



冷却ミュオンの高周波加速実証

名古屋大学 鷺見一路

第21回日本加速器学会年会 令和6年8月2日 FROT09

著者

鷺見 一路, 茨木 優花, 市川 忠樹, 飯嶋 徹, 居波 賢二, 糀 翔太,
近藤 彩夏, 杉山 蒼, 鈴木 一仁, 上田 晃市, 四塚 麻衣 (名大),

有留 翔一, 松下 凌大, 小山 駿, 佐藤 太希 (東大),

二ツ川 健太, 池戸 豊, 石田 勝彦, 上岡 修星, 河村 成肇, 木村 真人,
幸田 章宏, 児島 一輝, 三部 勉, 中村 惇平, 岡崎 祐太, 大谷 将士,
齊藤 直人, 下村 浩一郎, Strasser Patrick, 山崎 高幸, 吉田 光宏 (KEK),

原 秀明, 今井 康貴, 宮本 祐樹, 植竹 智, 山基 真佑 (岡山大),

早坂 圭司, 佐藤 優太郎, 矢村 昴暉 (新潟大),

飯沼 裕美, 葛葉 昌弥, 佐藤 颯人 (茨城大),

Kamal Saeid (UBC),

近藤 恭弘 (JAEA),

中沢 雄河 (理研),

小川 真治, 塩谷 漸, 竹内 佑甫, 谷田 征輝,
東城 順治, 山田 瑞樹, 吉岡 瑞樹 (九大),

Xie Xinhai (Peking Univ.)

目次

1. 研究背景

- ▶ J-PARC muon $g-2$ /EDM experiment
- ▶ ミュオンの冷却と再加速

2. 実験結果

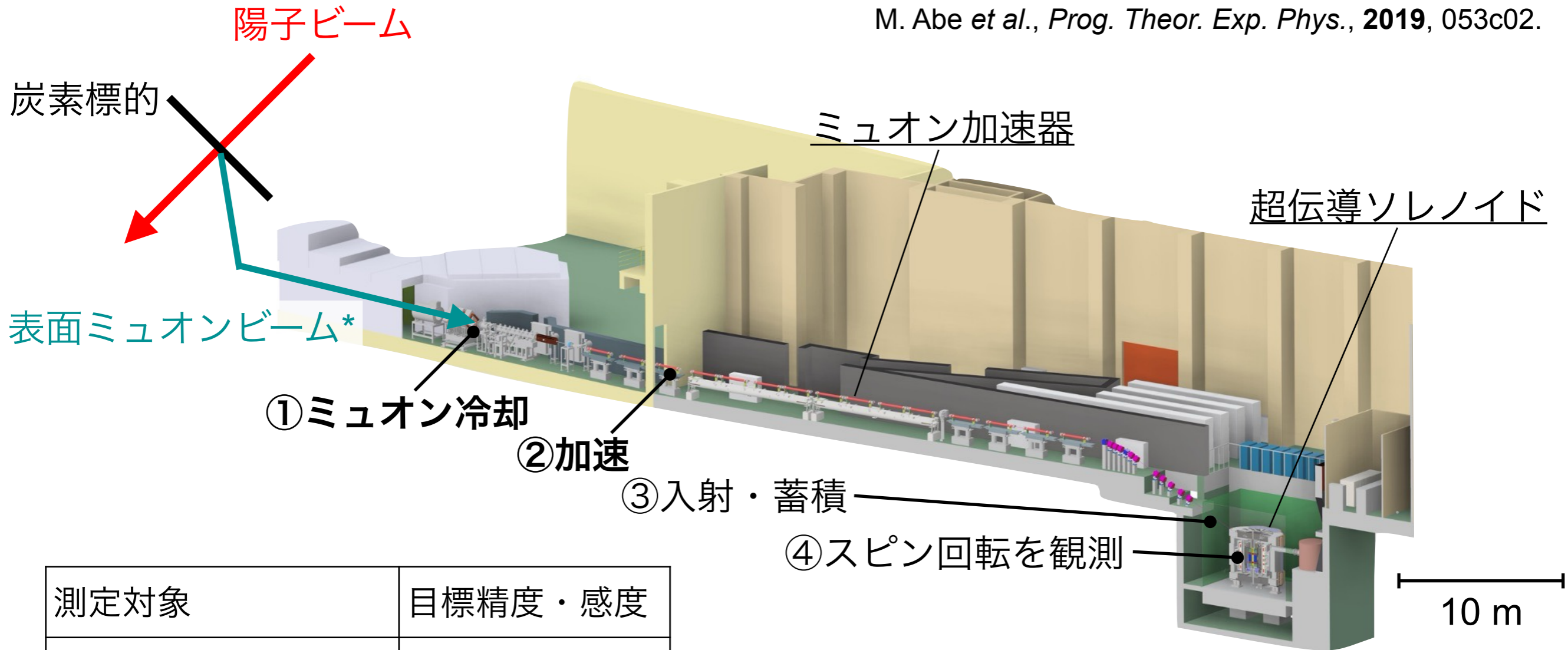
- ▶ ミュオン冷却試験
- ▶ 冷却ミュオンの高周波加速試験

3. 展望

4. まとめ

1. J-PARC muon $g-2$ /EDM experiment

M. Abe et al., Prog. Theor. Exp. Phys., 2019, 053c02.



測定対象	目標精度・感度
異常磁気能率 $g-2$	0.45 ppm
電気双極子能率 EDM	$1.5 \times 10^{-21} \text{ e cm}$

(いずれも統計誤差が支配的)

← 新手法で独立な検証を

← 先行実験から2桁向上

ミュオンビームで素粒子標準模型を超える新物理を探索

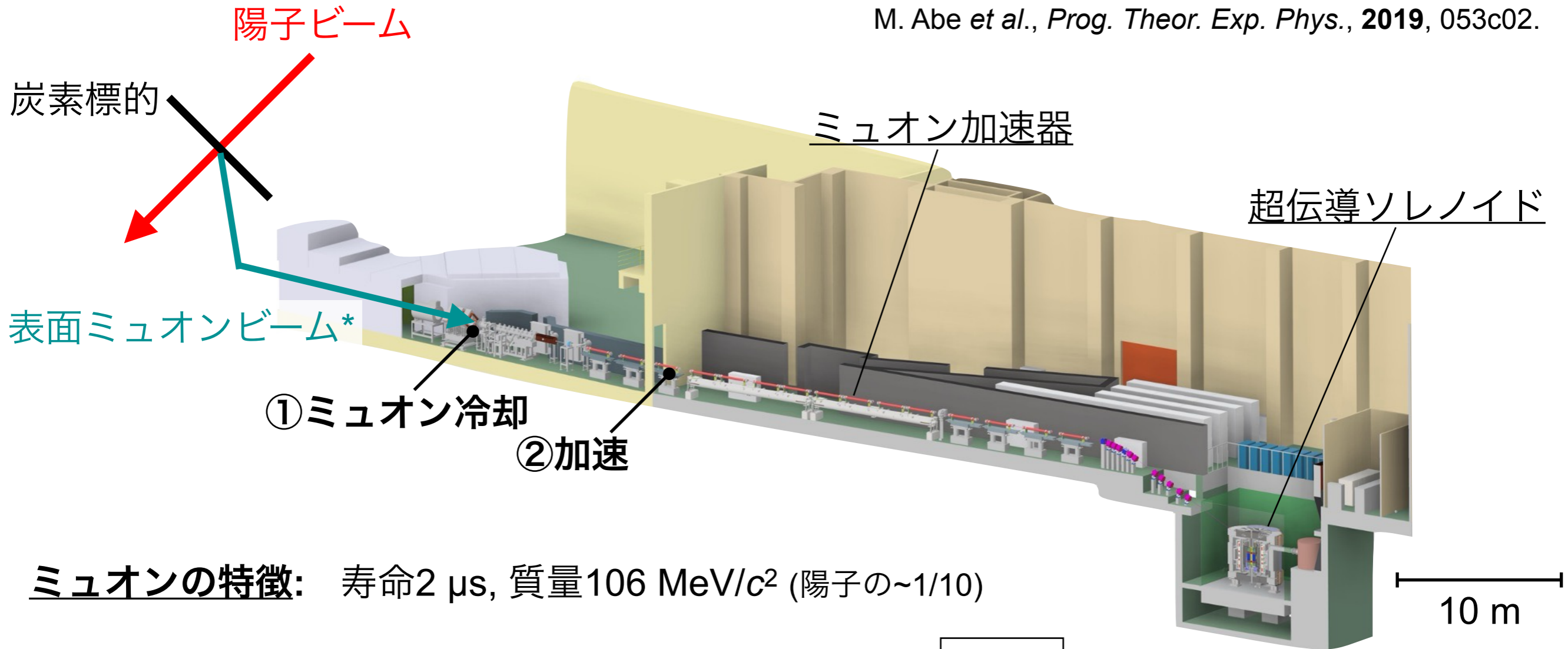
【関連講演】

- ② THOT05 宮原 房史
- THP065 設楽 暁
-
- WEOA06 阿部 充志
- ③ THP015 松下 凌大
- FRP009 飯沼 裕美
- FRP010 小川 真治

* 炭素標的の表面近傍で核反応で生成された正パイオンが崩壊した結果生じる正ミュオン

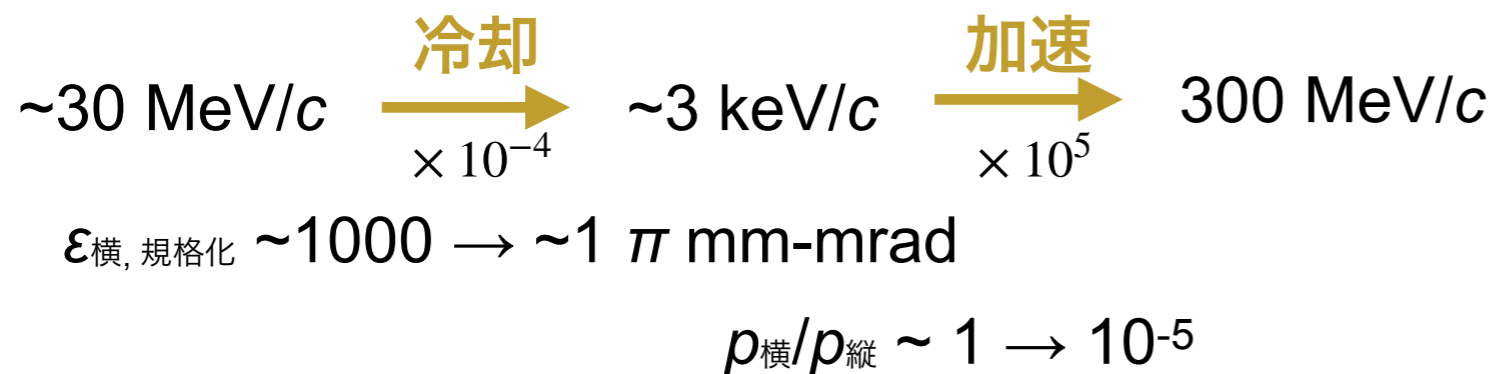
1. J-PARC muon $g-2$ /EDM experiment

M. Abe et al., Prog. Theor. Exp. Phys., 2019, 053c02.



ミュオンの特徴: 寿命 $2 \mu\text{s}$, 質量 $106 \text{ MeV}/c^2$ (陽子の $\sim 1/10$)

