

# ミュオン線形加速器 APF方式IH-DTLプロトタイプの 大電力試験に向けた開発状況

茨城大学 中沢雄河

飯沼裕美（茨大）、岩下芳久（京大）、岩田佳之（NIRS）  
大谷将士、河村 成肇、三部勉、山崎高幸、吉田光弘、  
Cicek Ersin（KEK）、竹内佑甫（九大）、北村遼、近藤恭弘、  
森下卓俊（JAEA）、長谷川和男（QST）、齊藤直人（J-PARC center）  
須江祐貴、四塚麻衣（名大）、林崎規託（東工大）、安田浩昌（東大）

# 本研究の目的

ミュオンg-2/EDM精密測定実験のためのミュオン専用の加速器“IH-DTL”のプロトタイプを開発しており、大電力試験を2020年冬に予定している。

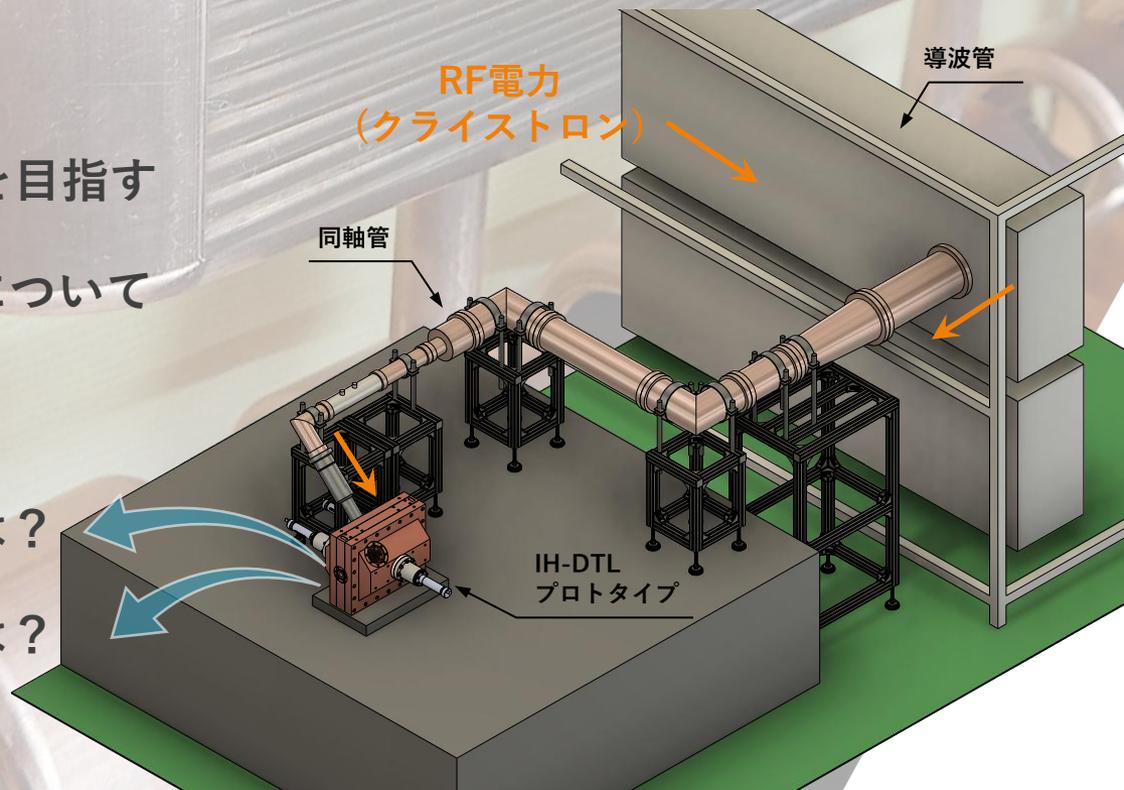
安定した運転の実現を目指す

## ①実験の概要について

シミュレーションの構築

## ②空洞の発熱は？

## ③放射線発生は？

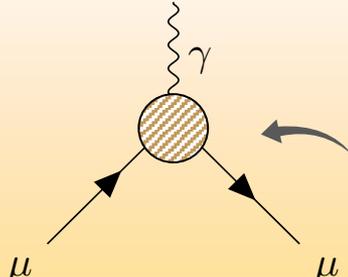


大電力試験に向けた現在の準備状況を報告する

# ミューオン異常磁気能率 $g-2$

ミューオンの双極子能率：標準模型を超えた物理に高い感度を持つ

標準理論予測



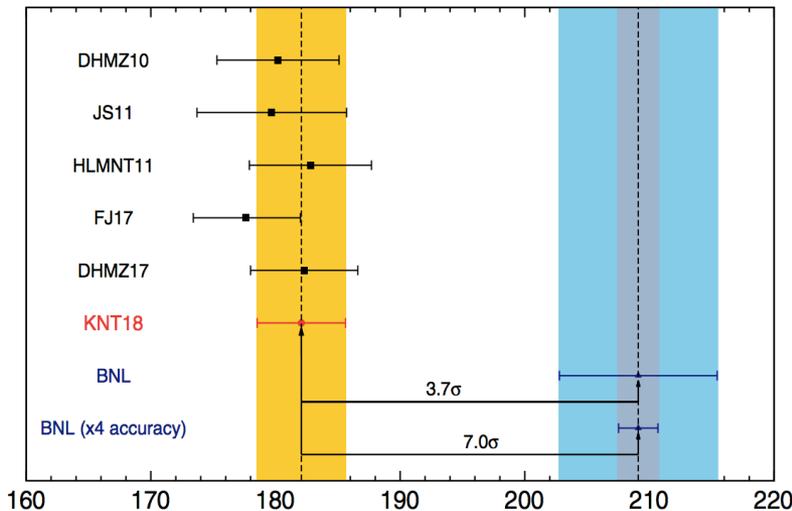
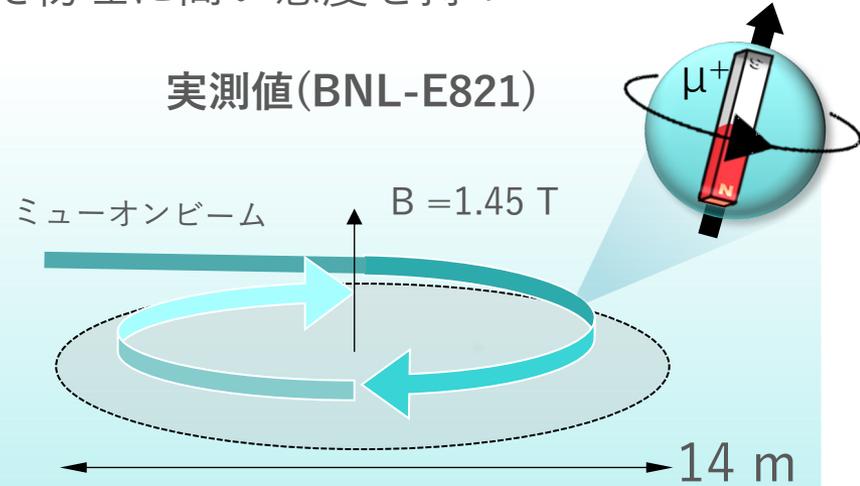
$$\vec{\mu} = g_{\mu} \left( \frac{q}{2m} \right) \vec{s}$$

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

ミューオン異常磁気モーメント

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

実測値(BNL-E821)



