Flavor Physics workshop 2021 (FPWS2021)　　2021/9/28

J-PARC muon g-2/EDM実験に向けたミューオン線形加速器の開発

[A]Ibaraki Univ.

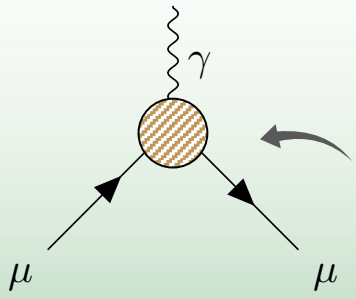
[B]NIRS, [C]KEK, [D]JAEA, [E]Nagoya Univ., [F]Kyushu Univ., [G]Tokyo Tech, [H]Univ. of Tokyo, [I]RIKEN

Y. Nakazawa

H. Iinuma[A], Y. Iwata[B], E. Cicek[C], M. Otani[C], N. Kawamura[C], R. Kitamura[D], Y. Kondo[D], N. Saito[C], Y. Sue[E], K. Sumi[E], Y. Takeuchi[F], N. Hayashizaki[G], T. Mibe[C], T. Morishita[D], T. Yamazaki[C], M. Yoshida[C] , M. Yotsuzuka[E], T. Iijama[E], K. Inami[E], H. Ego[C], K. Suzuki[E], T. Takayanagi[D], J. Tojo[F], K. Futatsukawa[C], H. Yasuda[H], K. Shimomura[C], Y. Miyake[C], K. Ishida[I], Y. Fukao[C]

ミューオン異常磁気モーメント (g-2)

標準理論予測(2020)



磁気双極子

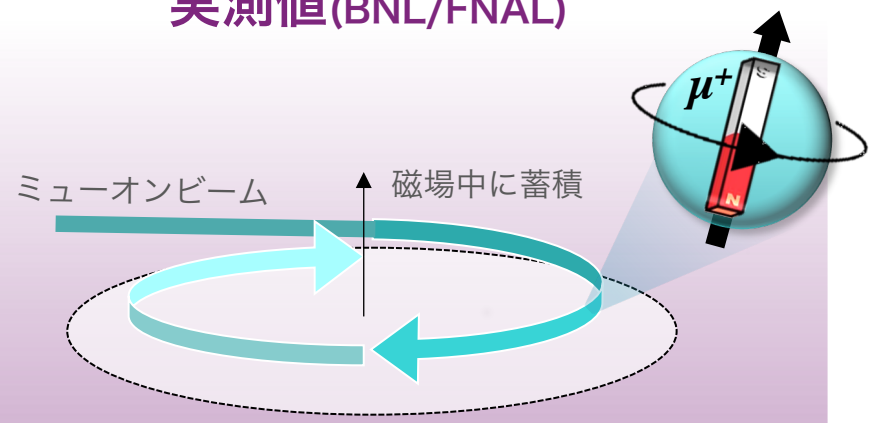
$$\vec{\mu} = g_\mu \left(\frac{q}{2m}\right)\vec{s}$$

$$g_\mu = 2(1 + \boldsymbol{a_\mu})$$

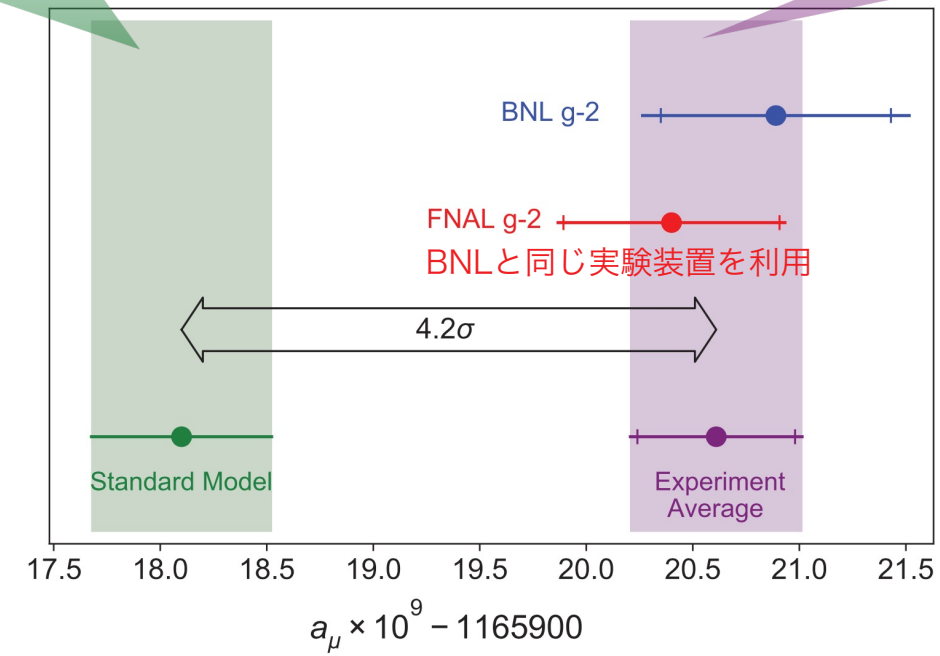
異常磁気モーメント

$$a_\mu{}^{\mathrm{th}} = a_\mu(\mathrm{QED}) + a_\mu(\mathrm{EW}) + a_\mu(\mathrm{QCD})$$

実測値(BNL/FNAL)



スピンの時間変化を測定



4.2σ の不一致が報告

B.Abi etal., Phy. Rev. Lett., vol. 126, no. 14, p. 141801 (2021)
T.Aoyama etal, Physics Reports, vol. 887, pp. 1–166 (2020)

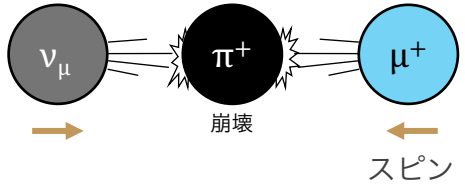
標準模型を超えた新物理が期待される

一方で、別手法による検証が必要

実験手法　ミューオンのスピン方向に依存する崩壊陽電子の時間変化を測定する

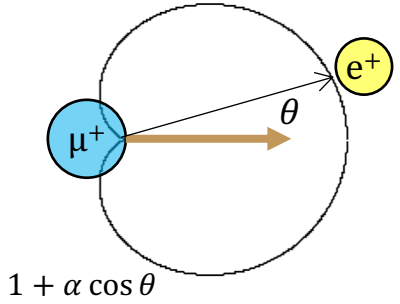
特徴１

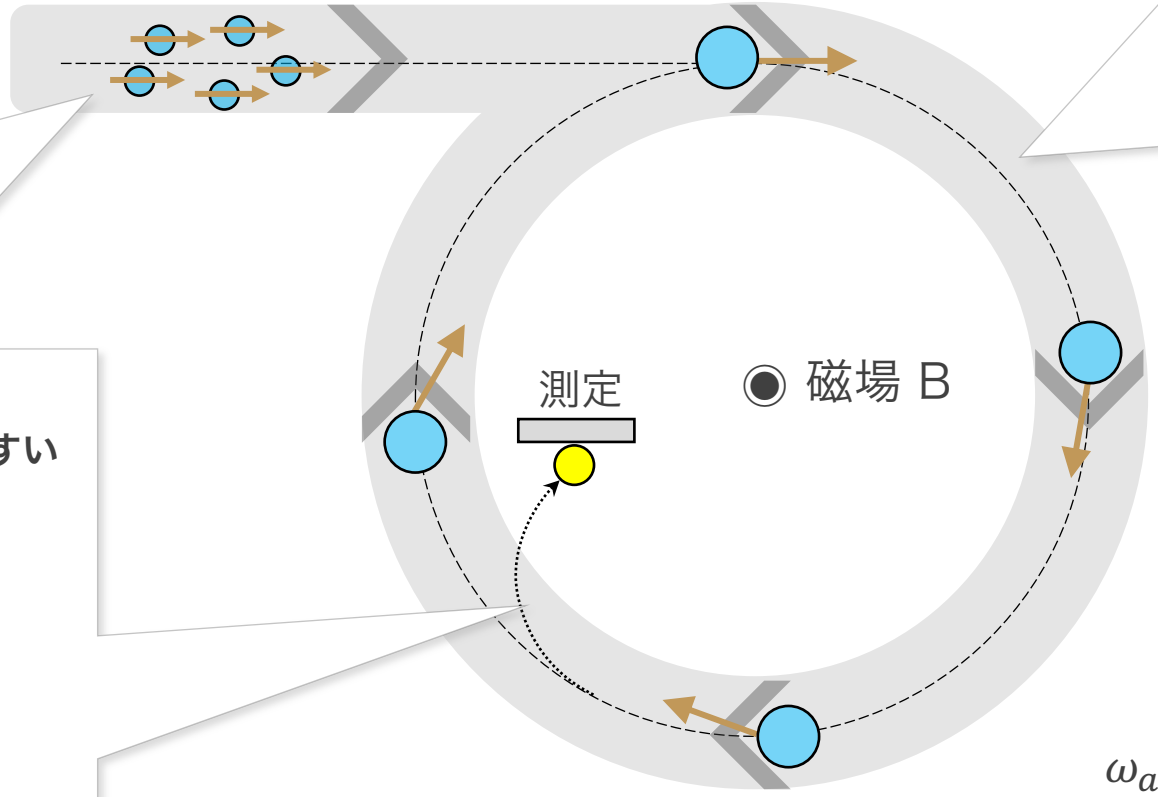
スピン偏極ビームが供給可能



特徴３

崩壊陽電子はスピン方向に出やすい
(P対称性の破れ)





特徴2

磁場中ではスピンも回転する

回転の差 = g-2による振動(スピン歳差)

(スピン運動) - (サイクロトロン運動) = (スピン歳差運動)

$$\overrightarrow{\omega_s} - \overrightarrow{\omega_c} = \overrightarrow{\omega_a}$$

運動量

スピン

$$\overrightarrow{\omega_a} = -\frac{q}{m}\left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1}\right)\frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}\right]$$

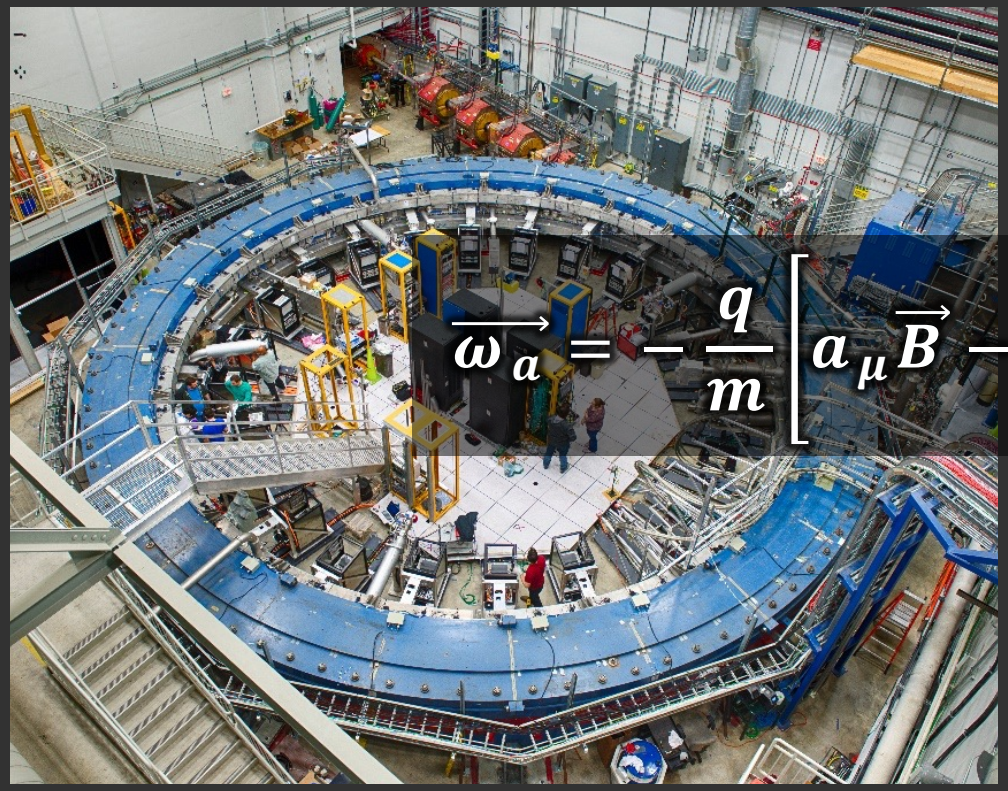
$$\overrightarrow{\omega_a} = -a_\mu \frac{q\vec{B}}{m}$$ (特定の条件下)

