

ミュオン線形加速器 APF方式IH-DTLプロトタイプの大電力試験

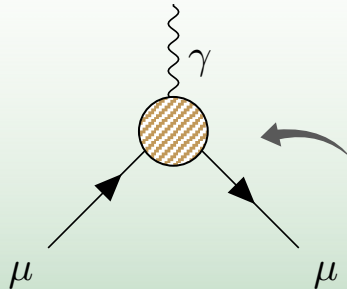
^AIbaraki Univ. Y. Nakazawa^A (D3)

^BNIRS, ^CKEK, ^DJAEA, ^ENagoya Univ., ^FKyushu Univ., ^GTokyo Tech, ^HUniv. of Tokyo

H. Inuma^A, Y. Iwata^B, E. Cicek^C, H. Ego^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, H. Ego^C, K. Futatsukawa^C, H. Yasuda^H, S. Mizobata^C

ミューオン異常磁気能率 “g-2”

標準理論予測(2020)



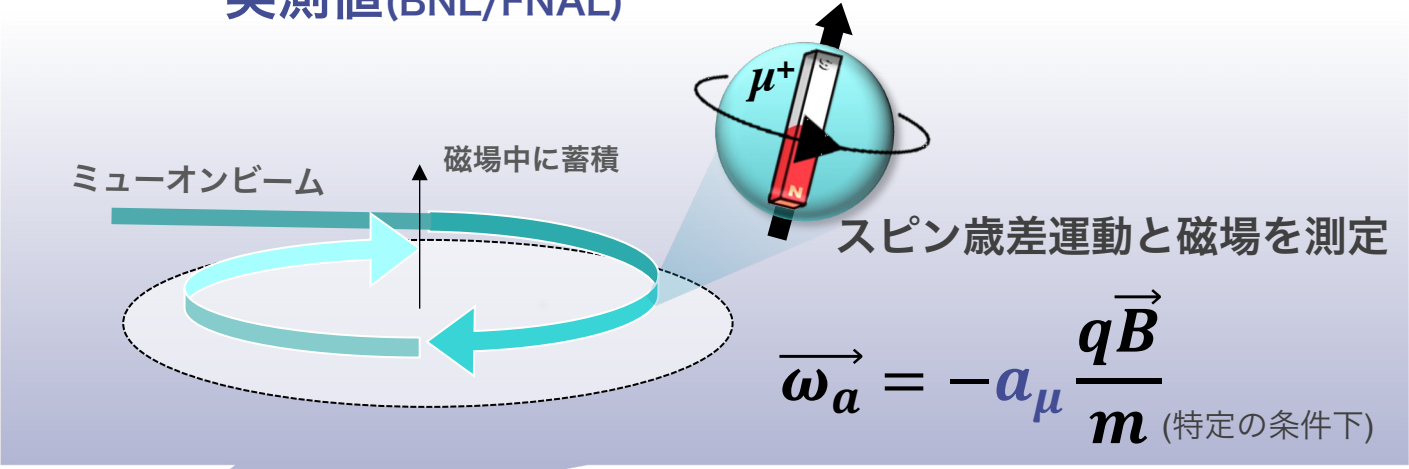
磁気双極子

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

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

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

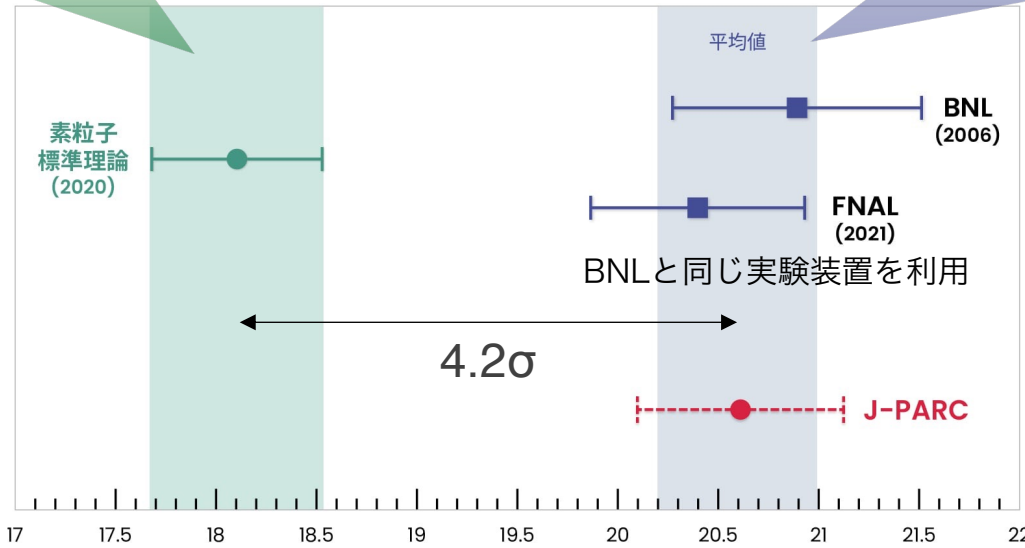
実測値(BNL/FNAL)



ミューオンビーム
 磁場中に蓄積

スピン歳差運動と磁場を測定

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



ミューオン異常磁気能率 $a_{\mu} \times 10^9 - 1165900$

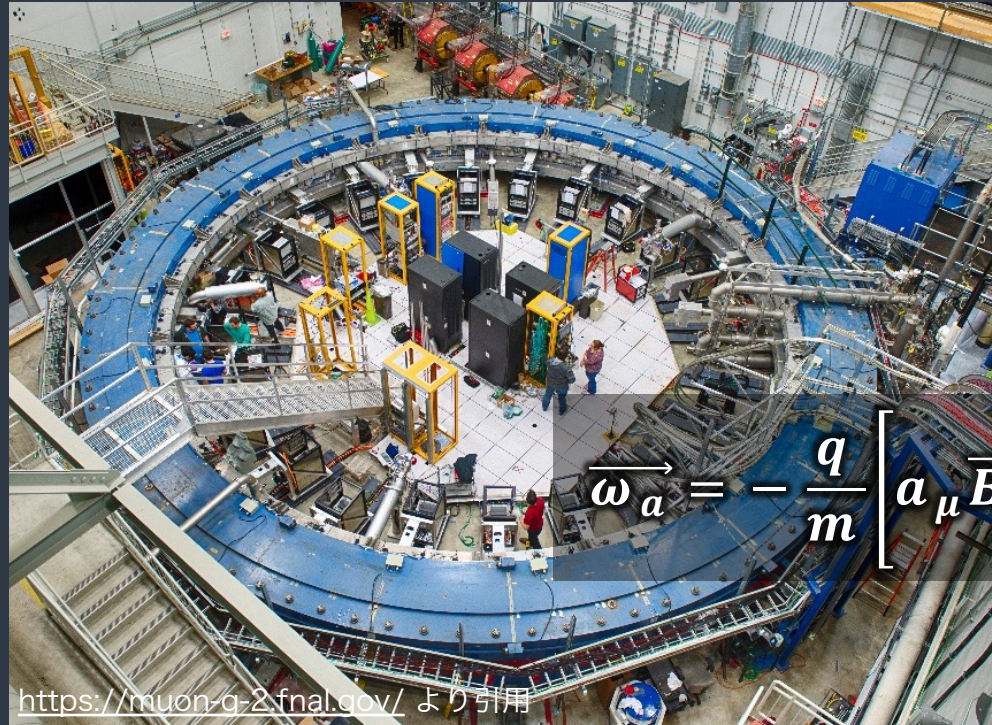
4.2σ の不一致が報告

B.Abi et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, no. 14, p. 141801 (2021)
 T.Aoyama et al, *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

