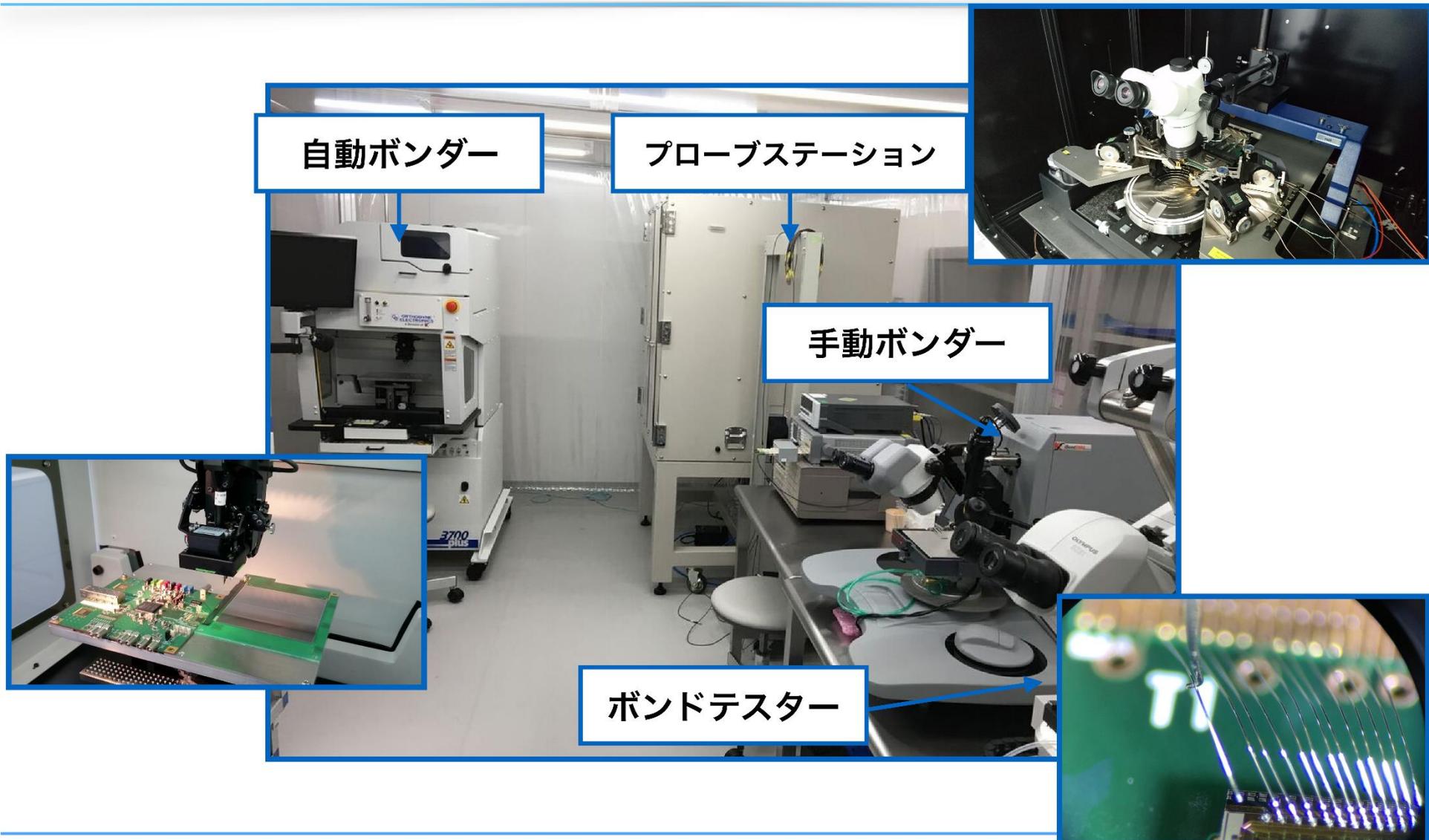
BNL & FNAL (P = 3 GeV/c, 1.45T)



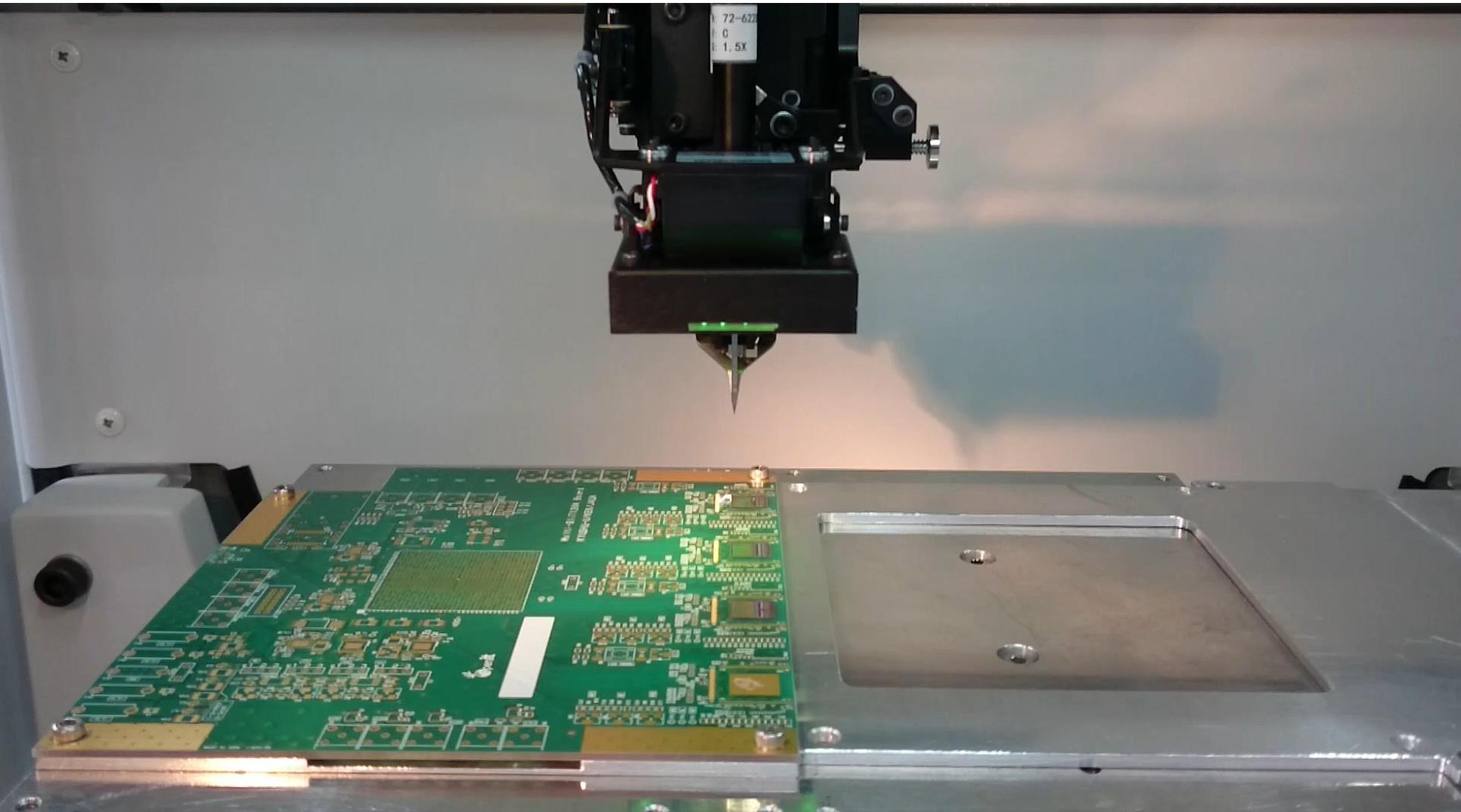
J-PARC (P = 300 MeV/c, 3T)



シリコン検出器製造施設 @ 九州大学

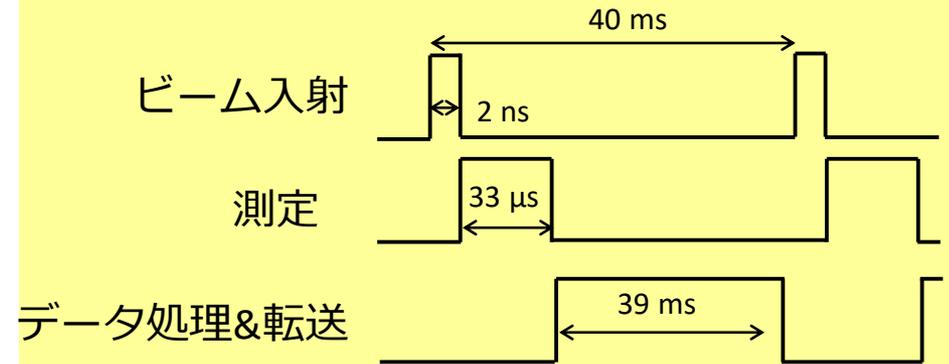


ワイヤーボンディングの様子



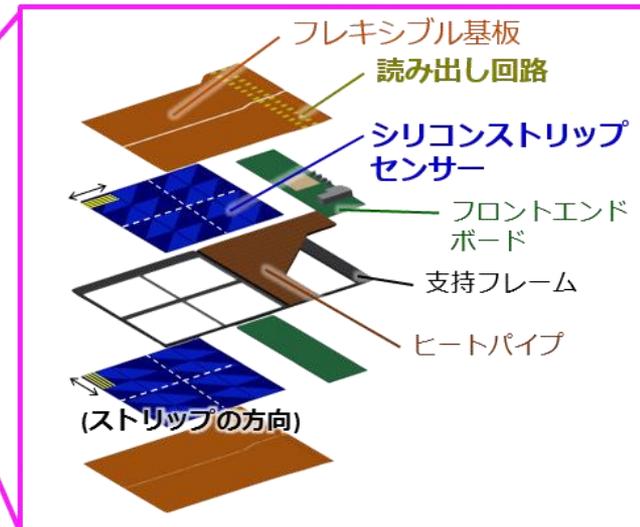
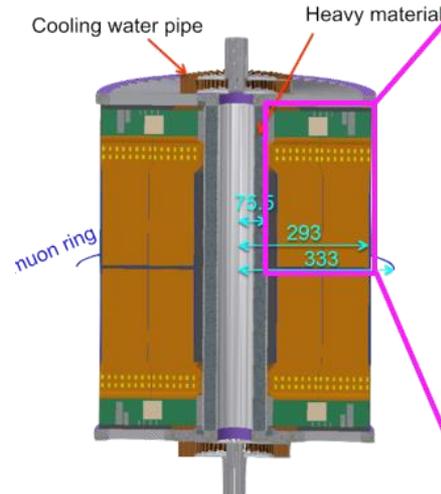
- **ビーム周期** : 25 Hz (40 ms で1 spill)
- **読み出し時間** : 39 ms
 - Front-end → FPGA → Back-End
- **総チャンネル数** : 786,432