ω_aとBの測定によってa_μが決まる

振動の周波数(ω_a) と 磁場(B) の精密測定が必須

実験手法の違い = ω_aの余分な項をどう消すか？

BNL/FNAL

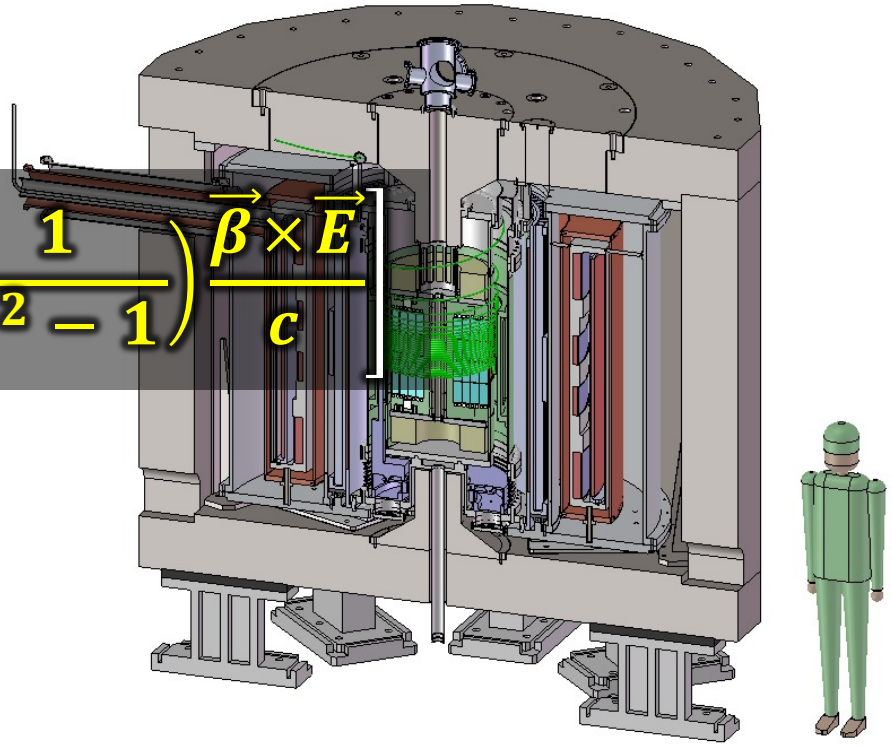


$$\overrightarrow{\omega_a} = -\frac{q}{m}\left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1}\right)\frac{\vec{\beta}\times\vec{E}}{c}\right]$$

特定のエネルギー(γ)のビームを使う

$$a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} = 0$$

J-PARC



電場を使わない

$$\vec{E} = 0$$

BNL/FNAL

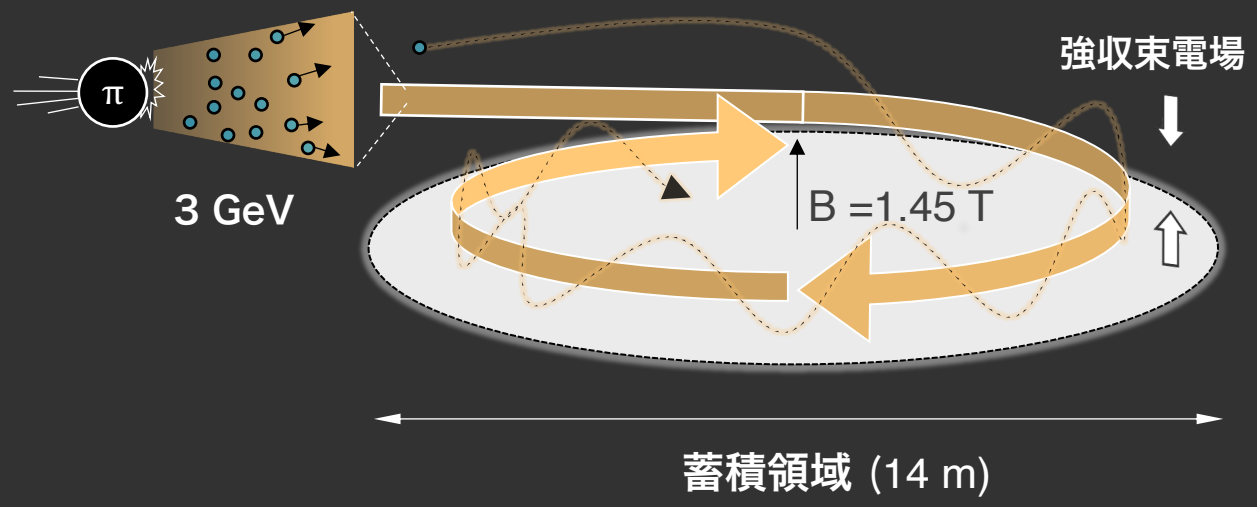
特定のγで崩壊したミューオンをそのまま利用

→ ビーム拡がり(エミッタンス)が大きい (→ 系統誤差の原因)

