



# 世界初のミュオン加速の実現と ミュオン線型加速器の開発

<sup>1</sup>KEK/J-PARC

M. Otani

<sup>2</sup>SNU, <sup>3</sup>JAEA, <sup>4</sup>Nagoya Univ., <sup>5</sup>Ibaraki Univ., <sup>6</sup>BINP, <sup>7</sup>Kyusyu Univ., <sup>8</sup>Univ. of Tokyo, <sup>9</sup>TIT  
S. Bae<sup>2</sup>, H. Choi<sup>2</sup>, S. Choi<sup>2</sup>, E. Cicek<sup>1</sup>, H. Ego<sup>1</sup>, K. Futatsukawa<sup>1</sup>,  
K. Hasegawa<sup>3\*</sup>, N. Hayashizaki<sup>9</sup>, K. Inami<sup>4</sup>, T. Iijima<sup>4</sup>, H. Inuma<sup>5</sup>,  
N. Kawamura<sup>1</sup>, Y. Kondo<sup>3</sup>, B. Kim<sup>2</sup>, H.S. Ko<sup>2</sup>, T. Mibe<sup>1</sup>, Y. Miyake<sup>1</sup>,  
T. Morishita<sup>2</sup>, Y. Nakazawa<sup>5</sup>, G.P. Razuvaev<sup>6</sup>, N. Saito<sup>1</sup>, K. Shimomura<sup>1</sup>,  
Y. Sue<sup>4</sup>, K. Sumi<sup>4</sup>, K. Suzuki<sup>4</sup>, T. Takayanagi<sup>3</sup>, Y. Takeuchi<sup>7</sup>,  
J. Tojo<sup>7</sup>, E. Won<sup>2</sup>, T. Yamazaki<sup>4</sup>, H. Yasuda<sup>8\*\*</sup>, M. Yotsuzuka<sup>4</sup>

\*present affiliation is QST \*\*present affiliation is Toshiba Energy Systems & Solutions Co.

# 自己紹介

- 2009/3 京大高エネ修士  
「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 京大高エネ博士  
「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 g-2/EDM実験
- 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」



# 内容

1. 世界初のミューオン加速の実現
  - ミューオンの生成・冷却・加速
2. ミューオン線型加速器の開発
  - J-PARCミューオンg-2/EDM実験
3. まとめ

# ミューオン

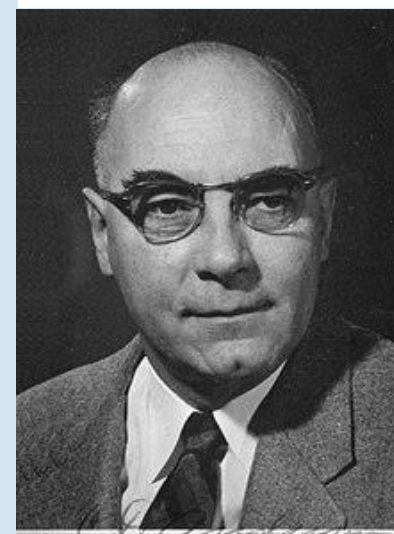


| 物質粒子<br>matter (fermions) |              |               | ゲージ粒子<br>gauge bosons |                                      |
|---------------------------|--------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|
|                           | 第1世代         | 第2世代          | 第3世代                  |                                      |
| クォーク<br>quarks            | アップ<br>クォーク  | チャーム<br>クォーク  | トップ<br>クォーク           | 電磁気力<br>electromagnetic<br>光子 (フォトン) |
|                           | ダウン<br>クォーク  | ストレンジ<br>クォーク | ボトム<br>クォーク           | 強い力<br>strong<br>グルーオン               |
|                           | 電子           | ミュー粒子         | タウ粒子                  | 弱い力<br>weak<br>ウィークボソン               |
| レプトン<br>leptons           | 電子<br>ニュートリノ | ミュー<br>ニュートリノ | タウ<br>ニュートリノ          | ヒッグス粒子<br>Higgs bosons<br>ヒッグス粒子     |

MAY 15, 1937 PHYSICAL REVIEW VOLUME 51

## Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles

SETH H. NEDDERMEYER AND CARL D. ANDERSON  
 California Institute of Technology, Pasadena, California  
 (Received March 30, 1937)

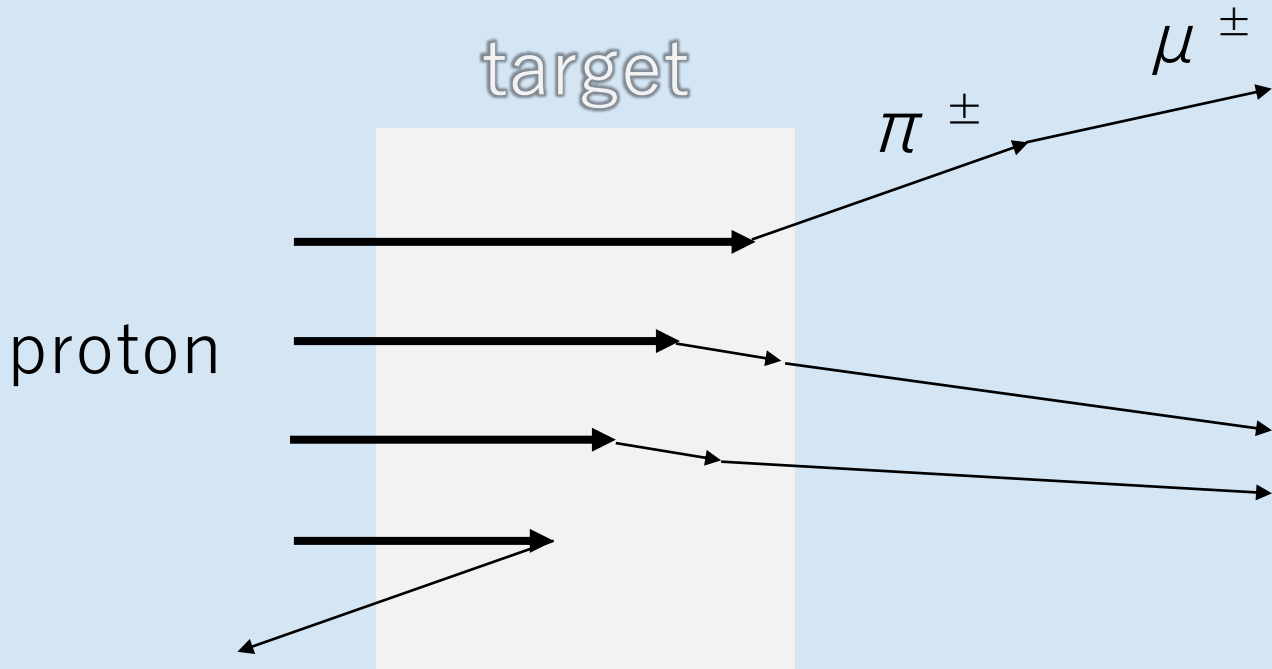
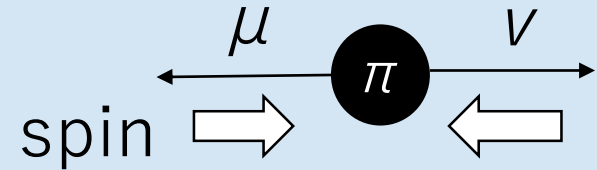


wikipediaより

Anderson, C. D. Neddermeyer, S. H.

# ミューオンの生成

- $\mu^\pm$  is generated through the  $\pi^\pm$ -decay
- $\pi$  is generated by proton-nucleon reactions in the target.



## decay muon

- Wide momentum distribution up to  $\sim P_p$
- polarization  $< 100\%$

## (sub-)surface muon

- semi-monochromatic
  - $T \sim 4\text{MeV}$ ,  $P \sim 30\text{MeV}/c$
  - muon range  $\sim 0.1\text{g}/\text{cm}^2$
- polarization  $\sim 100\%$
- only  $\mu^+$

# 世界のミュオン施設



Science & Technology  
Facilities Council



PAUL SCHERRER INSTITUT



J-PARC



TRIUMF



MuSIC



RAON

Nucl. Eng.  
Technol. 53  
(2021) 2909  
to be launched?



中国散裂中子源

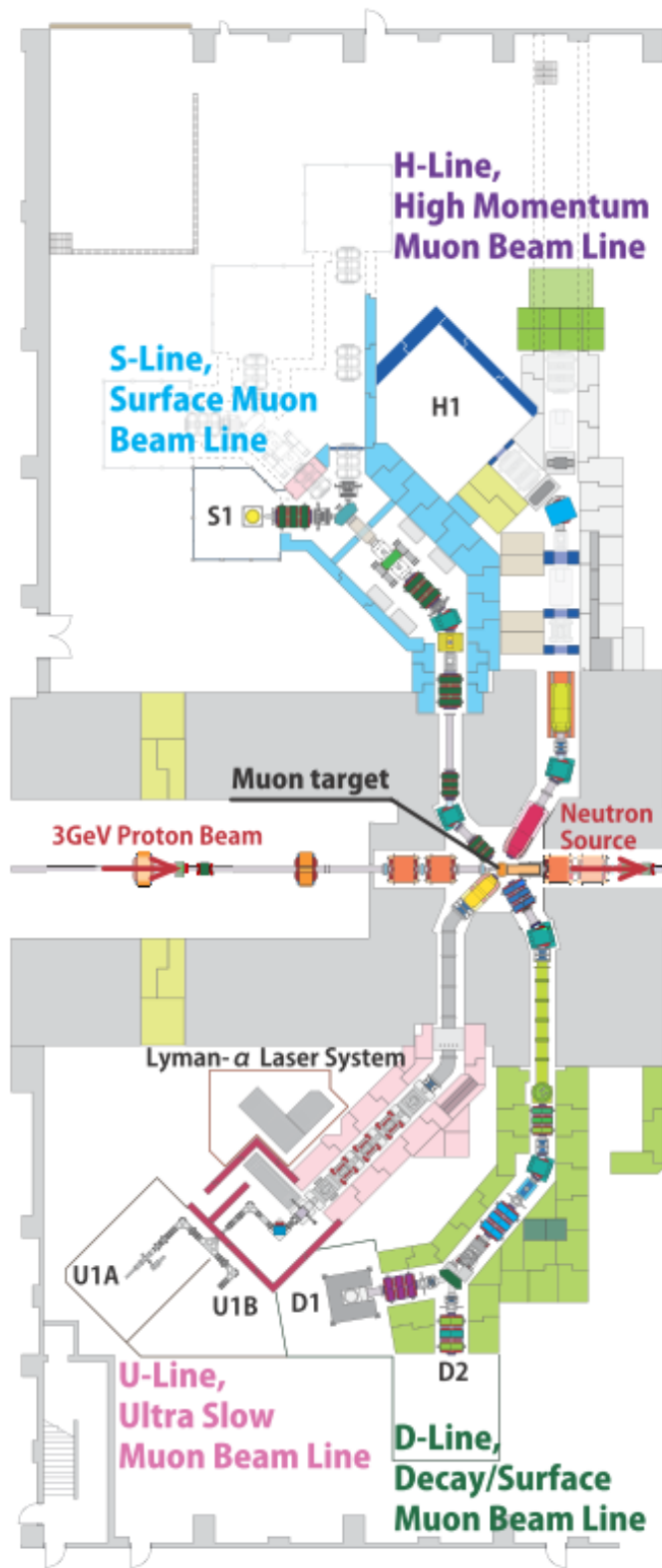
China Spallation Neutron Source

Quantum Beam Sci. 2 (2018) 23  
to be launched?

LINAC 400 MeV



MR 30 GeV



ニュー  
実験

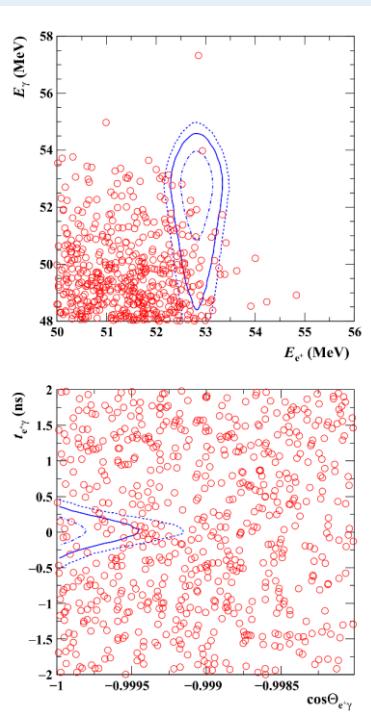
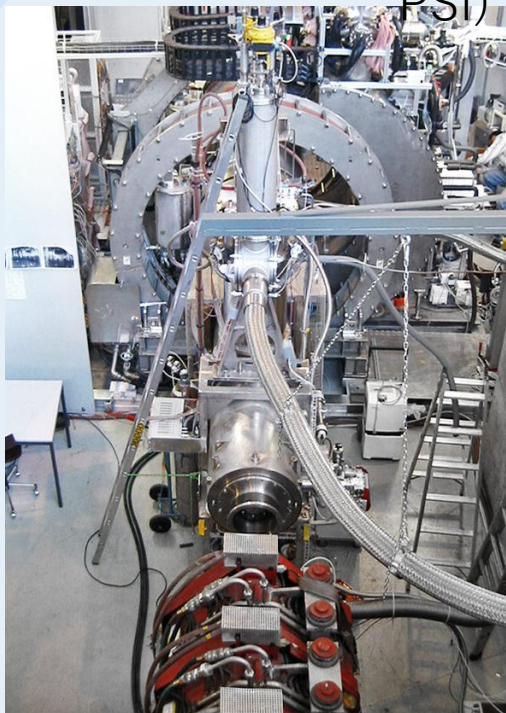
MLF

コン  
施設

# ミューオンの利用

## 基礎物理

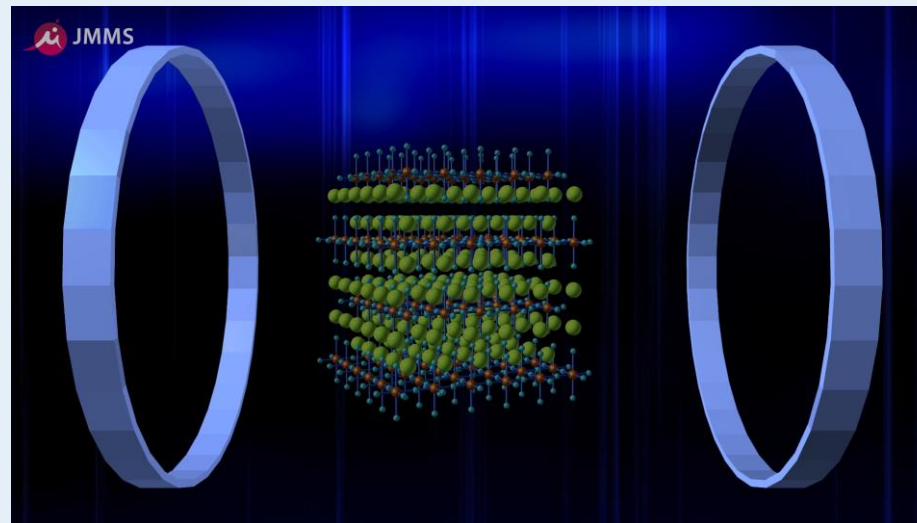
( $\mu \rightarrow e \gamma$  探索@MEG,  
PSI)



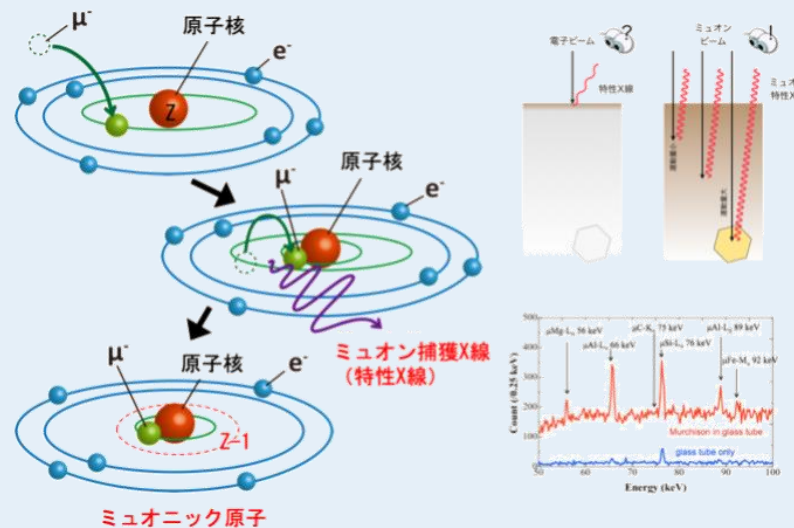
ICEPP HP, Eur. Phys. J. C (2016) 76:434

## 物質科学

$\mu$ SR (ミュオンスピン回転法)