低エミッタンスビームの作り方

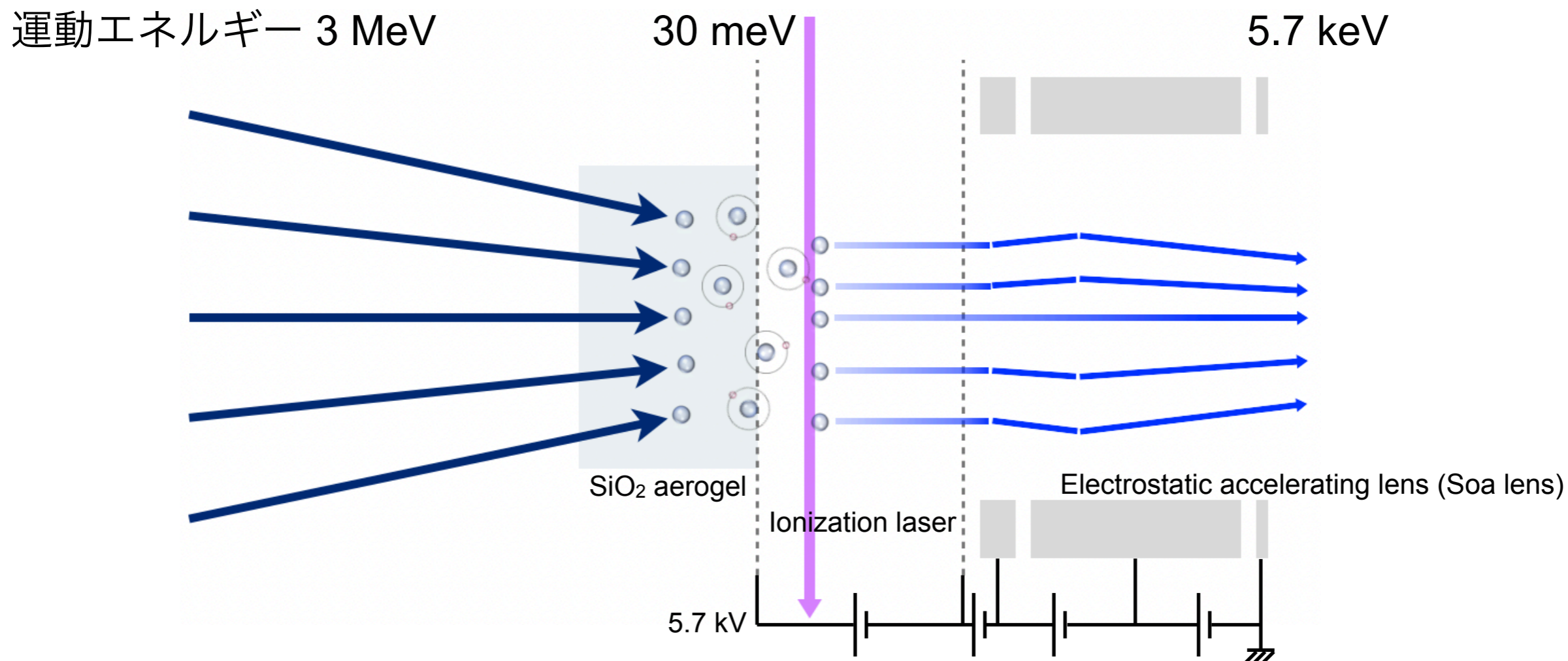


課題

- **ミュオンの冷却技術**
 - ▶ 冷却性能 (エミッタンス, 偏極度)
 - ▶ 冷却効率
- **ミュオンの加速技術**

1. ミュオン冷却 ~熱ミュオニウム + イオン化~

室温まで冷えたミュオニウム (μ^+e^-) から超低速ミュオンを生成



- ① 表面ミュオンを室温のシリカエアロゲル標的に照射
- ② 散乱により熱エネルギーまで冷却
電子と束縛しミュオニウムを形成
- ③ 標的内を拡散し真空中に放出
- ④ レーザーで電子を剥ぎ取り
静電場で取り出し

1. これまでの開発 ~ミュオン冷却と初段加速~

PASJ2024

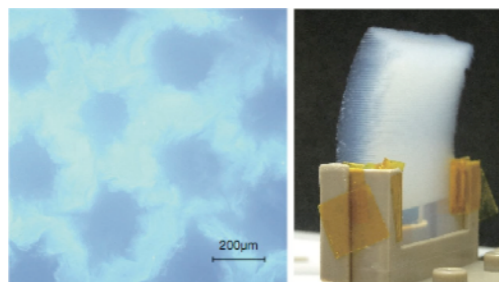
冷却ミュオンの高周波加速

冷却ミュオン源の開発

シリカエアロゲルからの
ミュオニウム放出を測定

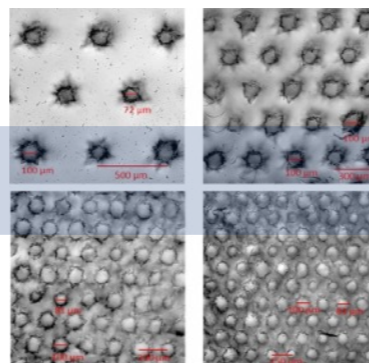
P. Bakule et al., *PTEP*, 2013, 103C01.

レーザー加工で
生成効率向上



G. A. Beer et al., *PTEP*, 2014, 091C01.

レーザー加工の最適化



J. Beare et al., *PTEP*, 2020, 123C01.

ミュオニウム生成の
モデルを構築

C. Zhang et al., *NIM A*, 1042, 167443 (2020).

高安定レーザー開発

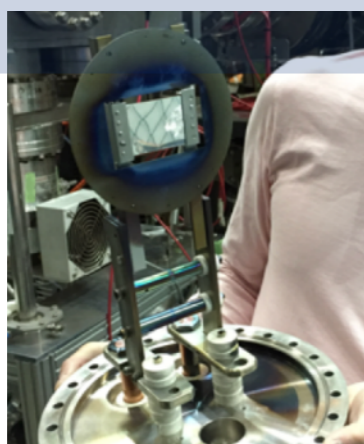
244 nmパルスレーザー
(岡山大学・ミュオニウム精密分光用)

