

2025年8月6日
第22回加速器学会年会

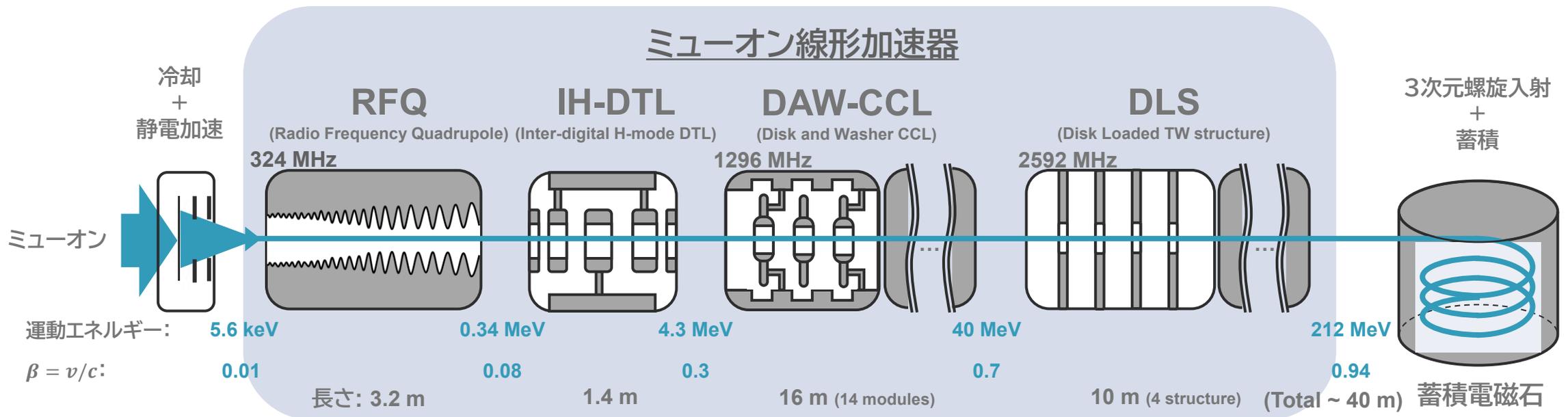
ミューオン加速用Disk-and-Washerにおける Bridge coupler試作機の低電力試験

近藤彩夏^A, 飯嶋徹^{AB}, 鷺見一路^A, 竹内佑甫^C, Cicek Ersin^D, 惠郷博文^D,
大谷将士^D, 中沢雄河^D, ニツ川健太^D, 三部勉^D, 吉田光宏^D, 近藤恭弘^E,
森下卓俊^E, 岩下芳久^F

名大理^A, 名大KMI^B, 上海交通大学^C, KEK^D, JAEA^E, 阪大^F

ミュオン加速器@J-PARC

- ミュオン線形加速器を用いて、新物理が期待される物理量であるミュオン $g - 2/EDM$ の精密測定をJ-PARCで行う
- 収束電場なしでビームを蓄積するという要請から、低エミッタンスミュオンビームの実現が必要となる
- ミュオン加速器は速度で最適化された4種類の加速空洞からなる



ミュオン線形加速器中速部

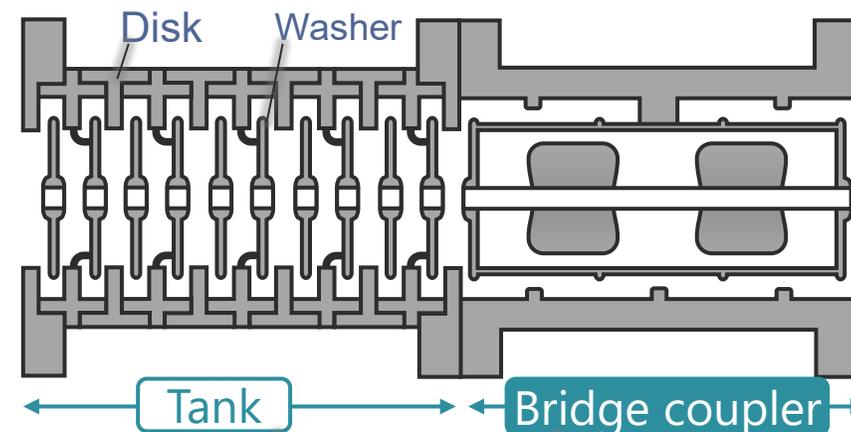
中速部(光速の30%~70%)ではミュオン特有の急激な速度変化への対応が必須
→広い速度領域で高い加速効率を持つ**DAW (Disk and Washer)**を採用

ミュオンDAWの構成

- 加速を担うTankと、ビーム収束のためのスペース確保・Tankの電磁気的な結合を担うBridge couplerから構成される

Frequency: 1296 MHz

of tank: 14 # of bridge coupler: 11 # of klystron: 3 (2.5 MW)



Module1



2.5 MW
Klystron

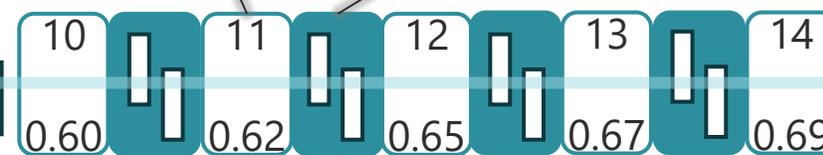
Quadrupole Magnet

Module2



2.5 MW
Klystron

Module3

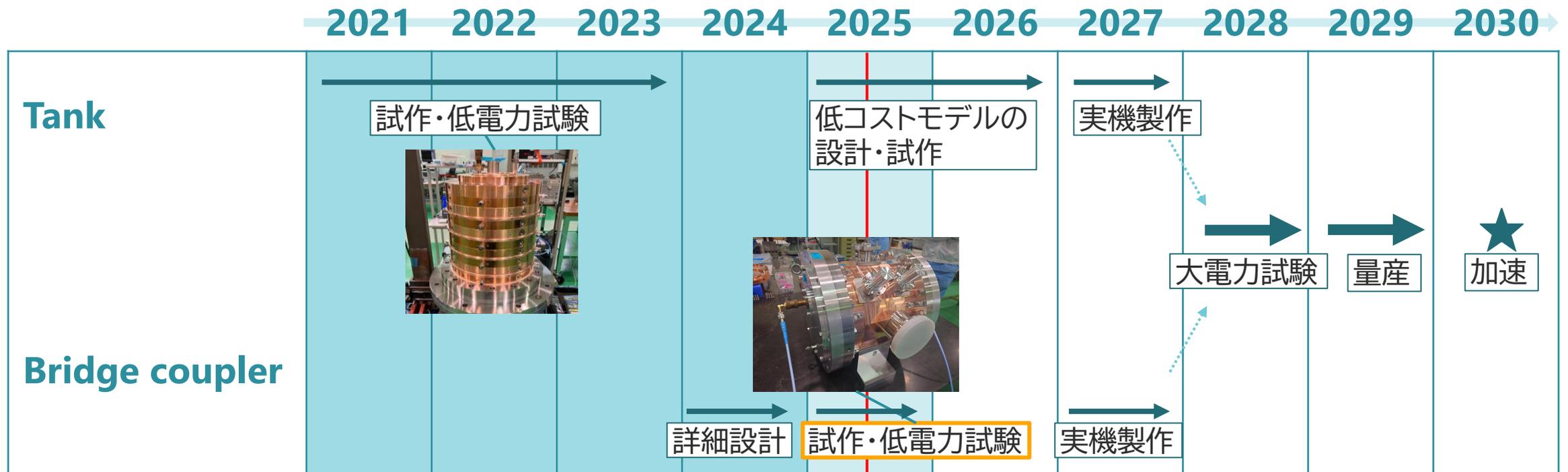


2.5 MW
Klystron

μ
 $\beta =$

開発スケジュール

- TankとBridge couplerの開発を並行して推進中
- 目標は2030年の加速運転開始
- 本講演ではBridge couplerの試作・低電力試験について報告する

