

# SuperKEKB／陽電子ダンピングリング用 高周波加速空洞の開発

阿部 哲郎

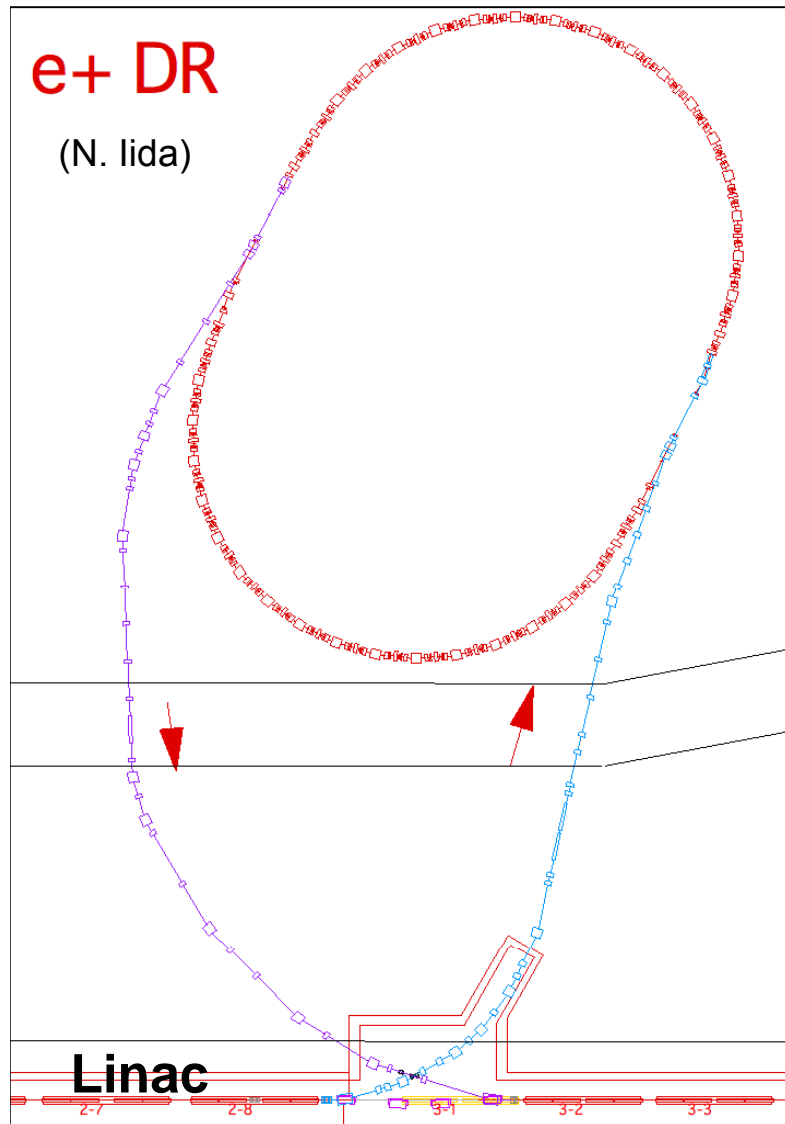
KEK／SuperKEKB-RF／アレス空洞グループ

2012年8月9日

第9回日本加速器学会年会

ナノ・ビーム・スキームに基づくSuperKEKB/MainRing(MR)への  
低エミッタンス陽電子入射のための

# ダンピングリング(DR)



Parameters of the Damping Ring

Energy	1.1	GeV
No. of bunch trains/ bunches per train	2 / 2	
Circumference	135.5	m
Maximum stored current*	70.8	mA
Energy loss per turn	0.091	MV
Horizontal damping time	10.9	ms
Injected-beam emittance	1700	nm
Equilibrium emittance(h/v)	41.4 / 2.07	nm
Coupling	5	%
Emittance at extraction(h/v)	42.5 / 3.15	nm
Energy band-width of injected beam	$\pm 1.5$	%
Energy spread	0.055	%
Bunch length	6.5	mm
Momentum compaction factor	0.0141	
Number of normal cells	32	
Cavity voltage for 1.5 % bucket-height	1.4	MV
RF frequency	509	MHz
Inner diameter of chamber	32	mm
Bore diameter of magnets	44	mm

\* 8 nC/bunch

(M. Kikuchi, MAC11)

MAC10

1.0

12.7

2100

14 / 1.4

10

17.6 / 5.1

5.4

0.0019

0.26

# 基本条件

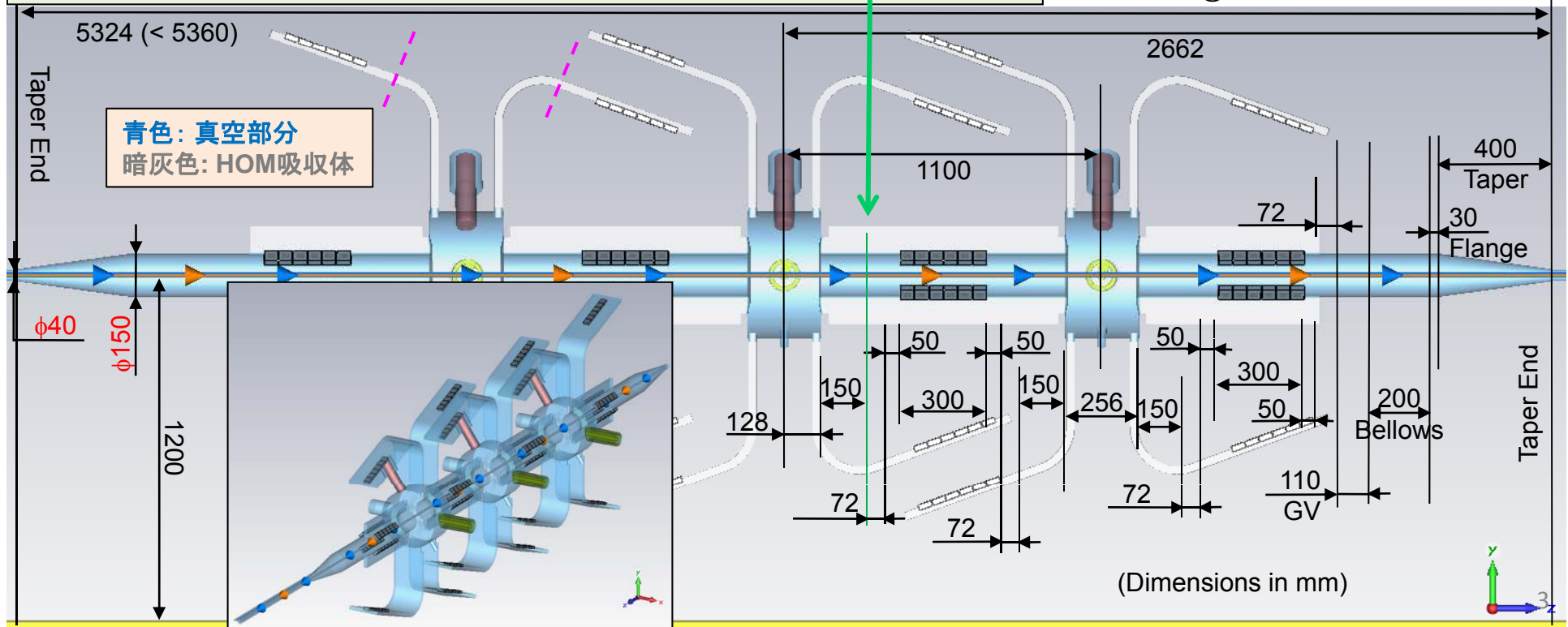
1. 加速モード周波数: 508.887MHz (MRと同じ)
2. 長期安定運転の実績があり、十分なHOM減衰機構を備えた加速構造をベースとする。
3. RF区間内のビーム軸方向 3.8m の領域 (ベローズ、ゲートバルブ、テーパー管は含まず) に収まること。
4. **全加速電圧の定格を1.4MV とする (但し、最低でも1.6MV まで拡張可能であること)。**
  - Coherent Synchrotron Radiation (CSR)による単バンチ不安定性のため、初期の0.26MVから5倍以上になった。
  - アレス空洞の定格は0.5MV/空洞 (最大: 0.7MV/空洞) なので、単純なアレス空洞2台構成では不足。

**KEKB加速器にて長期安定運転の実績のあるアレス空洞(次ページ)をベース**

- ▶ **最大2MVの全加速電圧を保証**

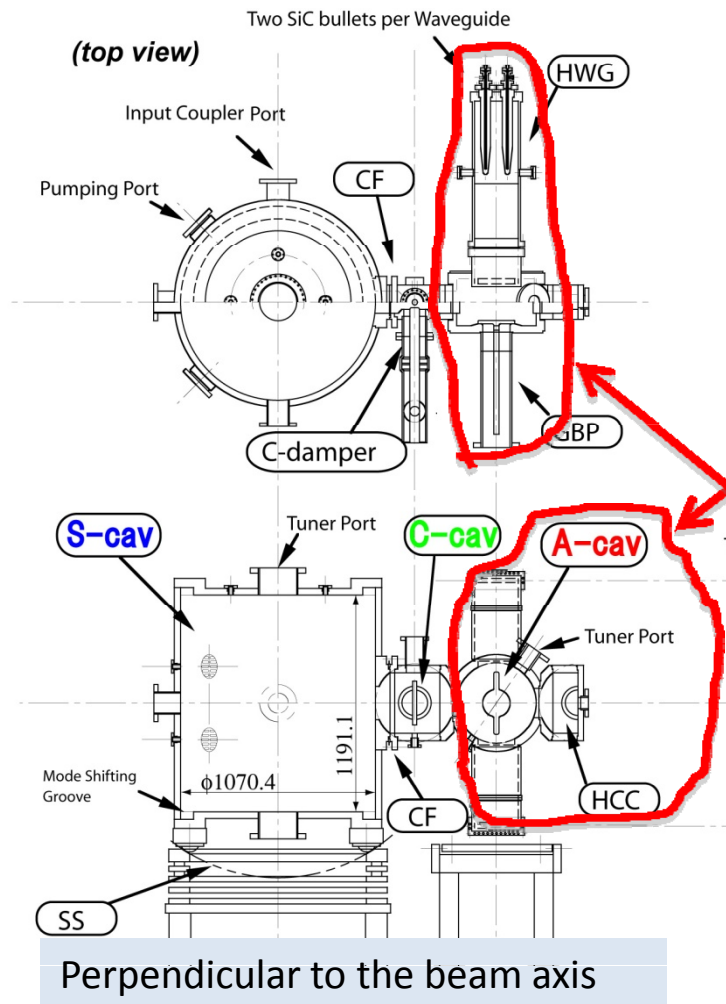
▶ (Super)KEKB-MR  
と比べると、ずっと小さい。

$$\begin{aligned} R/Q &= 150 \, \Omega \\ Q_0 &= 31420 \text{ (IACS100\%)} \\ R_{\text{sh}} &= 4.7 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$