ミュオン加速器の開発

負ミュオニウム ($\mu^+e^-e^-$) イオン源の評価

R. Kitamura et al., *PRAB*, 24, 033403 (2021).

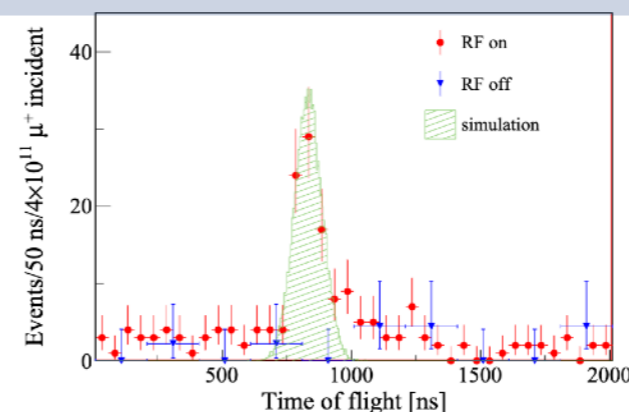
負ミュオニウムをRFQで加速



- 金属薄膜
- イオン化レーザーなし
- keV程度

PASJ2017

PASJ2018



S. Bae et al., *PRAB*, 21, 050101 (2018).

2. 実験概要

【実験期間】

2-1. ミュオン冷却試験

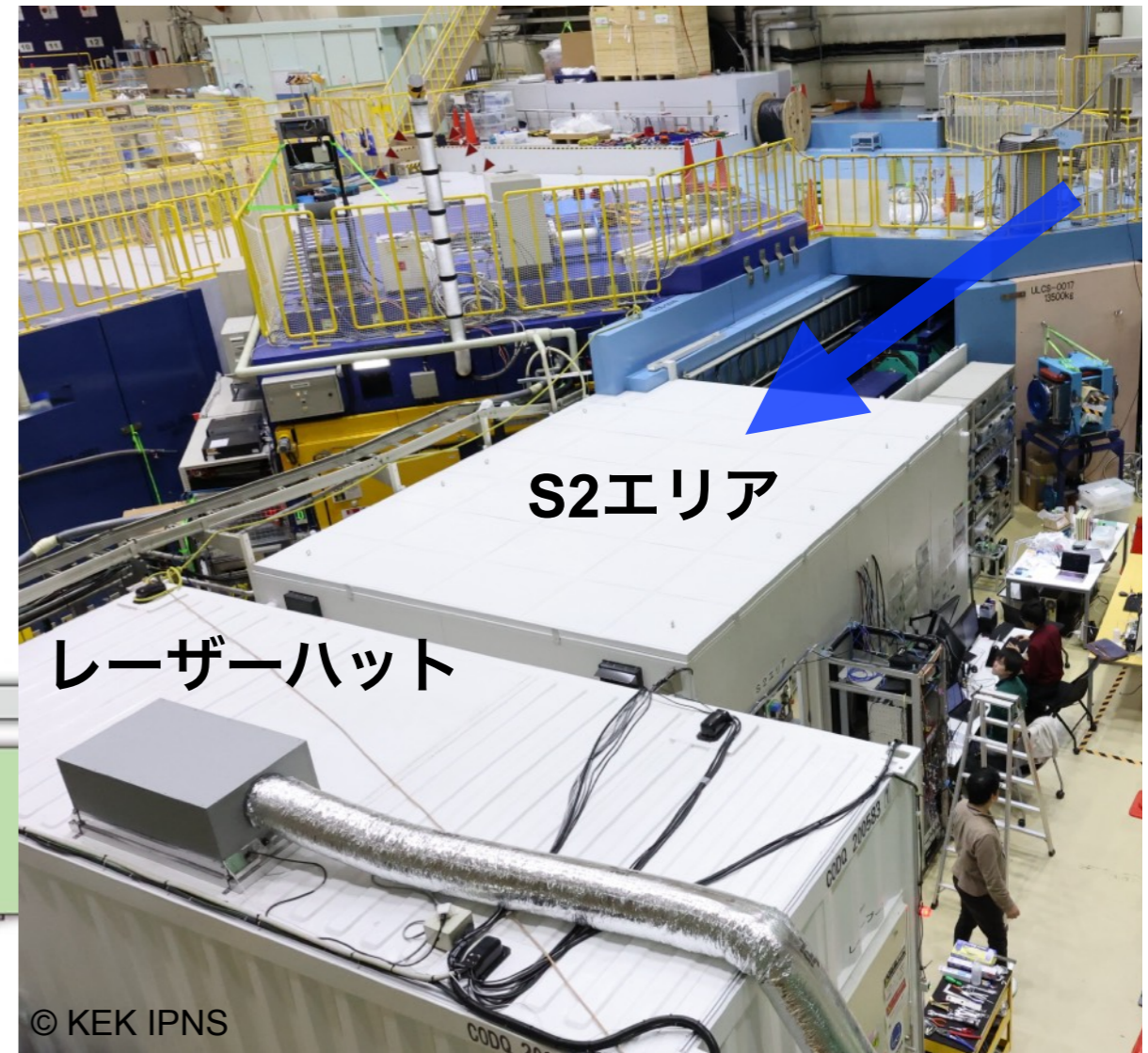
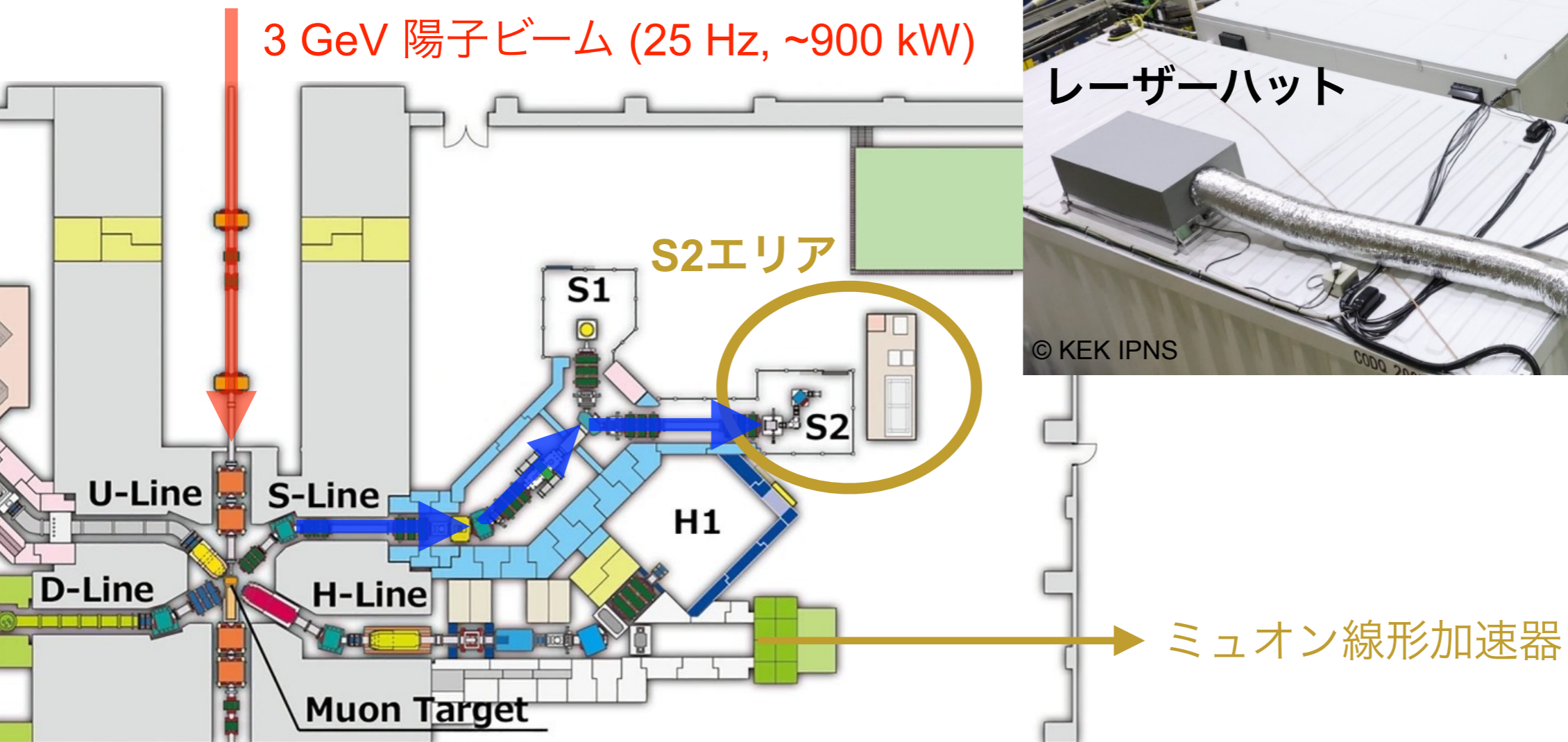
2023年2~5月, 2024年3月