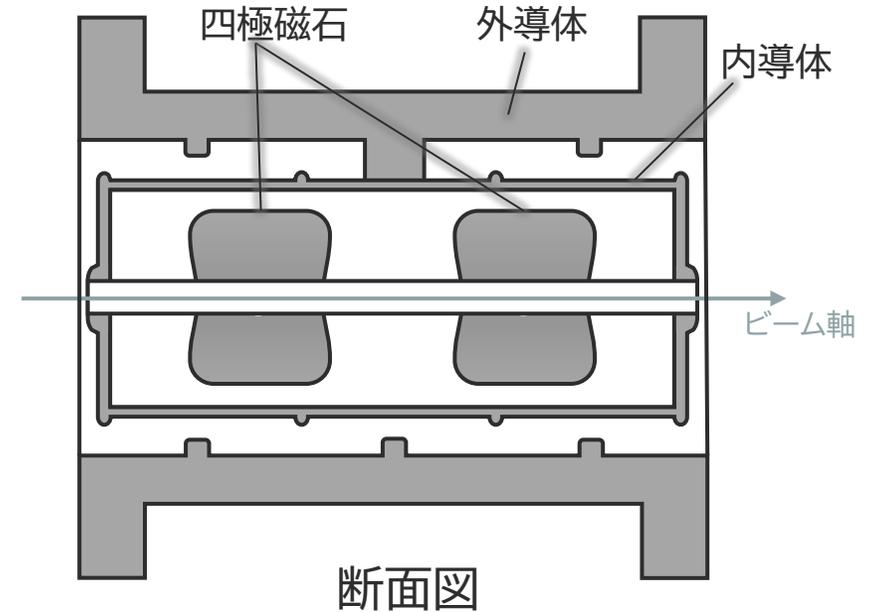


現在

Bridge coupler

構造

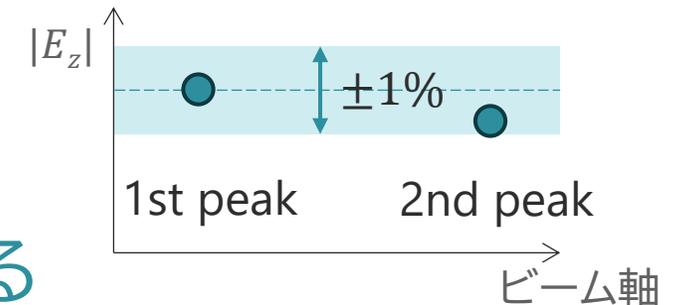
- DAWの強い結合を活かすために同軸タイプを採用
- 外導体・内導体と四極磁石から構成される



課題

1. 同軸型Bridge couplerは製作実績が乏しく、中でもミュオン用の製作は初の試みとなる
2. 両端のTankを均等に励起するために、電場強度が平坦である必要がある
 - 要求は”軸上軸方向電場の平坦度が $\pm 1\%$ ”とした

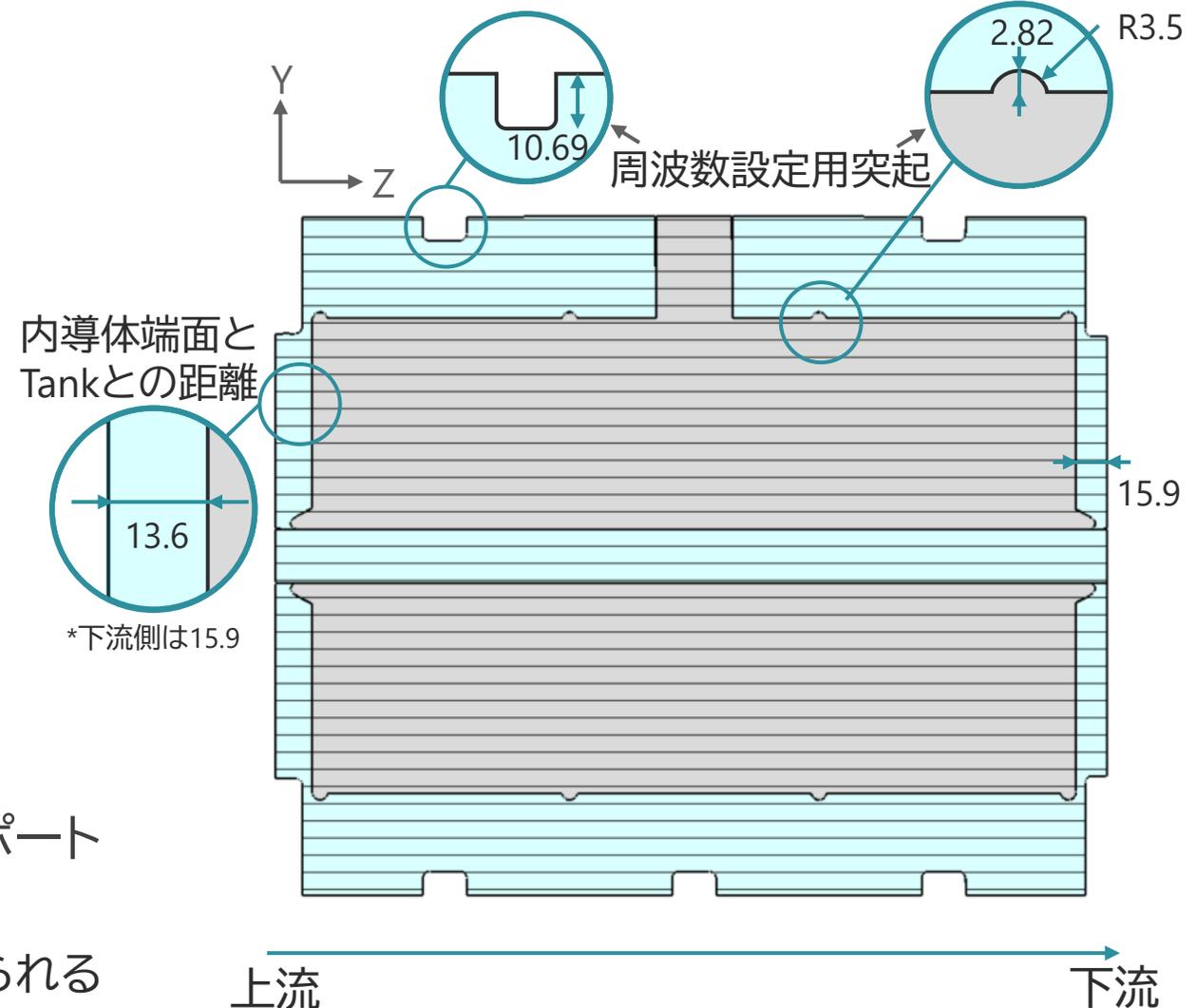
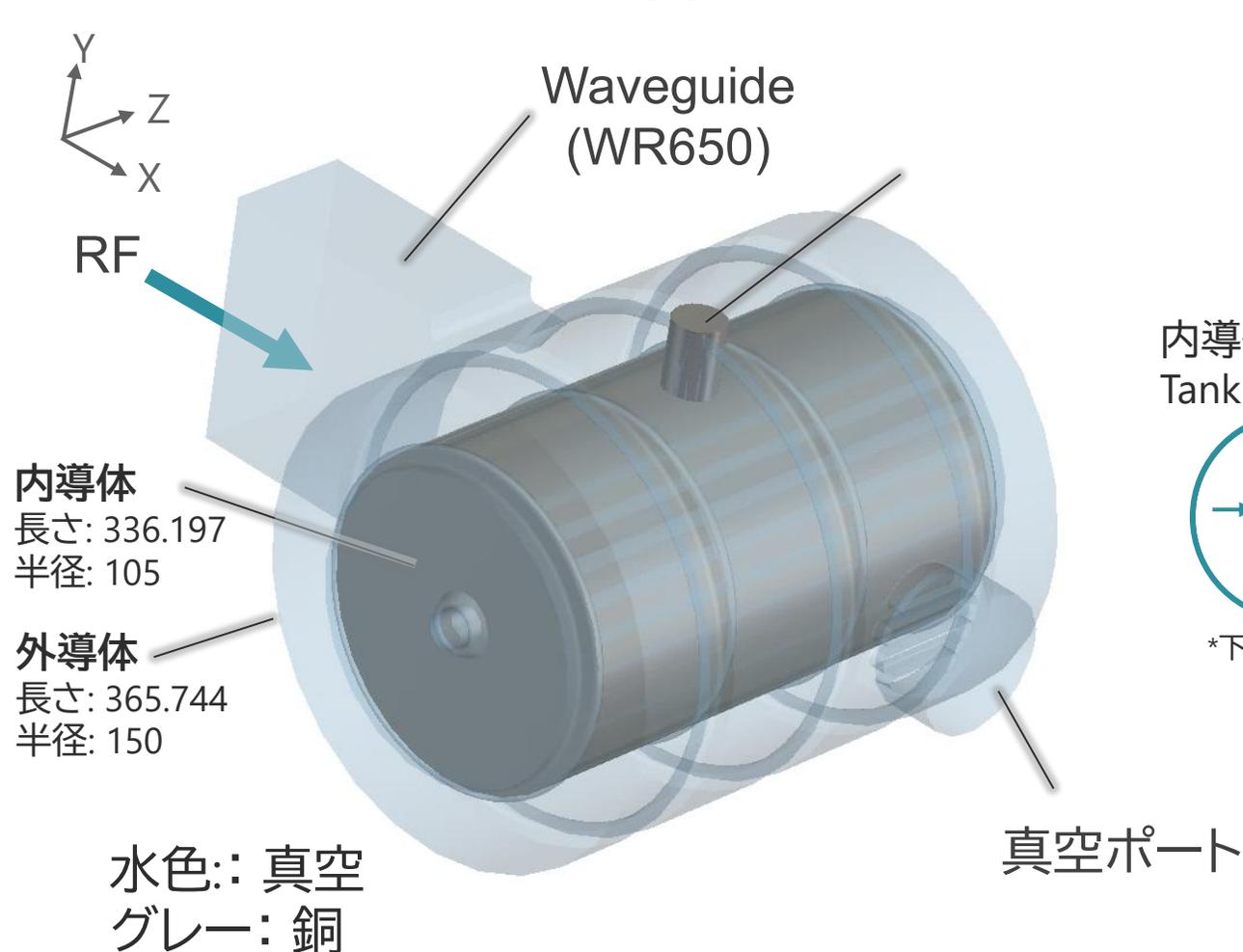
→試作機を設計・製作し、製作精度・電場を確認する