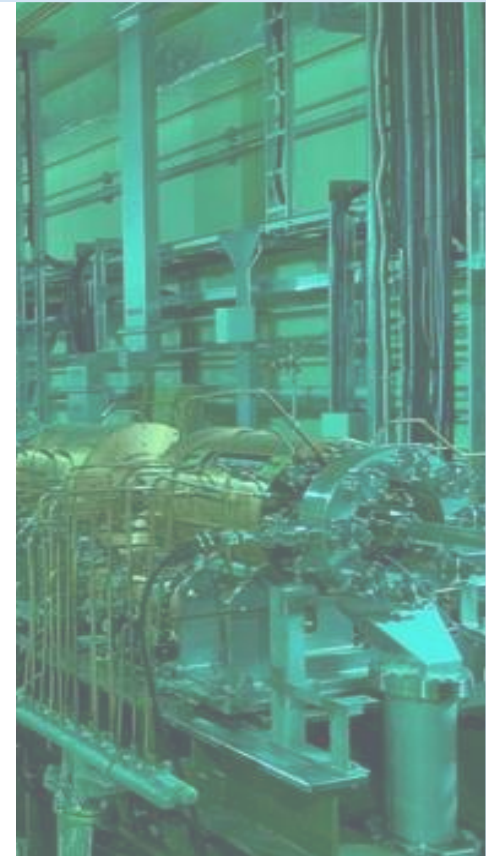
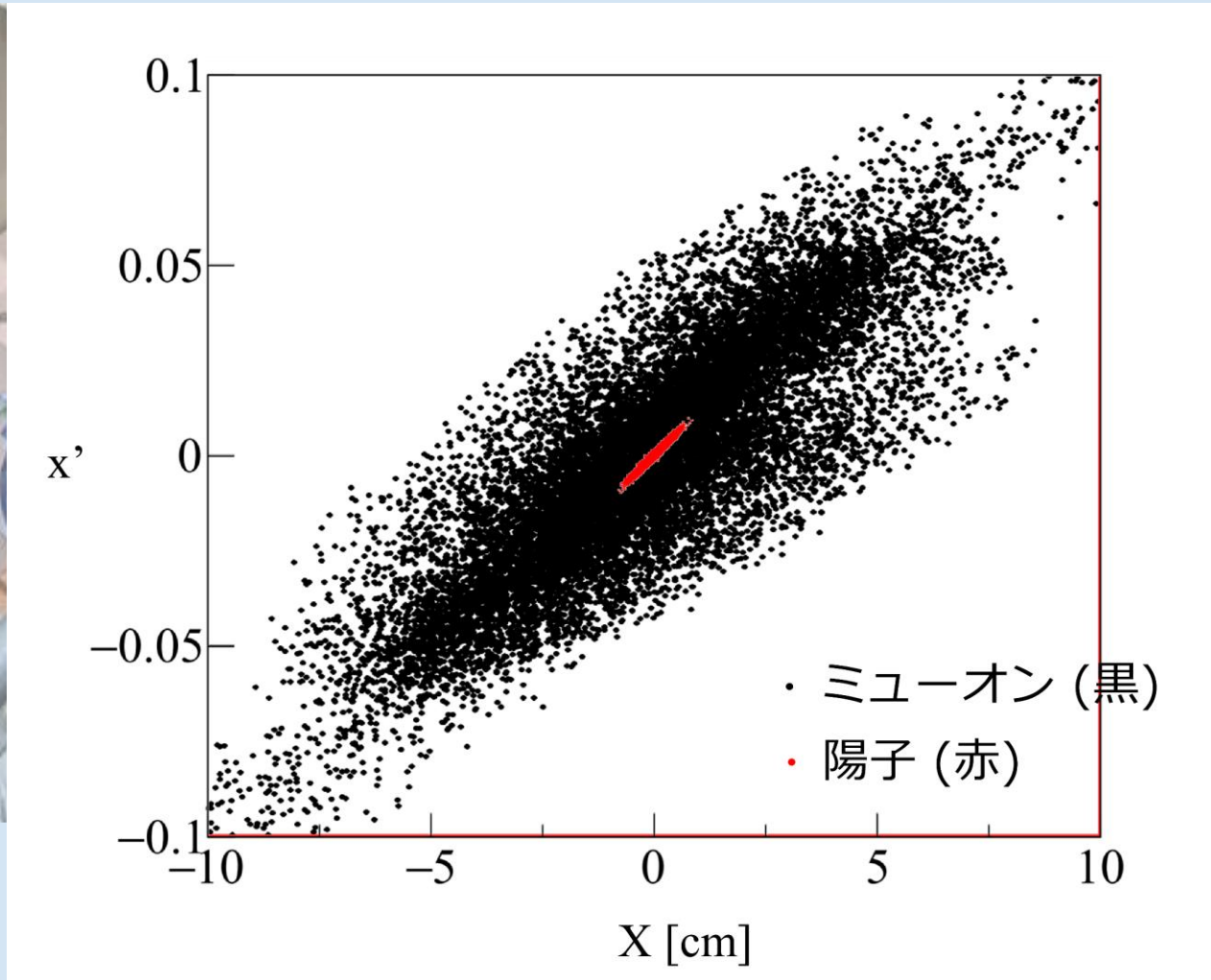
## 非破壊元素分析





# 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

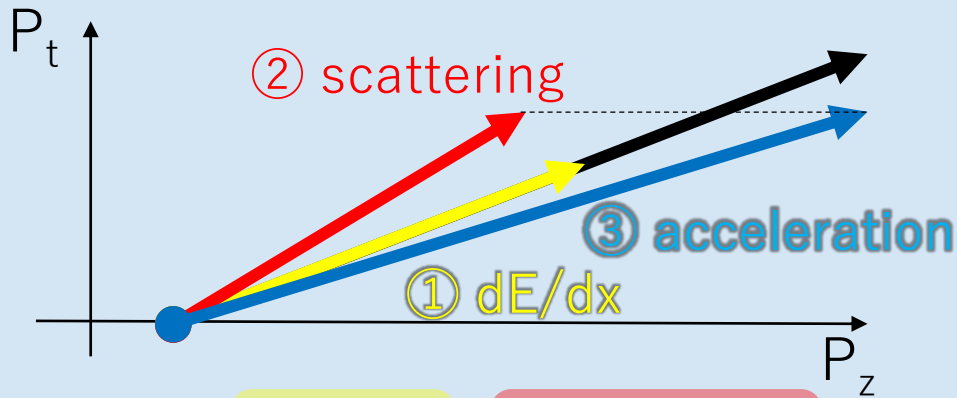


ミューオン:  $\sim 1,000 \pi \text{ mm mrad}$  (cf. J-PARC linac  $> 1 \pi \text{ mm mrad}$ )

# ミューオンの冷却 1/3

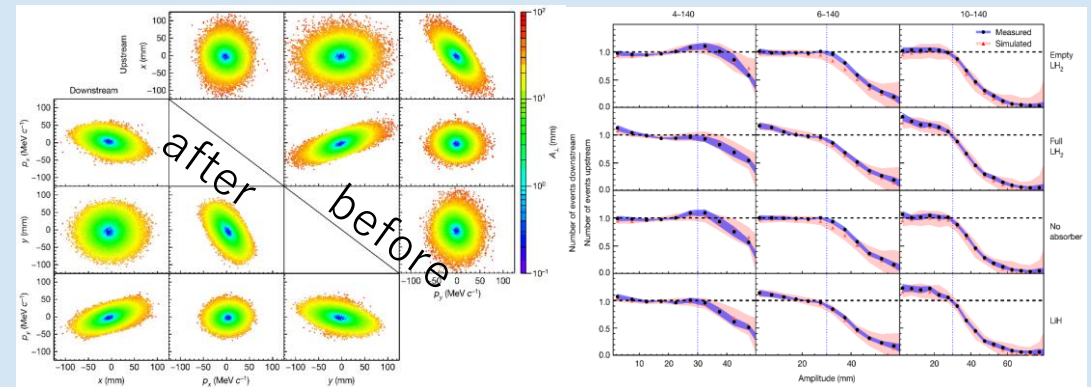
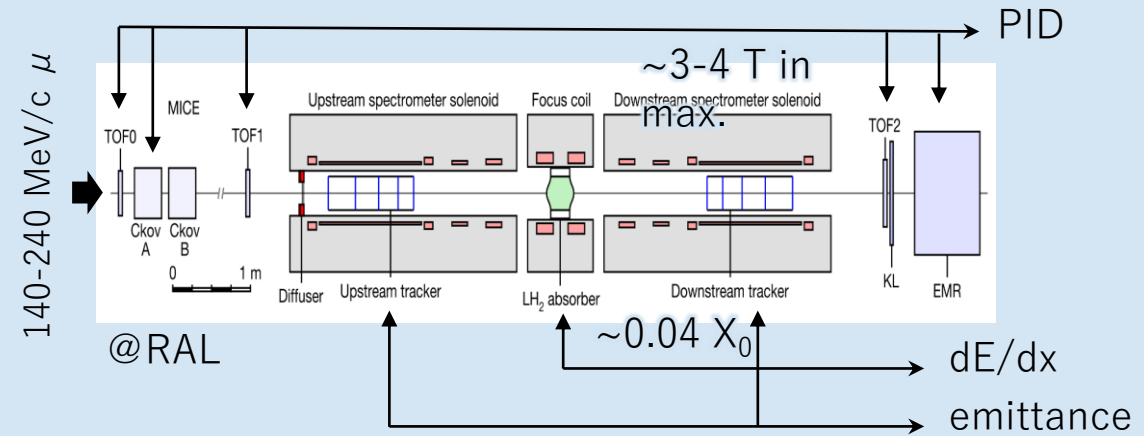
- 2マイクロ秒で崩壊するため、確率冷却や電子ビーム冷却が使えない

## Ionization cooling

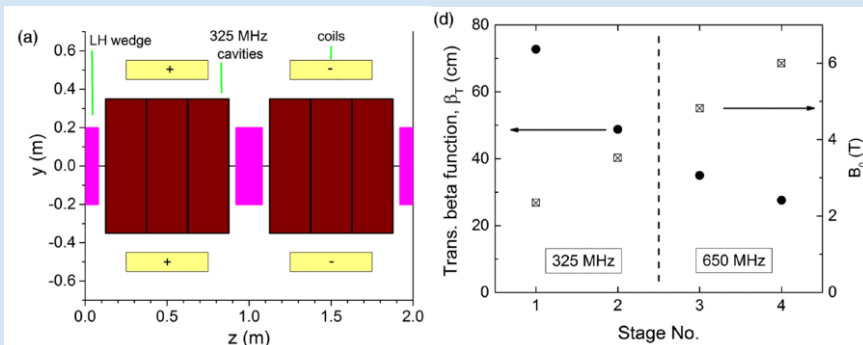


$$\frac{d\varepsilon_{\perp}}{dz} \approx -\frac{\varepsilon_{\perp}}{\beta^2 E_{\mu}} \left| \frac{dE_{\mu}}{dz} \right| + \frac{\beta_{\perp} (13.6 \text{ MeV } c^{-1})^2}{2\beta^3 E_{\mu} m_{\mu} X_0}$$

- low  $\beta_L \rightarrow$  strong B field
- high acceleration gradient
- low Z material (large  $X_0$ )

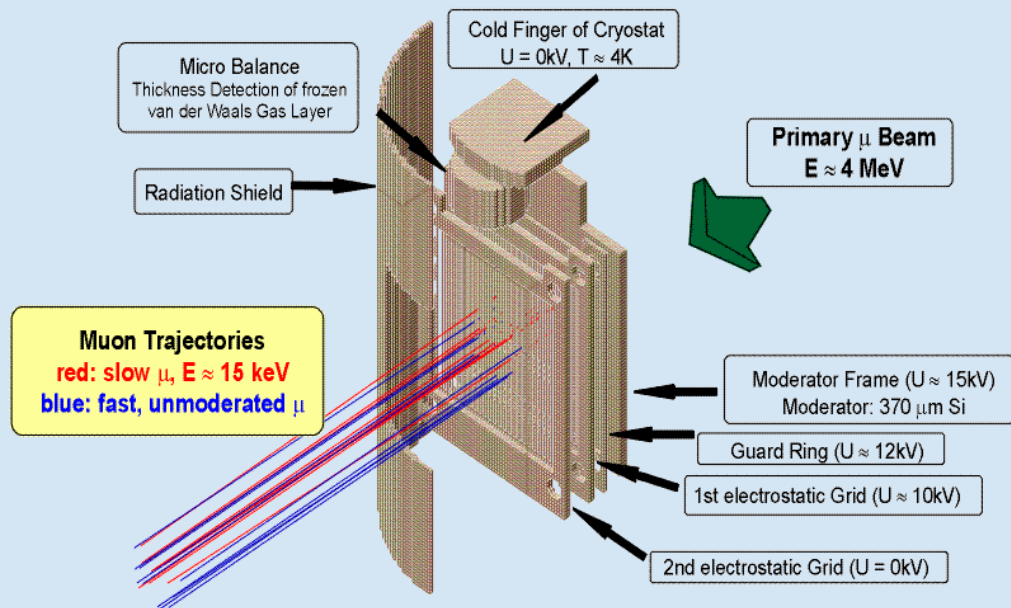


- 近年、イオン化冷却 (減速のみ) を実証 [*Nature* 578, 53-59 (2020)]
- $\sim 1 \text{ km}$  並べて  $\varepsilon_t \sim 1/100$ ,  $\varepsilon_l \sim 1/10$



# ミューオンの冷却 2/3

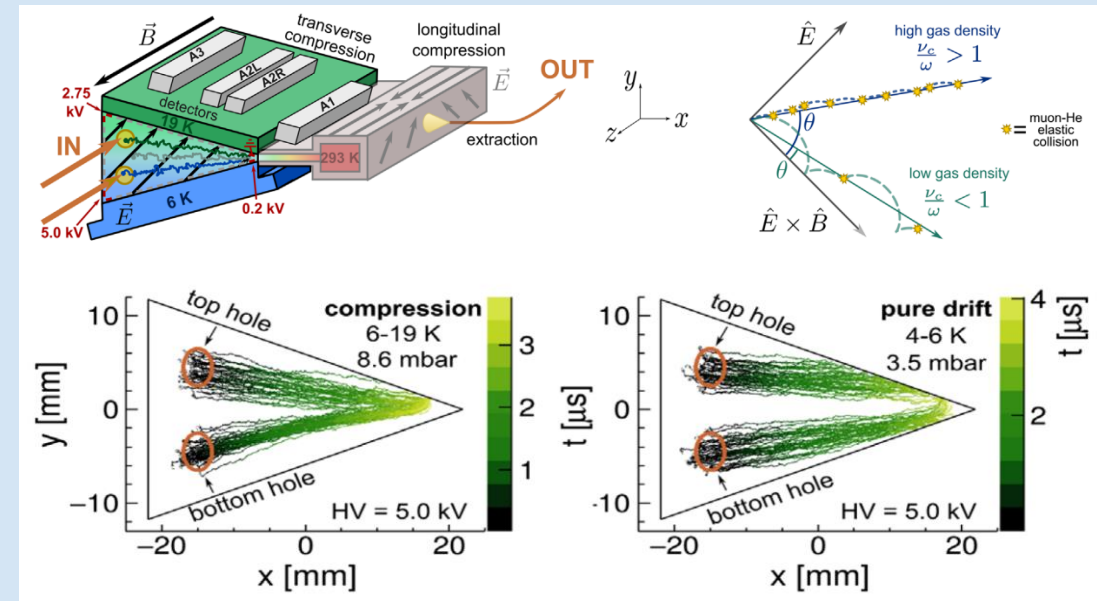
## Moderator@PSI LEM



van der Waals solids, no interaction less than  $\sim 10\text{ eV}$

- 希ガスレイヤー ( $\sim 10\text{ eV}$ 以下の相互作用が制限)で $\sim 10\text{ eV}$ まで減速、出射/入射  $\mu^+$   $\sim 10^{-4}$
- 既に物性実験に利用