データ収集の時間構造



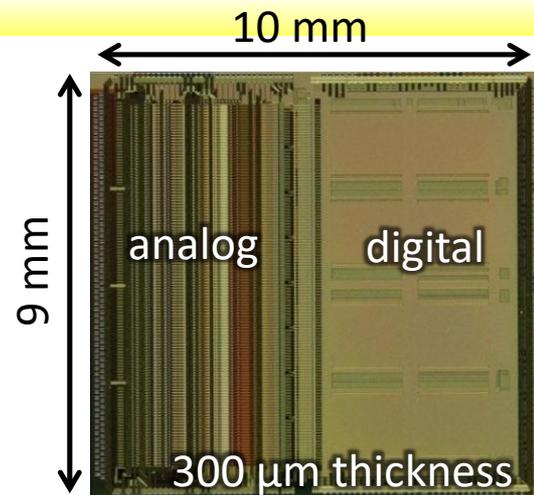
- **192 front-end(FE) board**
 - 48 vane × 2 (裏/表) × 2 (上/下)
 - 4096 strips/FE board
- **24 back-end(BE) board**
 - 8 FE board = 1 BE board

検出器の断面図

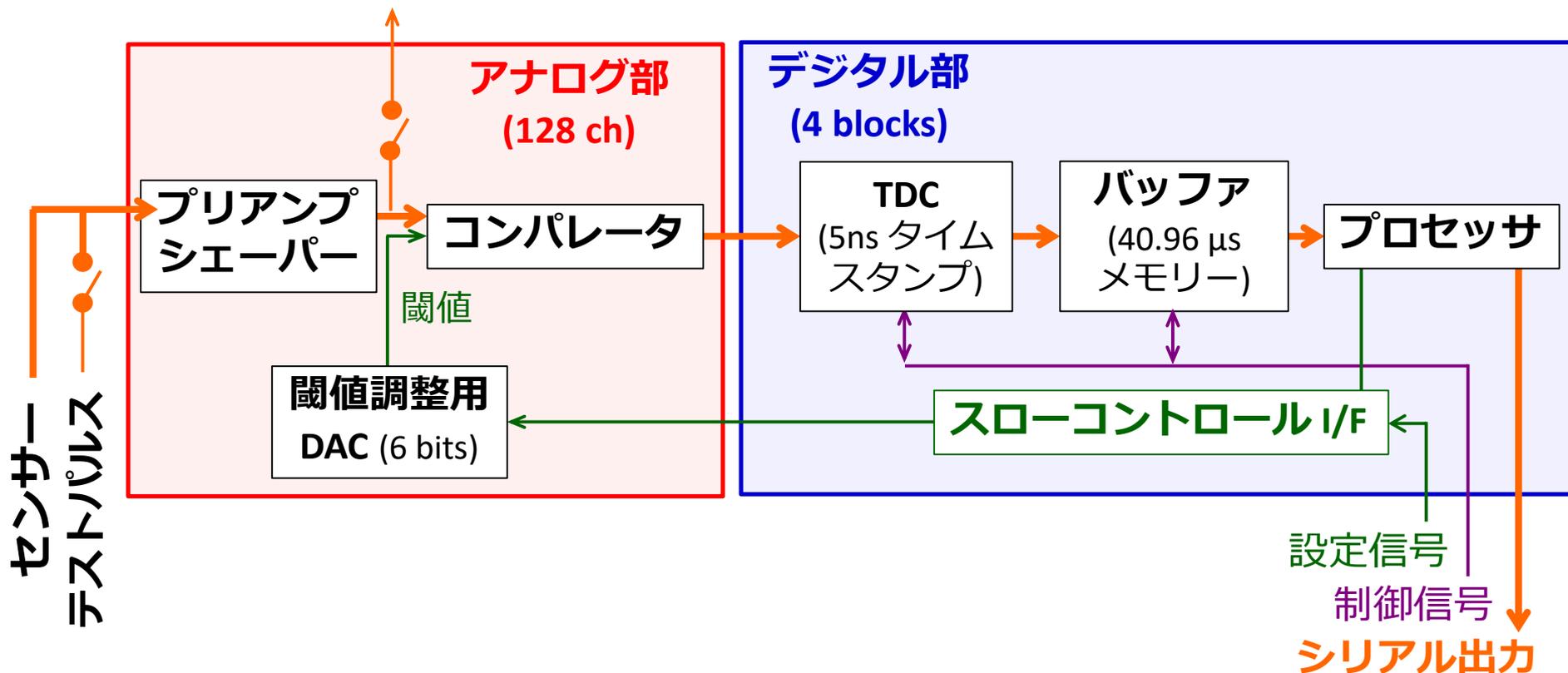


Slit128A のデザイン

- プロセス : Silterra 0.18 μm CMOS
- アナログ部** : 信号を増幅・整形・バイナリ化
- デジタル部** : 5ns 周期で検出時刻をサンプリング。
データをシリアル化して、FPGA へ転送

