

muon g-2

佐藤 優太郎

新潟大学

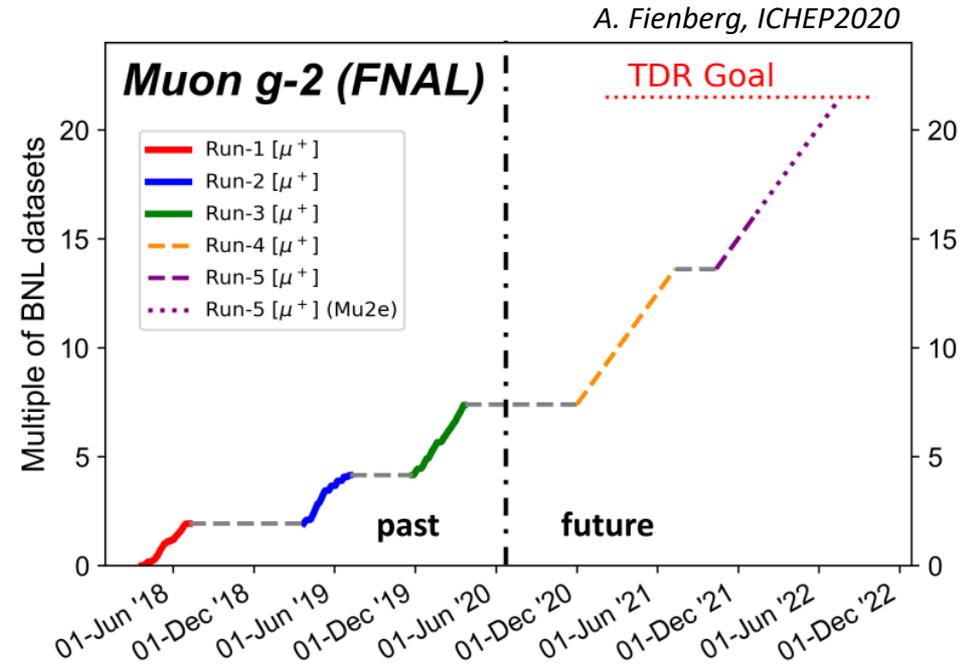
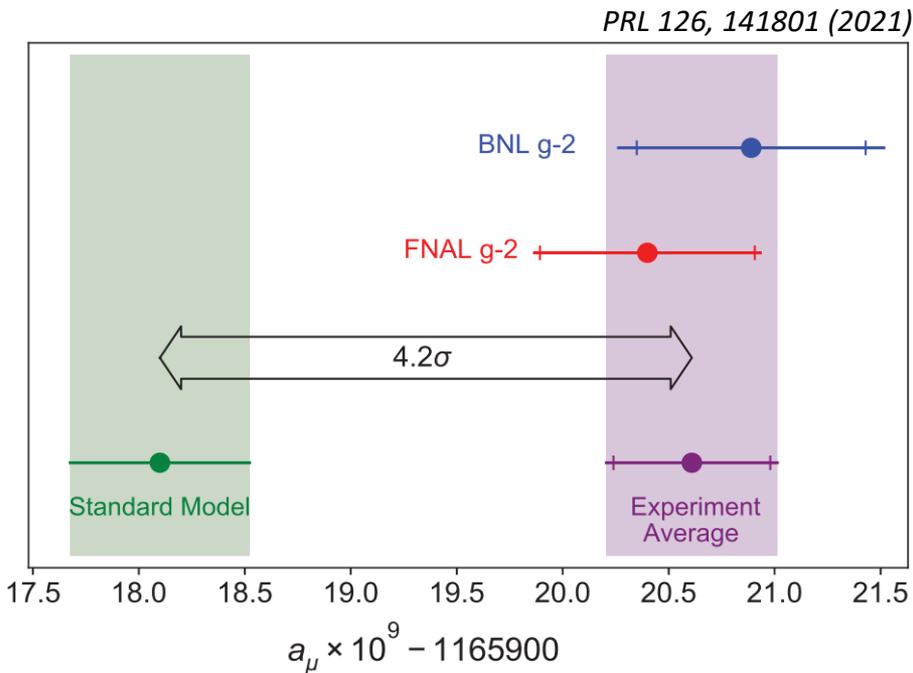
2021/09/08

基研研究会 素粒子物理学の進展2021

@online

ミューオン異常磁気能率($g-2$)

- 2021年4月, FNAL(フェルミ国立加速器研究所) の最初の結果が発表された。
 - BNL(ブルックヘブン国立研究所) の結果とは無矛盾な結果。
 - 実験と理論のずれは広がった($3.7\sigma \rightarrow 4.2\sigma$)。
- 現在、Run-2/Run-3 のデータを解析中。
- 最終的(~Run-5) にはBNL の20倍のデータを貯める予定。



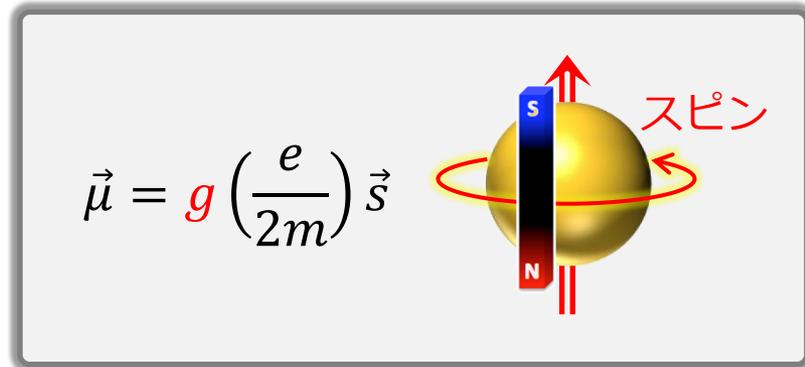
- FNAL はBNL から移設した蓄積リングを使用している。

→ 現在、FNAL, BNL とは全く異なる方式による実験をJ-PARCで準備中。

ミューオンの磁気・電気双極子能率

磁気双極子能率 ($g - 2$)

- 磁石の強さを表す。
- Dirac 方程式の最低次では、 $g = 2$ 。
- 実際は量子補正で2からずれる。
 - 異常磁気能率 $a_\mu = (g - 2)/2$



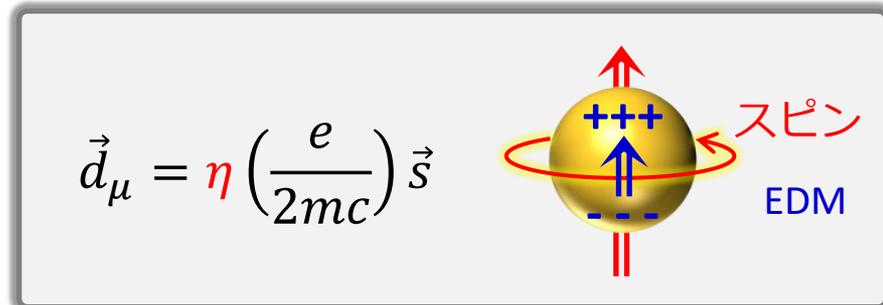
- $a_\mu =$

a_μ (電磁気力) QED	$+$ a_μ (強い力) Had.	$+$ a_μ (弱い力) EW	$+$ a_μ (新物理) e.g. SUSY
----------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	---

→ 新物理が寄与すると、 $g-2$ の値が標準理論の予言値からずれる。

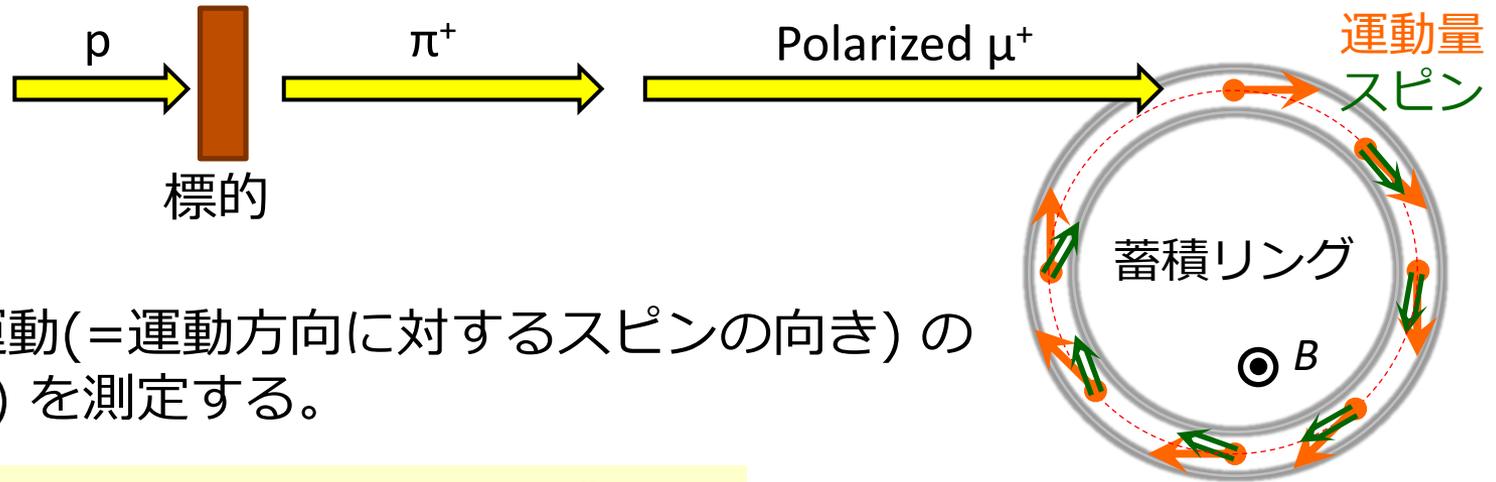
電気双極子能率 (EDM)

- 時間反転対称性を破る。
- 標準理論ではEDM はほぼ0。
- EDM を観測すると、**物質・反物質の謎を解く大きな手掛かり**になる。



ミューオン g-2 の測定方法

1. 偏極ミューオンビームを一様磁場中に入射する。



2. 異常歳差運動(=運動方向に対するスピンの向き)の周波数(ω_a)を測定する。

$$\omega_a = \omega_{\text{spin}} - \omega_{\text{cyclotron}} = -\frac{e}{m} a_{\mu} B$$

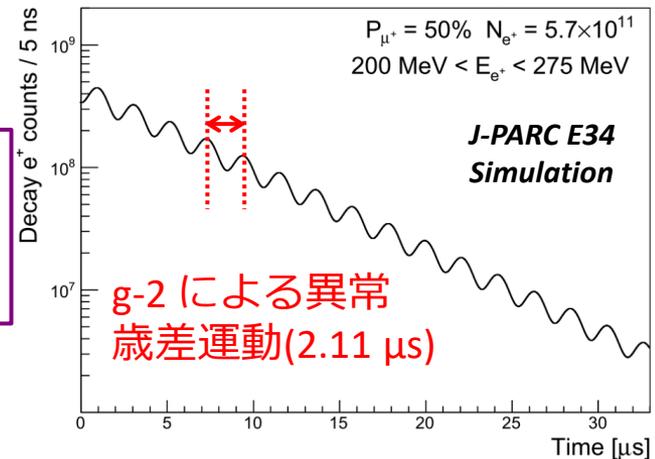
スピン歳差運動

$$\omega_{\text{spin}} = -\frac{geB}{2m} - (1-\gamma)\frac{eB}{\gamma m}$$

ラーモア歳差 トーマス歳差

サイクロトロン運動

$$\omega_{\text{cyclotron}} = -\frac{eB}{\gamma m}$$



- ミューオン崩壊で生じる高運動量の陽電子を捕らえる。

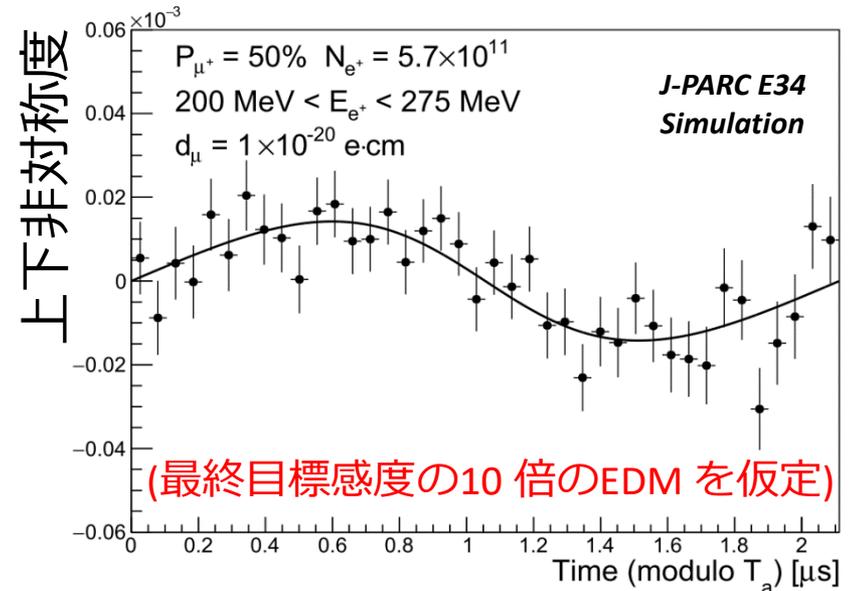
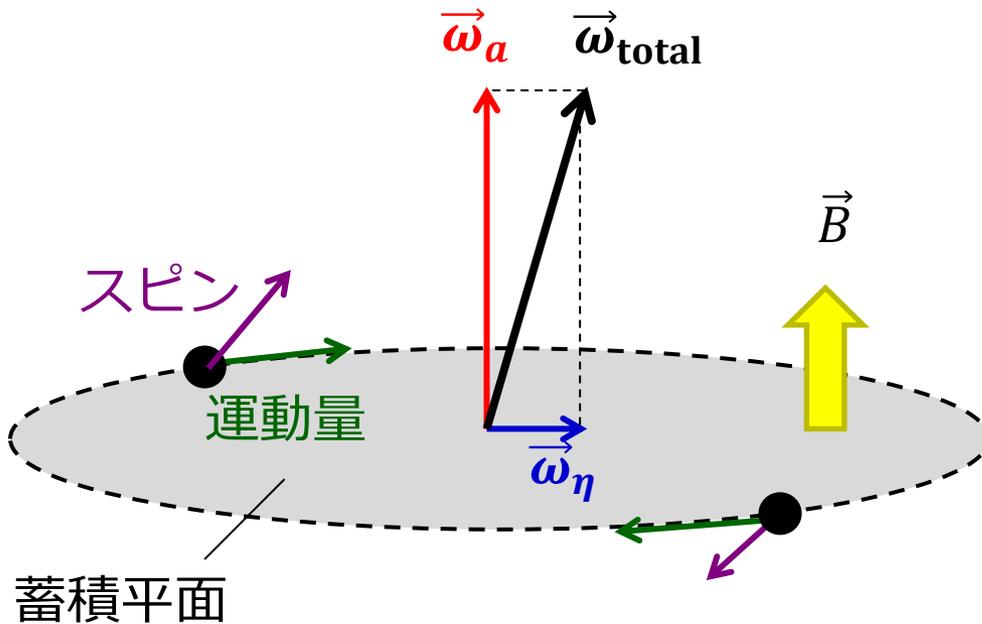
- 陽電子はミューオンのスピン方向に出やすい。

3. ミューオンが感じる磁場(B)を測定する。

ミュオン EDM の測定方法

- EDM の寄与があると、スピンの回転軸が磁場の向きからずれる。
 - 蓄積平面に対して、スピンの向いたり、下を向いたりする。
- 陽電子の放出角度(上下非対称度) から EDM を測定する。
 - 振幅が EDM に比例する。
 - $g-2$ の振動とは位相が90度ずれる。

$$\begin{aligned}\vec{\omega}_{\text{total}} &= \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta \\ &= -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]\end{aligned}$$



測定アプローチ

- 異常歳差運動の式は実際にはもう少し複雑。

異常歳差運動の式

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

第2項を相殺する
アプローチが異なる

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)

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

➤ FNAL E989 の実験が進行中。

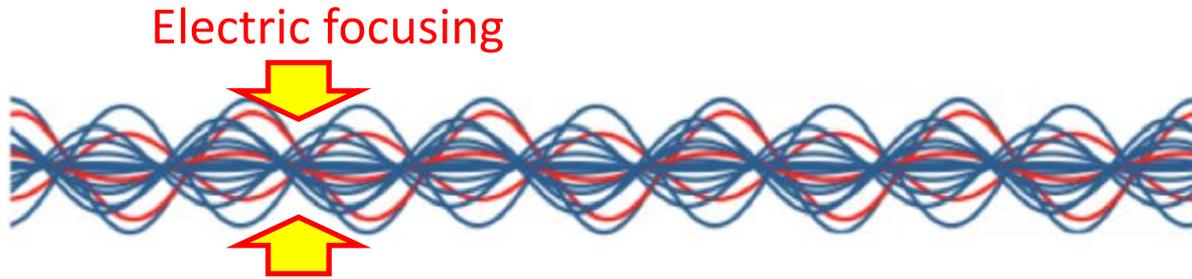
J-PARC E34 (新手法)

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

- BNL/FNAL の実験とは全く異なる手法による測定。

低エミッタンスミュオンビーム

- BNL, FNAL では電場を用いて、ビームを収束・蓄積する。



- J-PARC では電場を使えない。
- 広がりの少ない高品質なミュオンビームを作る。
(低エミッタンスミュオンビーム)