実験手法の違い： ω_a の余分な項をどう消すか？

BNL/FNAL

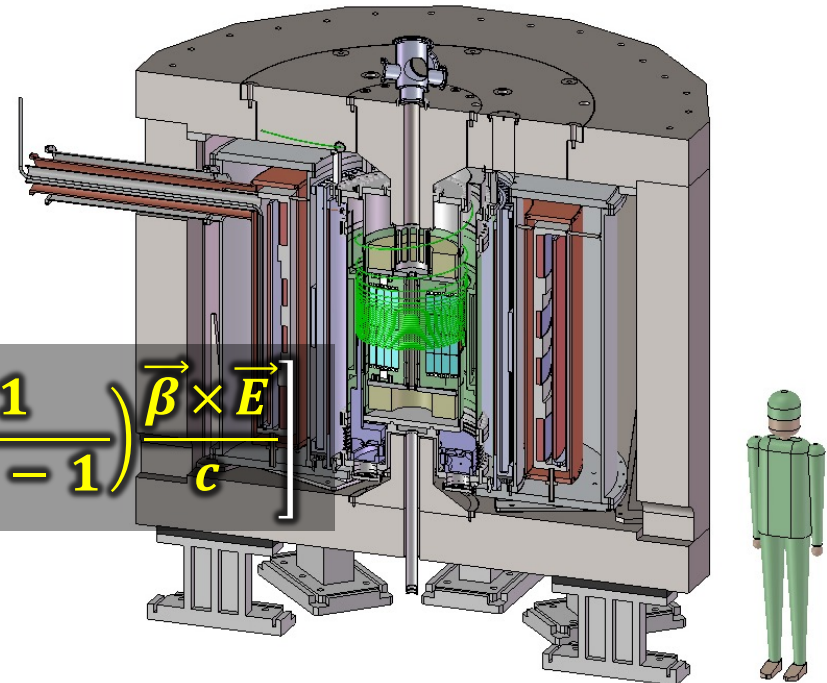


10 m

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



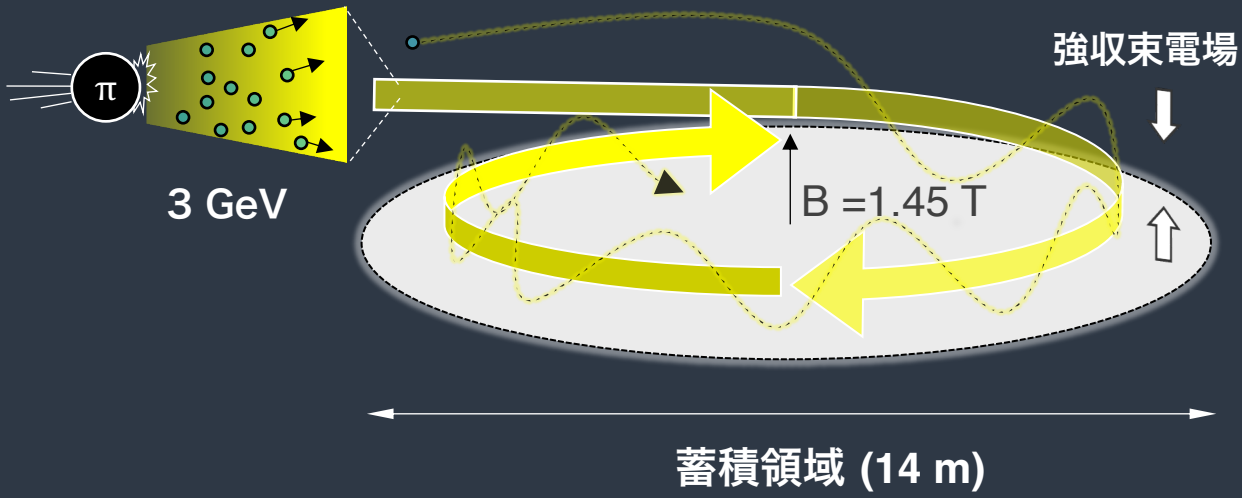
1 m

電場を使わない

$$\vec{E} = 0$$

BNL/FNAL

特定の γ で崩壊したミュオンをそのまま利用



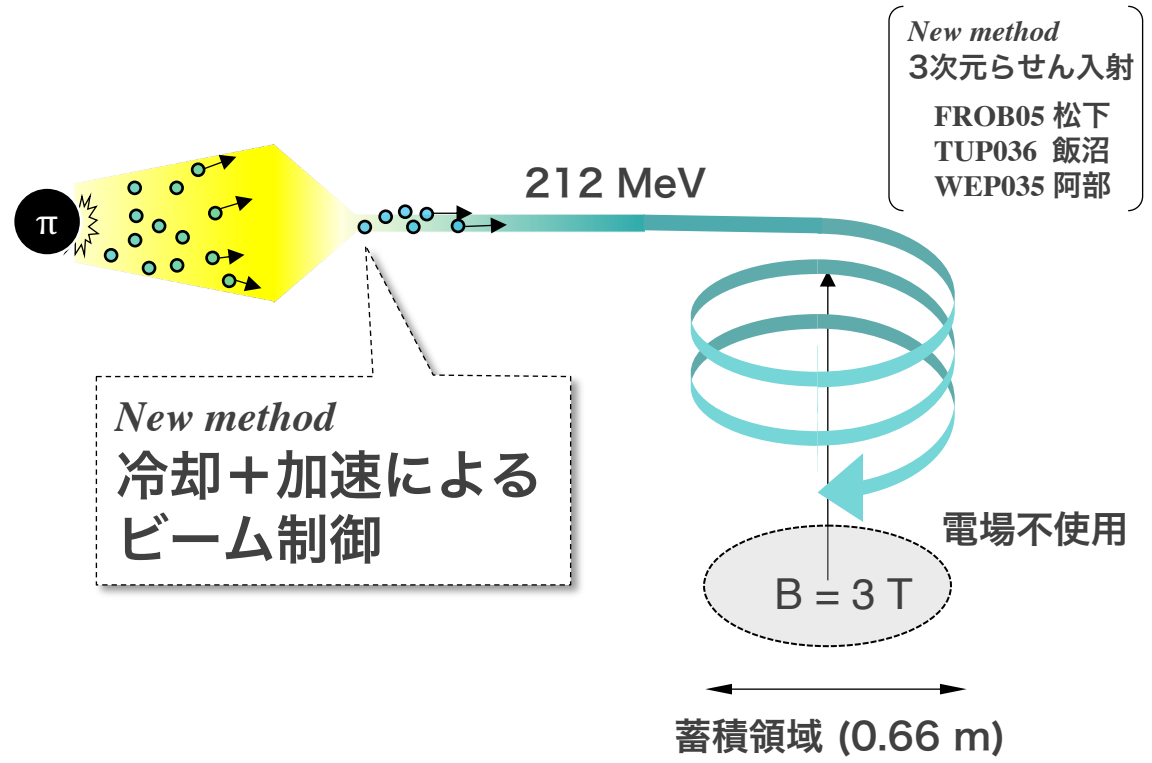
- ビーム拡がり(エミッタンス)が大きい (→ 系統誤差の原因)
- 電場による強収束が必要不可欠