## MuCool



- 密度勾配を付けたガス中での  $E \times B$  ドリフトで $\sim \text{eV}$ まで減速、出射/入射  $\mu^+$   $\sim 10^{-3}$  (未実測)
- 原理を実証 (ビーム取り出し&実験利用は未だ)

# ミューオンの冷却 3/3

Aerogel target

ionization laser

electric field

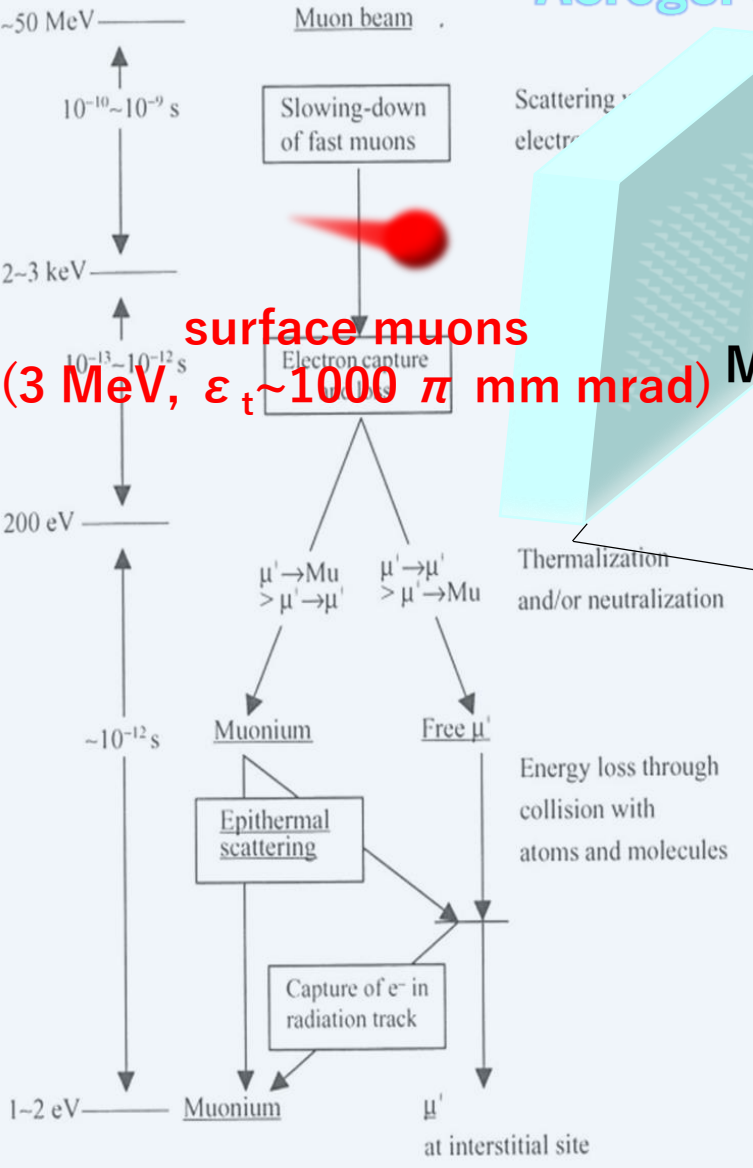
Mu ( $\mu^+ e^-$ )

thermal muons  
(25 meV)

$\sim$  keV,  
 $\epsilon_t < 1\pi$  mm mrad

surface muons

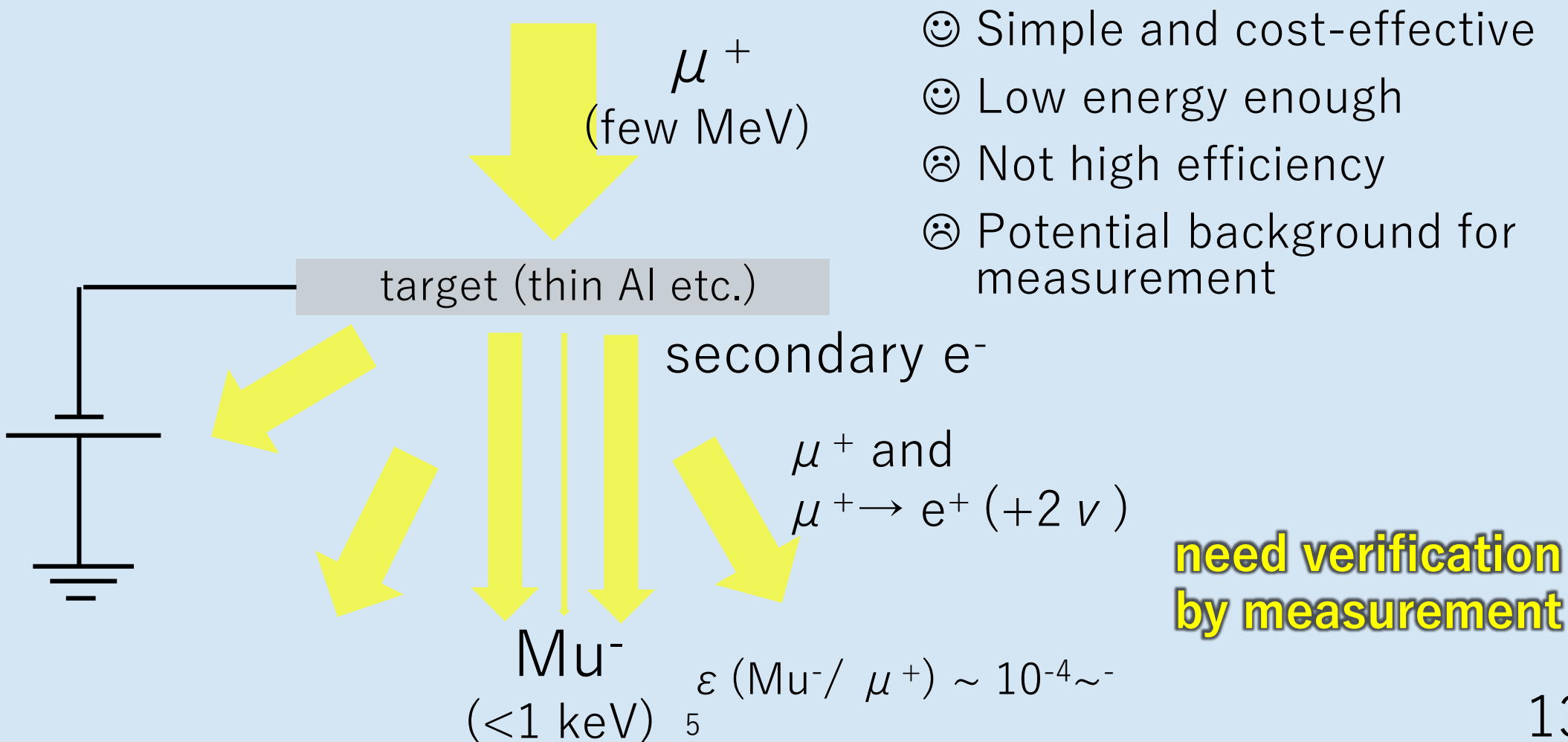
(3 MeV,  $\epsilon_t \sim 1000\pi$  mm mrad)



- 標的から湧き出てきたミューオニウムをレーザーイオン化して、室温(30 meV)まで減速  
出射/入射  $\mu^+ \sim 10^{-2-4}$
- 実験利用が開始(標的は高温タングステン)

# 負ミューオニウム生成

- 様々なミューオン冷却手法が開発されてきた一方で、加速は未実証だった。
- タイムリーにミューオン加速を実証するには、もっとシンプルで(安い)手法が必須だった  
→負ミューオニウム生成 [PRA 35, 3172 (1987) ]



2014 Aug.  
Shipping  
BL@RAL



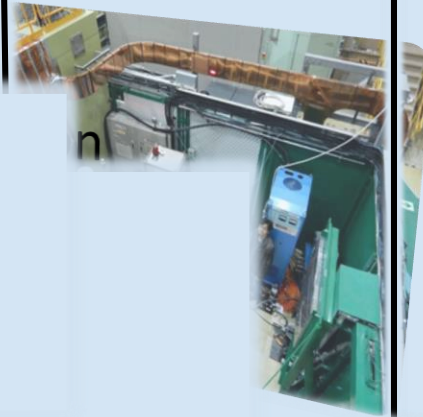
2016 Dec.  
Mu<sup>-</sup> Observation



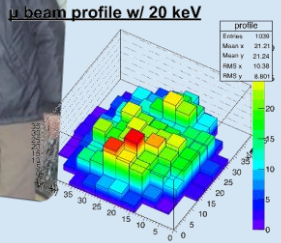
2015 May  
Assembling BL@J-  
PARC



2016 Feb.



2017 Mar.  
Profile  
Measurement



2017 Oct.  
First Muon Acceleration

History [参考文献: 高エネニュースVol.37 No.1]

# 負ミューオン観測

$\mu^-$  生成 (<keV)

$\mu^+$   
(~3MeV)

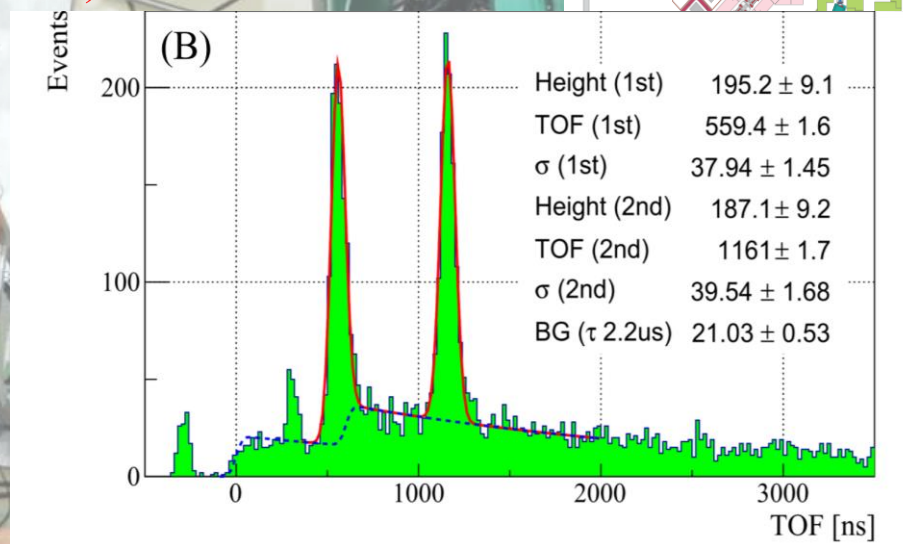
静電レンズによる加速・取り出し

偏向電極

マイクロチャンネル  
プレート(MCP)

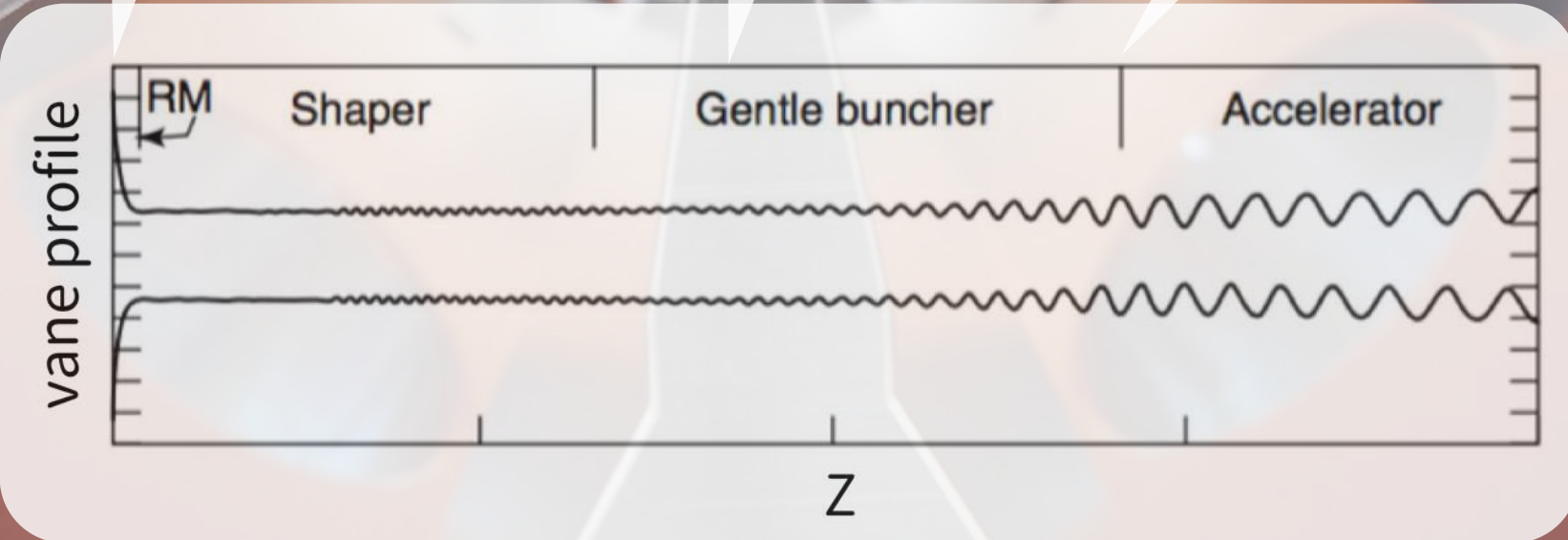
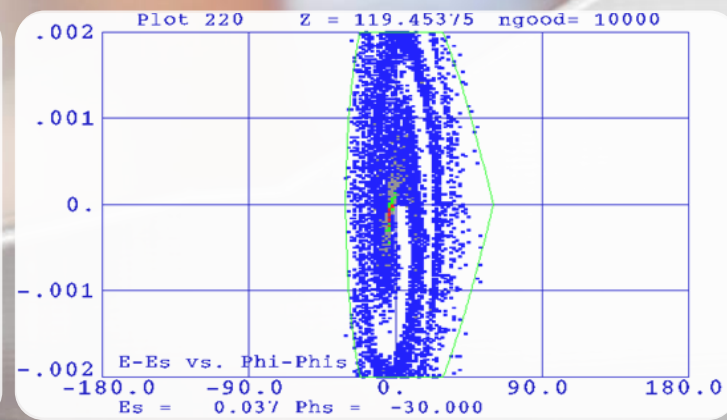
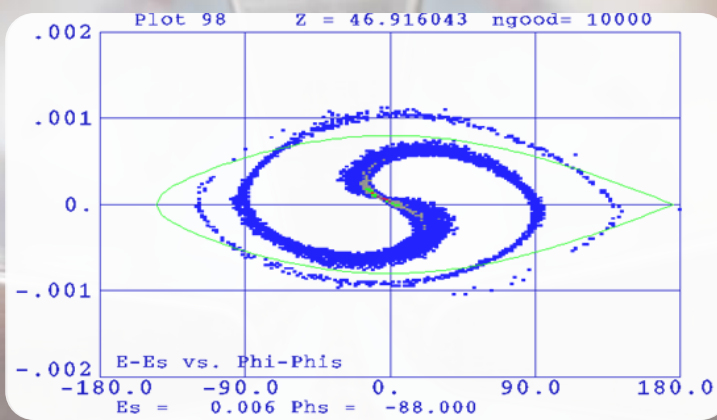
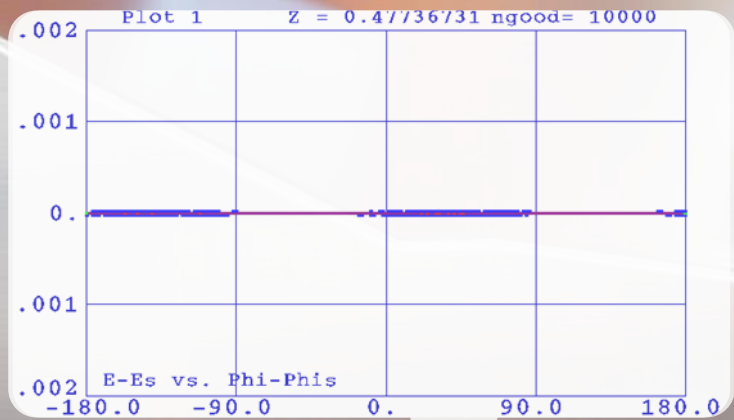
4極電極