– $\frac{\sigma(p_T)}{p} < 10^{-5} \rightarrow 10 \text{ km 飛行しても広がりは10 cm}$

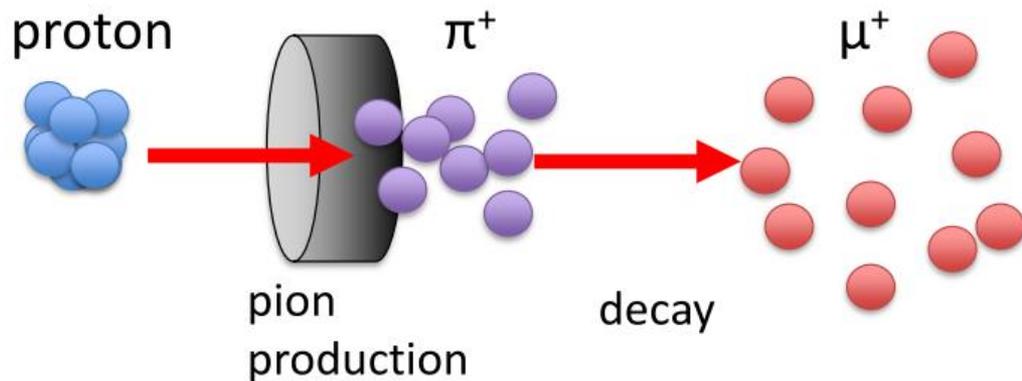
- 高品質なビームを使うことで、ビーム由来の系統誤差を抑える。

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

ビーム由来

低エミッタンスミュオンビーム

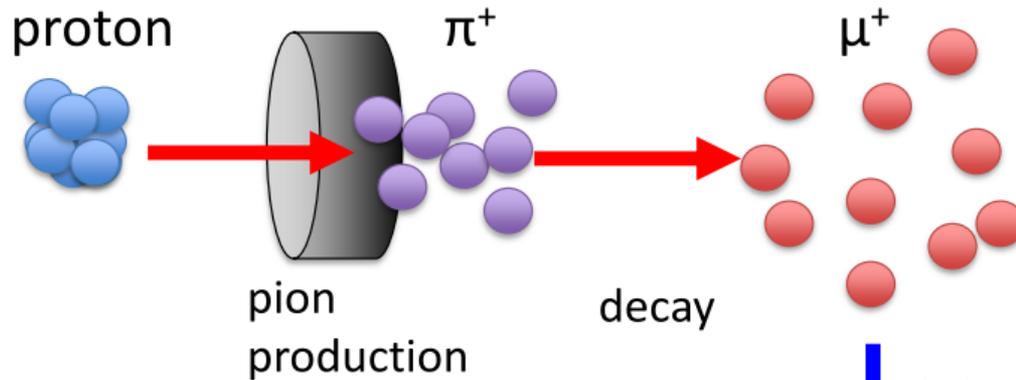


従来のミュオンビーム
エミッタンス $\sim 1000\pi$ mm*mrad

電場による強収束
ミュオンのロス
パイオンのバックグラウンド



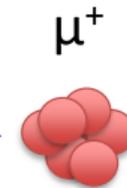
低エミッタンスミュオンビーム



従来のミュオンビーム
エミッタンス $\sim 1000\pi \text{ mm}^*\text{mrad}$

電場による強収束
ミュオンのロス
パイオンのバックグラウンド

冷却&加速



低エミッタンスミュオンビーム
エミッタンス $\sim 1\pi \text{ mm}^*\text{mrad}$

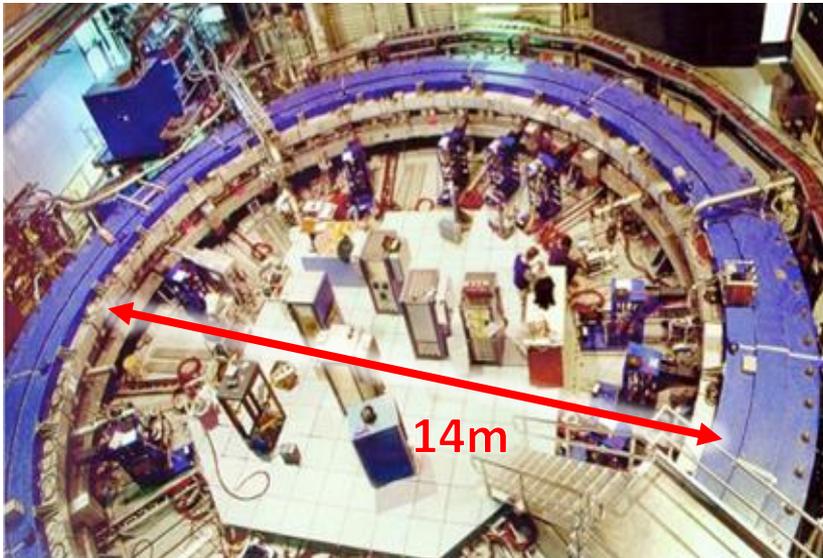
上記の問題なし



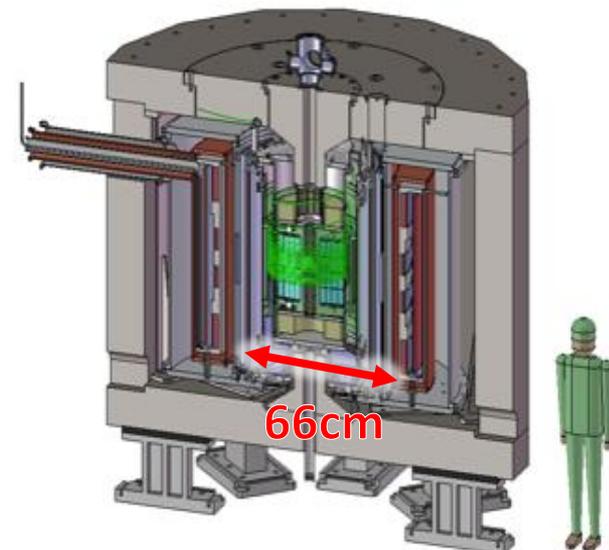
高い一様性の磁場

- MRI 型磁石を使用して、一様性の高い磁場を生成する。
 - MRI 磁石の一般的な強さ(3T) かつ有効体積(直径66 cm)。
- ミューオンの運動量は300 MeV/c に設定。
- 大変なことも...
 - コンパクトなリングにどうやって、ミューオンビームを**入射**するのか。
 - ミューオン崩壊で生じる陽電子が密に飛んでくるので**検出**が大変。

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

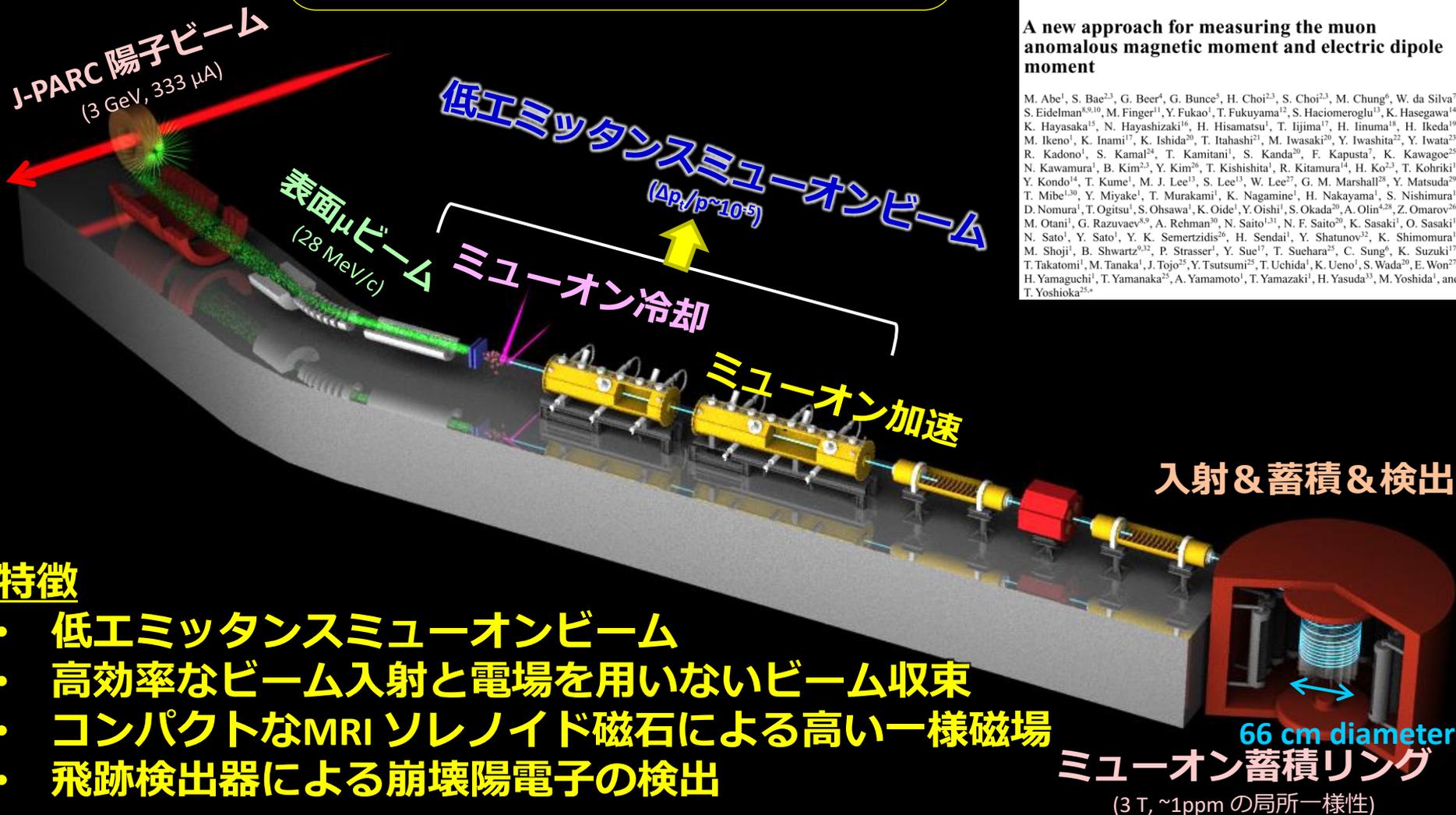
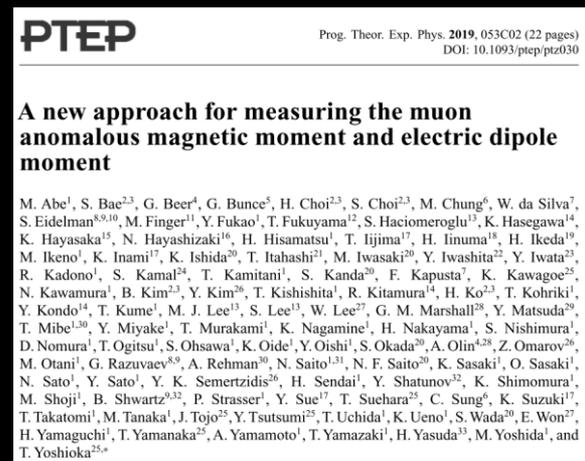


J-PARC (P = 300 MeV/c, 3T)



	先行実験	目標精度
g-2	[0.46 ppm @FNAL 0.54 ppm @BNL]	→ 0.1 ppm
EDM	<1.8 × 10 ⁻¹⁹ e · cm@BNL	→ < 10 ⁻²¹ e · cm

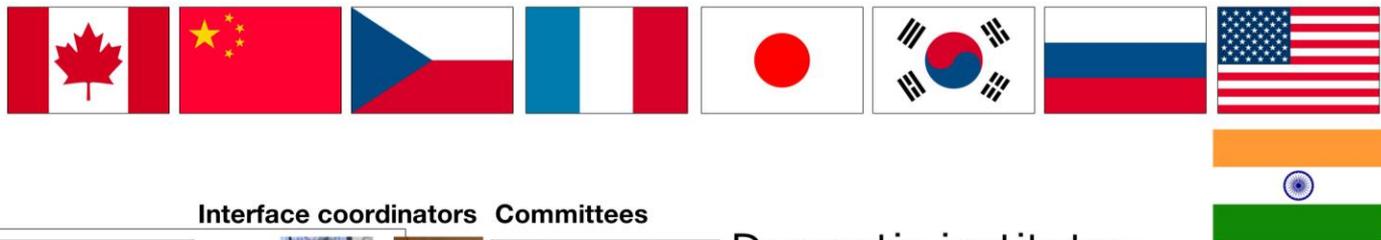
TDR summary paper
(*PTEP 2019, 053C02*)



- 特徴**
- 低エミッタンスミュオンビーム
 - 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
 - コンパクトなMRI ソレノイド磁石による高い一様磁場
 - 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

J-PARC muon g-2/EDM コラボレーション

110 members from Canada, China, Czech, France, India, Japan, Korea, Russia, USA



Collaboration board (CB)
Chair: Seonho Choi



Executive board (EB)
Spokesperson: T. Mibe

Subgroups

Interface coordinators

Committees

Surface muon beam
leader: T. Yamazaki, N. Kawamura

Ultra-slow muon
leader: K. Ishida, G. Marshall

LINAC
leader: Y. Kondo, M. Otani

Injection and storage
leader: H. Iinuma

Storage magnet, field measurements

Detector
leader: T. Yoshioka

DAQ and computing
leader: Y. Sato, S. Lee

Analysis
leader: T. Yamanaka (K. Hayasaka)



K. Ishida



M. Otani

Y. Kondo

H. Iinuma

T. Kume

Y. Sato

T. Suehara

T. Yamanaka

Speakers committee
chair: K. Ishida, E. Won

Publication committee
chair: S. Eidelman

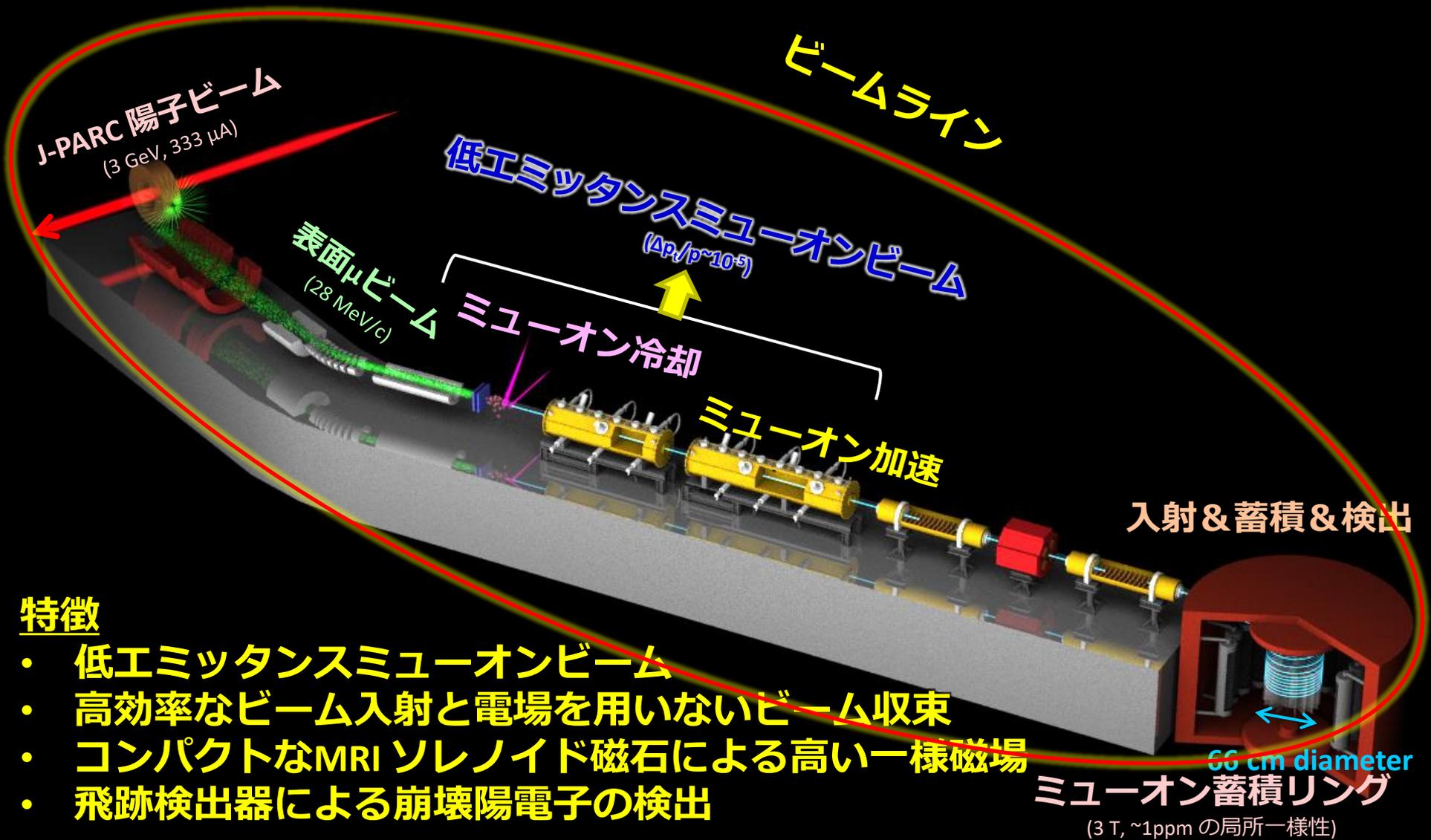
Domestic institutes:
Kyushu, Nagoya, Tohoku, Niigata,
Tokyo, Ibaraki, RIKEN, JAEA, etc.

