

ミュオン加速器

Nov. 8th 2022,
Flavor Physics workshop 2022

*KEK Acc. Masashi Otani
for the J-PARC E34 Collaboration*

レプトン物理 (1)



自己紹介

2009/3

修士論文「**T2K**長基線ニュートリノ振動実験
ニュートリノビームモニター INGRID
の製作と性能評価」

2012/3

博士論文「Measurement of **Neutrino Oscillation**
in the **T2K** Experiment」

2012/4-

東北大ニュートリノ科学センター教育研究支援者

2013/11-

KEK素核研博士研究員

J-PARC ミューオンg-2/EDM実験
ミューオン加速器開発

2017/4-

KEK加速器助教

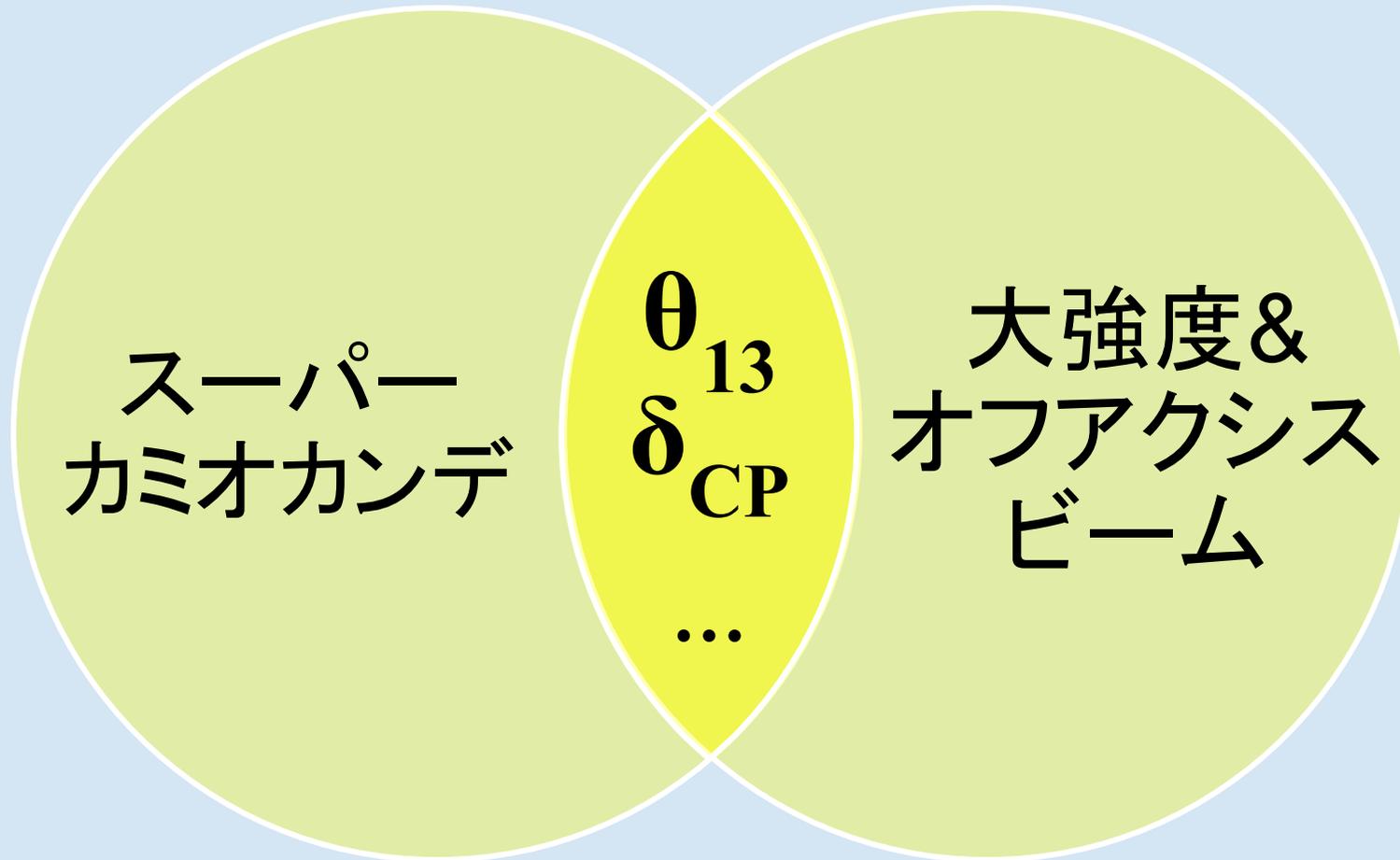
2021/10

AAPPS-APCTP **C.N. Yang Award**「For his development of the
muon linac in realizing the **muon acceleration for the first time**
in the world」

T2K実験

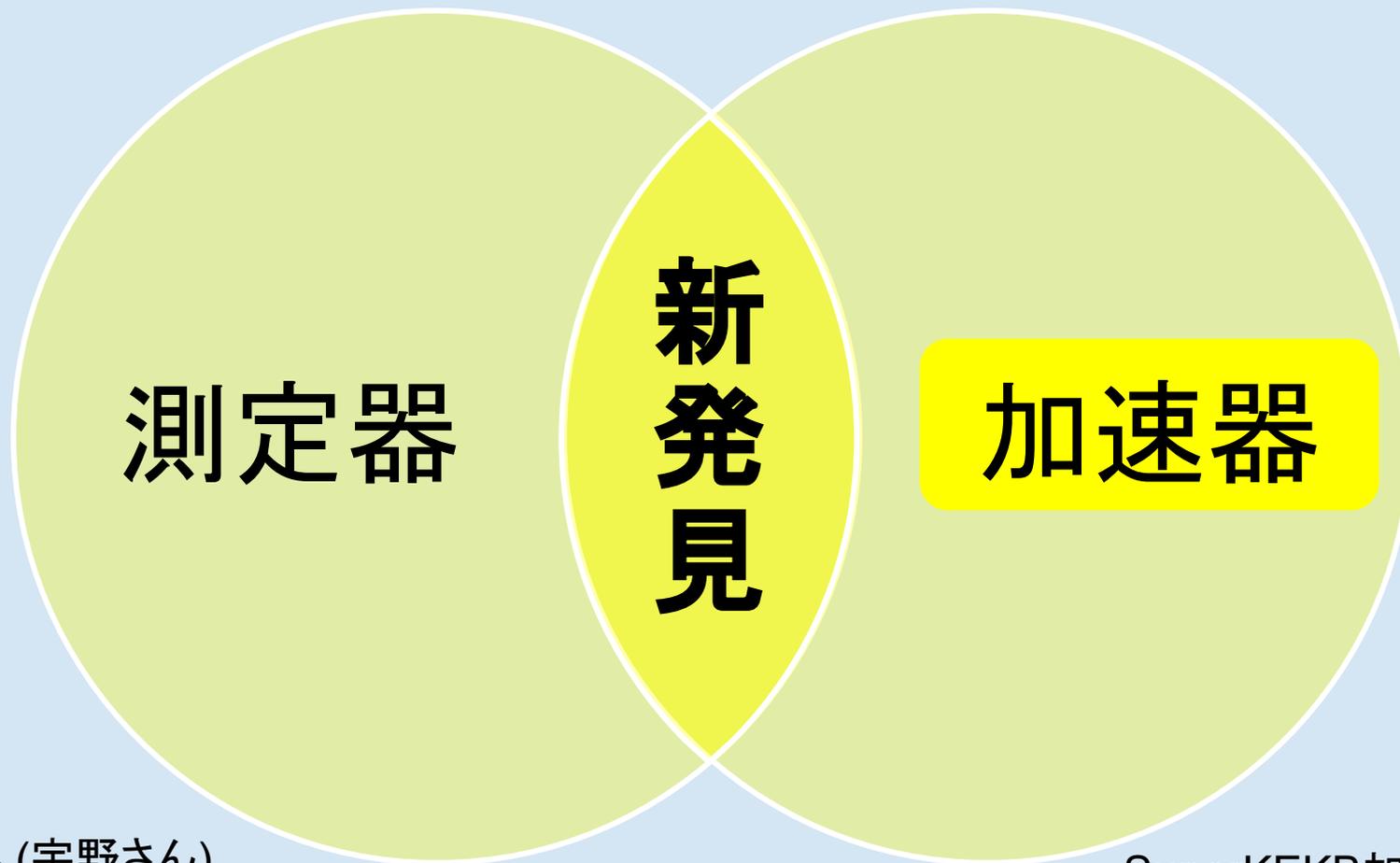
*主観です

ニュートリノ実験 (Lukasさん)



高エネルギー物理学

*主観です



Belle II測定器 (宇野さん)

SVD, TOP, ARICH...