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

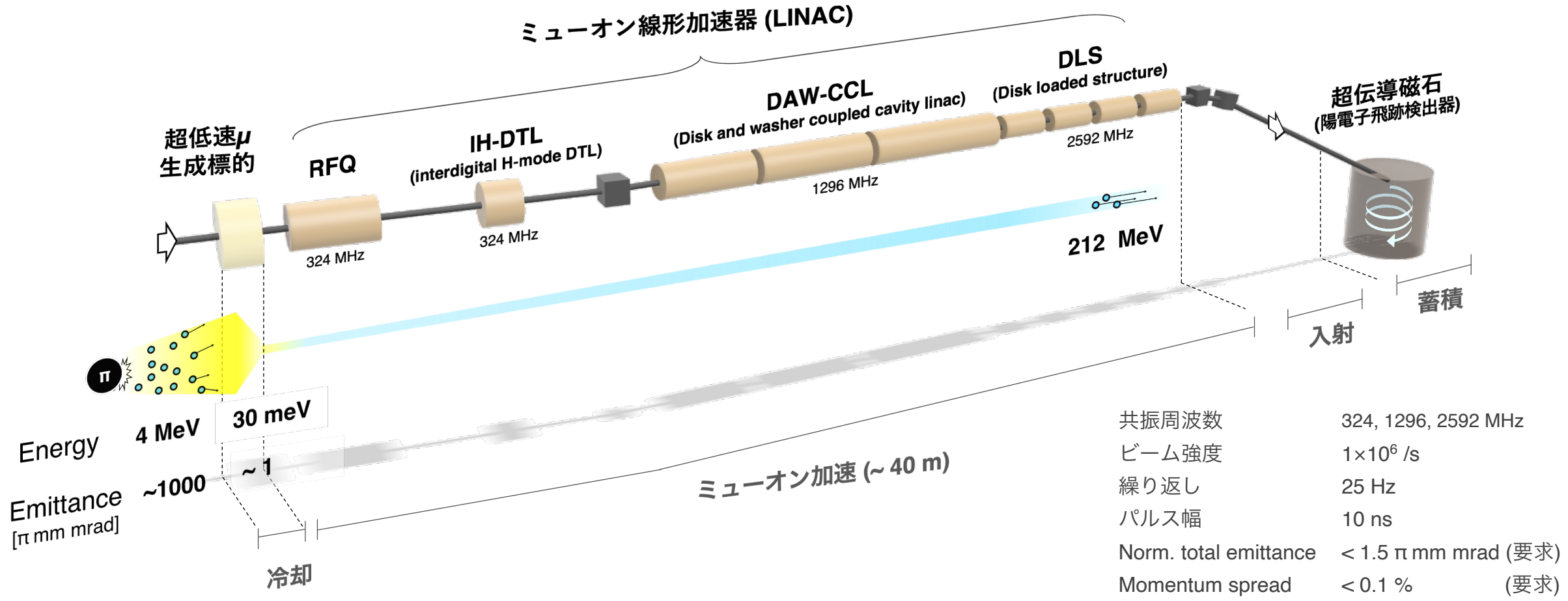


- 従来の1/1000の低エミッタンスビームが必要

ビーム由来系統誤差(ω_a)削減 + 高精度磁場

J-PARC muon g-2/EDM実験

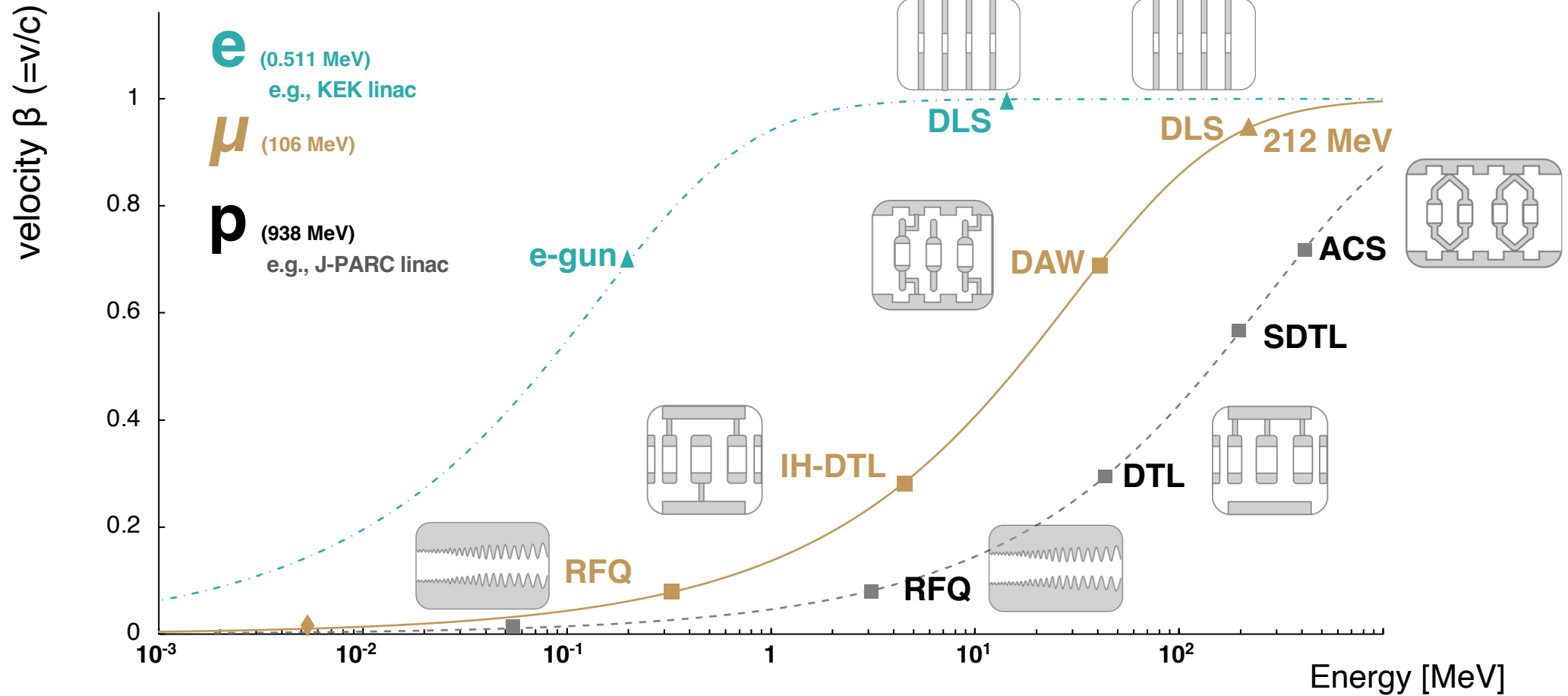
M. Abe et al., Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2019, no. 5, May. 2019.



ミューオンLINACによる低エミッタンスミューオンビームの実現が鍵

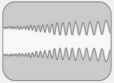

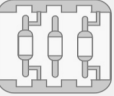
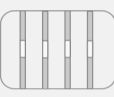
ミューオンLINAC

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(2.2 μ s)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新規開発 / ミューオン加速実証が必要

これまでの年会での報告

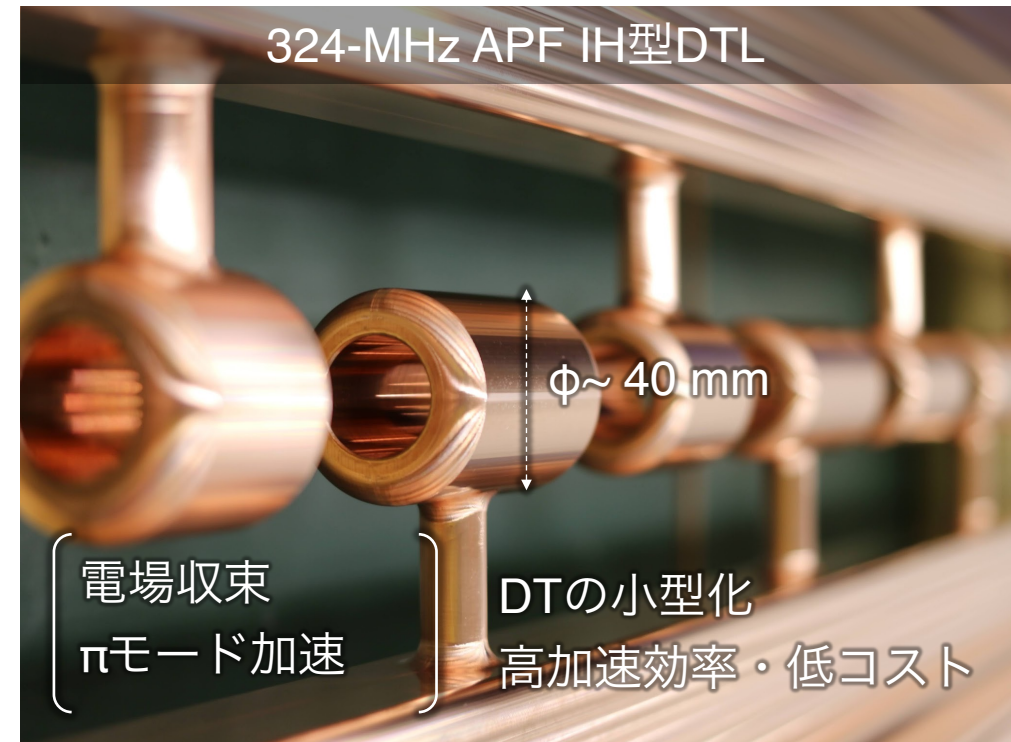
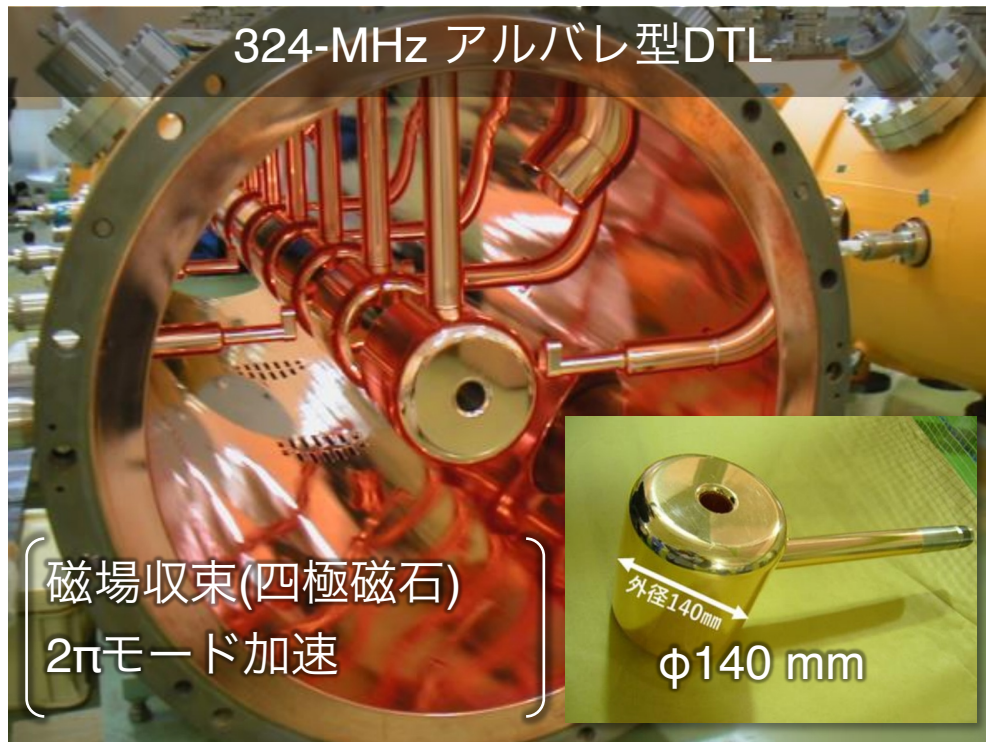
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> ミューオンLINACの基本設計を完了した </div>						
基礎設計	加速器 基本設計 (KEK 大谷)	ダイナミクス 設計 (JAEA 近藤)						
RFQ			低速Mu-源の 開発 (東大 北村)	世界初の ミューオン 加速実証 (KEK 大谷)	ミューオンの バンチ幅測定 (名大 須江, 四塚)			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 加速器開発が進行中 </div>
IH-DTL				プロトタイプ開発 (設計、低電力試験結果、カップラー開発) (茨大 中沢)				プロトタイプ 大電力試験 (茨大 中沢)
DAW						プロトタイプ 開発 (九大 竹内)	詳細設計 (九大 竹内)	
DLS							基礎設計 (名大 鷺見)	詳細設計 FROA12 (名大 鷺見)
加速器学会	第12回	第13回	第14回	第15回	第16回	第17回	第18回	第19回
年	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022