KEK: IPNS, IMSS, ACC, CRY,
MEC, CRC



19th collaboration meeting (@J-PARC, Dec. 2019)

- 2019年
 - 実験の技術設計書(TDR) の要約論文がPTEP に掲載。
 - [M. Abe et al., PTEP 2019 \(2019\) 053C02](#)
 - KEK 物構研がStage-2 を承認。
 - KEK 素核研は2018 年にStage-2 承認済み。
 - KEK 国際諮問委員会がE34 実験を次期優先将来計画として支持 (KEK PIP2016)。
- 2020年
 - KEK から文科省への概算要求を開始。
 - 科研費 特別推進研究に採択。



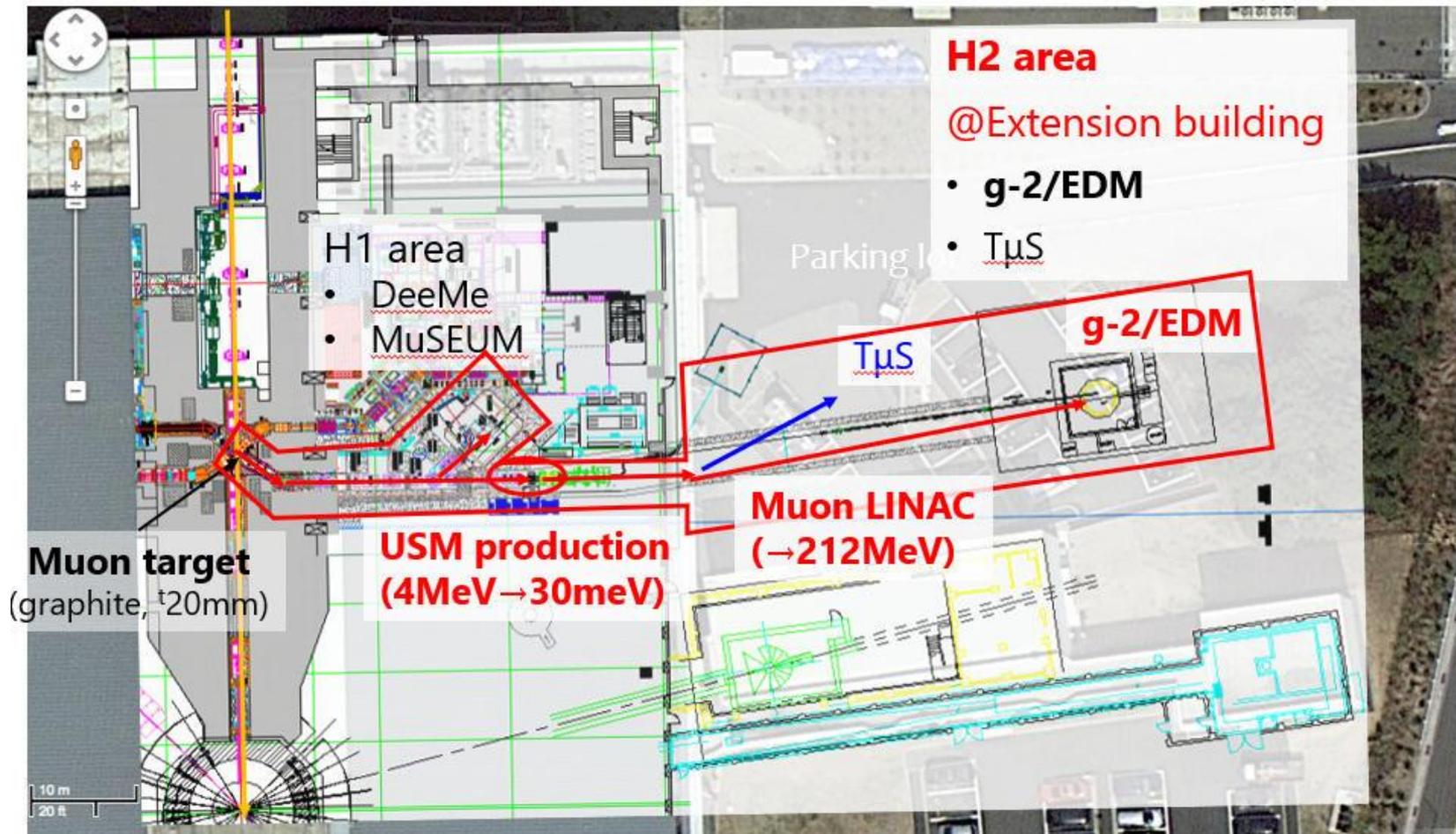
特徴

- 低エミッタンスミューオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
- コンパクトなMRI ソレノイド磁石による高い一様磁場
- 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出



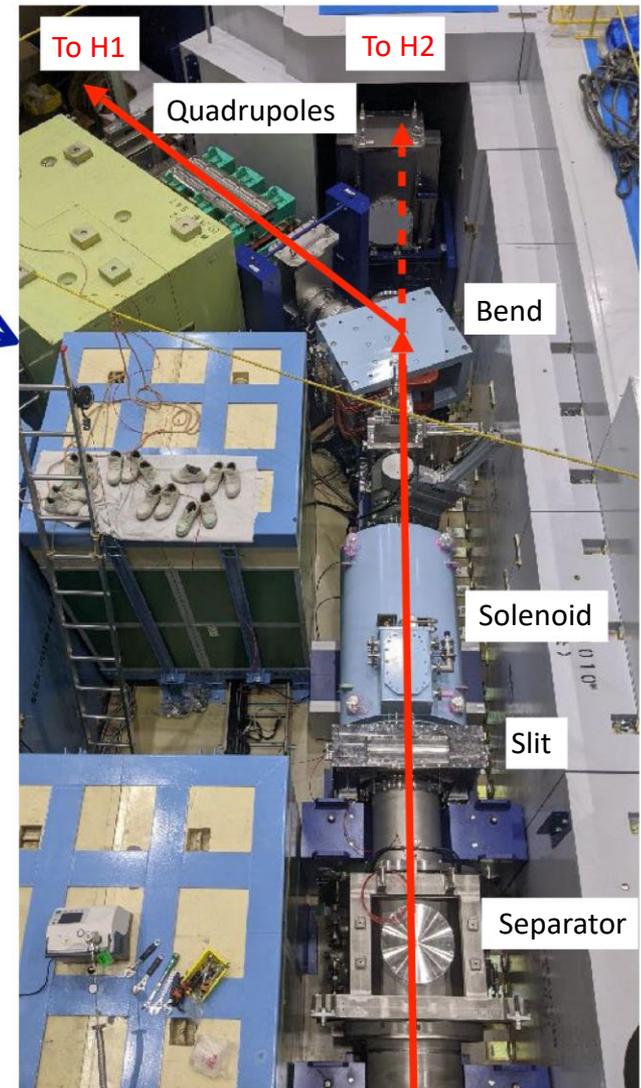
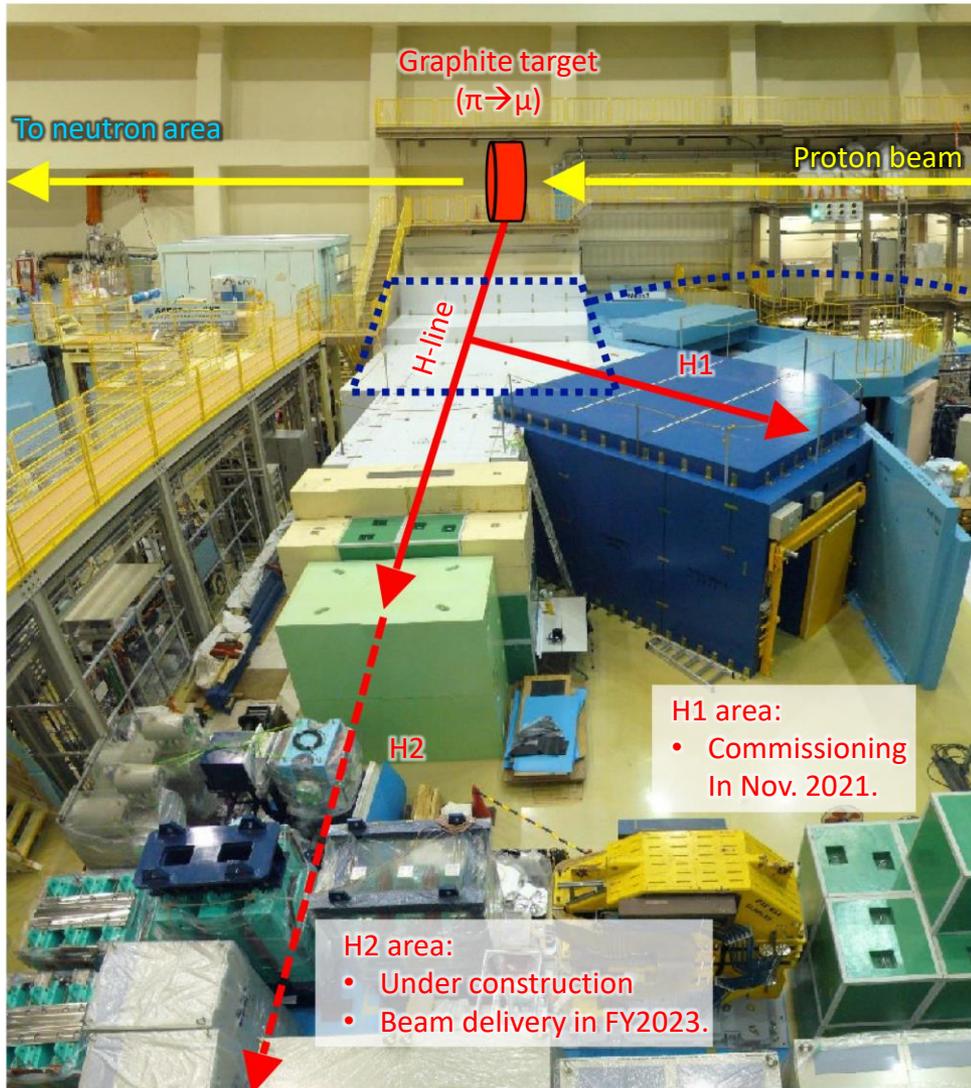
H-Line

- 高強度のミュオンビームを長時間使用するため、MLF ミュオン施設内に専用のビームライン(**Hライン**)を建設中。
- g-2 実験が行われる予定の**H2 エリア**は既存の建物を拡張して作られる。

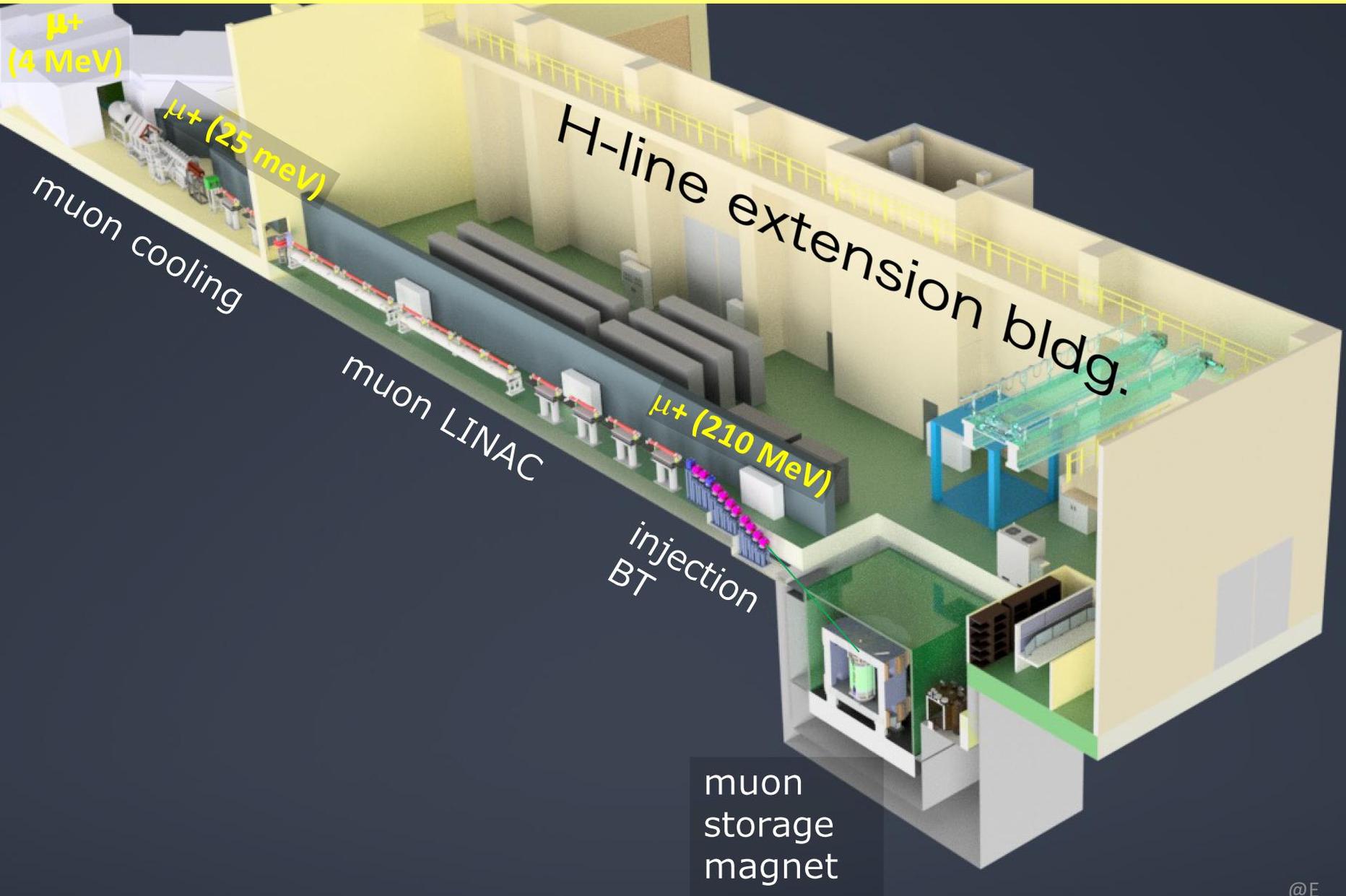


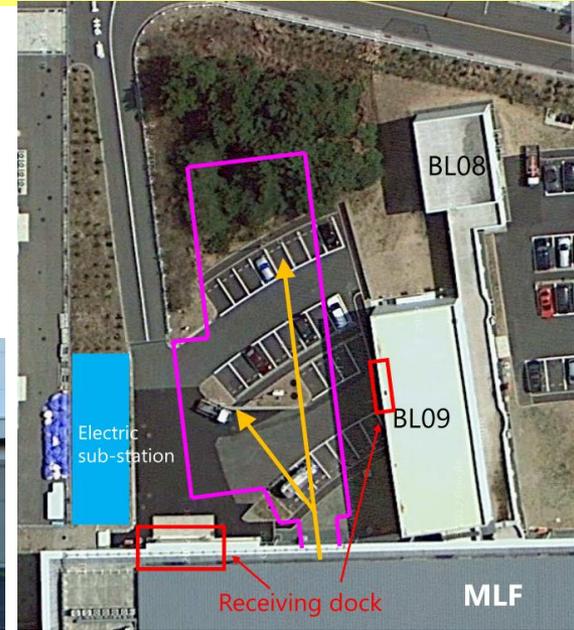
H1 エリアの建設状況

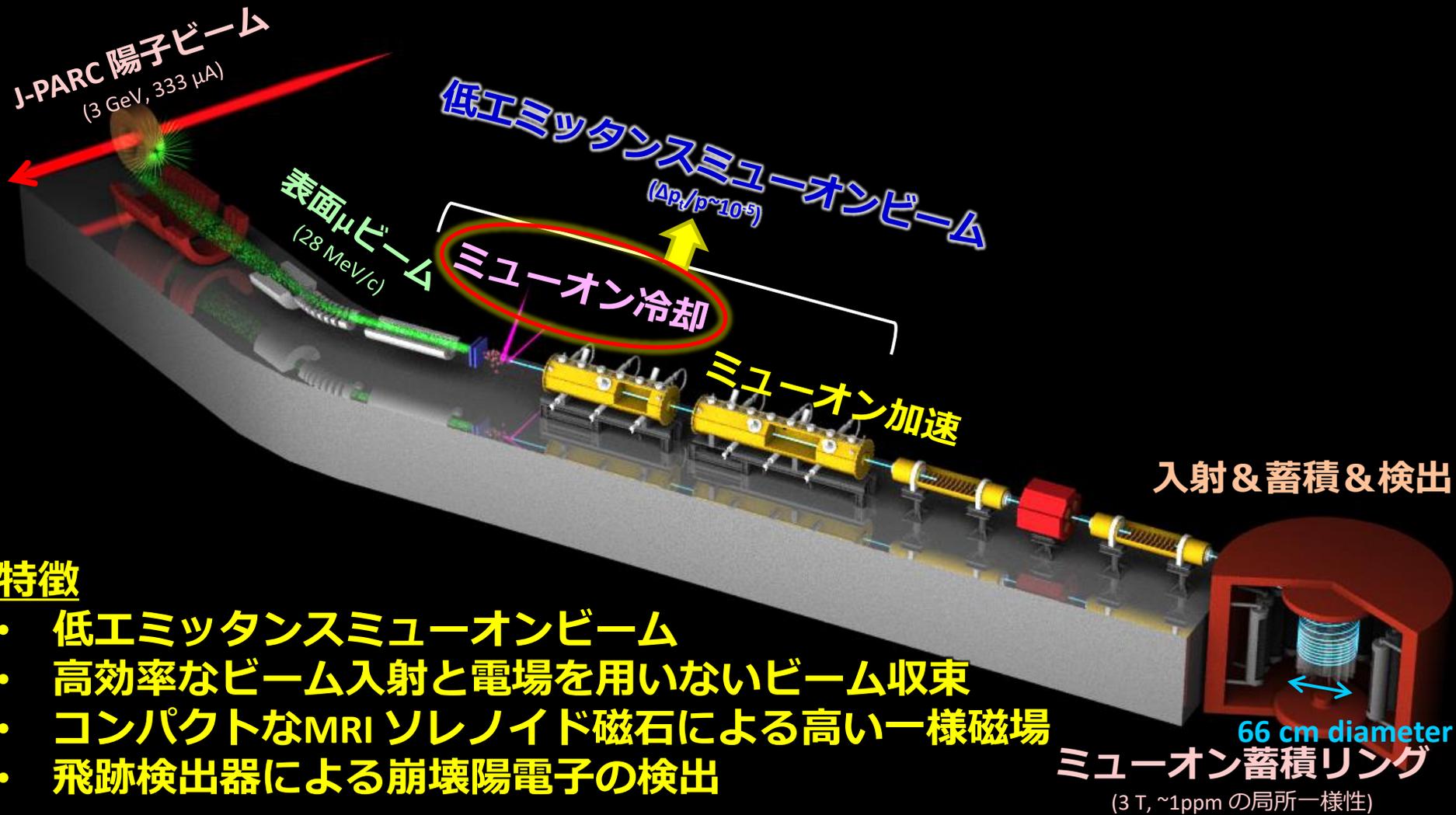
- 今年の11月にコミッショニングを開始する予定。



H2 エリアの建設状況



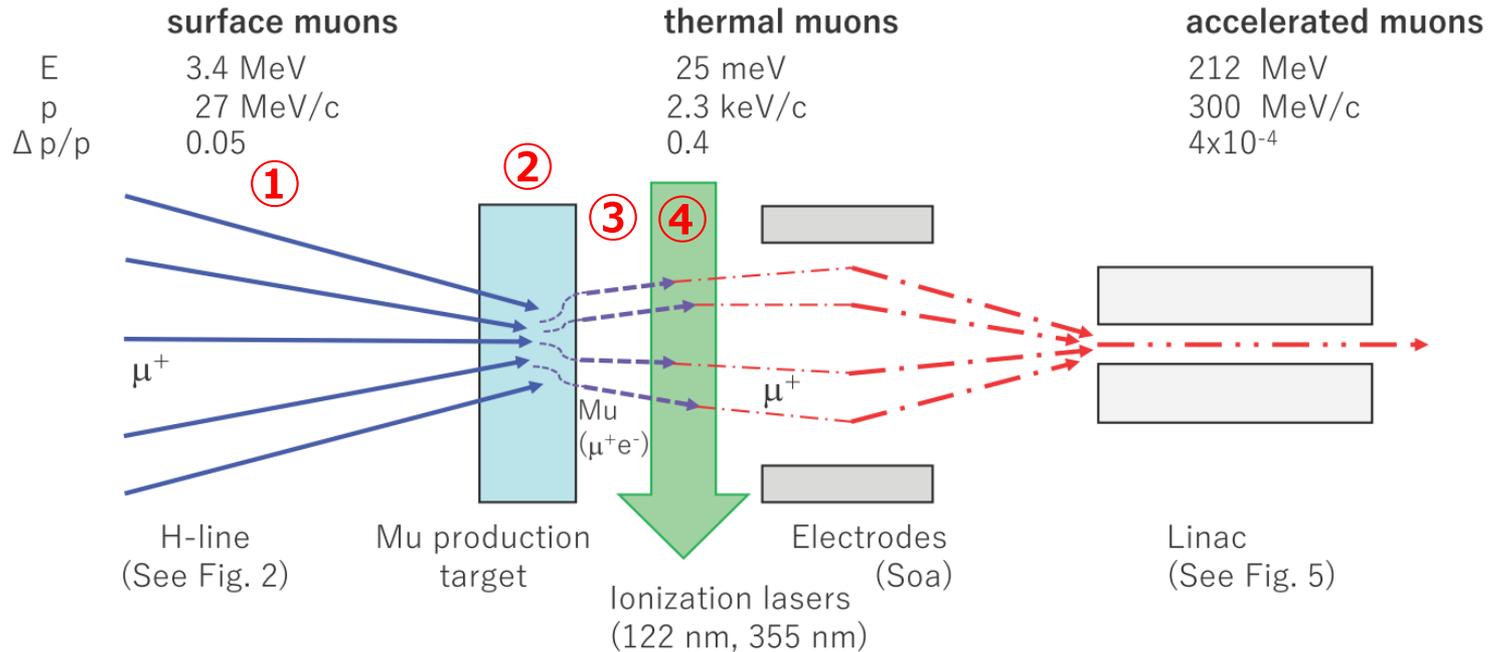




特徴

- 低エミッタンスミューオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
- コンパクトなMRI ソレノイド磁石による高い一様磁場
- 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