→ 電場による強収束が必要不可欠

大きな磁場領域

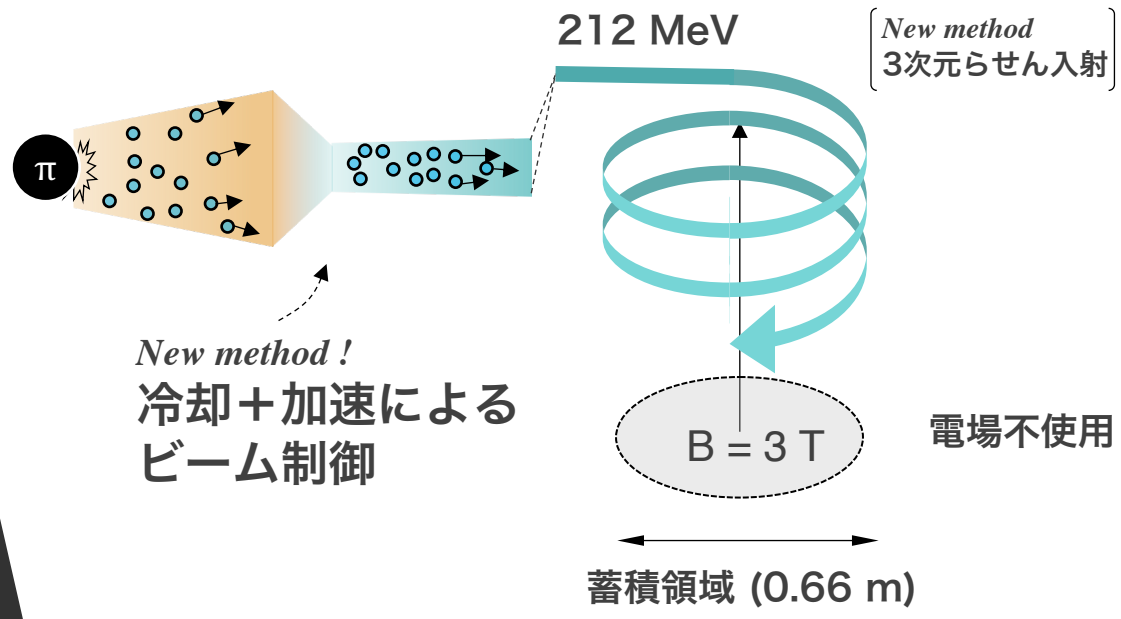
→ 均一磁場の制御が難しい



J-PARC

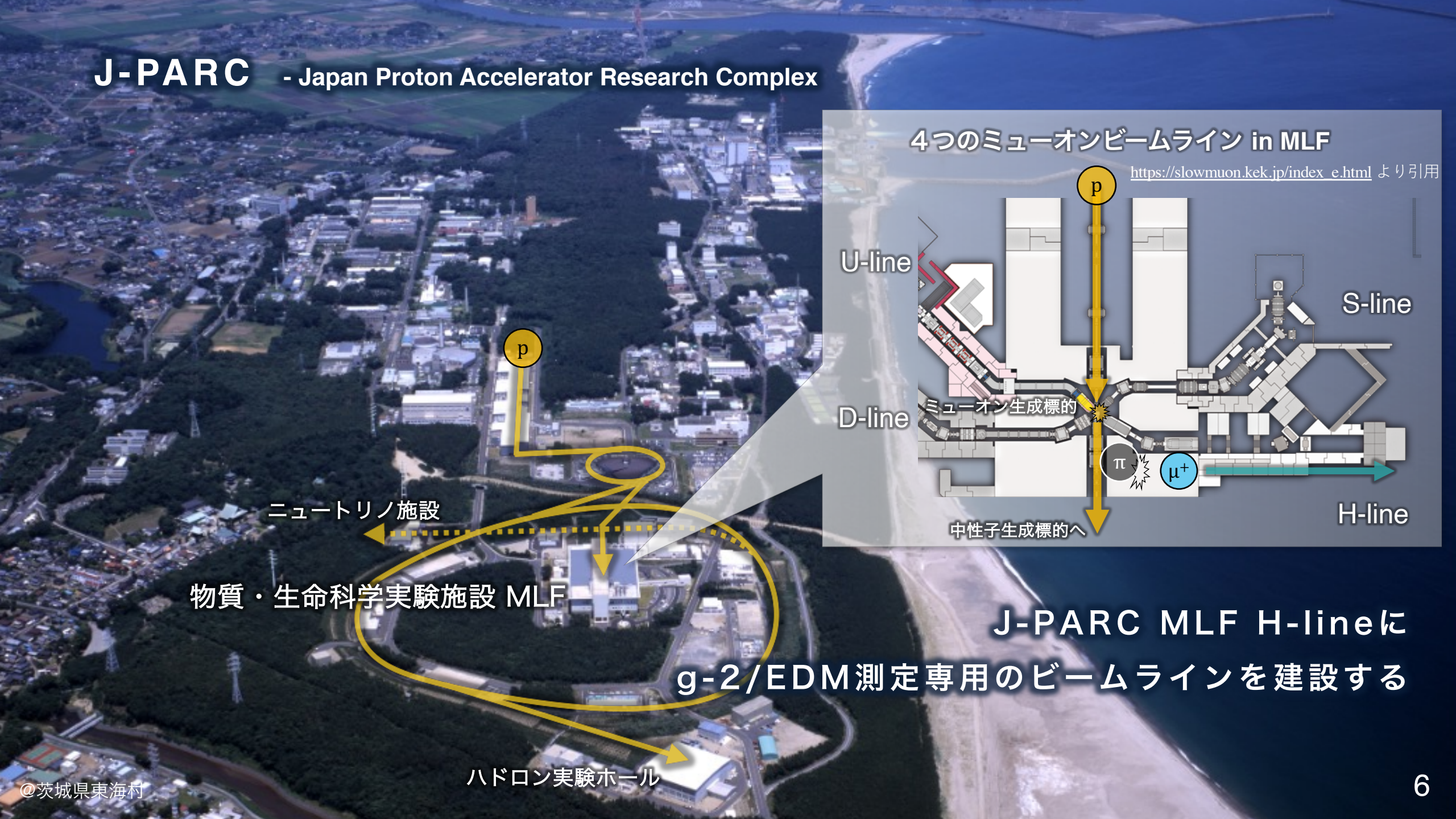
電場収束を行わない ＋ コンパクトな磁場領域

→従来の1/1000の低エミッタンスビームが必要



ビーム由来系統誤差(ω_a)削減 ＋ 高精度磁場

J-PARC - Japan Proton Accelerator Research Complex



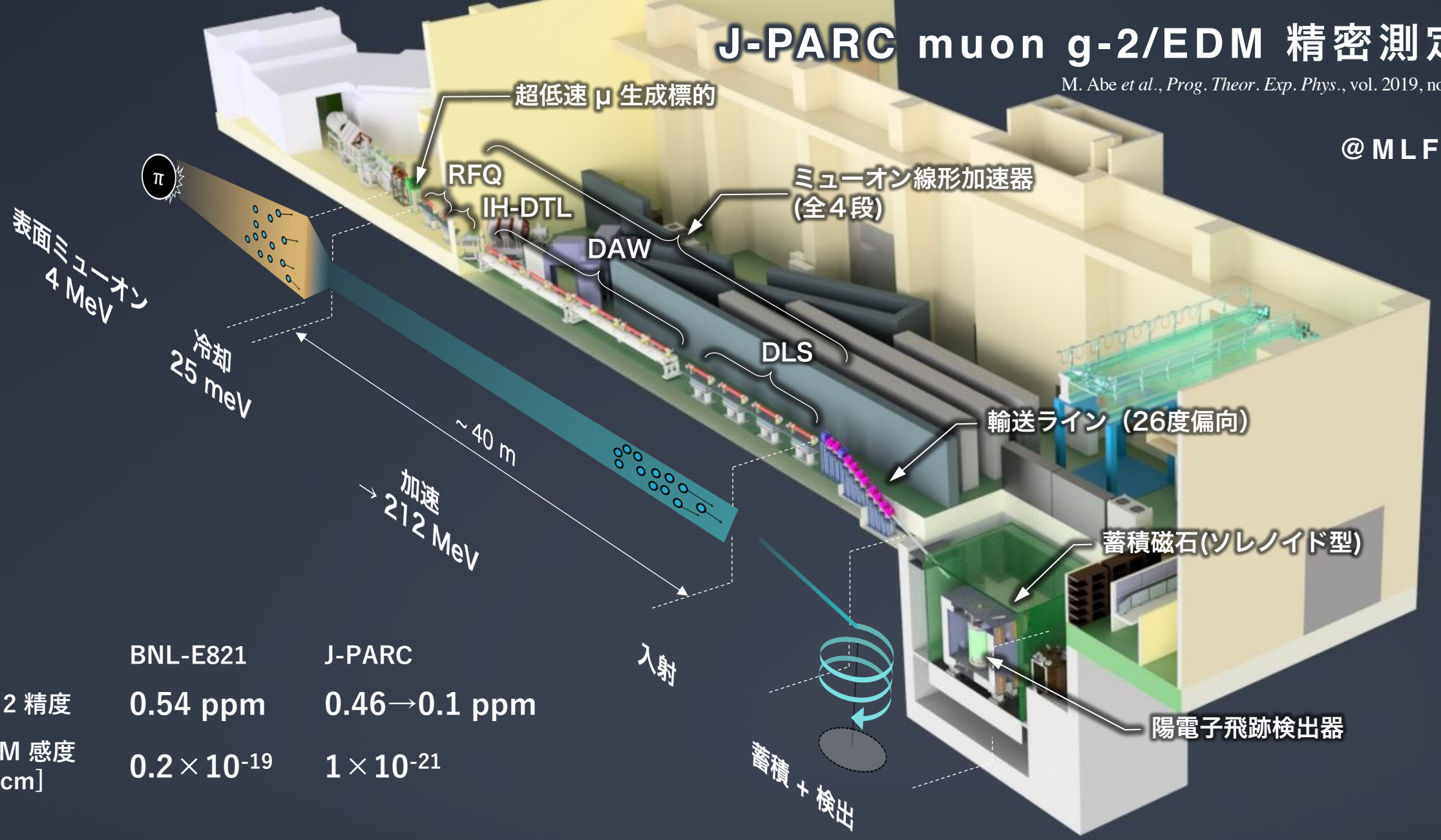
J-PARC MLF H-lineに
g-2/EDM測定専用のビームラインを建設する

@茨城県東海村

J-PARC muon g-2/EDM 精密測定実験

M. Abe *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2019, no. 5, May. 2019.

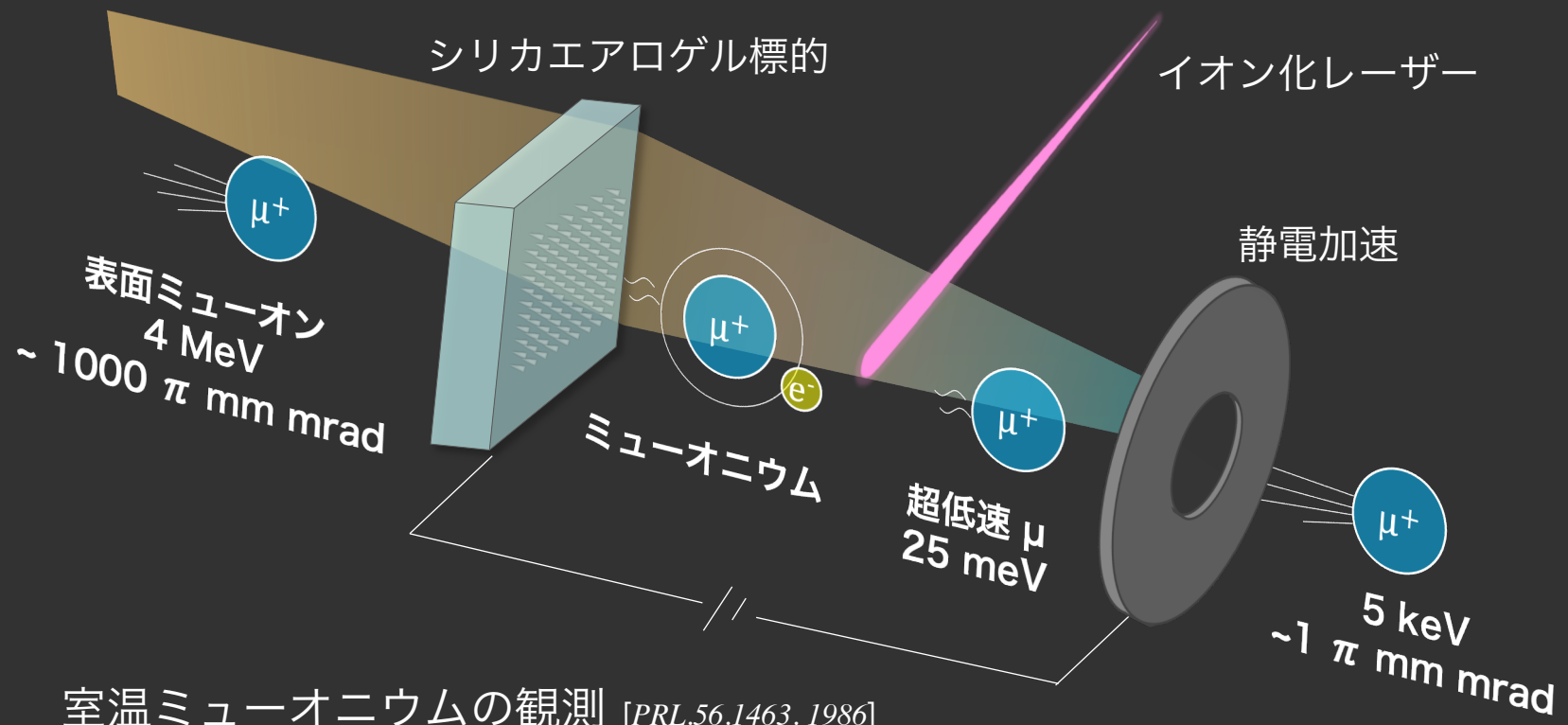
@MLF H-line



	BNL-E821	J-PARC
$g-2$ 精度	0.54 ppm	0.46→0.1 ppm
EDM 感度 [e·cm]	0.2×10^{-19}	1×10^{-21}

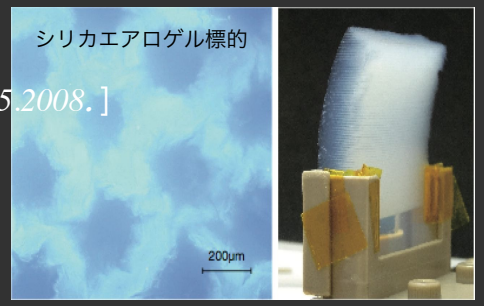
いかに加速中でのエミッタンスの増大を抑えるかが課題

ミューオン冷却



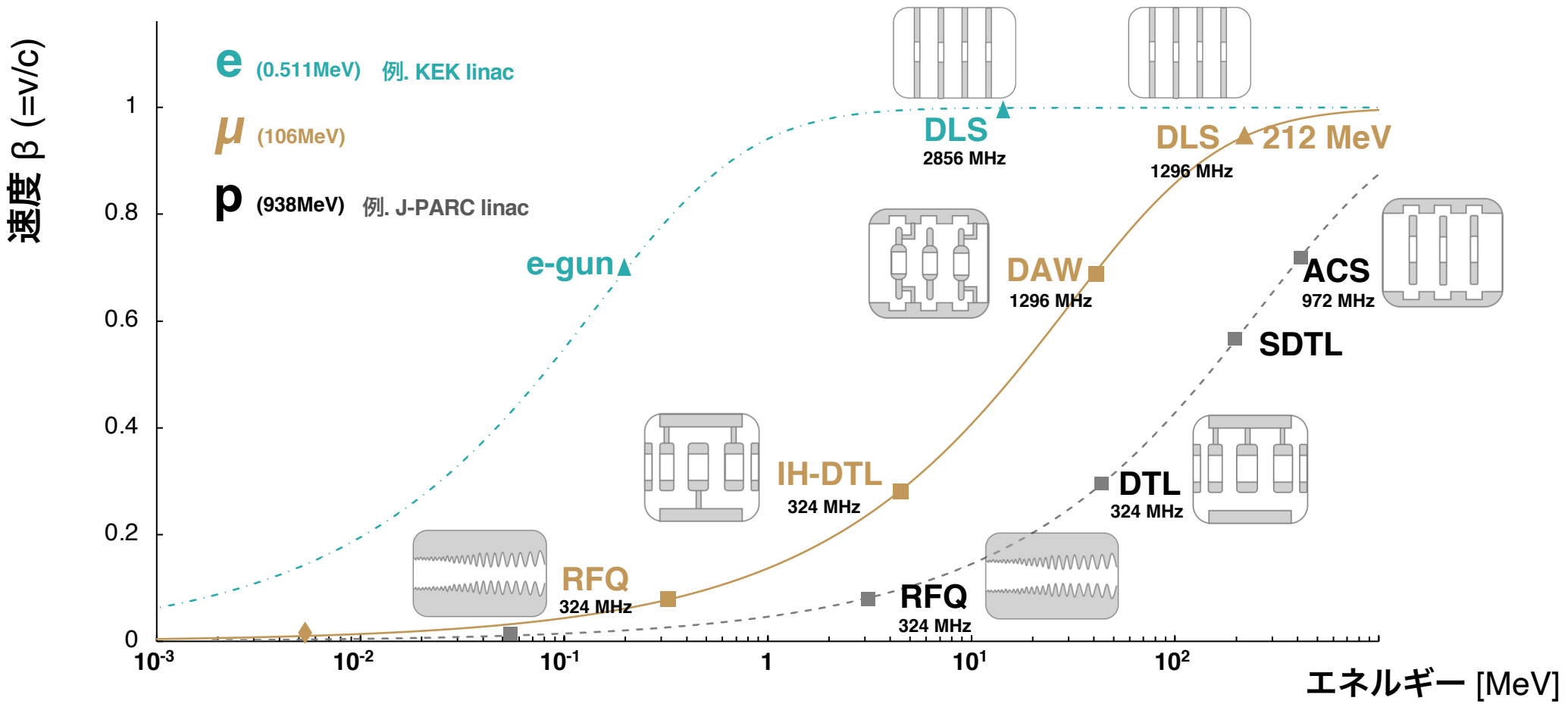
History

1986	室温ミューオニウムの観測 [*PRL.56.1463. 1986*]
1988	ミューオニウムイオン化による超低速ミューオン生成 [*PRL.60.101.1988*]
1995 - 2008	1s-2p励起による超低速ミューオンの高強度化 [*RRL.74.4811.1995, NIMB.266.335.2008.*]
2014	高効率室温ミューオニウム生成標的 [*PTEP.091.C01.2014*]
2022	高強度レーザーの開発 [*JPS2021 17pT1-7 S.Kamioka*]
	超低速 μ の生成実験 + RFQ加速試験 [*JPS2021 15aT1-9 Ce Zhang , JPS2021 16aT4-3 M. Yotsuzauka*]