2-2. 冷却ミュオン加速試験

2024年4月

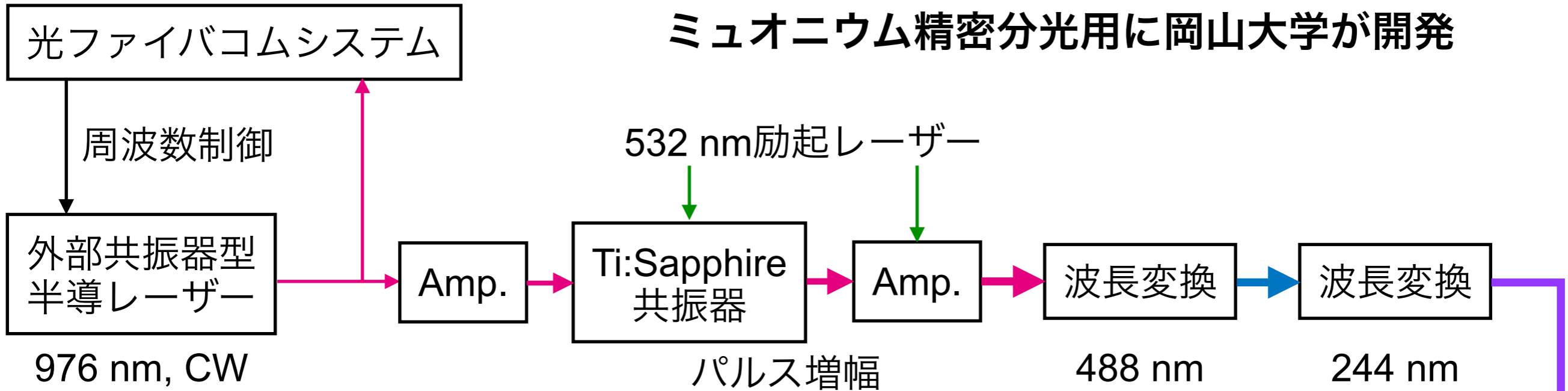
J-PARC MLF ミュオン科学実験施設

3 GeV 陽子ビーム (25 Hz, ~900 kW)

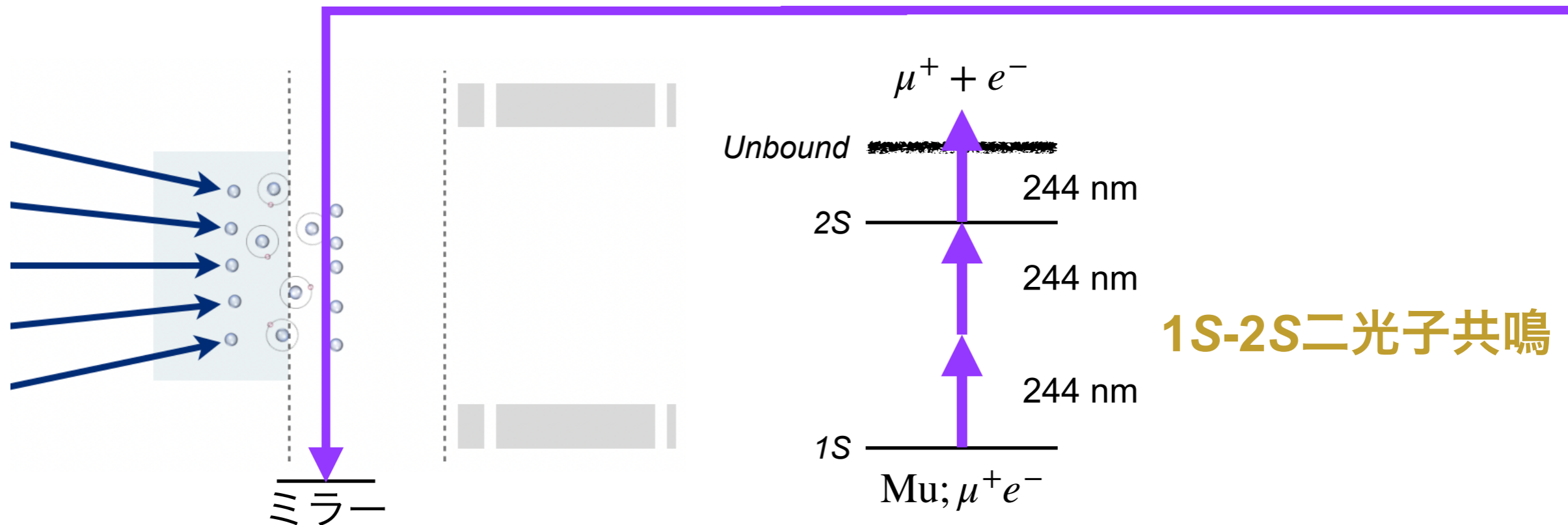


2. 波長244 nmパルスレーザーシステム

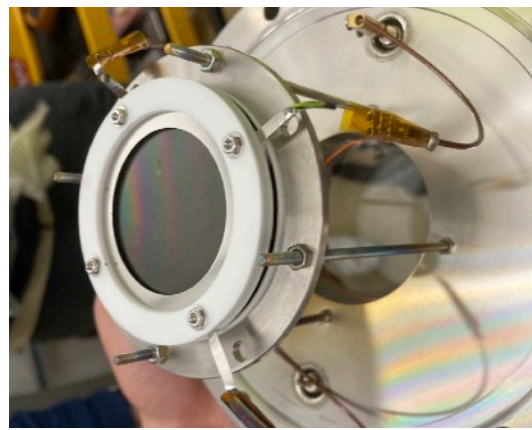
ミュオニウム精密分光用に岡山大学が開発



パルス強度~1 mJ, 時間幅57 ns, 直径1 mm



2. ミュオン測定

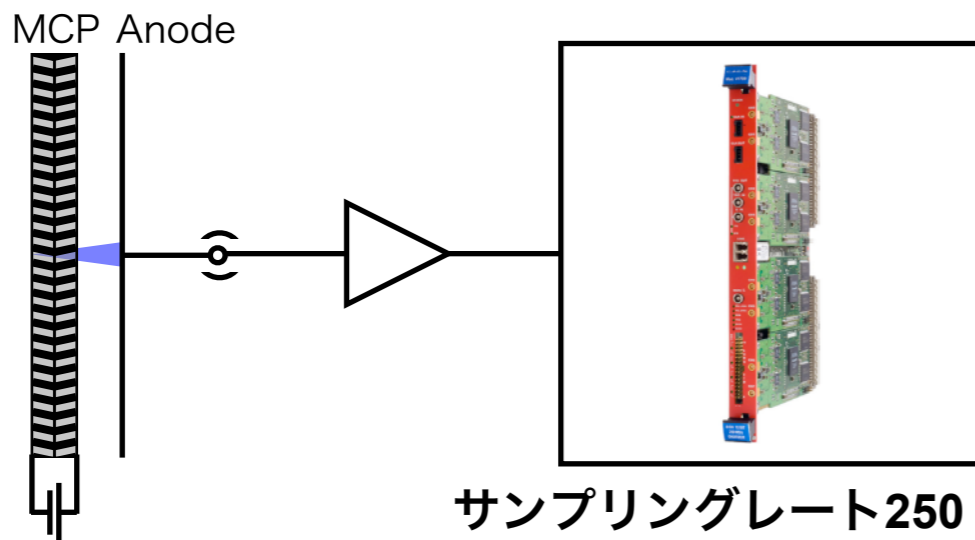


マイクロチャンネルプレート (MCP) ベースのモニタ

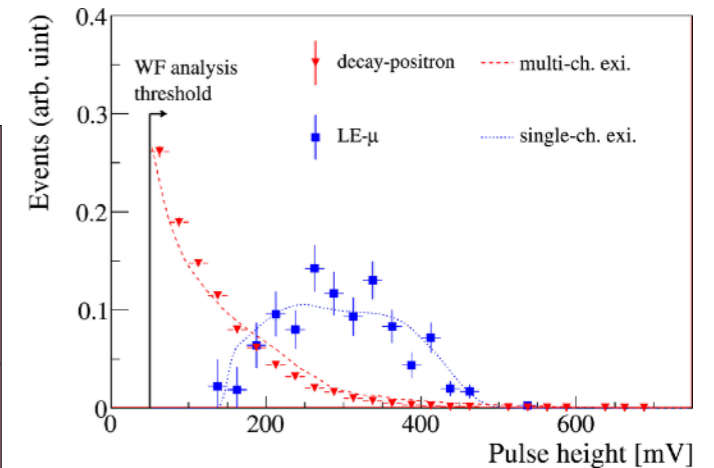
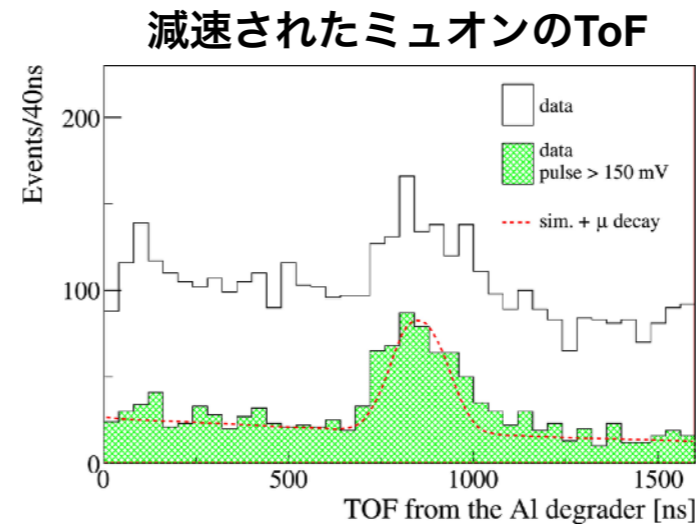
高速応答 & ミュオン1個でも検出可能

飛行時間 (ToF) 測定

Single-Anode MCP Amplifier Waveform digitizer



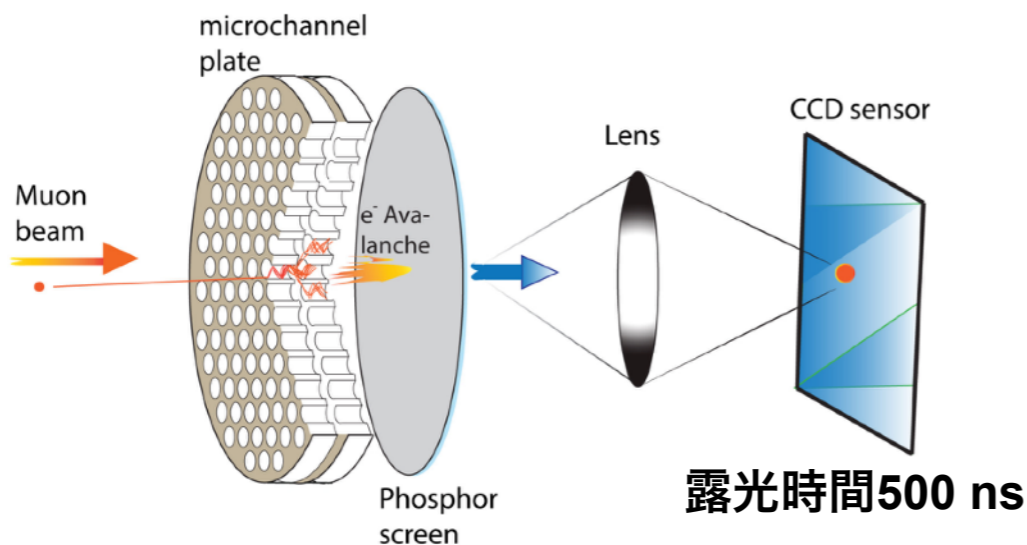
浜松ホトニクス, F9892-21



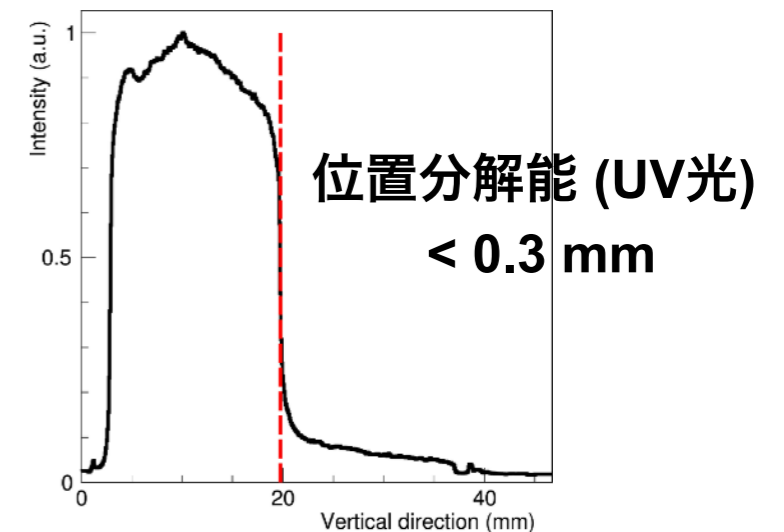
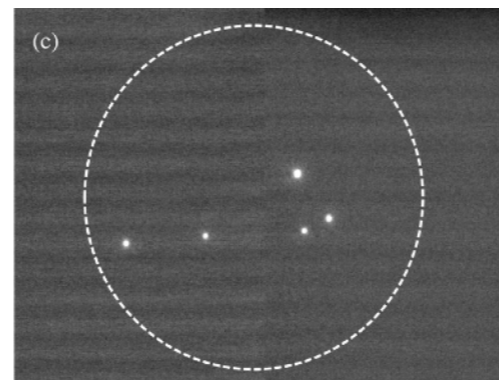
ミュオンと電子を
信号波高で選別

M. Otani et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sec. A., 943, 162475 (2019).

プロフィール測定

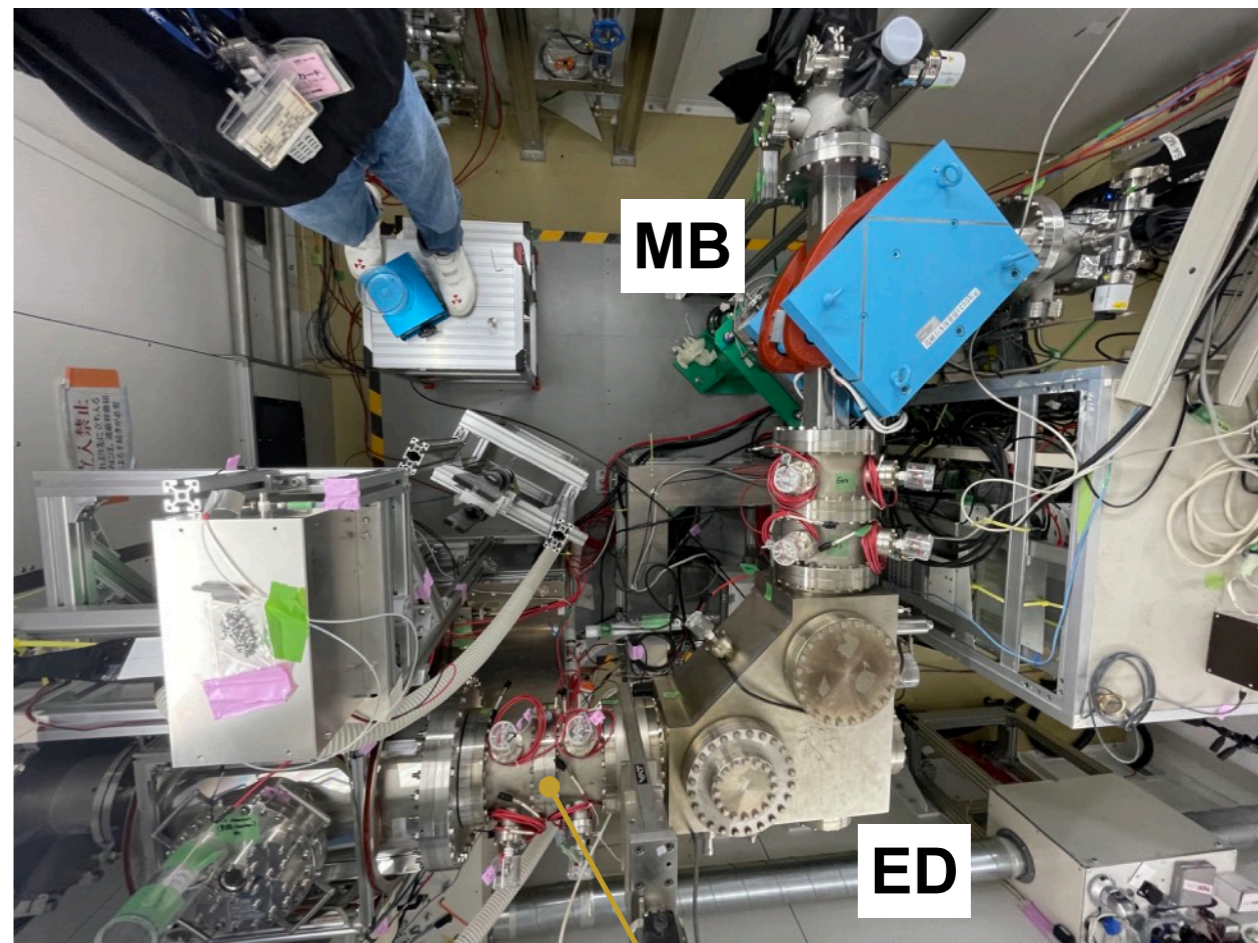
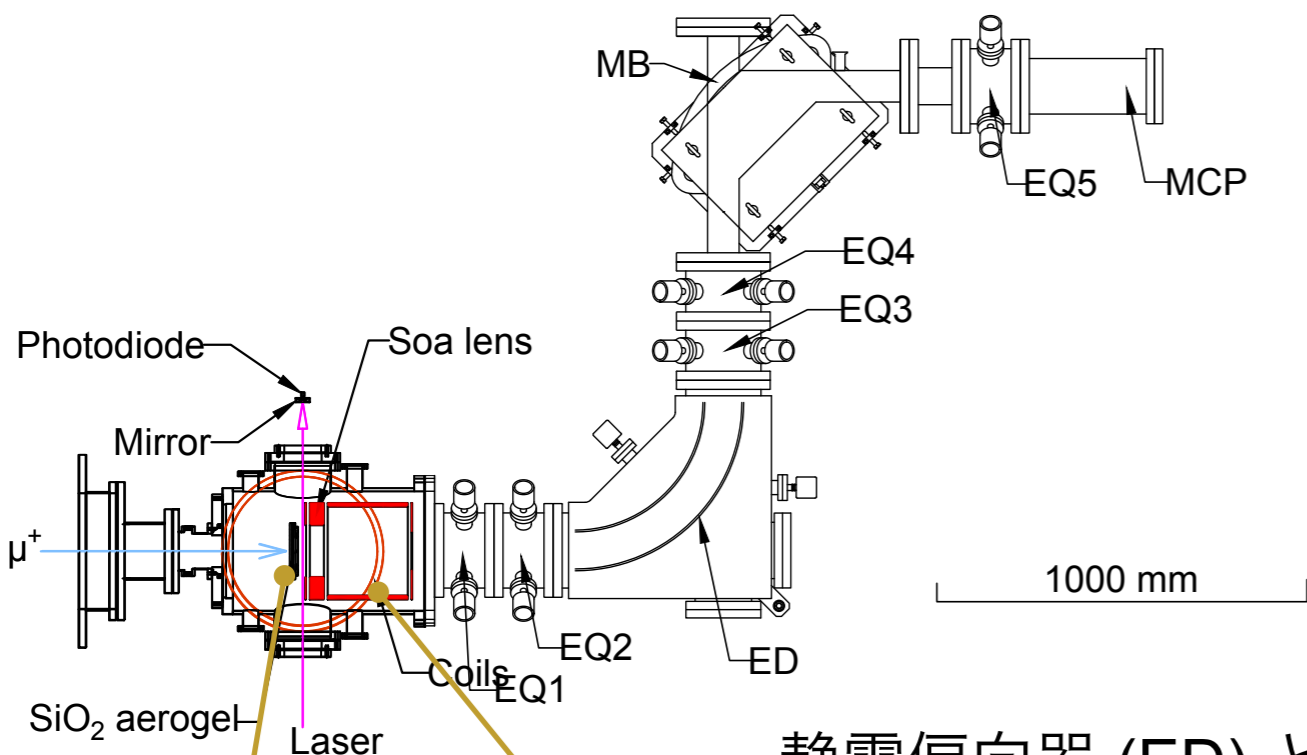