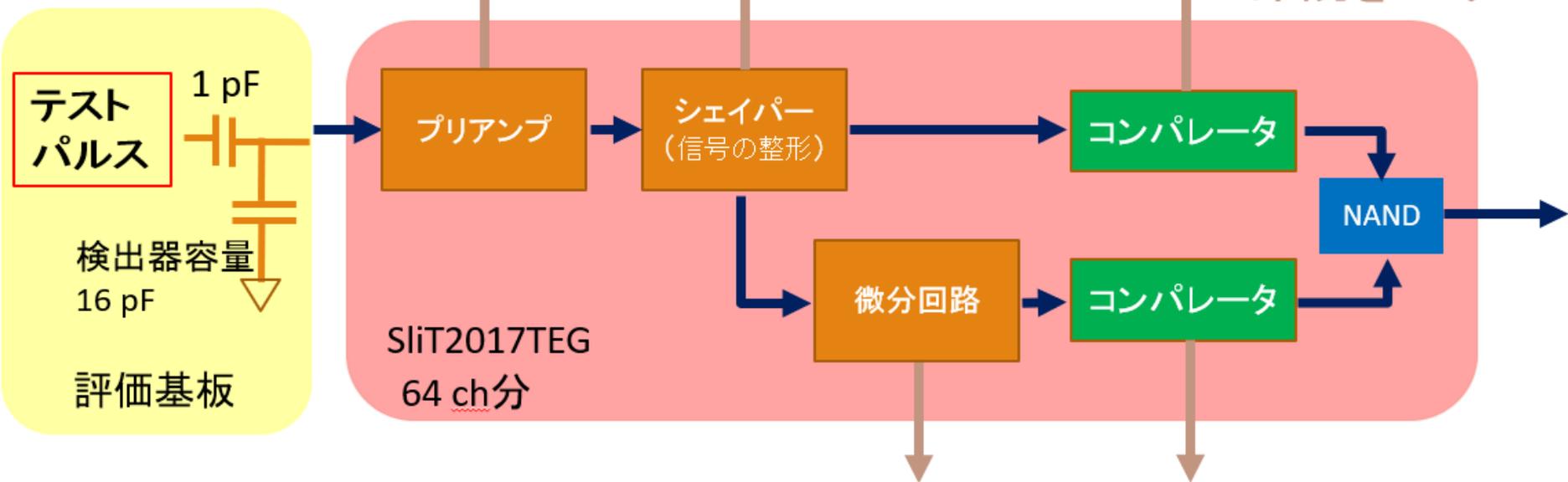


アナログモニター



Slit2017TEGの回路構成

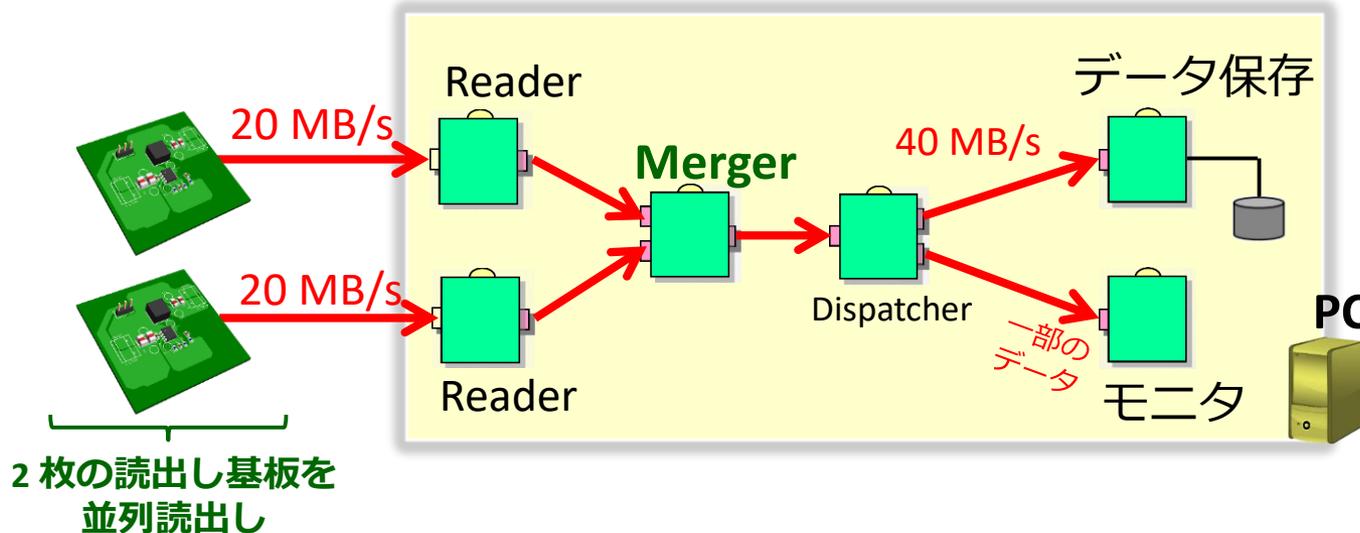
各コンポーネントからの出力をモニター



- Time Walkの改善のために、微分回路を新たに導入した

試験モジュール1の運用 ~DAQシステム~

- DAQ-Middleware を用いてデータ収集(DAQ) システムを構築。



Operation Panel for DAQ operator

Current Status : OK

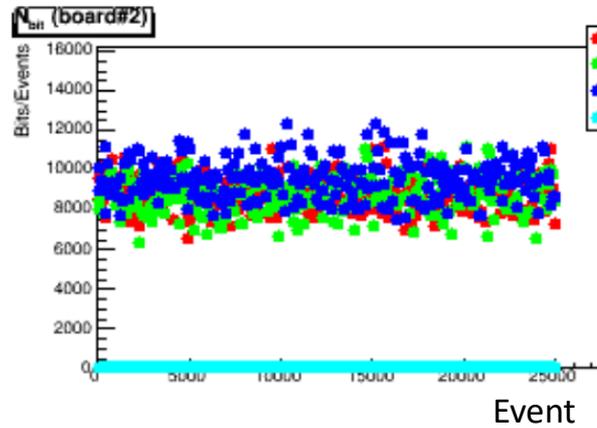
Run Number : 169

DAQ button

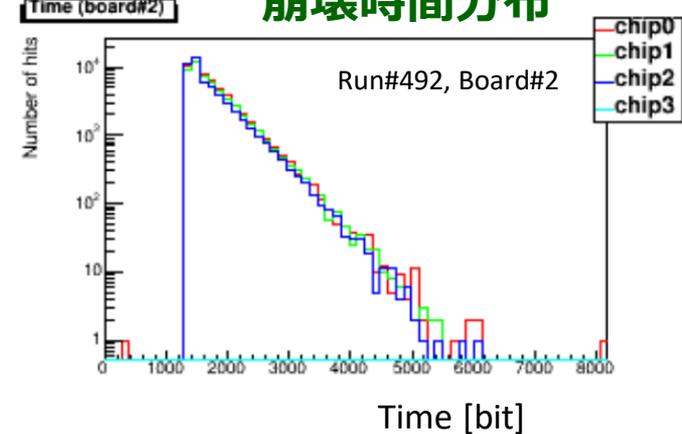
DAQ status

Group	State	Status	Total Byte Counts
group0:SampleLogger0	CONFIGURED	WORKING	29350839350
group0:SampleMonitor0	CONFIGURED	WORKING	29350839350
group0:BestEffortDispatcher0	CONFIGURED	WORKING	29350839350
group0:Merger0	CONFIGURED	WORKING	29350839350
group0:SampleReader50	CONFIGURED	WORKING	16771619440
group0:SampleReader0	CONFIGURED	WORKING	12579219910

イベントごとのヒット数



崩壊時間分布



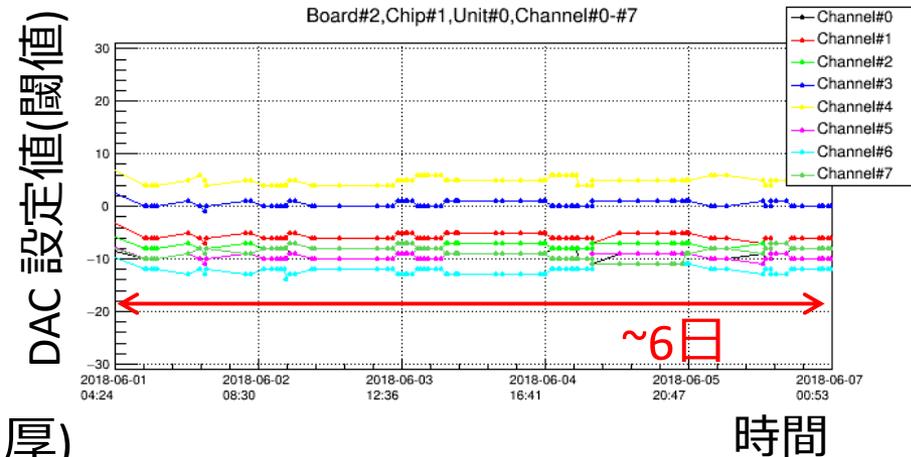
→ Web browser から
DAQ を操作可能。

→ オンラインモニタでリアルタイムに
検出器の状況を把握可能。

試験モジュール1の運用・性能

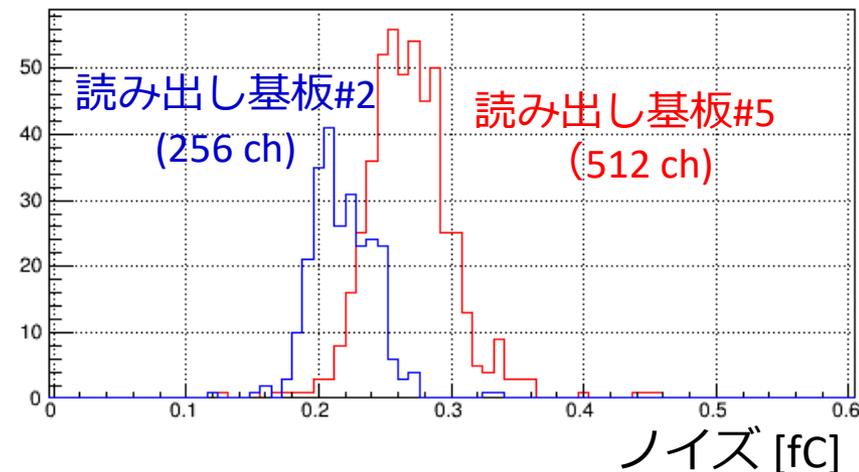
しきい値電圧の較正

- 6-bit DAC でチャンネルごとのしきい値電圧のばらつきを補正可能。
- 1 MIP の信号に対してToT が150 ns になるようにしきい値電圧を調整。
- 1 bit は約0.02 MIP に対応。



ノイズ性能

- S/N = 12~21 @ J-PARC MLF
 - 1 MIP = 3.84 fC を仮定(@Si 320 um 厚)
- J-PARC 外の実験室での性能(S/N ~25) に比べると悪い。
 - 外的要因(温度・電源) の調査。
 - 読み出し基板の電源強化。



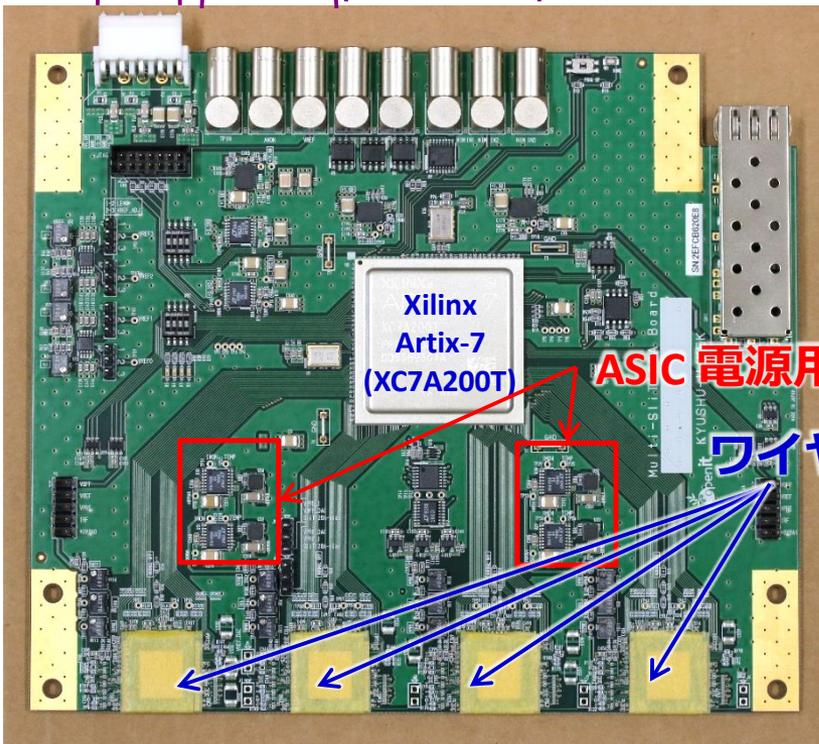
改良版読み出し基板

Multi-SliT128A 基板 (v2)

- ASIC の近傍にレギュレータを配置して、安定した電源をASIC に供給。
- 電源のインピーダンスを小さくするため、IVH(Interstitial via hole) を使用。
- ADC による電源電圧・バイアス電圧のモニタ
- DAC によるバイアス電圧のコントロール。