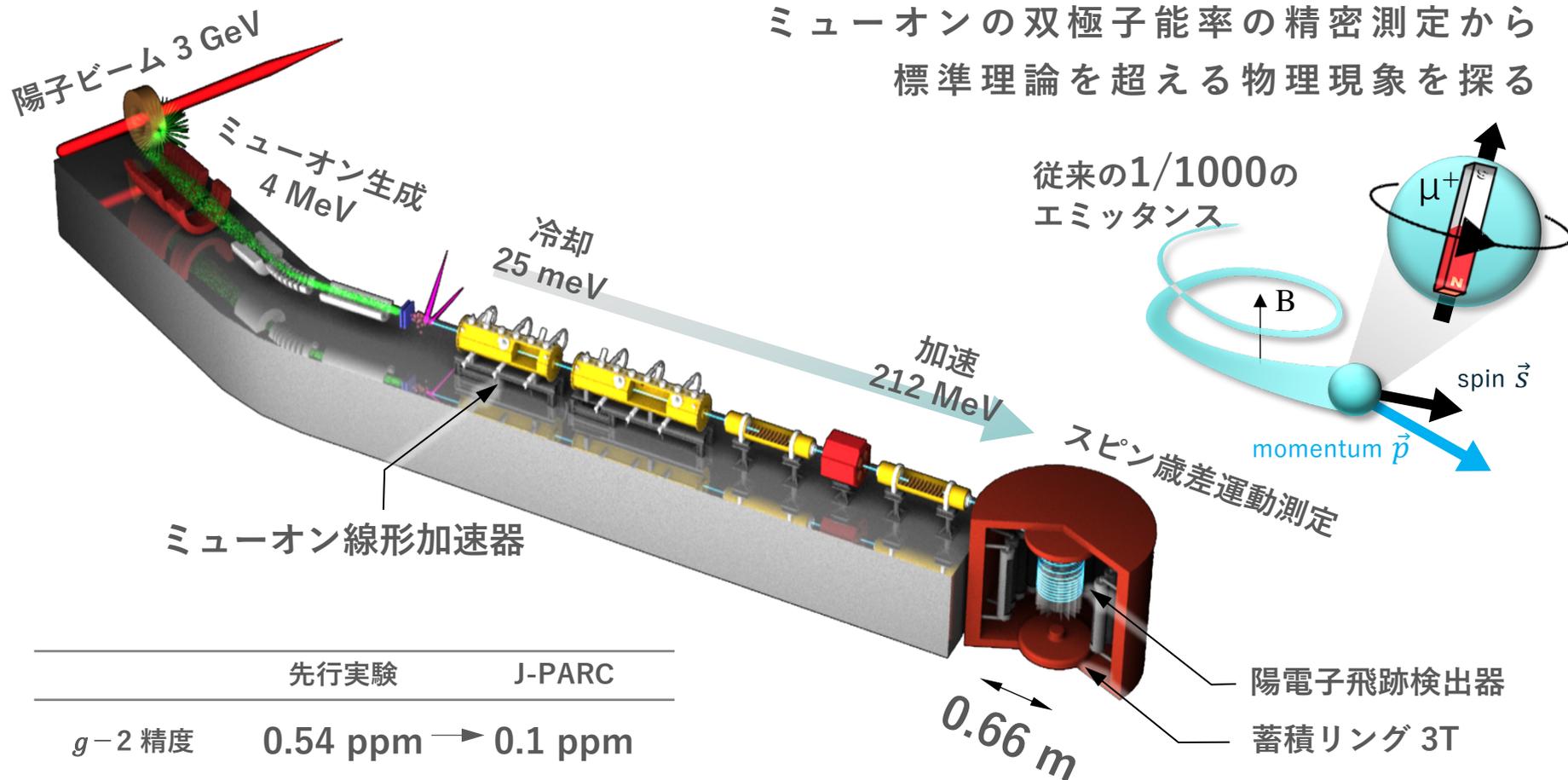
>  $3\sigma$  の不一致が観測

標準模型を超えた  
新物理が期待される

測定の主要な系統誤差は  
大きいビームエミッタンスに起因

# ミュオン $g-2$ /EDM精密測定実験 @J-PARC

4/18



	先行実験	J-PARC
$g-2$ 精度	0.54 ppm	→ 0.1 ppm
EDM 感度 [e·cm]	$0.2 \times 10^{-19}$	→ $1 \times 10^{-21}$

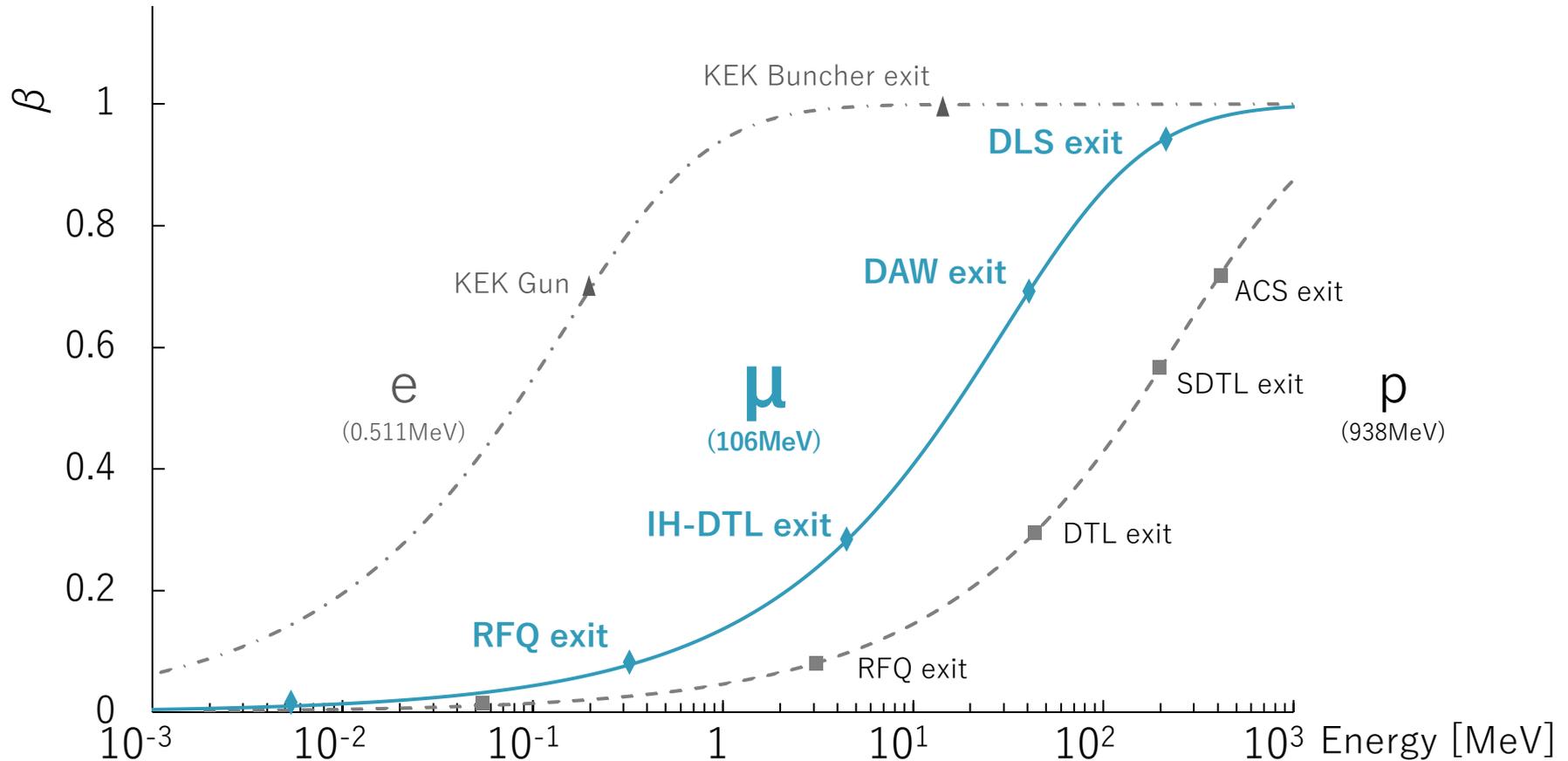
双極子能率を高精度で測定するためには、  
従来の実験(BNL・FNAL)とは異なる手法である、