ミューオン加速　電子/陽子加速器の技術を用いて、ミューオン専用の加速器を新たに開発する

崩壊損失(2.2μs)の抑制, 高加速効率, 安定性, 速度変化に対応(DLS) ..etc.

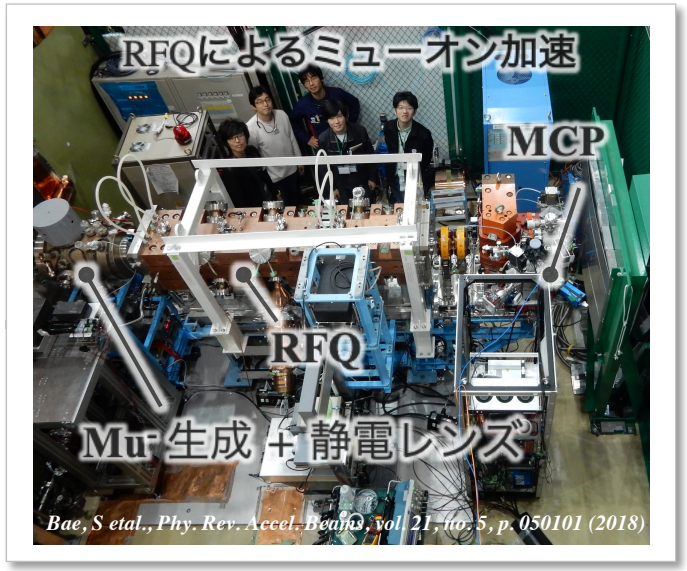


前例のないミューオン線形加速器の開発 / ミューオン加速実証が必須。

これまでの開発

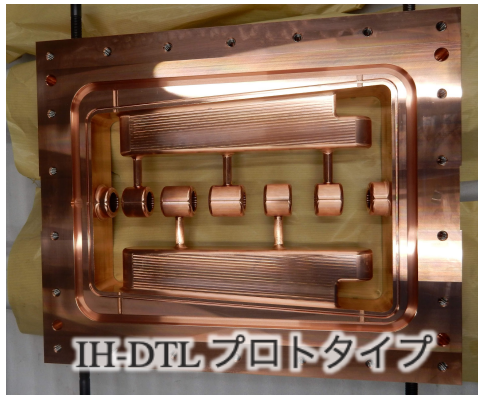
ビーム試験

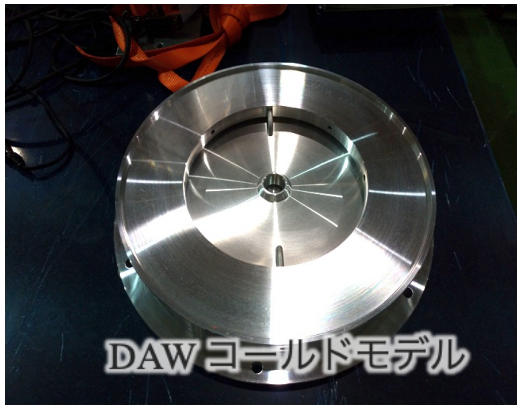
- 2016: ビームダイナミクス設計完了
- 2017: 超低速Mu-の開発
- 2017: 世界初のミューオン加速(RFQ)
- 2017: FWPS 2017 (RFQ加速)
- 2018: 加速ビーム横プロファイル測定
- 2019: 加速ビーム縦プロファイル測定
- 2020: 縦プロファイルモニターの評価



加速器開発

- 2016: 空洞基礎設計
- 2020: 試作・評価試験(IH, DAW)
- 2020: FWPS 2019 (全体, DAW)
- 2020: 詳細設計(IH, DAW, DLS)
- 2021: 実機製作の検討(IH, DAW)
- 2021: FWPS 2021 (全体 + IH)

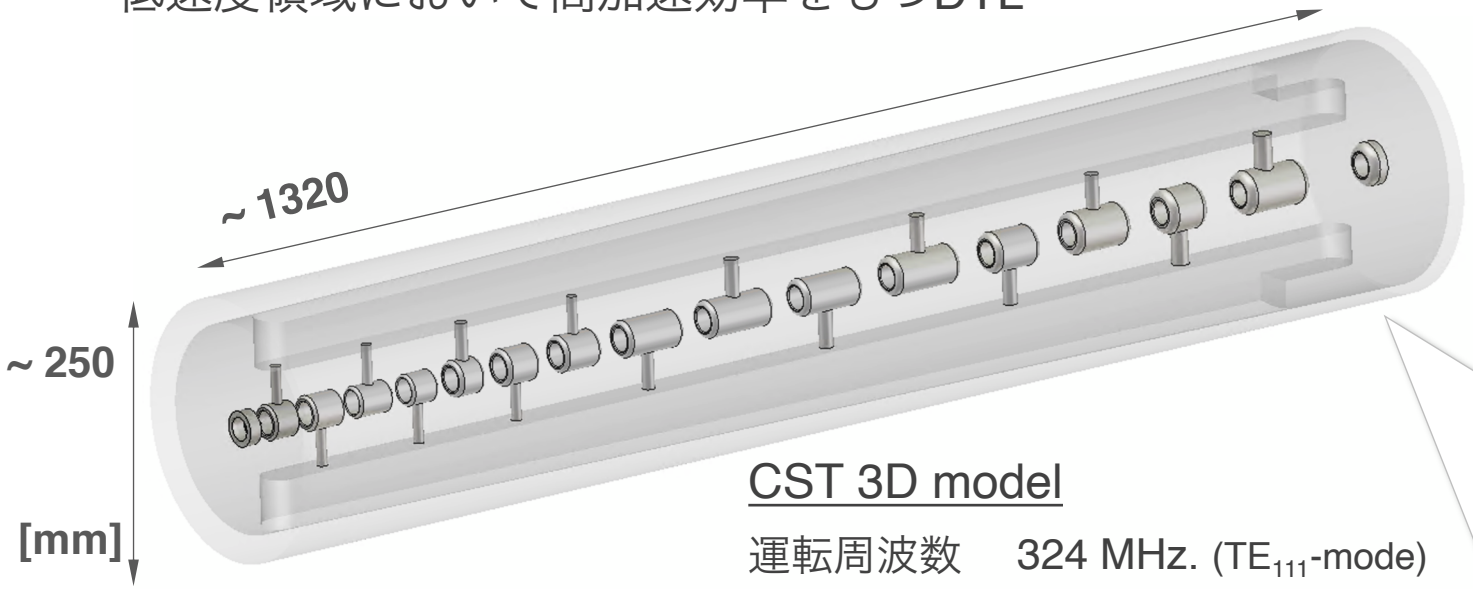




IH-DTL (Inter-digital H-mode drift tube linac)

低速度領域の加速中のミューオンの崩壊損失を抑制するためには 高加速効率 ・ 短距離加速 が必要

低速度領域において高加速効率をもつDTL



CST 3D model

運転周波数	324 MHz. (TE_{111}-mode)
セル数	16
RFパワー	309 kW

横方向収束に、

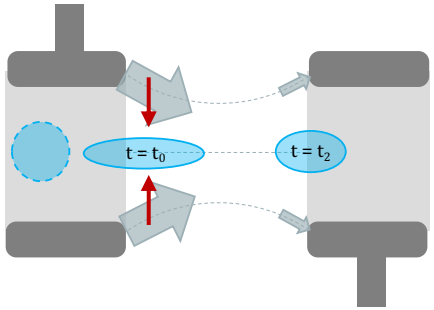
APF: Alternative Phase focusing を採用

セル毎の同期位相(ϕ_s)の調整により

横収束を高周波電場のみで行う

$\phi_s > 0$

横方向の収束



☺

収束用磁石が不要 → DTの簡易化(1/3~4)

高周波電場でビームの加速と収束を同時に行う→ ☺ 高加速効率, 短距離加速

APFによる問題

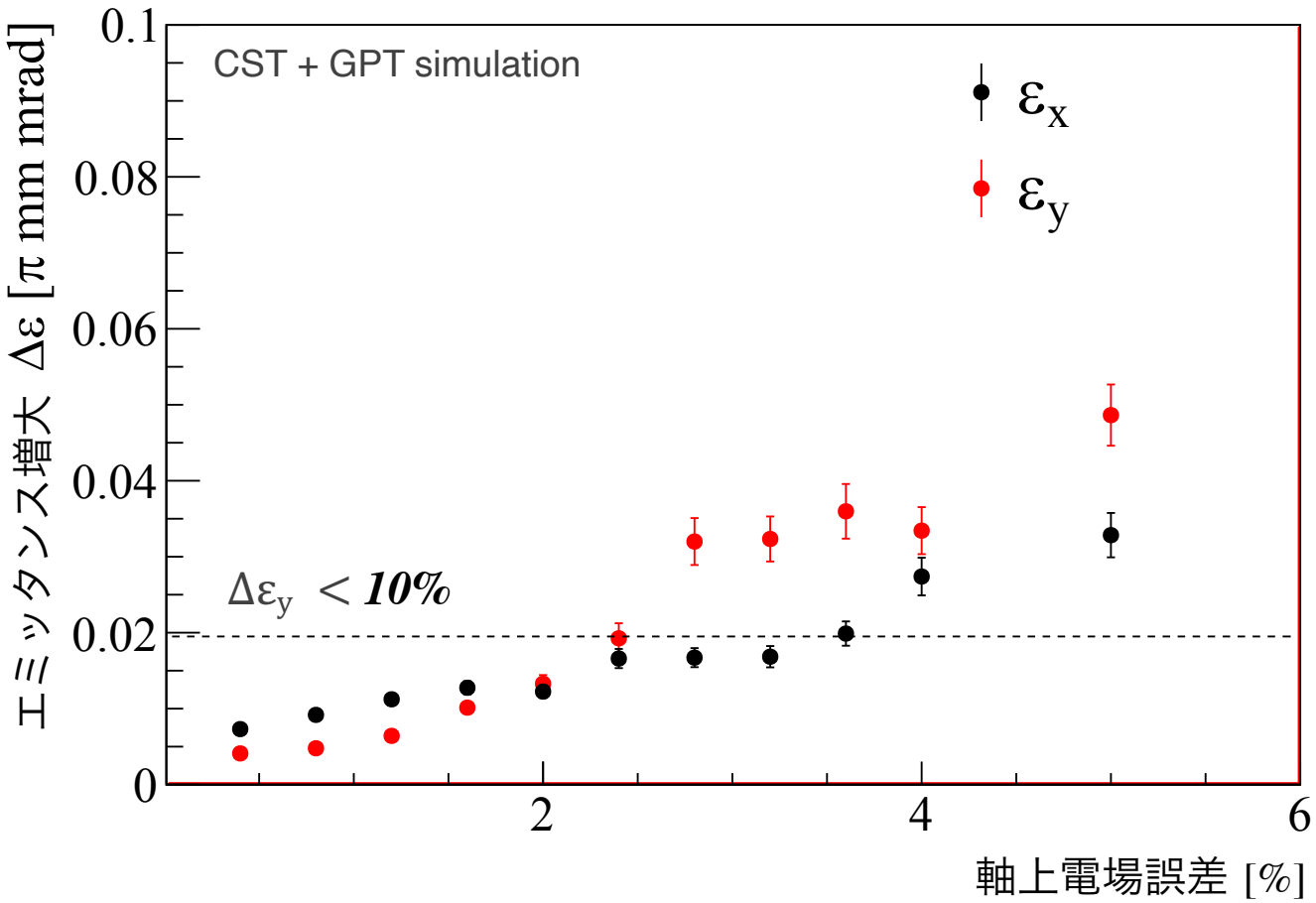
☹ 軸上電場の電場誤差 (製作誤差, 熱膨張などに由来) がビームダイナミクスに大きく影響する