Bridge coupler 基本設計

[1] 竹内佑甫, 博士論文, 九州大学, 2023

2Dモデルによる基礎設計[1]を基にCST Studio Suiteでモデルを作成した*数値の単位はmm

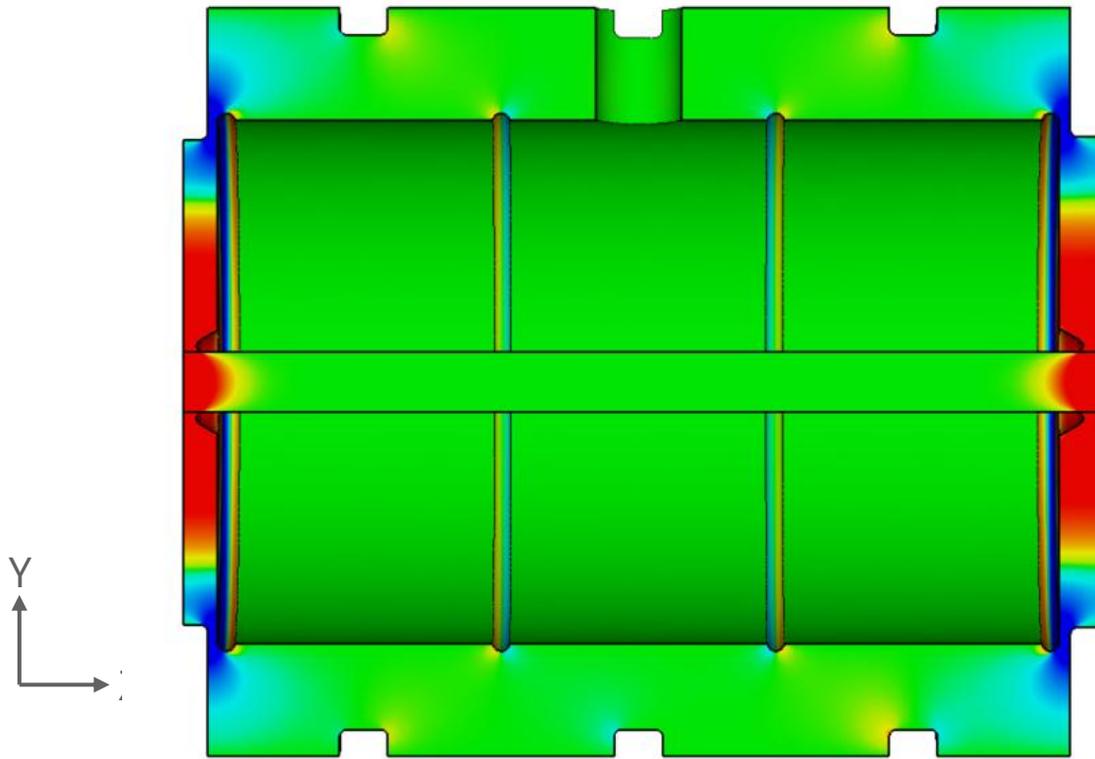


*図にはないが周波数調整用チューナーも取り付けられる

シミュレーション

*CST Studio Suiteを用いた計算

E_z 分布(加速モード)

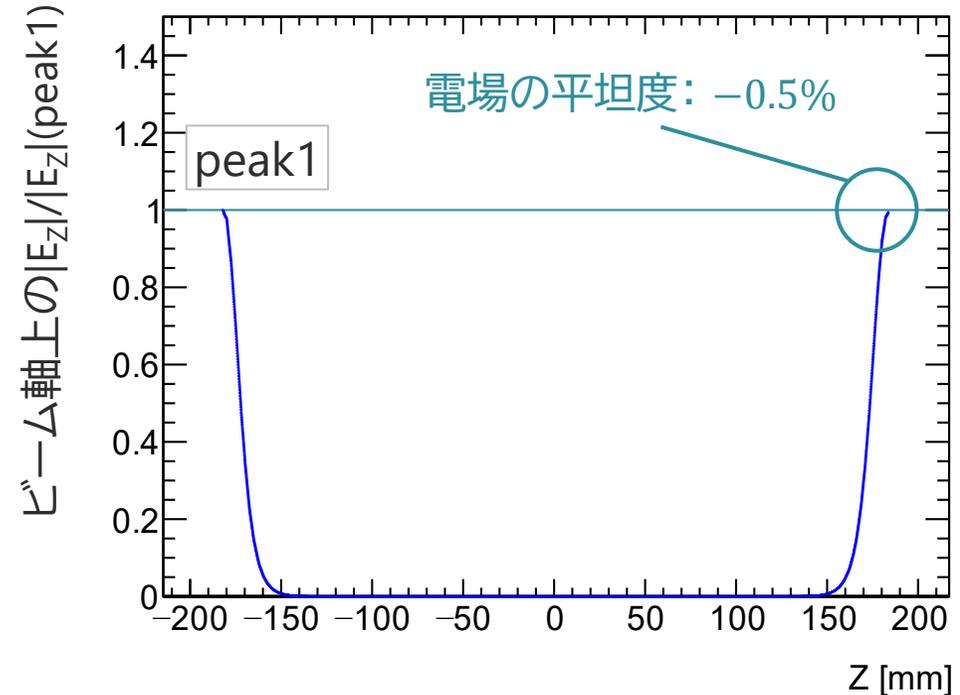


共振周波数[MHz] Q_0

| | | |
|-------|---------|-------|
| 加速モード | 1296.04 | 7996 |
| 結合モード | 1295.96 | 16986 |