“低エミッタンスミュオン”を実現するための加速器の開発が必須

# ミューオンの加速

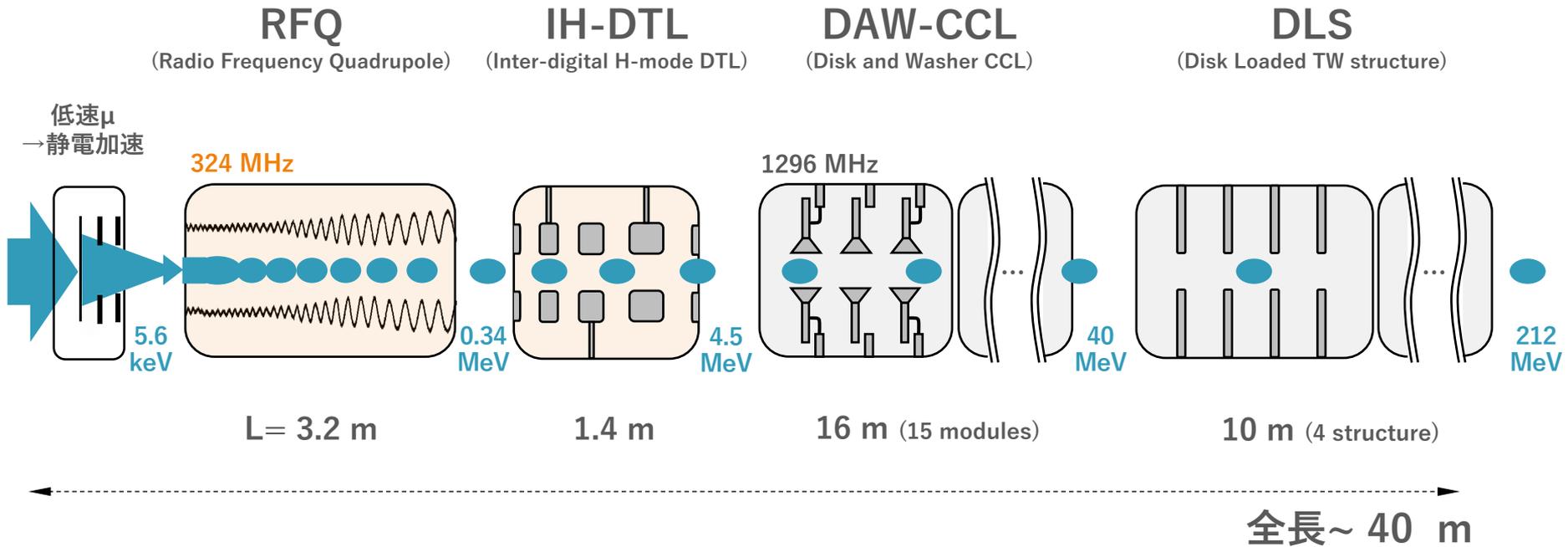
ミューオンは静止状態で  $2.2\mu\text{s}$  で崩壊してしまう

→ 線形加速器によって速やかに加速することが要求される



陽子加速器（低速～中速部）と電子加速器（高速部）のハイブリッドで実現

# ミュオン線形加速器の構成



RFQはJ-PARC H-用に開発された空洞を  
質量比でスケールして利用

RFQ以外はミュオン専用に新規開発

→**空洞のR&Dが必須**

## 関連講演

FROO04 竹内佑甫 “DAW-CCL”

FROT02 安田浩昌 “スピントラッキング”

(WEPP01 大谷将士 “自動サイクロトロン加速”)

(WEPP05 近藤恭弘 “Lバンド加速構造”)

# これまでの報告

第12回年会 (2015) ミューオン線形加速器の基本設計

第13回年会 (2016) ビームダイナミクス設計

## 「ミューオン加速器の基本設計を完了した」

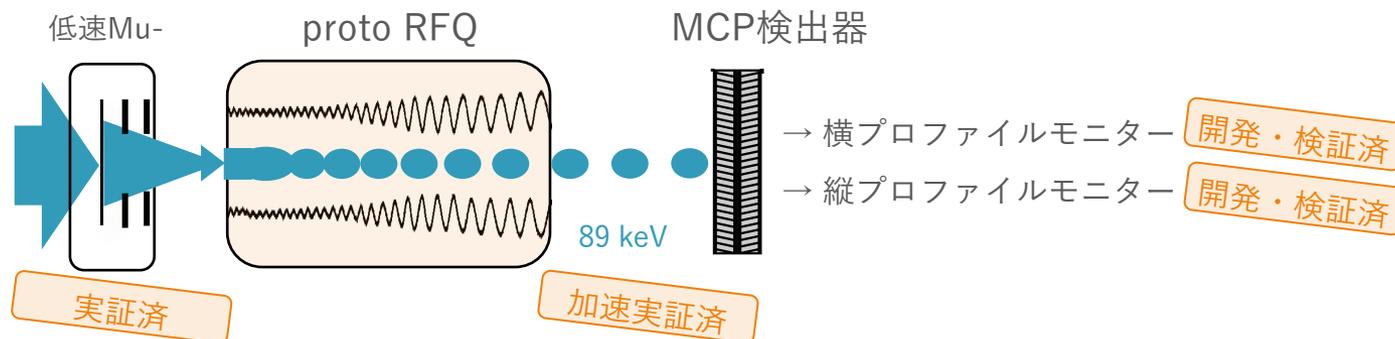
第14回年会 (2017) 加速試験用の低速 $\text{Mu}^-$ の観測