テストパルス入力
アナログモニタ
コンパレータしきい値

電源 汎用NIM 入出力



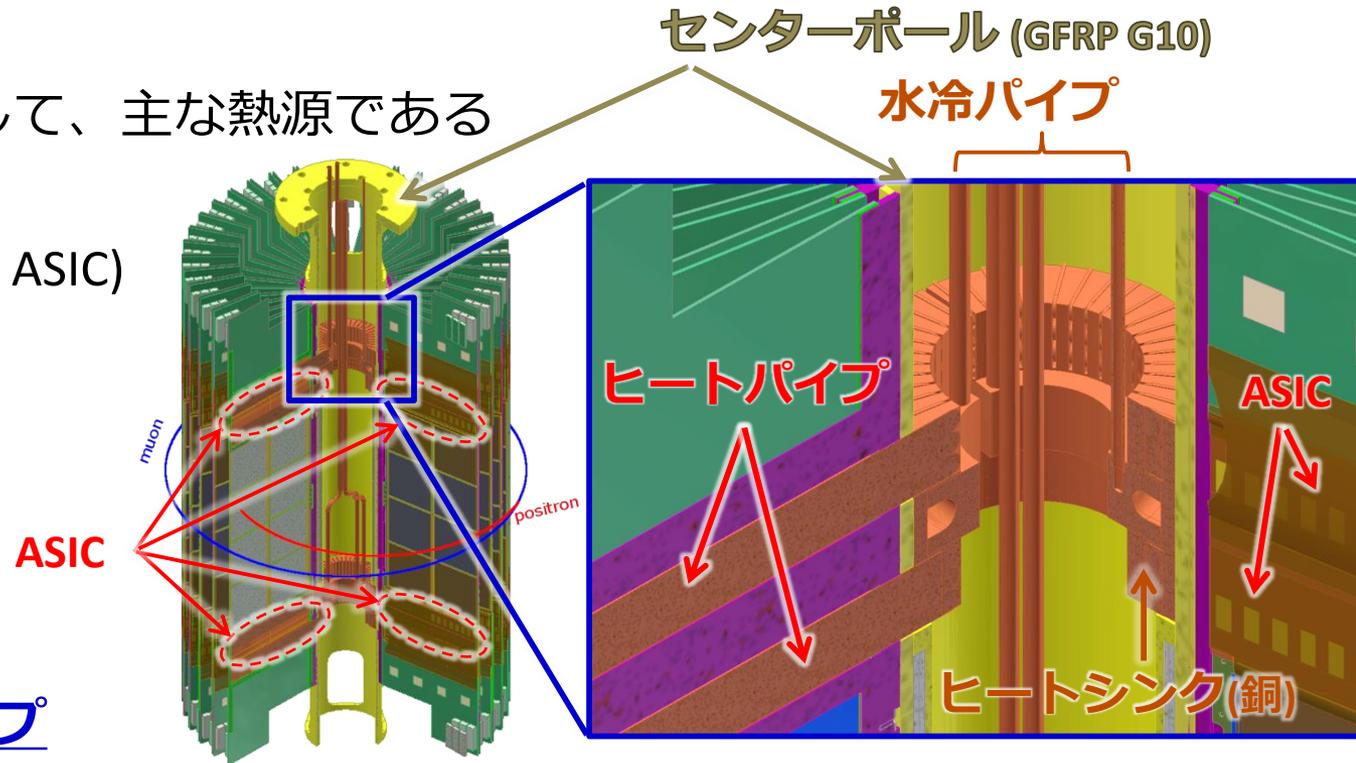
ASIC 電源用レギュレータ

ワイヤーボンディング実装

冷却機構の開発

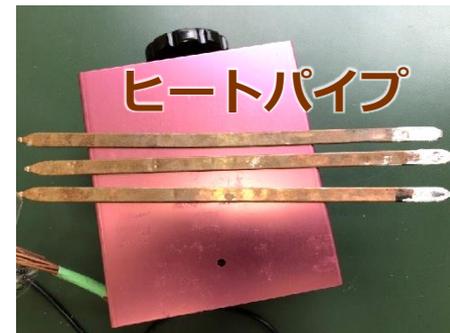
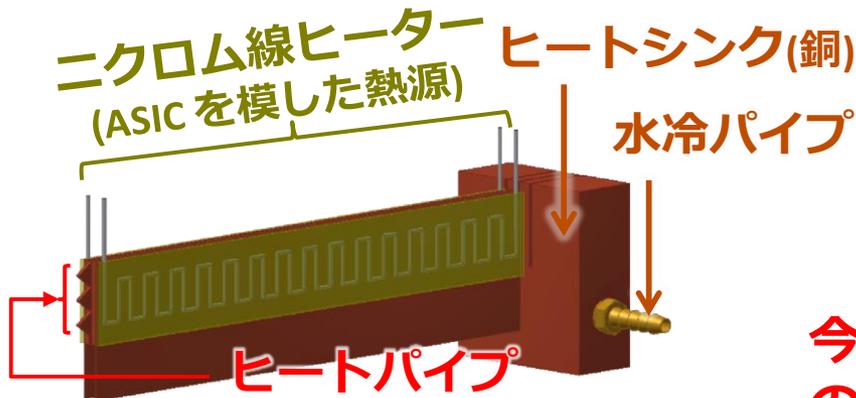
冷却機構

- ヒートパイプを通して、主な熱源である ASIC の熱を逃がす。
- $\sim 20 \text{ W}@\frac{1}{4}$ ベーン(32 ASIC)



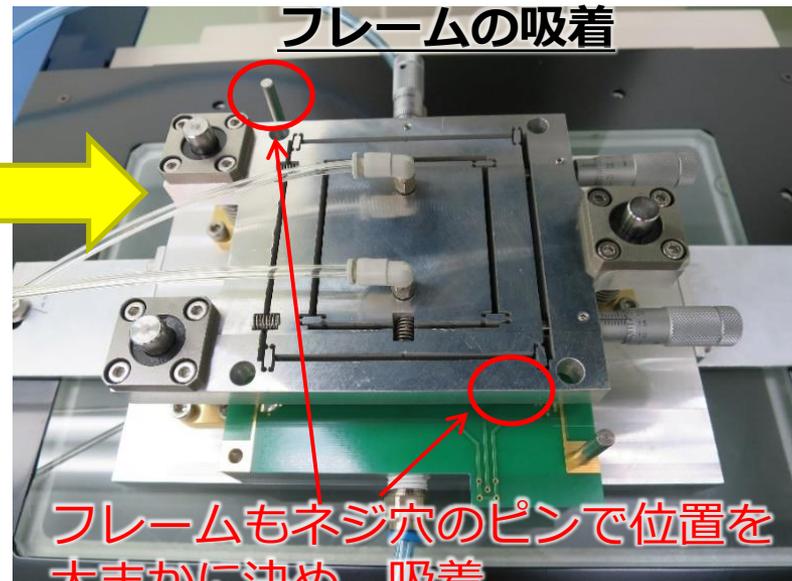
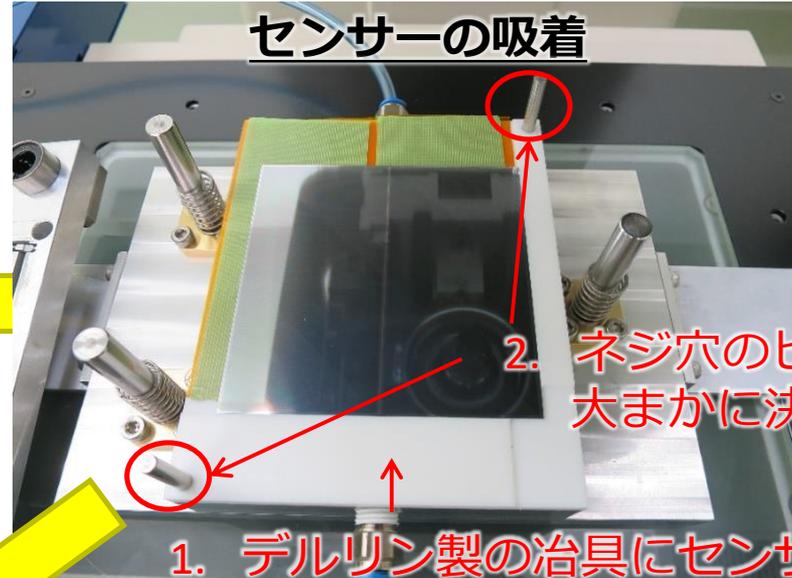
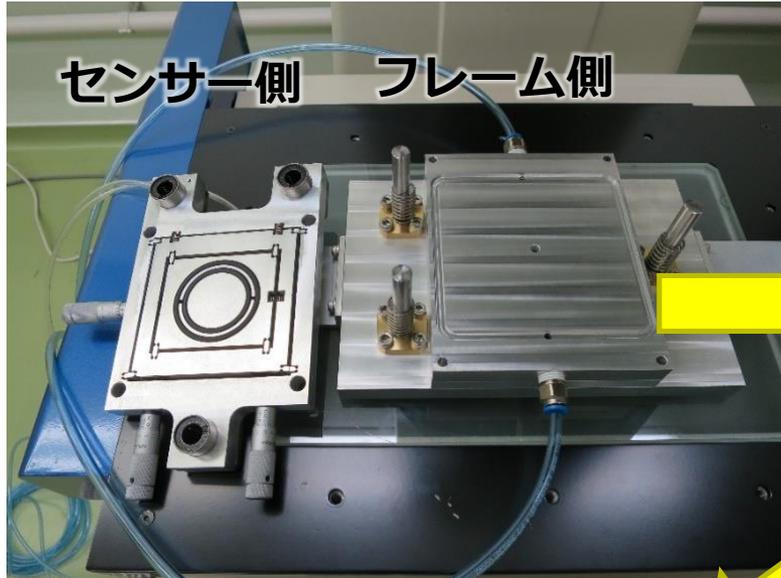
冷却試験のセットアップ