現在は、世界初のミューオン専用の加速器 (IH-DTL, DAW, DLS) の開発を推進している

IH-DTL (Inter-digital H-mode DTL)

ミュオンLINACの特徴

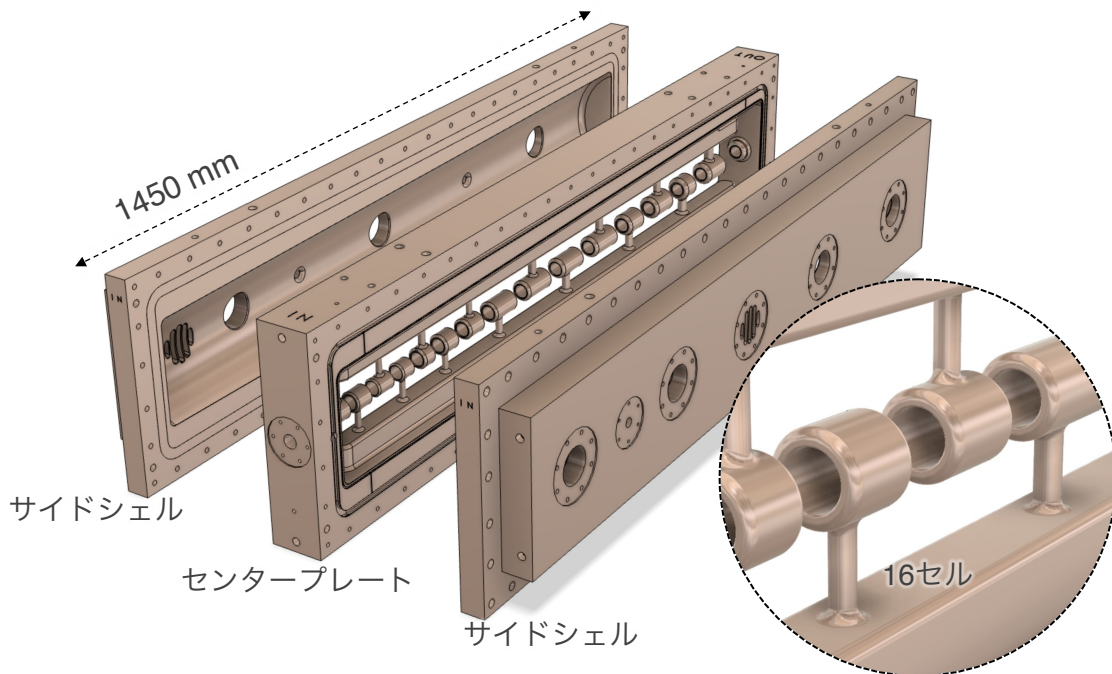
ミュオンビームは低電流(10^6 /s) → 電場による収束 “Alternating phase focusing (APF)法” を採用
さらに、アルバレ型DTLより高加速効率をもつIH型を採用



森下 卓俊 “陽子リニアック”, OHO'18 より引用

ミュオン加速に適しており、かつ高加速効率を持つAPF IH-DTLを採用した

一体構造のドリフトチューブ



	設計値
ビームエネルギー	0.34 → 4.26 MeV
空洞パワー	310 kW
表面電界強度 E_{\max}	35.4 MV/m ($2.0 E_k$)
duty factor	0.1% (40 μ s, 25 Hz)

ドリフトチューブ

→ 無酸素銅の切削加工による一体構造のドリフトチューブを採用
(重粒子線治療用のIH-DTL (100MHz)での開発例あり)

☺ メリット

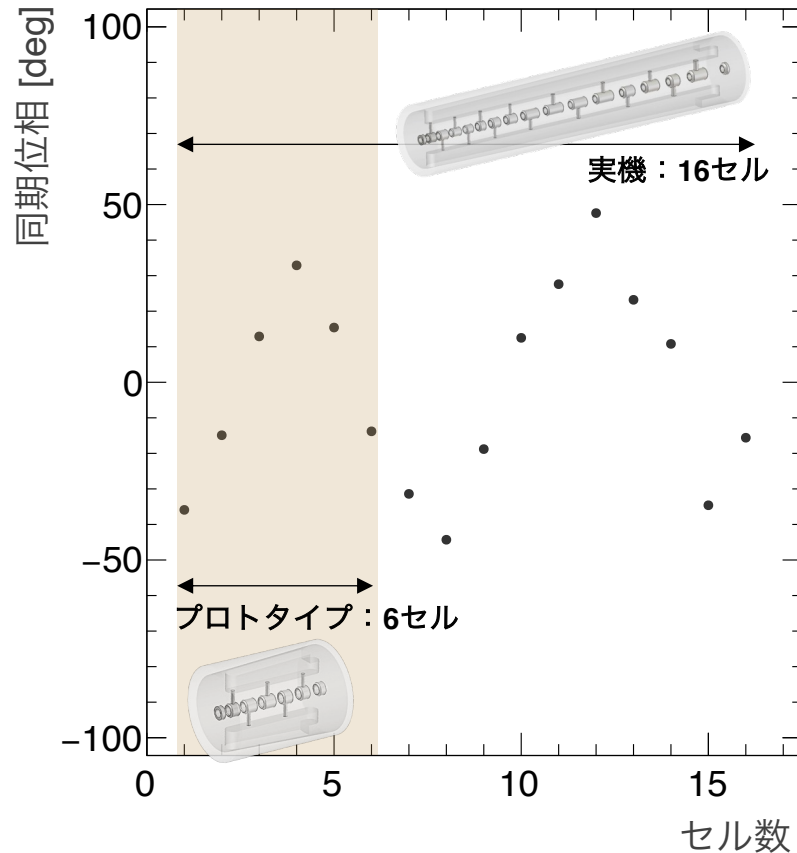
- ・ ドリフトチューブの高い製作精度
- ・ 高いアライメント精度
- ・ 少ない作業工程による低コスト化

☹ 課題・懸念点

- ・ 本構造を採用した324-MHz IH-DTLの大電力運転実績が無い
- ・ 製作誤差による電場誤差 (要求 $\Delta E < 2\%$)
- ・ 高い表面電界強度による耐電圧性