解析手法、機械学習 (岩崎さん)

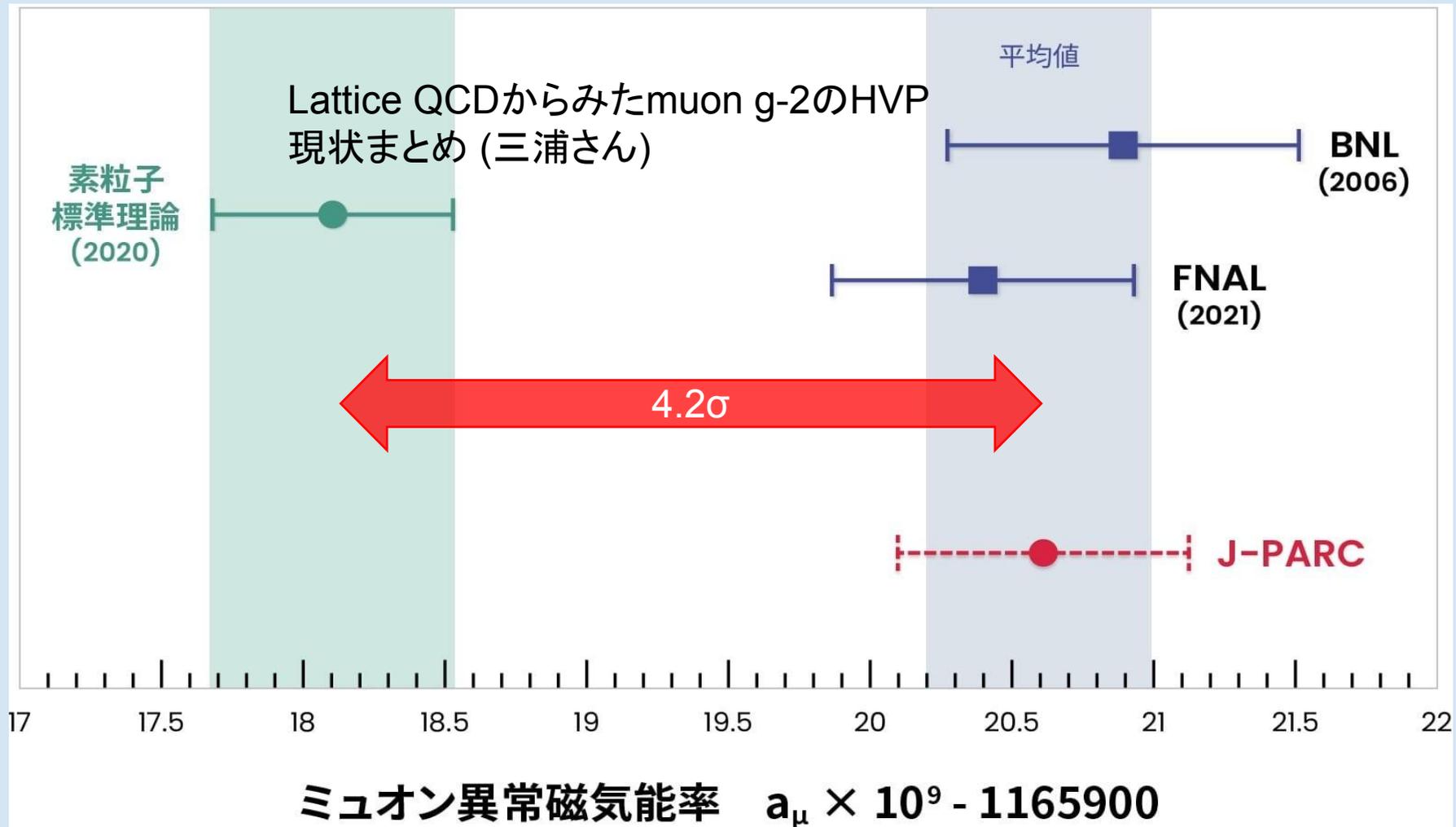
...

SuperKEKB加速器 (渡邊さん)

ビームロス改善

...

ミューオン異常磁気能率 ($g-2$)

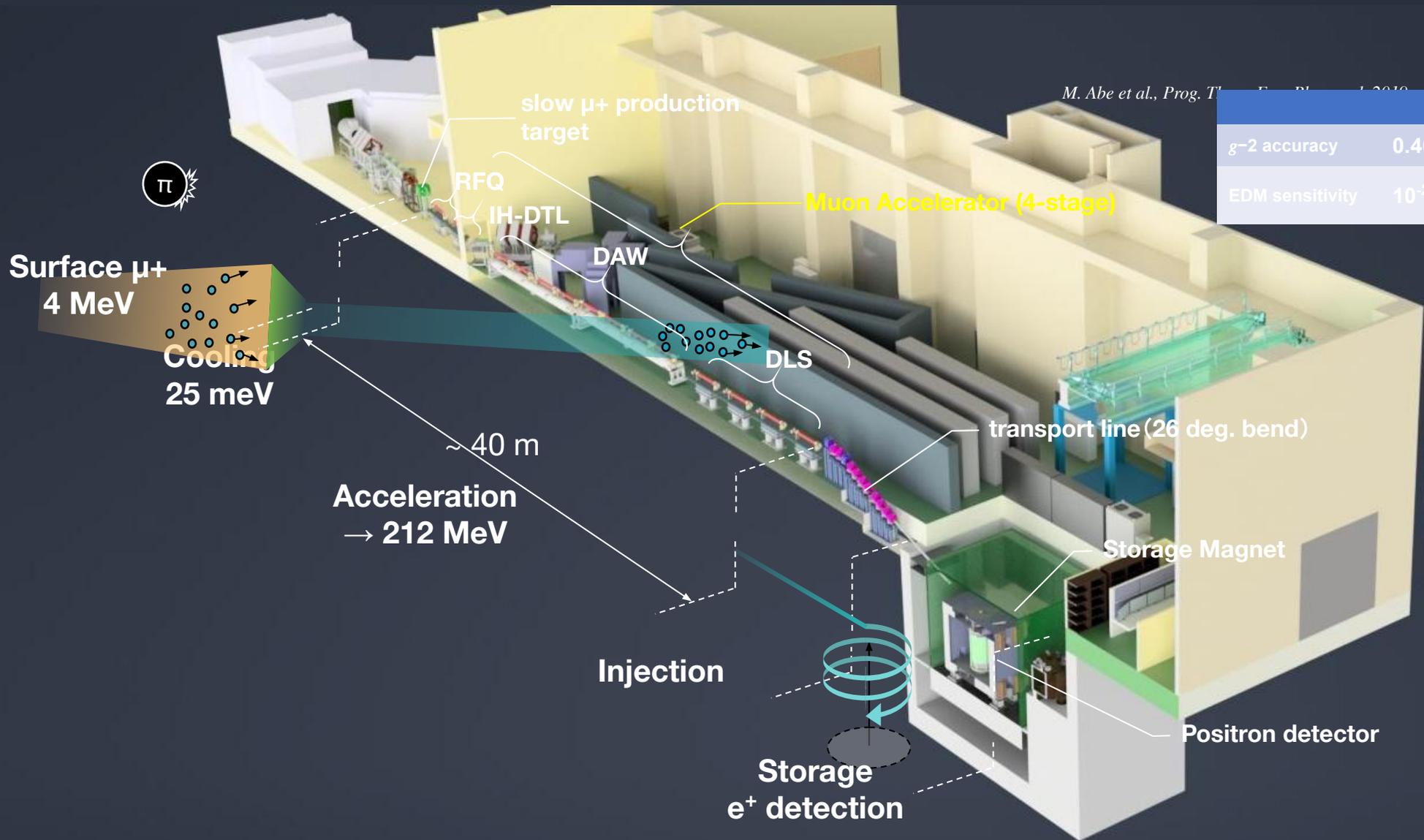


新しい加速技術 = 「ミューオン加速」で $g-2$ 問題に決着をつける

ミューオン加速によるg-2測定

(J-PARC muon g-2/EDM experiment)