第15回年会 (2018) プロトタイプRFQによる世界初のミューオンRF加速

第16回年会 (2019) 縦方向プロファイルモニターの開発と実証試験

## 「RFQによるミューオン加速の実証に成功した」

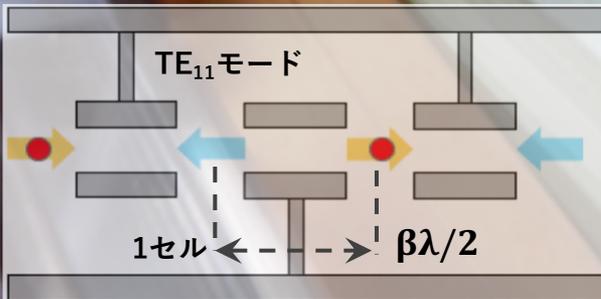
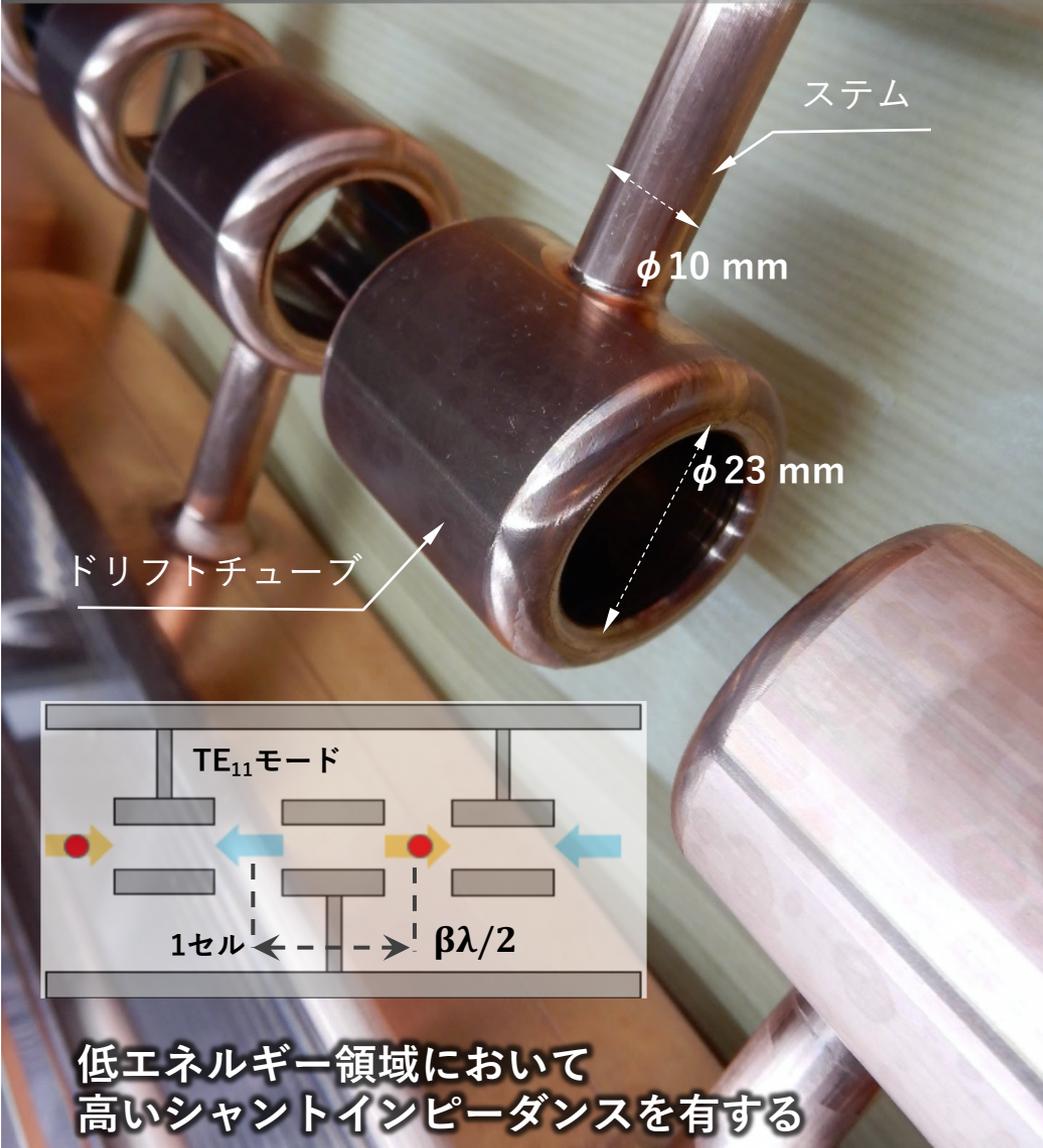
## 「低速ミューオンの診断手法を確立した」



次の「IH-DTL」による加速のために必要な実証・検証が全て完了した

# IH-DTL

Inter-digital H-mode Drift Tube LINAC

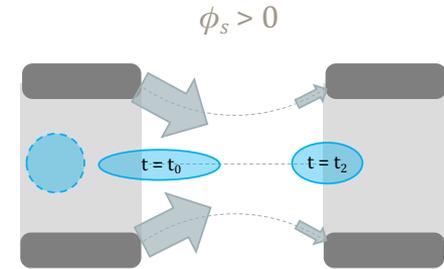


低エネルギー領域において  
高いシャントインピーダンスを有する

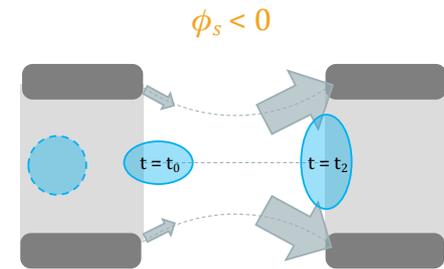
横方向収束には、

**APF: Alternative Phase focusing** を実装

正の同期位相の高周波電場による横収束



Transverse : focus  
Longitudinal : defocus



Transverse : defocus  
Longitudinal : focus

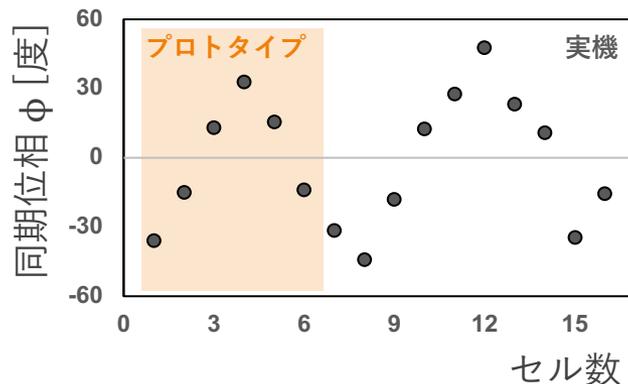
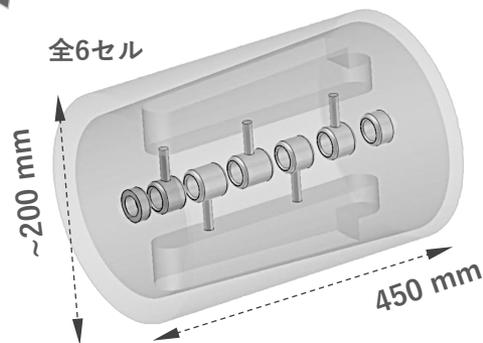
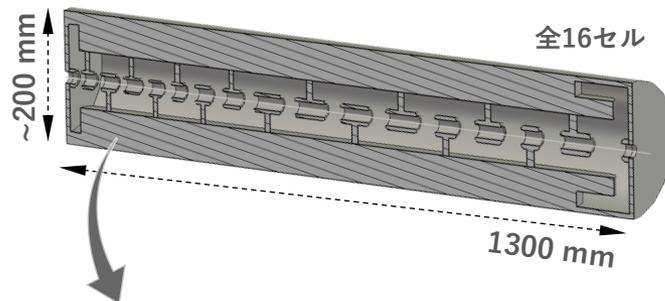
磁石が不要 → 構造の簡易化

**短距離加速を実現する**

# 基本性能

エミッタンス増大の許容値( $\Delta \varepsilon < 10\%$ )を満たすには、**電場誤差2%以下の精度**が必要  
 →1/3スケールのプロトタイプ空洞によって検証する。

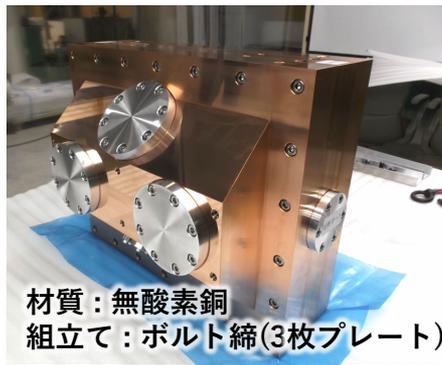
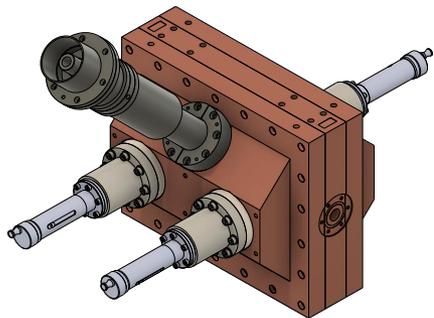
	実機	プロトタイプ
共振周波数	324 MHz	
セル数	16	6
$Q_0$	10300	8700
RFパワー	325 kW	55 kW
出射エネルギー	4.5 MeV	1.3 MeV
透過率	98.7 %	100 %
$\varepsilon_x$ [ $\pi$ mm mrad]	0.316	0.312
$\varepsilon_y$ [ $\pi$ mm mrad]	0.190	0.182