[解決策] IH-DTLプロトタイプを開発する

プロトタイプの空洞設計



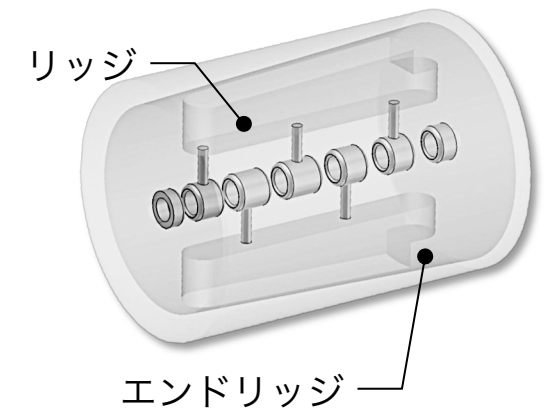
ダイナミクス設計

- APF法による収束のために、セル毎の同期位相を最適化
- 実機IH-DTLの上流 6セル分を再現

空洞設計

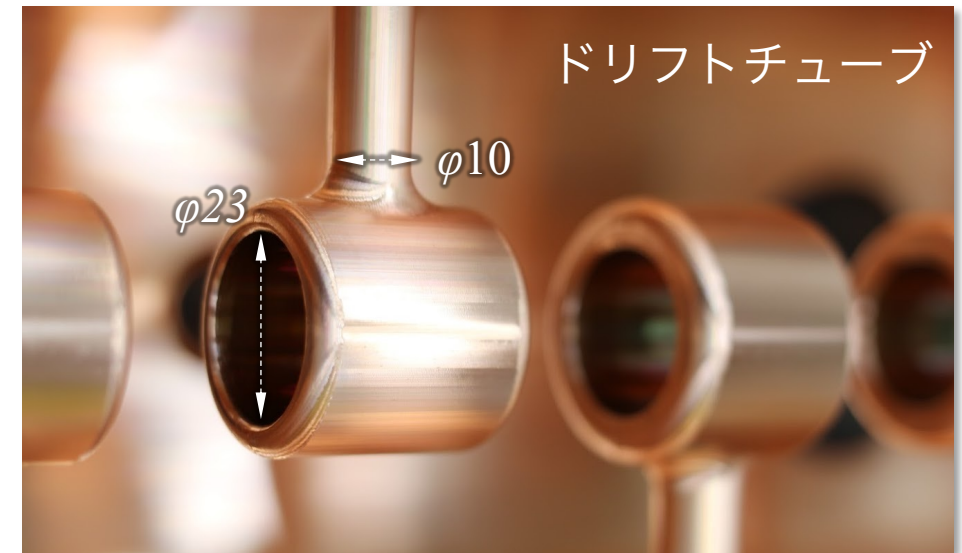
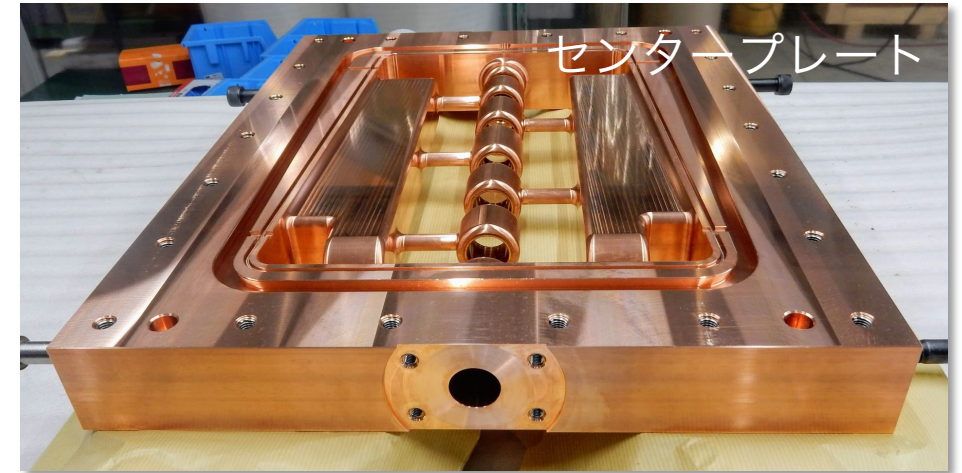
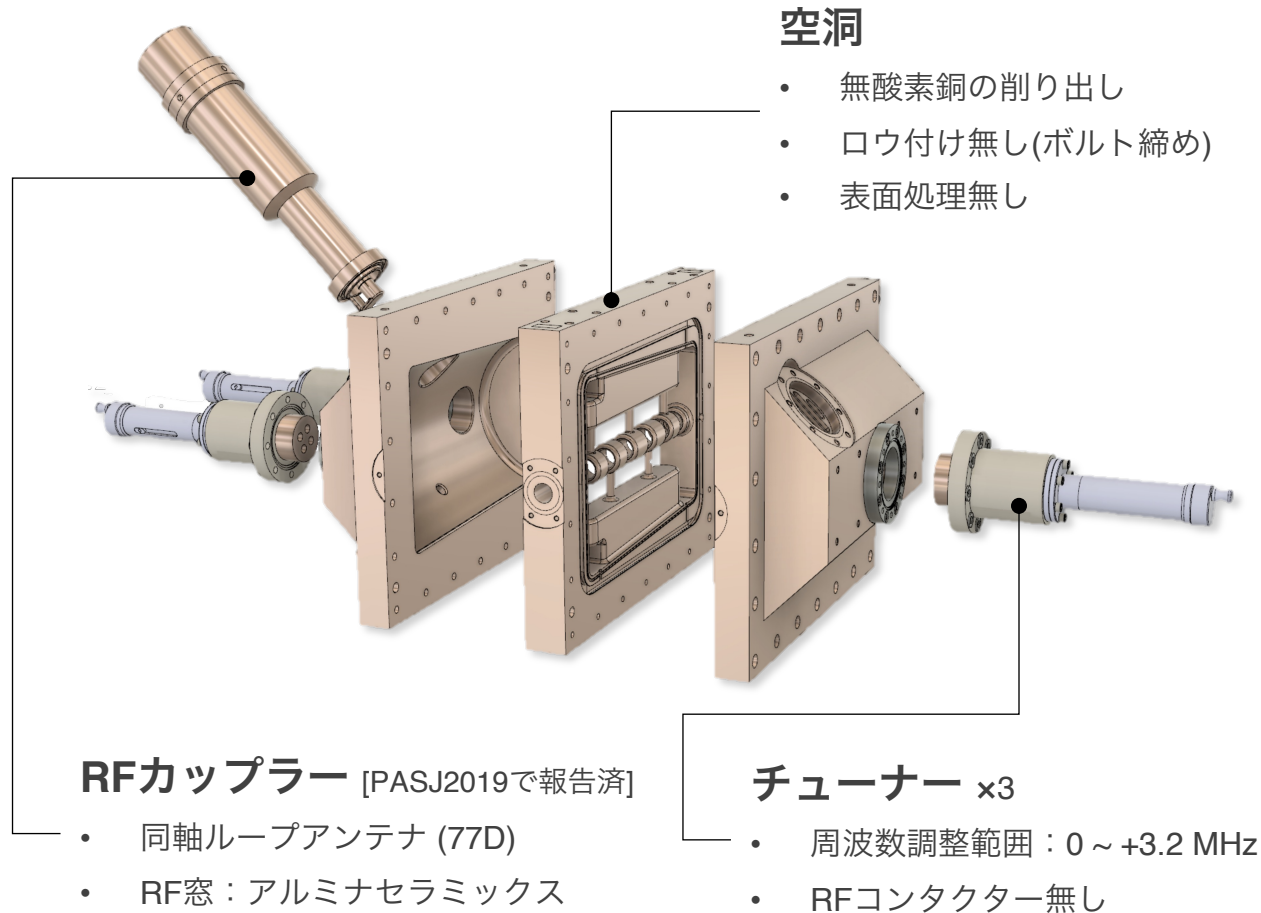
- 有限要素法(FEM)モデル計算
- 電場分布・周波数調整のために空洞径とエンドリッジを調整

ビームエネルギー	0.34 → 1.30 MeV
空洞パワー	65 kW
表面電界強度 E_{\max}	34.7 MV/m (1.9 E_k)
平均加速勾配	3.0 MV/m



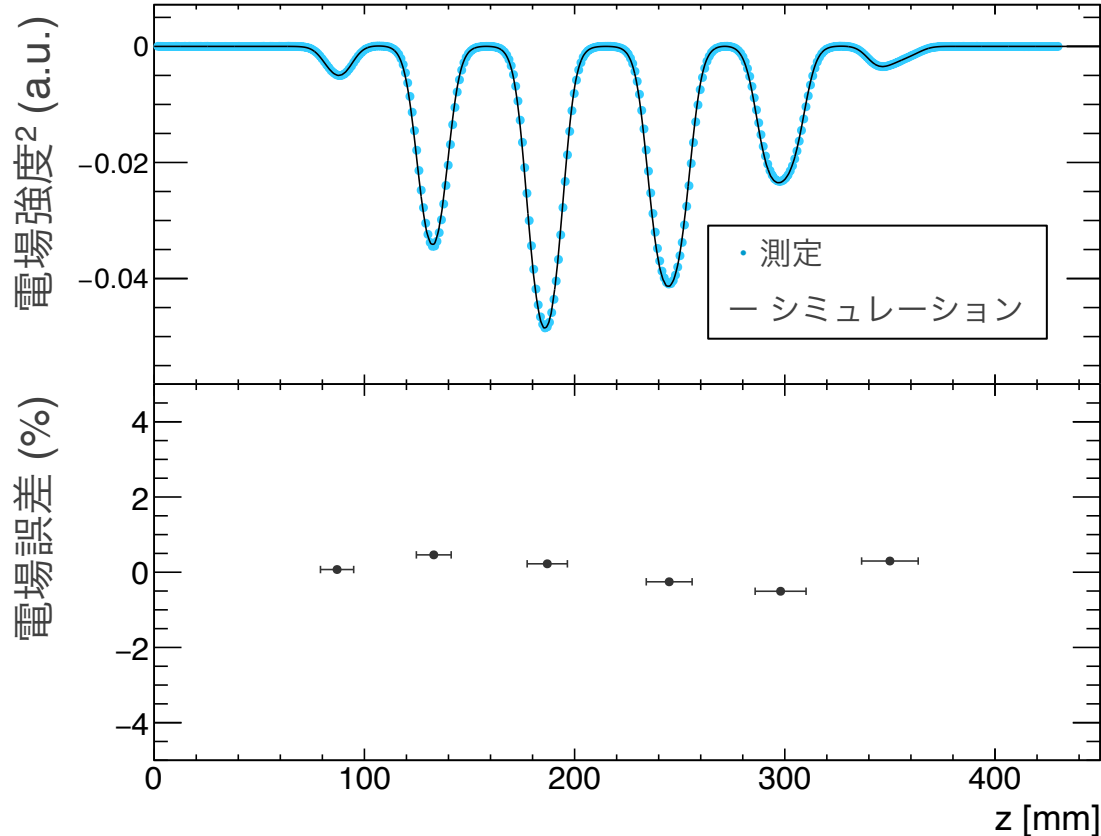
実機のセル構造を再現しつつ、プロトタイプの設計を最適化した

製作 実機同様の加工手法で空洞を製作



製作が完了した (ドリフトチューブ径, 長さの製作精度は要求($< 100 \mu\text{m}$)を満たす)