M. Abe et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053A01 (2019)



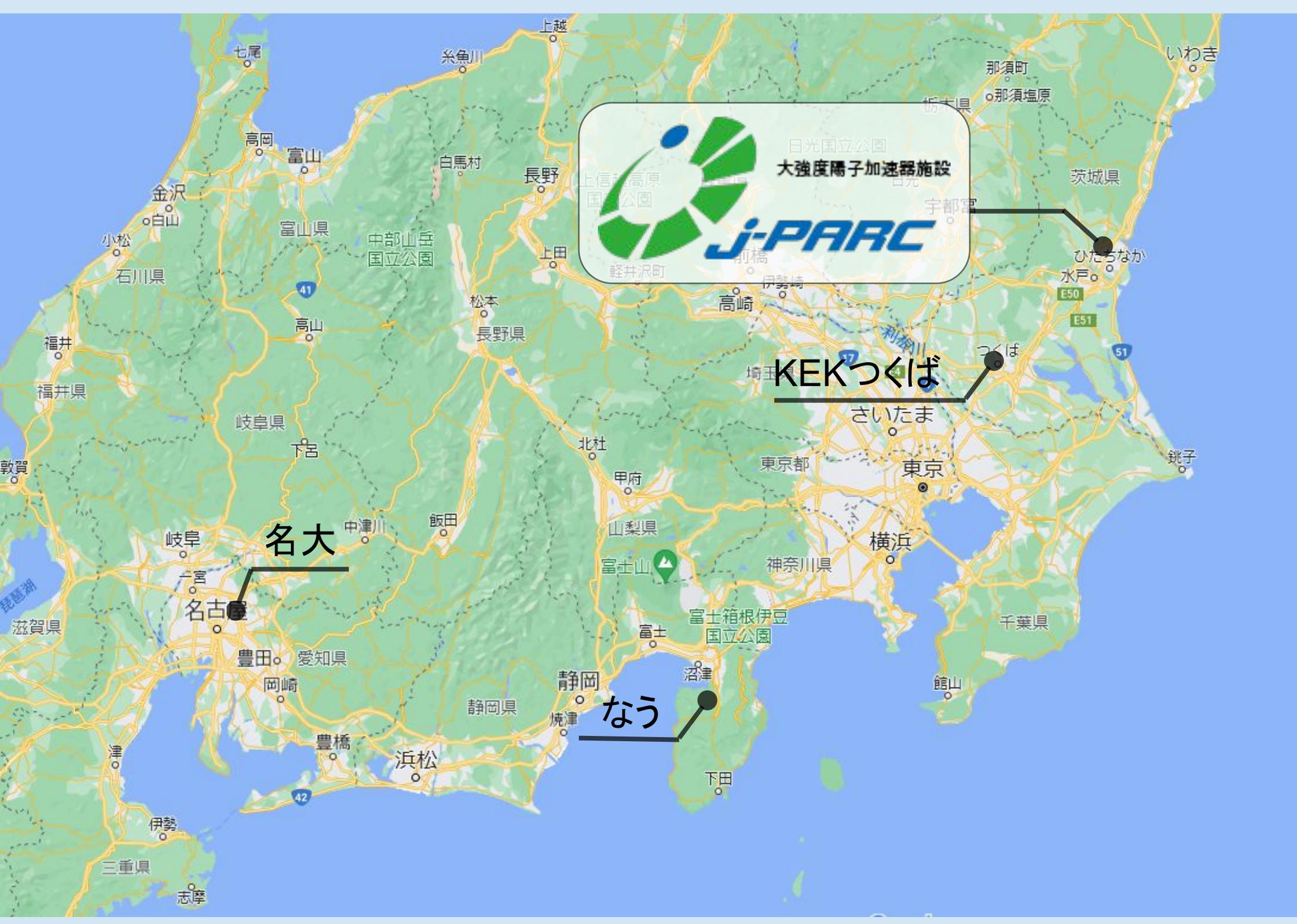
ミューオン加速以外は次の佐藤さんの講演参照



KEKつくば

名大

なう





LINAC 400 MeV



RCS 3 GeV



MR 30 GeV

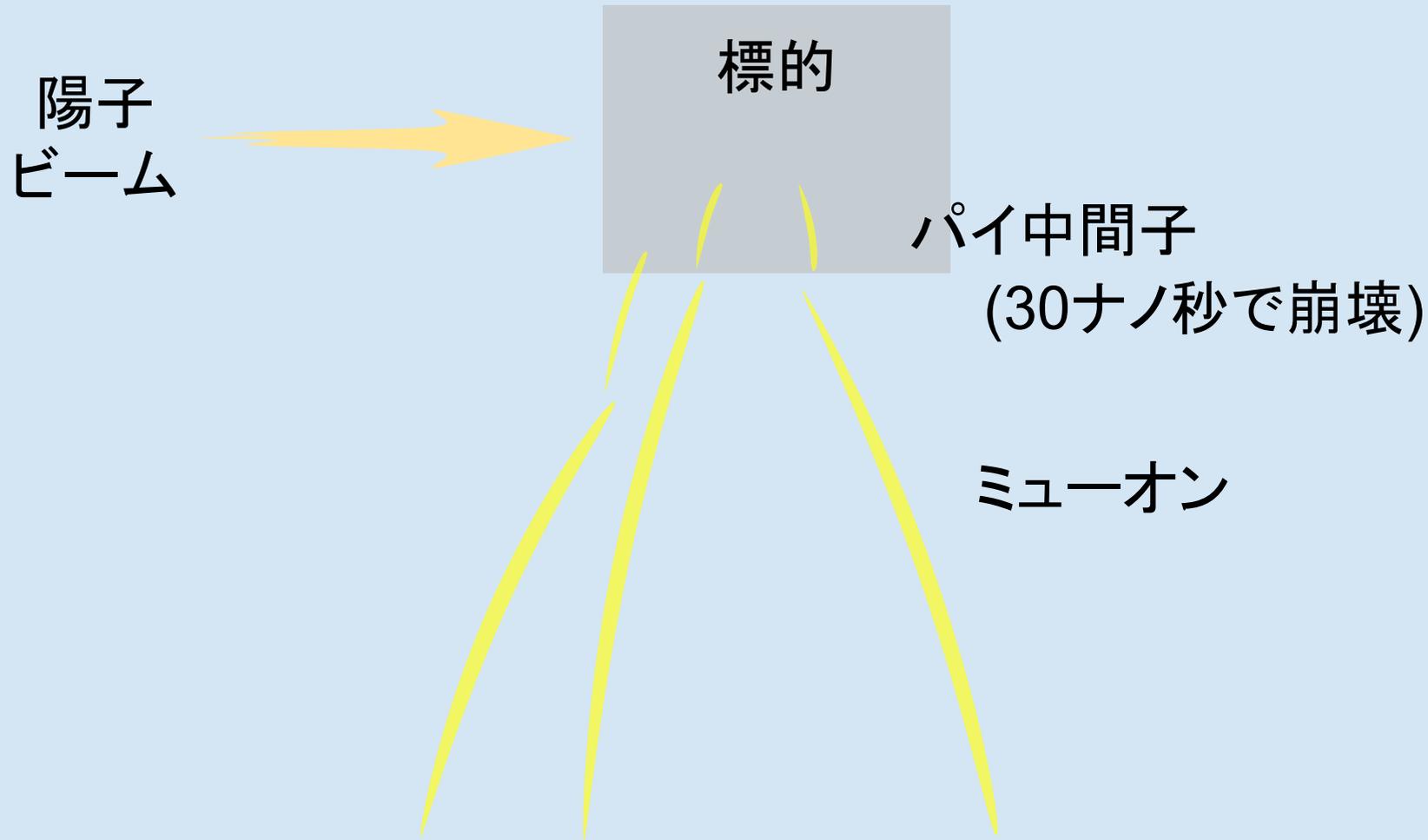


ニュートリノ
実験施設

MLF

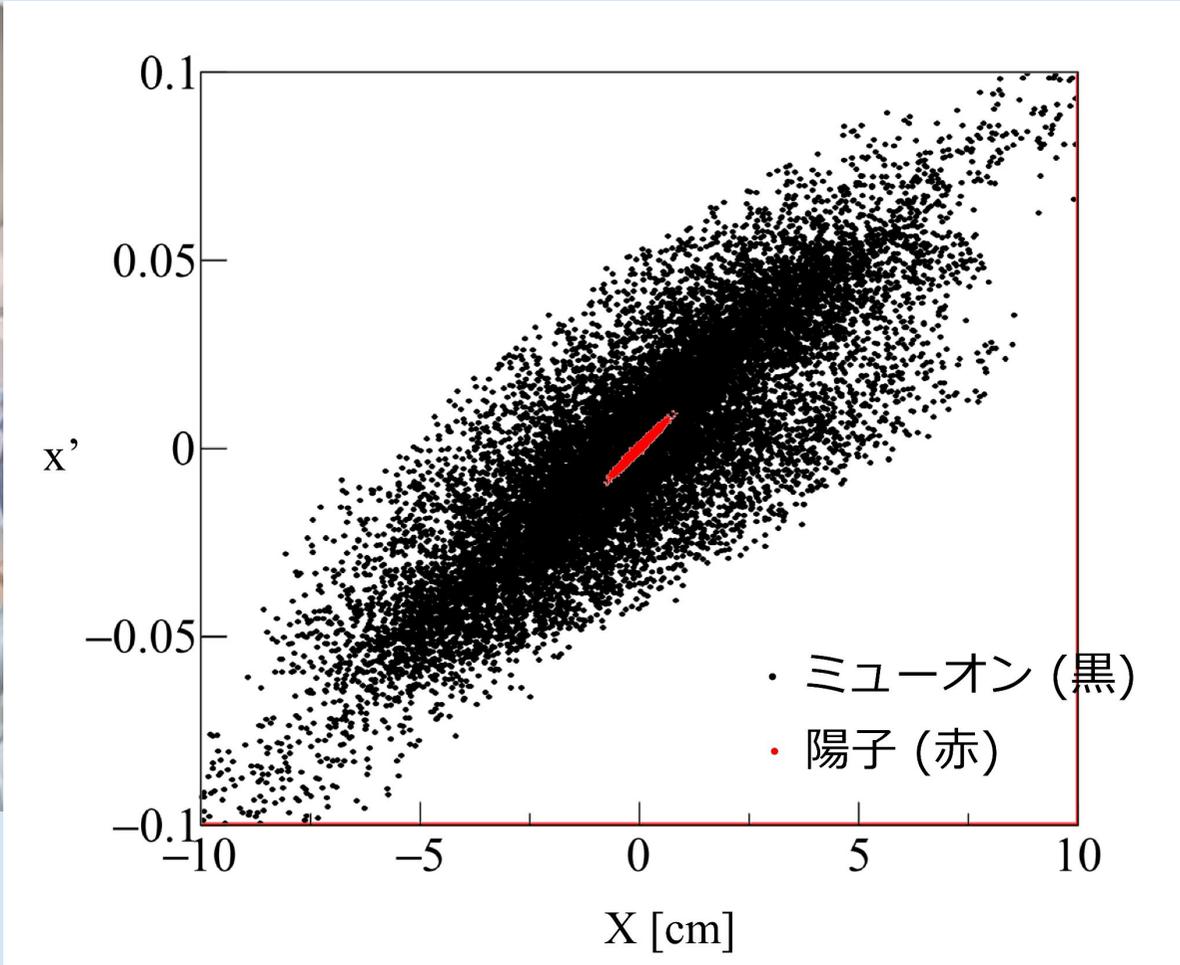
ハドロン
実験施設

加速器で作るミューオン



ミューオンビームの品質

エミッタンス~位相空間を占める面積が非常に大きい

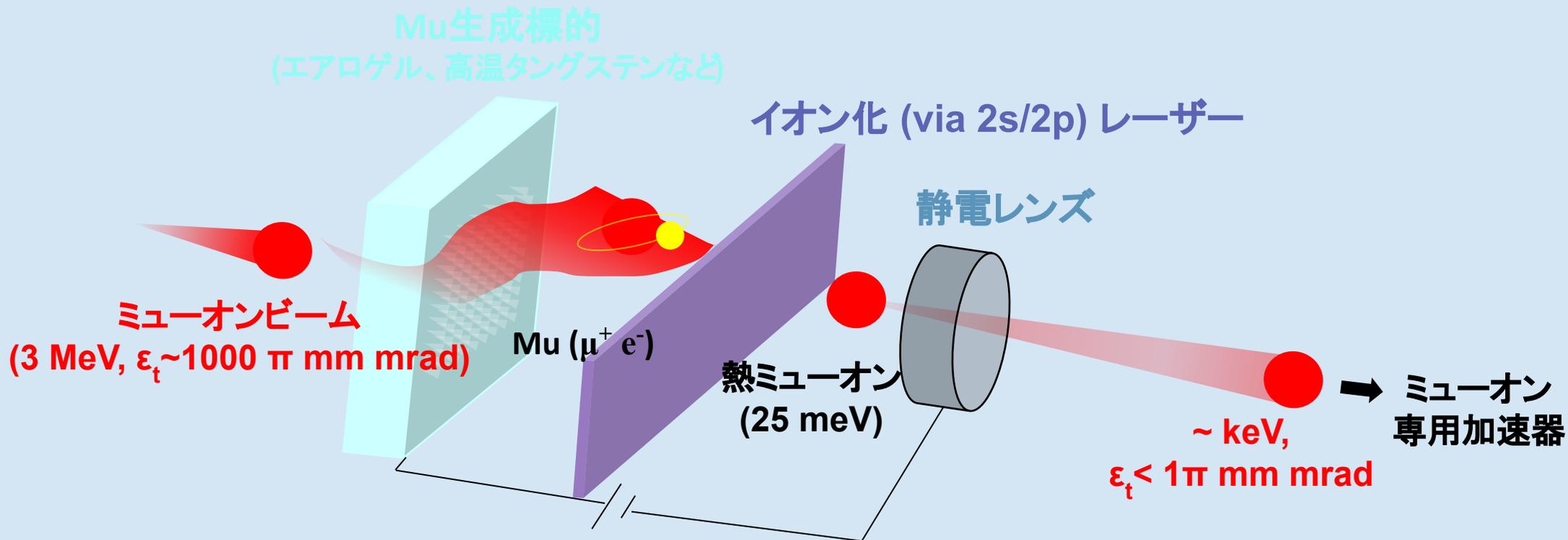


ミューオン: $\sim 1,000 \pi \text{ mm mrad}$ (cf. J-PARC linac $\sim 1 \pi \text{ mm mrad}$)