IH-DTLの大電力投入と加速実証の試験用として開発

原理実証と実機設計に向けた技術的課題の抽出が目的

## IH-DTLプロトタイプ開発状況



RF窓；  
アルミナセラミック[KYOCERA]

77D

回転フランジ

ループアンテナ

製作中

RFカップラー  
材質：無酸素銅  
組立て：ロウ付け

開発済

Pickupループ

チューナー

開発済

## 第15回年会.(中沢) 低電力試験

設計(CST MWS)と比較した時…

- 共振周波数: 誤差0.2%以下
- $Q_0$  : 設計の88%を達成
- 電場分布 : 誤差2%以下

## 第16回年会.(中沢) チューナー、RFカップラー開発

可動式チューナー(手動)を製作(×3)

- 324MHzのチューニングを達成
- 低電力用RFカップラーを製作
- 結合度=1.01を満たすループ形状を決定
- 結果を基に大電力用RFカップラーを設計

現在：RFカップラーの製作中

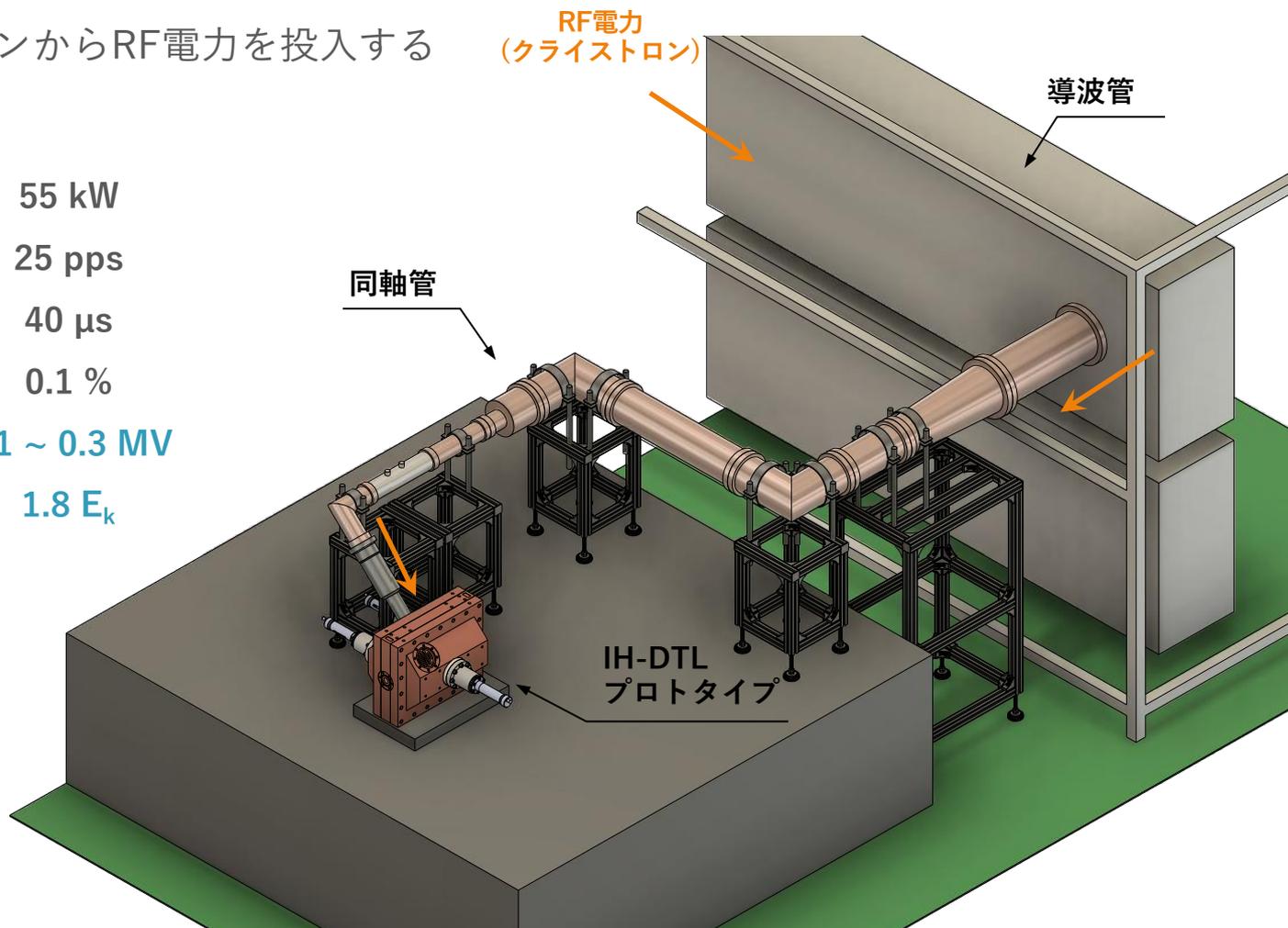
2020年秋頃完成予定

大電力試験への準備が完了した。

# 大電力試験セットアップ

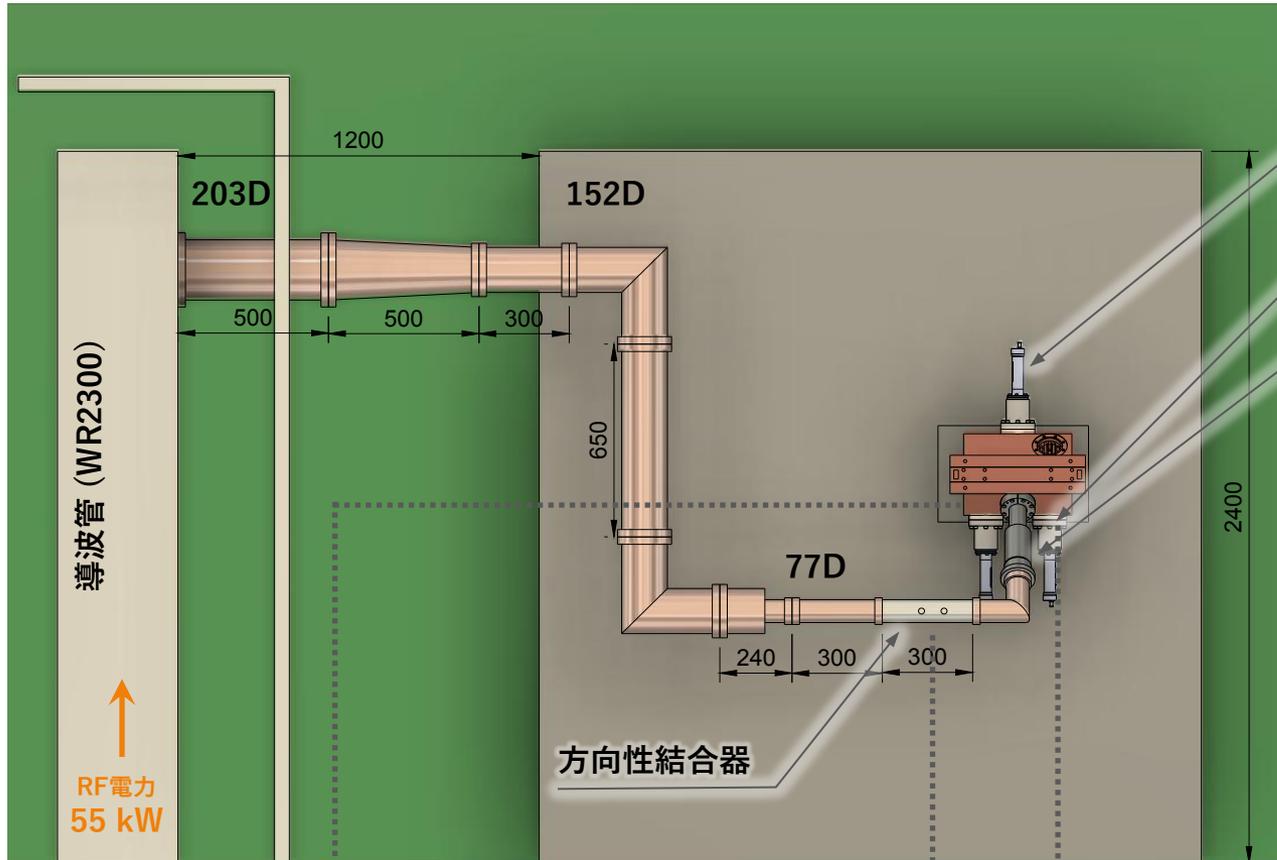
324 MHzクライストロンからRF電力を投入する

RF電力(定格)	55 kW
繰返し周波数	25 pps
RFパルス幅	40 $\mu$ s
Duty	0.1 %
セル電圧(定格)	0.1 ~ 0.3 MV
最大電場	1.8 $E_k$