# A<sub>ccelerator</sub> R<sub>esonantly-coupled</sub> with E<sub>nergy</sub> S<sub>torage</sub>

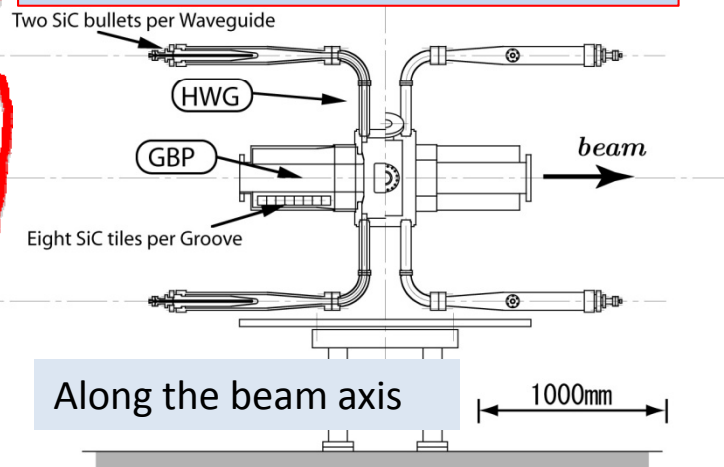
## 3-cavity system stabilized with the $\pi/2$ -mode operation



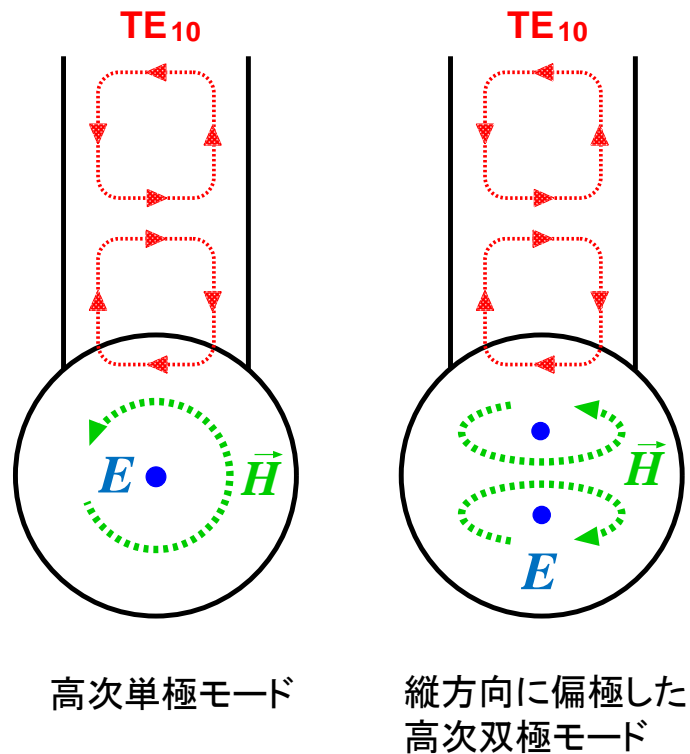
consists of For KEKB-MR

- HOM-damped accelerating cavity (**A-cav**),
- Energy-storage cavity with TE<sub>013</sub> (**S-cav**),
- Coupling cavity (**C-cav**) with a parasitic-mode damper.

**We use only this for the DR.**

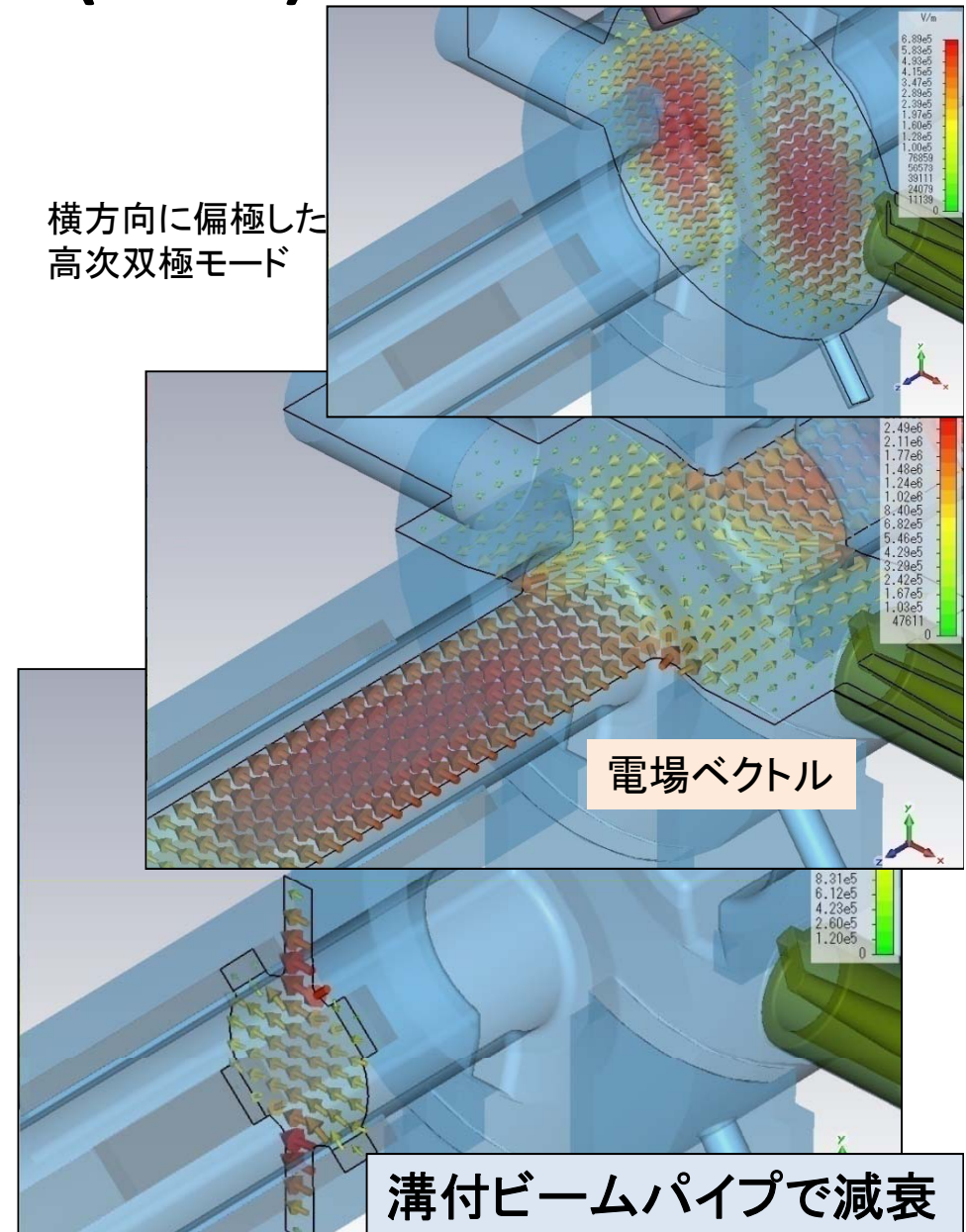


# アレス空洞の Higher-Order-Mode(HOM)減衰機構



上下のHOM導波管で減衰

横方向に偏極した  
高次双極モード





# SuperKEKB/DR用高周波加速構造

KEKB加速器にて長期安定運転の実績のあるアレス空洞をベース

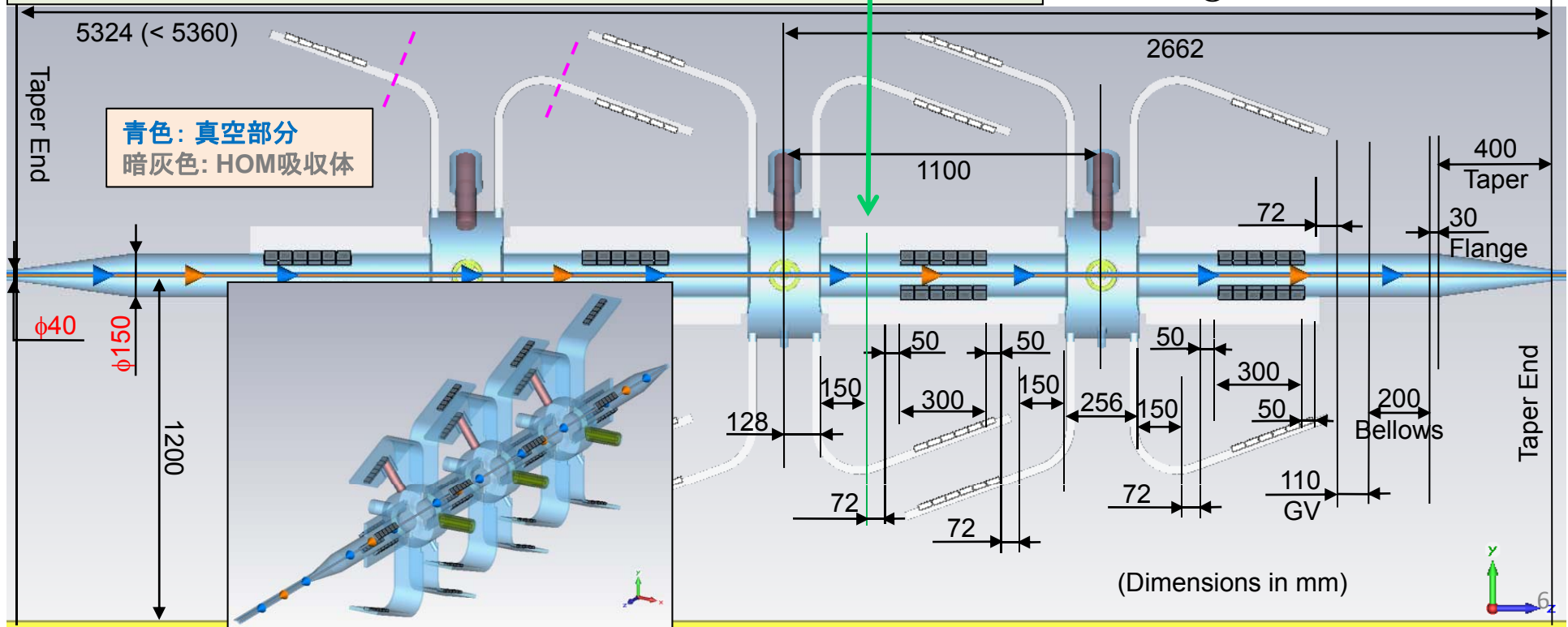
1. 加速モード周波数: 508.887[MHz] (MRと同じ)
2. 加速電圧(定格): **0.7[MV/空洞]** (→壁面損失パワー:133kW/空洞)
3. 加速電圧(努力目標):0.8[MV/空洞] (→壁面損失パワー:180kW/空洞)(次ページ)
4. 最大蓄積ビーム電流: 70.8[mA]
5. HOM吸収体はすべてタイル形SiC
6. 溝付ビームパイプ(GBP)を隣り合う空洞間で共有
7. 空洞-GBP連結部にはフランジを用いない構造
8. 「マルチ・単セル空洞」構造
9. ハイパワー入力結合器: KEBB-MR/アレス空洞で使ったものを再利用
10. 各空洞に排気ポート→良い真空度(< 10<sup>-6</sup>[Pa])で運転