ミューオンを利用した様々な実験のボトルネック

ミューオンの冷却技術

- ミュオニウムレーザーイオン化をはじめとした冷却技術が発展・確立



1986-1988

Mu観測, Muイオン化 (1s-2s) [PRL 56 (1986) 1464, 60 (1988)101]

1995-2008

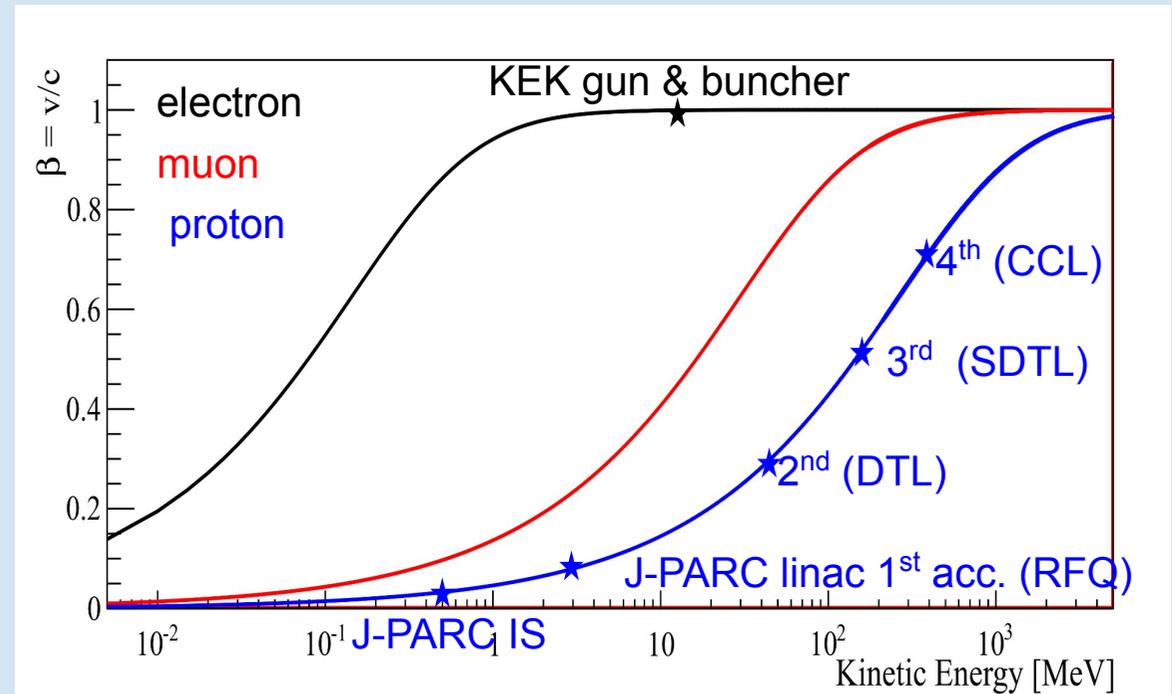
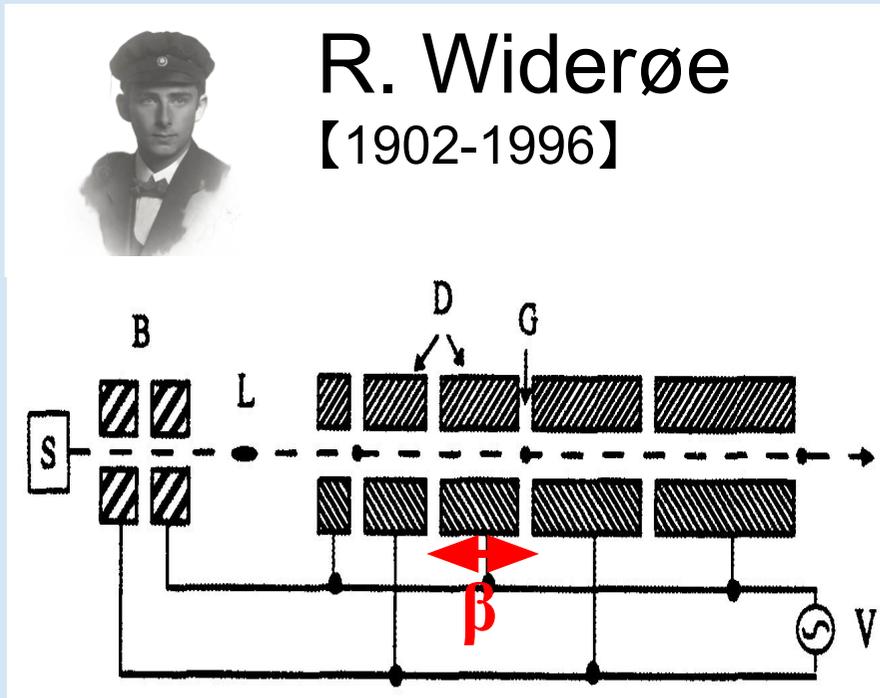
1s-2pイオン化, μ SR法への利用 [RRL 74 (1995) 4811, NIMB 266 (2008)335]

2010s-2020s

大強度化、素粒子実験への利用 [PTEP.091.C01.2014...]

ミューオン専用線型加速器

- これまでにないミューオン専用の線型加速器設計が必要



FY2015
設計開始



FY2016
設計完了



FY2017
加速準備完了

FY2018
世界初の加速成功



FY2019
バンチ幅を測定

FY2020
試作器製作



FY2021
実機製作開始

• PRAB19 (2016) 040101

• J. Phys. Conf. 874 (2017) 021038

• J. Phys. Conf. 874 (2017) 012054

• J. Phys. Conf. 874 (2017) 012055

• PRAB21 (2018) 050101

• NIMA899 (2018) 22

• NIMA908 (2018) 313

• J. Phys. Conf. 1067 (2018) 052018

• J. Phys. Conf. 1067 (2018) 052012

• NIMA937 (2019) 164

• NIMA943 (2019) 162475

• NIMA946 (2019) 162693

• J. Phys. Conf. 1350 (2019) 012054

• J. Phys. Conf. 1350 (2019) 012067

• J. Phys. Conf. 1350 (2019) 012097

• PRAB23 (2020) 022803

• PRAB24 (2020) 033403

これまでの歩み

ミュオン線型加速器:3つの要求

• ビーム品質

- g-2測定精度の要求からエミッタンス $\varepsilon < 1.5\pi$ mmmrad, 運動量分散 $\Delta p < 0.1\%$
- 入射ビーム分布が想定からズレると $\varepsilon \cdot \Delta p$ 共に増大

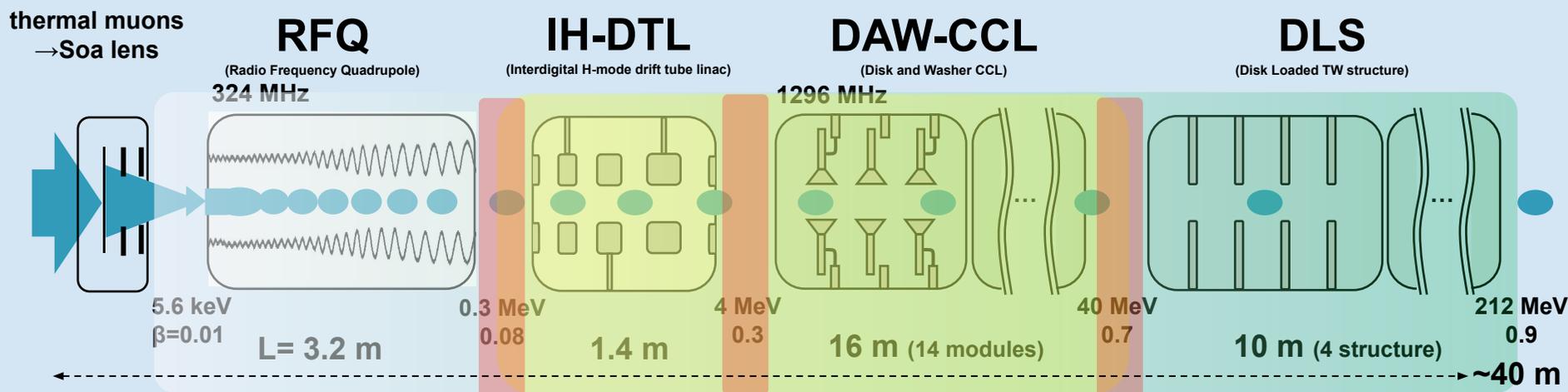
• 高加速勾配

- 崩壊損失→統計精度
- 実験エリア < 40メートル

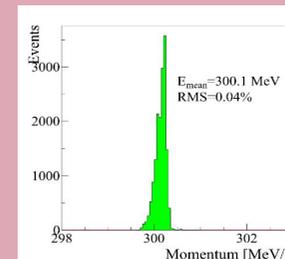
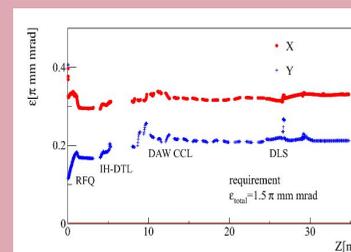
• 高効率