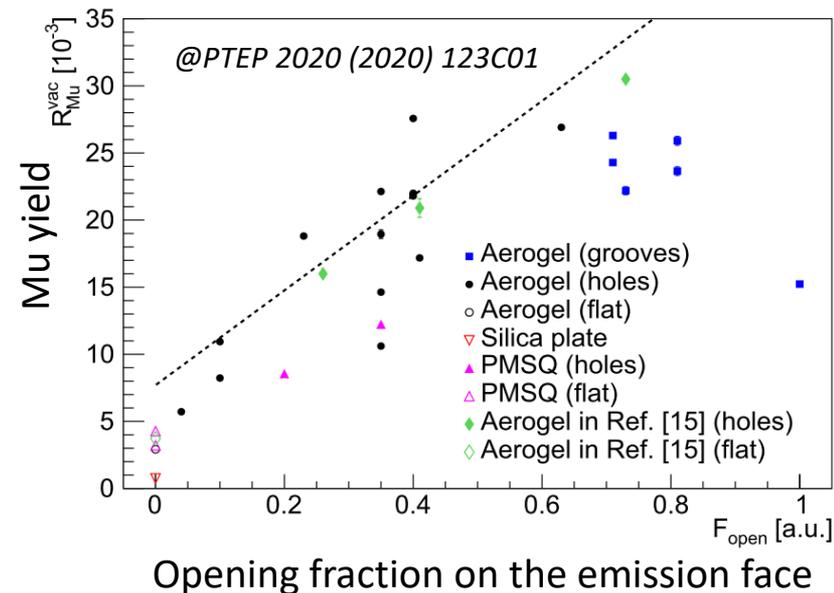
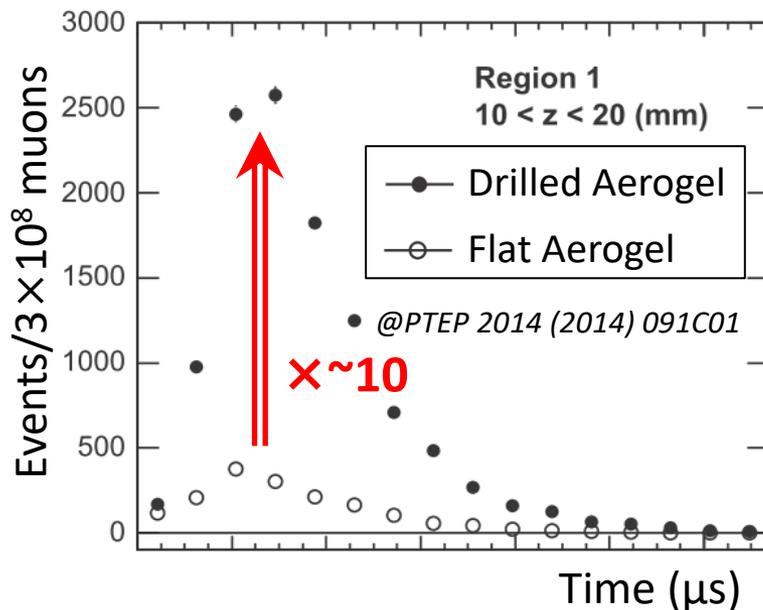
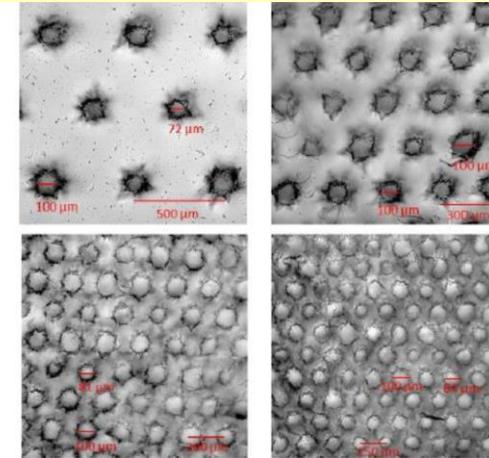
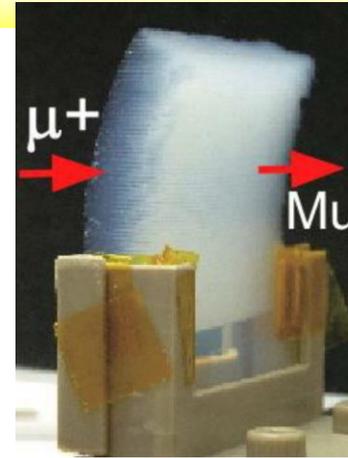
冷却：ミュオン源



- ① 表面ミュオンビームを標的に入射。
 - ② ミュオンは標的中に止まり、**ミュオニウム(μ^+e^-)**を形成する。
 - ③ 熱拡散により、ミュオニウムが標的から放出される。
 - ④ **レーザー**でミュオニウムの電子をはぎ取る。
- 熱エネルギー(25 meV)程度の**超低速ミュオン**が得られる。

冷却：ミューオニウム生成標的

- 標的として、**シリカエアロゲル**を使用。
 - 千葉大で開発されたBelle II ARICH 用エアロジェル生成技術を応用。
- レーザーアブレーションで穴をあけることにより、ミューオニウムの生成効率が向上(x10)。
 - 2年間の実験期間でBNLの測定精度に達する。
- 様々なパターンで穴をあけて、ミューオニウムの生成効率を測定。長期間の安定性なども評価。

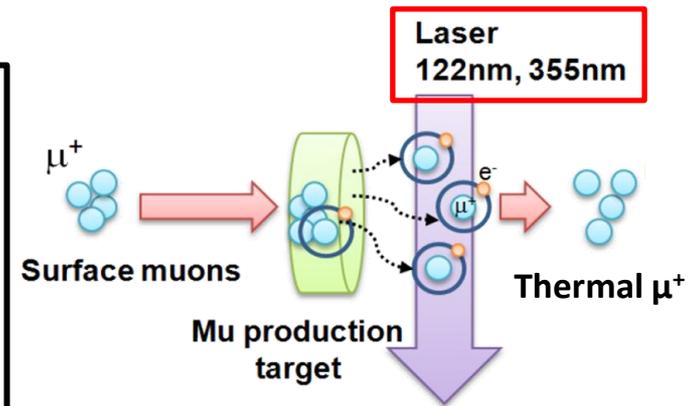
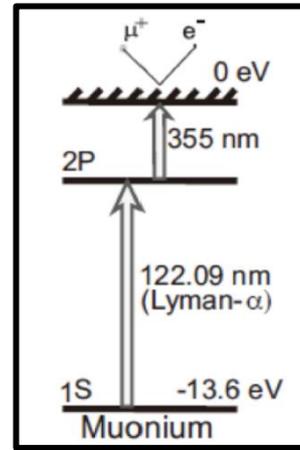


冷却：イオン化レーザー

- ミューオニウムから電子をはぎ取る(イオン化)には高強度のレーザーが必要。

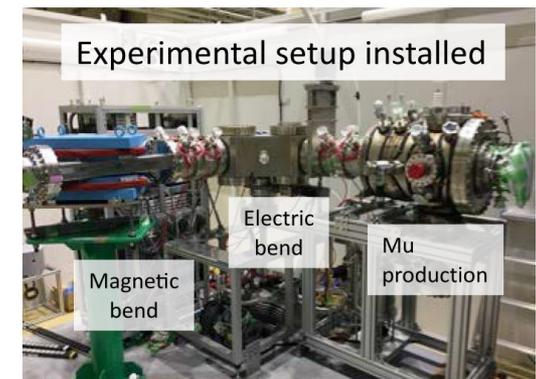
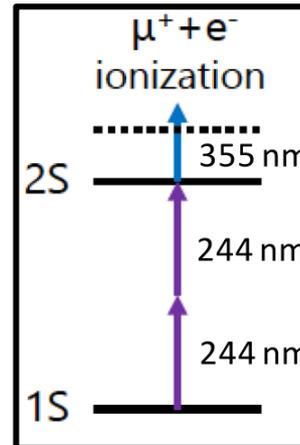
• Mu 1S-2P 遷移 (baseline)

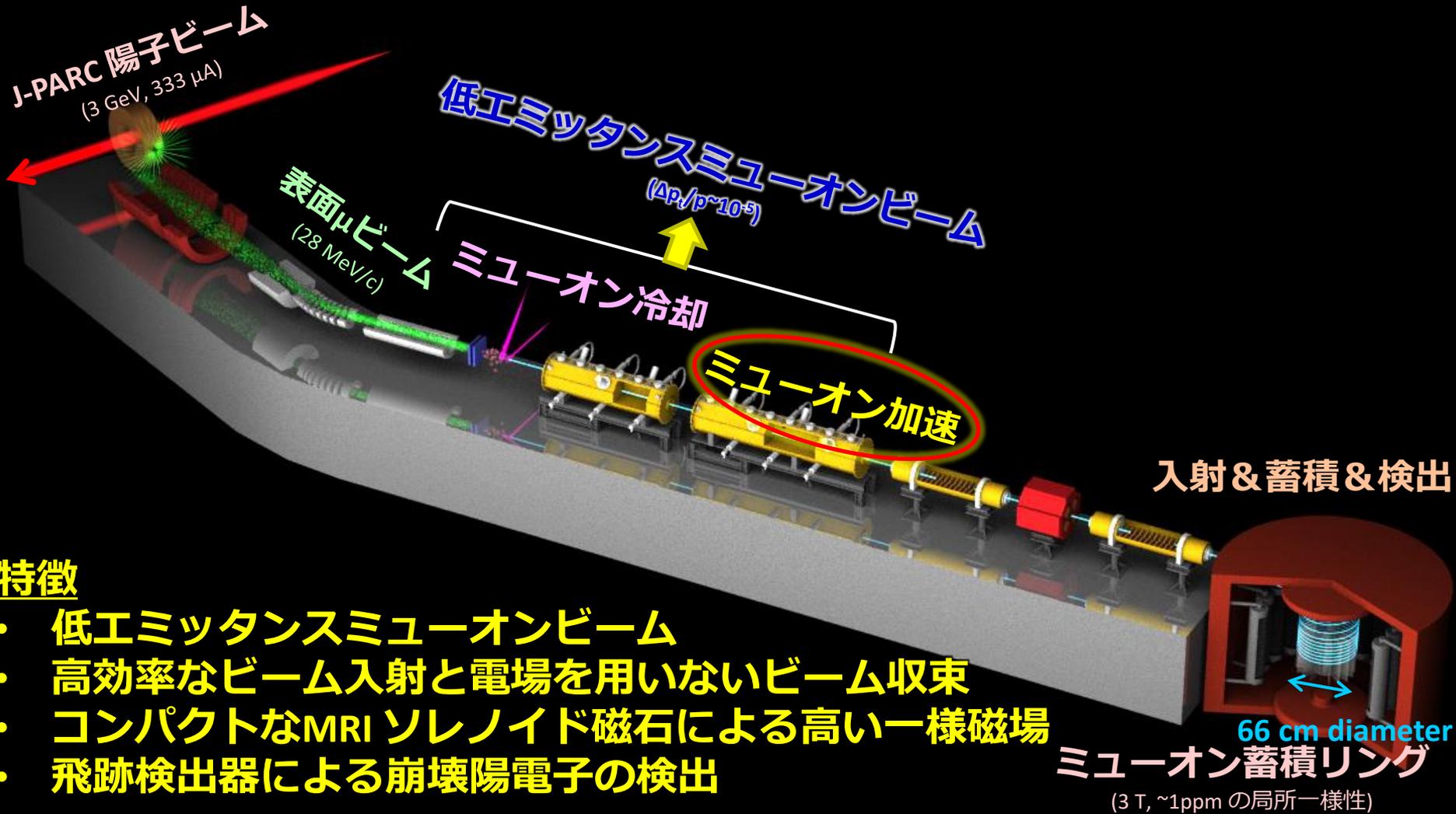
- 1光子励起過程なので、遷移強度が高い。
- 波長122 nm 真空紫外パルスレーザーを使用。
- MLF U-line でレーザーをコミッショニング中。



• Mu 1S-2S 遷移 (Plan B)

- 2光子励起過程なので、遷移強度は劣る。
- 波長244 nm の深紫外パルスレーザーを使用。
- 技術的には熟成している。
- 2021年秋から、専用ビームラインを使用して、試験予定 (@MLF S-line)。



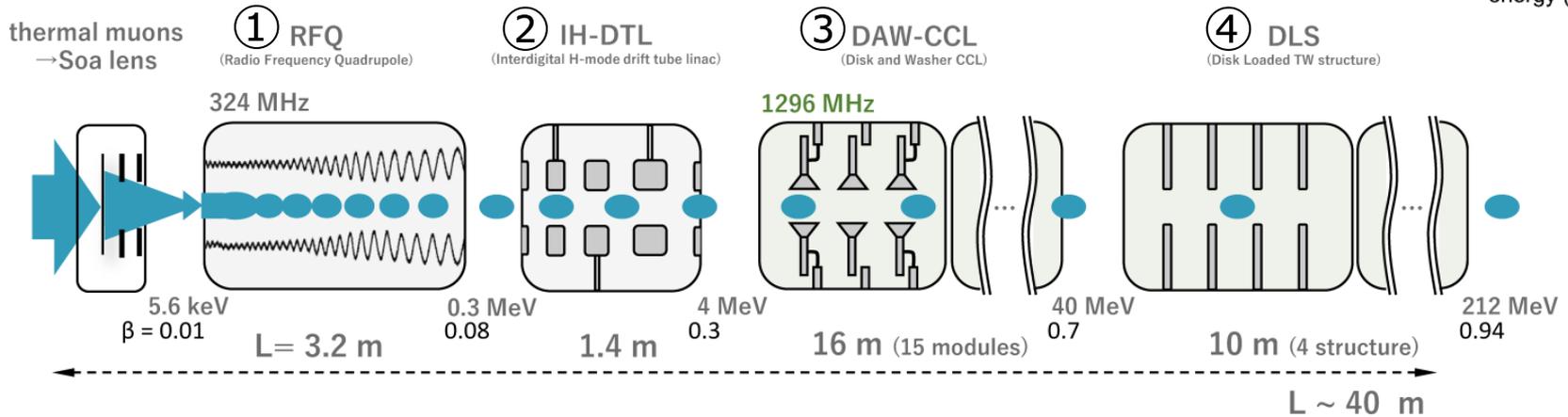
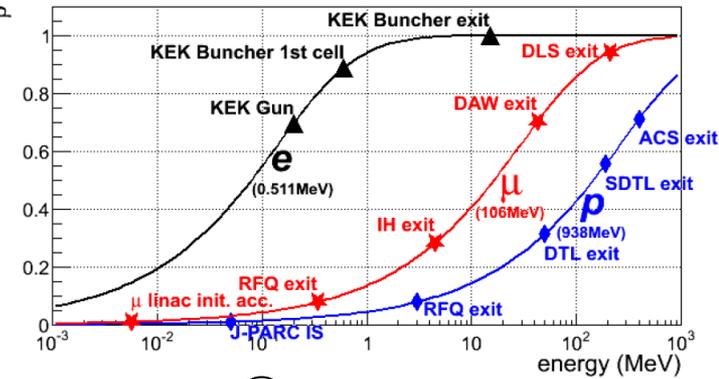