→ **最大2MVの全加速電圧を保証**

→ (Super)KEKB-MR  
と比べると、ずっと小さい。

(空洞あたり)

$$R/Q = 150 \Omega$$
$$Q_0 = 31420 \text{ (IACS100\%)}$$
$$R_{sh} = 4.7 \text{ M}\Omega$$



# 空洞電圧

96試アレス空洞限界性能試験（1997年度にKEK/AR加速器の西トンネル直線部にて実施）の結果に基づき、加速空洞単体の運転定格を導出。

	空洞電圧 [MV]	壁面損失電力 [kW]	壁面温度計算値 [°C]
KEKBデザイン	0.50	60	50
最大連続定格 (時間制限無し)	0.70	133	74
最大瞬間定格 (30分間以内)	0.82	193	94

Note: The DR cavity has been designed with the same basic structure as the ARES/A-Cav on the basis of its successful experiences.

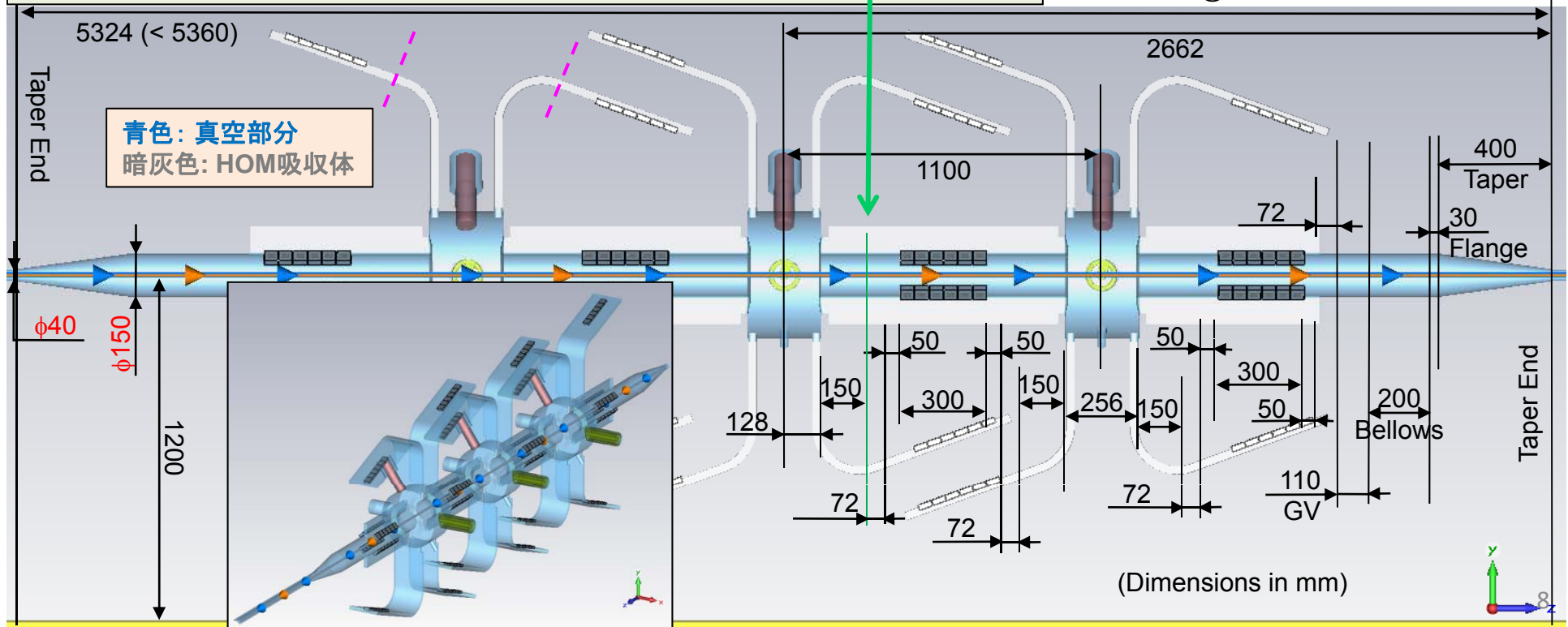


## KEKB加速器にて長期安定運転の実績のあるアレス空洞をベース

- ▶ **最大2MVの全加速電圧を保証**

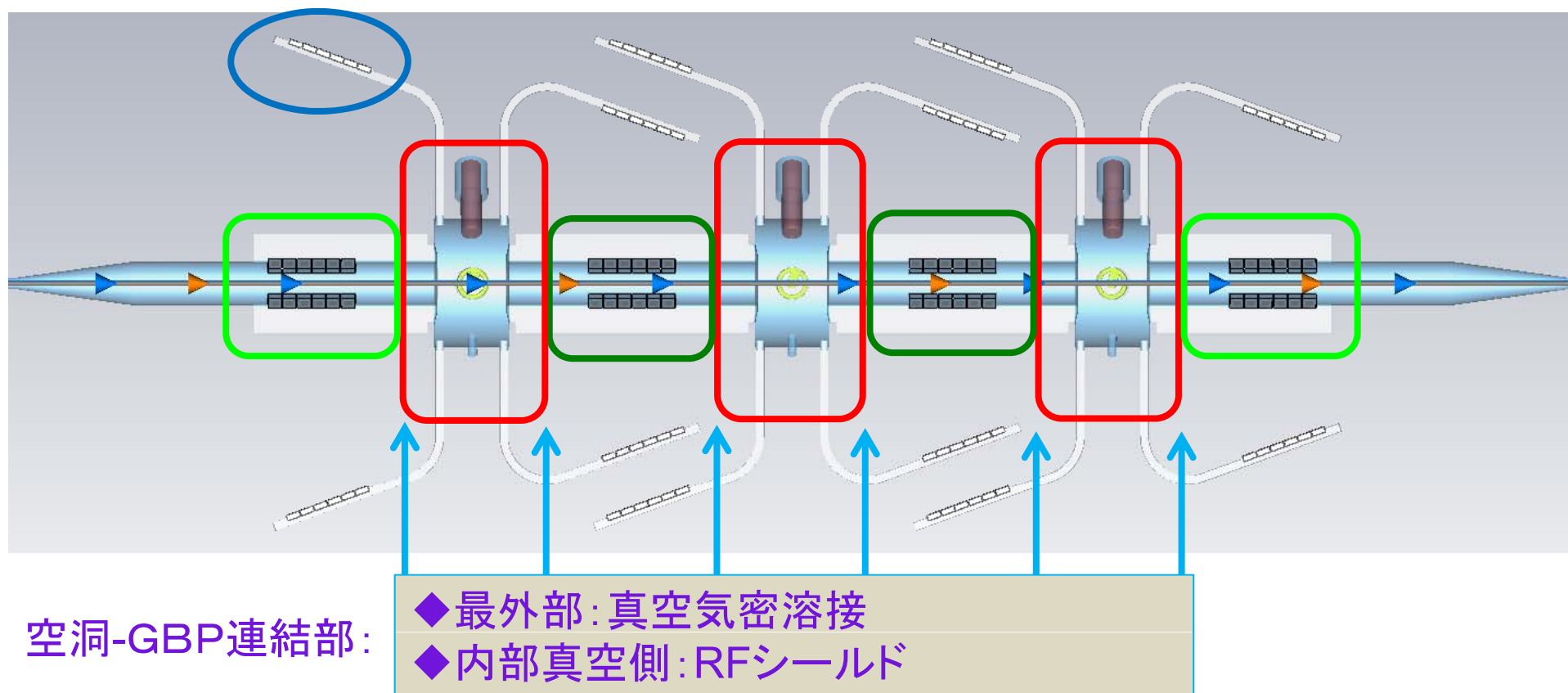
▶ (Super)KEKB-MR  
と比べると、ずっと小さい。

$$\begin{aligned} R/Q &= 150 \, \Omega \\ Q_0 &= 31420 \text{ (IACS100\%)} \\ R_{\text{sh}} &= 4.7 \, \text{M}\Omega \end{aligned}$$