- 効率 = 加速に使える実効的な電力 / RF電力。
専門用語でシャントインピーダンス
- RF電力源は主要なコスト源

基本設計 FY2016



- ビームを実測 & 調整するビームライン
- 新しいミュオンビームモニターが必要



- 電子 ($v=c$ で一定)で高勾配加速の実績のあるDLSを採用
→ミュオン ($v<c$ で変化)専用の設計が必要 → 鷲見さん(名大)の発表

- イオン加速で実績のあるIH-DTL、高効率が期待されるDAW-CCLを採用
→電磁場分布が複雑で原理実証が必要

そもそもミュオン加速自体が未実証

加速実証にむけた準備 FY2017

- 実験施設建設に先立って加速を実証するために、負ミュオニウムイオン ($\text{Mu}^-: \mu^+ e^- e^-$, $< \text{keV}$)を用いた新しい冷却方式を開発
 - 本実験ではミュオニウム+レーザーによる冷却 (25 meV)

Mu^- 生成 ($< \text{keV}$)

μ^+ ($\sim 3 \text{ MeV}$)

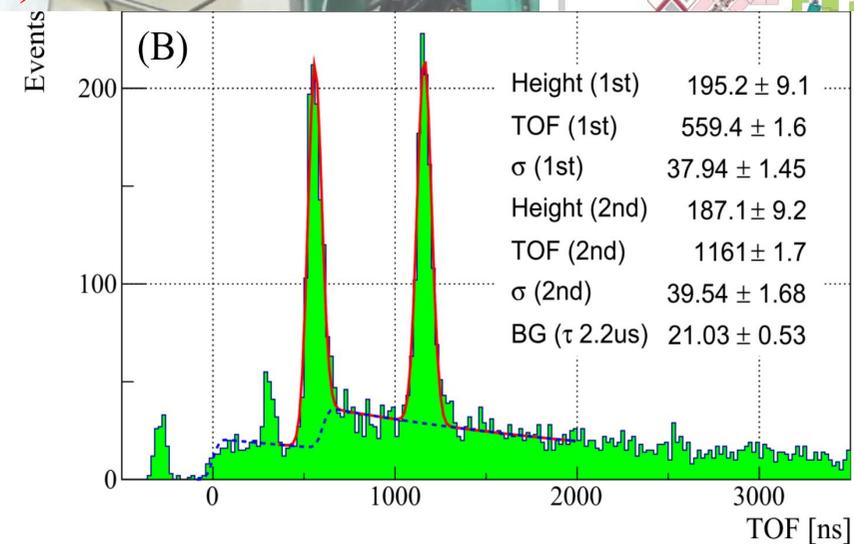
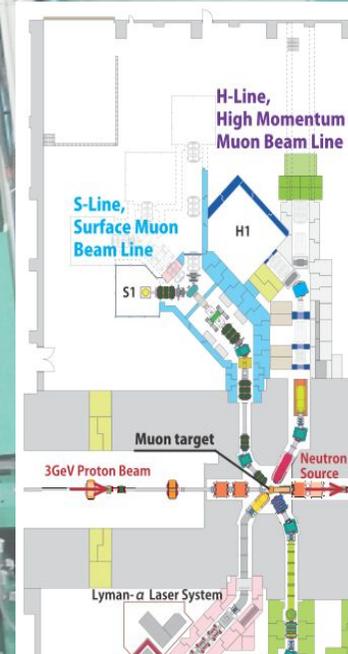
静電レンズによる加速・取り出し

偏向電極

マイクロチャンネルプレート (MCP)

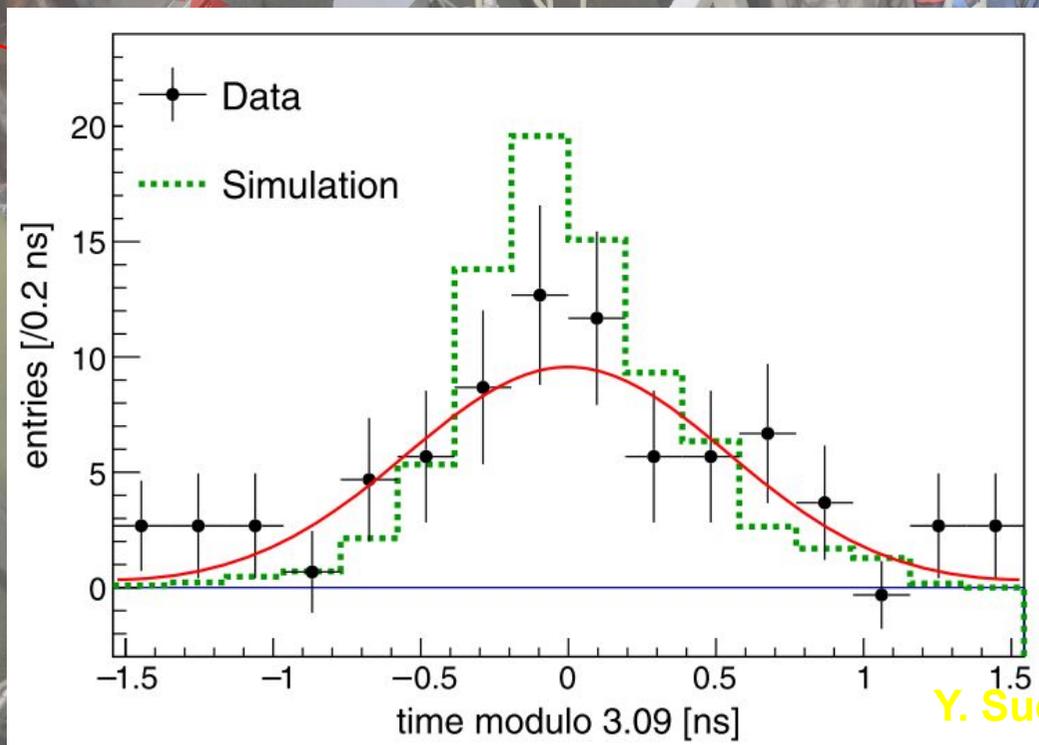
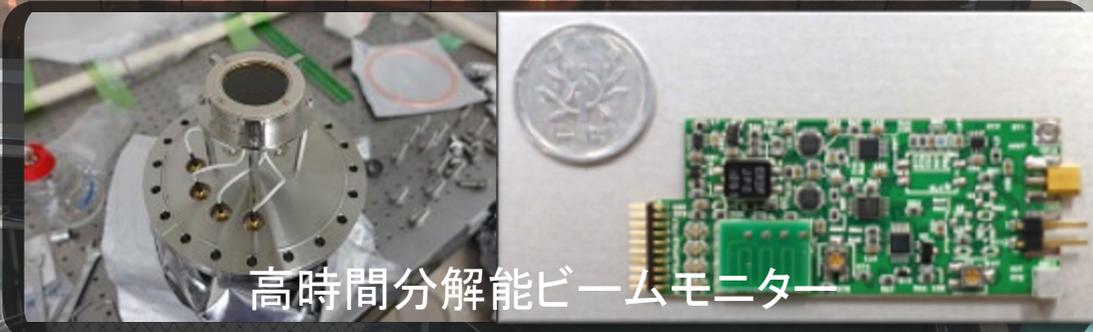
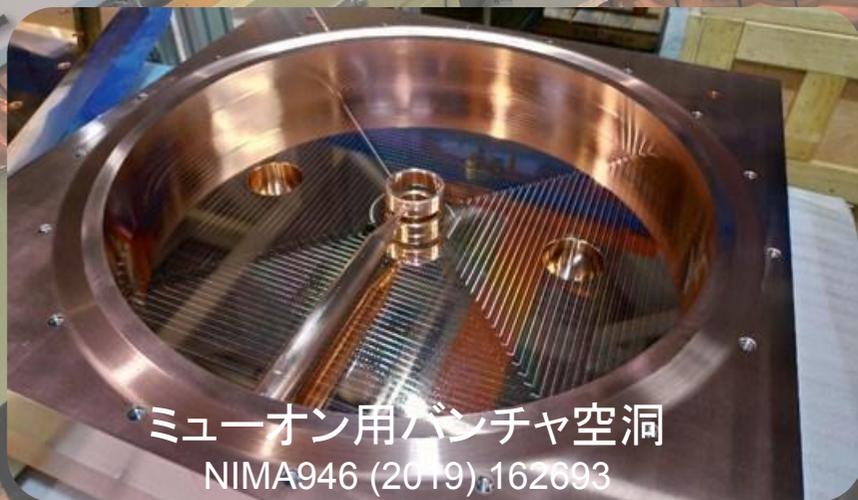
4極電極