特徴

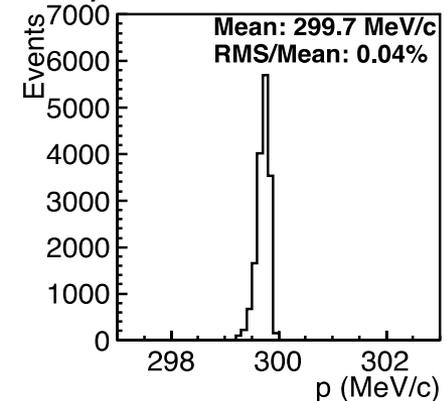
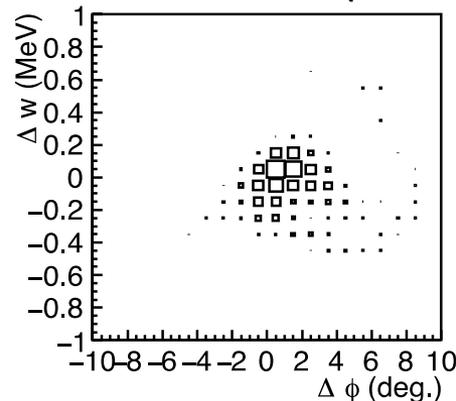
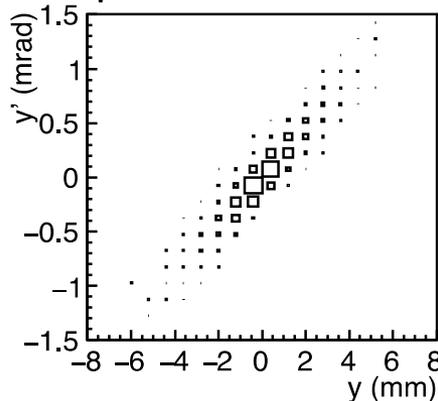
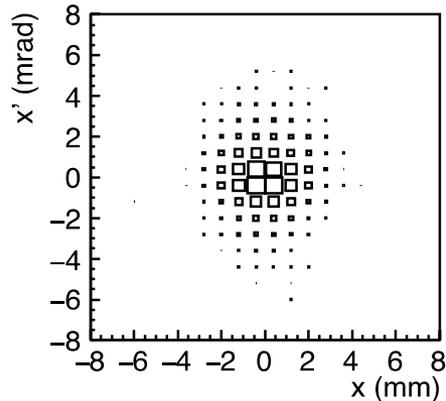
- 低エミッタンスミューオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
- コンパクトなMRI ソレノイド磁石による高い一様磁場
- 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

ミュオン加速

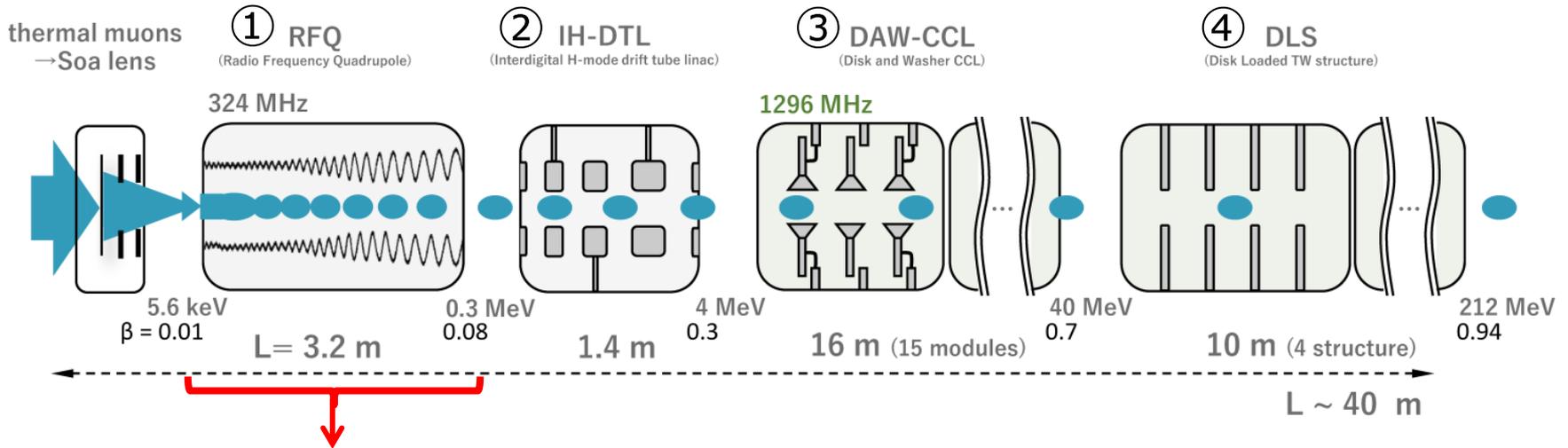
- ミュオンビームを300 MeVまで再加速する。 ^{β}
 - 崩壊による損失を抑えるため素早く加速する。
 - エミッタンスを増加させない。
- 4種類の加速キャビティを使用して、広い β 領域をカバーする。



Phase space distributions after muon LINAC (simulation)

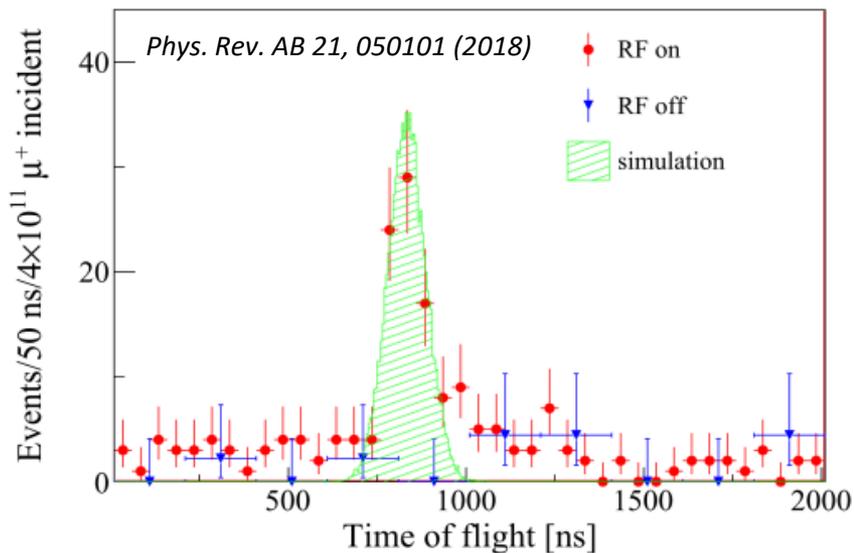


ミュオン加速の開発状況(1/2)

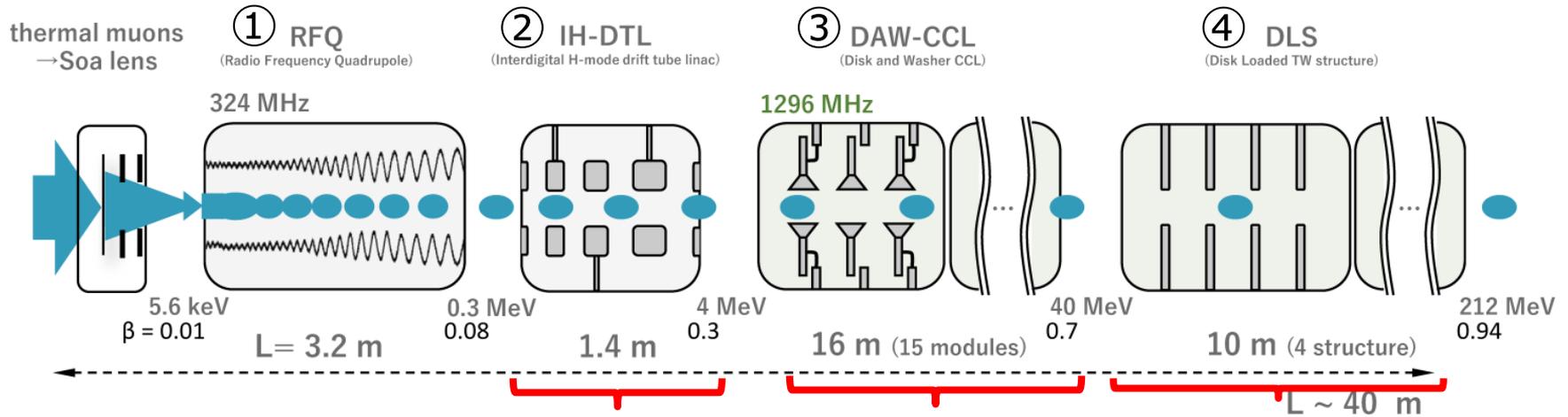


RFQ を用いて世界で初めてのミュオン加速に成功。

- 負イオン化したミュオニウムを加速。
- 次のマイルストーンは冷却したミュオンの加速。

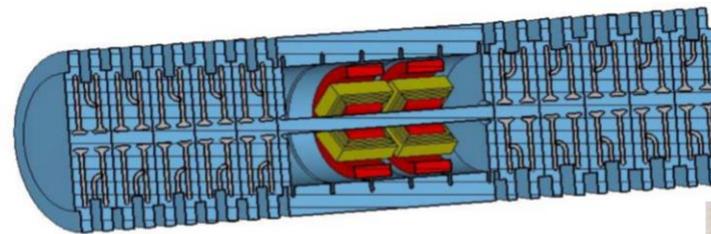
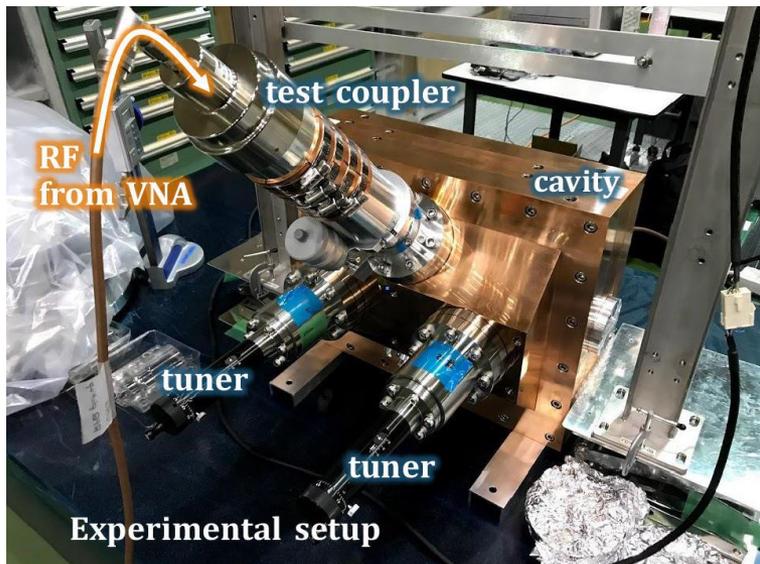


ミュオン加速の開発状況(2/2)

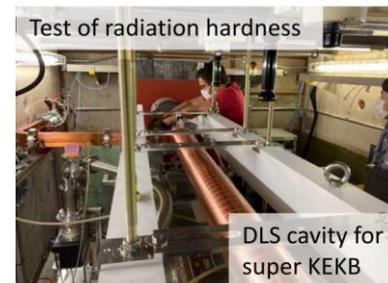


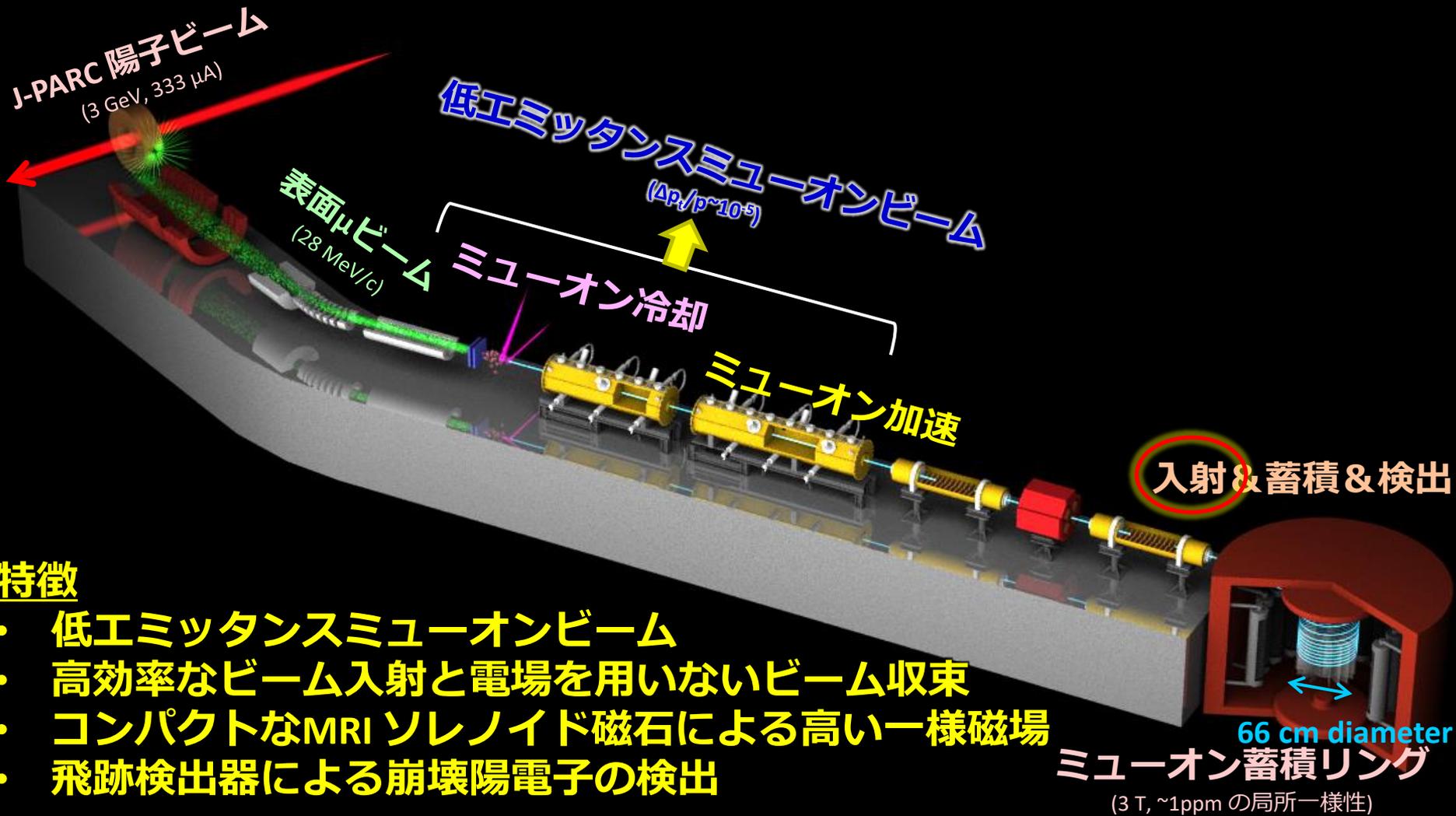
IH-DTL の試作機を製作して、試験中。

DAW-CCL, DLS の設計
およびビームモニタの開発も進行中。



DAWの3Dモデル





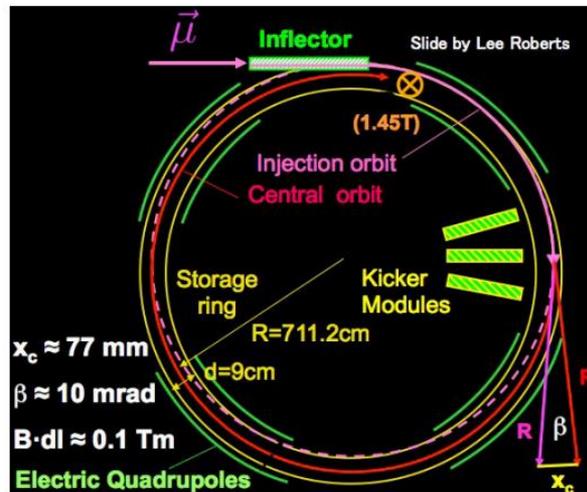
特徴

- 低エミッタンスミューオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
- コンパクトなMRI ソレノイド磁石による高い一様磁場
- 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

3次元らせんビーム入射

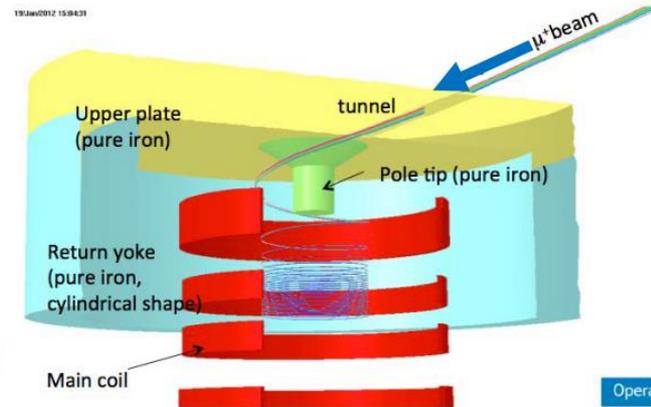
- 従来の2次元平面内での入射方式
 - インフレクターを通して、蓄積リングへビームを入射。
 - 1周する前に、キッカー磁石で、蓄積軌道にずらす。
 - コンパクトな蓄積リングに同様の入射方式は適用できない。
 - 必要な強度のキッカー磁場を発生させるためには、大電流が必要になり、既存の技術では不可能。
- 蓄積領域の上方から入射する**3次元らせんビーム入射法**を考案。

Horizontal injection + kicker
(BNL E821, FNAL E989)



Injection efficiency : 3-5%(*)

3D spiral injection + kicker
(J-PARC E34)