設計手法

1. 内導体端面とTankとの距離を調整して電場の平坦度を調整
2. 突起長を調整し共振周波数を微調整

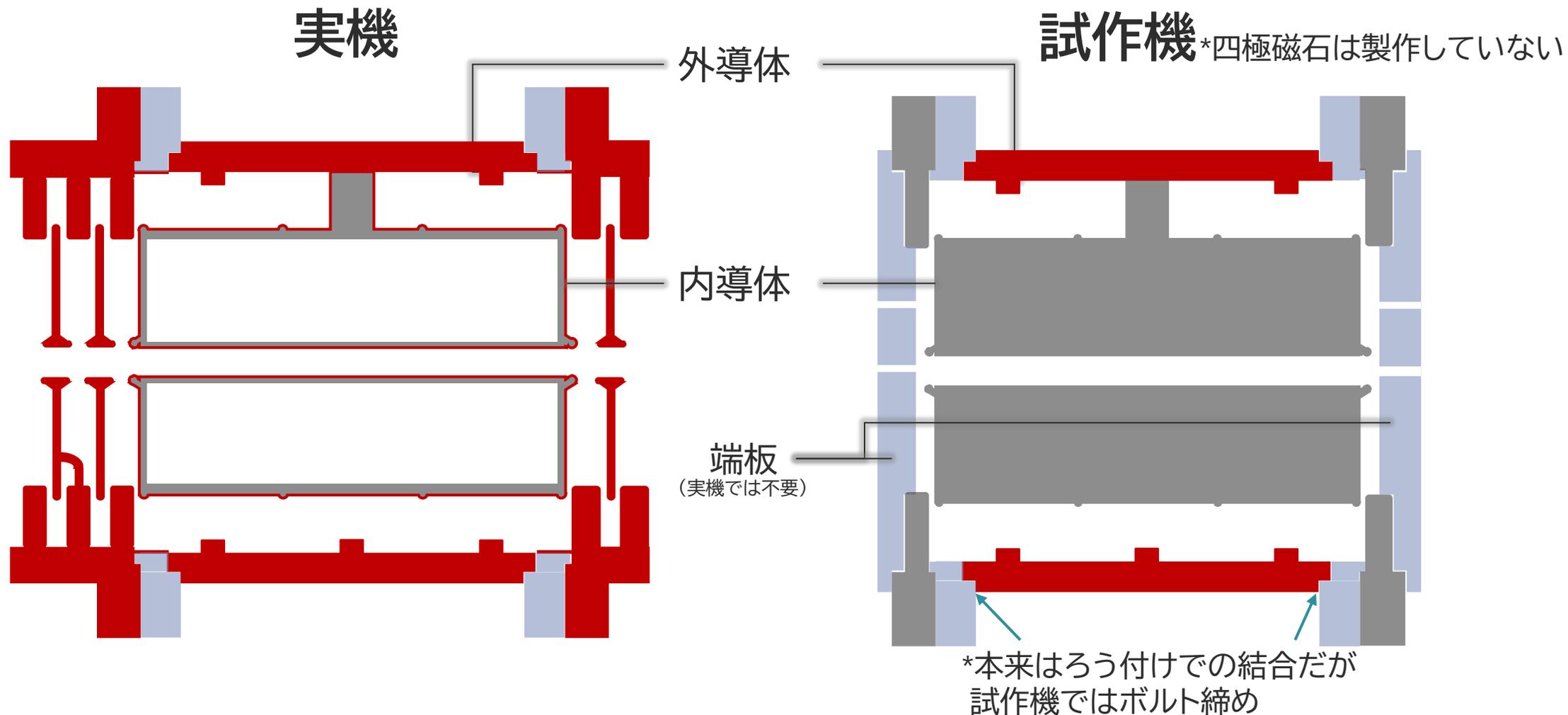


要求を満たす設計を達成した

試作機概要

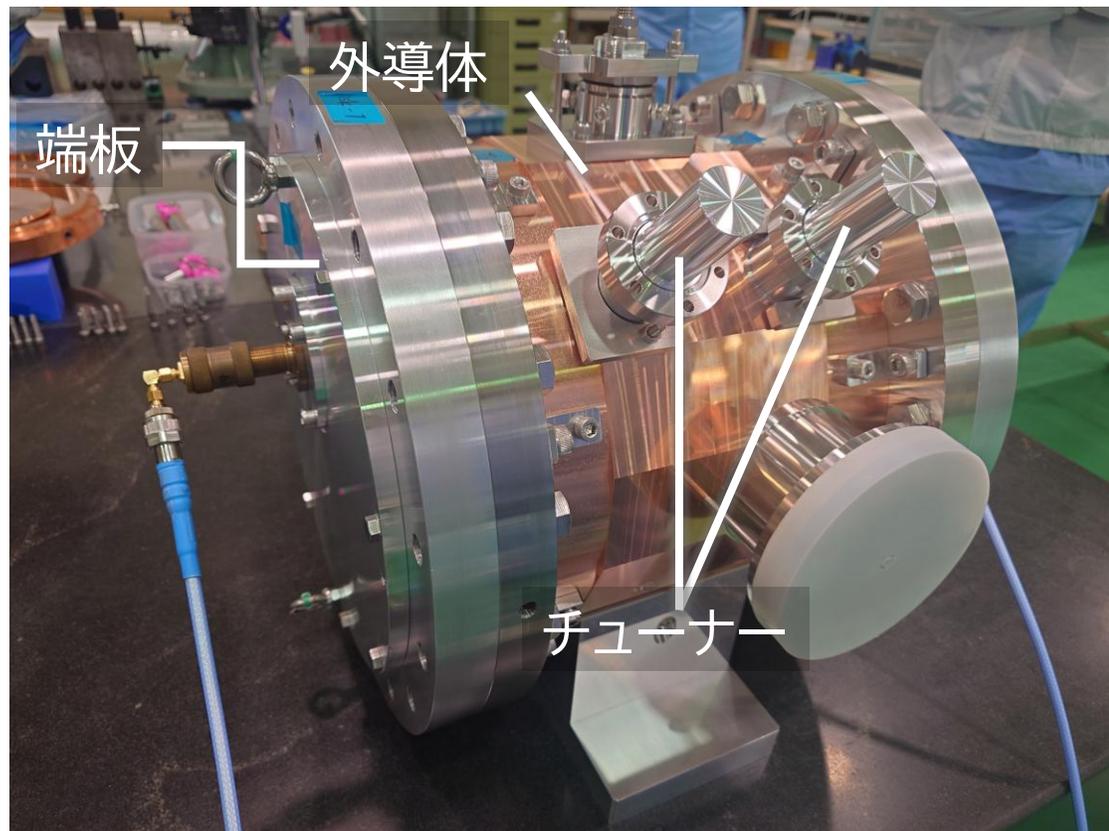
実機と試作機では材質が異なる

■ Copper ■ Al ■ SUS

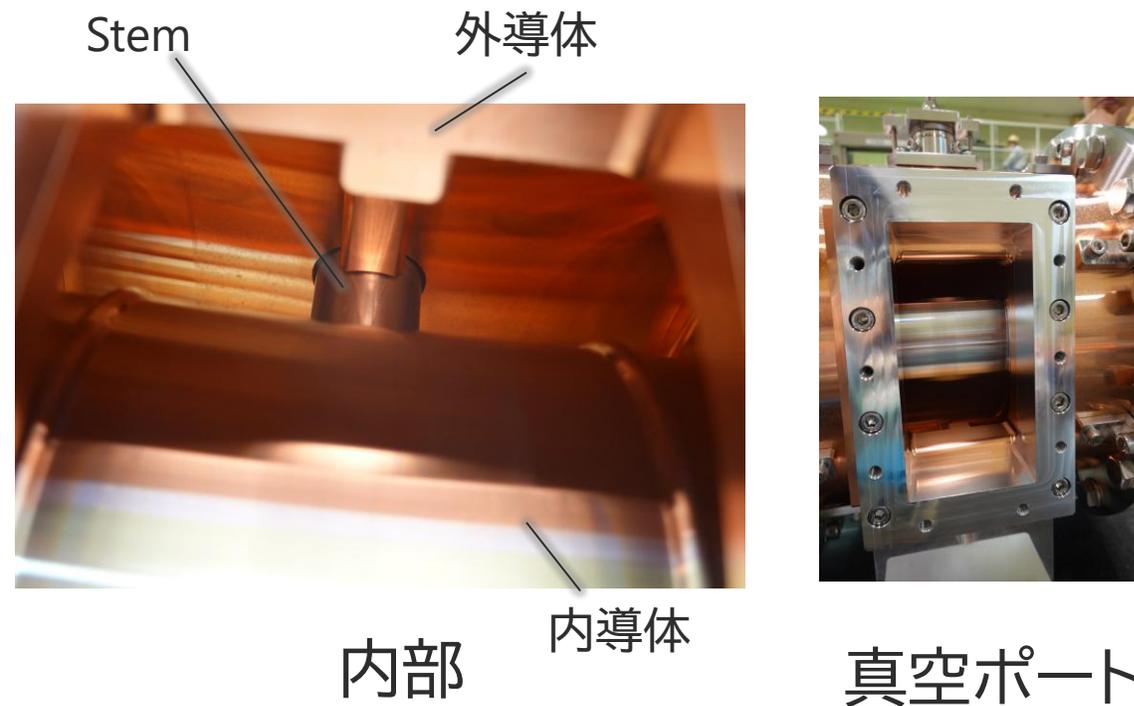


試作機製作

2025年3月に試作機を製作した



外観



試作機全体の製作誤差は0.08 mm未満

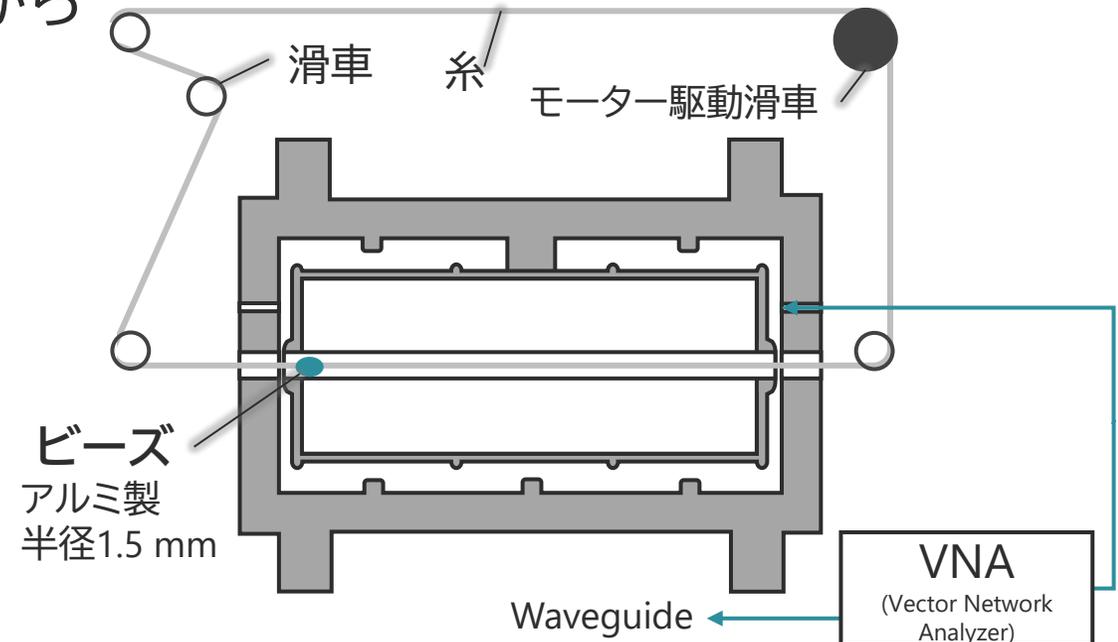
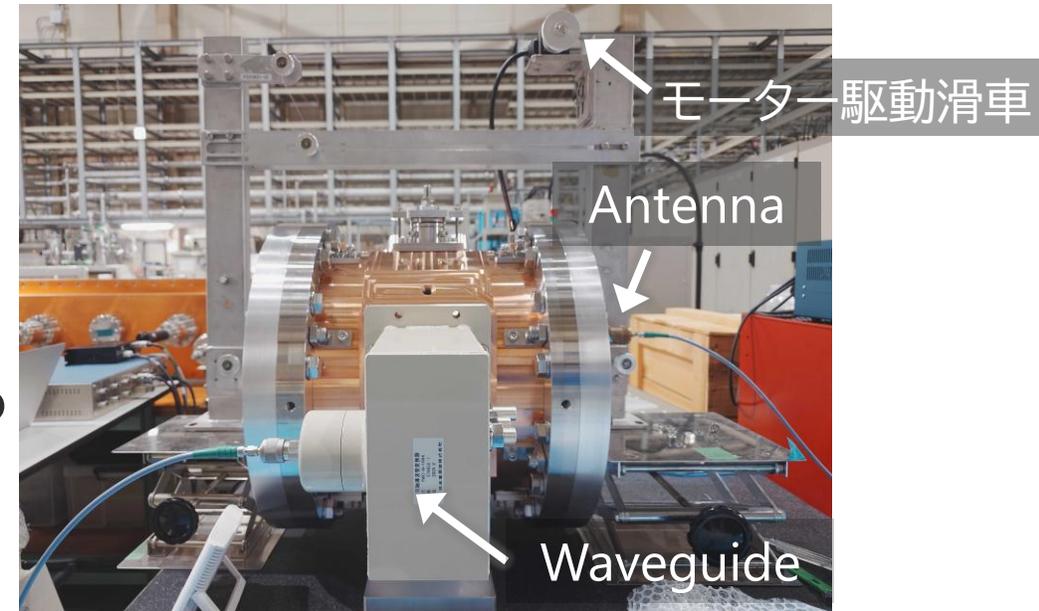
低電力測定

1. 周波数・Q値を測定する
2. ビーズを空洞内に挿入し、電場を測定する
 - ビーズを空洞内に挿入すると摂動が起こり、共振周波数がシフトする
 - スレーターの定理より共振周波数シフトから電場の大きさが求められる

スレーターの定理 *磁場のない領域・導体ビーズの場合