IH-DTL出射時のエミッタンス設計値

ε_x	**0.316** π mm mrad
ε_y	**0.189** π mm mrad

許容値目安 (実験要求)

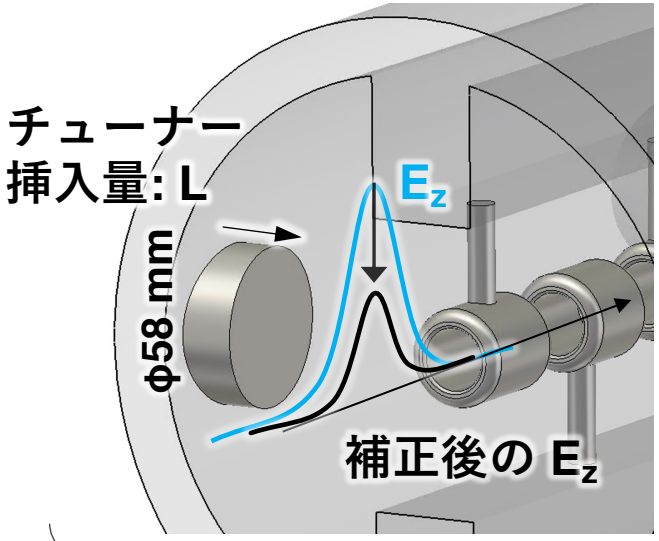
$\Delta\varepsilon < 10\%$

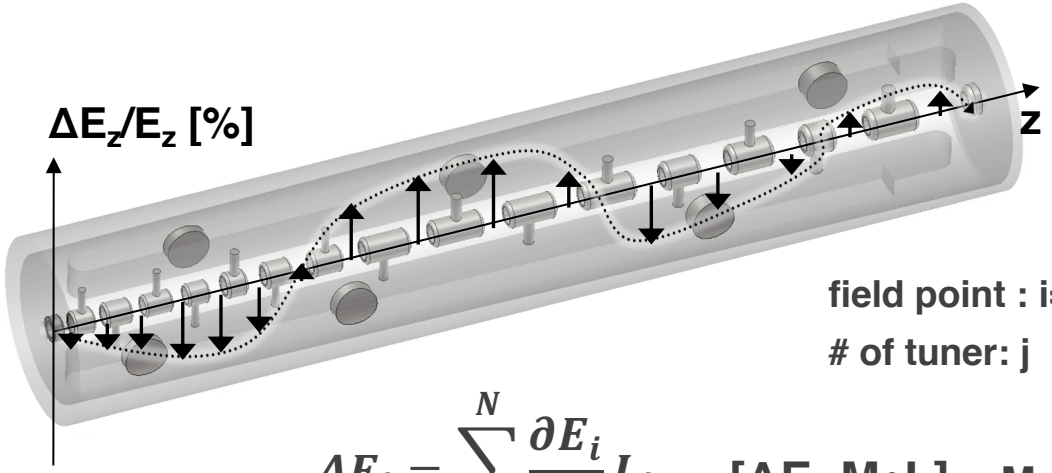


エミッタンス増大を <10 % にするには 電場誤差を <±2% に抑制する必要がある

電場補正

チューナー挿入の位置に依存して電磁場が摂動 → 軸上電場E_zを調整可能



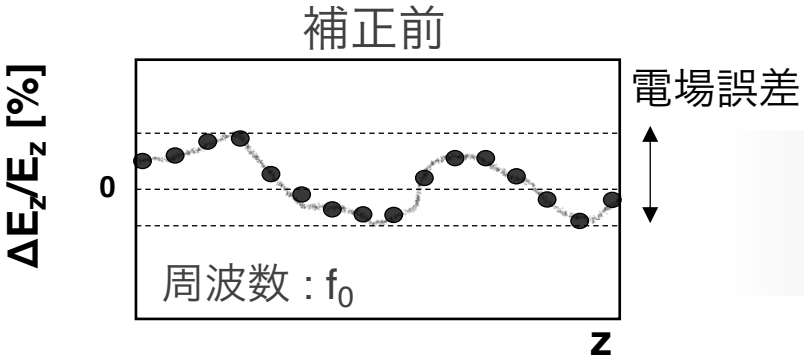


field point : i=16 (cell)

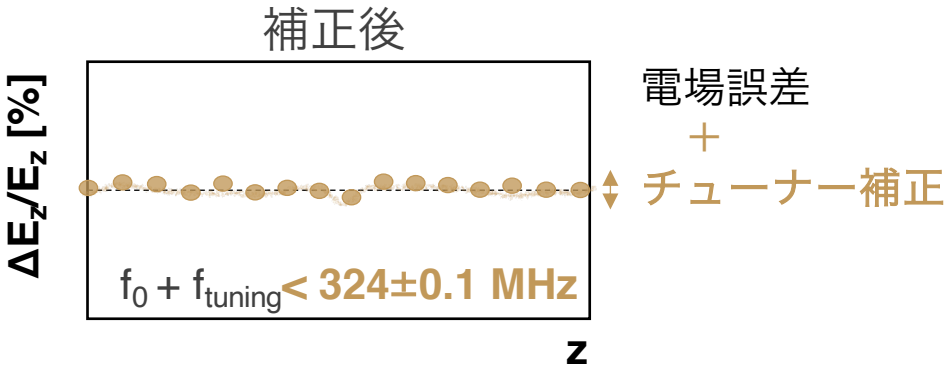
# of tuner: j

$$\Delta E_i = \sum_j^N \frac{\partial E_i}{\partial L_j} L_j$$

[ΔE=M•L]　M : 応答行列



補正に必要な
L_tを導出
$L_t = M^{+}\Delta E_z$



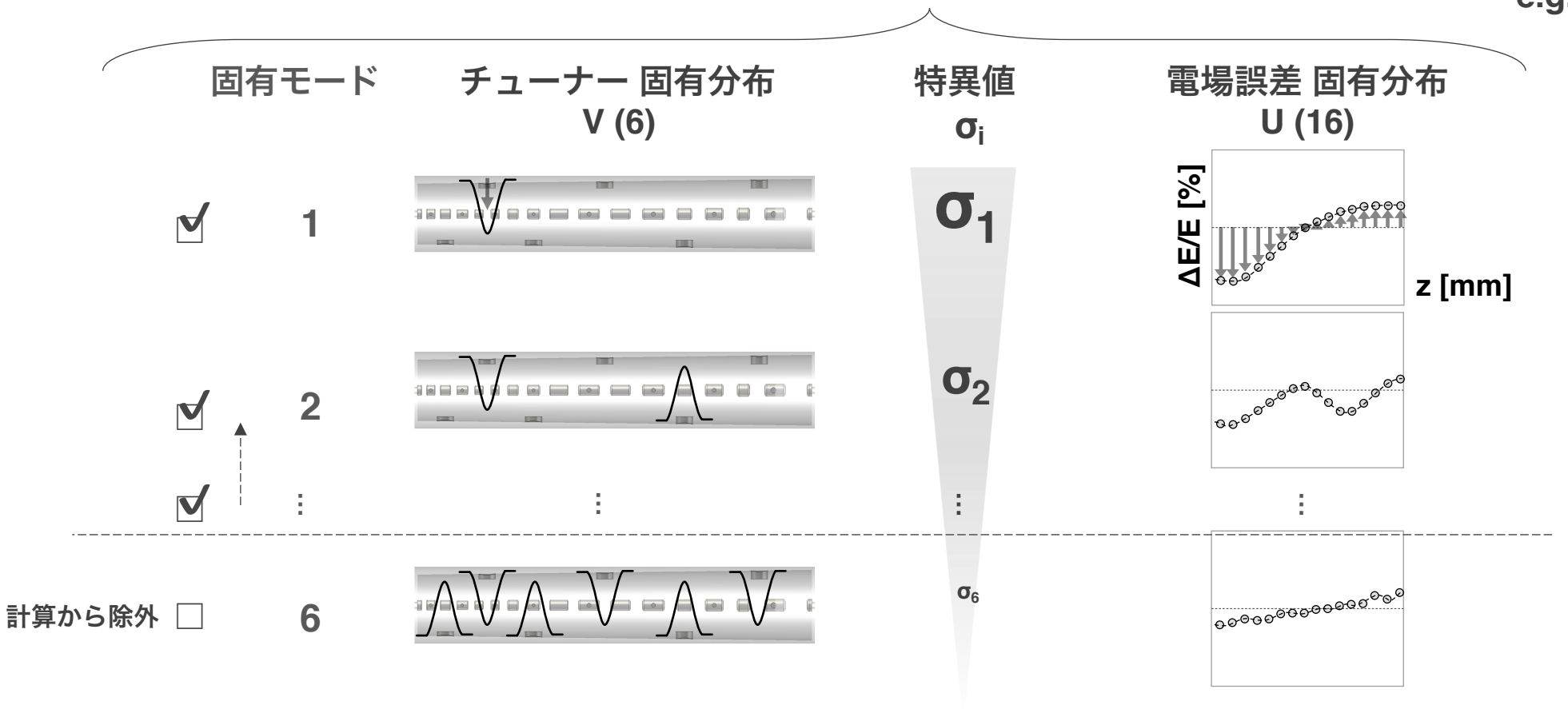
電場補正しつつ、共振周波数も合わせるようなチューナーの条件(数, 挿入量)が必須