# 4種類のコンポーネント

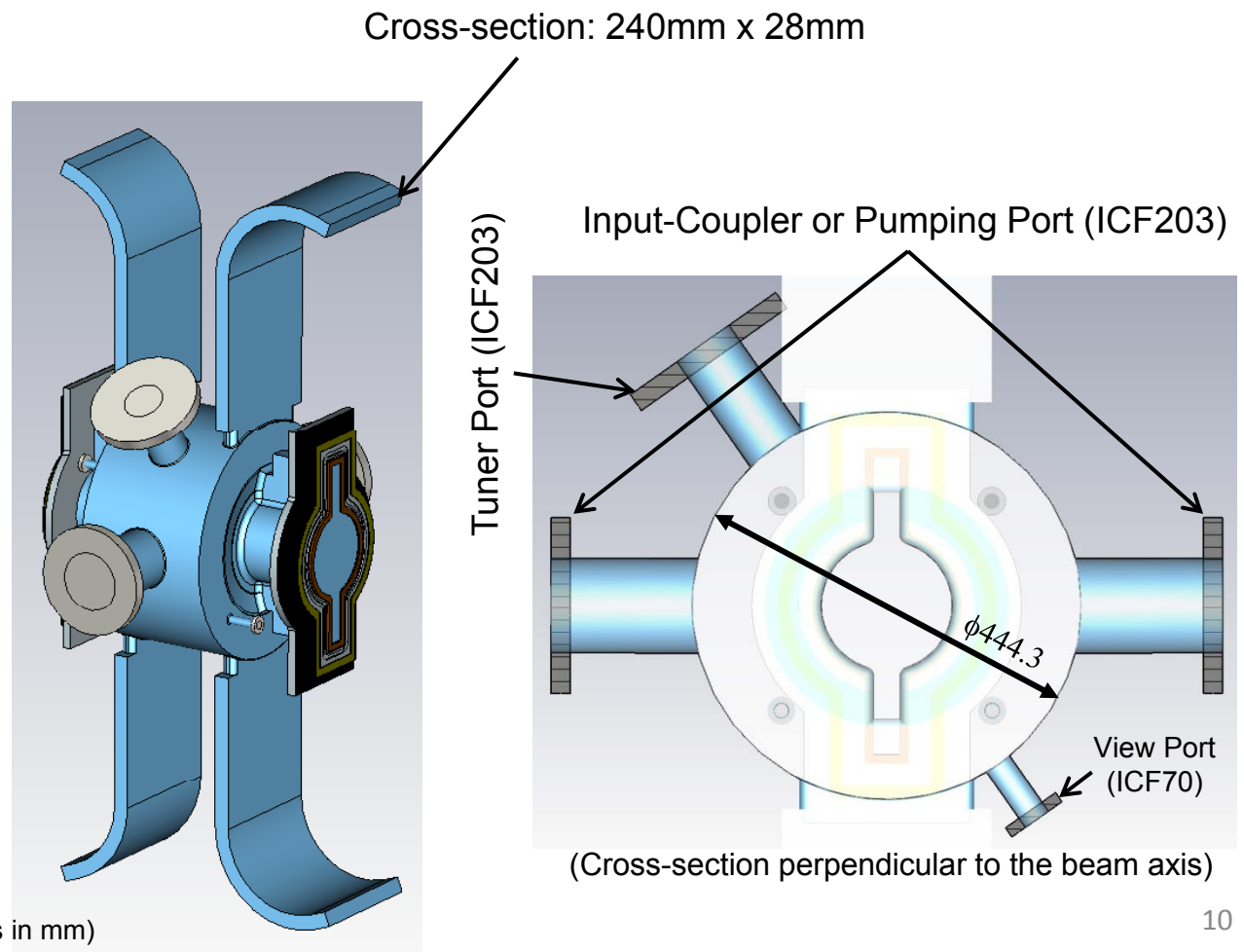
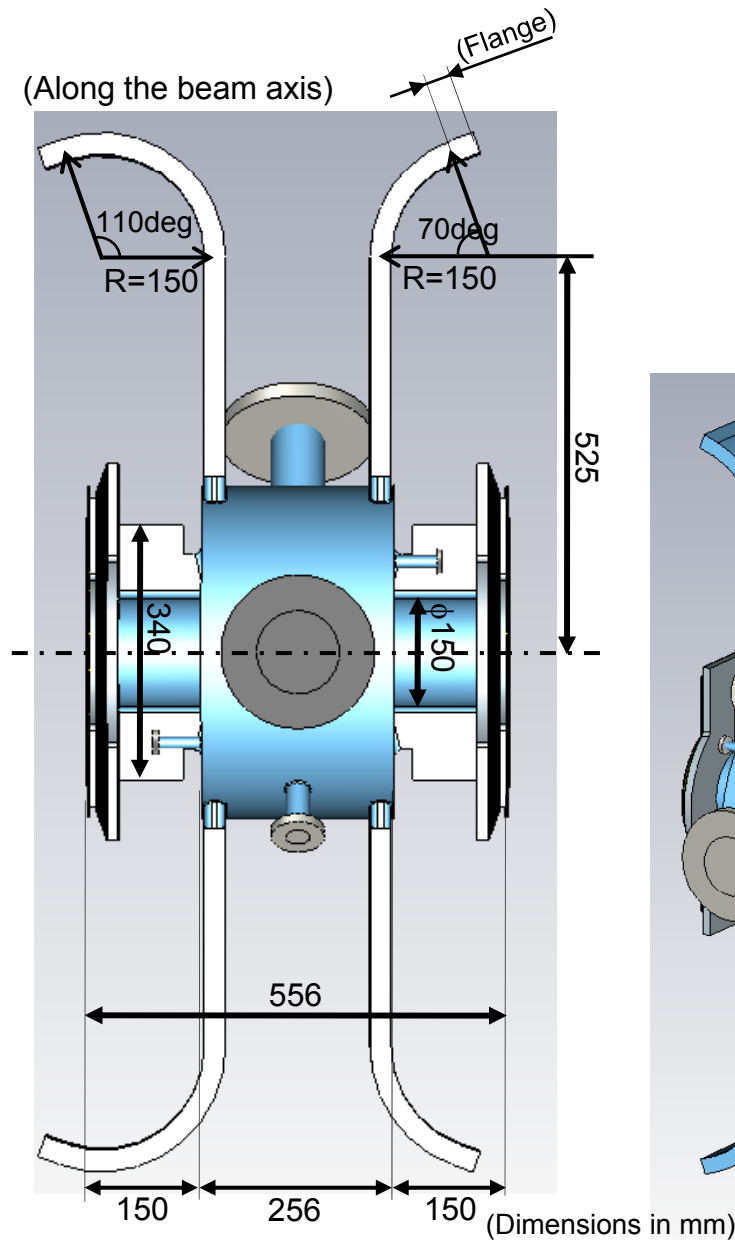
1. 加速空洞本体
2. HOM導波管ロード
3. 溝付ビームパイプ(GBP)(空洞間)
4. 溝付ビームパイプ(GBP)(空洞端)



本構造は、以上のコンポーネントをブロックのように組み立てる方式。

# 1. 空洞本体

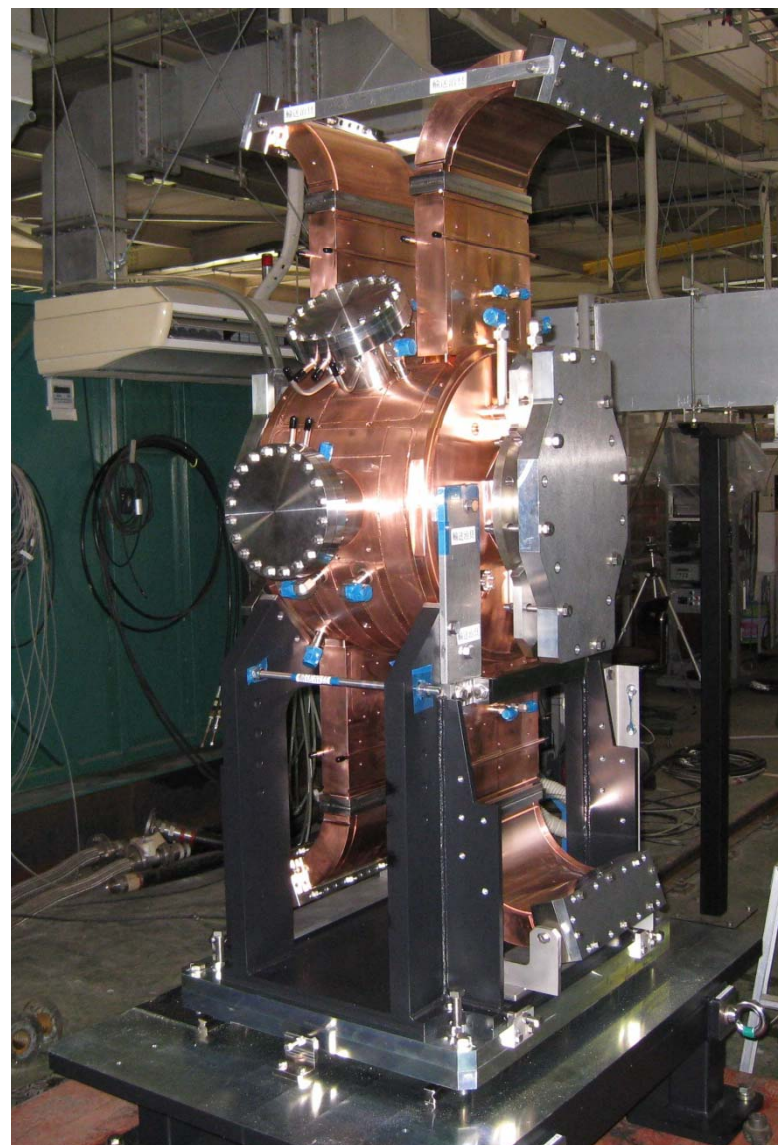
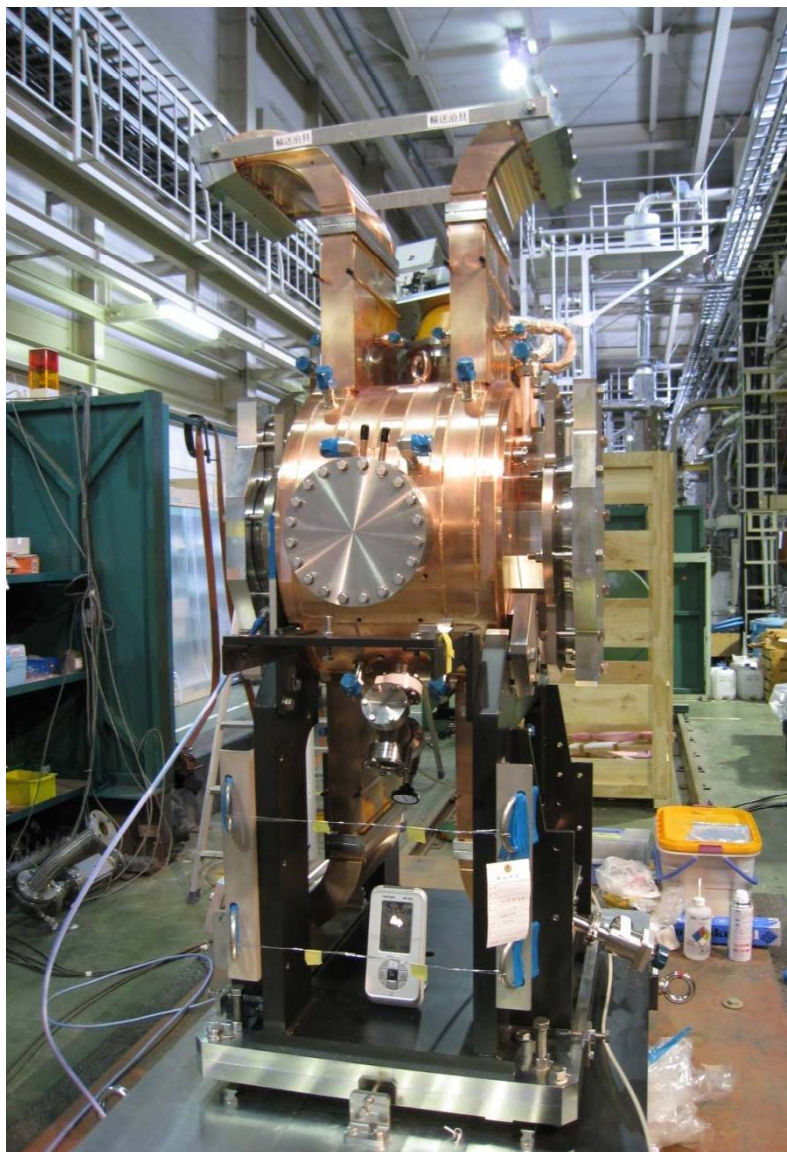
- ✓材質：無酸素銅クラス1（ポート、GBP、HOM導波管を除く）
- ✓鏡面对称（Eバンド、可動チューナ、モニターポートを除く）
- ✓2つの入力結合器用ポート（内ひとつを排気ポートとして使用）