- ヒートパイプの性能を評価中。



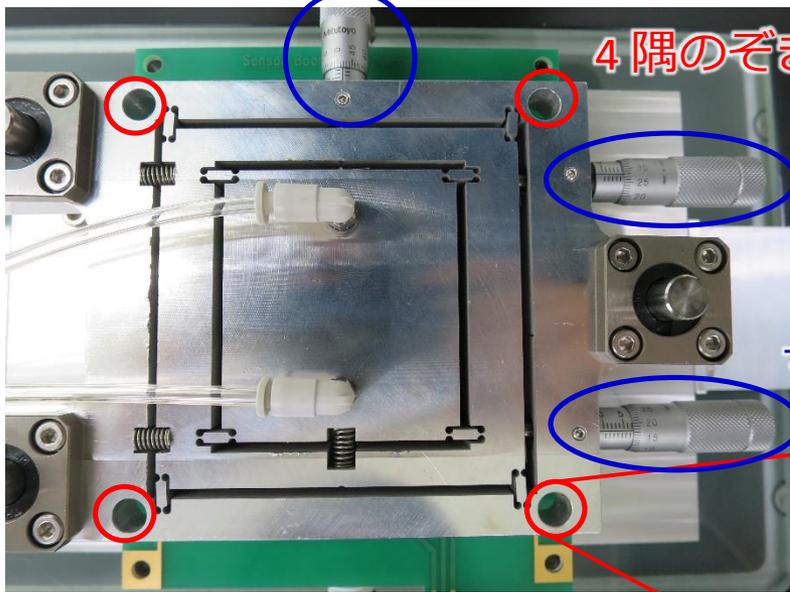
今年度、検出器のメカニカルモックアップの製作を目指して、構造設計を進めている。

センサーの位置調整・接着工程



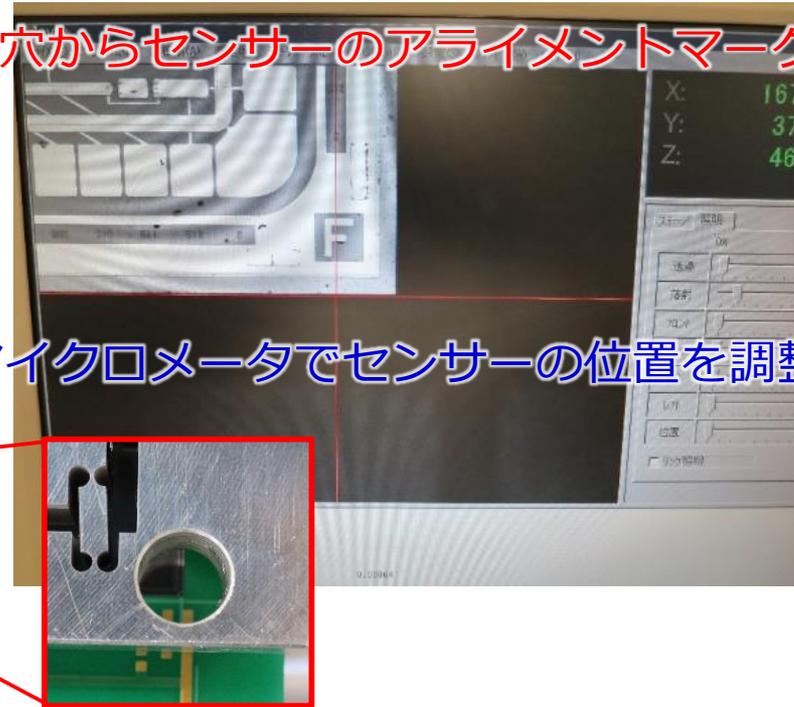
センサーの位置調整・接着工程

センサーの位置調整

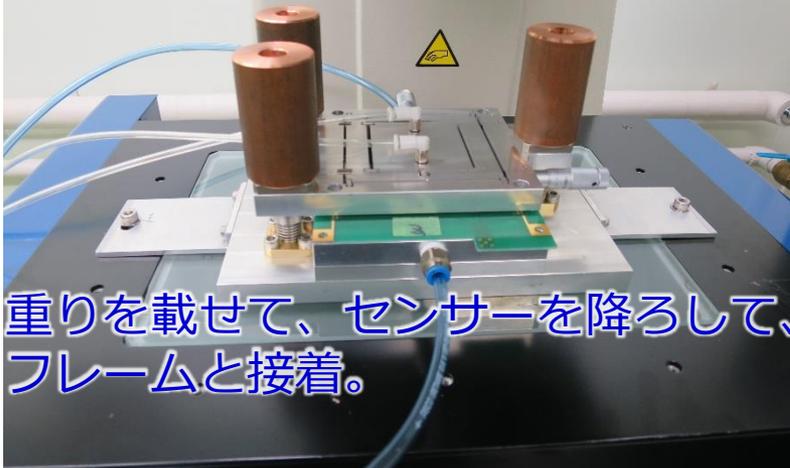


4隅のぞき穴からセンサーのアライメントマークを確認。

マイクロメータでセンサーの位置を調整する。



センサーとフレームの接着

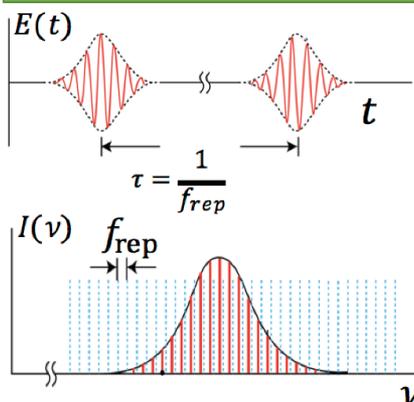


重りを載せて、センサーを降ろして、フレームと接着。

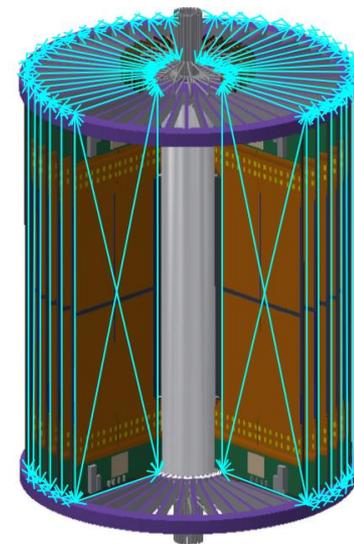
- 最大20 μm 程度のずれでの接着を達成。
 - 今回の組み立てでは、フレームの精度が良くないため、最終目標(1 μm レベル)の達成は難しい。
 - 最終目標精度を達成するには、センサーを降ろす際のずれなどを考慮する必要がある。

光コムレーザーを用いたアライメントモニターの開発⁴⁰

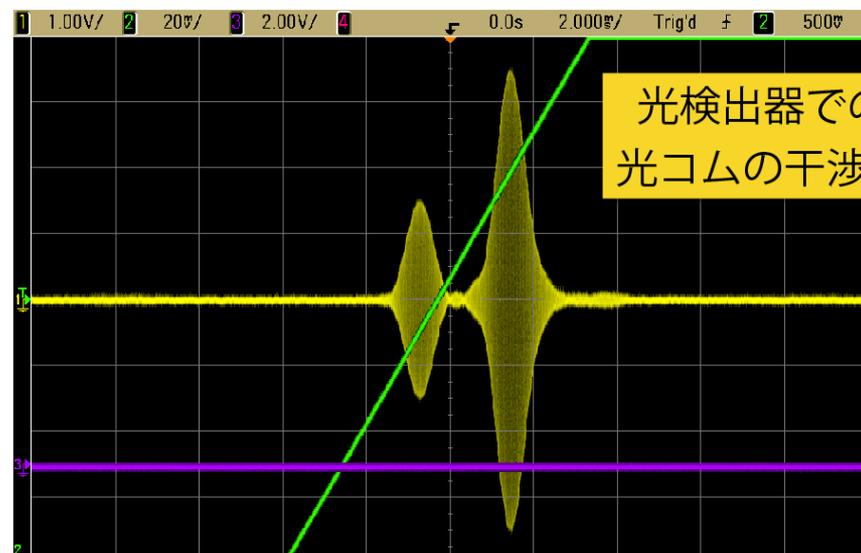
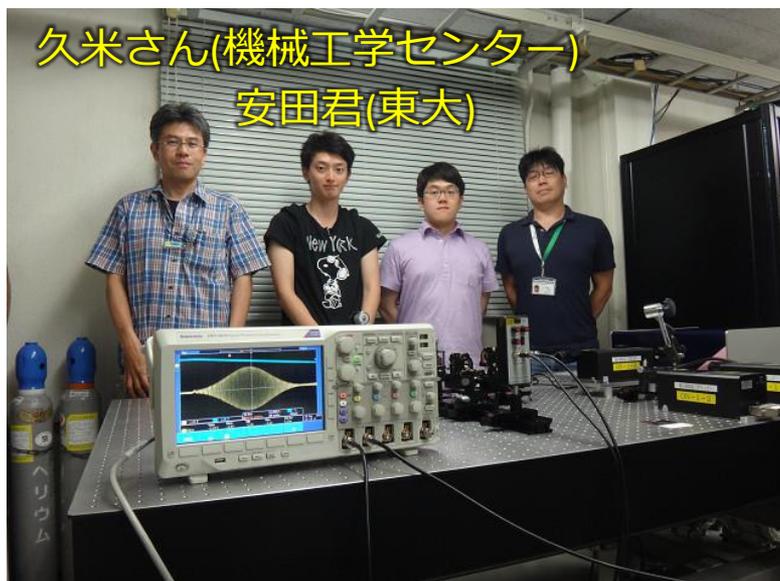
Optical Comb Laser



- 光コムレーザー
 - 櫛(comb)状の周波数構造
 - 時間標準器によってパルス間隔が $10^{-19}/m$ で安定
- 非常に正確なパルス間隔を実現
- 精密な測定が可能**



久米さん(機械工学センター)
安田君(東大)



光検出器での
光コムの干渉縞

Track Reconstruction Tool

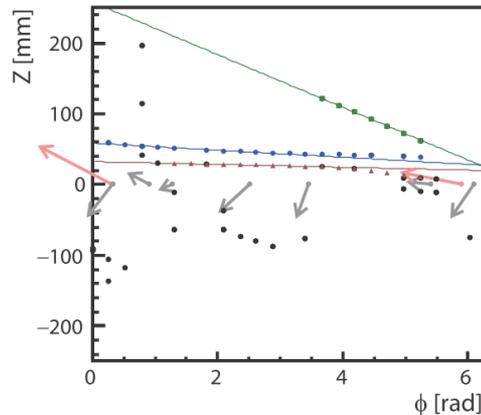
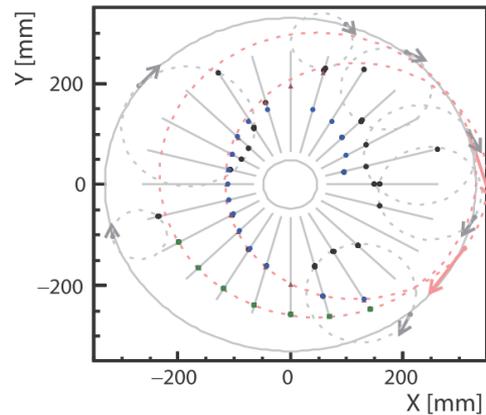
- Track reconstruction algorithm is being developed.
 - With the developed track finding algorithm based on Hough transformation, more than 90% efficiency is expected even in the highest pileup condition.