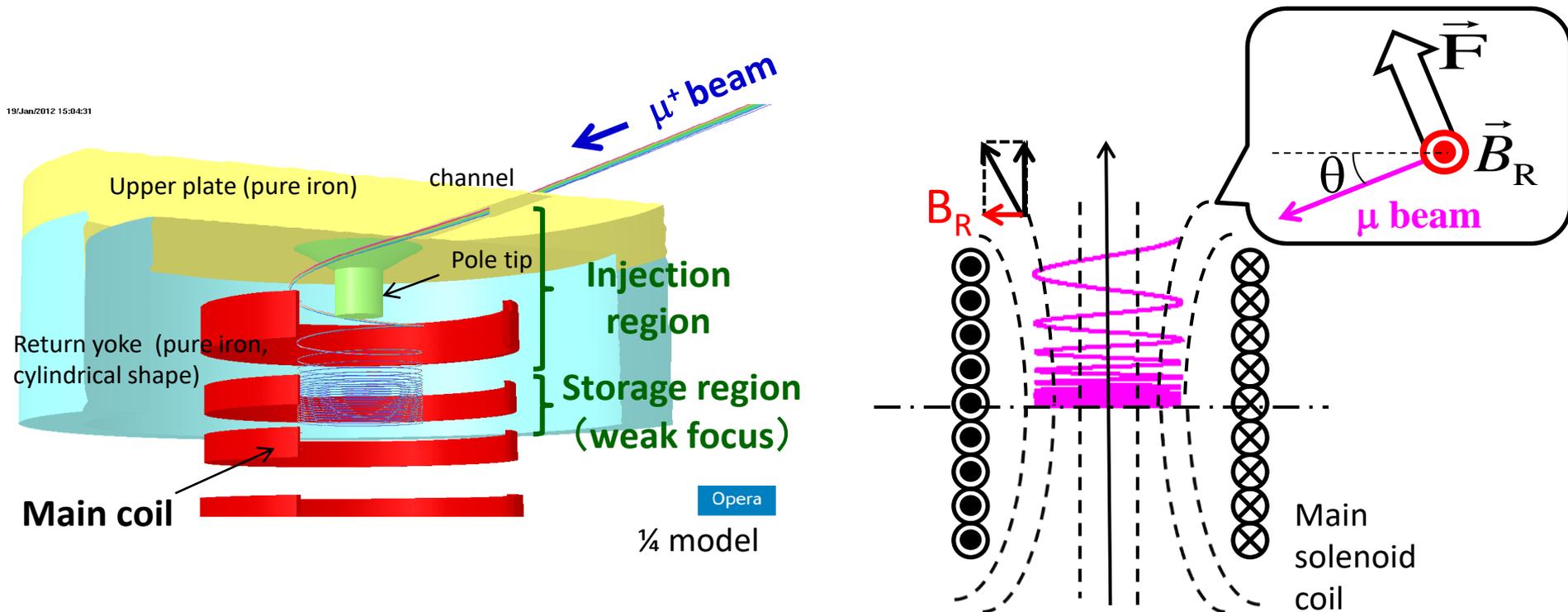


Injection efficiency : ~85%

3次元らせんビーム入射の原理

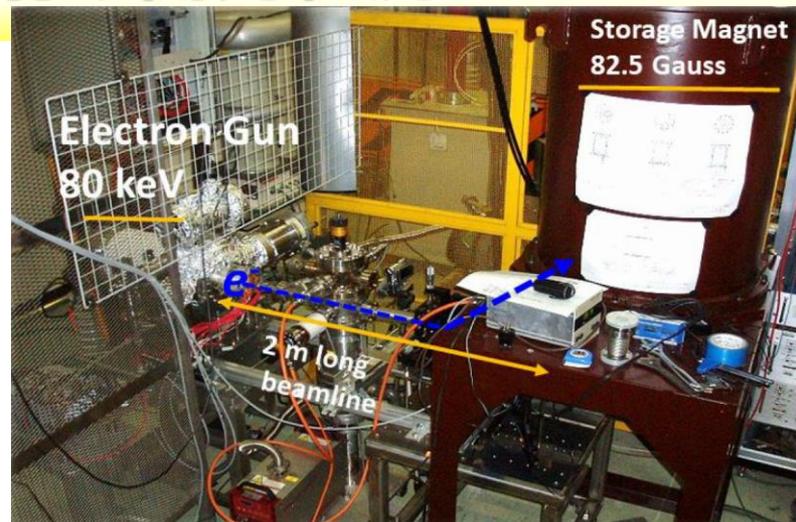
- 蓄積磁場コイルの周辺磁場を利用して入射から蓄積軌道へ滑らかに接続。
 - 径方向の磁場(B_r)でビームの鉛直方向の運動を制御する。
- 瞬間的な磁場(B_r)を発生させて、鉛直方向のビームの運動を止める。

3D spiral injection + kicker

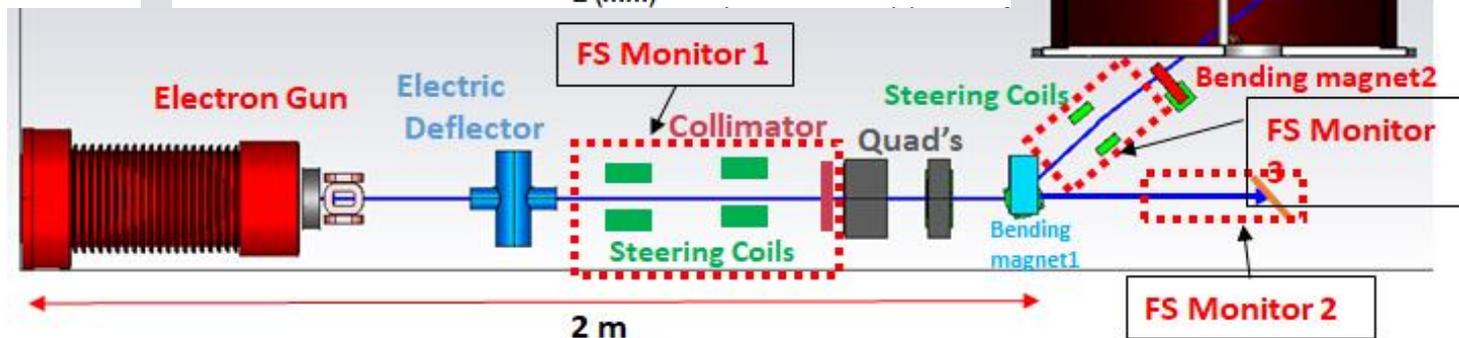
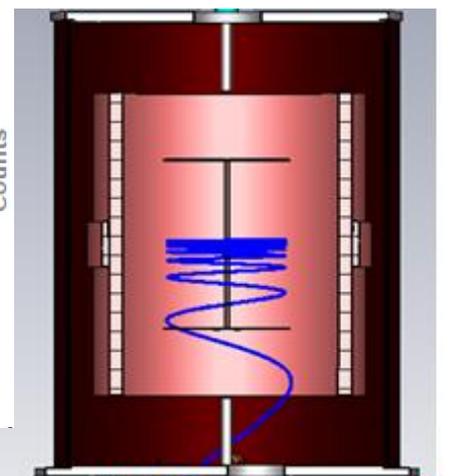
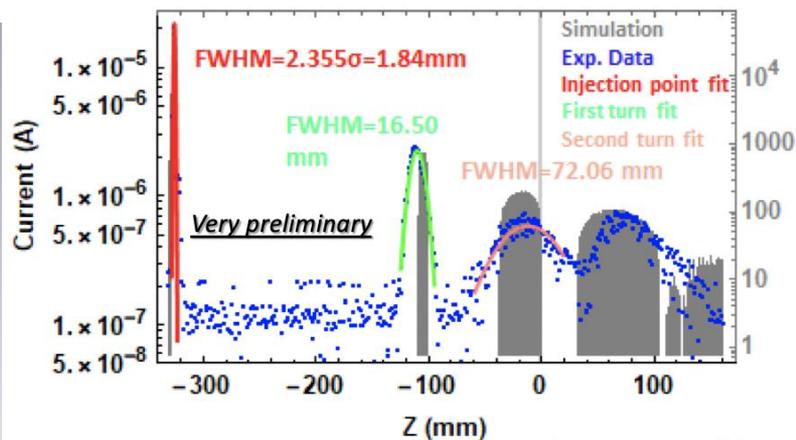
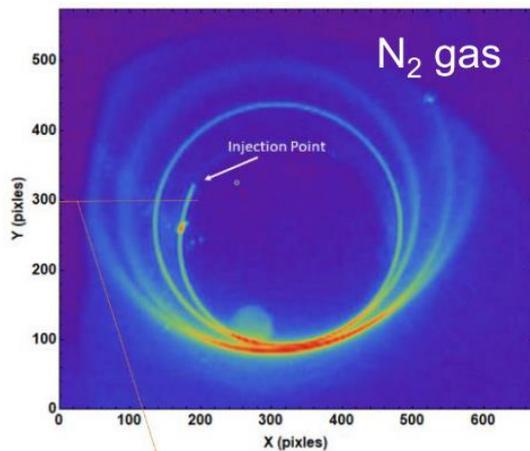


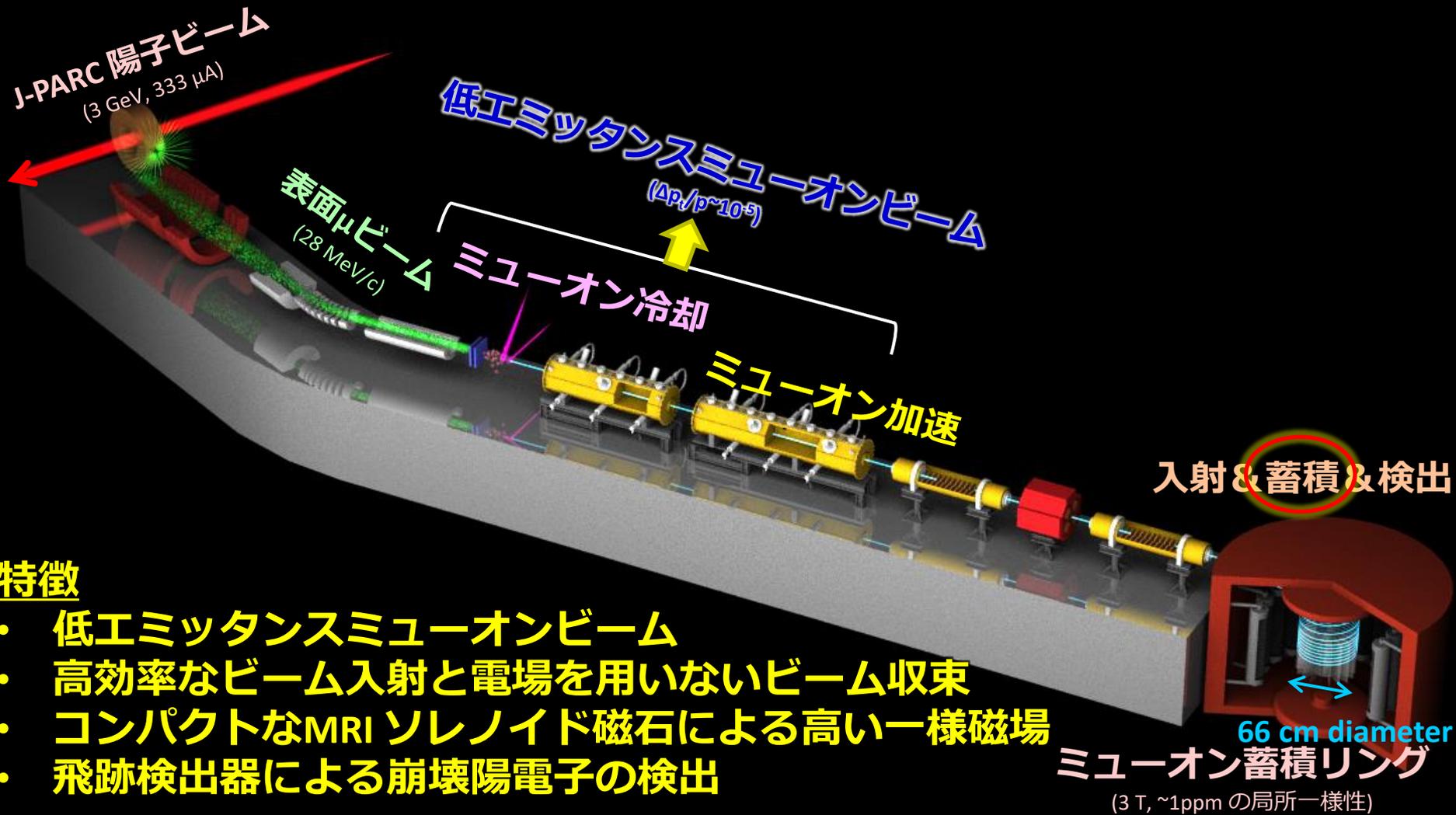
3次元らせんビーム入射の開発状況

- 低エネルギーの電子を用いた実証実験が進行中。



CCDカメラで電子軌道を撮影



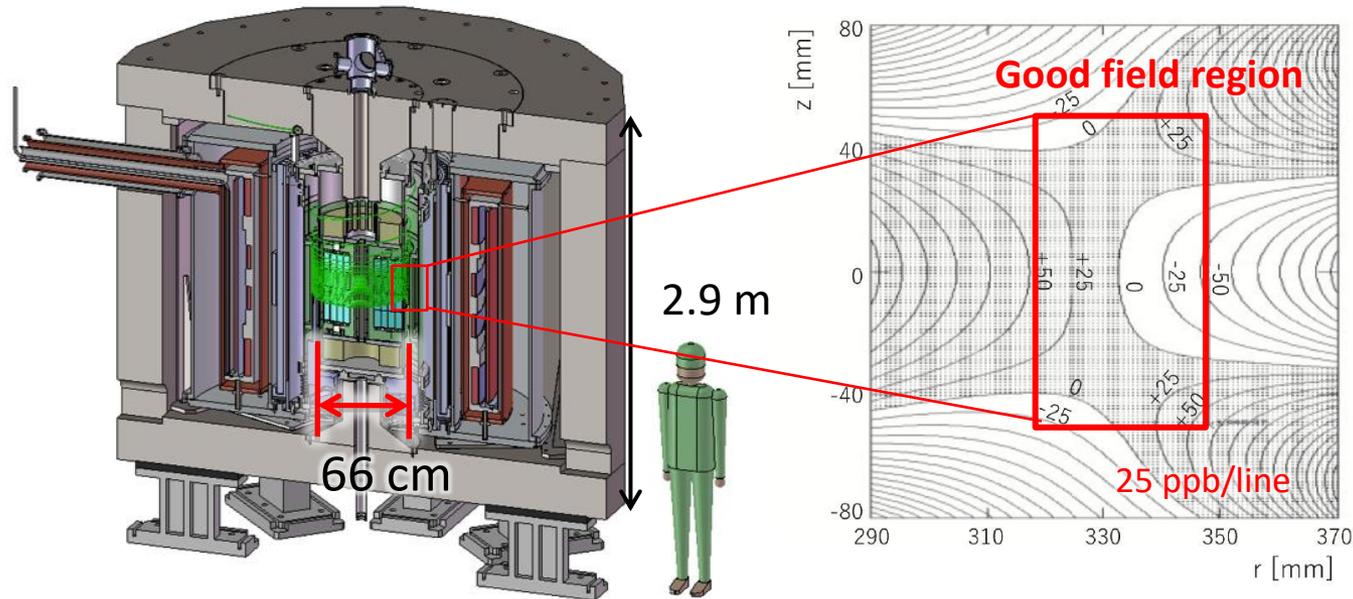


特徴

- 低エミッタンスミューオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
- コンパクトなMRI ソレノイド磁石による高い一様磁場
- 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

蓄積磁石

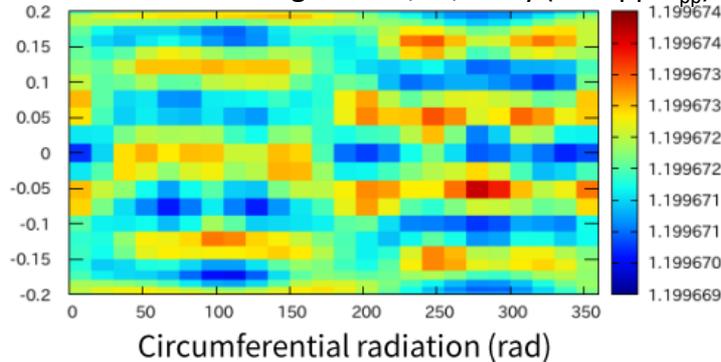
- 3T のMRI 型ソレノイド磁石を使用。
 - 実機製作に向けた詳細設計が進行中。



M. Abe et. Al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A890, 51 (2018)

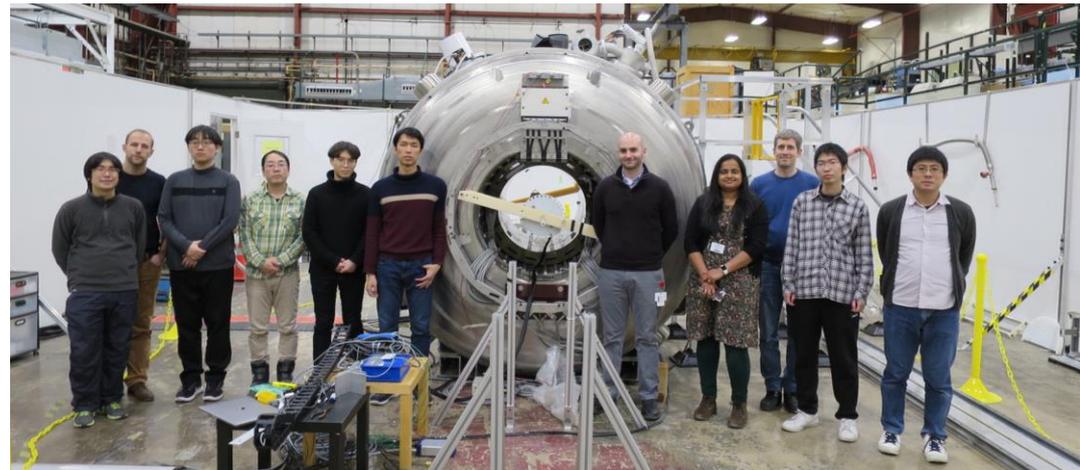
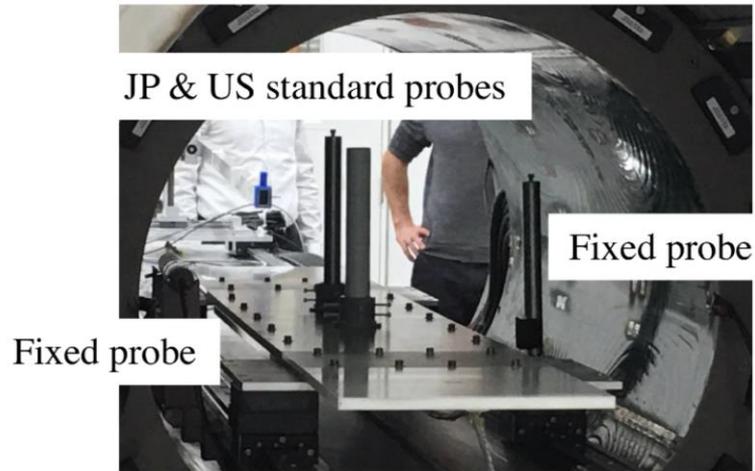
- 磁性パテを使用したシミングによりsub-ppm の一様性を達成。