偏向電磁石



加速実証に十分な冷却性能を実証

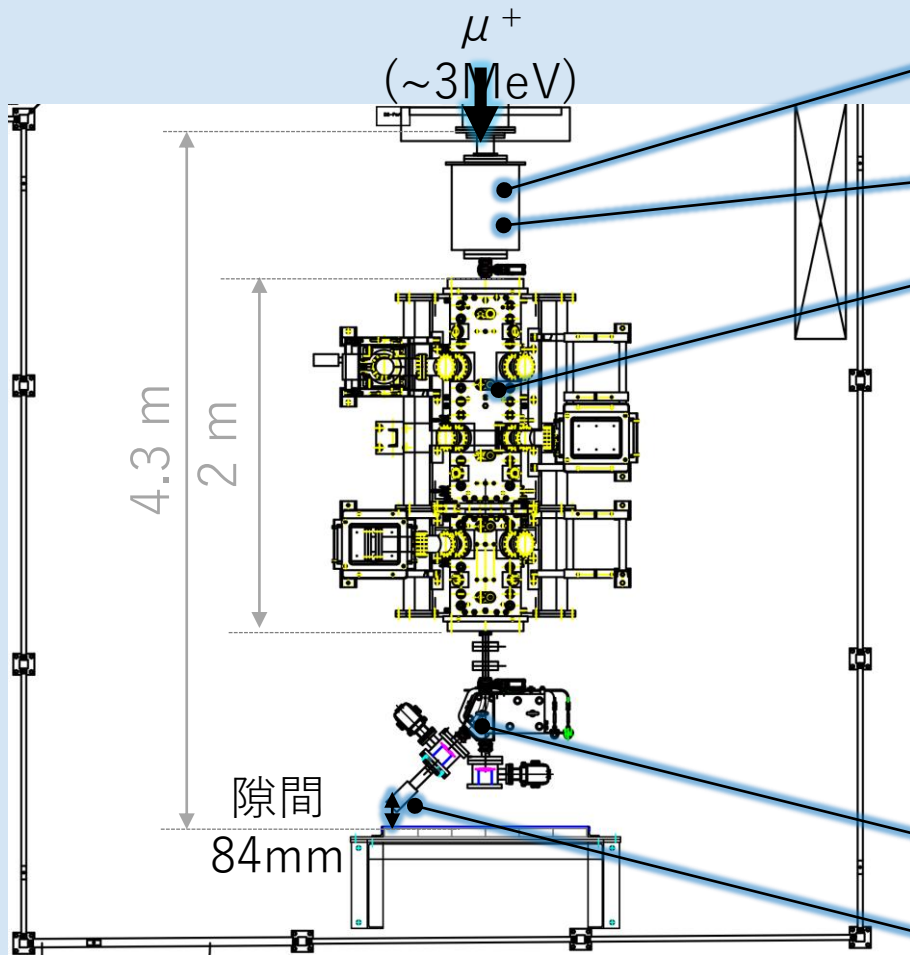
# Radio-Frequency Quadrupole linac: RFQ





# 加速試験セットアップ

@J-PARC MLF テストエリア(D2)

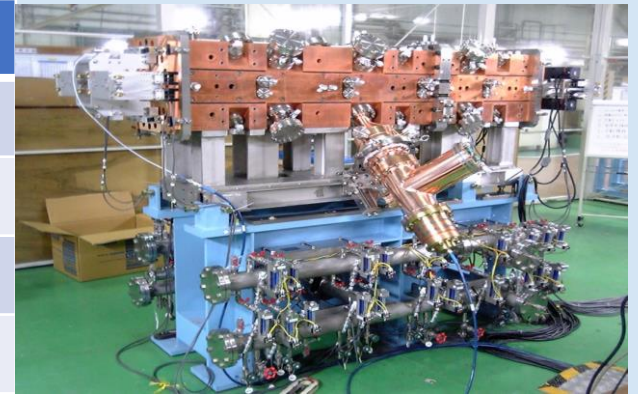


Mu<sup>-</sup>生成  
(3 MeV → <keV)

静電加速 (5 keV)

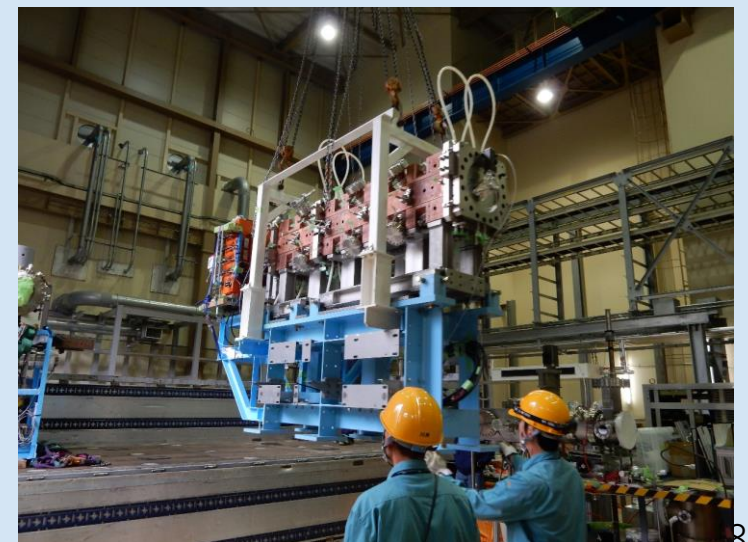
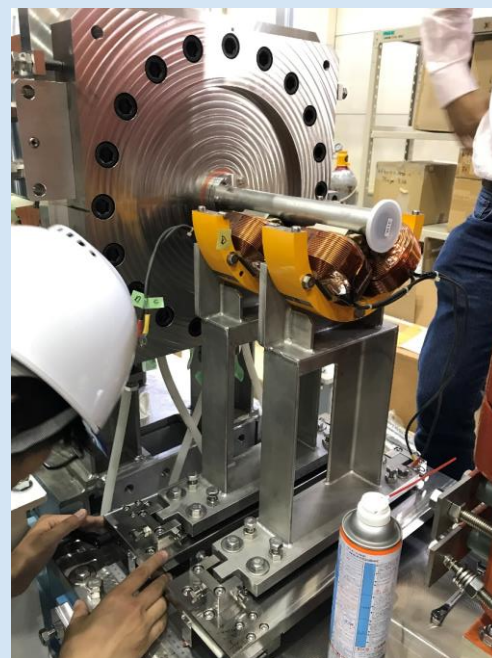
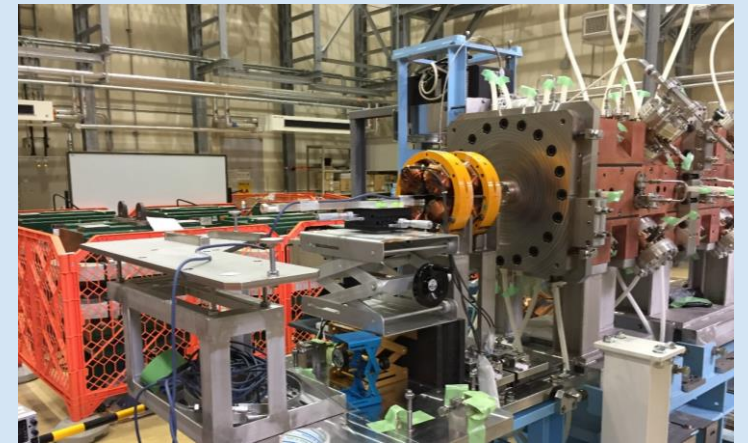
RFQ0号機による加速 (90 keV)

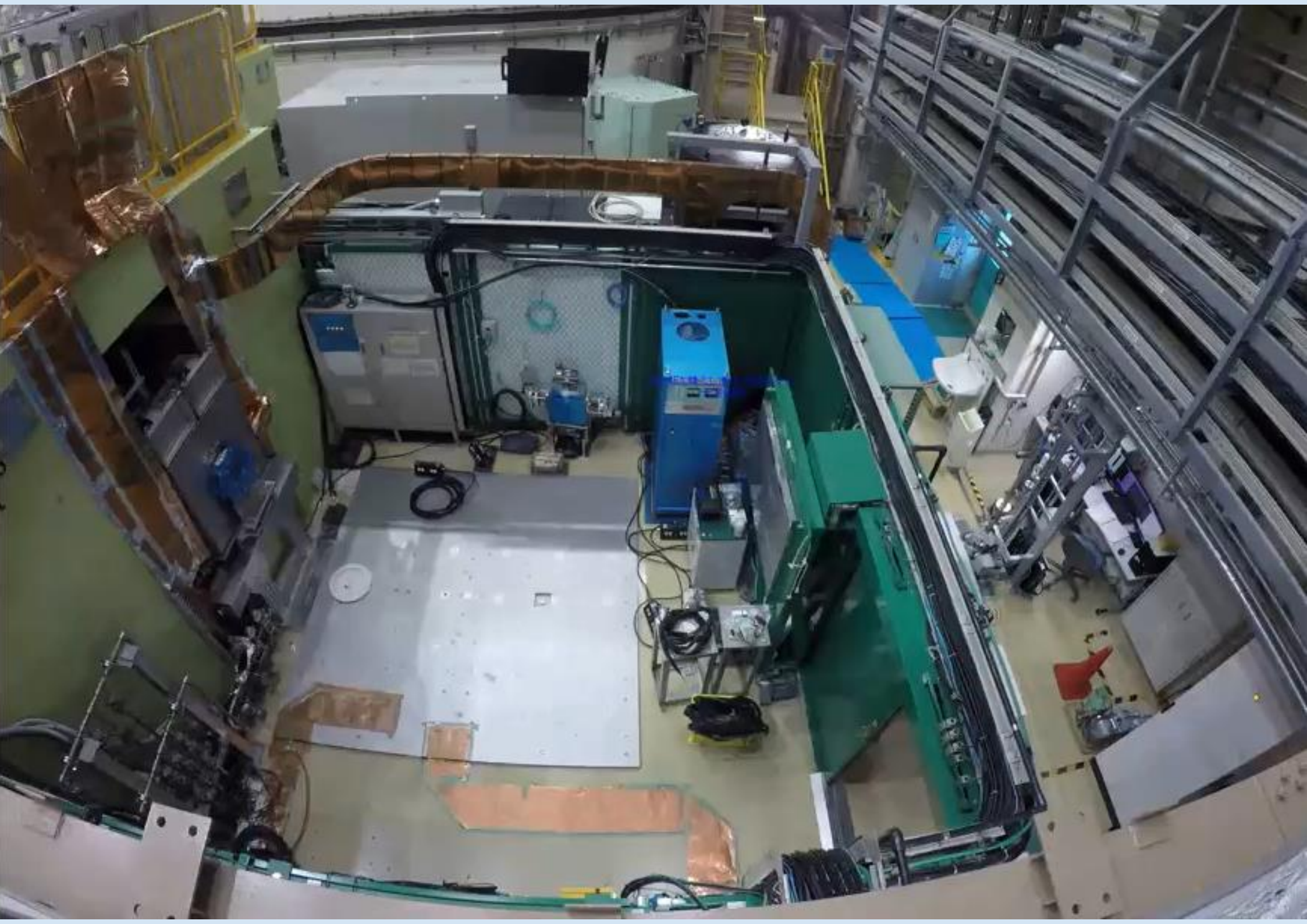
|                 | H-  | μ   |
|-----------------|-----|-----|
| Injection (keV) | 50  | 5.6 |
| Extraction      | 810 | 89  |
| IntervaneV(kV)  | 81  | 9.1 |
| Power (kW)      | 180 | 2.3 |