Event display

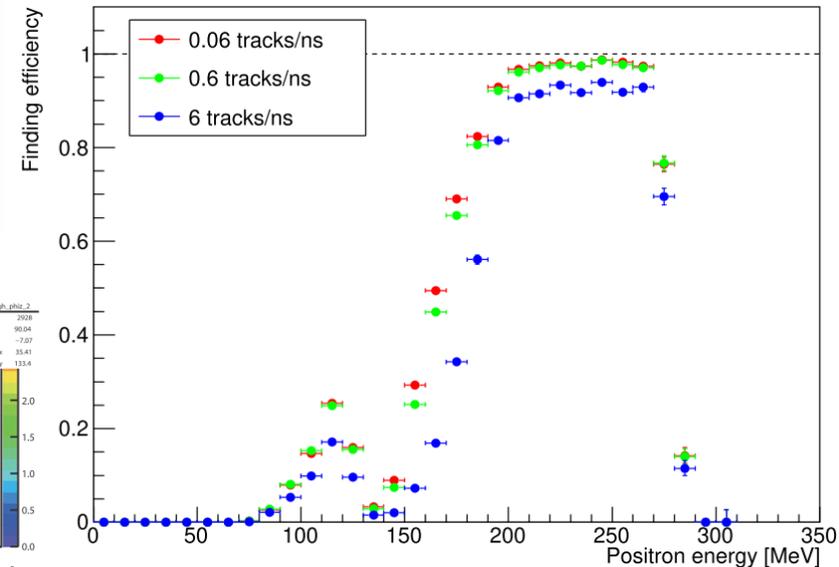
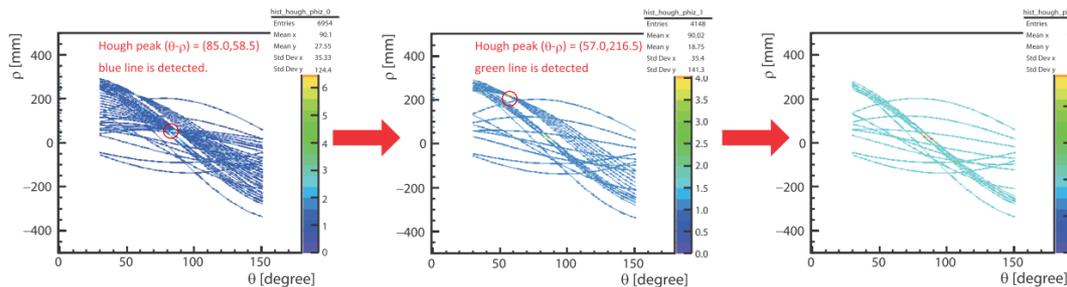
(0.6 tracks/ns, time window= 10 ns)

event display (x-y plane)

event display (ϕ -z plane)



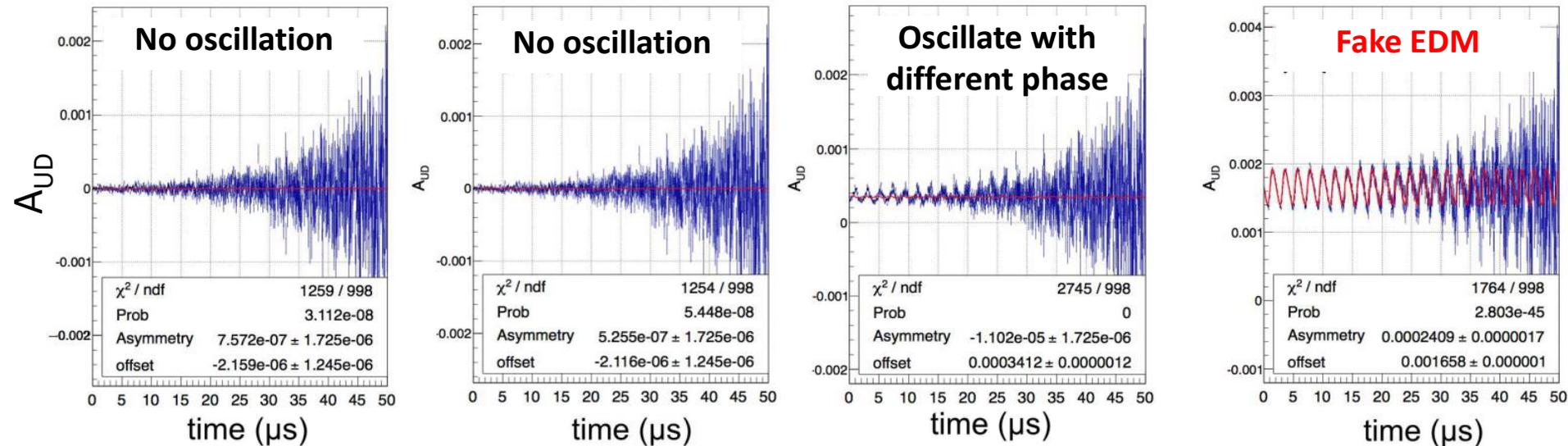
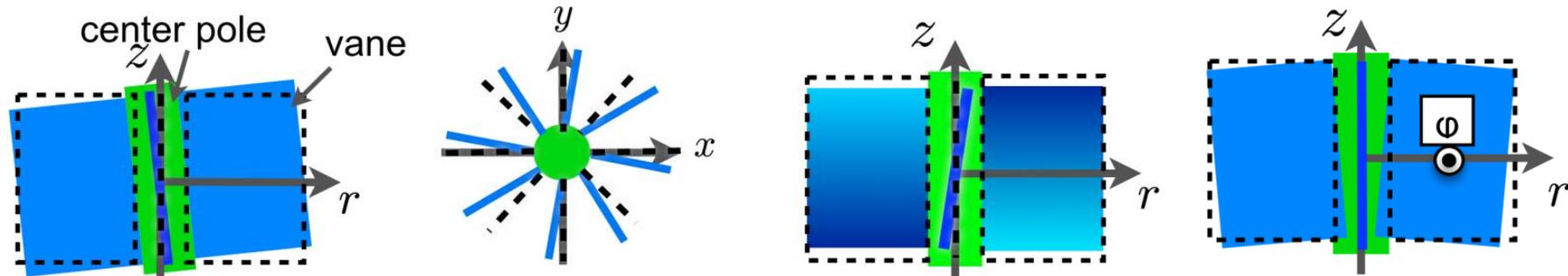
Track finding efficiency



Fake EDM Signal by Misalignment

- EDM is measured from up-down asymmetry “ A_{UD} ”.

Simulation with 1 mrad misalignment and null EDM signal



- The alignment must be controlled with $10 \mu\text{rad}$ accuracy to measure EDM with $10^{-21} e \cdot \text{cm}$.

Muon RF acceleration for the first time!

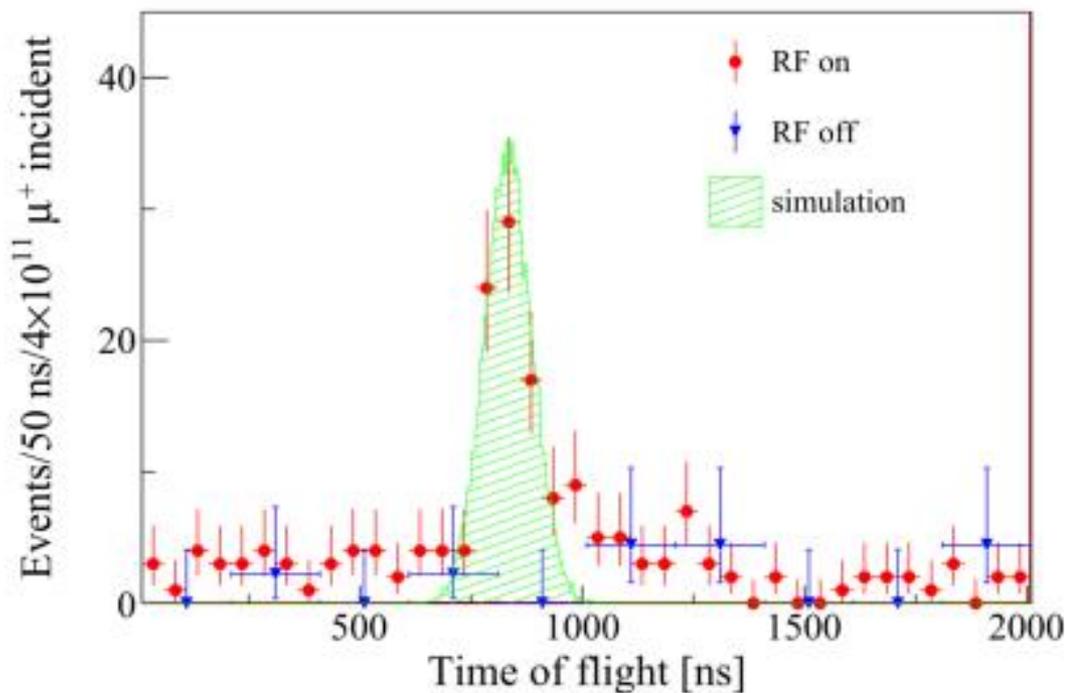
J-PARC MLF D2 area, October 2017

Slide by M. Otani

μ^+ (~4MeV)