目標電力・電圧を保持した安定性の評価試験を実施する

## RF 伝送線路



チューナー  
(手動)

pickupループ

RFカップラー

安定運転への懸念 (空洞原因)

- ・ 共振周波数のズレによる RF反射過多
- ・ 放電による真空悪化
- ・ 放射線発生

モニター

真空圧力

- ・ 真空計(インターロック)

RF電力(方向性結合器、pickupループより)

- ・ パワーメータ(電力測定)
- ・ VSWRメータ(インターロック)

試験に先立ち、

シミュレーションに

よる諸現象の評価を行う

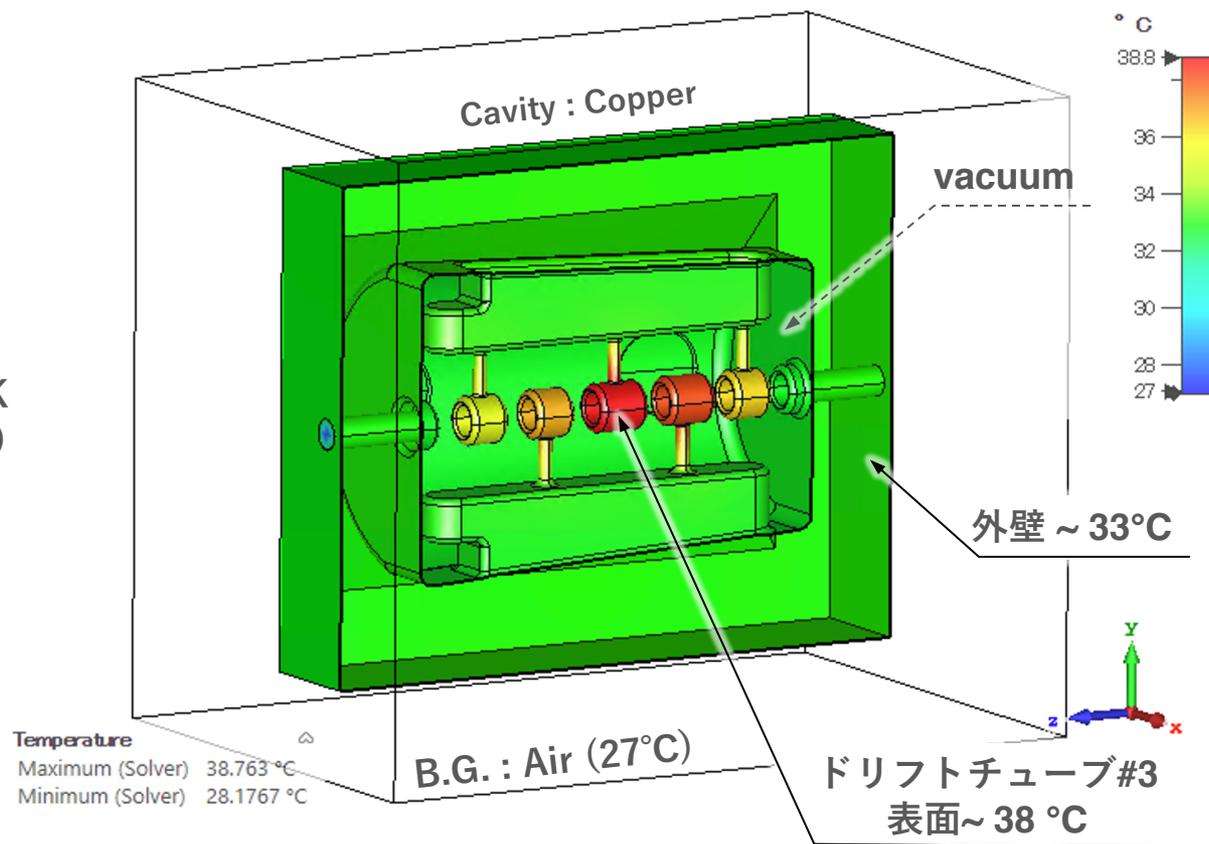
# 空洞運転時の温度変化

プロトタイプ空洞に水冷機構は無いため、チューニングは手動チューナーにて行う  
 →温度の変化による共振周波数の変化の程度が安定運転に影響する

## 定常熱解析

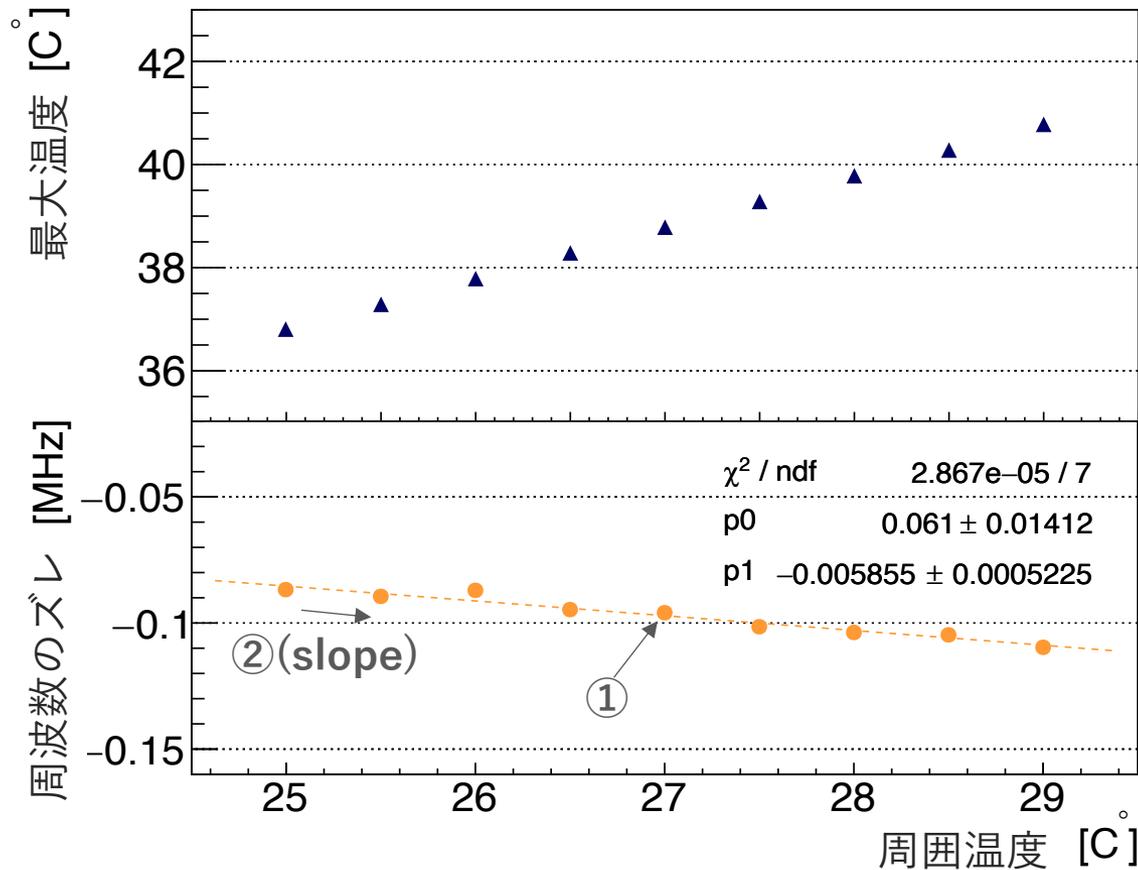
RF電力	55 kW
Duty	0.1 %
材質	銅
熱伝達係数	14 W/m <sup>2</sup> K (自然体流)
放射率	0.1
周囲温度	27度