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{3\Delta V}{4U} \epsilon_0 E^2$$

ω_0 : 共振周波数,
 $\Delta\omega_0$: 共振周波数シフト
 ΔV : ビーズの体積
 U : 蓄積エネルギー
 ϵ_0 : 真空誘電率
 E : 電場



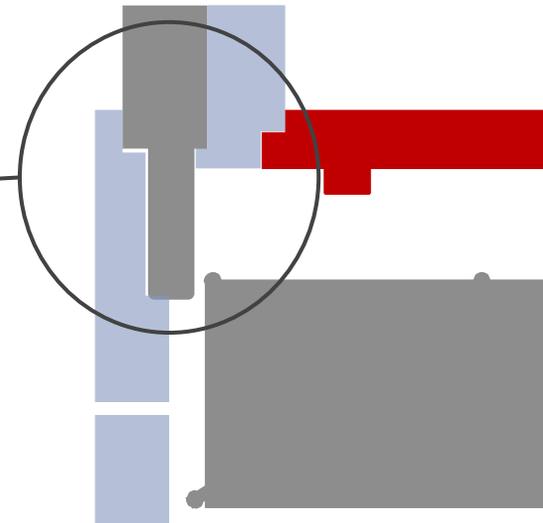
周波数・Q値

| | Simulation*端板を付けた場合 | Prototype |
|------------|---------------------|----------------------------|
| 共振周波数[MHz] | 1296.3 ± 0.01 | 1295.4 ± 0.01 |
| Q_0 | 7002 | 3493 (Simulationの49.9%) |

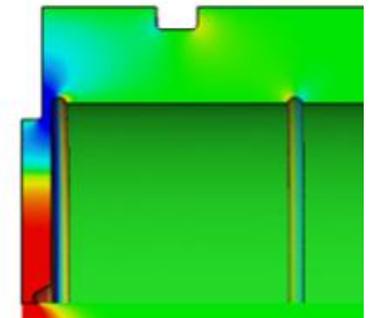
- 測定とシミュレーションの不一致については現在調査中

予測される原因

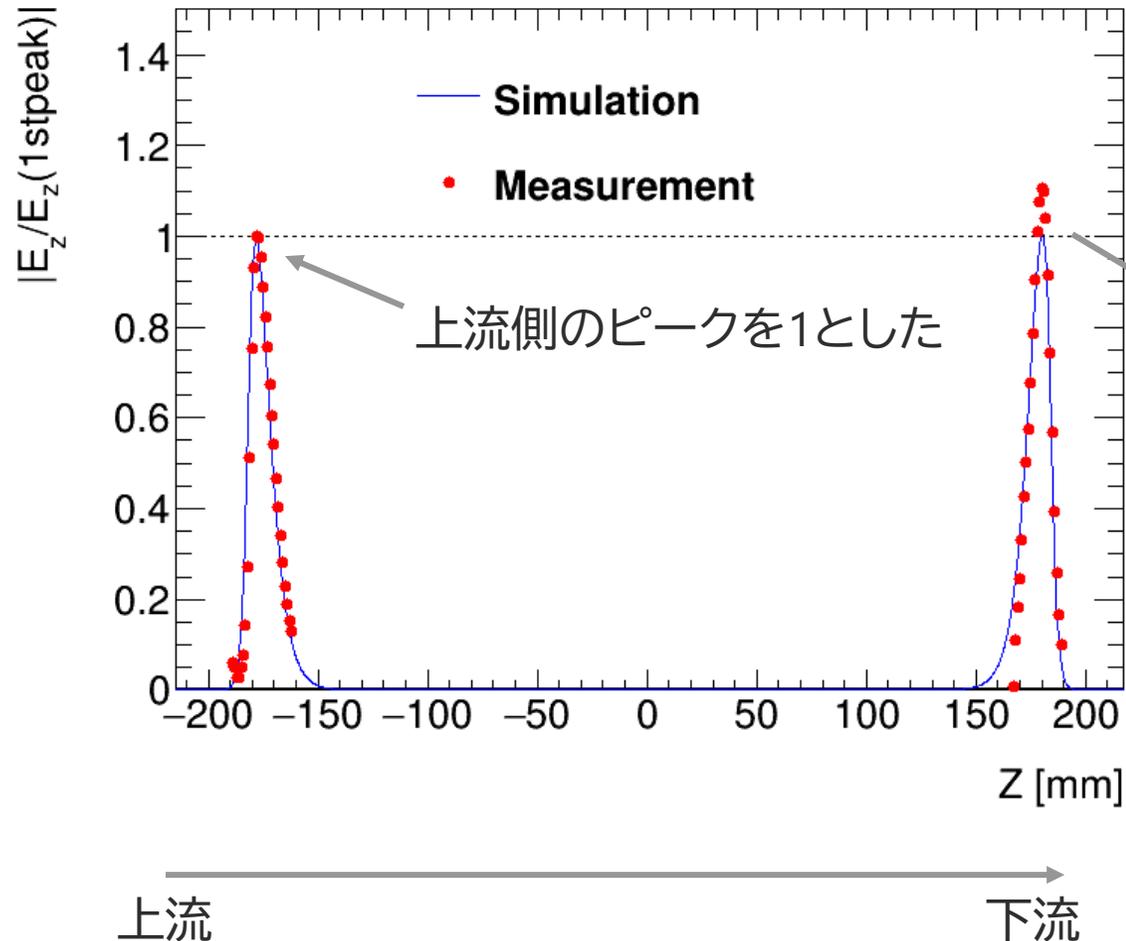
- 構造同士の不完全な接触
- 端板付近は電場の強度が高いため接触が不完全だと影響が大きい