偏向電磁石



加速実証に十分な冷却性能を実証

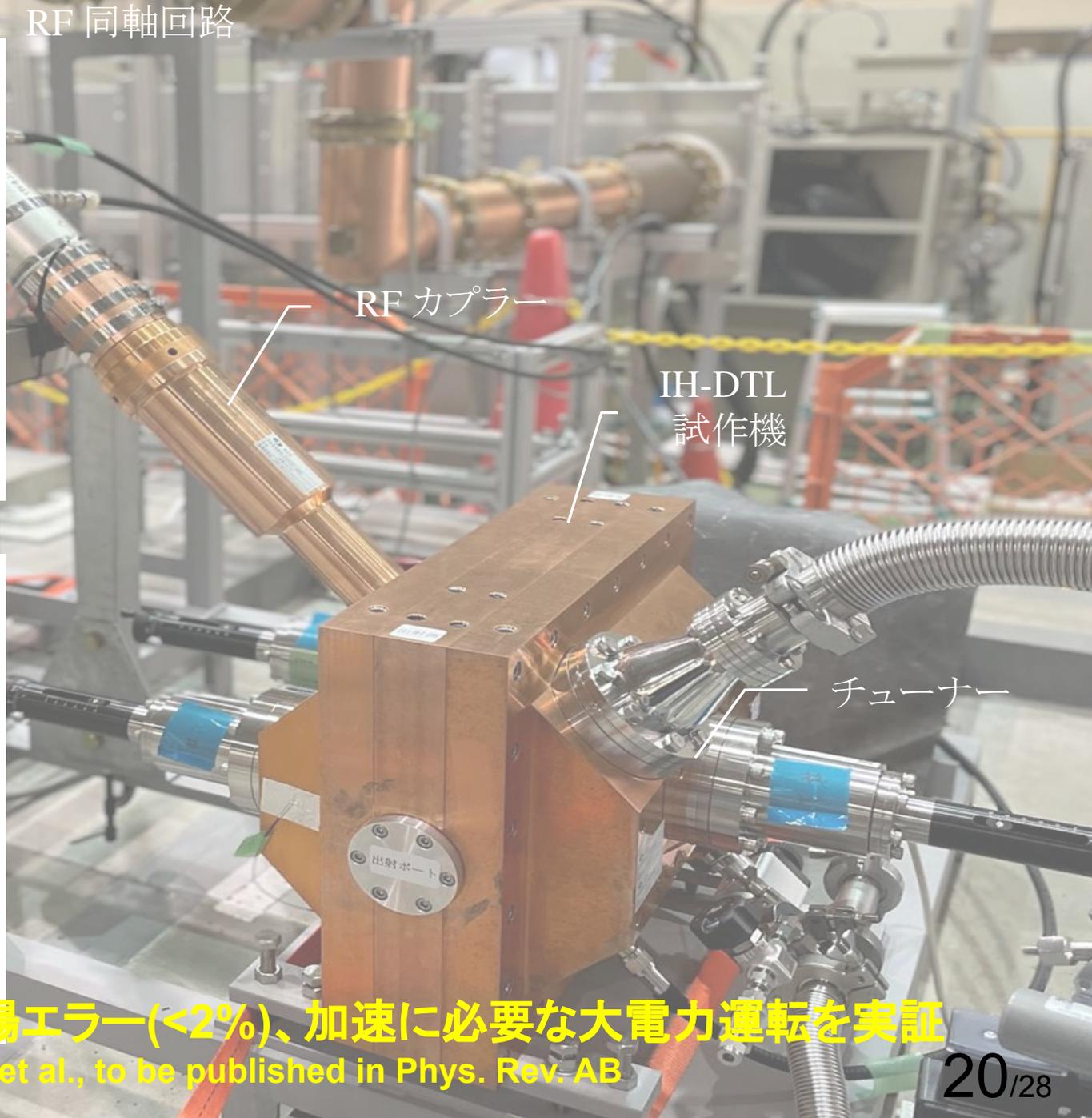
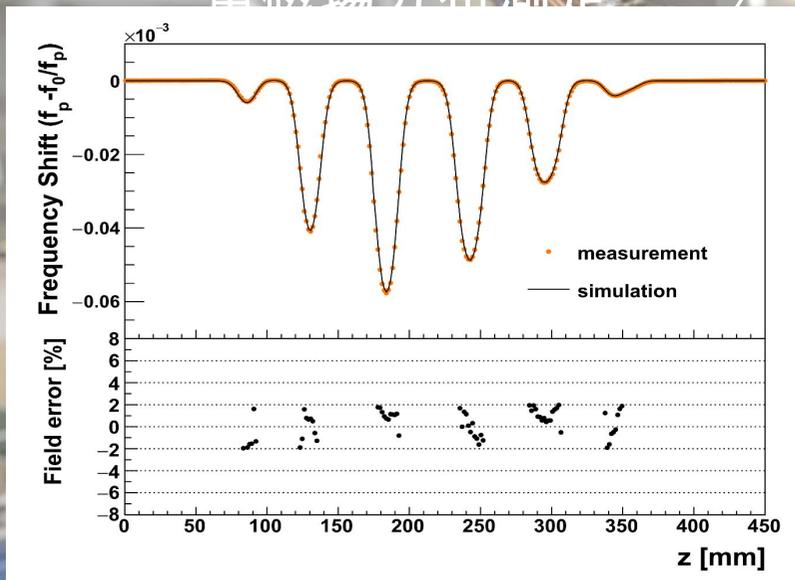
ビーム分布測定 FY2019



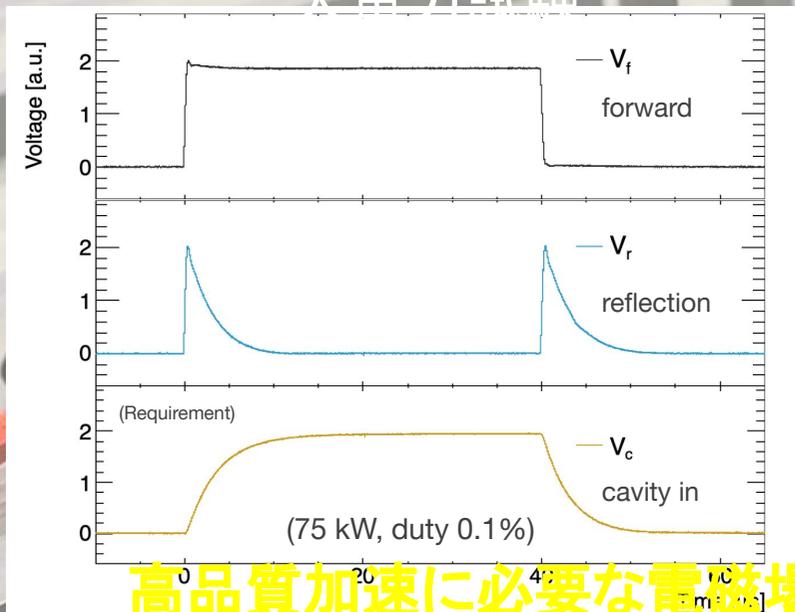
試作機製作・試験 FY2020~

電磁場分布測定

RF 同軸回路



大電力試験



高品質加速に必要な電磁場エラー(<2%)、加速に必要な大電力運転を実証

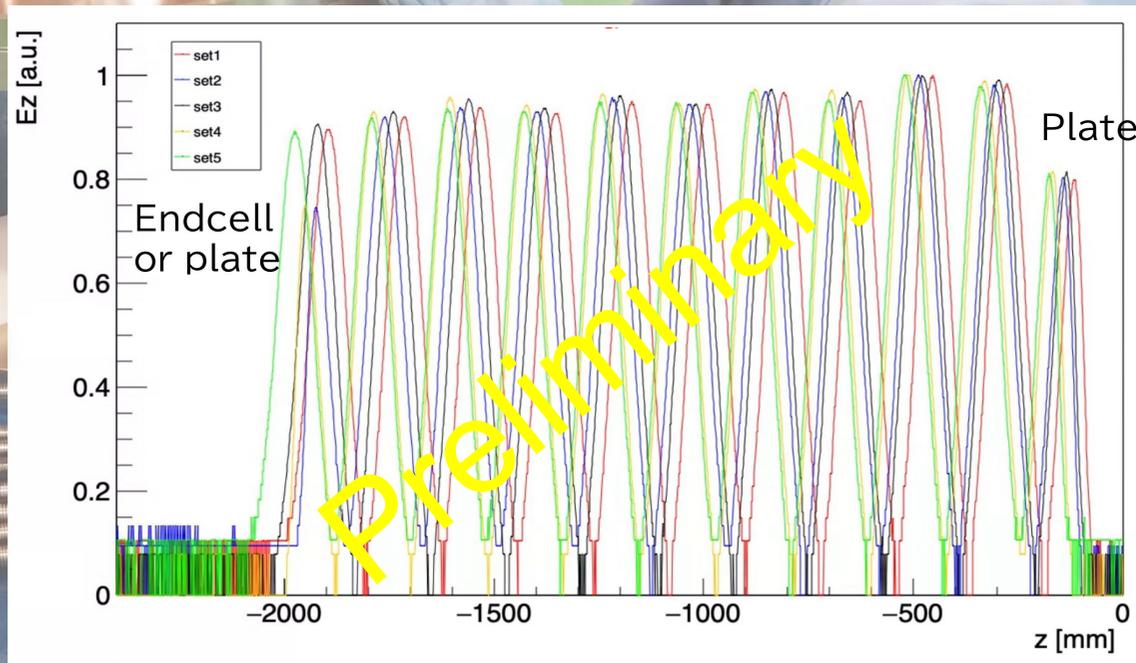
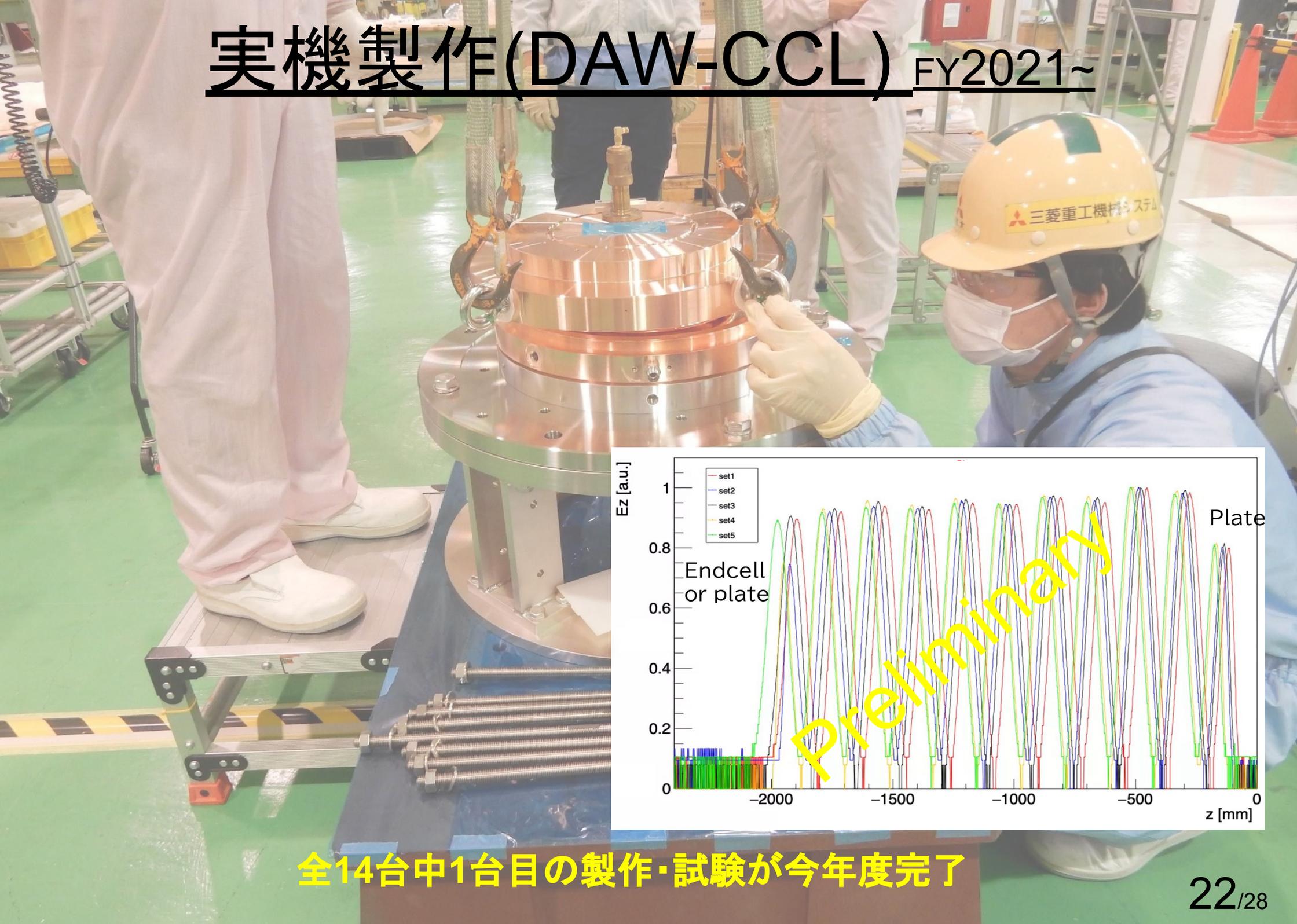
Y. Nakazawa et al., to be published in Phys. Rev. AB