CST MWS & CST MPS



表面電流密度の大きいドリフトチューブ表面では、周囲温度から最大+11°C程度の温度上昇

# 温度変化による共振周波数の変化



- ① 27度の時のRF電力による周波数(324MHzから)のズレ

**-0.096 MHz**

チューナーによる調整範囲内(数MHz以内)より十分に小さい

- ② 周囲温度に依る周波数変化量

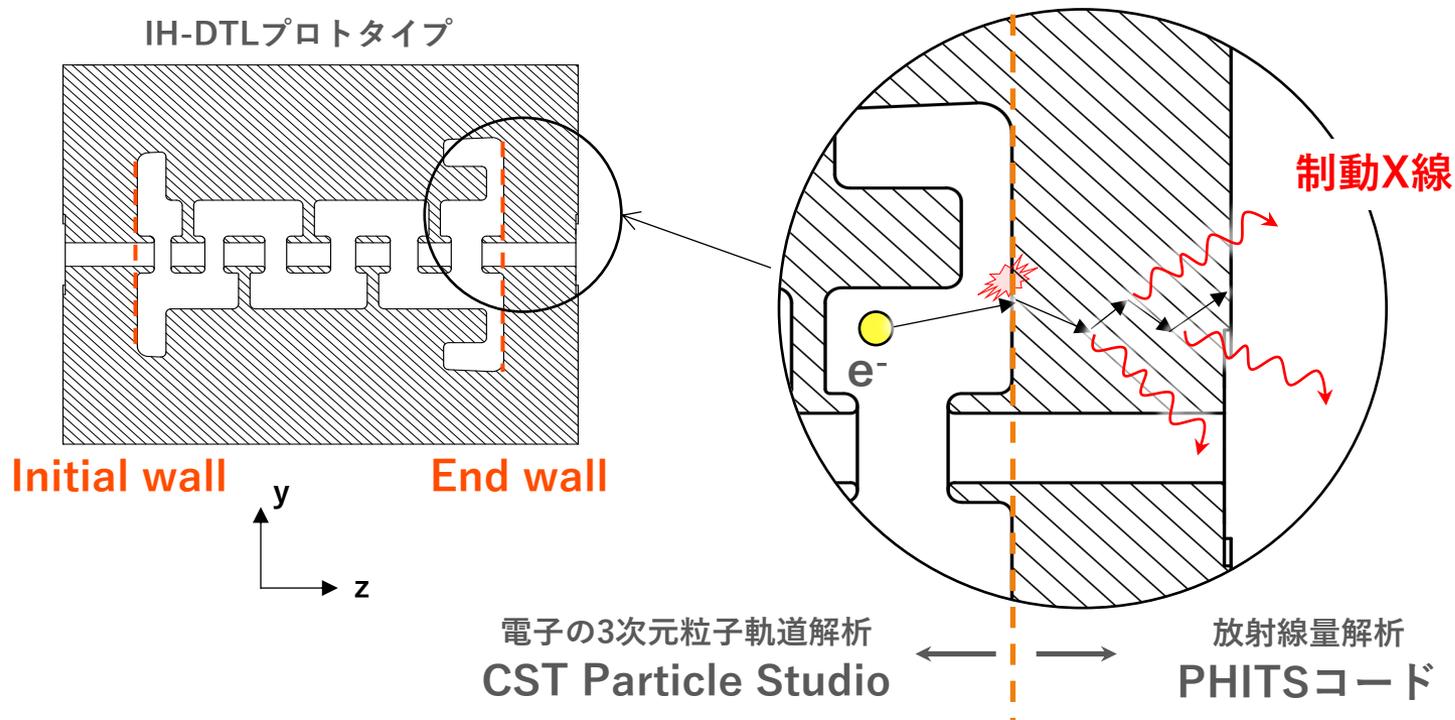
**-0.006 MHz/°C**

周囲温度における周波数の変化は小さいため、安定して共振周波数を維持できる

大電力試験時には空洞壁の温度と、RF位相をモニターする→シミュレーションと比較

# 空洞内の放射線の発生

空洞内壁面から出た電界放出電子が加速されて、別の内壁面に衝突する際に発生するX線を評価する

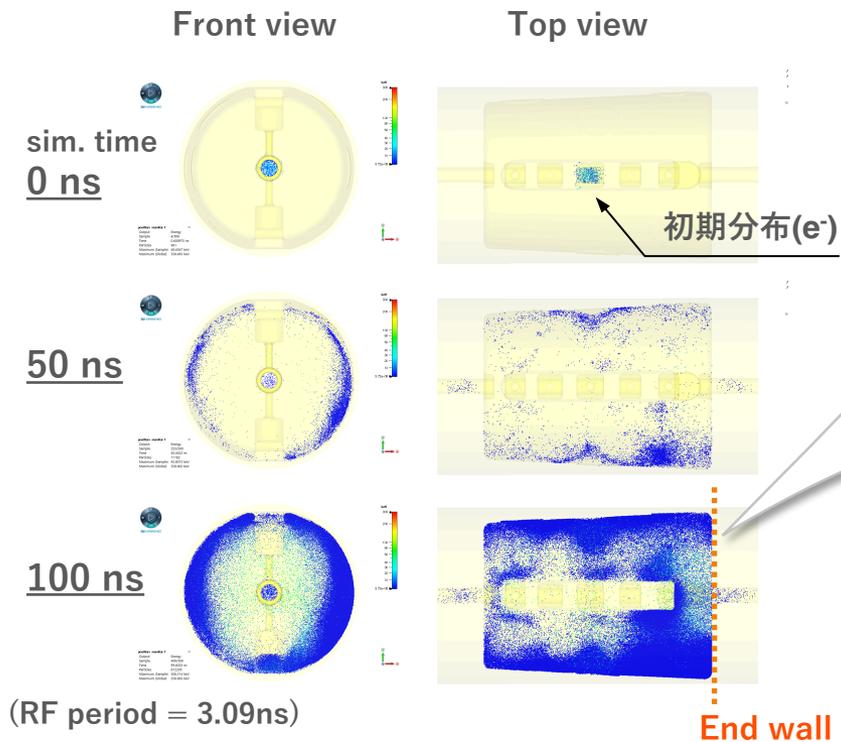


実測値と比較することで計算値のスケールを決めることが目標