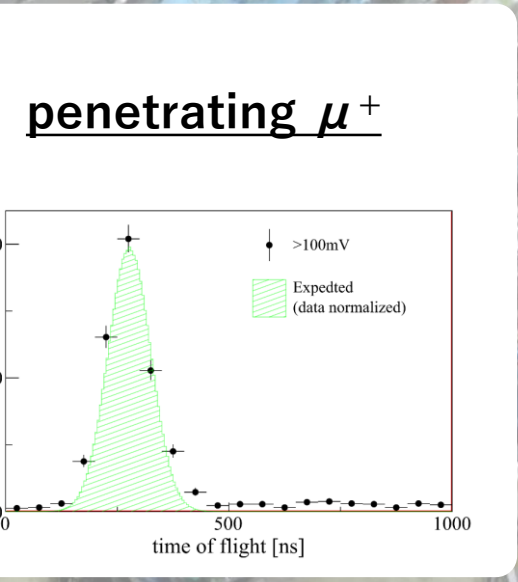
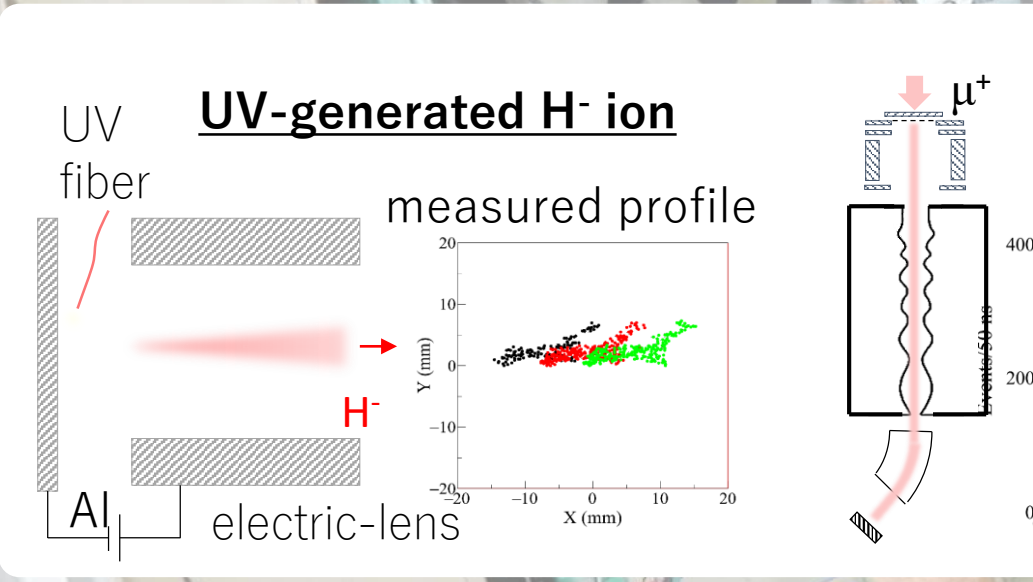
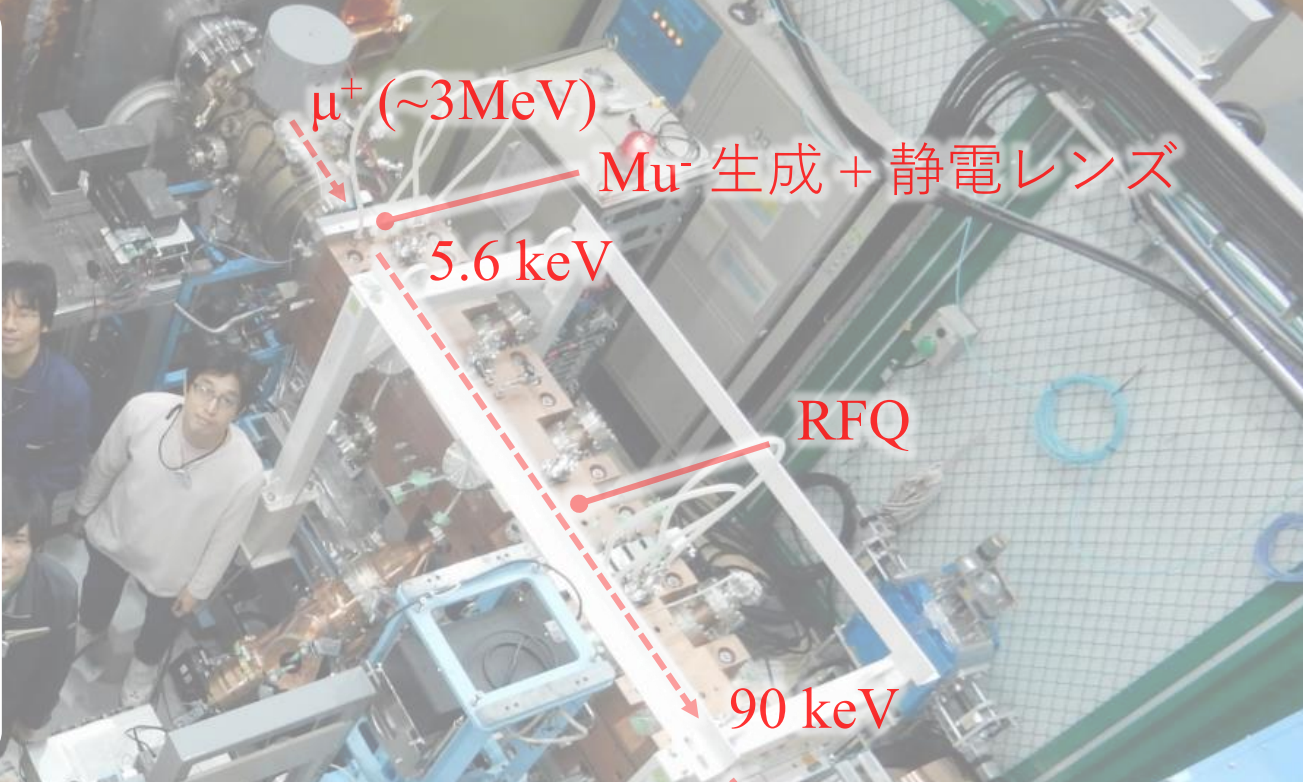
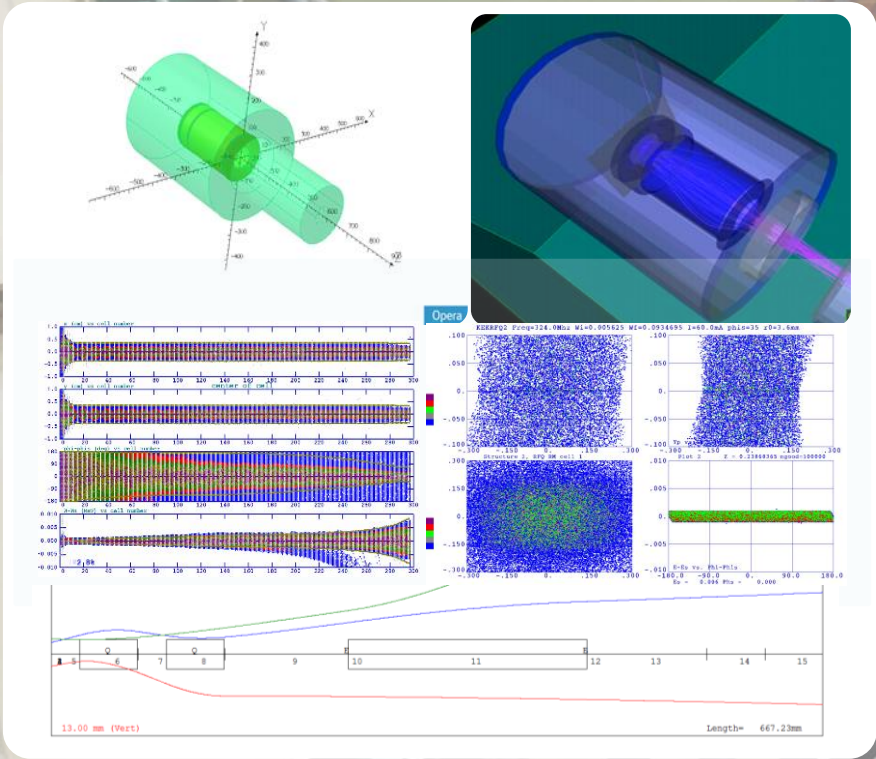
4極+偏向電磁石によるビーム輸送

MCP検出器

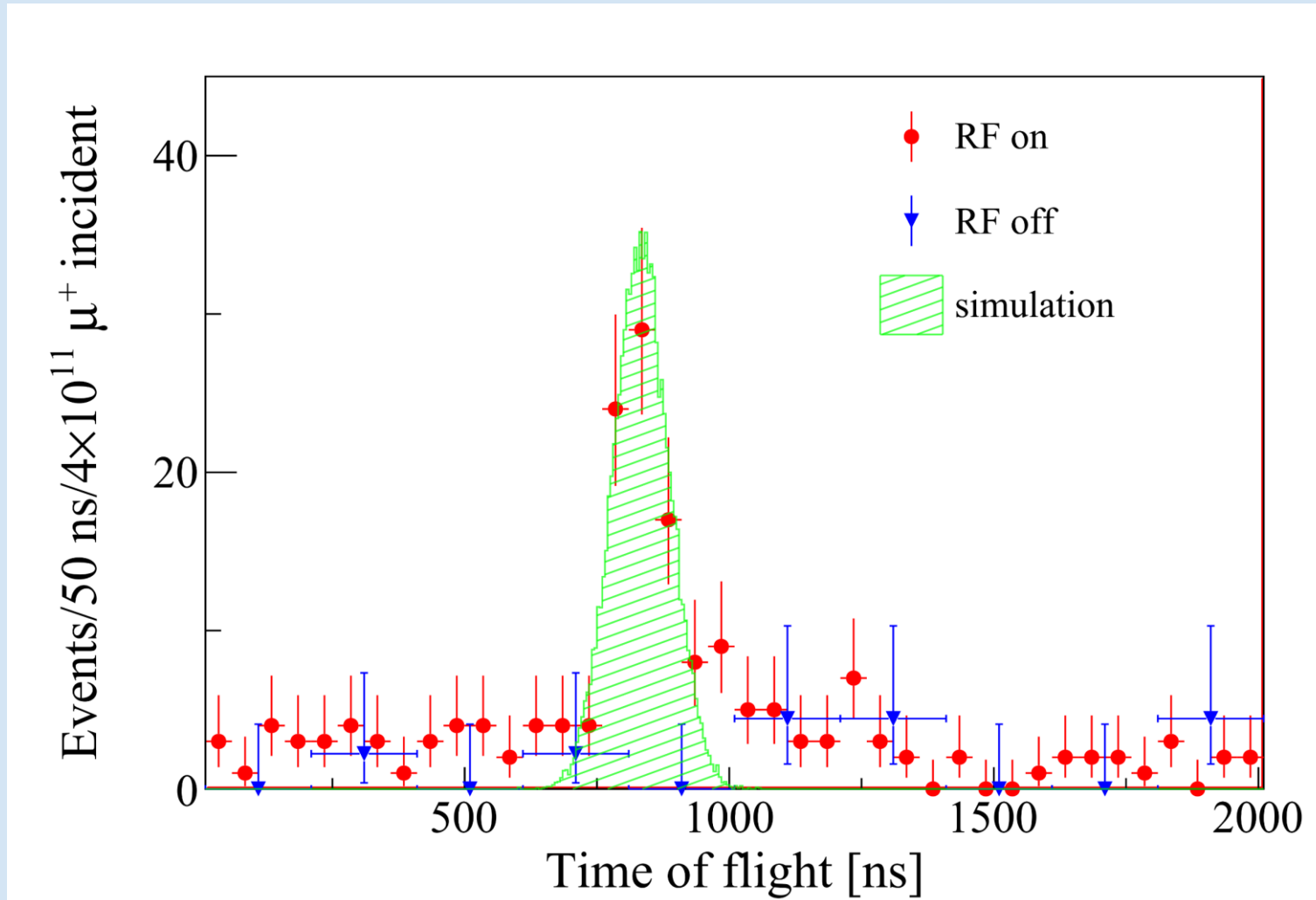




# ミュオン加速の実証



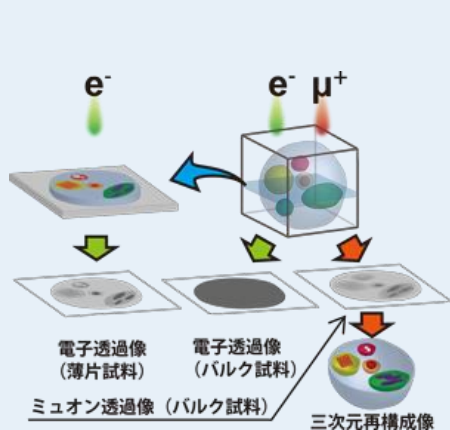
# 結果



First muon acceleration in the world

# ミュオン加速の展開

## 透過型ミュオン顕微鏡

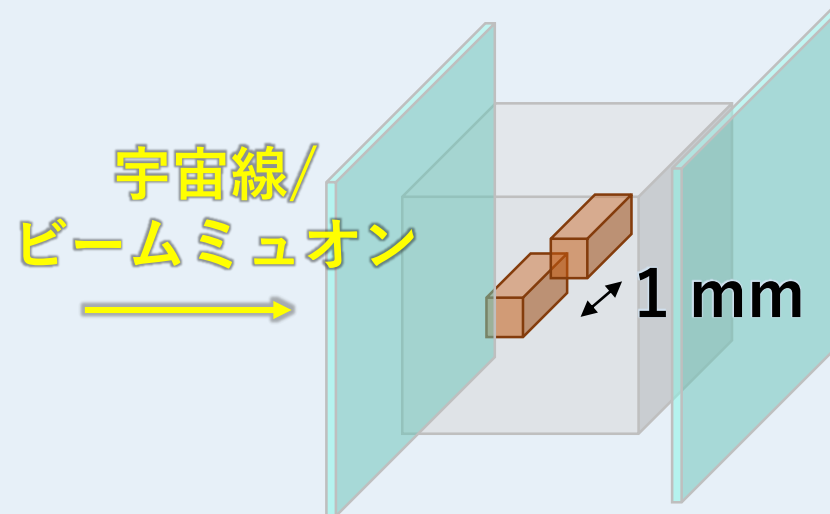


| 手法      | 透過電子顕微鏡                        | 光学顕微鏡                      | X線顕微鏡放射光          | ミュオン顕微鏡       |
|---------|--------------------------------|----------------------------|-------------------|---------------|
| 観測可能厚さ  | 200 nm (通常)<br>3 μm (超高压)      | 無制限 (透明)<br>1 mm (乱反射不透明時) | mm 以上 (波長依存)      | 14 μm @10 MeV |
| 分解能     | 0.1 nm (物理的分解能)<br>2 nm (生物試料) | 300 nm (光の波長)              | 20 nm (ゾーンプレート)   | 20 nm @10 MeV |
| 電荷      | -1                             | 0                          | 0                 | +1            |
| 電磁場分布測定 | AB 効果<br>ローレンツ顕微鏡等             | Ca イメージング (間接的、細胞単位)       | 磁気円二色効果 (磁性体、強磁場) | AB 効果         |

<https://slowmuon.kek.jp/MuonMicroscopy.html>

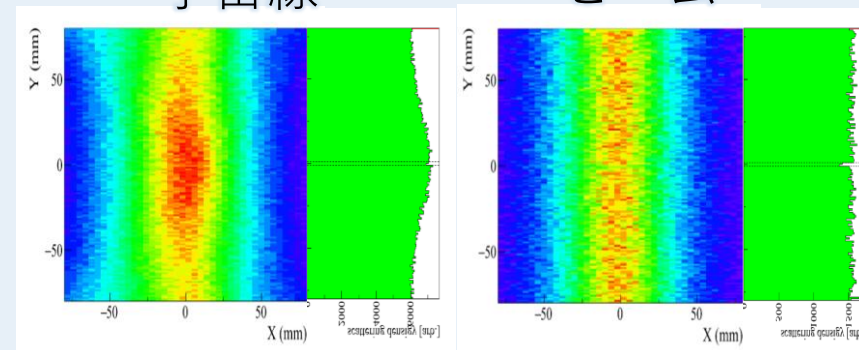
- ミュオン異常磁気能率(g-2)、ニュートリノファクトリー、コライダーetc.