浜松ホトニクス, F2225-21P-Y003



B. Kim et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sec. A., 899, 22-27 (2018).

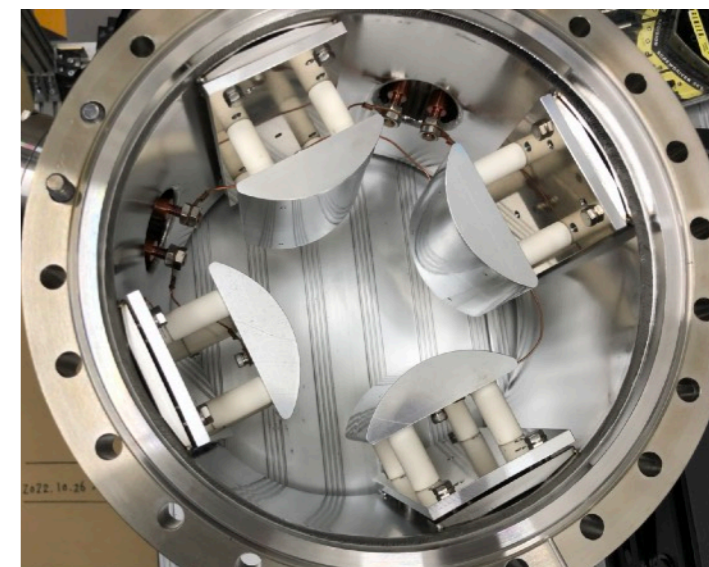
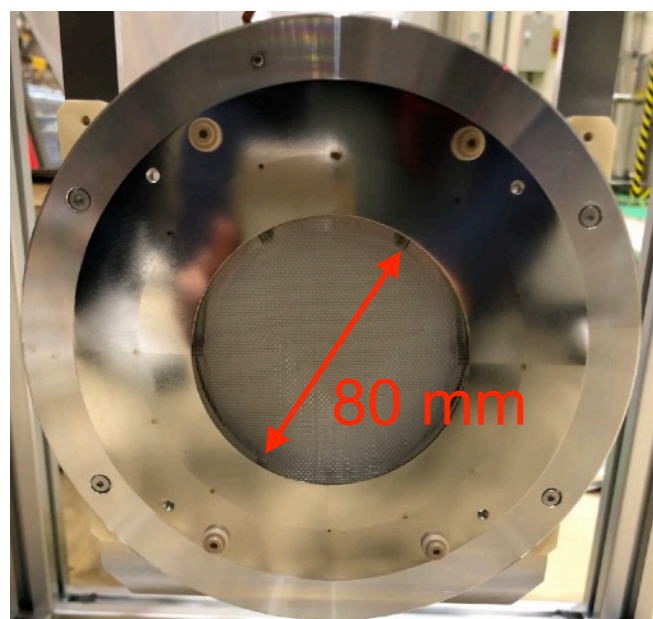
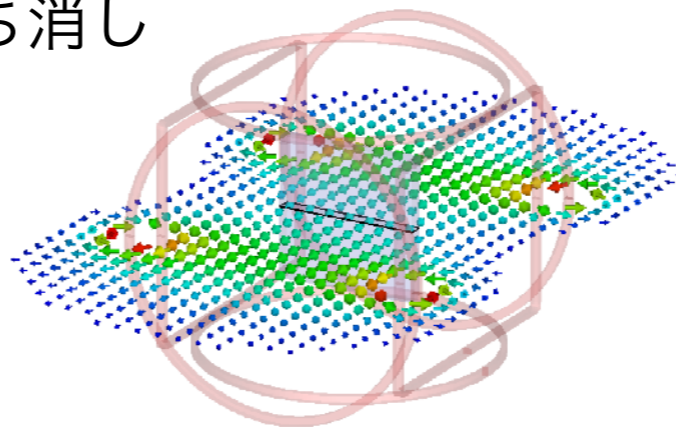
2-1. ミュオン冷却試験 実験装置



静電偏向器 (ED) と
偏向電磁石 (MB) で
粒子の運動量と種類を選別

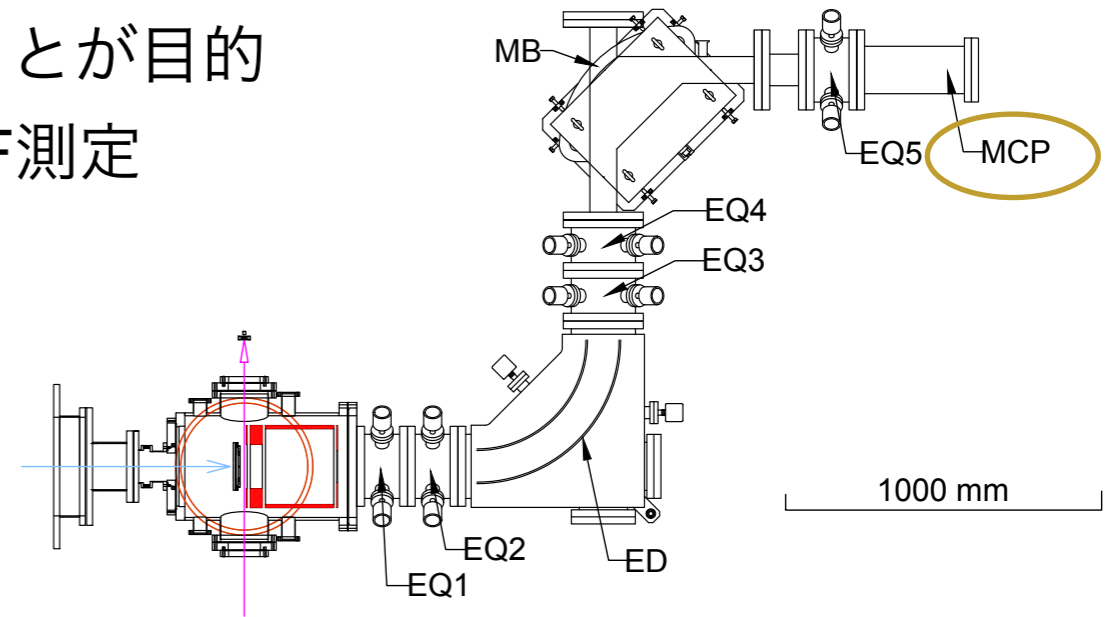
静電四極レンズ (EQ)