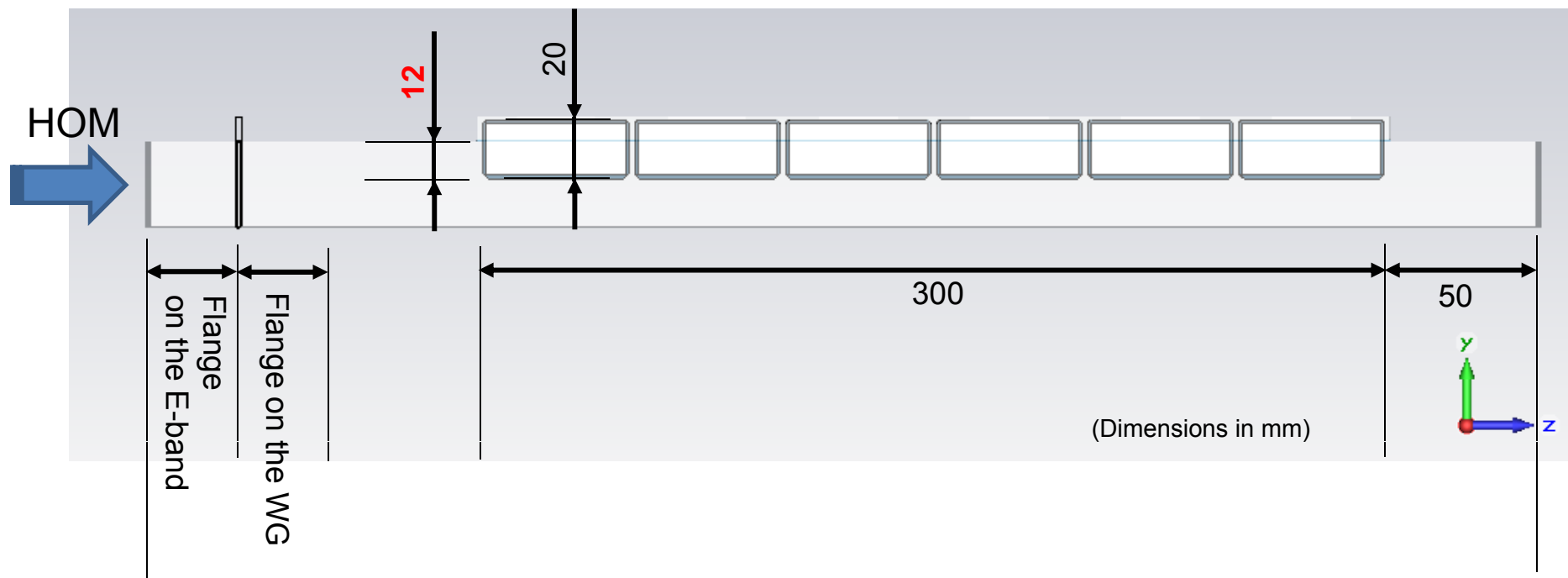
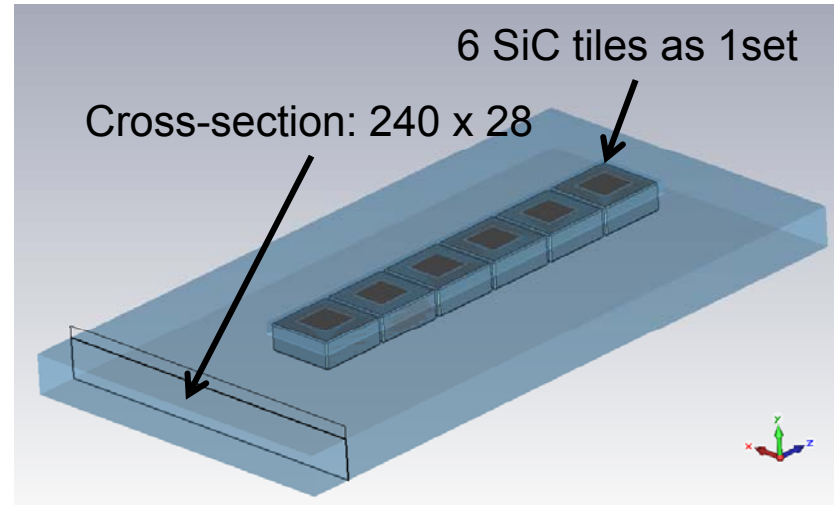
# 空洞本体の試験機

(2011年度製作)



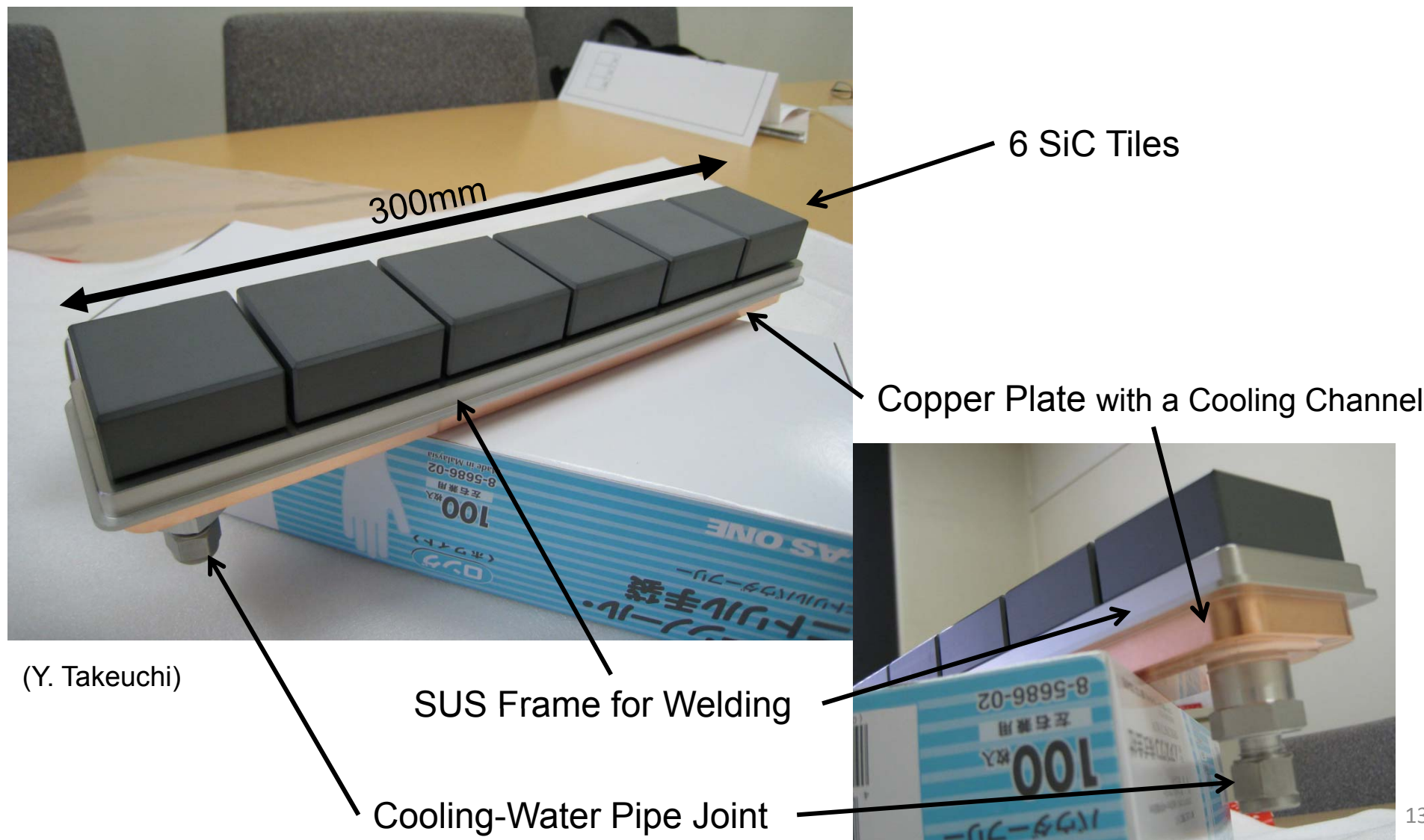
## 2. HOM導波管ロード

- ✓導波管ロードの材質: SUS
- ✓HOM吸収体: SiC (Silicon Carbide) セラミックス
  - 銅板にろう付け
  - 銅板を介した間接冷却
  - KEKB-MR/アレス空洞と同じ
- ✓Power Capability:  $\sim 1\text{kW}/1\text{set}(@1.3\text{GHz})$
- ✓Max. HOM Power:  $\sim 30\text{W}$ ／導波管ロード
- ✓Max. Accl.-Mode Power:  $\sim 100\text{W}$ ／導波管ロード