シミュレーションでの E_z



軸方向電場の平坦度



- シミュレーション結果と測定データを比較した

上流側に対する下流側のピーク比

Simulation *端板を付けた場合

Prototype

+1.63%

+10.5%

- 加速モードの励起を確認することができた
- 平坦度は約+11%だった
- シミュレーションとの差は製作誤差から予想される誤差より大きい(後述)

製作誤差と電場に関する考察

電場の平坦度には内導体と端板の距離が影響する

→製作誤差と電場誤差を比較した

製作誤差: 上流側 +0.06 mm, 下流側 - 0.02 mm

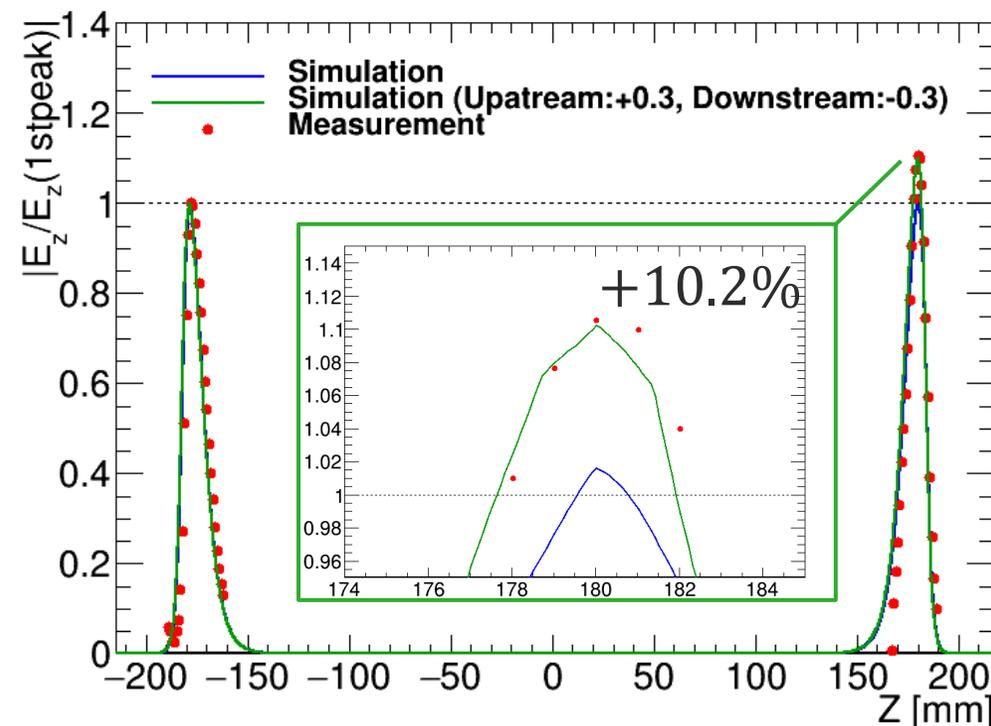
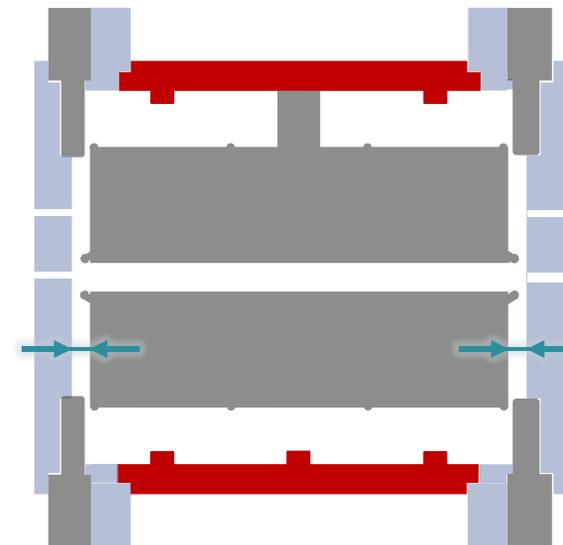
シミュレーション

- シミュレーション上で内導体と端板の距離を変化させた

| 上流側 | 下流側 | 平坦度 |
|----------|-----------|--------|
| +0.06 mm | - 0.02 mm | +2.45% |
| +0.30 mm | -0.30 mm | +10.2% |

- 上流側が+0.3 mm, 下流側が-0.3 mmのとき
測定結果(+10.5%)と近くなる

→製作誤差だけでは電場の誤差は説明できないため、
他の要因を考える必要がある

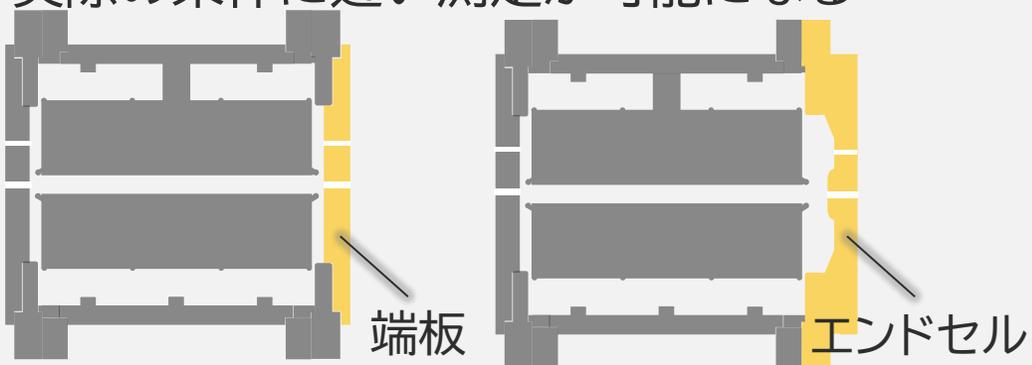


今後の予定

Q値や電場分布の応答をさらに調査する

エンドセルの製作

- 端板の境界条件をTankに近づけたもの
- 実際の条件に近い測定が可能になる



TankとBridge couplerを繋げた測定

- TankとBridge couplerを繋げた時のQ値や電場分布への影響を確認する



8月

9月

10月

11月

エンドセル製作

TankとBridge couplerを繋げた測定

エンドセルを用いた電場測定

まとめ

- ミューオン加速器中速部ではDAWを用いてミューオンを光速の30%から70%まで加速する
- ミューオン用DAWにおけるBridge couplerは、乏しい製作実績と平坦な電場強度の要求が課題
- 製作精度や電場を調べるため、Bridge couplerの試作機を製作し、低電力試験を行った
- 加速モードの周波数・Q値・電場を測定した
- 電場の平坦度は+10%程度であり、製作誤差では説明しきれない
- 今後はQ値や電場分布の応答をさらに調査する