実機製作IH-DTL FY2021~



IH-DTL実機製作完了、チューナーを用いた調整がほぼ完了

実機製作(DAW-CCL) FY2021~



全14台中1台目の製作・試験が今年度完了

先端加速器開発を支える若手研究者

論文

M. Otani	KEK	PTEP 2022 (2022) 052C01	Y. Nakazawa	Ibaraki, D2	JPS Conf. Proc. , 33 (2021) 011128
Y. Sue, M. Yotsuzuka	Nagoya D1, M1	Phys. Rev. AB 23 (2020) 022804	Y. Takeuchi	Kyushu, D3	JPS Conf. Proc. , 33 (2021) 011129
Y. Nakazawa	Ibaraki, M2	J. Phys. Conf. Ser. 1350 (2019) 012054	M. Yotsuzuka	Nagoya, D1	JPS Conf. Proc. , 33 (2021) 011140
Y. Nakazawa	Ibaraki, M2	NIM A937 (2019) 164-167	...		

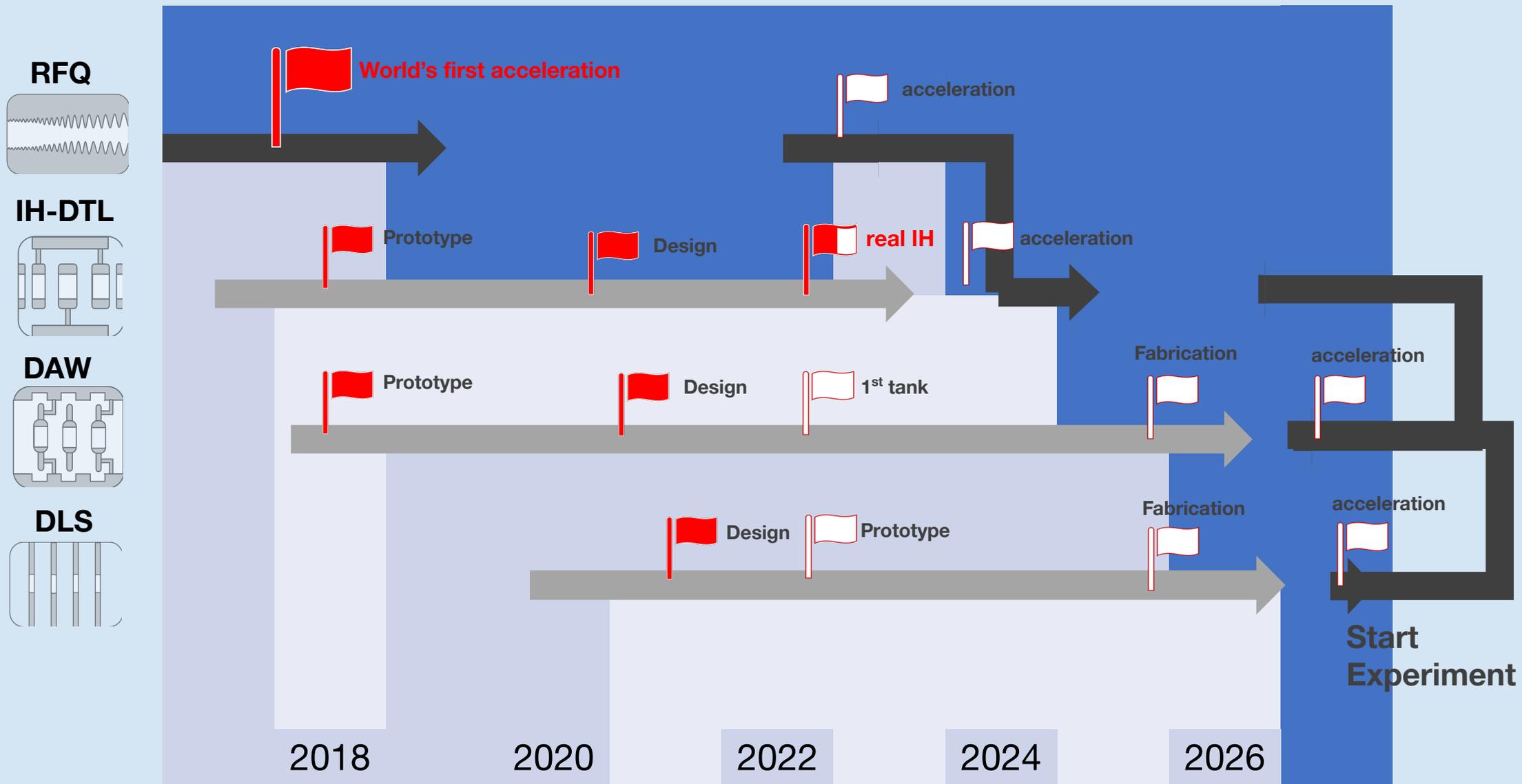
受賞

中沢 雄河	茨城大D3	国際線形加速器学会.INAC2022 Student poster award
中沢 雄河	茨城大D3	日本物理学会第77回年会 学生優秀発表賞(ビーム物理)
竹内 佑甫	九大D3	2021年度ビーム物理研究会若手発表賞
四塚 麻衣	名大D1	日本物理学会2021年秋季大会学生優秀発表賞(素粒子実験)
大谷 将士	KEK加速器	AAPPS-APCTP C.N. Yang Award 2021
竹内 佑甫	九大D3 [当時]	日本加速器学会第18回年会賞(ポスター)
中沢 雄河	茨城大D2	flavor physics workshop 2021 Best Talk賞
四塚 麻衣	名大M2	日本物理学会第76回年会 学生優秀発表賞(ビーム物理)
四塚 麻衣	名大M2	日本物理学会2020年秋季大会学生優秀発表賞(素粒子実験)
安田 浩昌	東大D3	日本加速器学会第17回年会賞(ポスター)
中沢 雄河	茨城大M2	4th International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University, poster award
中沢 雄河	茨城大M2	2019年度ビーム物理研究会若手発表賞
安田 浩昌	東大D2	第6回KEKスチューデント・デイ機構長賞
北村 遼	東大D3	国際線形加速器学会.INAC2018 Student poster award (1st prize)
須江 祐貴	名大M2	日本加速器学会第15回年会賞(ポスター)
安田 浩昌	東大D2	第6回KEKスチューデント・デイ機構長賞
安田 浩昌	東大D1	日本物理学会第74回年会 学生優秀発表賞(ビーム物理)
須江 祐貴	名大M2	日本物理学会第74回年会 学生優秀発表賞(ビーム物理)