# A Set of SiC Tiles for the DR Cavity/HOM-WG or GBP





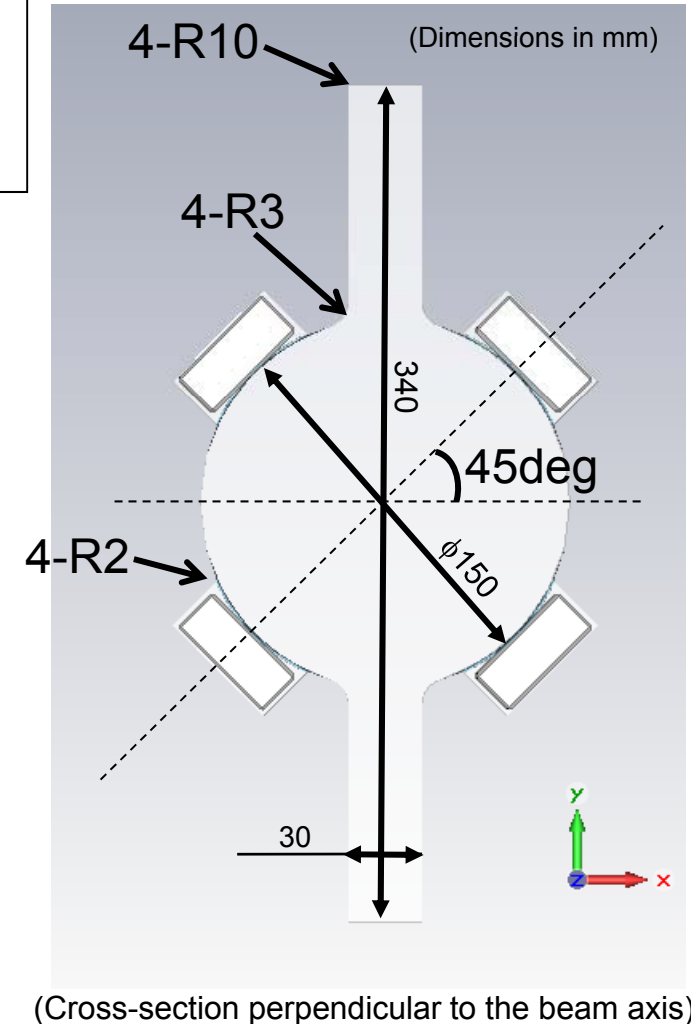
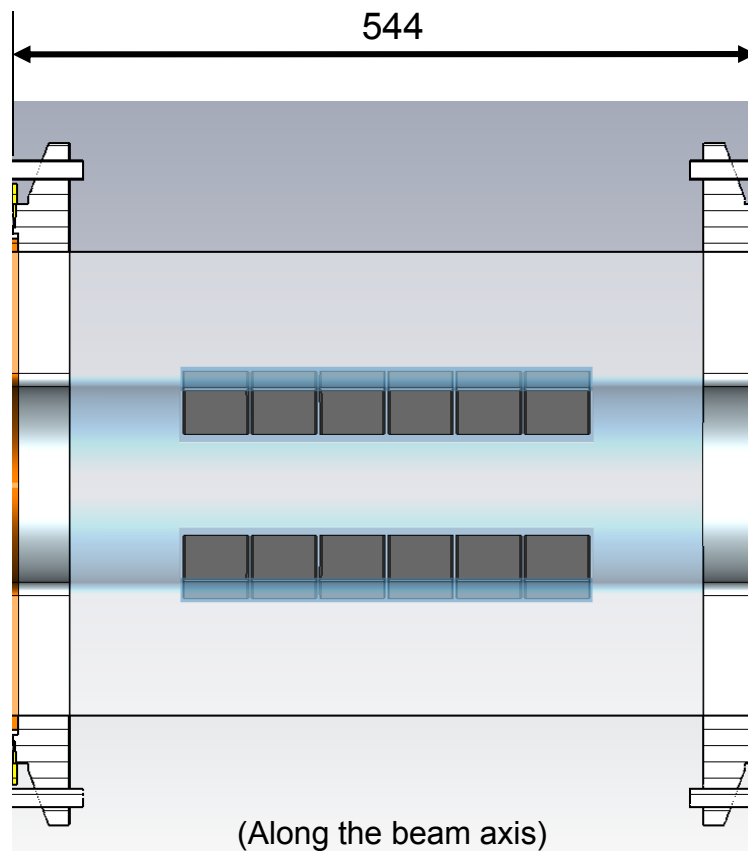
# HOM導波ロードの試験機

(2011年度製作)



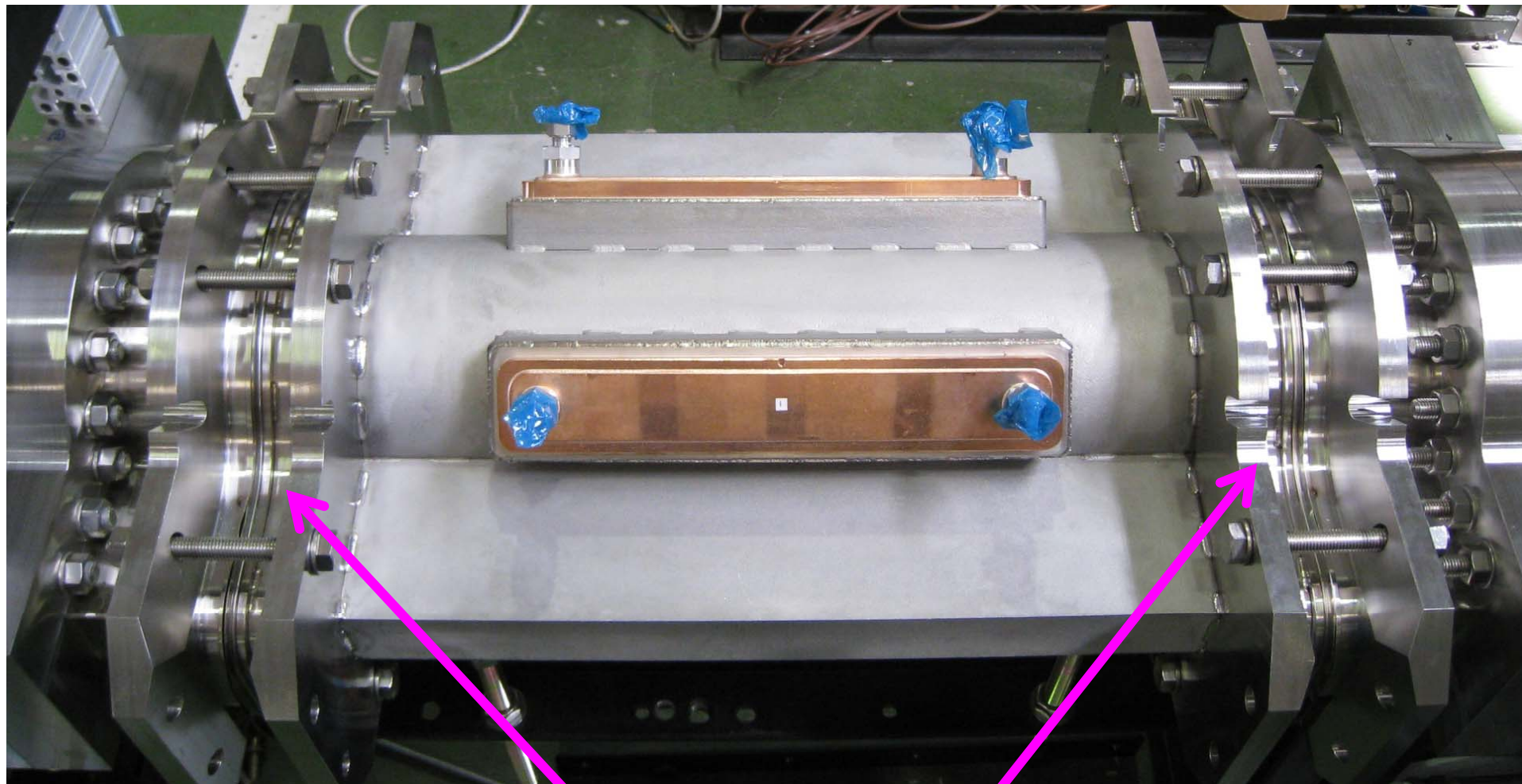
### 3. GBP (空洞間)

- ✓材質: SUS
- ✓HOM吸収体: 4セットのSiCタイル (HOM導波管と同じ)
- ✓Max. HOM Power: ~200W/GBP
- ✓Max. Accl.-Mode Power: ~100W/GBP



# GBP(空洞間)の試験機

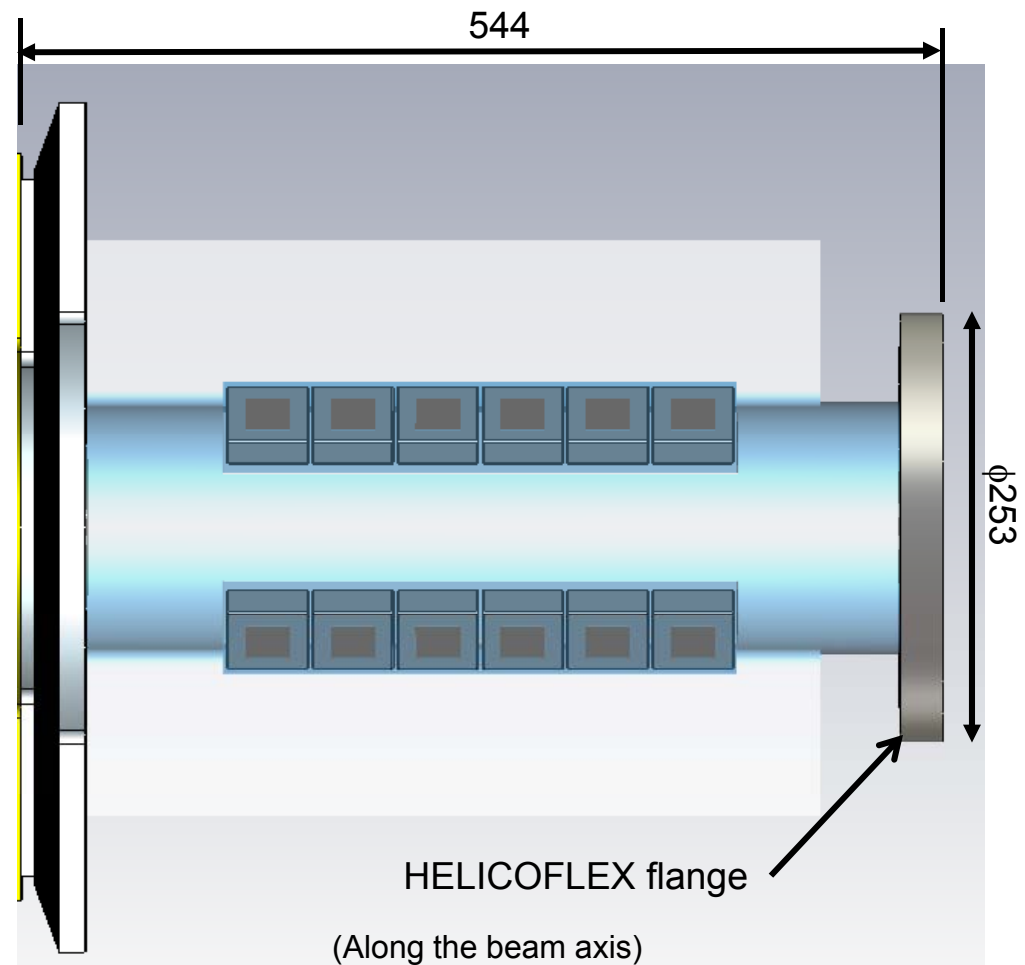
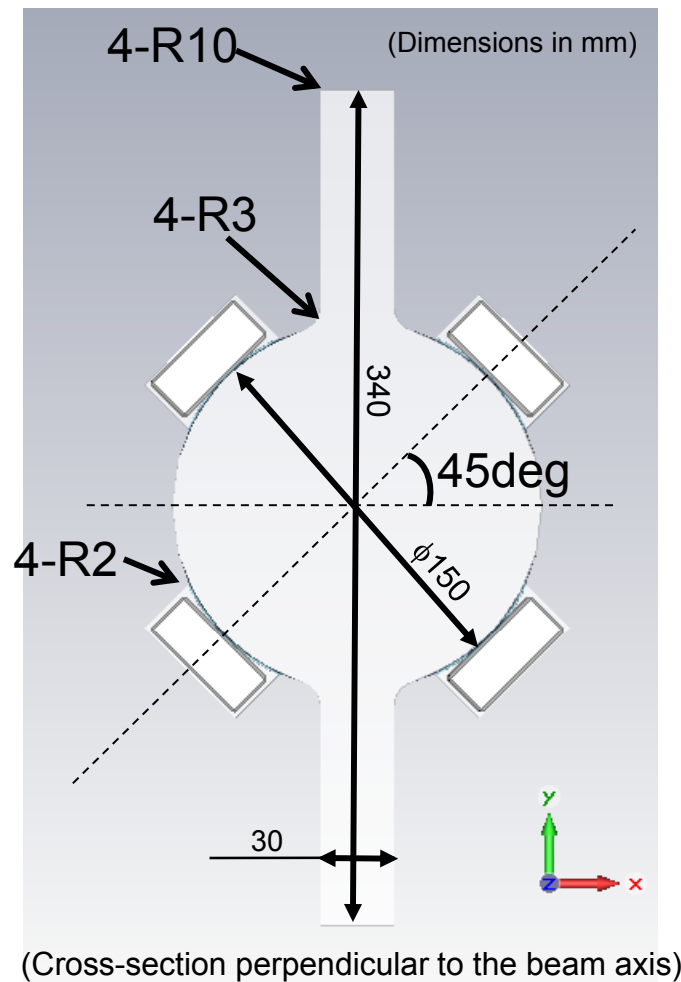
(2011年度製作)