5.6 keV

90 keV



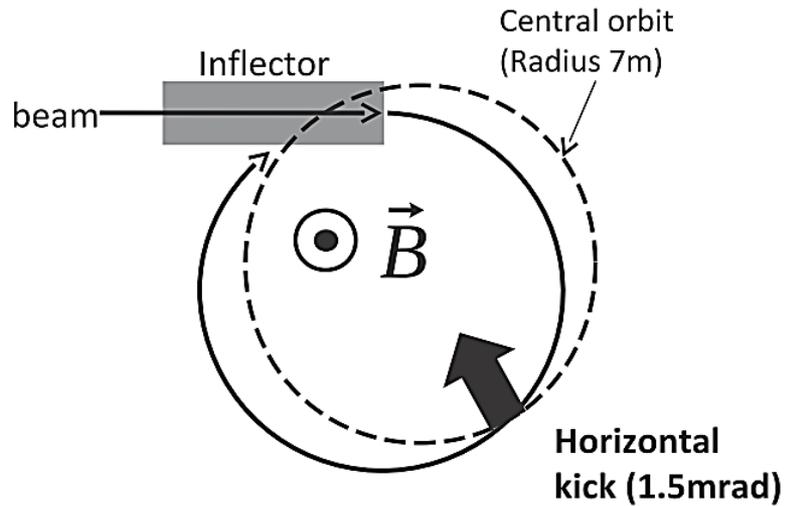
line pair

Detector

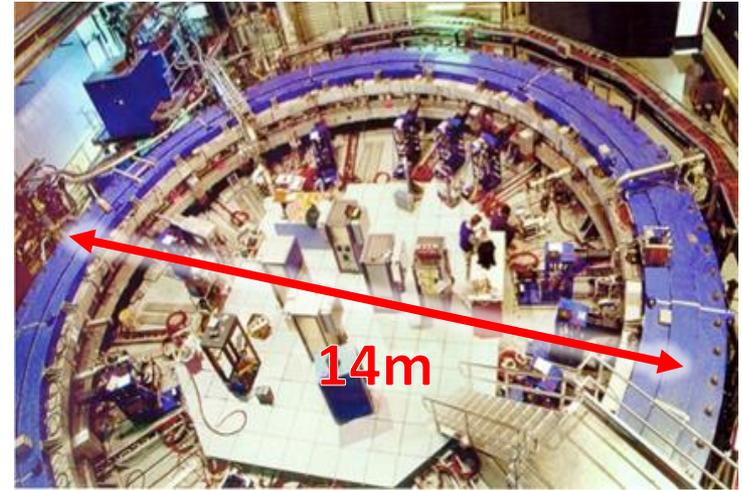
S. Bae et al., Phys. Rev. AB 21, 050101 (2018). (ending)

Muon Injection Scheme @BNL&FNAL

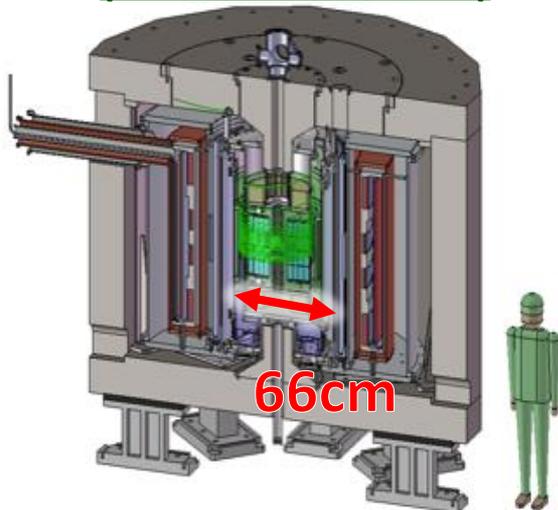
Horizontal injection + horizontal kicker



Storage ring @BNL & FNAL ($P = 3 \text{ GeV/c}$, 1.45T)



Our storage ring @J-PARC ($P = 300 \text{ MeV/c}$, 3T)

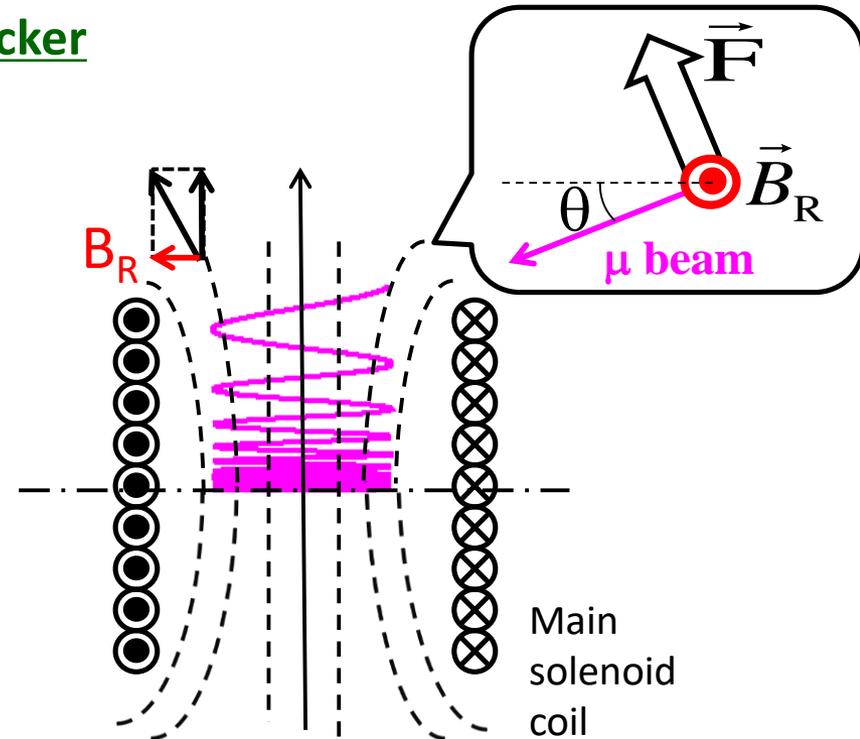
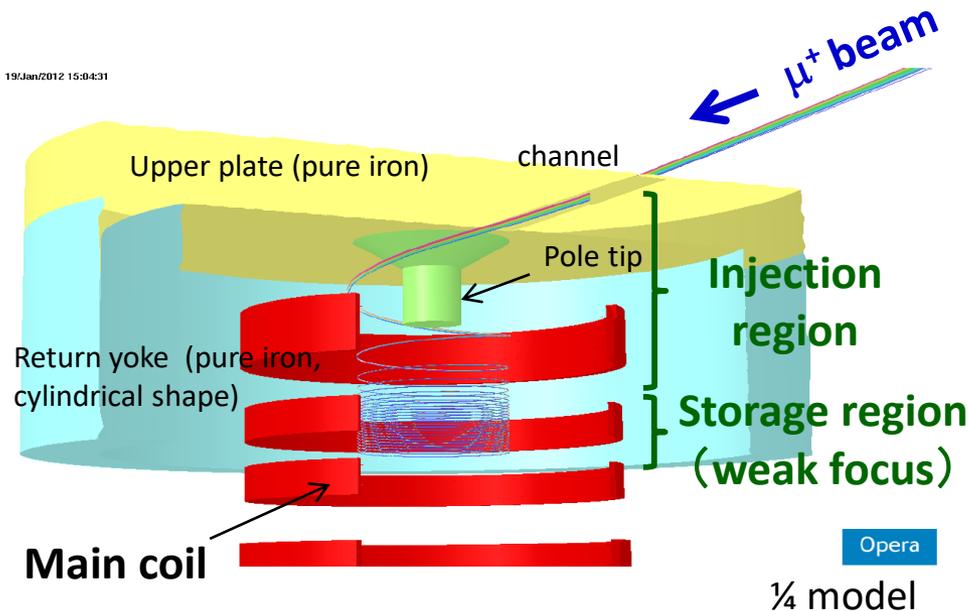


- 3T is too high to cancel fringe field by inflector.
- Kick angle required in our compact ring is too large and fast.

Muon Injection Scheme @J-PARC

- **3D-spiral injection scheme** has been designed. [H. linum et al. NIMA 832 \(2016\) 51](#)
 - Smooth connection btw **injection** and **storage regions** w/o any sources of error field.
 - Vertical motion is controlled by radial field (B_R).
 - **Pulsed magnetic kicker** to guide muon beam into stable orbit.
 - **Weak-focusing magnetic field** to hold muon beam in stable orbit.