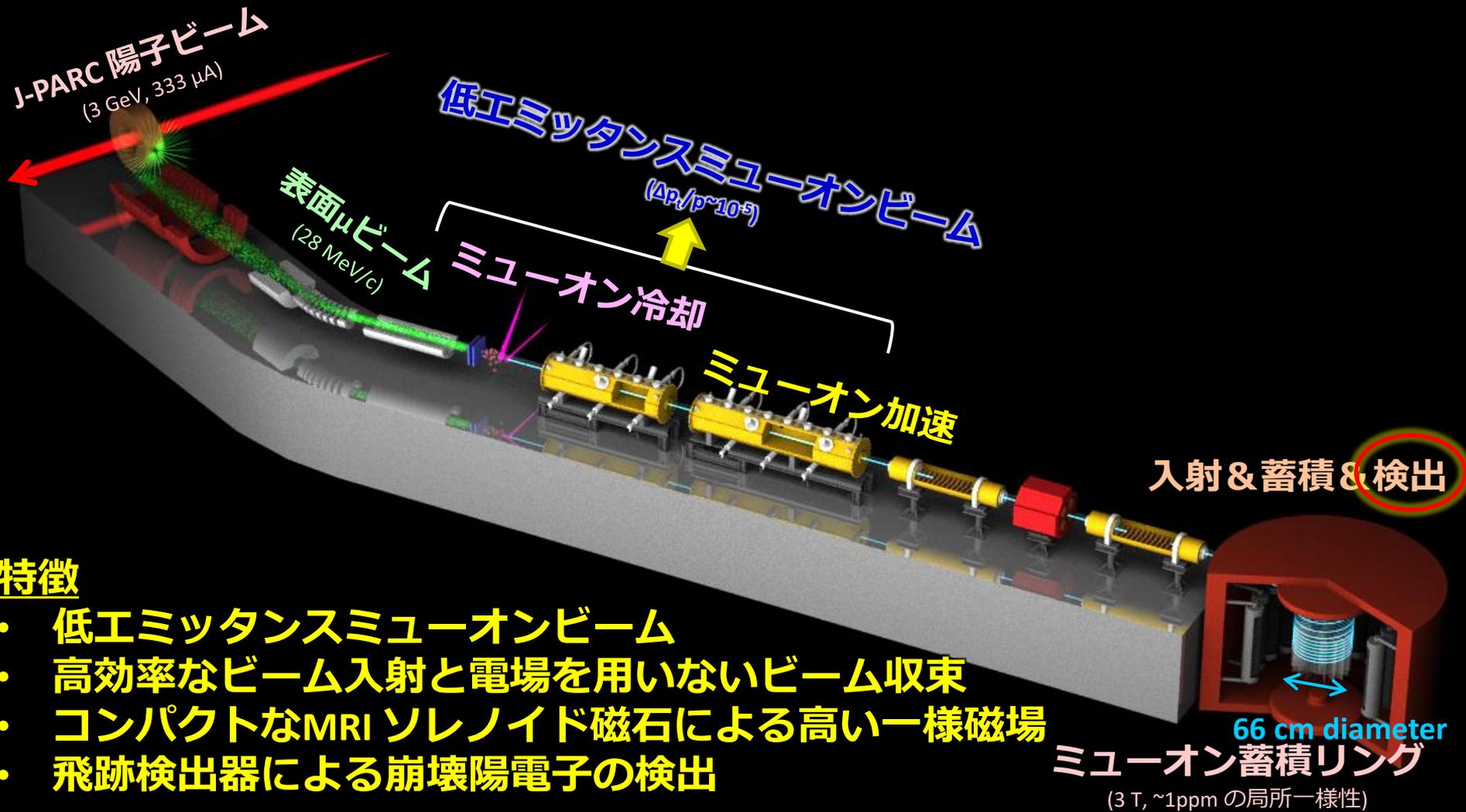
After shimming with Fe, Ni, Putty (0.17 ppm_{pp})



磁場測定

- 核磁気共鳴(NMR)プローブを使用して、磁場を測定する。
- FNAL g-2 実験グループとの磁場測定の相互校正を実施。





特徴

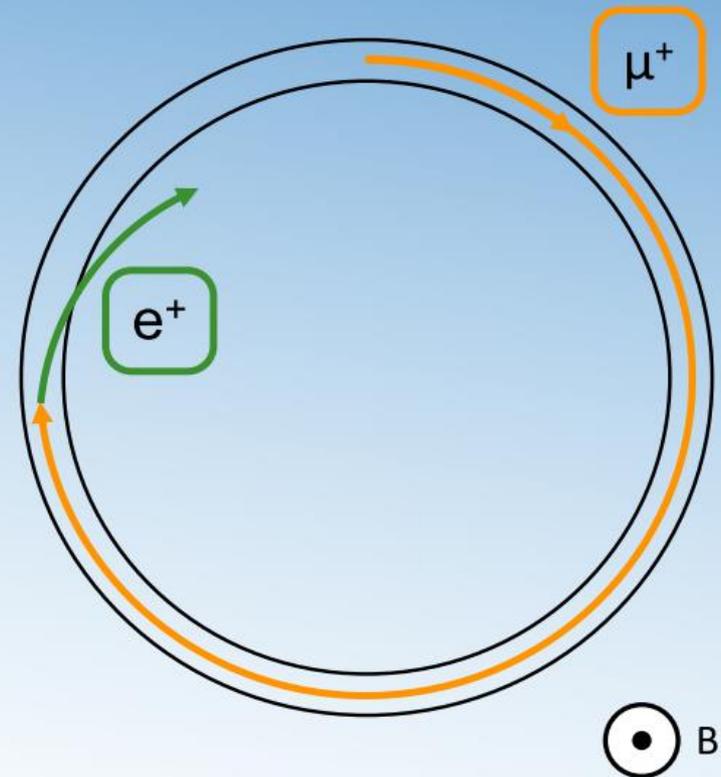
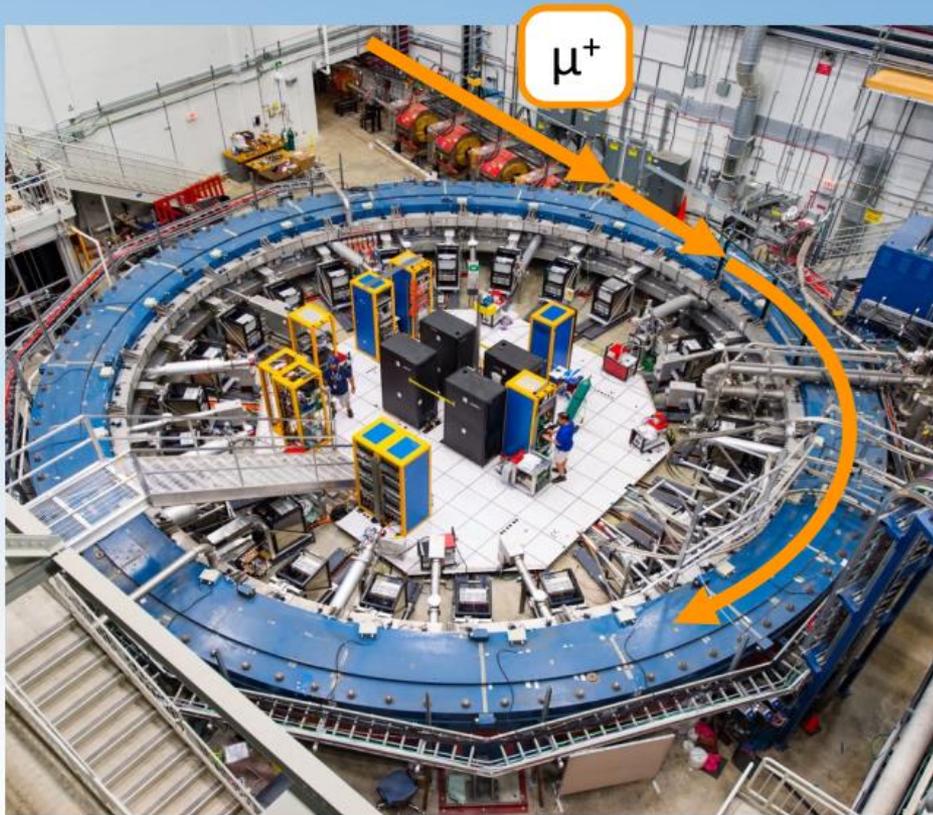
- 低エミッタンスミューオンビーム
- 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
- コンパクトなMRI ソレノイド磁石による高い一様磁場
- 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

FNAL, BNL の検出器の概要

Real World Experiment: Positrons



- Experiment measures decay e^+ which curl inwards since they have lower momentum

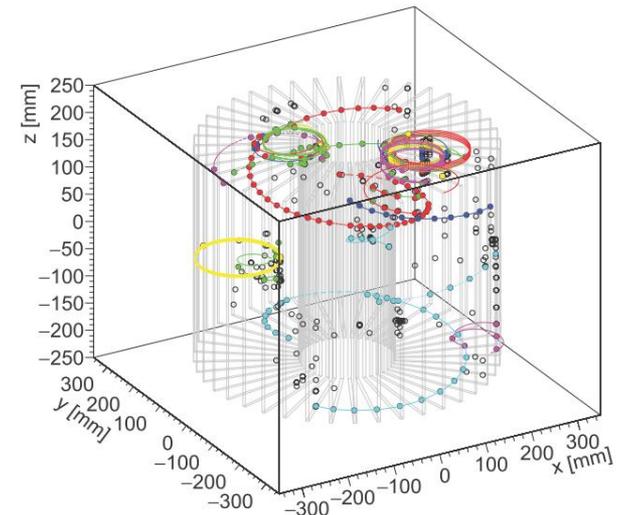
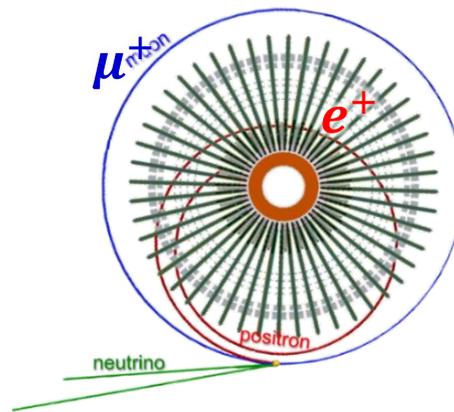
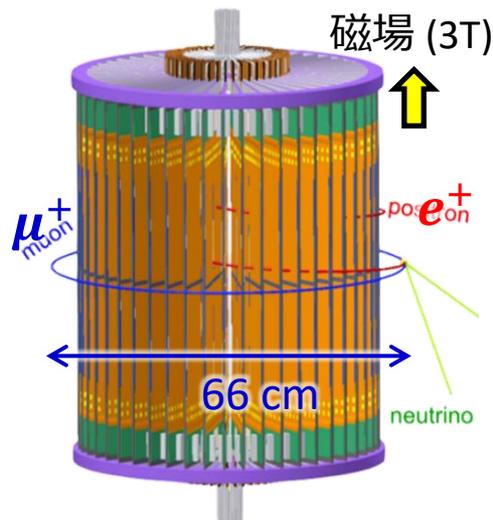


陽電子飛跡検出器(@J-PARC) の概要

- BNL, FNAL の蓄積リングに比べてコンパクト($\times 1/20$) なため、
 - 陽電子が密集して飛んでくる。
 - 5 ns の間に最大30 個の陽電子が生成される。
 - 検出器の設置スペースが限られている。

→ シリコンストリップ検出器を用いて陽電子の飛跡を再構成する。

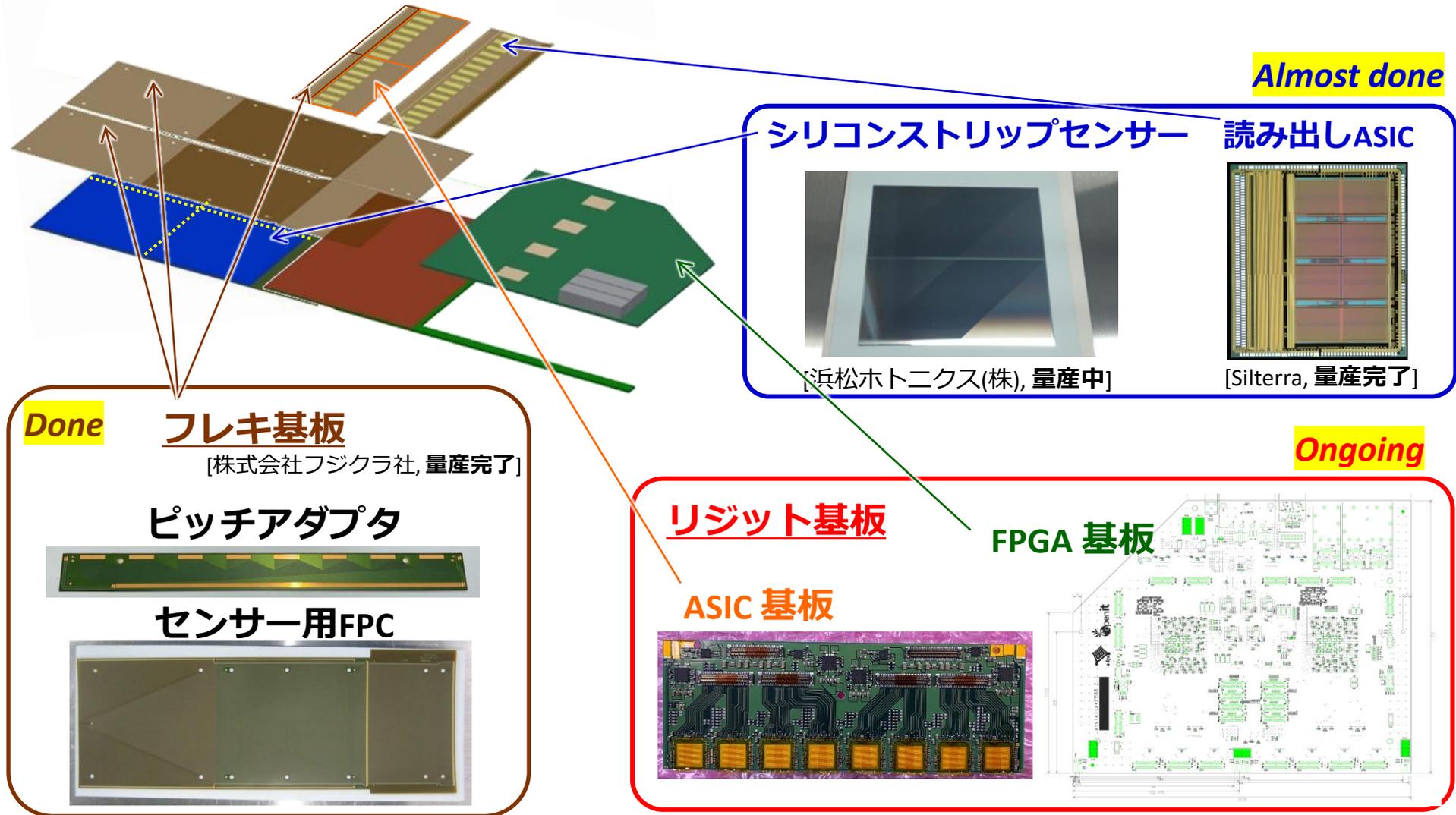
- 陽電子の飛跡を効率的に検出するため放射状に検出層(ベーン)を配置。
- 高いGranularity (細分割性) : 190 μm のストリップ間隔
- 高速応答 : 100 ns の信号増幅処理時間



検出器モジュール“クォーターベーン”の開発状況

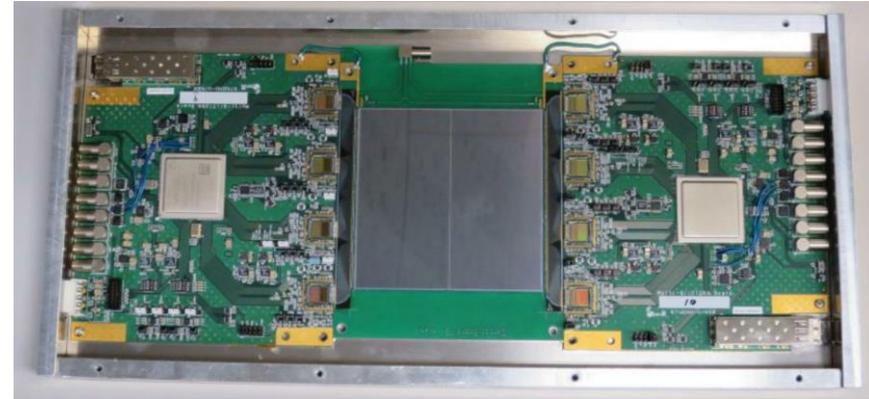
最小単位の検出器モジュール“クォーターベーン”の実機製作に向けて、開発が進行中。

- 4 sensors + 32 ASICs

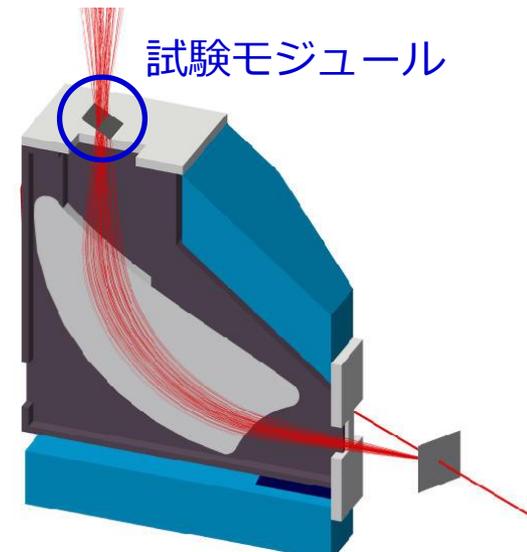
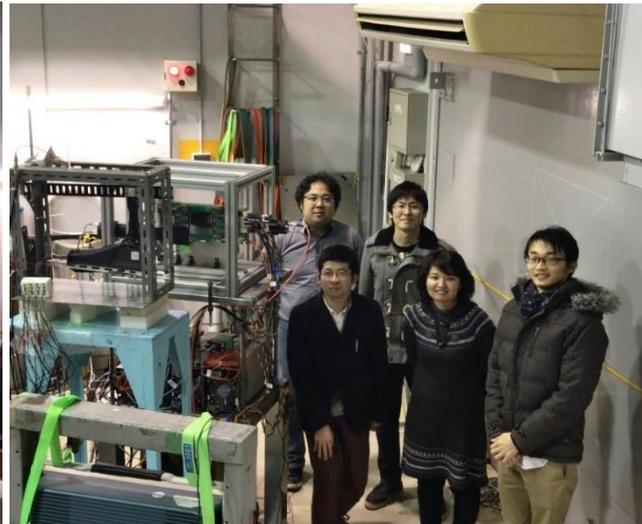
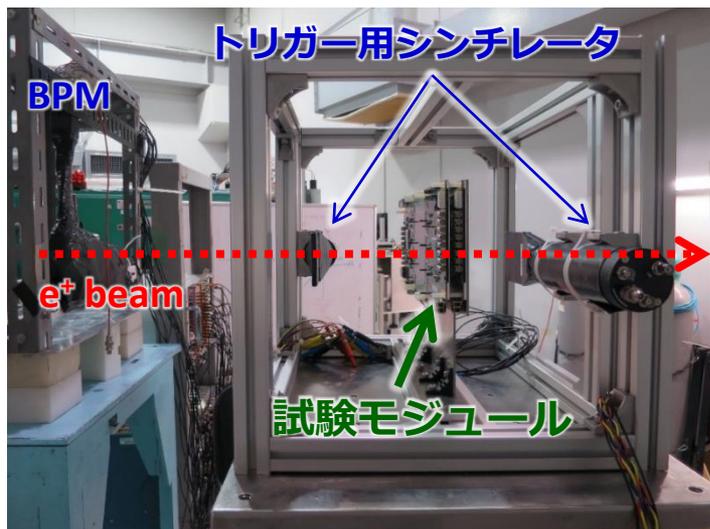