## ミュオンイメージング



宇宙線

ビーム

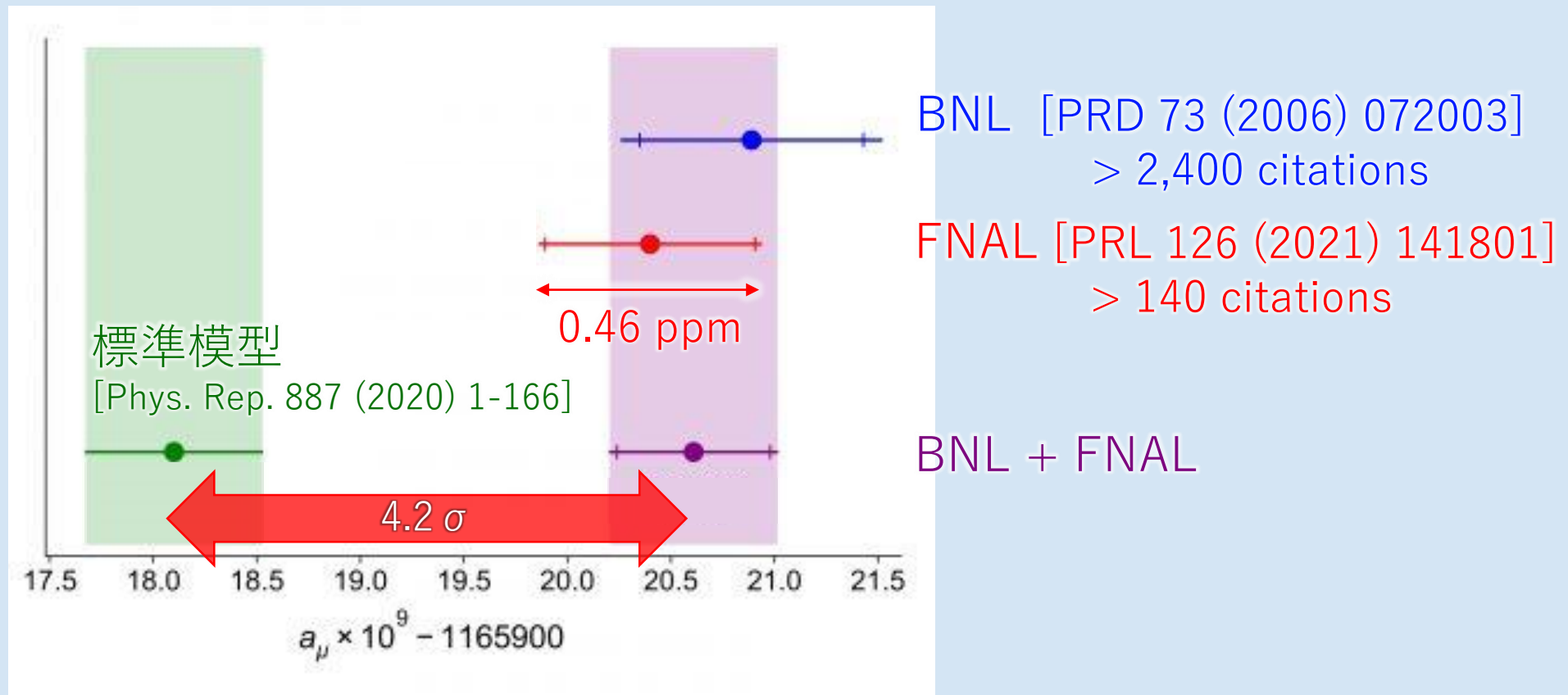


M. Otani, T. Shiba, H. Miyadera, IPAC2021 THXC05

様々な応用展開が可能

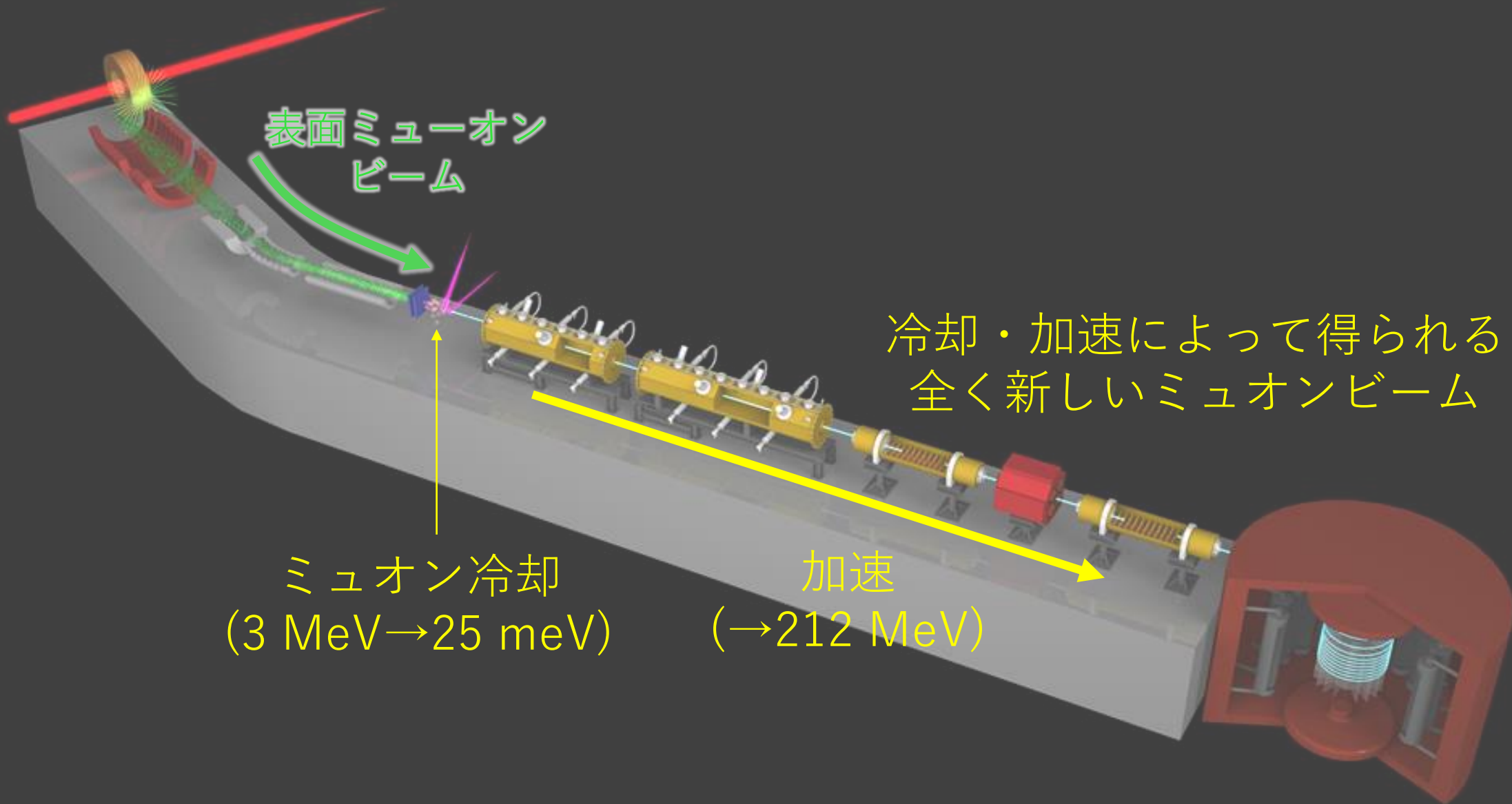
# ミュオン異常磁気能率 ( $g-2$ )

- 2021年4月にFNALがミュオン $g-2$ 測定結果を発表。  
10年以上前のBNLの測定結果を再現→標準模型とのズレは $4.2\sigma$
- FNALとBNLは同手法による測定→異なる手法での検証が必須



**$g-2$ の独立な高精度測定が切望**

# ミュオンg-2精密測定実験J-PARC E34



全く新しい手法による独立な高精度(0.45 → 0.1ppm)測定

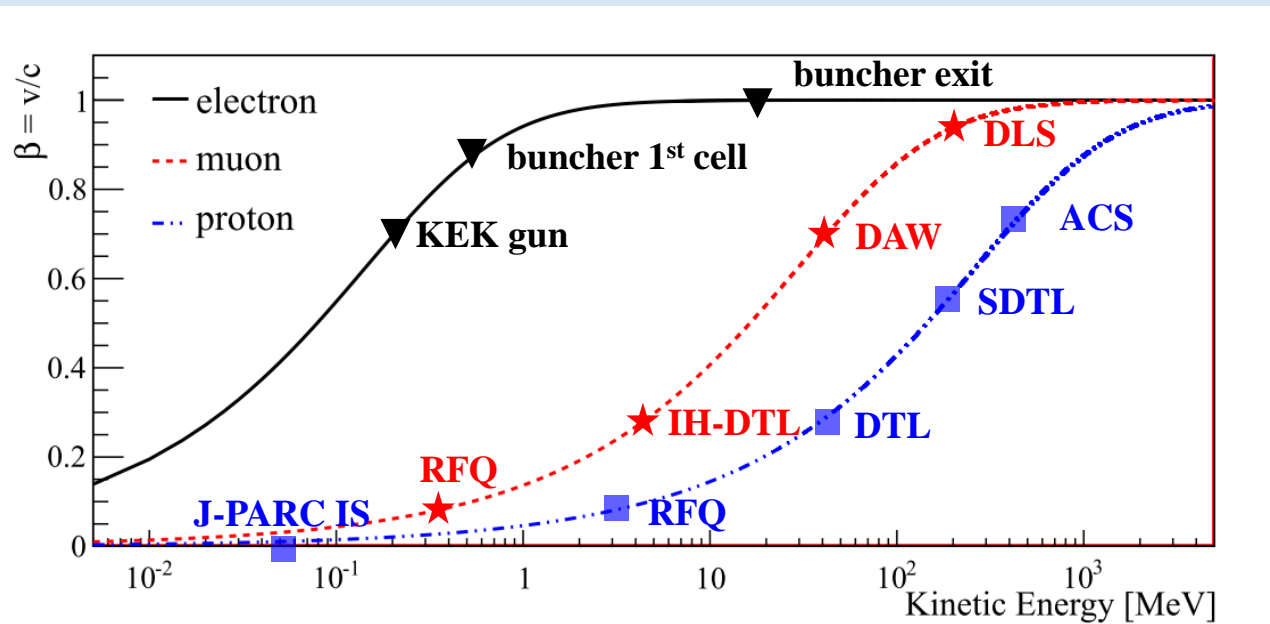


# 実験の現状

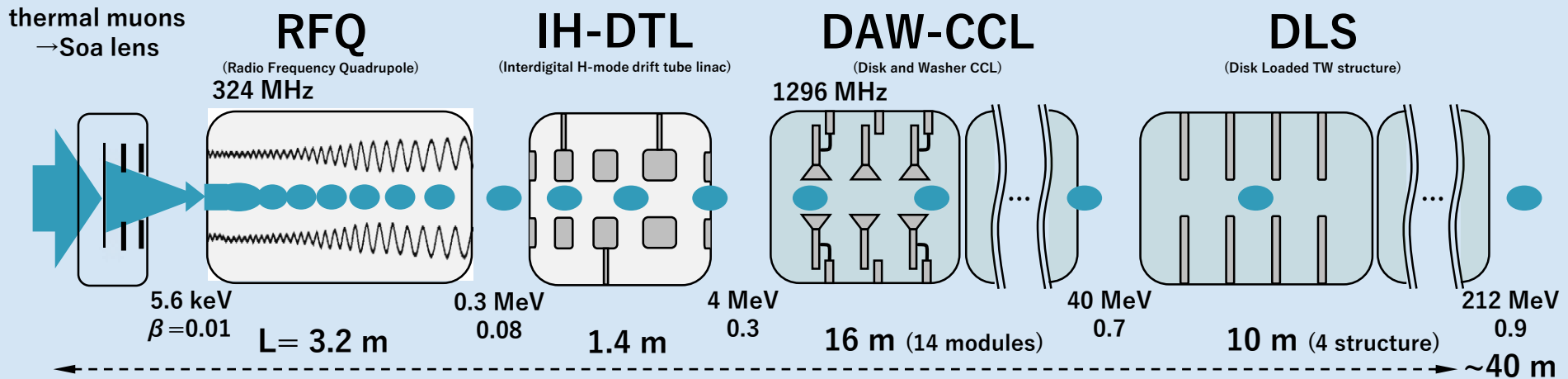
- 実験の詳細設計が完了 [K. Abe et al., PTEP2019, 053C02]
- J-PARC PACおよびKEK-IMSS PACで実験採択 (Stage-II)
- KEK PIP2016において最優先の一つ、KEK SAC2019はPIP2019をサポート。
  1. (既に予算化) J-PARC upgrade for Hyper-K
  2. (既に予算化) HL-LHC
  3. J-PARC E34
  4. J-PARC HD拡張
- KEKから概算要求を開始 (KEK → 文科省 → 財務省)
- 科研費特別推進研究が採択 (2020~2025, 代表: 三部)
  - 検出器や入射ラインを製作、ミュオン加速器上流部を製作

徐々に建設フェーズに移行。いよいよ予算化が期待。

# ミュオン線型加速器の概要



|                                             |        |
|---------------------------------------------|--------|
| Energy [MeV]                                | 212    |
| Intensity [/s]                              | $10^6$ |
| Repetition [Hz]                             | 25     |
| Pulse length [nsec]                         | 10     |
| Normalized $\epsilon_t$<br>[ $\pi$ mm mrad] | 1.5    |
| $\Delta p$ [%]                              | 0.1    |



前例のないミュオン線型加速器。

2015  
設計開始



2016  
設計完了



2017  
加速準備完了

2018  
世界初の加速成功



2019  
バンチ幅を測定

2020  
試作器製作



2021  
実機製作開始

これまでの歩み

• PRAB19 (2016) 040101

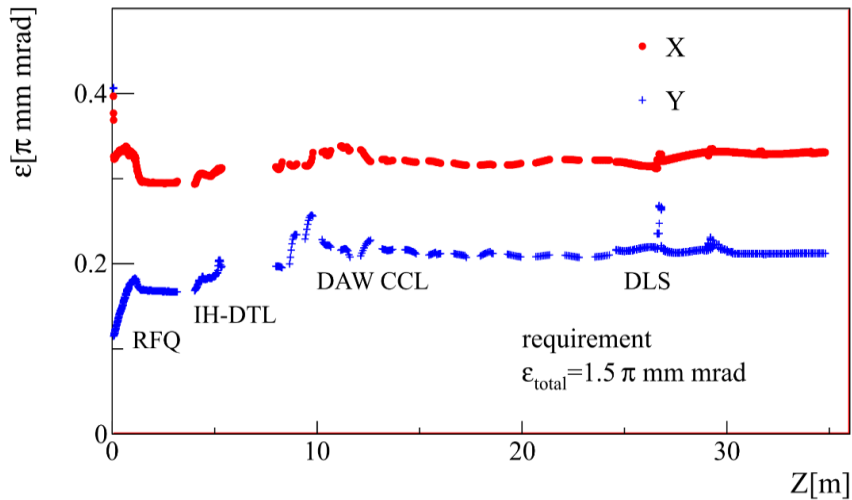
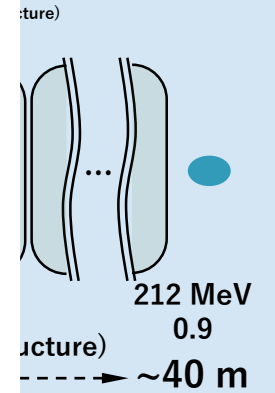
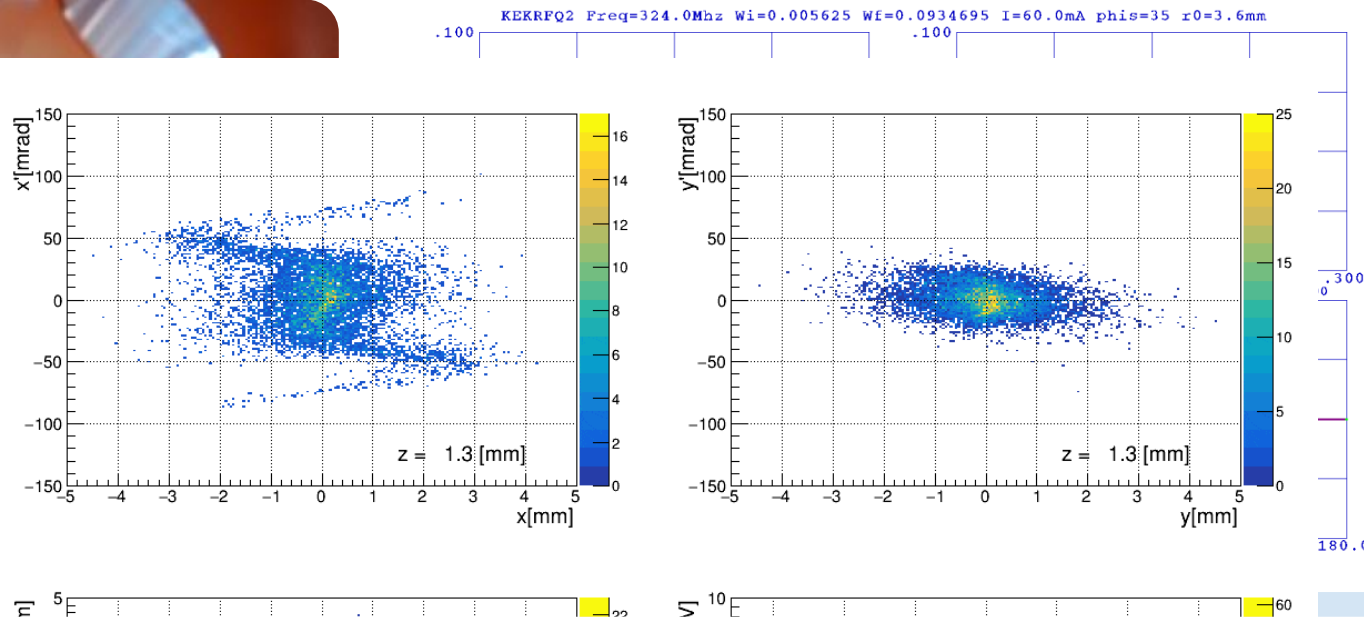
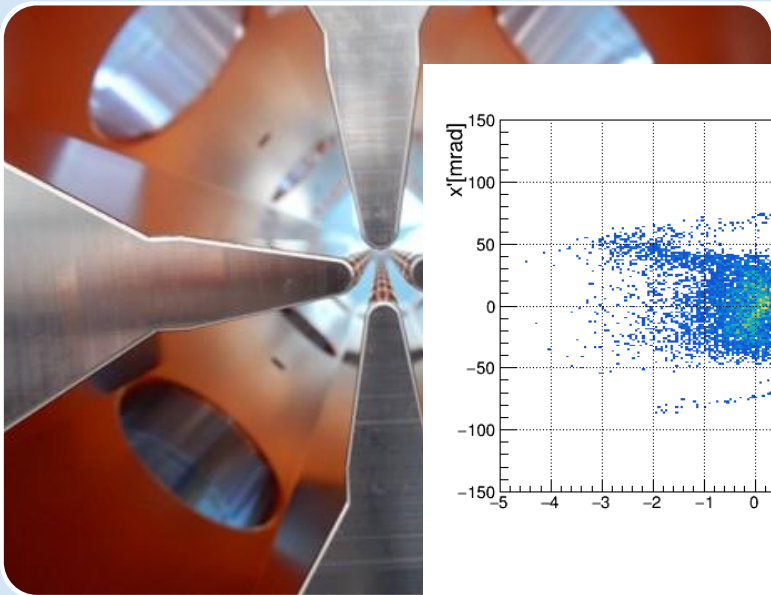
- J. Phys. Conf. 874 (2017) 021038
- J. Phys. Conf. 874 (2017) 012054
- J. Phys. Conf. 874 (2017) 012055