低電力測定 / tuning



空洞単体での低電力測定結果 (tuning前)

共振周波数	: 321.36 MHz	(sim. 321.88 MHz)
無負荷Q値	: 7800	(sim. 8600)
電場誤差	: <math>< \pm 2\%</math>	

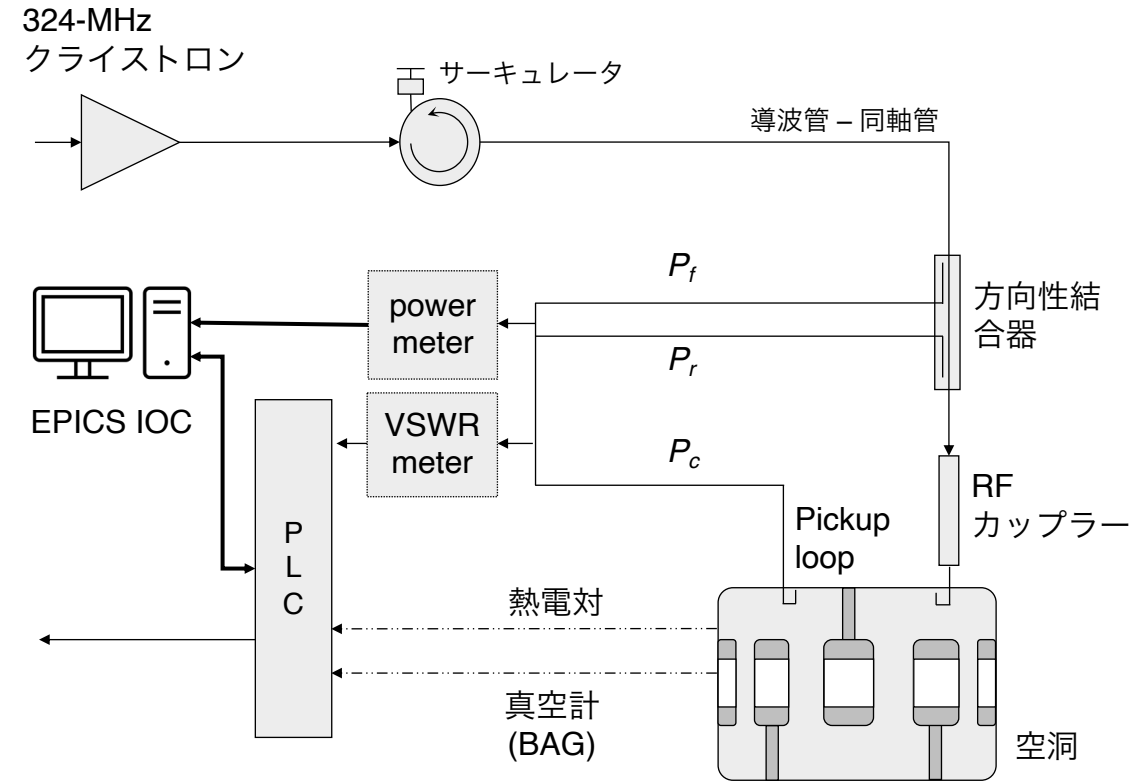
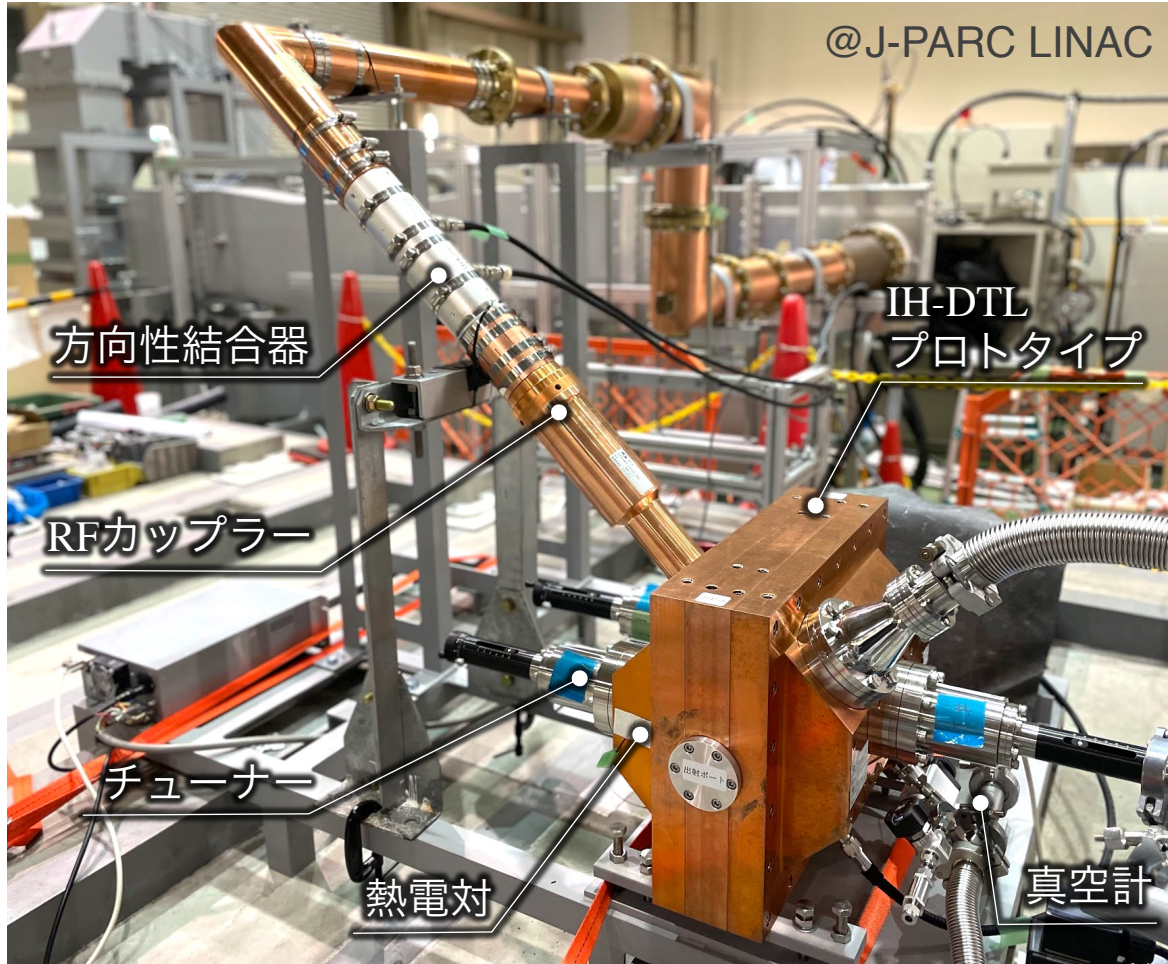
ドリフトチューブの製作精度は要求($\Delta E < 2\%$)を満たす

低電力tuning

RFカップラー	: 結合定数 = 1.01 (臨界結合)
チューナー	: 324.00 MHzに調整
要求RFパワー	: 75 kW (測定 Q_0 を考慮)