GBP連結部

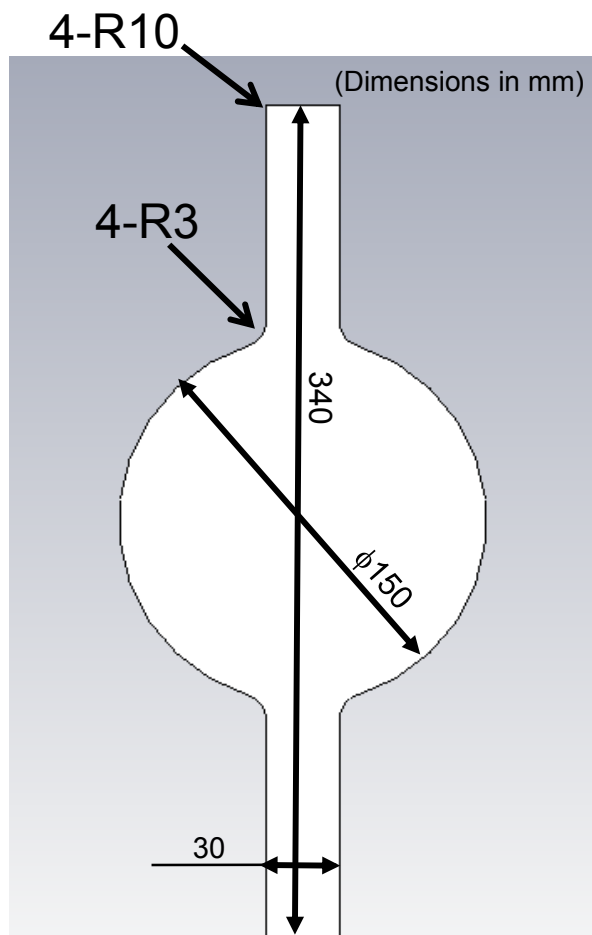
## 4. GBP (空洞端)

- ✓材質: SUS
- ✓HOM吸収体: 4セットのSiCタイル
- ✓Max. HOM Power: ~200W/duct
- ✓Max. Accl.-Mode Power: ~100W/duct

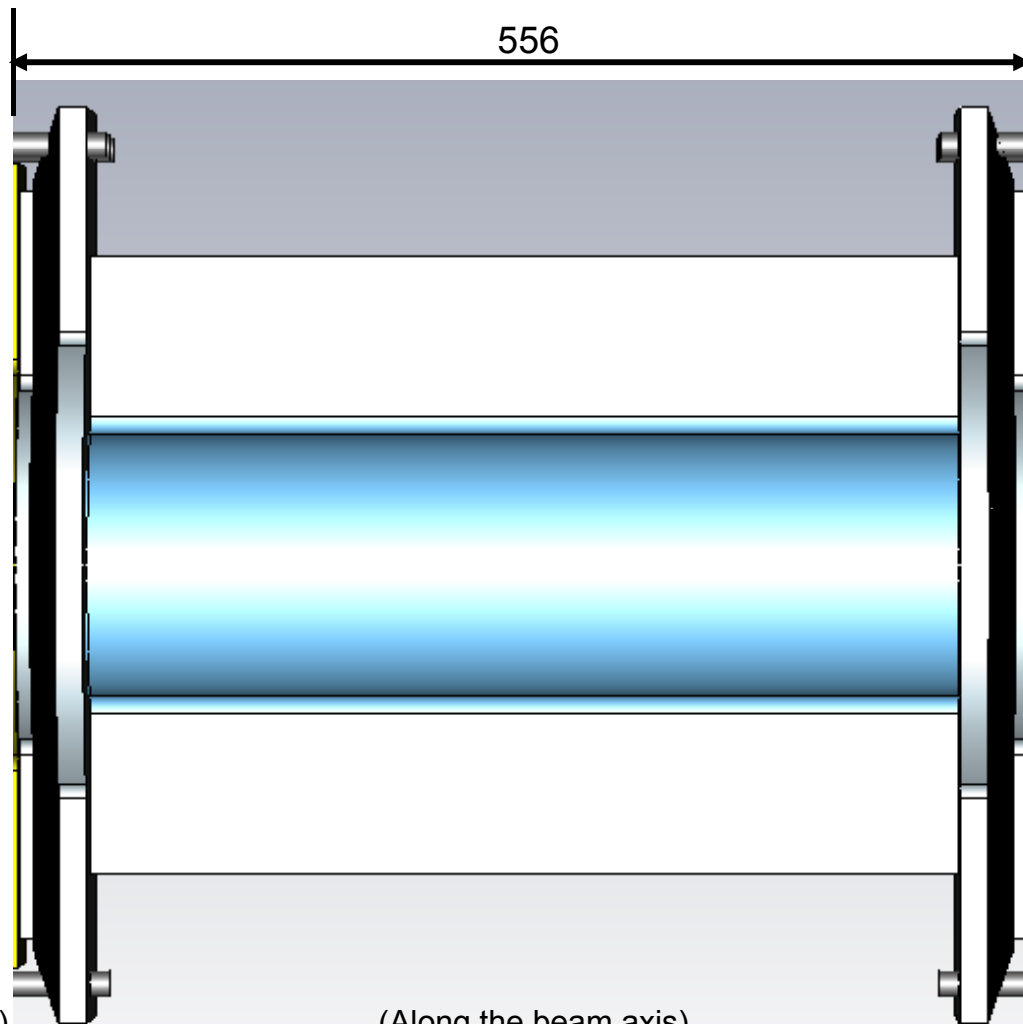


# GBP (ダミー)

- ✓材質:SUS
- ✓HOM吸収体無し
- ✓空洞2台構成時に使用



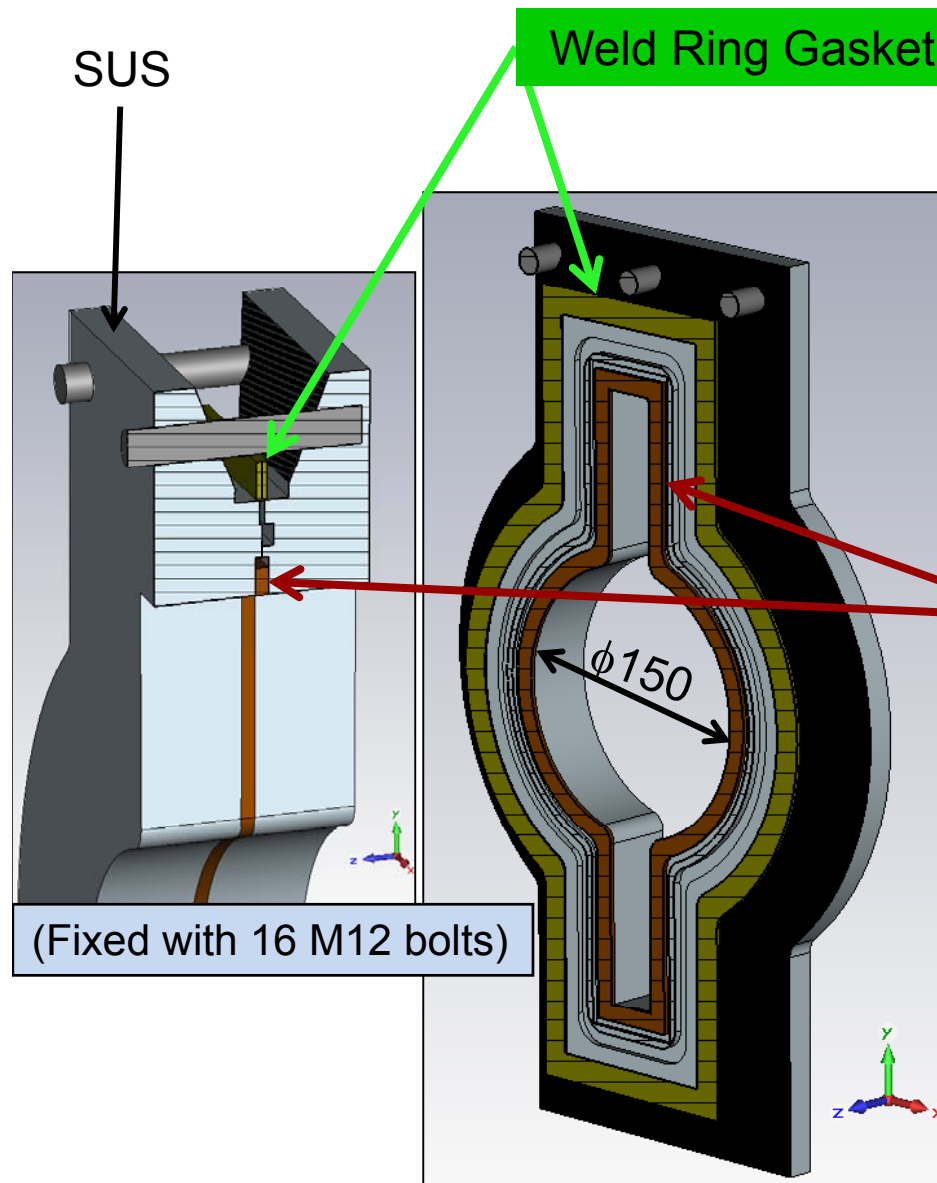
(Cross-section perpendicular to the beam axis)