- 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

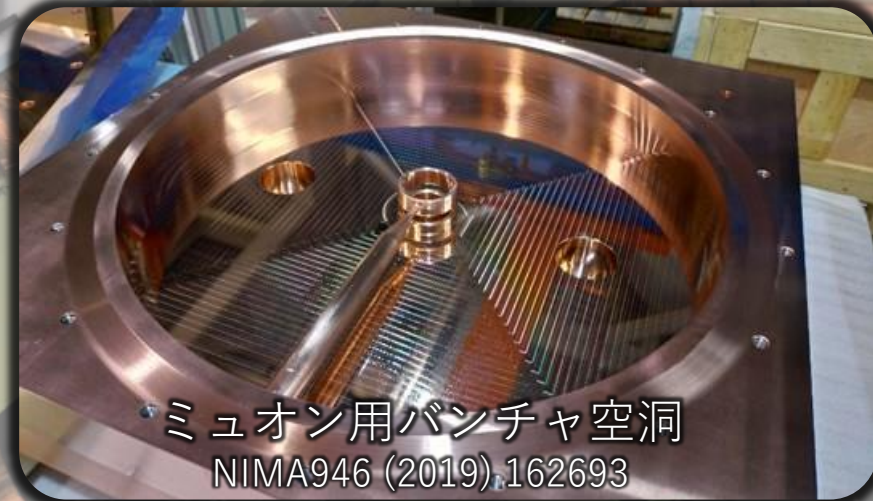
# 基本設計 2015/16



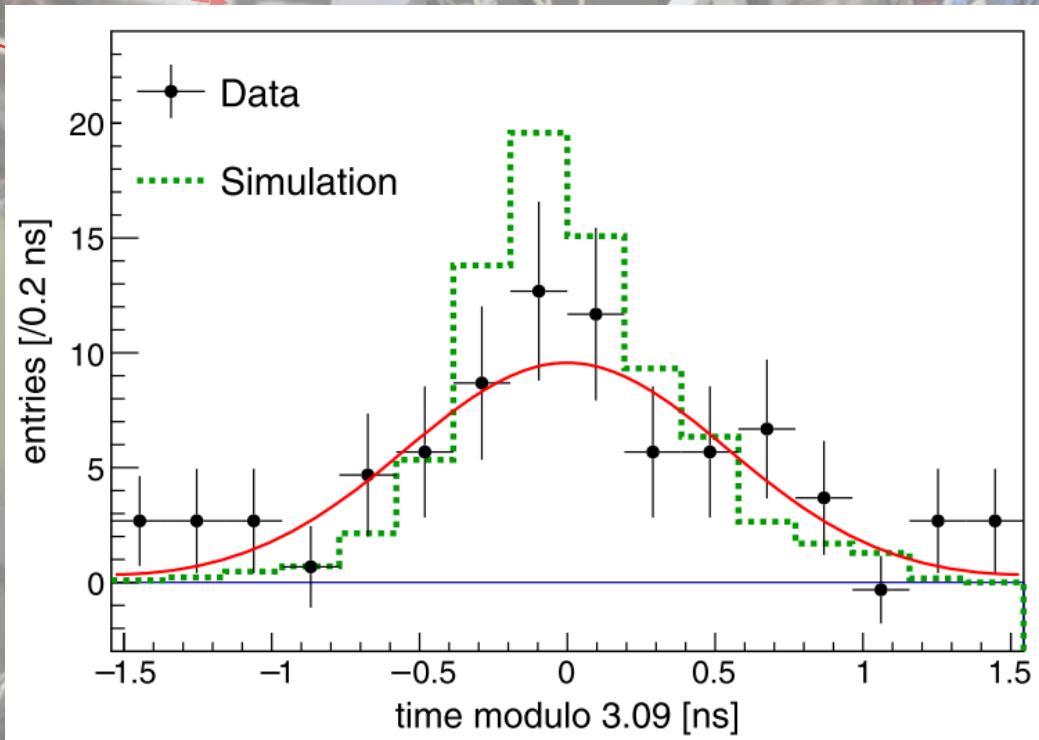
|                    | Init. | RFQ | IH   | DAW  | DLS  |
|--------------------|-------|-----|------|------|------|
| Decay survival [%] | 83    | 81  | 98   | 96   | 99   |
| Transmission [%]   | 87    | 95  | 99.9 | 99.5 | 99.9 |

実験で要求されるエミッタンス・強度を達成

# バンチ幅測定 2019



$\mu^+$



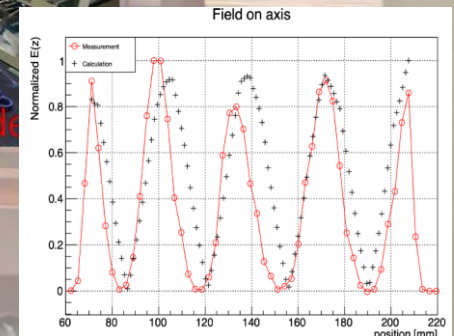
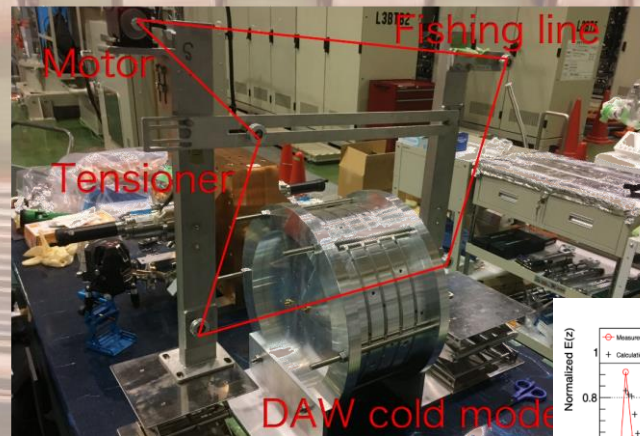
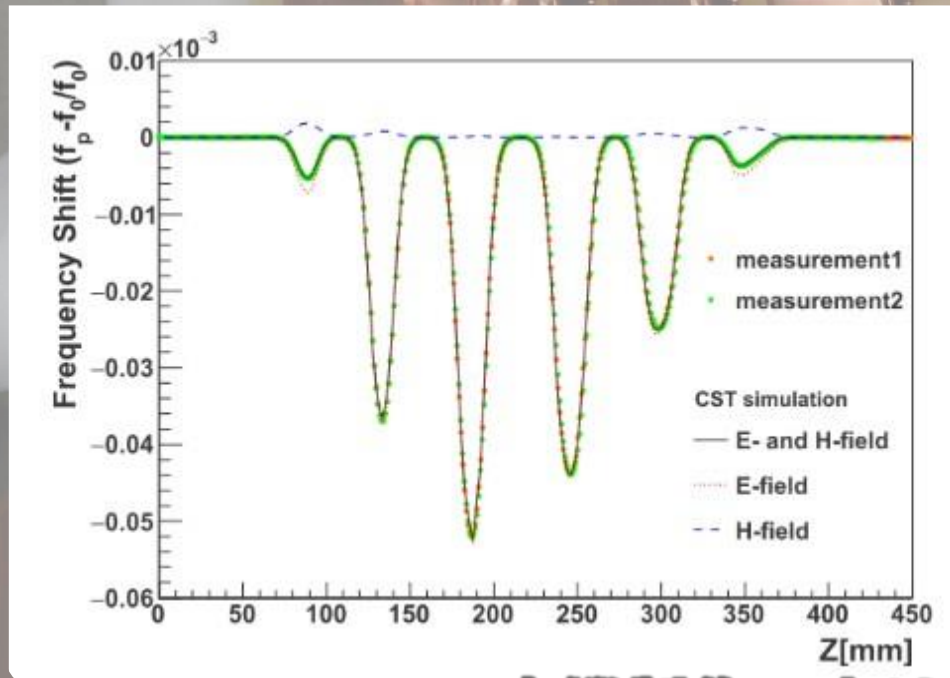
加速ミュオンの  
バンチ幅測定に成功  
Phys. Rev. AB 23 (2020) 022804

# 試作機製作・試験 2020

- 2段目加速器IH-DTLの~1/3ハイパワーモデルを製作。  
低電力試験で性能評価完了、今年度前半に大電力試験を実施予定。
- 3段目加速器DAW-CCLのコールドモデルを製作。  
低電力試験で性能評価完了、ハイパワー実機設計に着手。

|                 | Sim.   | Meas.  |
|-----------------|--------|--------|
| Frequency [MHz] | 321.53 | 321.21 |
| $Q_0$           | 8700   | 7695   |

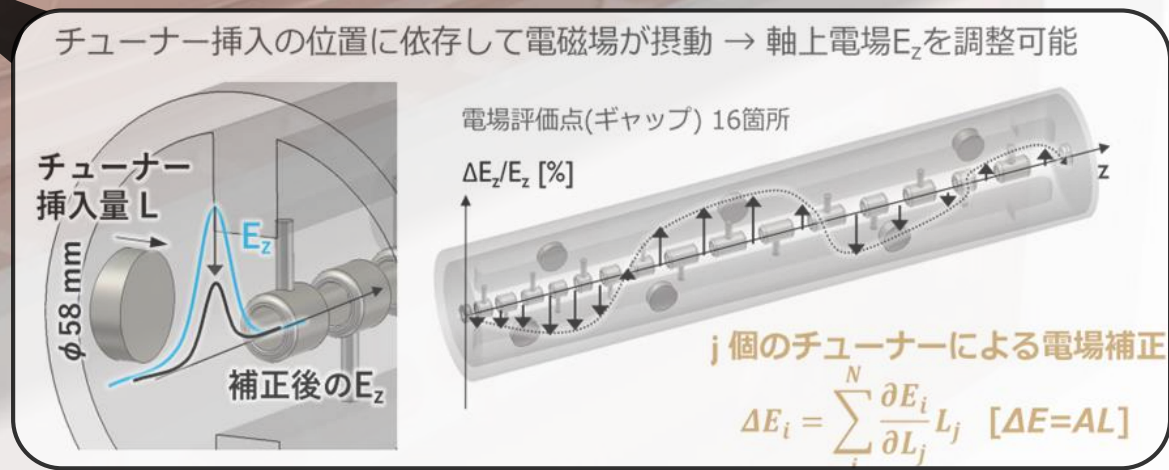
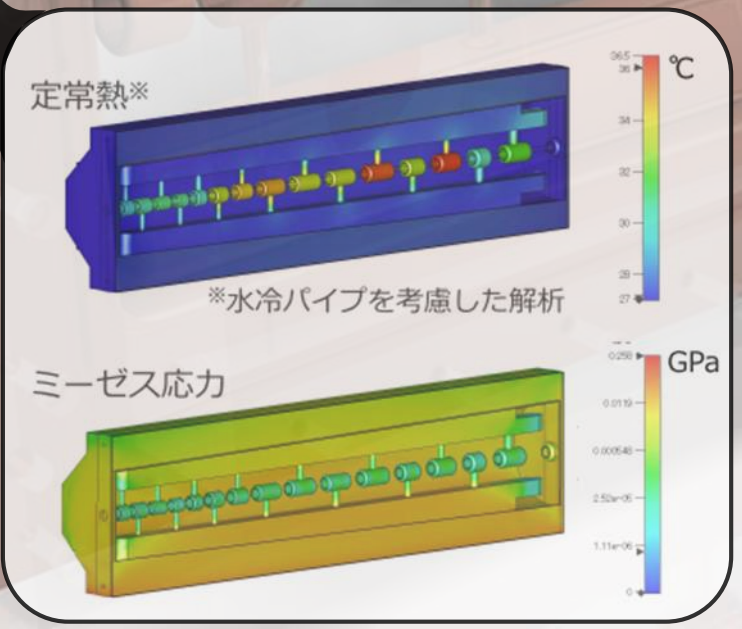
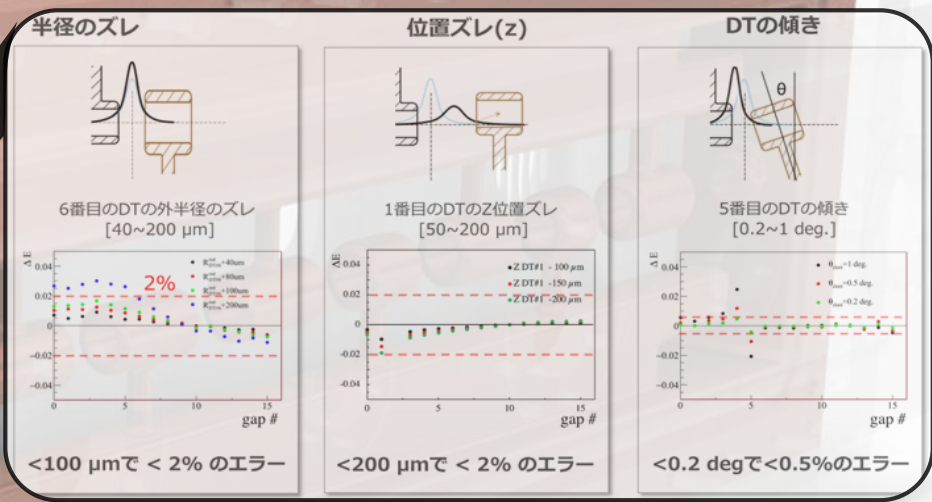
|                 | Sim.  | Meas. |
|-----------------|-------|-------|
| Frequency [GHz] | 1.318 | 1.322 |
| $Q_0$           | 9254  | 8766  |