Tuning手法の提案

逆問題を解くために、打切り特異値分解（TSVD）を応用する

$$L_t = M^{+}\Delta E_z = (V\Sigma^{+}U^{T})\Delta E_z$$

e.g., M=16×6



高次のモードを除外することで

適度な補正で実現可能な挿入量となる解を選択できる

解析例

3次元電磁場解析(CST)を用いて検証

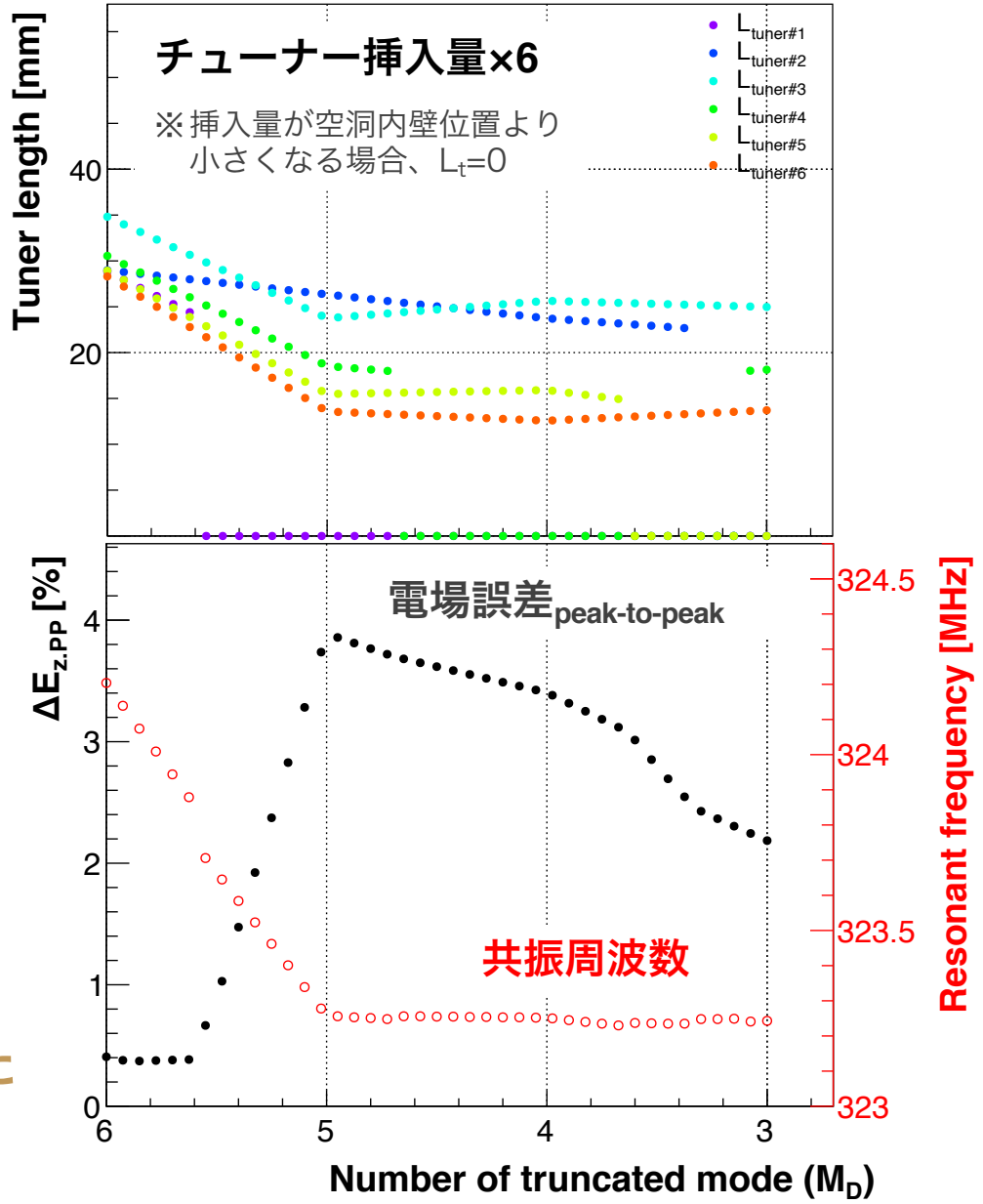
予想される電場誤差に対して
打ち切るモード数を選択し最適解を得る

要求値	
$\Delta E_{z,PP}$	< 4%
f	< 324 ± 0.1 MHz
L_t	< 50 mm (IH prototype用チューナー再利用のため)

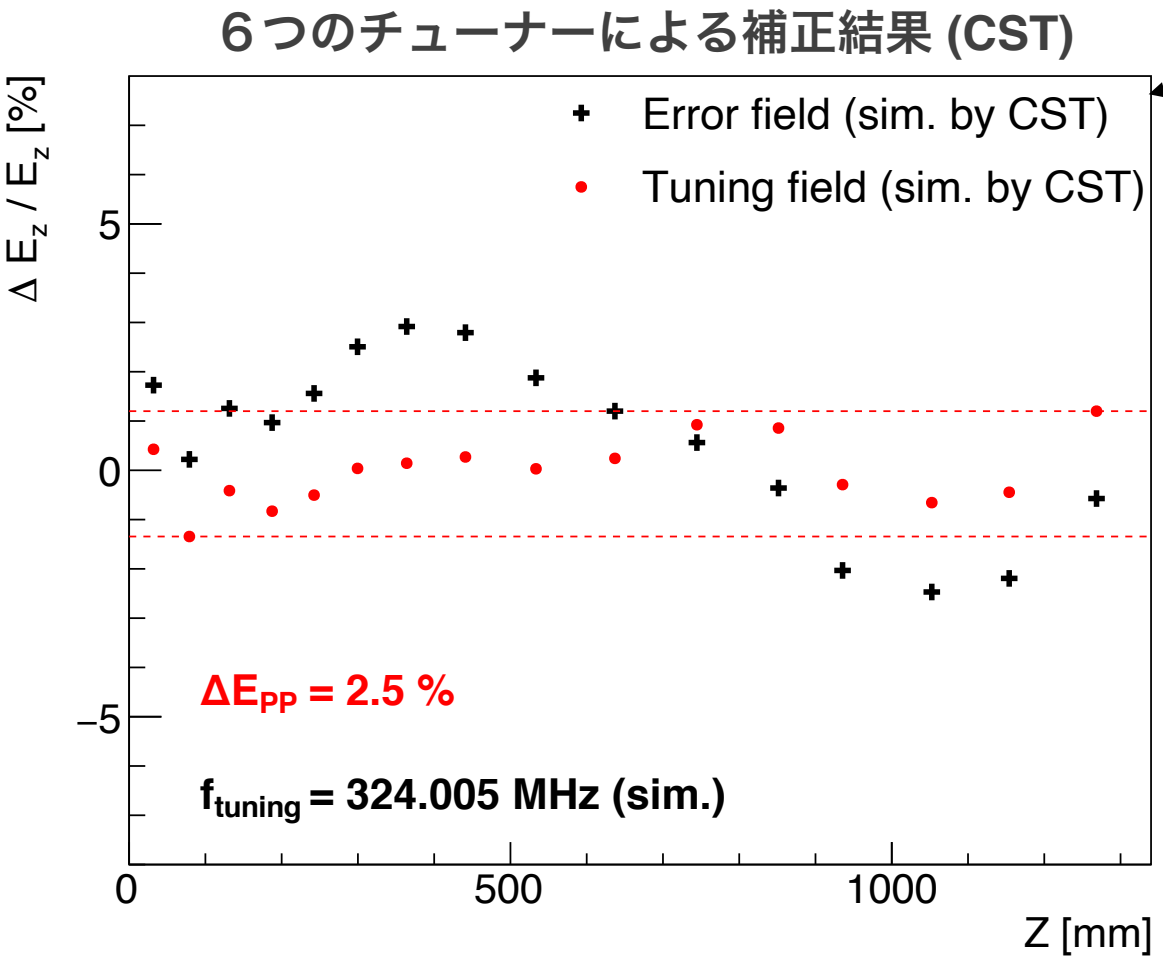
電場・周波数を補正しつつ実現可能な挿入量を導出

また、チューナー数は 6個 が最も適していると判断した

CSTで得た応答行列を元にTSVDで計算



電場補正の結果 (case study)



電場誤差 (ケース1, error studyより見積り)

製作誤差 (~200 μm)

複数のドリフトチューブの外半径の変化

熱膨張 (~200 μm)

複数のドリフトチューブの軸ズレ(y)と位置ズレ(z)

$L_{t\#1}$ = 26.38 mm
$L_{t\#2}$ = 0.00 mm
$L_{t\#3}$ = 33.83 mm
$L_{t\#4}$ = 28.30 mm
$L_{t\#5}$ = 0.00 mm
$L_{t\#6}$ = 20.59 mm

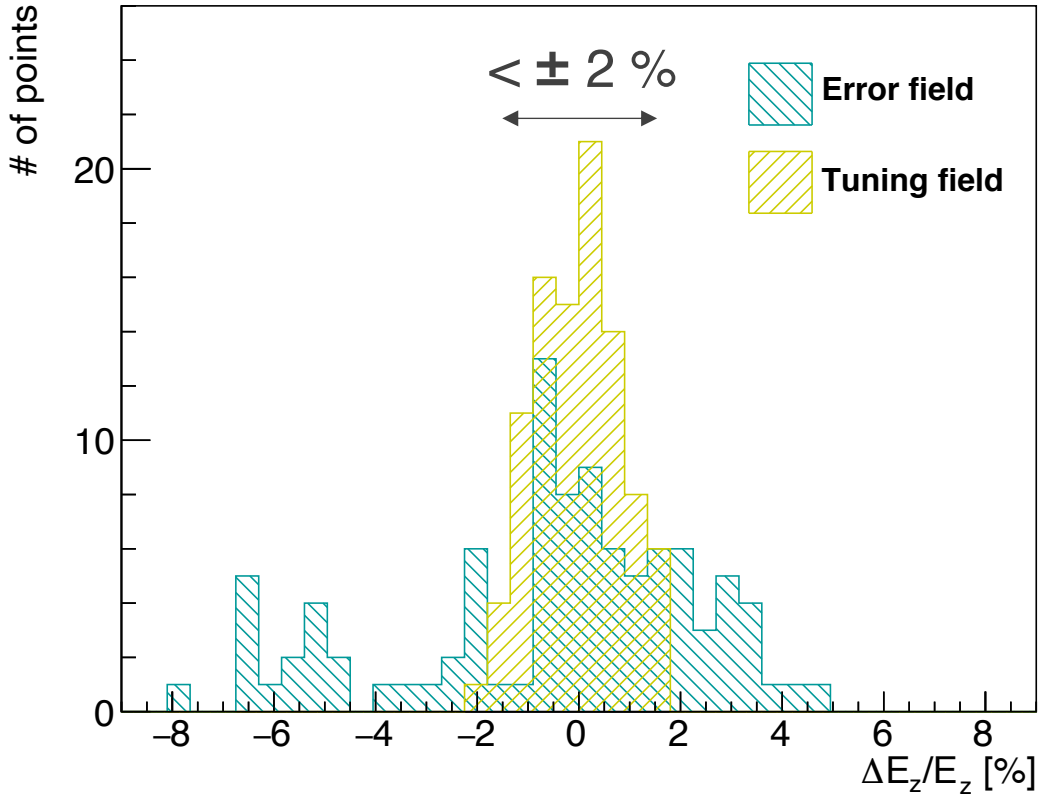
全ての要求を満たす

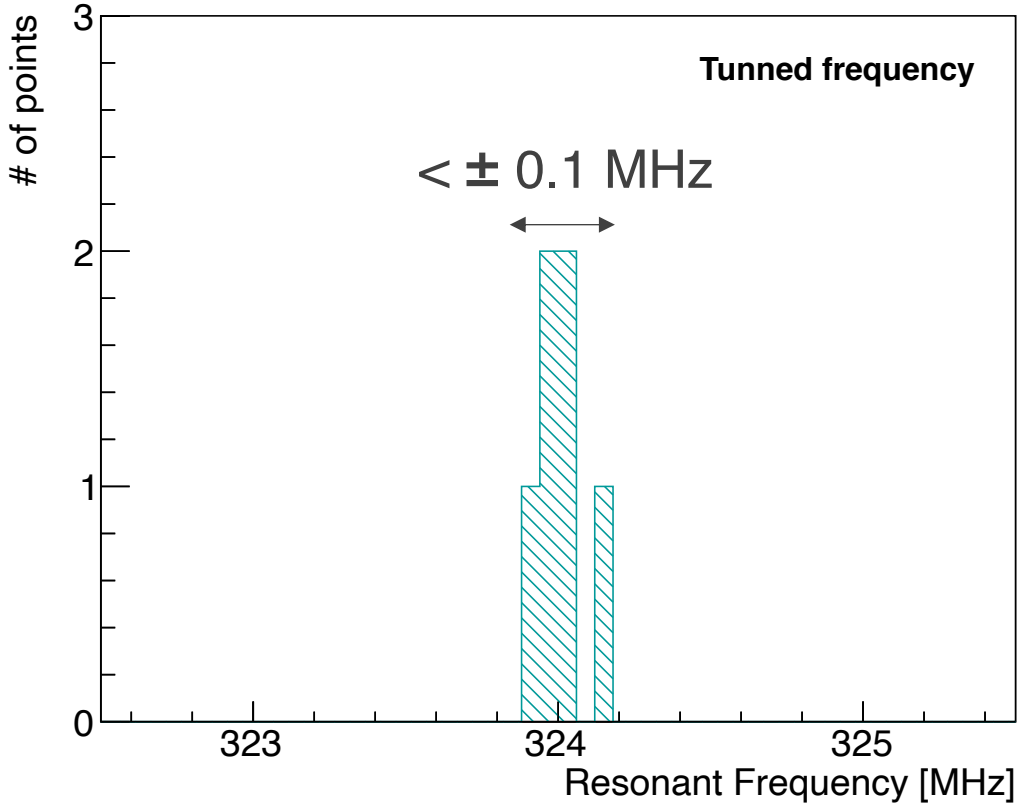
- ✓ $\Delta E_{z,PP}$ < 4%
- ✓ L_t < 50 mm
- ✓ f_{tuning} < 324±0.1 MHz