シミュレーション体系を確立し、  
今後のミュオン加速器設計時の放射線遮蔽の指標にもしたい

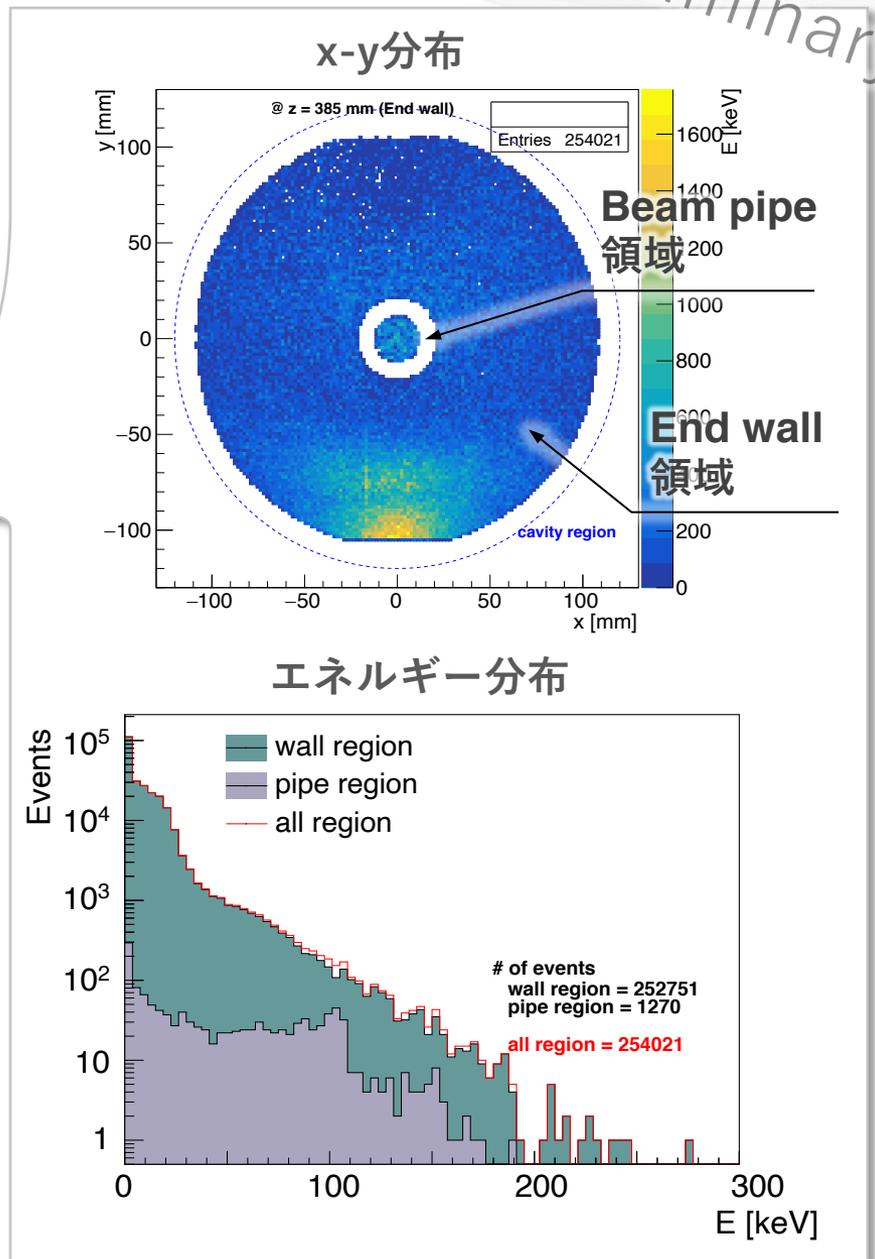
preliminary

# 空洞内のマルチパクティング



CST PARTICLE STUDIOにより  
空洞内壁にヒットした  
電子の位置分布・エネルギー分布を生成

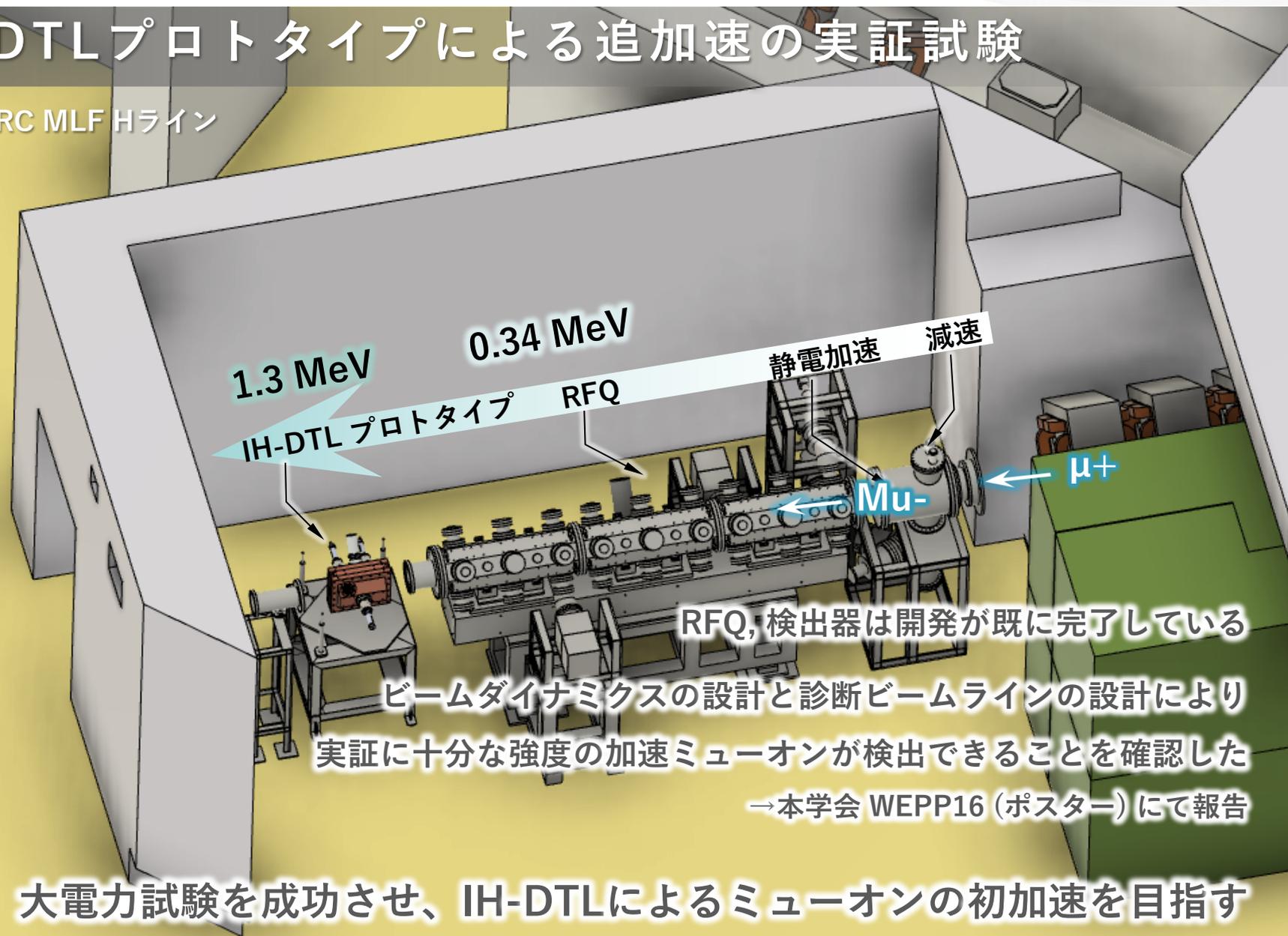
今後、PHITS コードにより  
放射線量を見積もる



## 今後の展望

## IH-DTLプロトタイプによる追加速の実証試験

@ J-PARC MLF Hライン



# まとめ

- ミューオンg-2/EDM精密測定実験のためのミューオン線形加速器  
”IH-DTL”を開発している。
- 大電力試験のセットアップは整いつつある。現在はRFカップラーの製作待ち
- 運転における発熱、放電、放射線発生等のシミュレーションを進めている。
- 2020年 冬に大電力試験を実施予定