実機製作に向けた工程・要求性能を実証

# IH-DTL実機製作

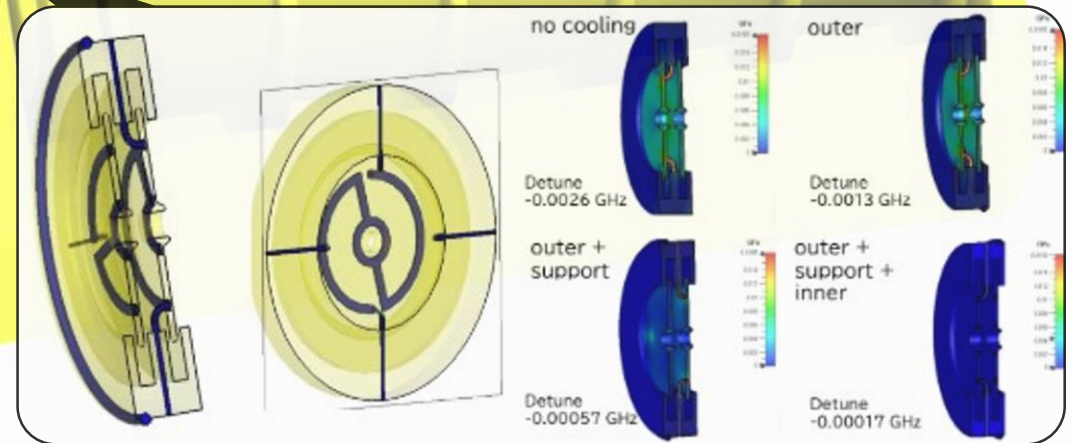
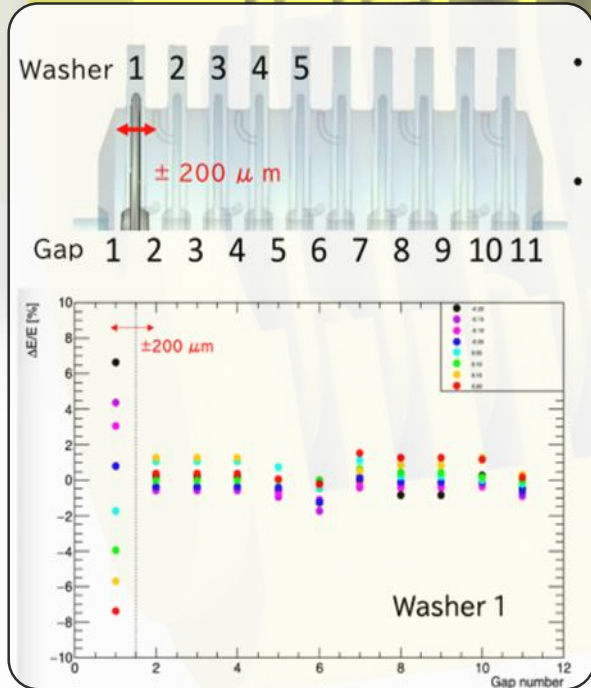
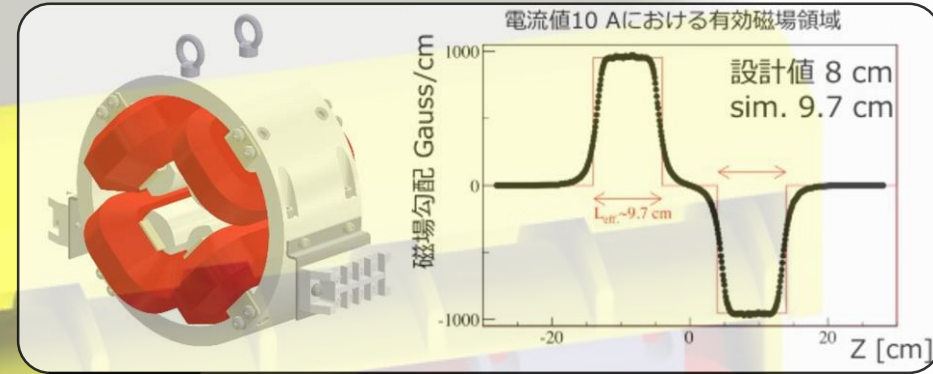
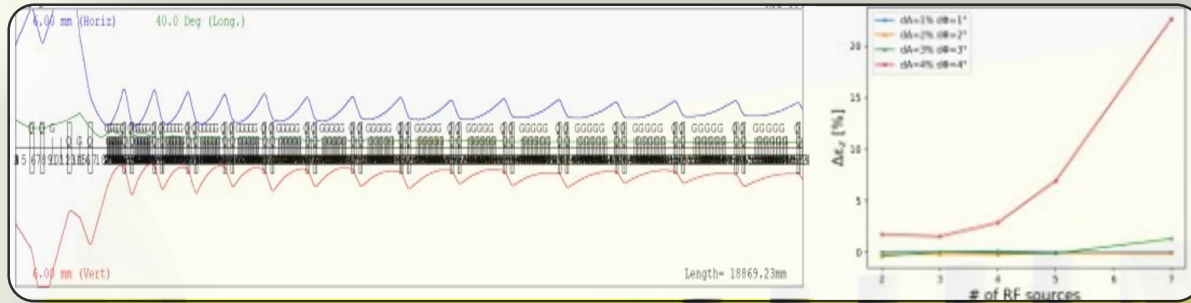
- 実機製作に必要な様々な検討が完了。



年度内に製作完了。次年度以降に低電力・大電力試験。

# DAW-CCL実機製作

- 実機製作に必要な様々な検討が完了。

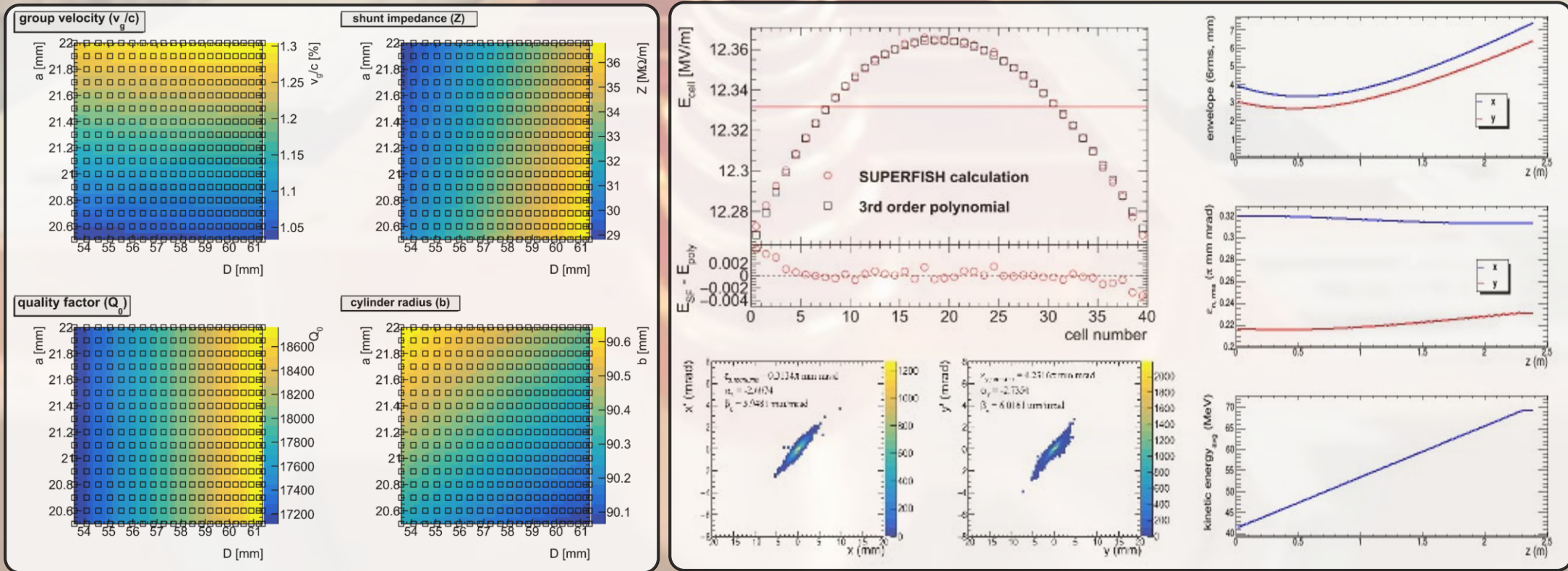


年度内に1st タンクの全セルを製作し、低電力試験実施



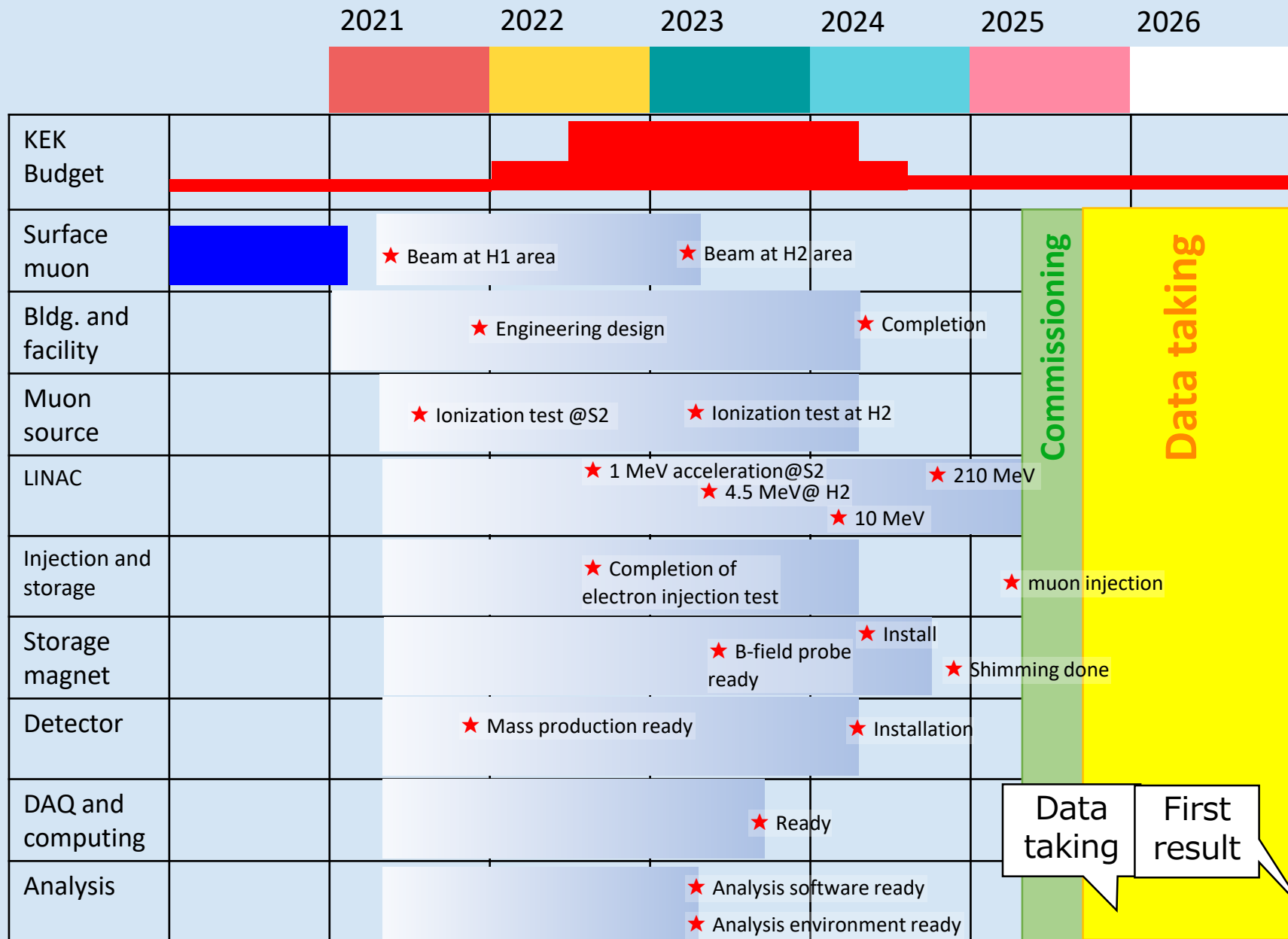
# DLS詳細設計

- 電子( $\beta = 1$ )と異なる設計( $\beta = 0.7 \rightarrow 0.94$ )が必要。
- 製作に向けた詳細設計を行っている。



ミュオン用( $\beta \neq 1$ )設計手法を確立、  
来年度に実機スケール空洞を試作予定

# 今後の予定



# まとめ

- 負ミューオニウムイオンによる冷却とRFQによって  
**世界初のミューオン加速を実証**
- 本技術に立脚して、静止したミューオンをほぼ光速度まで加速するミューオン線型加速器を設計、実現に着手。
- **ついに予算化**が期待。2025年にデータ収集開始を目指す。

本研究は日本学術振興会科学研究費JP25800164、JP15H03666、JP15H05742、JP16H03987、JP16J07784、JP18H03707、JP18J22129、JP18H05226、JP19J21763、JP20J21440、JP20H05625、JP21K18630、JP21H05088、JP21H05084の助成を受けております。

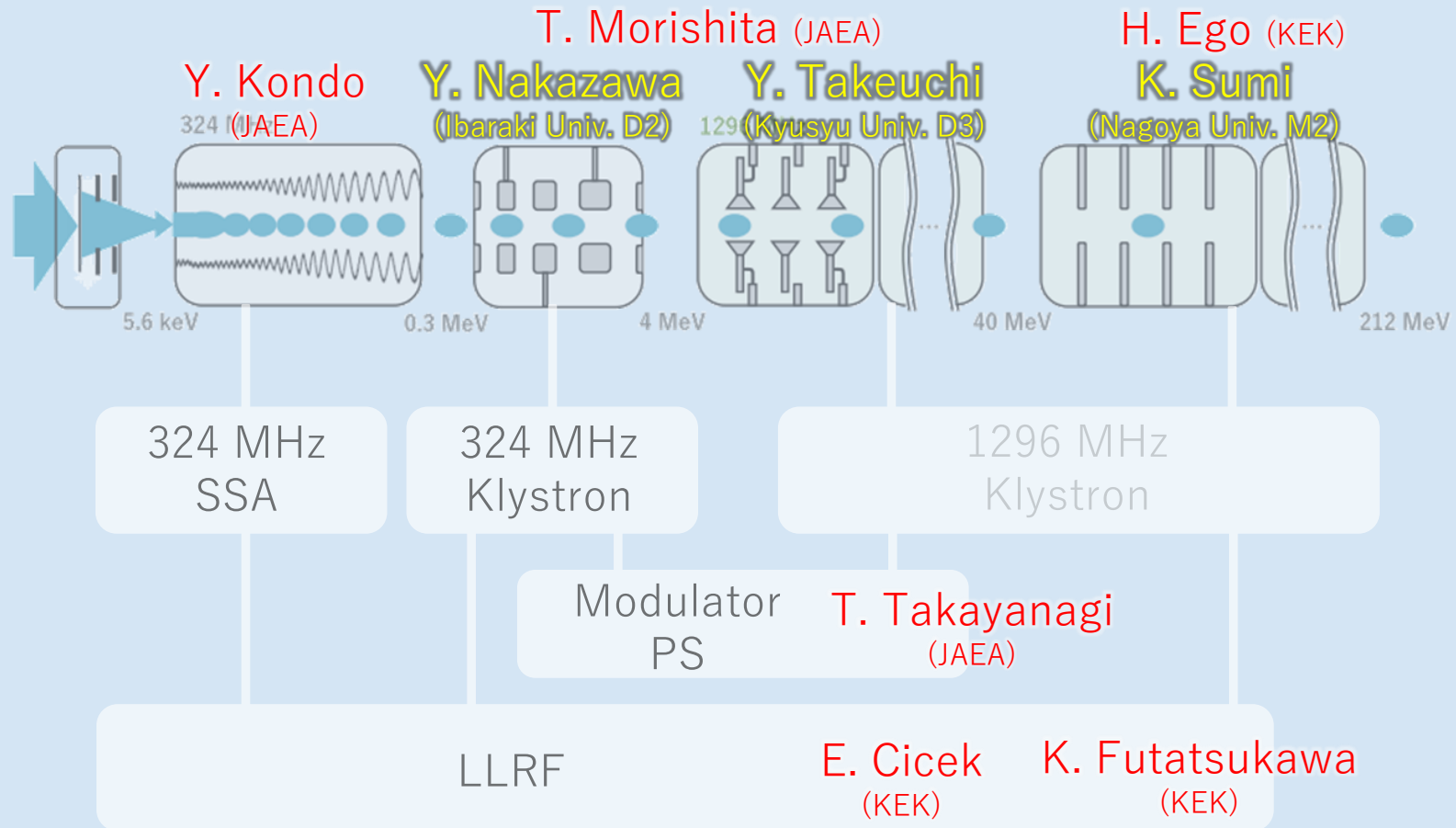


# グループ体制

Commissioning  
Y. Nakazawa

M. Yotsuzuka  
(Nagoya Univ. D1)  
K. Sumi

G. Razuvaev Monitor  
T. Youssef (SOKENDAI)  
C. K. Sung (IBAL/UNIST)



加速器エキスパートによる強力なサポート体制

# 若手が活躍

## 論文

|                 |                 |                                        |       |       |                                    |
|-----------------|-----------------|----------------------------------------|-------|-------|------------------------------------|
| 須江 祐貴、<br>四塚 麻衣 | 名大D1、M1<br>[当時] | Phys. Rev. AB 23 (2020) 022804         | 中沢 雄河 | 茨城大D2 | JPS Conf. Proc. , 33 (2021) 011128 |
| 中沢 雄河           | 茨城大M2           | J. Phys. Conf. Ser. 1350 (2019) 012054 | 竹内 佑甫 | 九大D3  | JPS Conf. Proc. , 33 (2021) 011129 |
| 中沢 雄河           | 茨城大M2           | NIM A937 (2019) 164-167                | 四塚 麻衣 | 名大D1  | JPS Conf. Proc. , 33 (2021) 011140 |
|                 |                 |                                        | • • • |       |                                    |

## 受賞

|       |           |                                                                                         |
|-------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)                                                          |
| 竹内 佑甫 | 九大D3      | 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 [当時] | 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LINAC2018 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)                                                            |

若手大学院生が活躍



**I WANT YOU  
FOR J-PARC E34**

**NEAREST RECRUITING STATION**