要求を達成することを確認した

様々なケースで検証した結果

さらに、6つのケース[backup]で電場補正と共振周波数の結果をまとめた





6つのチューナーによって実験要求を満たすことを確認できた

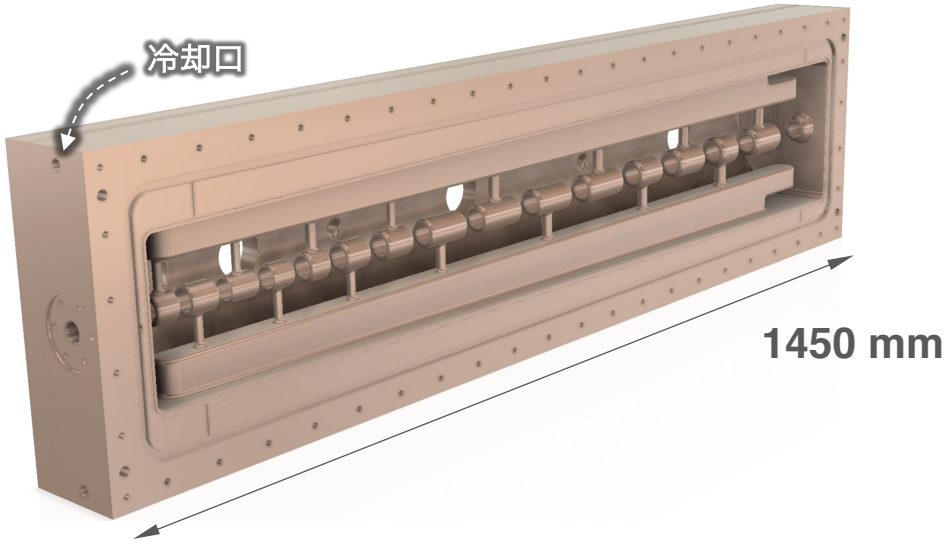
進捗：IH-DTL

基礎設計 ● 試作 ● 詳細設計 ● 製作 ○ 試験 ○

空洞設計
ビームダイナミクス設計

製作精度、計算精度の評価

工学的な空洞設計
真空設計
チューナー設計
カップラー(RF投入)設計
熱計算、冷却システム設計
Error study



詳細設計が完了した。 年度内に製作完了

*PASJ2021 MOP038 Y. Takeuchi

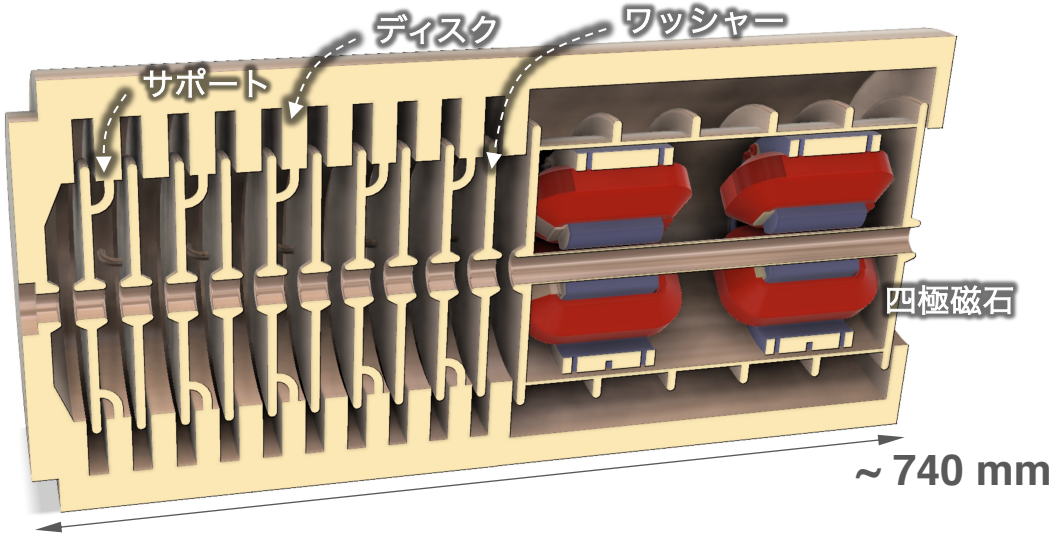
進捗： DAW-CCL (Disk and Washer Coupled Cell Linac)

☺ 高加速効率。許容できる製作誤差が大きく、電磁場の安定性に優れる。

☹ 設計・解析が複雑 (実際の運用例が少ない)

基礎設計 → 試作 → 詳細設計 → 1st tank製作 → 試験

- 基礎設計: 空洞設計、ビームダイナミクス設計
- 試作: 製作精度、計算精度の評価
- 詳細設計: 工学的な空洞設計、磁石設計、カップラー設計、熱計算、冷却システム設計、Error study*



詳細設計が完了した。 年度内に1st tankを製作完了

進捗： DLS (Disk Loaded Structure)

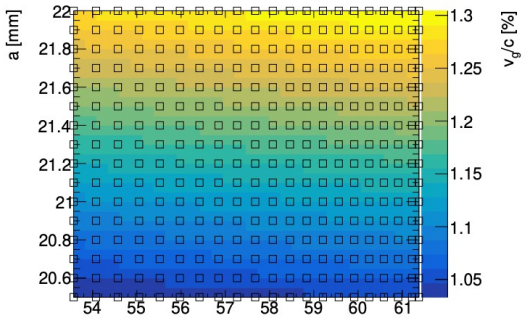
電子(β=1)とは異なり加速中の速度変化が大きい(β=0.7→0.94)
→ ミューオン用の設計が必須

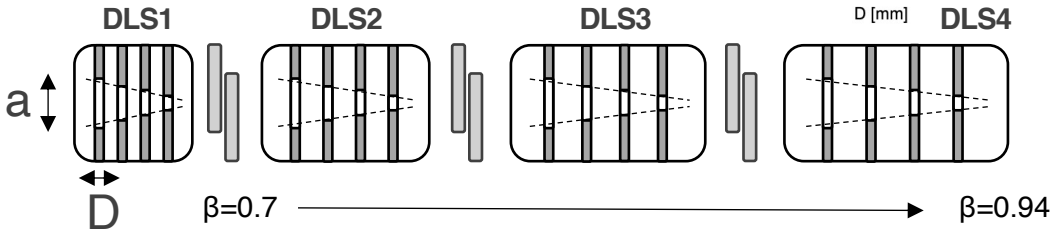
基礎設計 ● 詳細設計 ● 試作 ○ 製作 ○ 試験 ○ →

- 基礎設計：空洞設計、ビームダイナミクス設計
- 詳細設計：ビームダイナミクス設計、設計手法の確立*
- 試作：製作精度、計算精度の評価

多項式近似による
調整手法を確立

- アイリス径 a
- セル長 D





設計手法を確立、年度内に詳細設計が完了。試作を予定している

まとめ

- J-PARCでは、冷却と加速による全く新しいミューオンビームを用いたミューオンg-2精密測定を計画している

- これまでに、RFQによる世界初のミューオン加速を実証した。

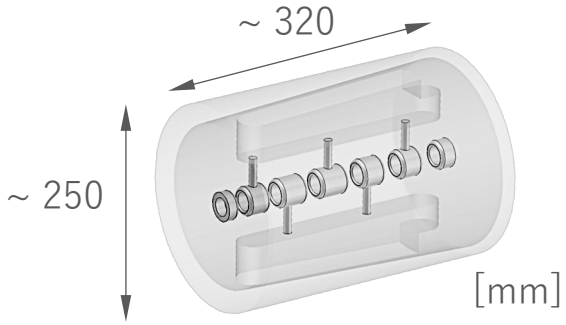
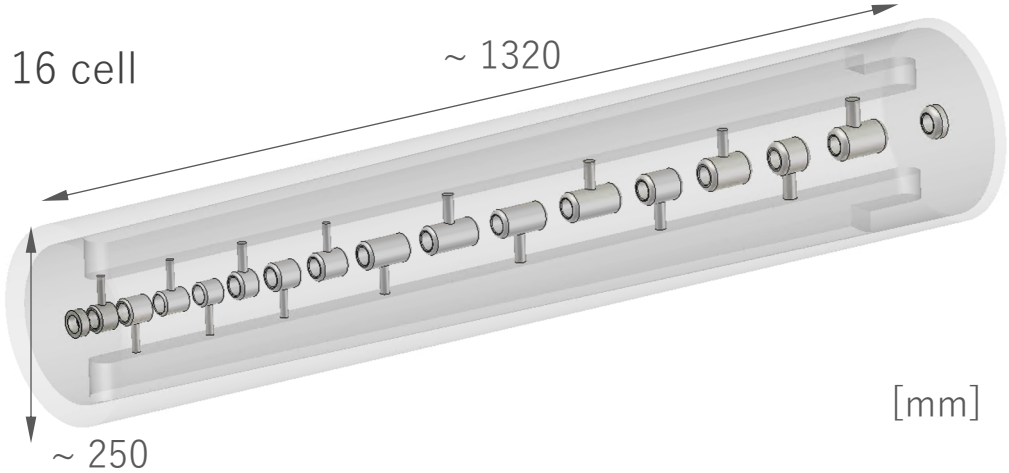
- 現在は、後段の加速器の詳細設計・製作に着手している。