3軸コイルで数十 μ Tの
環境磁場を打ち消し

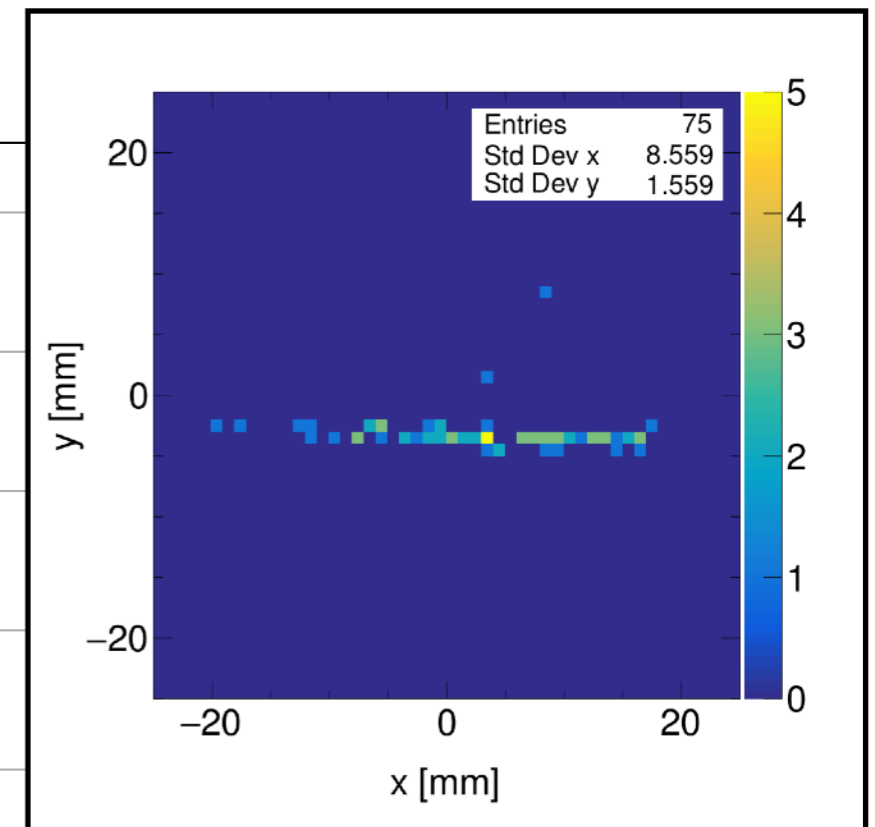
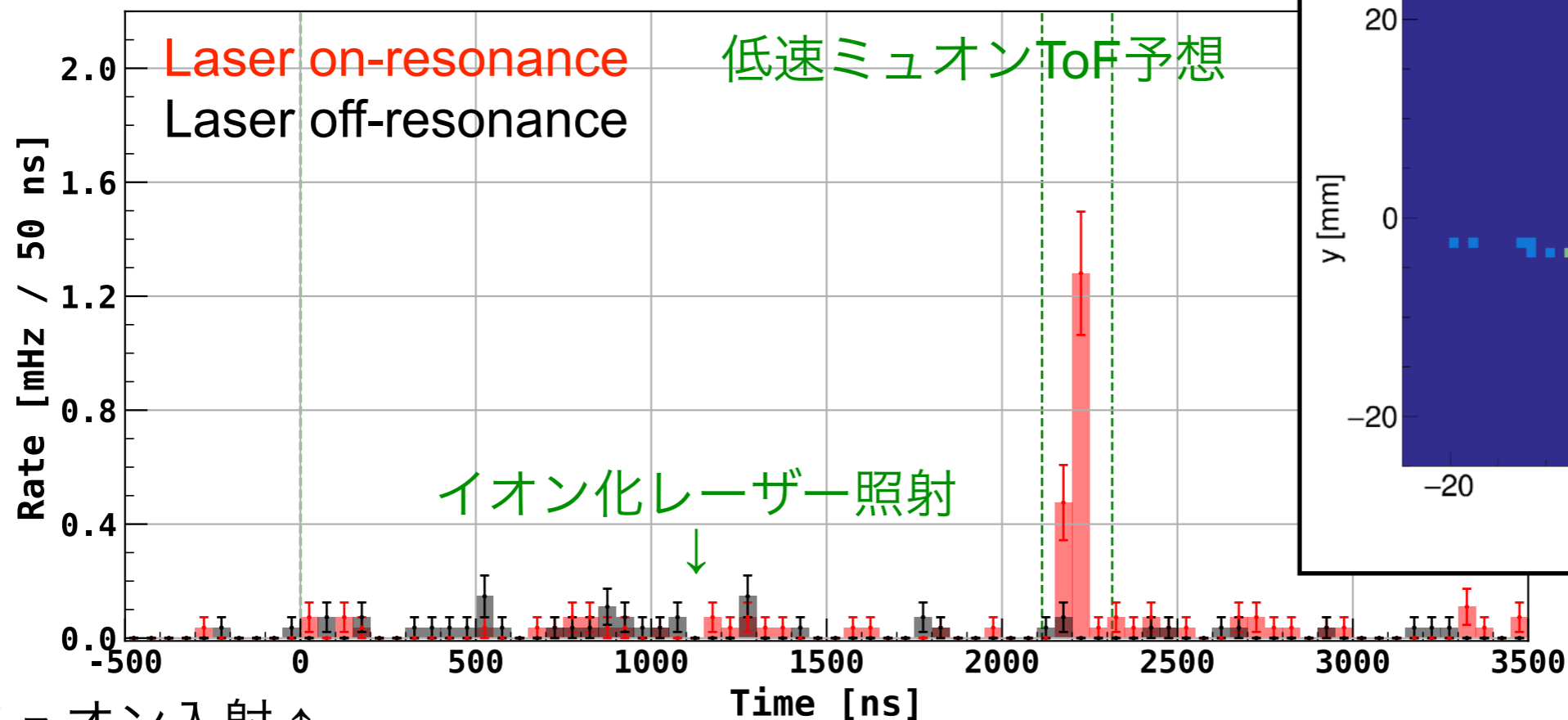


2-1. 低速ミュオンのToF・プロファイル測定

- 超低速ミュオンの生成数を把握し最大化することが目的
→ Soaレンズに10 kVを印加して取り出してToF測定
- 超低速ミュオンの取り出しに成功し、
毎秒 0.13 ± 0.02 個を観測

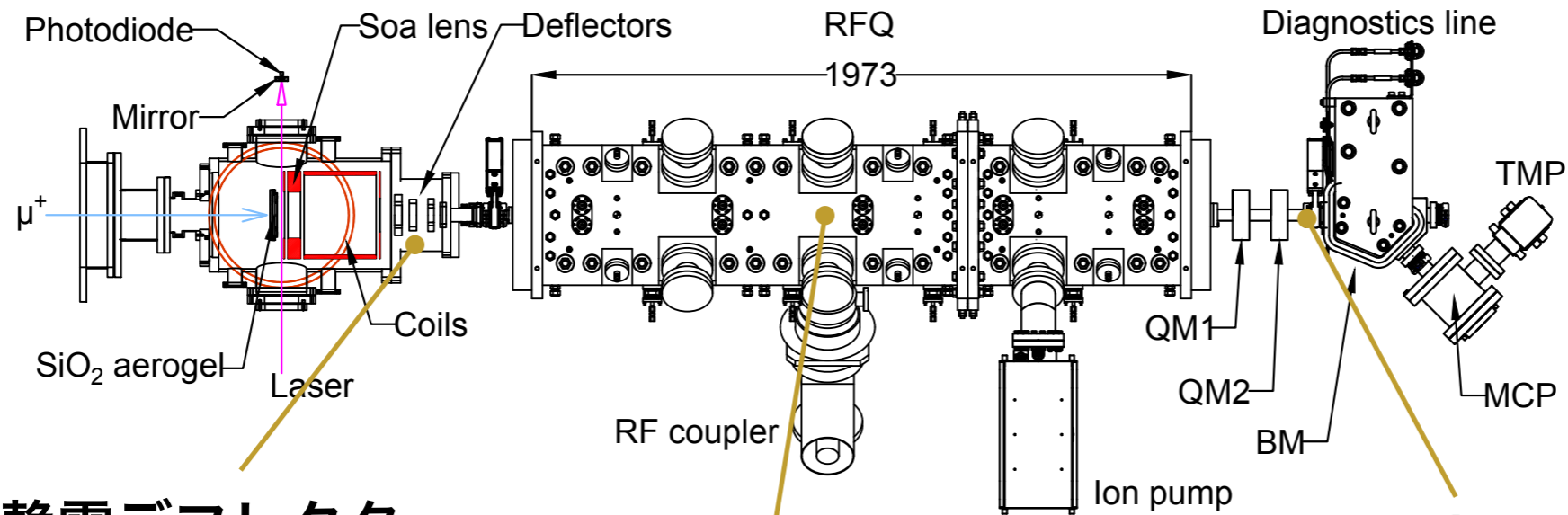


- 5.7 kVで取り出したプロファイルの解析が進行中



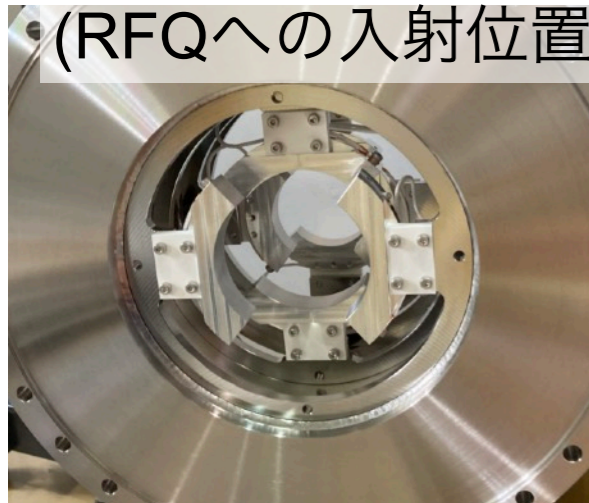
表面ミュオン入射 ↑

2-2. RFQによる冷却ミュオン加速試験 実験装置

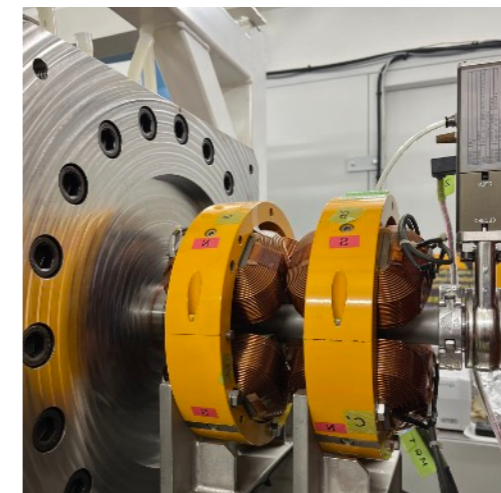


静電デフレクタ

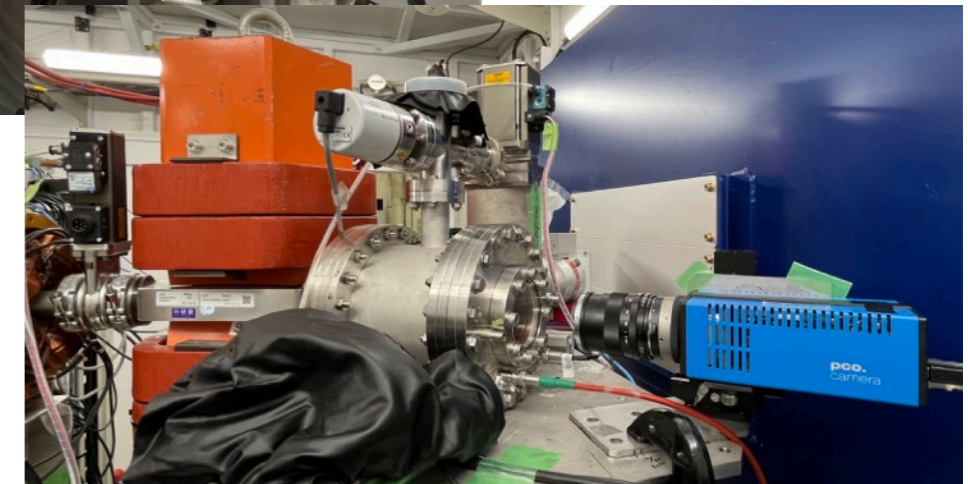
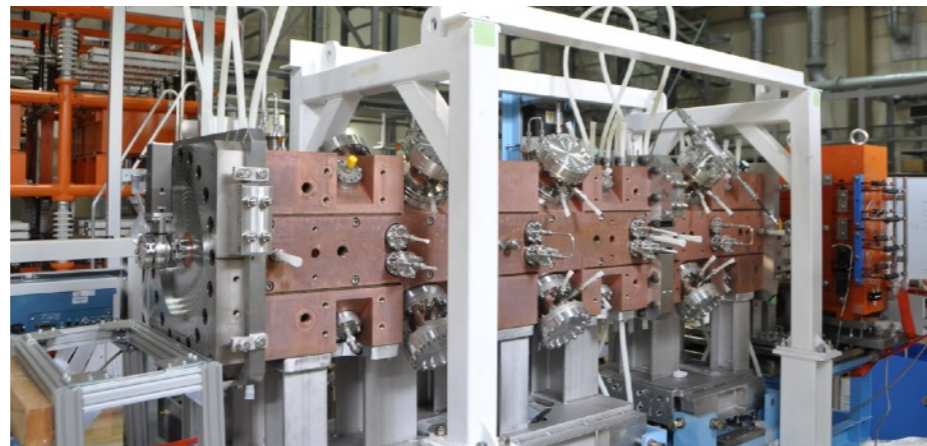
• (RFQへの入射位置・角度調整)