加速器分野での大きな注目

研究を推進する若手研究者・大学院生の研究は高く評価

今後の予定



今後~4年間で世界初のミュオン線型加速器施設を実現

ミューオン加速の展望: イメージングへの応用

ミューオン透過イメージング手法

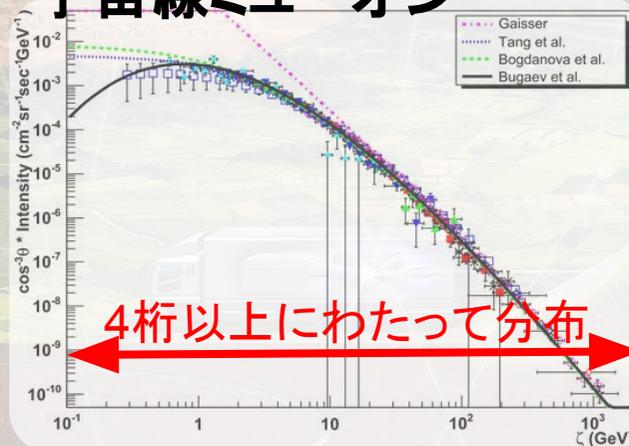
1. 透過法
2. 散乱法

いずれもエネルギーの不定性が分解能に影響

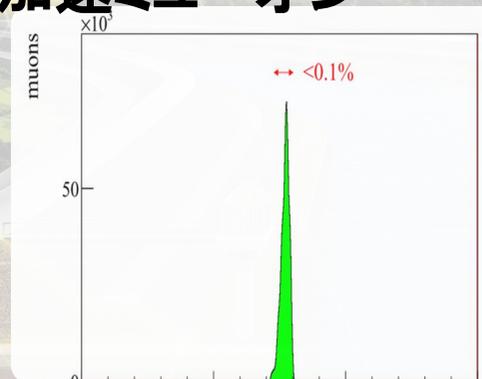


$$\theta \propto \sqrt{x/X_0/E}$$

宇宙線ミューオン



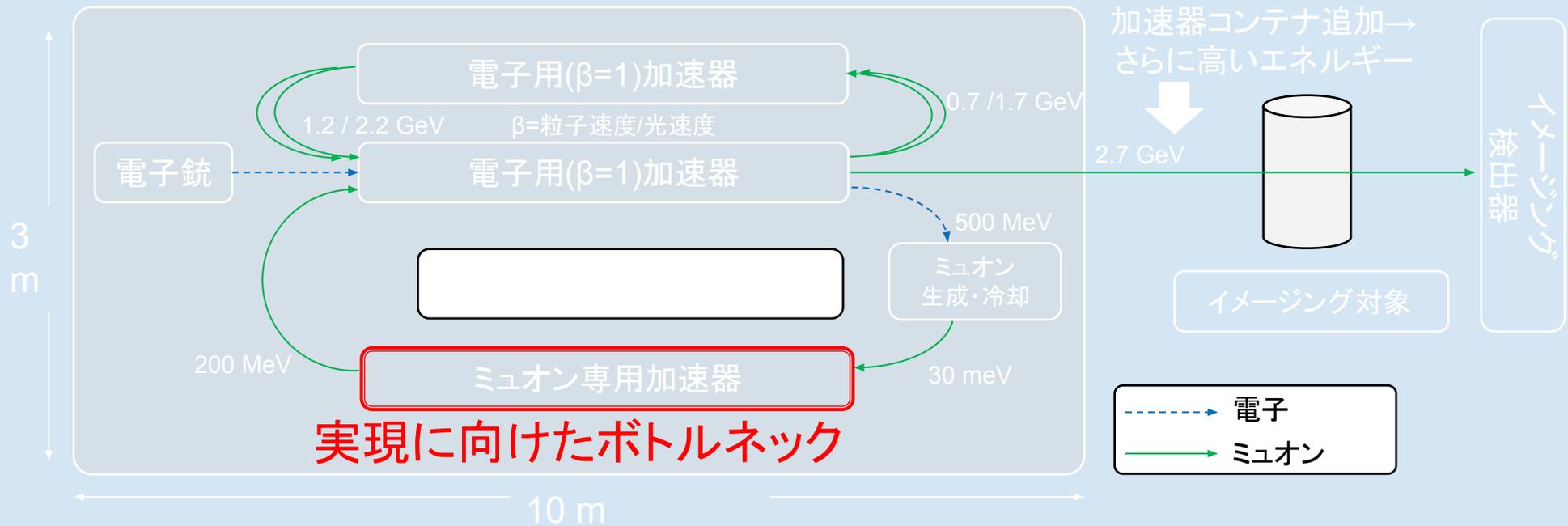
加速ミューオン



$\Delta E < 0.1\%$

加速ミューオンはイメージングに最適

イメージング装置の構想



サイクロトン共鳴加速 (CARA)

電子で既に実績 [PRL 76 (1996) 2718]

⊙ 相対論効果により適応可能なエネルギー小

陽子で検討

⊙ $B > 50 \text{ T} @ f = 900 \text{ MHz} (f = eB/2\pi m)$

ミュオンで原理実証 (本研究)

⊙ 電子と陽子の中間質量

近年、ミュオンの高周波加速が実証→**今こそ本原理を実証すべき!**

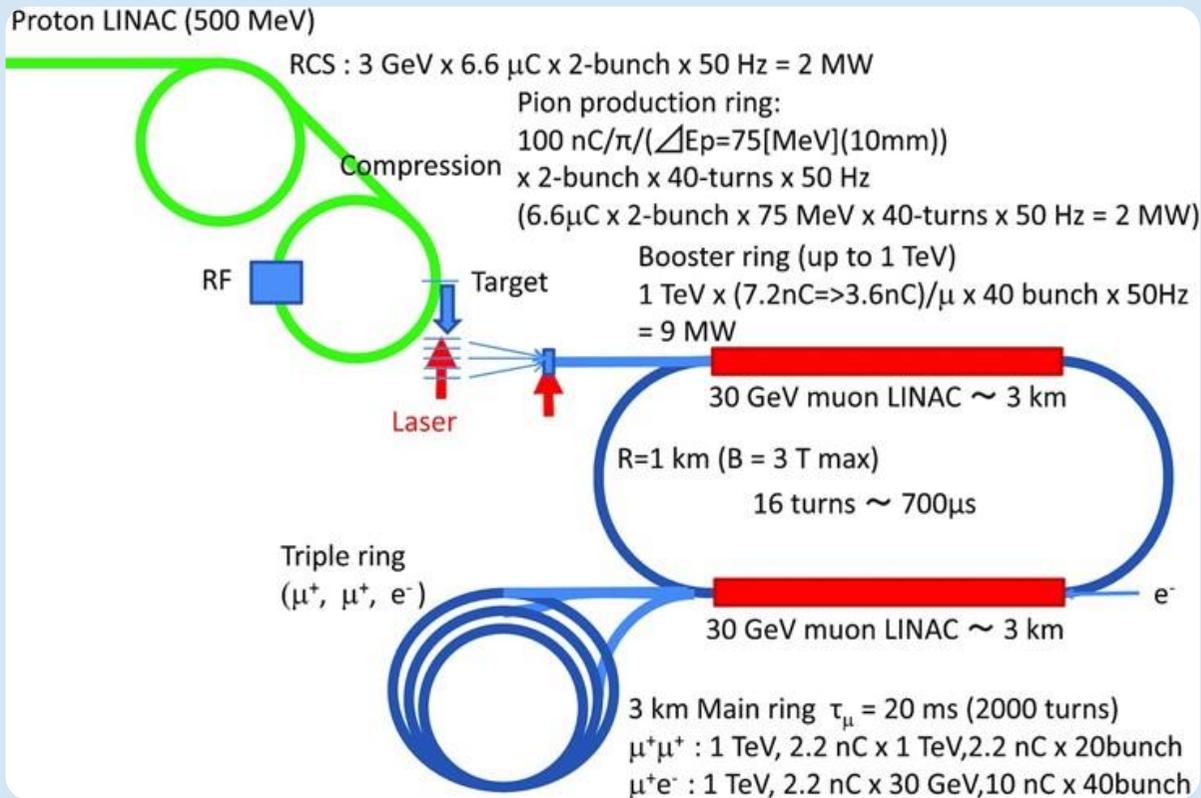
高勾配ミュオン専用加速管($\beta \neq 1$)

陽子線治療加速器の小型化にむけて
世界中で検討

→ **世界に先駆けてミュオンで技術を確立**

ミューオンコライダー

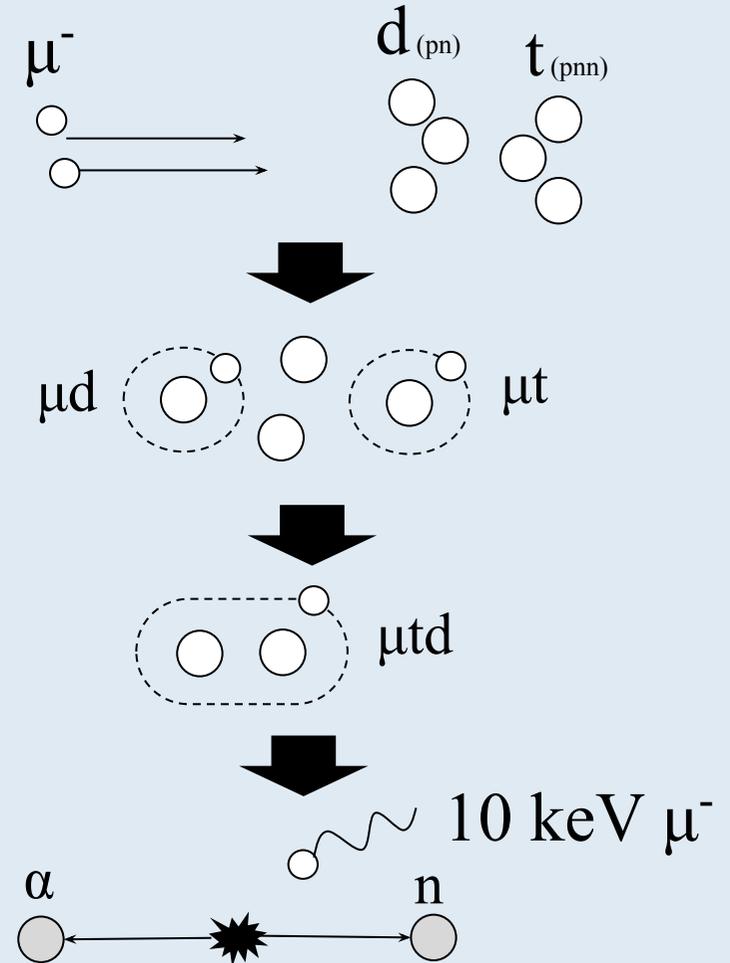
- μ TRISTAN: $\mu^+ e^- / \mu^+ \mu^+$ コライダーでヒッグス測定・新物理探索
- $\mu^+ \mu^-$ コライダー実現には μ^- 冷却が必須。いくつかの原理実証が計画。



PTEP 2022 (2022) 5,
053B02

μ Catalyzed F_{usion} 反応を利用

K. Nagamine, Proc. Jpn Acad., 65B (1989)



J-PARCで原理実証を計画
(Natori, NuFACT 2019 etc.)

まとめ

- 測定器と加速器の両輪で新発見がドライブされてきた
- ミューオン加速技術はイメージングや究極のコライダーを実現するうえで一つの基盤技術
- まずは世界初のミューオン加速器でg-2に決着

共に新しい加速器を実現し
新発見を目指しましょう！