試験モジュールの活躍①

- 1枚のセンサーのみを使用した試験モジュールを製作した。
- 東北大電子光理学センター(ELPH)の陽電子ビームを用いて、1粒子に対する試験モジュールの応答を評価。
 - ビームタイム : 2019/1/23-24
 - *T. Aoyagi et al., JINST 15 (2020) P04027*



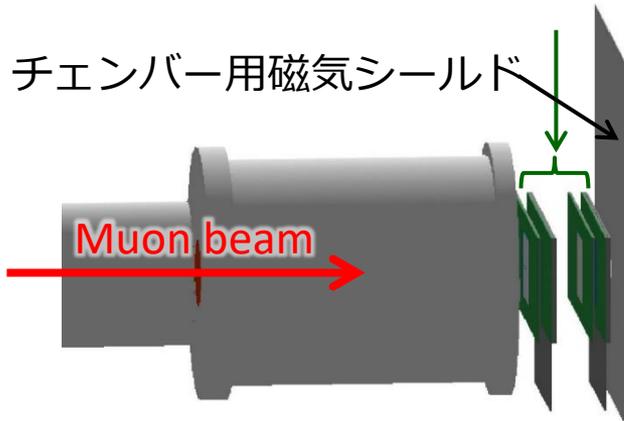
- 現在は、ELPHのULQ2実験(電子散乱による陽子半径の精密測定@東北大)にも使用されている。



試験モジュールの活躍②

- J-PARC で行われている他のミュオンの実験に投入。
 - MuSEUM 実験(ミュオニウム超微細構造の精密測定実験)@J-PARC MLF
- 試験モジュールで取得したデータを解析した結果がプレスリリースに。

試験モジュール(4機)



<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2021/7502/>

2021/08/10

逆転の発想『ラビ振動分光』でミュオニウム原子を精密に測定

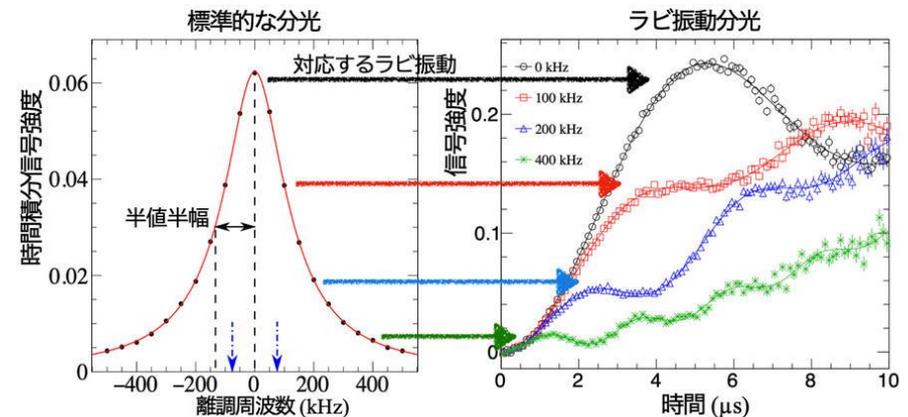
鳥居 寛之 (化学専攻 准教授)

西村 昇一郎 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 博士研究員)

下村 浩一郎 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授)

発表のポイント

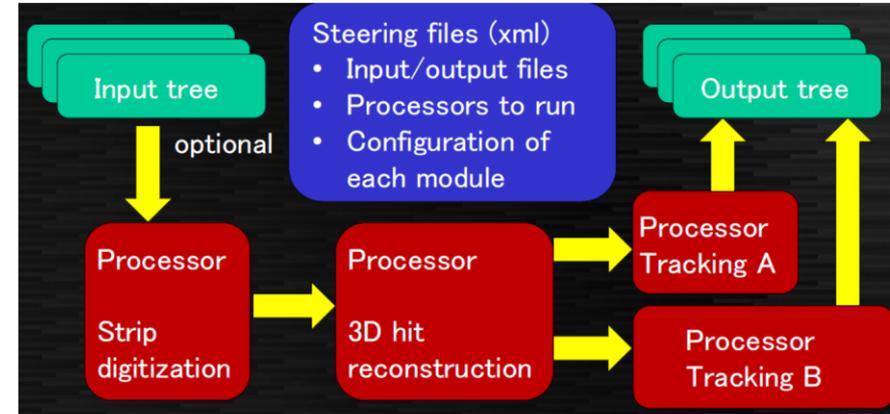
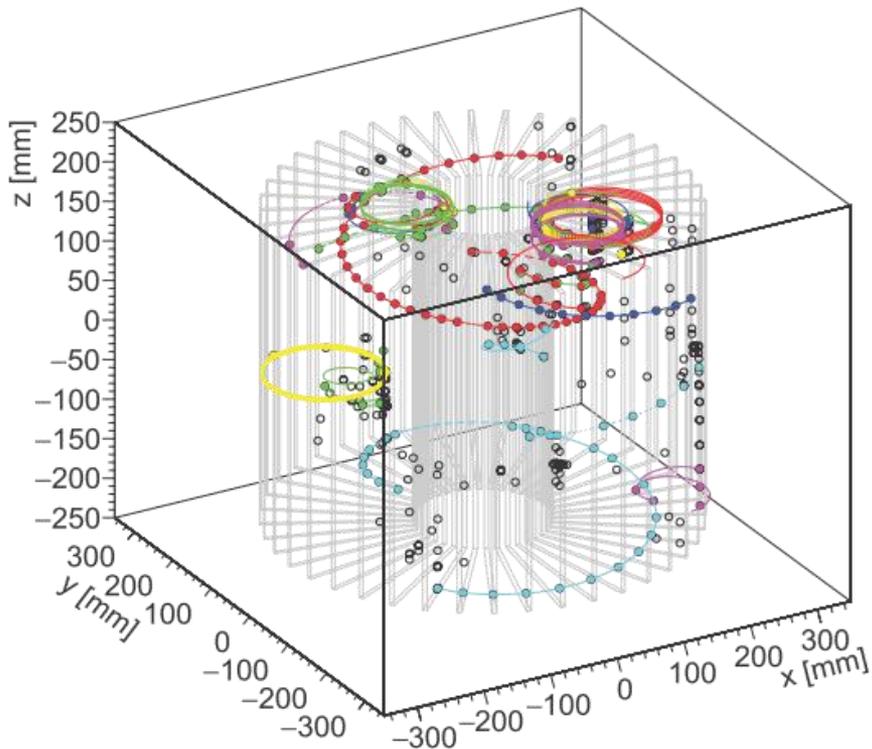
- ▶ たった1つの周波数に対する時間応答から共鳴周波数(注1)を求められる新しい原子分光法「ラビ振動分光」を編み出し、ミュオニウム原子(注2)の超微細構造(注3)を精密に決定することに成功した。
- ▶ 共鳴信号を周波数軸に変換せず、時間軸のまま、理論的なラビ振動(注4)のシミュレーションと比較し、逆問題として共鳴周波数を求める逆転の発想を実現した。
- ▶ ミュオニウム原子のマイクロ波分光(注5)は、今後高強度ビームラインで強磁場を使った実験へと発展し、ラビ振動分光法は素粒子物理学を検証するための世界最高精度の鍵を握る。



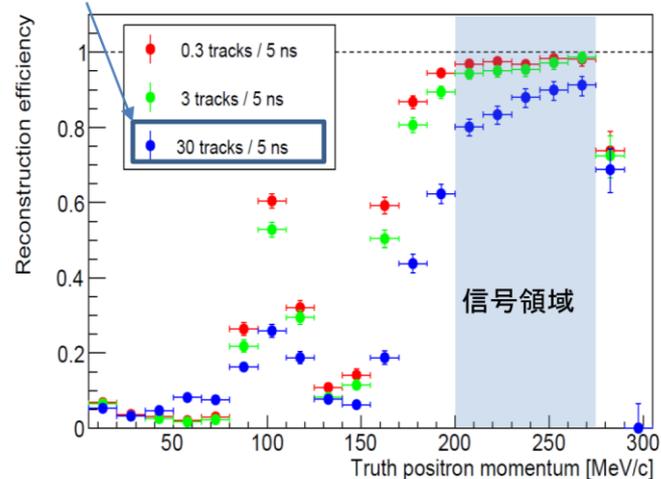
解析ソフトウェア

- 検出器シミュレーションから飛跡再構成までを行うソフトウェアフレームワーク(g2esoft)を独自に開発。
- 飛跡検出器のヒット情報から陽電子飛跡を再構成するためのアルゴリズムを開発。

25個のミュオン崩壊事象
パイラップのシミュレーション



想定される最大パイラップ頻度



シミュレーションでの飛跡再構成効率

予想感度

- 予想ビーム強度は $1.3 \times 10^5 \mu/\text{sec}$
- 2年間の実験期間で、BNLの精度に達する。
- 系統誤差は統計誤差よりも十分に小さい。
- 統計精度を向上させるR&Dを進めている。
 - ミューオニウムの生成効率の向上が肝。

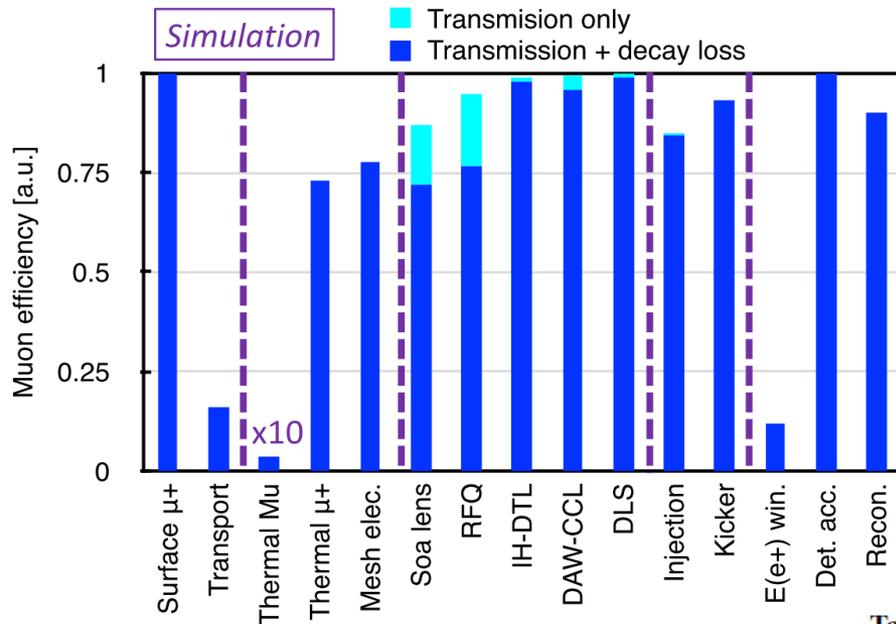
	統計	系統
a_μ [ppb]	450	<70
EDM [$10^{-21} e \cdot \text{cm}$]	1.5	0.36

Table 5. Summary of statistics and uncertainties.

	Estimation
Total number of muons in the storage magnet	5.2×10^{12}
Total number of reconstructed e^+ in the energy window [200, 275 MeV]	5.7×10^{11}
Effective analyzing power	0.42
Statistical uncertainty on ω_a [ppb]	450
Uncertainties on a_μ [ppb]	450 (stat.) < 70 (syst.)
Uncertainties on EDM [$10^{-21} e \cdot \text{cm}$]	1.5 (stat.) 0.36 (syst.)

Table 6. Estimated systematic uncertainties on a_μ .

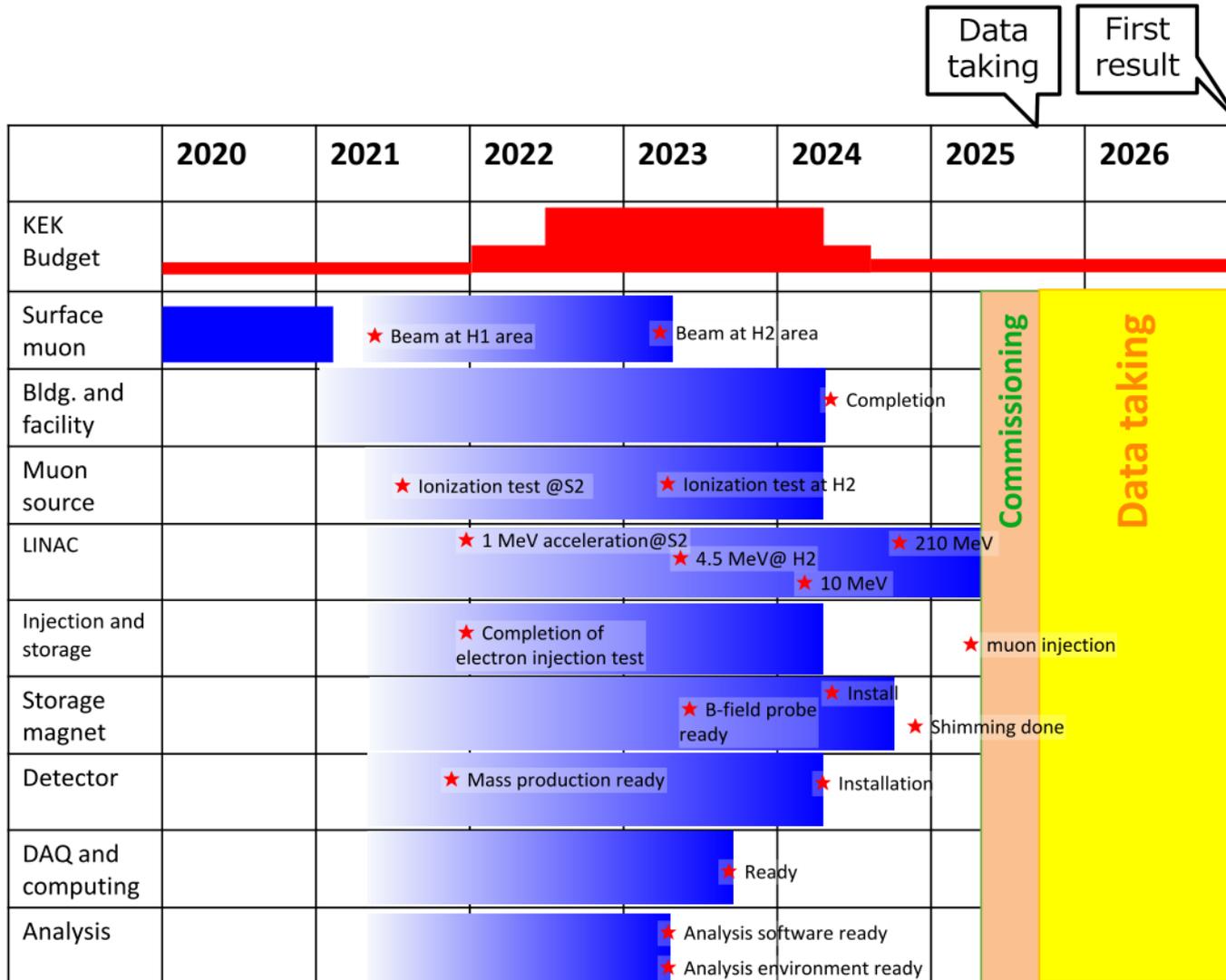
Anomalous spin precession (ω_a)		Magnetic field (ω_p)	
Source	Estimation (ppb)	Source	Estimation (ppb)
Timing shift	< 36	Absolute calibration	25
Pitch effect	13	Calibration of mapping probe	20
Electric field	10	Position of mapping probe	45
Delayed positrons	0.8	Field decay	< 10
Differential decay	1.5	Eddy current from kicker	0.1
Quadratic sum	< 40	Quadratic sum	56



Table

実験スケジュール

- 2025年の実験開始を目指して、準備が進行中。



まとめ

- **これまでの実験と異なる手法でミューオン $g-2$ /EDM を測定するための実験をJ-PARCで準備中。**
 - 低エミッタンスミューオンビーム
 - 高効率なビーム入射と電場を用いないビーム収束
 - コンパクトなMRIソレノイド磁石による高い一様磁場
 - 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出
 - 実験の各システムの開発が進み、製造・建設の段階に近く到達。
 - KEKから文科省への概算要求を開始。
 - 特別推進研究の採択。
- 2025年の実験開始に向けての準備が本格化。**

Backup

Table 4. Breakdown of estimated efficiency.

Subsystem	Efficiency	Subsystem	Efficiency
H-line acceptance and transmission	0.16	DAW decay	0.96
Mu emission	0.0034	DLS transmission	1.00
Laser ionization	0.73	DLS decay	0.99
Metal mesh	0.78	Injection transmission	0.85
Initial acceleration transmission and decay	0.72	Injection decay	0.99
RFQ transmission	0.95	Kicker decay	0.93
RFQ decay	0.81	e^+ energy window	0.12
IH transmission	0.99	Detector acceptance of e^+	1.00
IH decay	0.99	Reconstruction efficiency	0.90
DAW transmission	1.00		

Comparison of experiments

Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 053C02 (2019)

	BNL-E821	Fermilab-E989	Our experiment
Muon momentum		3.09 GeV/c	300 MeV/c
Lorentz γ		29.3	3
Polarization		100%	50%
Storage field		$B = 1.45$ T	$B = 3.0$ T
Focusing field		Electric quadrupole	Very weak magnetic
Cyclotron period		149 ns	7.4 ns
Spin precession period		4.37 μ s	2.11 μ s
Number of detected e^+	5.0×10^9	1.6×10^{11}	5.7×10^{11}
Number of detected e^-	3.6×10^9	–	–
a_μ precision (stat.)	460 ppb	100 ppb	450 ppb *
(syst.)	280 ppb	100 ppb	<70 ppb
EDM precision (stat.)	0.2×10^{-19} e · cm	–	1.5×10^{-21} e · cm
(syst.)	0.9×10^{-19} e · cm	–	0.36×10^{-21} e · cm

Completed

Running

In preparation

* w/o muon source upgrade