空洞が設計通りの性能を有することが確認でき、大電力運転のためのtuningが完了した

大電力試験 セットアップ

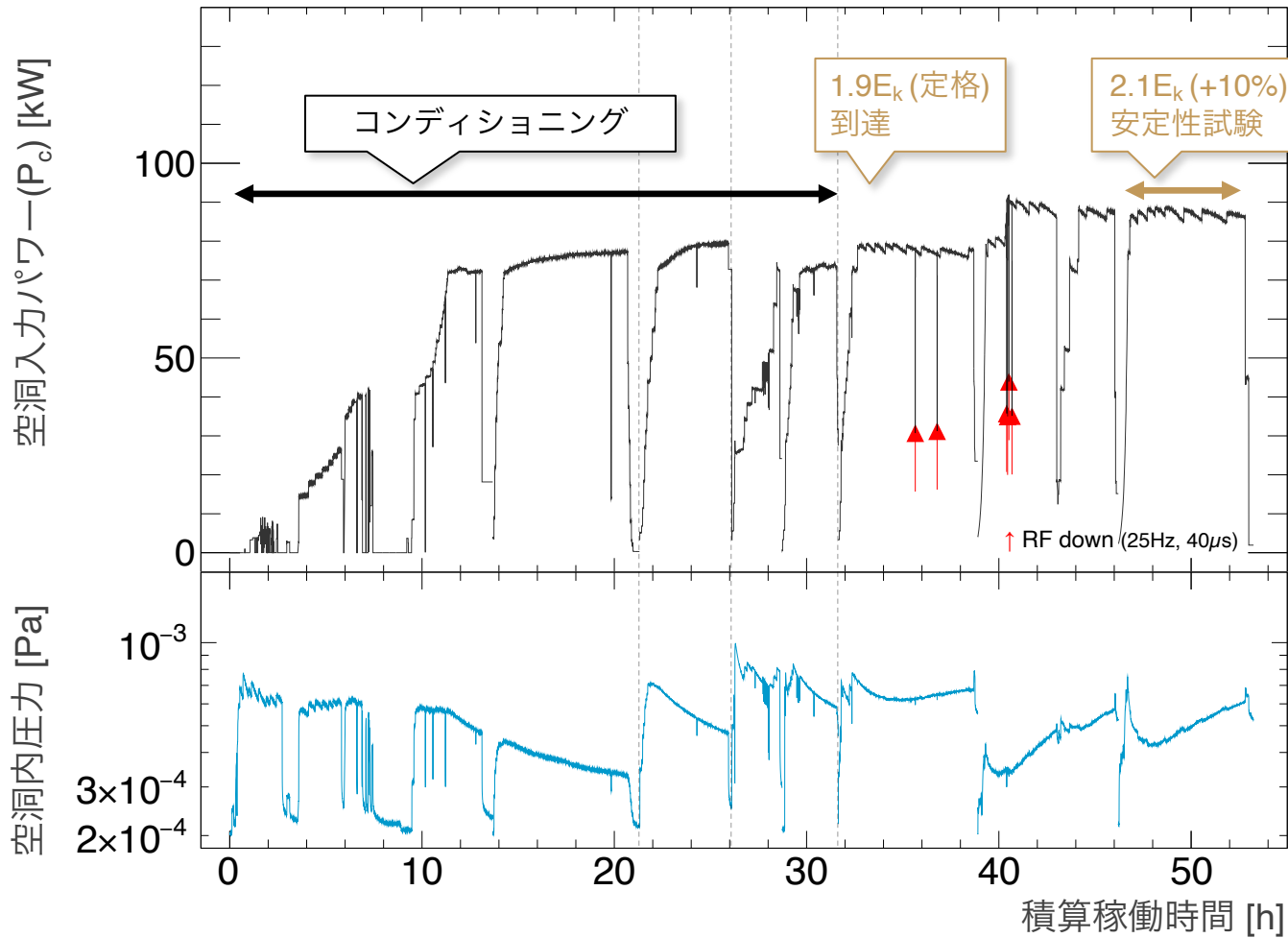


[インターロック：VSWR, 真空値, 空洞外壁温度]

空洞のRFパワーに加え、真空・空洞外壁温度を常時モニターするシステムを構築した

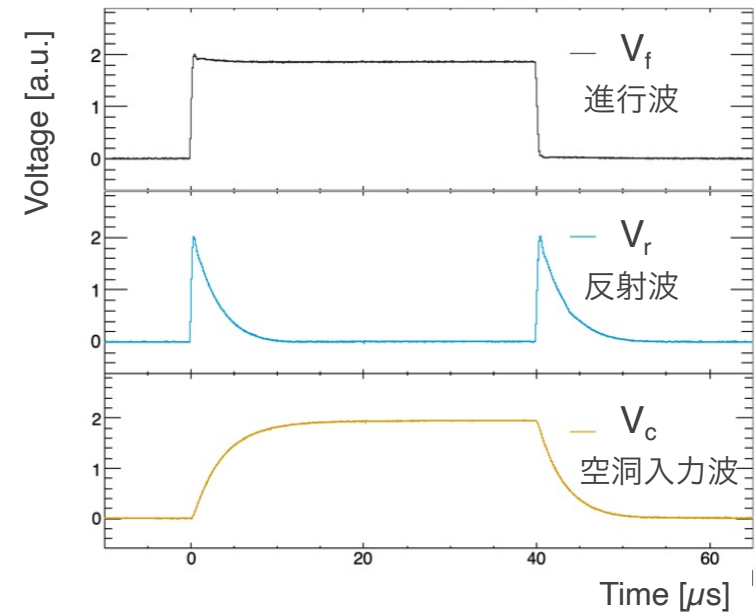
コンディショニング / 安定性試験

繰り返し = 1 Hz
パルス幅 = 20 μ s
5 Hz 20 μ s
25 Hz 20 μ s
25 Hz 40 μ s (定格duty)



- 32 hのコンディショニング：定格(1.9E_k)に到達
- 定格+10%電圧 (2.1E_k)で7 h安定性試験：ダウン無し

定格運転時のRFシグナル (25Hz, 40 μ s, 1.9 E_k)



3枚構造の324 MHz IH-DTLの大電力運転の実証 / 安定運転に成功した

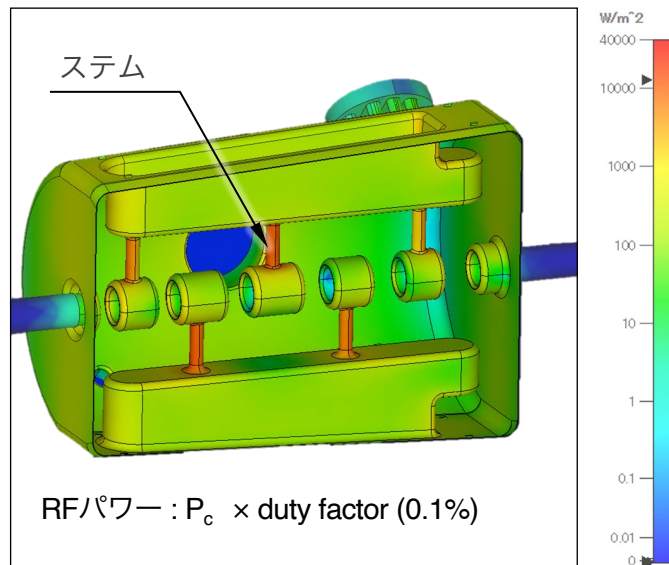
ドリフトチューブの発熱による影響の検証

- ドリフトチューブに水冷システムを導入するのは、工学的に困難
- 実機設計にあたり、FEMモデルによる熱特性の検証は重要 → FEMモデル計算の妥当性をプロトタイプで検証する