3D spiral injection + kicker

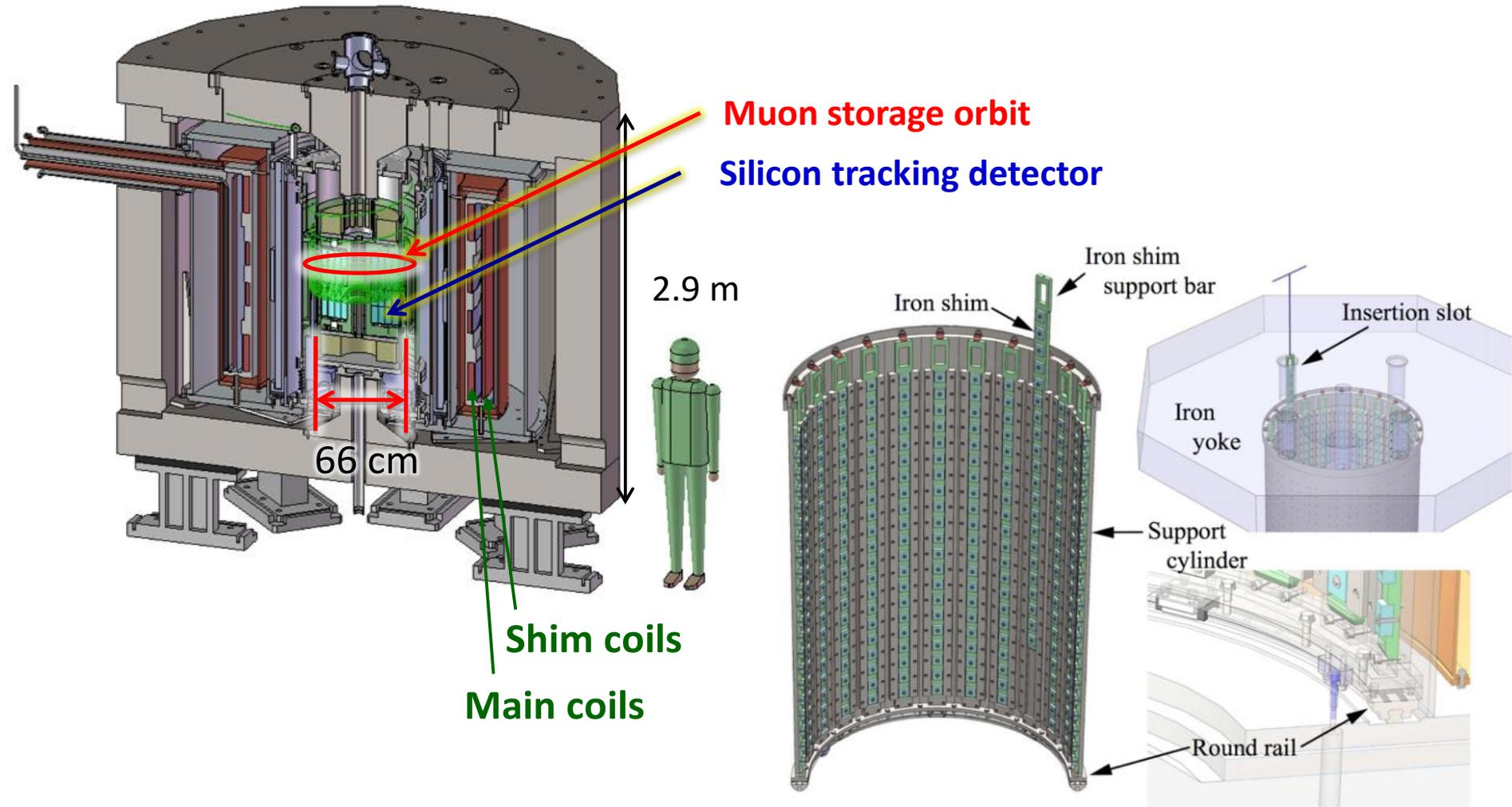


➤ **Higher injection efficiency : ~80%** \Leftrightarrow 3-5% @BNL E821 [PRD73 072003 (2006)]

Storage Magnet Design

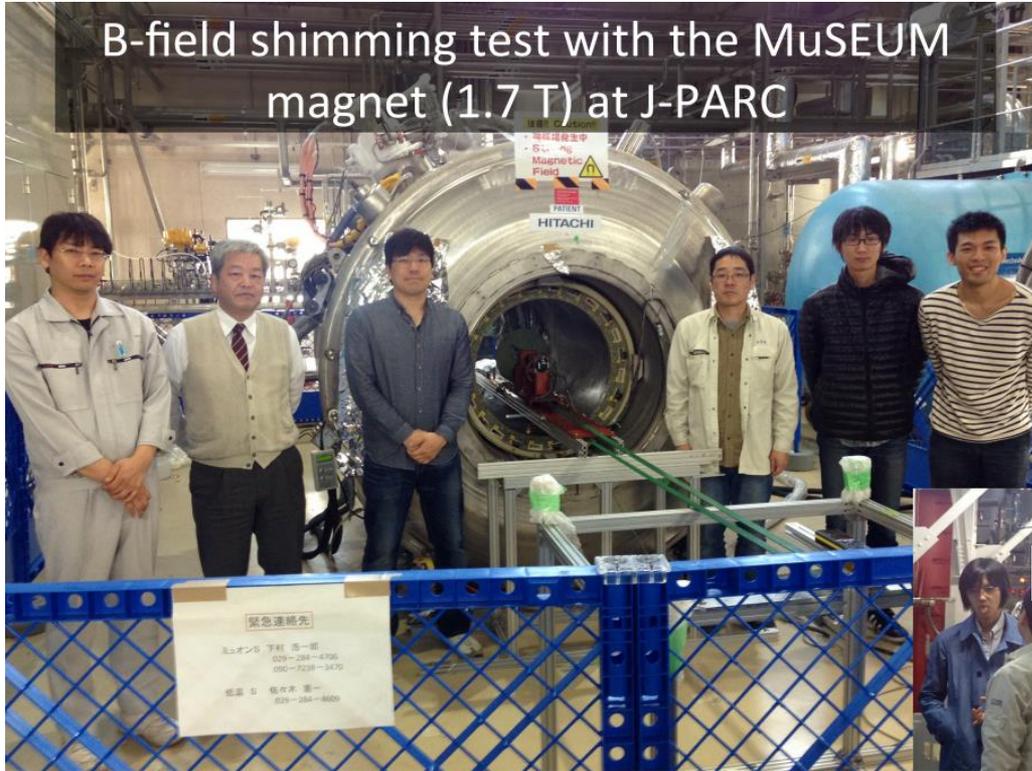
Super Precision Storage Magnet

- 3T with local uniformity of 1 ppm by iron shimming and superconducting shim coils.

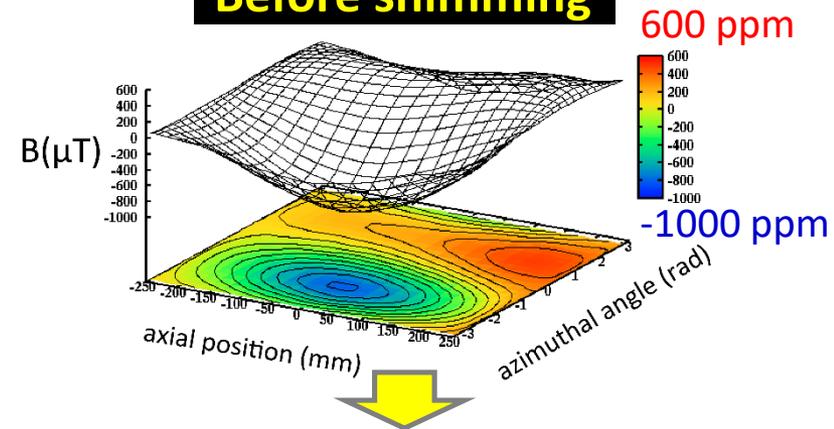


B-Field Shimming

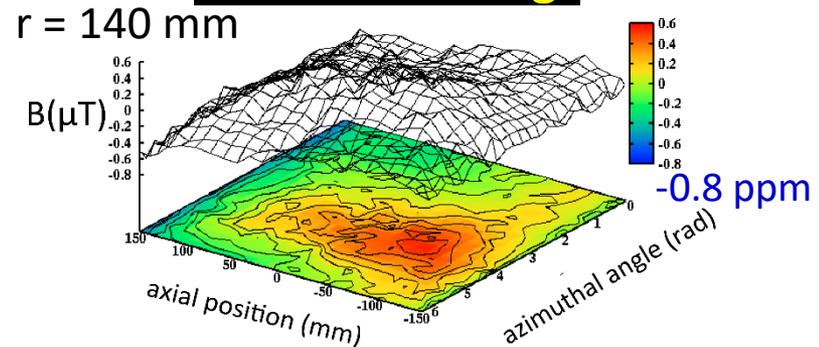
B-field shimming test with the MuSEUM magnet (1.7 T) at J-PARC



Before shimming

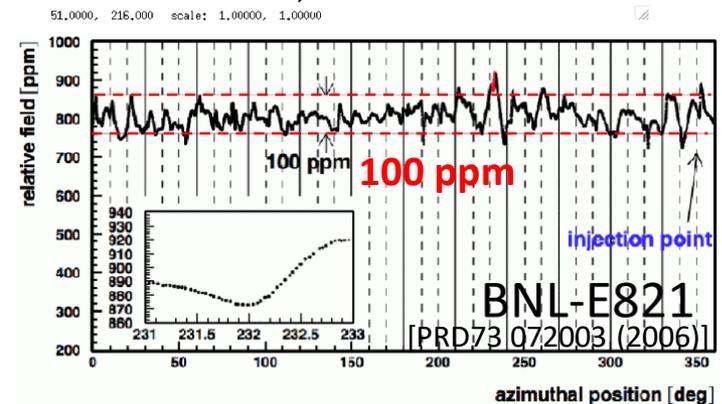


After shimming



$r = 140 \text{ mm}$

- ppm level uniformity is achieved by iron shimming.
- Shimming method is established.



Muon Beam Intensity

Table 14.1: Efficiency and beam intensity

Quantity	Reference	Efficiency	Cumulative	Intensity (Hz)
Muon intensity at production target	[2]			1.99E+09
H-line transmission	[2]	1.62E-01	1.62E-01	3.22E+08
Mu emission	[3]	3.82E-03	6.17E-04	1.23E+06
Laser ionization	[4]	7.30E-01	4.50E-04	8.97E+05
Metal mesh	[5]	7.76E-01	3.49E-04	6.96E+05
Init. Acc.trans.+decay	[5]	7.18E-01	2.51E-04	5.00E+05
RFQ transmission	[6]	9.45E-01	2.37E-04	4.72E+05
RFQ decay	[6]	8.13E-01	1.93E-04	3.84E+05
IH transmission	[7]	9.87E-01	1.90E-04	3.79E+05
IH decay	[7]	9.89E-01	1.88E-04	3.75E+05
DAW transmission	[8]	9.95E-01	1.87E-04	3.73E+05
DAW decay	[8]	9.61E-01	1.80E-04	3.58E+05
High beta transmission	[9]	1.00E+00	1.80E-04	3.58E+05
High beta decay	[9]	9.88E-01	1.78E-04	3.54E+05
Injection transmission	[10]	8.5E-01	1.42E-04	2.83E+05
Injection decay	[10]	9.9E-01	1.41E-04	2.80E+05
Detector start time	[10]	9.27E-01	1.30E-04	2.60E+05
Muon at storage				2.60E+05

Expected uncertainties

	Estimation
Total number of muons in the storage magnet	5.2×10^{12}
Total number of positrons	0.57×10^{12}
Effective analyzing power	0.42
Statistical uncertainty on ω_a [ppb]	450
Statistical uncertainty on ω_p [ppb]	100
Uncertainties on a_μ [ppb]	460 (stat.) < 70 (syst.)
Uncertainties on EDM [10^{-21} e·cm]	1.4 (stat.) 0.36 (syst.)

The Collaboration

99 “current” members from 41 institutions, 7 countries.