収束と運動量選別



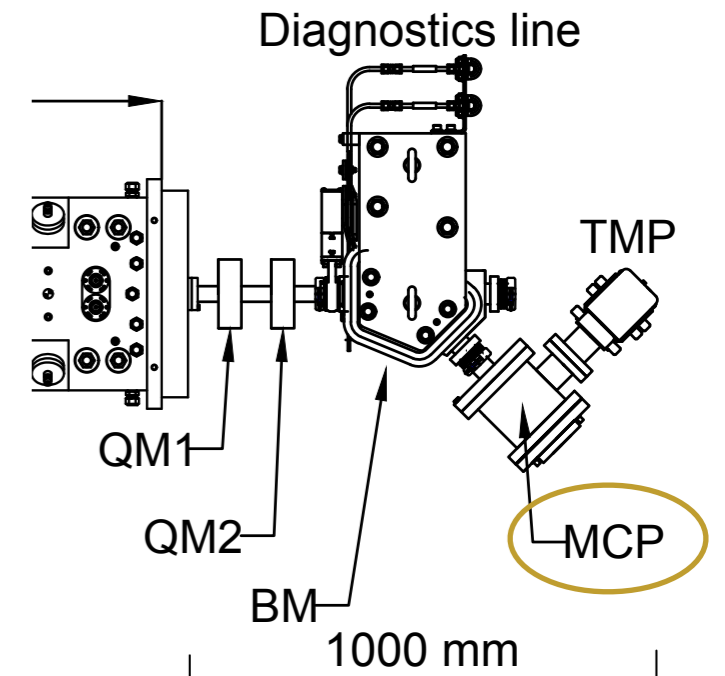
J-PARC H-RFQ試作機
(β : 0.01 \rightarrow 0.04)



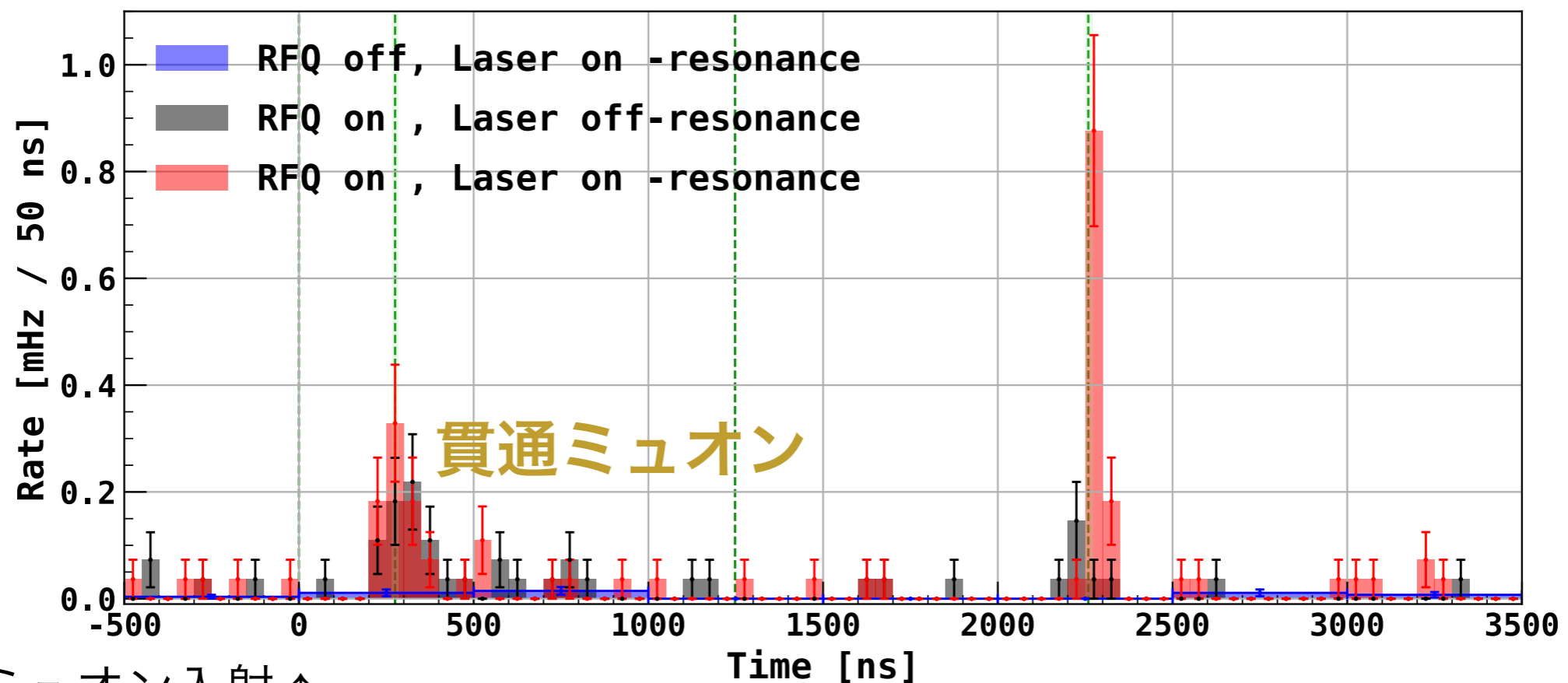
2-2. RFQによる冷却ミュオン加速試験 ToF測定

○ 貫通ミュオン:

標的を減速しながら突き抜け、RFQを通り抜けたミュオン
そのうち、加速ミュオンと同程度の運動量を持つもの
(RFQによるビーム収束は機能するのでoffだと見えない)