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 の助成を受けております。

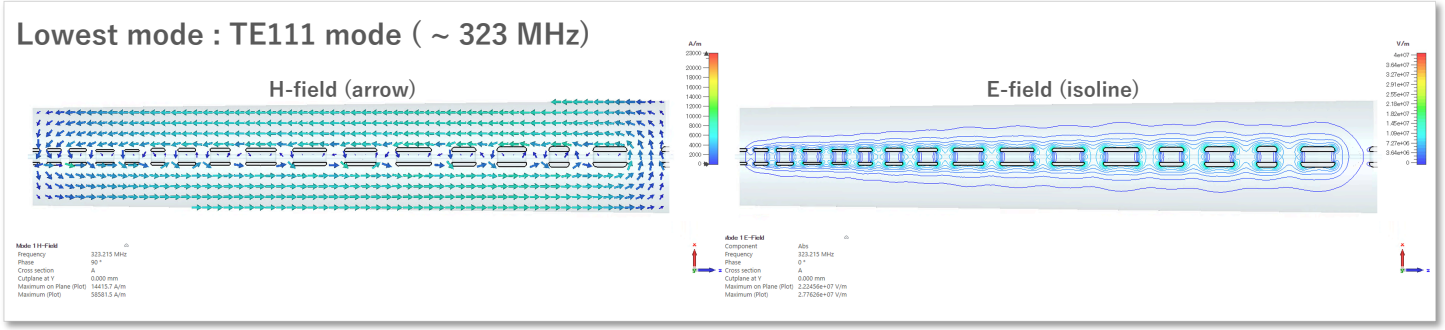
科研費
KAKENHI

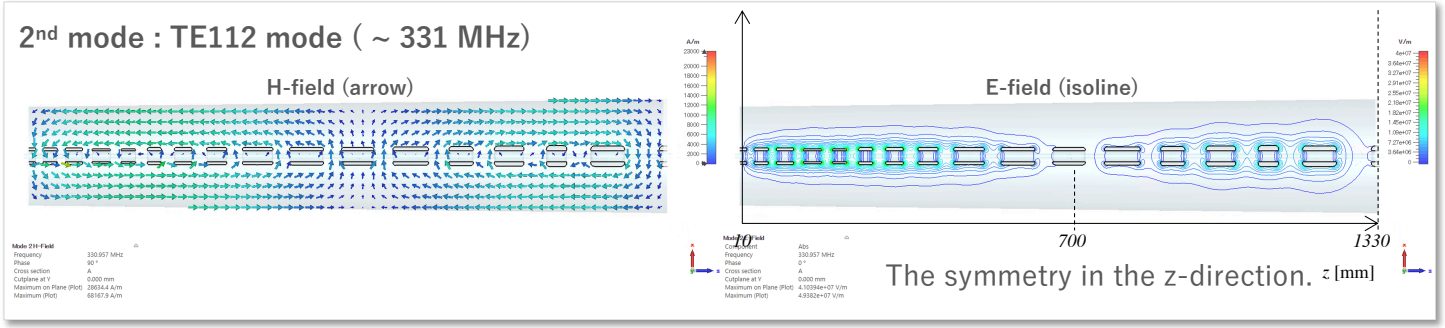
Backup

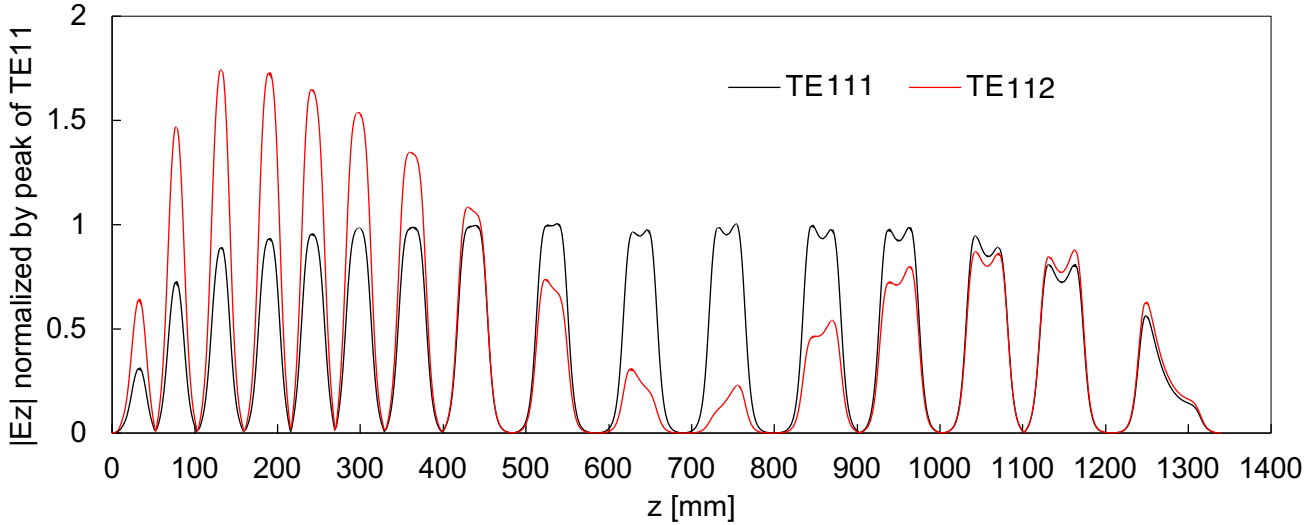
Development items

		Prototype (1/3 model)	Real
model		6 cell  Model fabricated to evaluate a fabrication accuracy and cavity performance and demonstrate the muon acceleration test.	16 cell  Model used in E34 experiment
Q_0		0.88×10^4	1.04×10^4
RF power	[kW]	55	322
E_{max}	[MV/m]	32.94 (1.85 E_k)	35.32 (1.98 E_k)
Energy	[MeV]	1.3	4.26

TE mode


Lowest mode : TE111 mode (~ 323 MHz)
H-field (arrow)
E-field (isoline)


2nd mode : TE112 mode (~ 331 MHz)
H-field (arrow)
E-field (isoline)
0
700
1330
z [mm]
The symmetry in the z-direction.


|Ez| normalized by peak of TE11
z [mm]
TE111
TE112
0
0.5
1
1.5
2
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400

Error study: summary

#	items	field variation	Expected displacement	causes	理由
1	DT radius	2% / 100 μm	<100 μm	fab. error	measured value by IH-proto
2	Edge	1% / 1000 μm	-	fab. error	-
3	gap length	2% / 200 μm	< 190 μm	fab. error	measured value
			< 60 μm	thermal expansion	simulated value
4	position(z)	1% / 100 μm	-	fab. error	-
			< 50 μm	thermal expansion	simulated value
5	slant	0.5% / 0.2 deg	-	fab. error	-
			< 0.02 deg	thermal expansion	simulated value

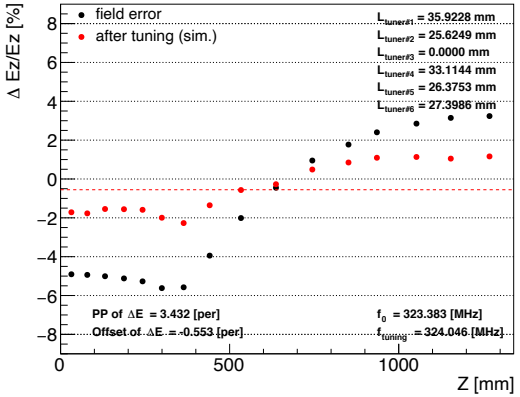
Case study

	#	Error model	Value	Simulated f_0	Simulated Q
Fab. error	1	• Outer radius error	• DT #6: R_{out} = -300 μm • DT #7: R_{out} = -200 μm	323.383	1.0460e+04
	2	• Outer radius error	• DT #3: R_{out} = -100 μm • DT #4: R_{out} = -200 μm • DT #7: R_{out} = +100 μm • DT #13: R_{out} = -400 μm	323.509	1.0426e+04
	3	• Outer radius error	• DT #0: R_{out} = -200 μm • DT #1: R_{out} = -200 μm • DT #7: R_{out} = +100 μm	323.183	1.0428e+04
Fab. error + Thermal error	4	• Outer radius error • Axial(Y) shift of DT • Position(Z) shift of DT	• [R_{out} error (model 1)] • DT #1: $Z_{position}$ = -300 μm • DT #9: $Y_{position}$ = +300 μm	323.485	1.0475e+04
	5	• Axial(Y) shift of DT • Position(Z) shift of DT	• DT #1: $Z_{position}$ = -200 μm • DT #9: $Y_{position}$ = +200 μm • DT #15: $Z_{position}$ = +200 μm	323.297	1.0439e+04
	6	• Outer radius error • Axial(Y) shift of DT • Position(Z) shift of DT	• [R_{out} error (model 2)] • DT #1: $Z_{position}$ = -200 μm • DT #9: $Y_{position}$ = +200 μm • DT #15: $Z_{position}$ = +200 μm	323.603	1.0426e+04

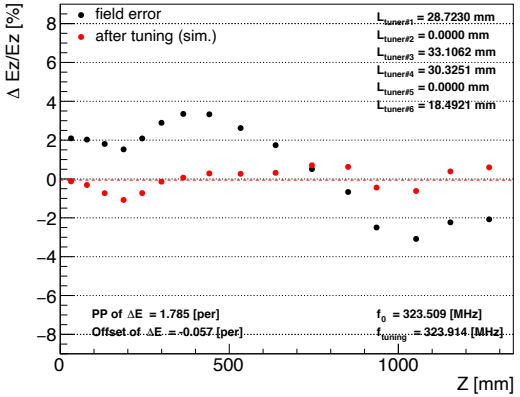
Case study; result

Data of histogram (Simulated result)

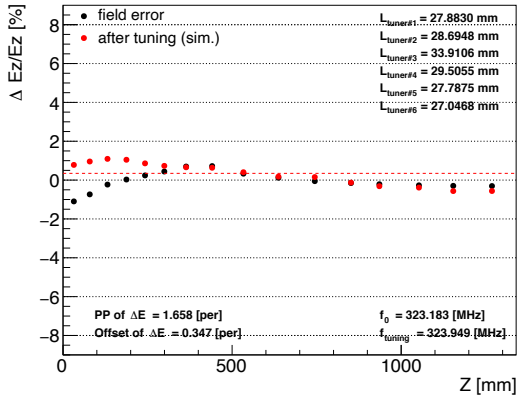
model1



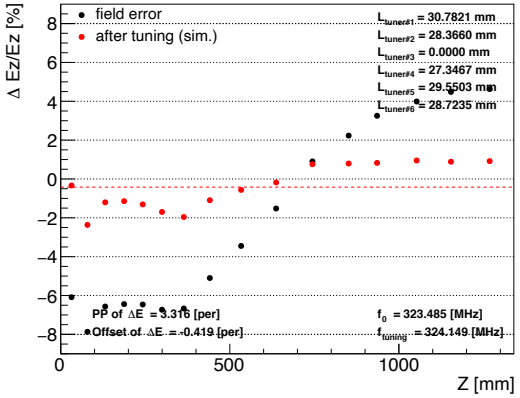
model2



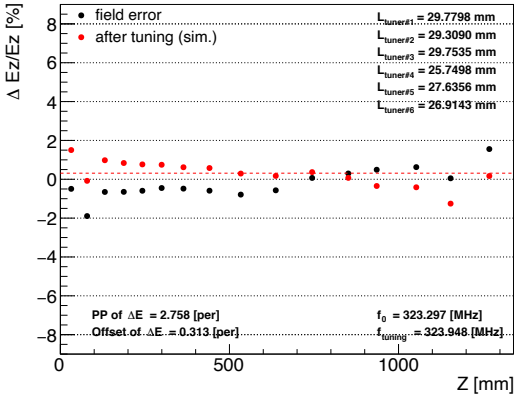
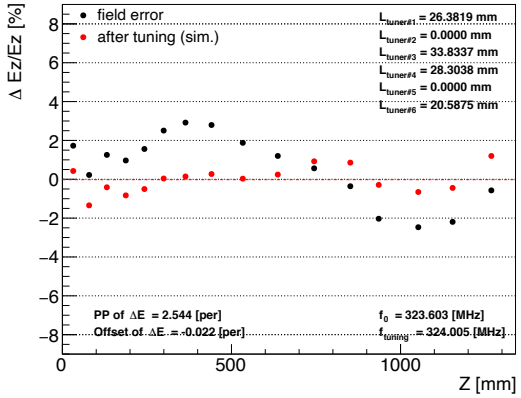
model3



model4



model5



model6