Backup

測定手法

一様磁場中でのスピン歳差運動とサイクロトロン運動のずれを測定する

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c}) \right]$$

$a_\mu = \frac{g_\mu - 2}{2}$ を精度よく測定するため、第2項を消去する

先行実験

- $\left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) = 0$ となる γ を選ぶ
- 集束電場を用いる

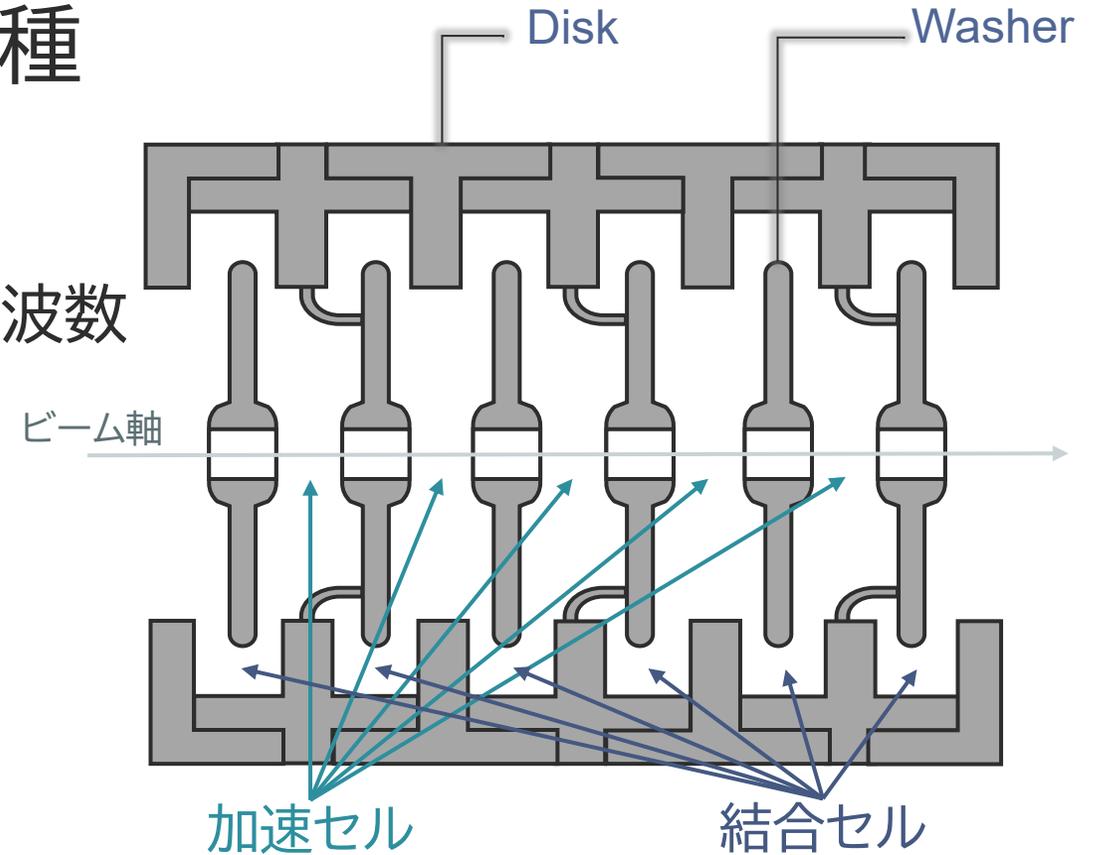
J-PARC

- 任意の γ を選択
- 集束電場を用いない ($\vec{E} = \mathbf{0}$)

→異なる手法での測定により独立した検証を行う

Disk and Washer(DAW) CCL

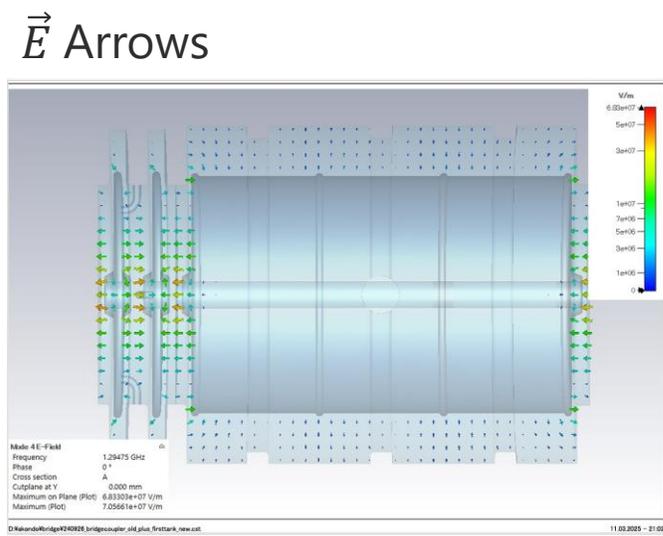
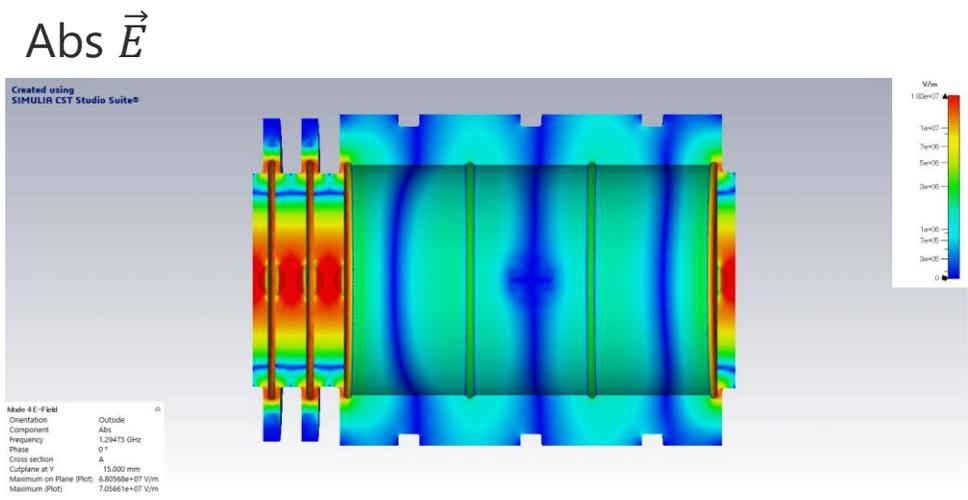
- 結合空洞線形加速器(CCL)の一種
 - Bi-periodic structures
 - 加速セルと結合セルが交互に並ぶ
 - 加速モード周波数 = 結合モード周波数
- 中速度領域で高い電力効率
- セル間の結合が強い
 - 電場の安定性が高い



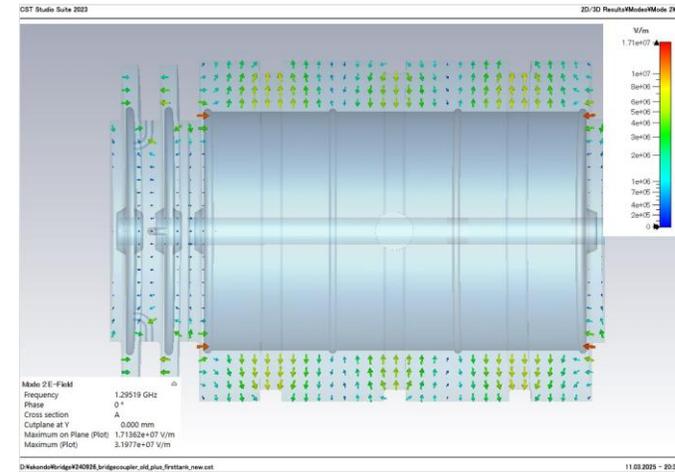
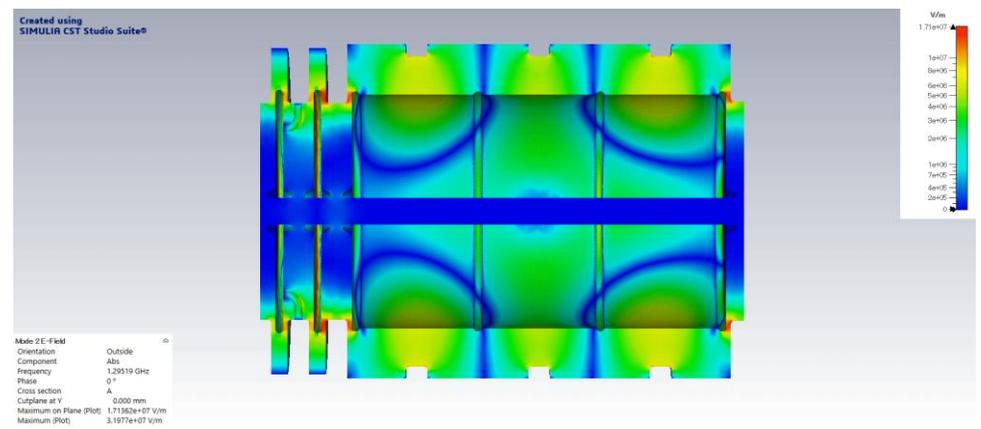
DAW-CCL断面図