貫通ミュオンToF予想

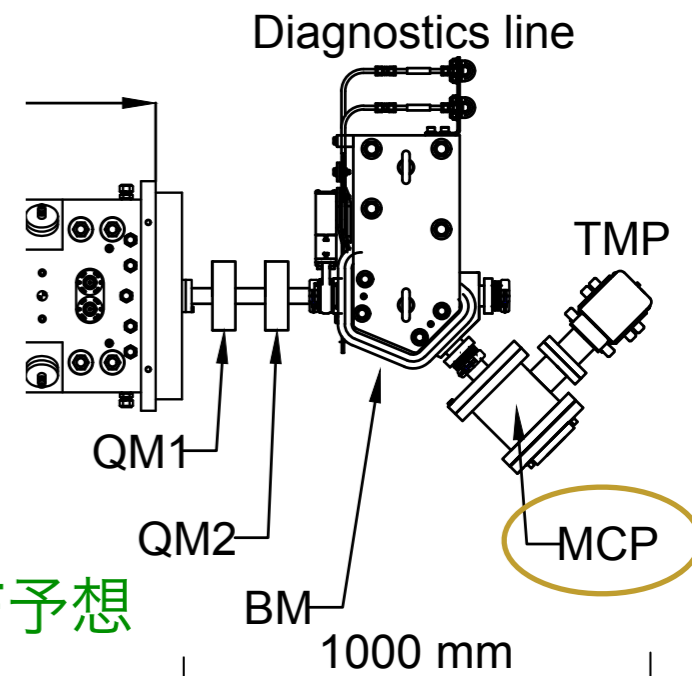


表面ミュオン入射 ↑

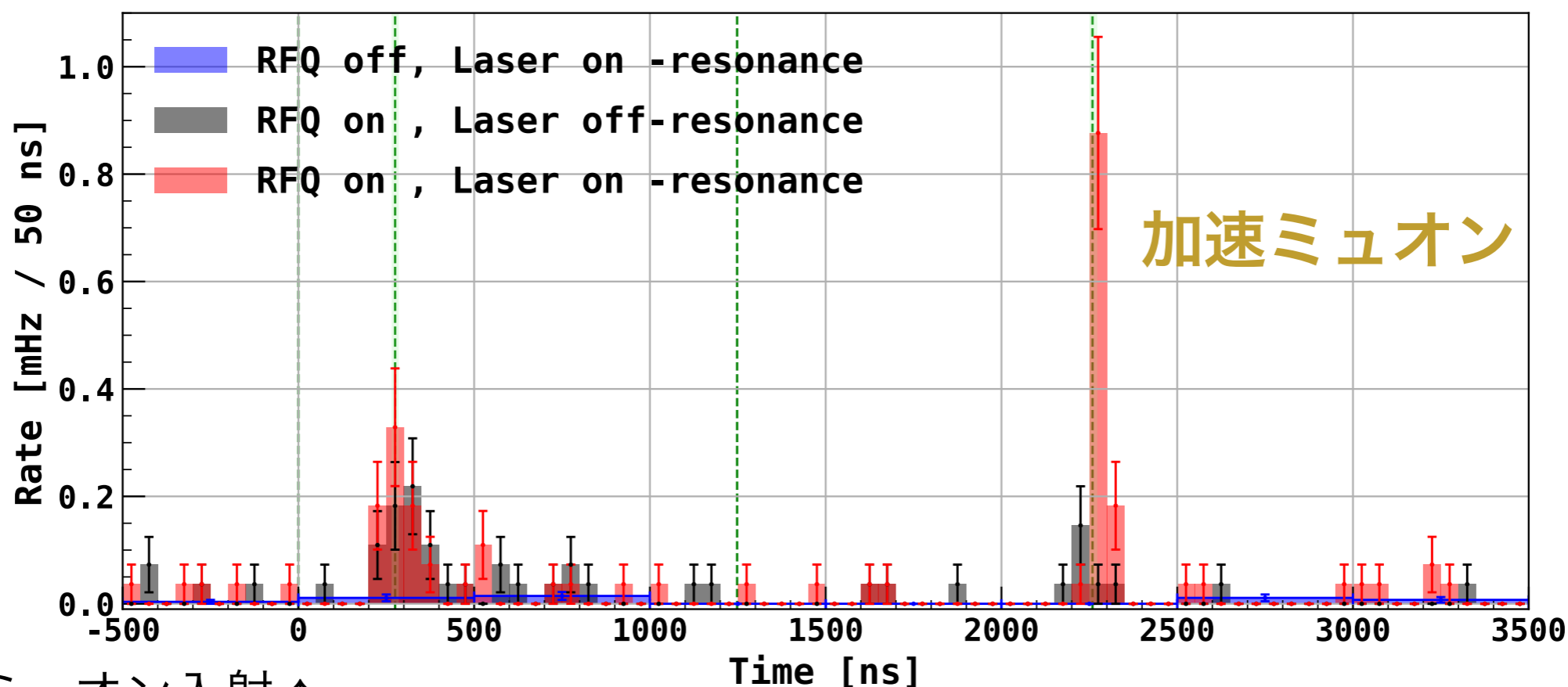
2-2. RFQによる冷却ミュオン加速試験 ToF測定

- RFQ onかつ共鳴イオン化時にのみピークを観測
- ToFから、レーザー照射のタイミングでイオン化され、RFQで加速されたミュオンと同定

→ 超低速ミュオンの高周波加速に成功



イオン化レーザー照射 ↓ 加速ミュオンToF予想 ↓



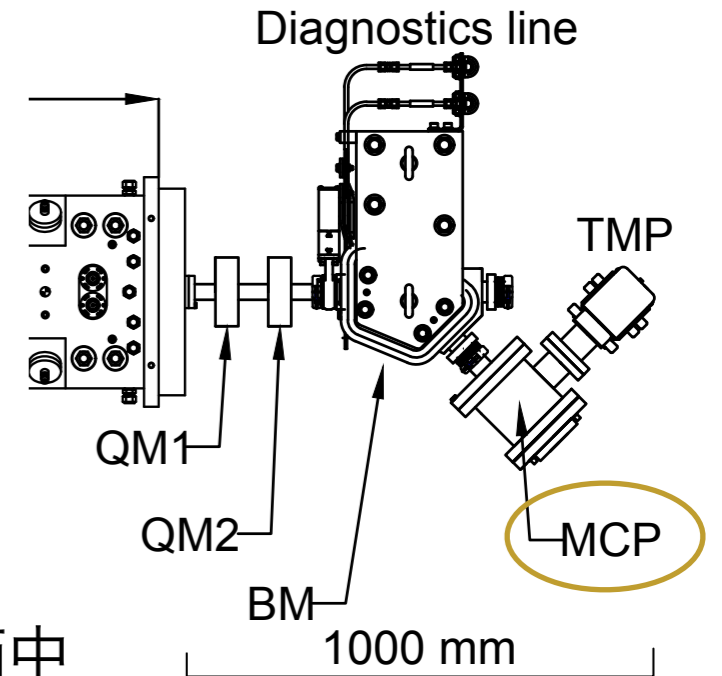
表面ミュオン入射 ↑

2-2. RFQによる冷却ミュオン加速試験 プロファイル測定

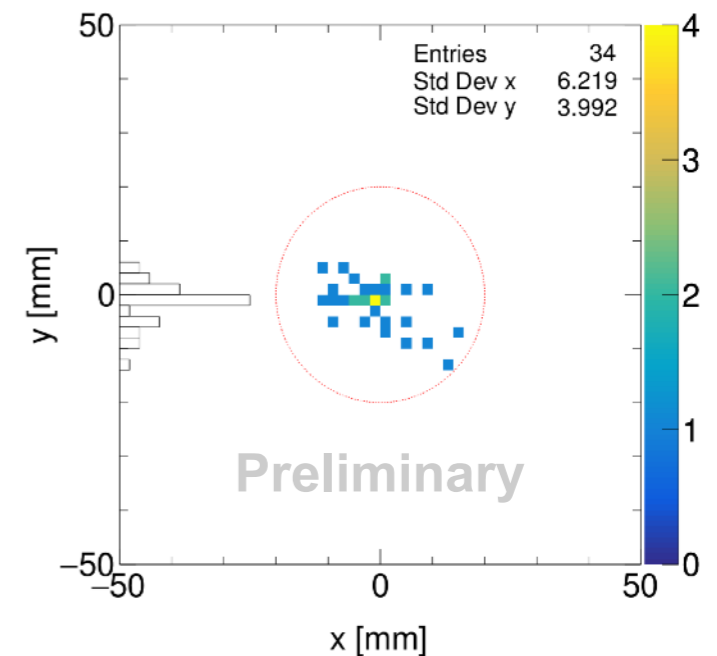
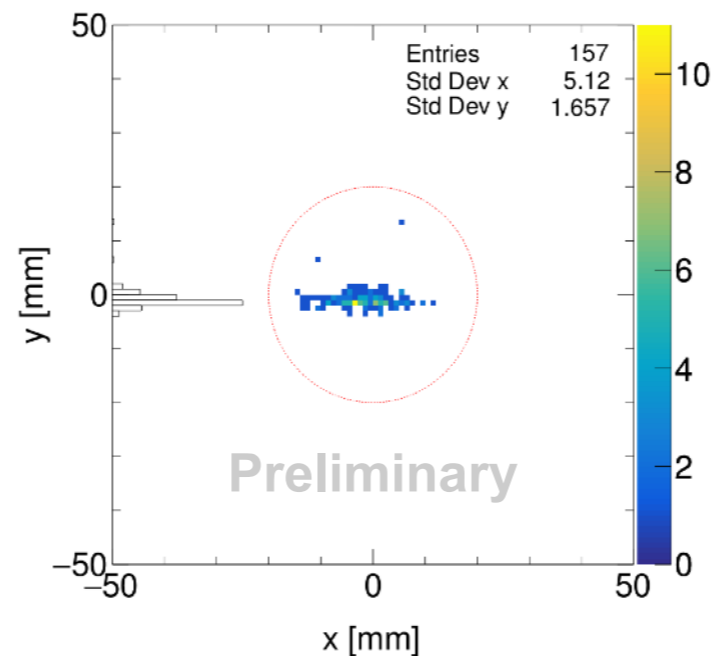
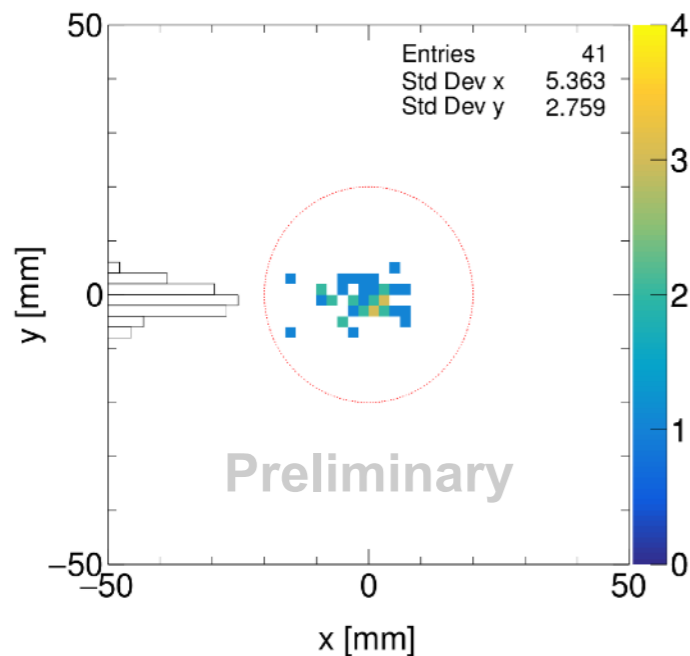
加速ミュオンのプロファイルを初めて測定

- QM2で垂直y方向収束力を変えながらy方向のウエストを確認
(各プロファイルの測定に1~4時間)

水平x方向収束 (QM1)
+ 垂直y方向収束 (QM2)
+ 水平方向45度偏向



- 背景事象を考慮しながらQスキャン法でエミッタンスを評価中



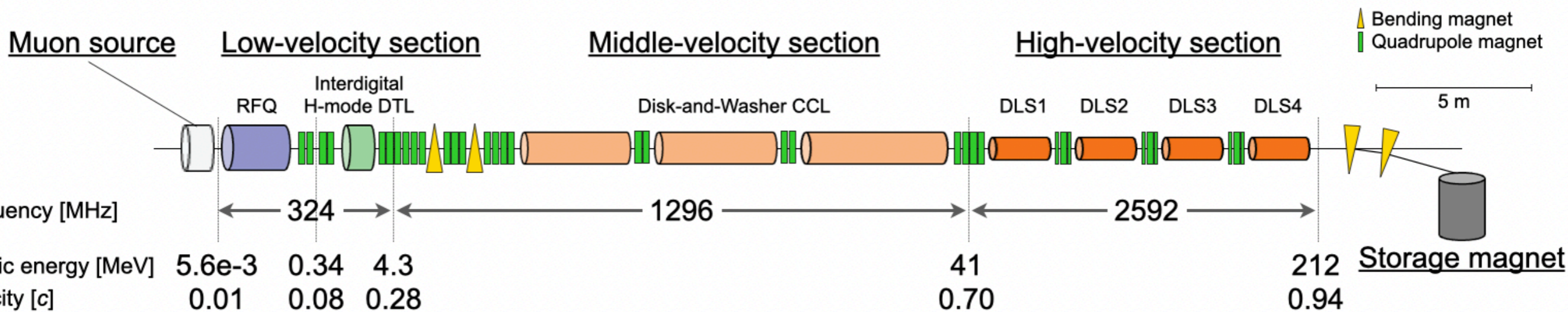
QM2 field gradient

3. 展望

g-2/EDM実験を行うH2エリアへ
表面ミュオン数が増加

実機レーザーシステムを建設
レーザー強度=イオン化確率も増加

冷却ミュオン源の大強度化 (2025年)

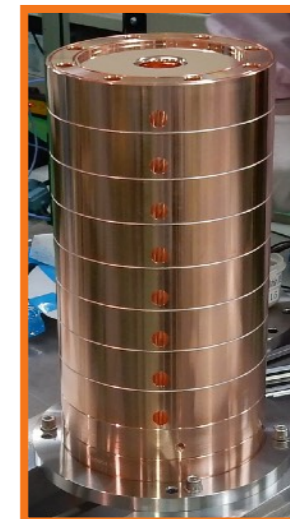
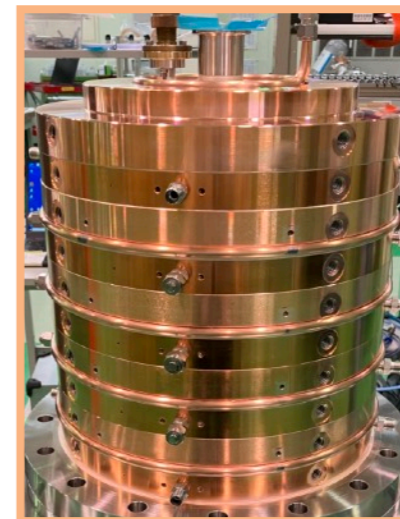


340 keV, 4.3 MeVまでの加速実証 (2026, 2027年)

中・高速部の空洞製作 (~2027年)

実機RFQでの加速

ミュオン用IH-DTLでの加速



まとめ

○ 冷却されたミュオンの高周波加速に初めて成功

- ▶ 超低速ミュオン生成（室温シリカエアロゲル+244 nmレーザー共鳴イオン化）
- ▶ 加速ミュオンの飛行時間を測定
- ▶ 加速ミュオンのプロファイルを初測定

○ 今後の予定

- ▶ Qスキャン法による低速・加速ミュオンのエミッタンス、透過率の評価

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (18H05226, 19H05606, 20H05625, 21K13944, 21J01132, 22KJ1594, 22K21350, 22H00141, 24H00023, 24K03211)、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118069021、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A1 の助成を受けたものです。

実験は J-PARC MLF の実験課題 (2011MS06) として実施されました。