FEMモデル計算手順

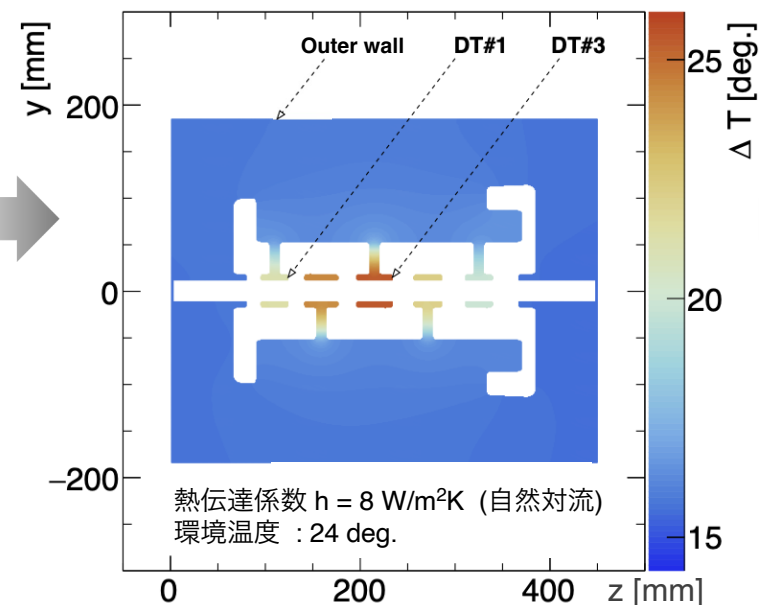
① 電磁場解析

② 空洞表面の消費電力の導出



ステム(φ10mm)での消費電力が高い

③ t 秒後の温度上昇分布の導出



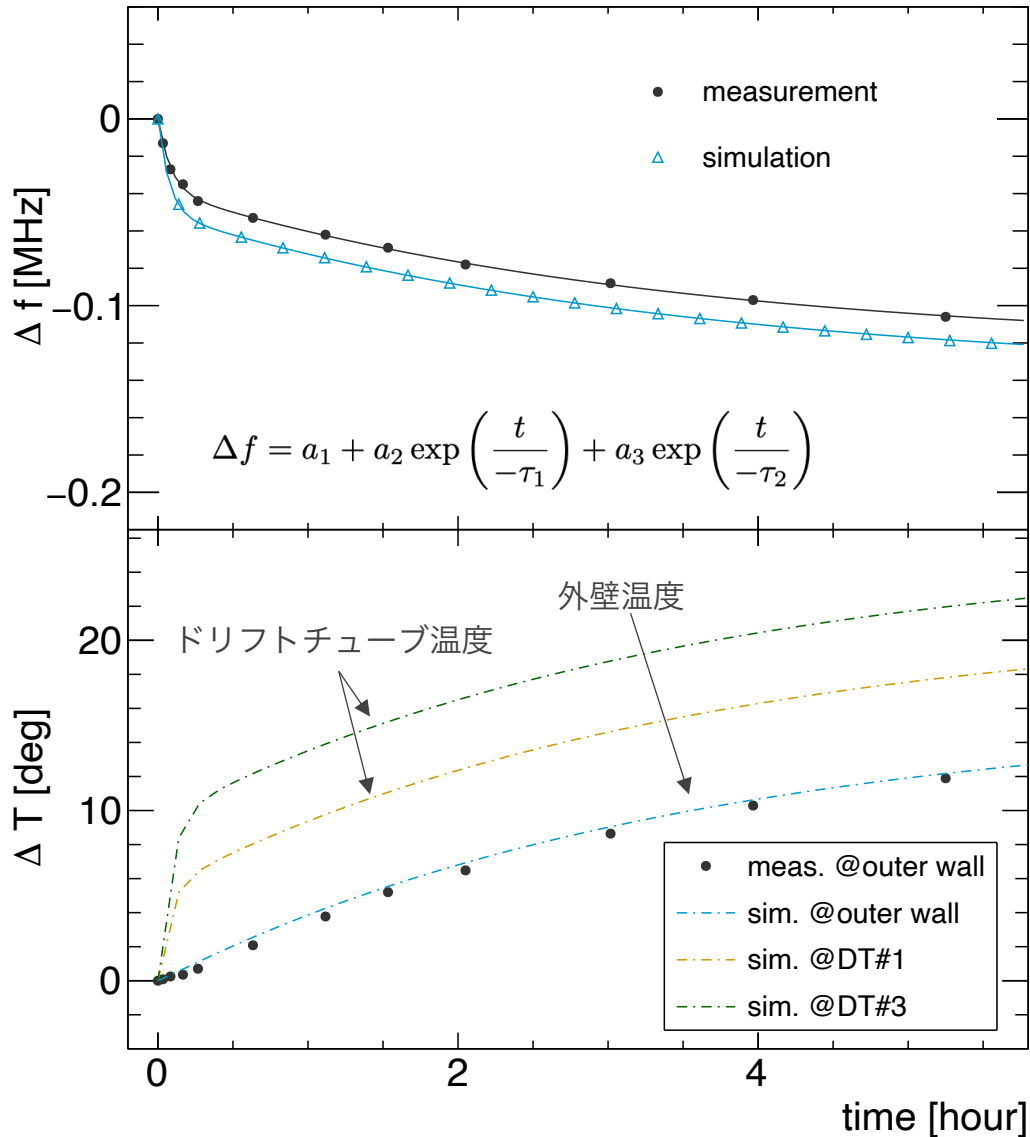
熱容量の小さいDTには熱がこもる

④ 構造/電磁場解析

周波数
シフトの
導出

ドリフトチューブの熱膨張による局所的な構造変位が予想される

熱膨張による周波数シフト



保持試験中(定格電圧+10%)の周波数シフトの測定結果

	a_1 (MHz)	a_2 (MHz)	τ_1 (h)	a_3 (MHz)	τ_2 (h)
measurement	-0.12	0.038	0.086	0.084	3.31
simulation	-0.14	0.051	0.074	0.086	3.37

チューナーの調整範囲であるため、運用上問題ないレベルで一致している

τ_1 : DTの局所的な構造変位 + 空洞全体の膨張

τ_2 : 空洞全体の膨張

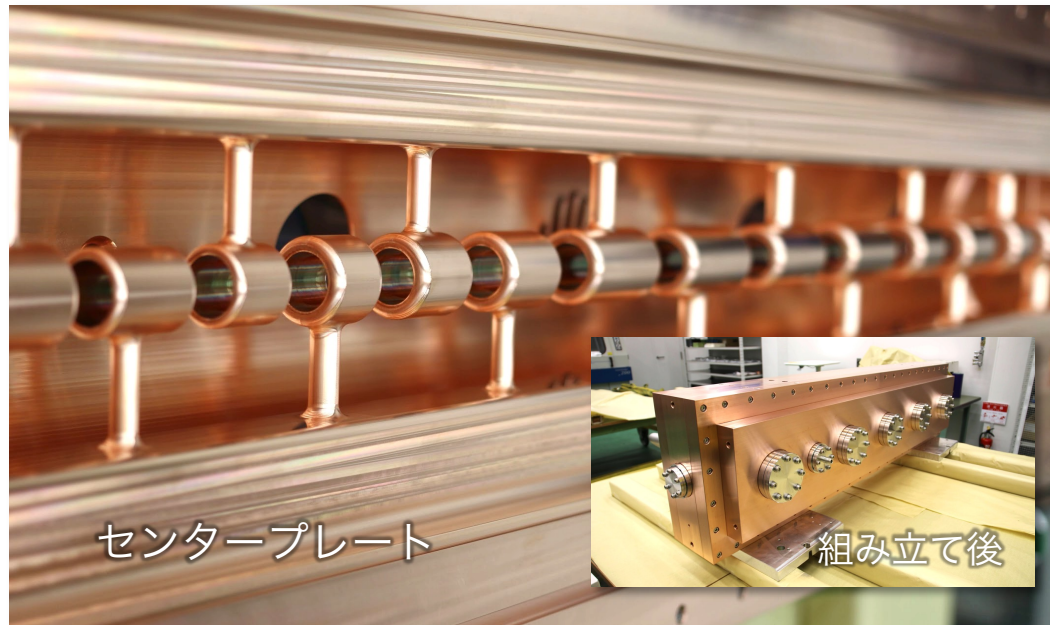
温度及び周波数シフトの測定結果は
シミュレーションの結果をよく再現した

IHの熱特性の検証において簡易FEMモデルが有効であることが示せた

(今後の開発) IH-DTL実機の製作が完了

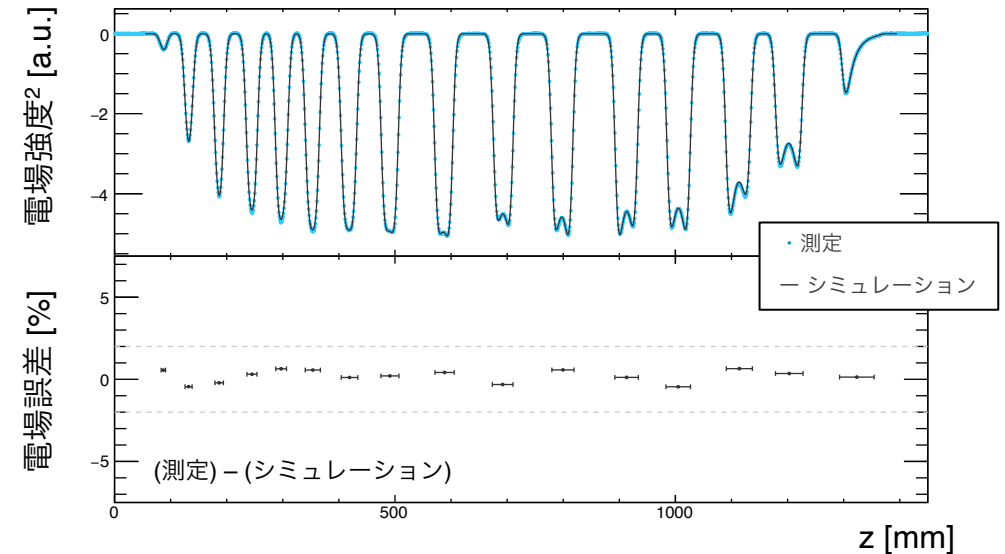
プロトタイプでの知見を元に設計をアップデート

- ・ 詳細な工学設計
- ・ 真空ポート、RFカップラーの設計
- ・ 電場補正のためのチューナー調整手法の考案
- ・ 熱膨張抑制のための水冷システム設計



空洞単体での低電力測定結果 (tuning前)

共振周波数	: 322.36 MHz (sim. 322.38 MHz)
無負荷Q値	: 10002 (sim. 10910)
軸上電場誤差	: <math>< \pm 2\%</math>



設計と一致する結果が得られた

世界初のミュオン用IH-DTLの製作が完了した。現在、低電力tuningを進行中

まとめ

- ミューオンg-2/EDM実験用のAPF IH-DTLプロトタイプを開発。
- 32時間のconditioningにより要求性能（25Hz, 40 μ s, >75 kW）を達成した。
- 電磁場, 熱特性等の解析により、CSTによるFEMモデル設計の有用性を証明できた。

- プロトタイプ開発の知見に基づき、実機IH-DTLの開発も進行中
- 世界初のミューオン多段線形加速実証に向け、準備を進めている。

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、JP22H00141 の助成を受けております。

科研費
KAKENHI

本研究はJST創発的研究支援事業 (Grant Number JPMJFR2120)、三菱財団自然科学研究助成、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の助成を受けております。