加速モードと結合モード

加速モード
(加速セルが励起される)



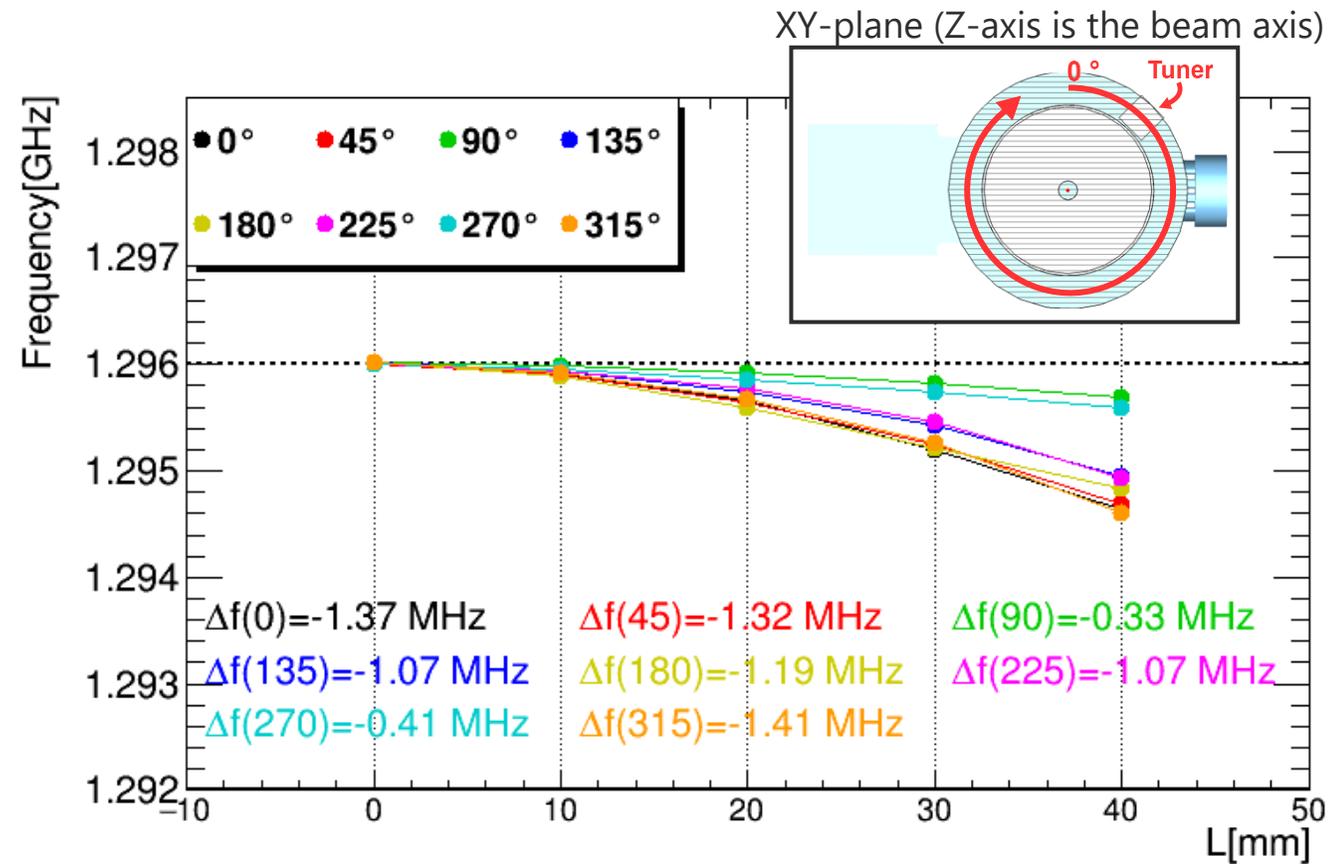
結合モード
(結合セルが励起される)



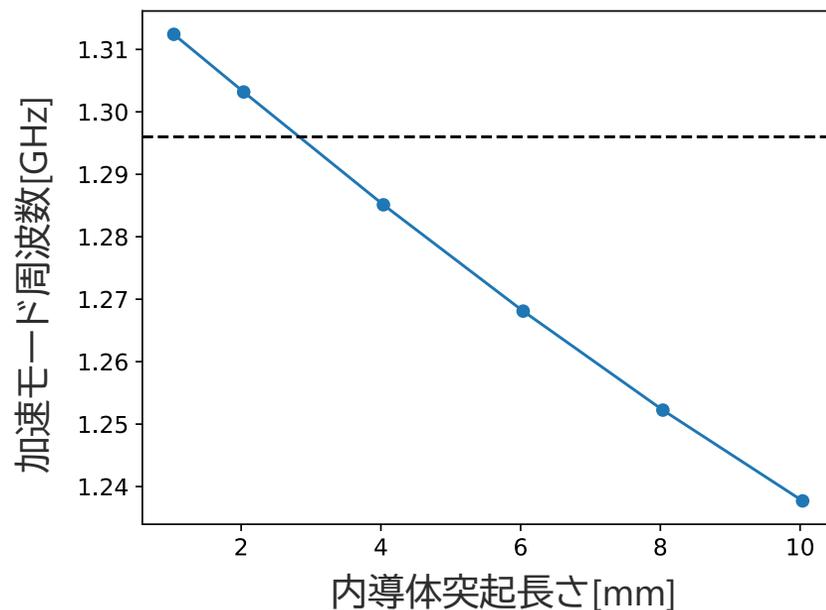
チューナー

チューナー: 挿入量を調節できる円筒

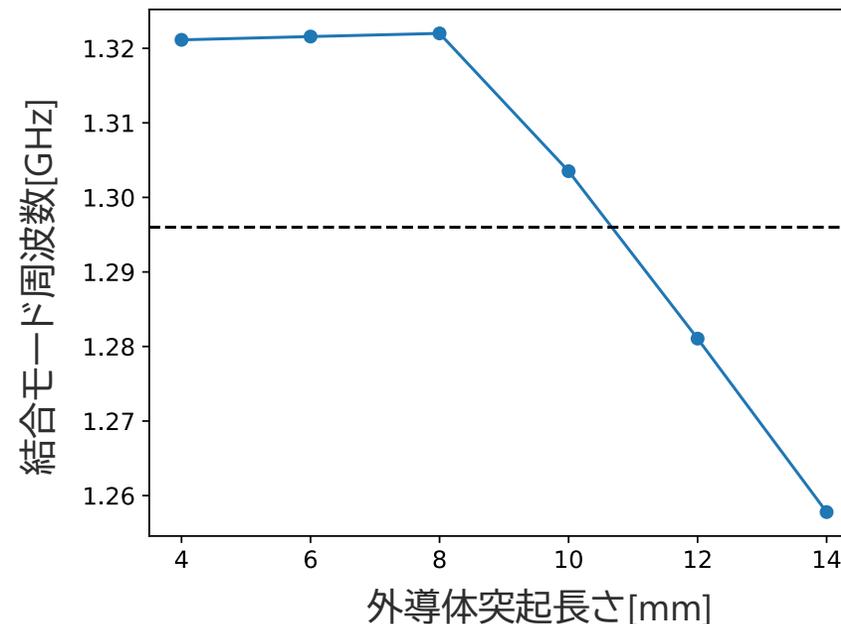
- チューナーの設置角度依存性を調べた結果、調整可能角度が大きく、他の構造と干渉しない45°の位置に決定した
- チューナー1つで加速モード周波数を約1 MHz下げることができる。



突起による周波数調整



~-9 MHz/mm



~-11 MHz/mm

最終設計

内導体突起長さ: 2.82 mm 外導体突起長さ: 10.69 mm

電場の平坦度(P.7)の拡大図