(Along the beam axis)

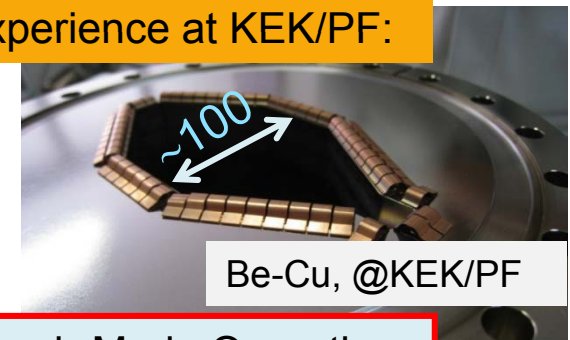


# GBP連結部

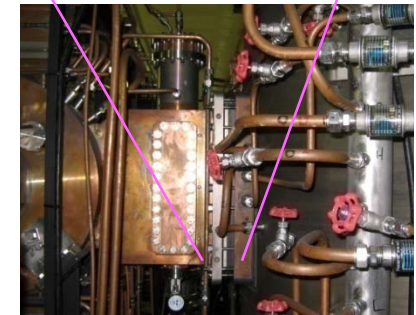
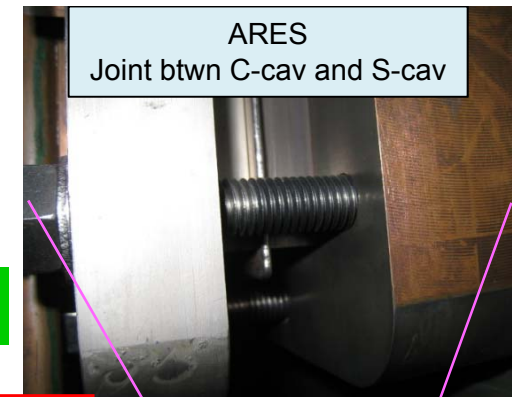


“Welding → Disassembly  
→ ReWelding”  
Possible Several Times

Finger-type RF shield  
- Successful experience at KEK/PF:



Single-Bunch-Mode Operation  
- Beam current: 70 mA (max.)  
- Bunch length: 24 mm



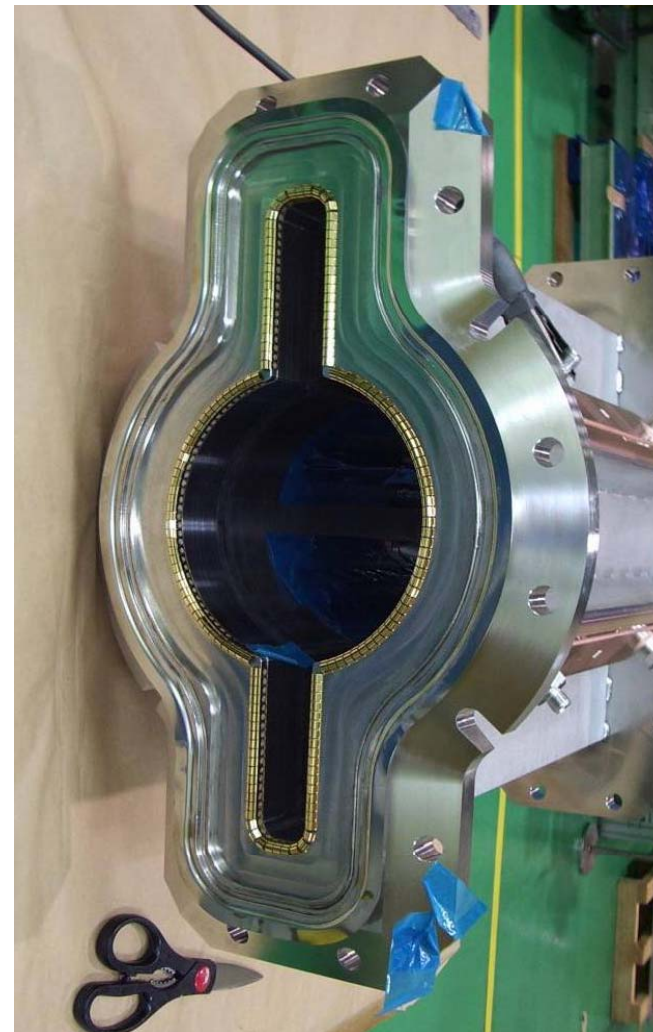


# 試験機のGBP連結部

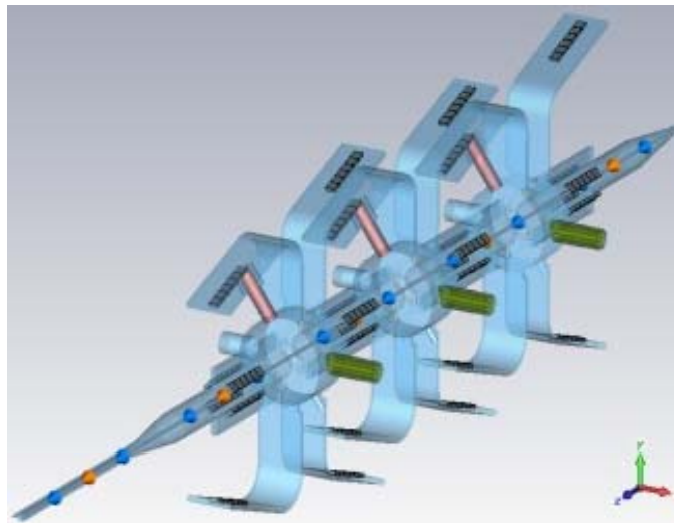
加速空洞側



GBP側

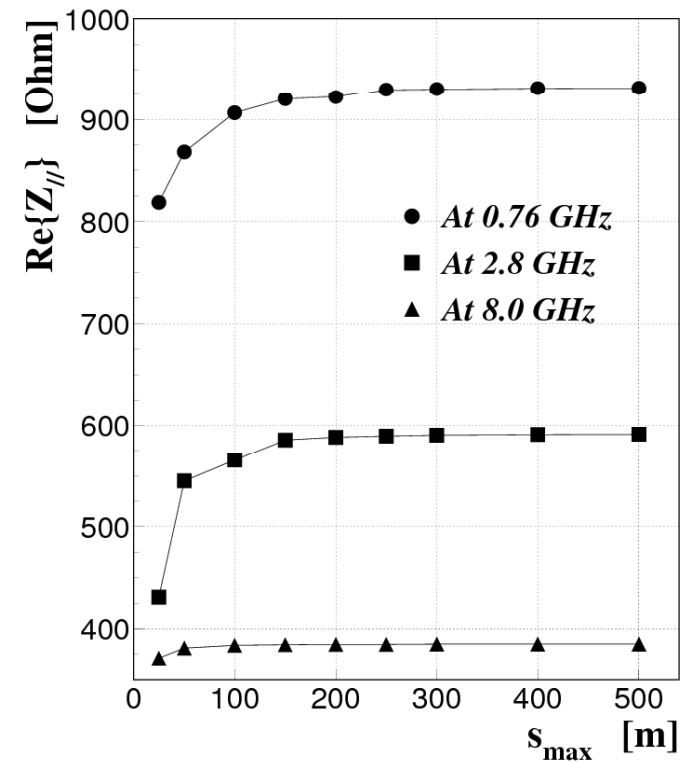
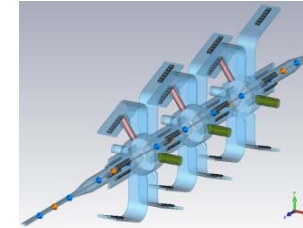
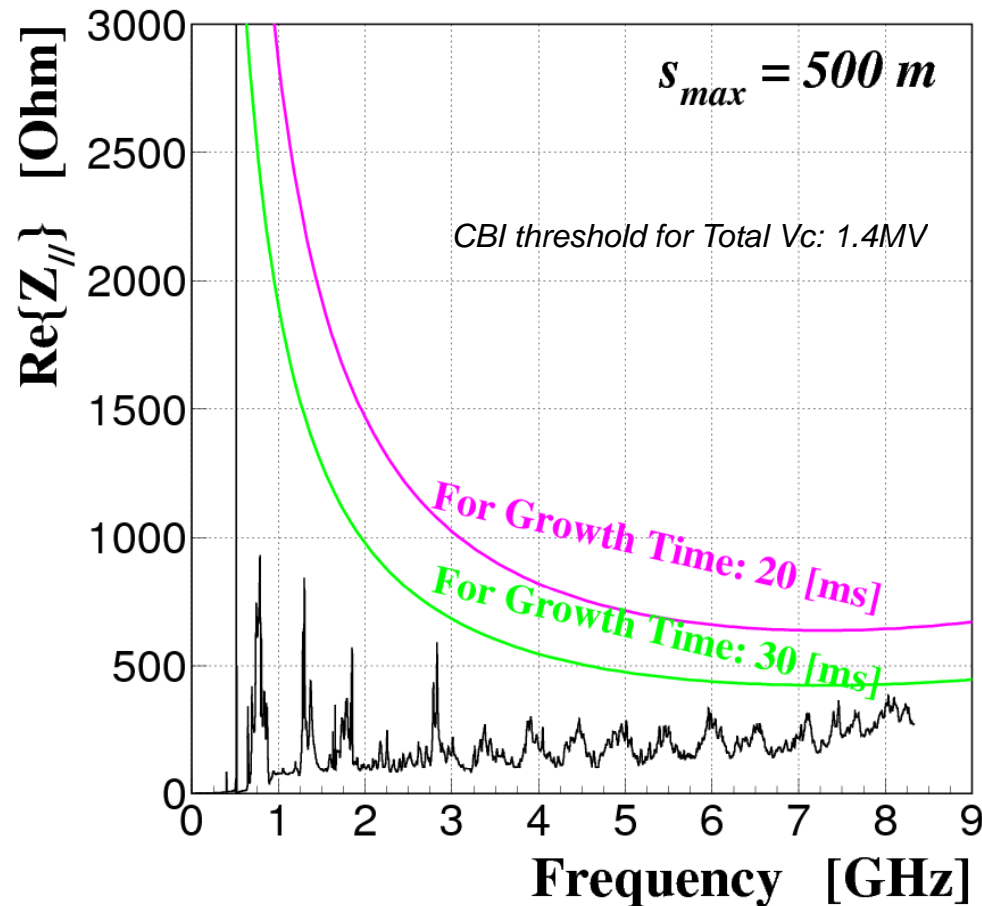


# 結合インピーダンスと 結合バッチ不安定性



# 進行方向結合インピーダンス計算結果

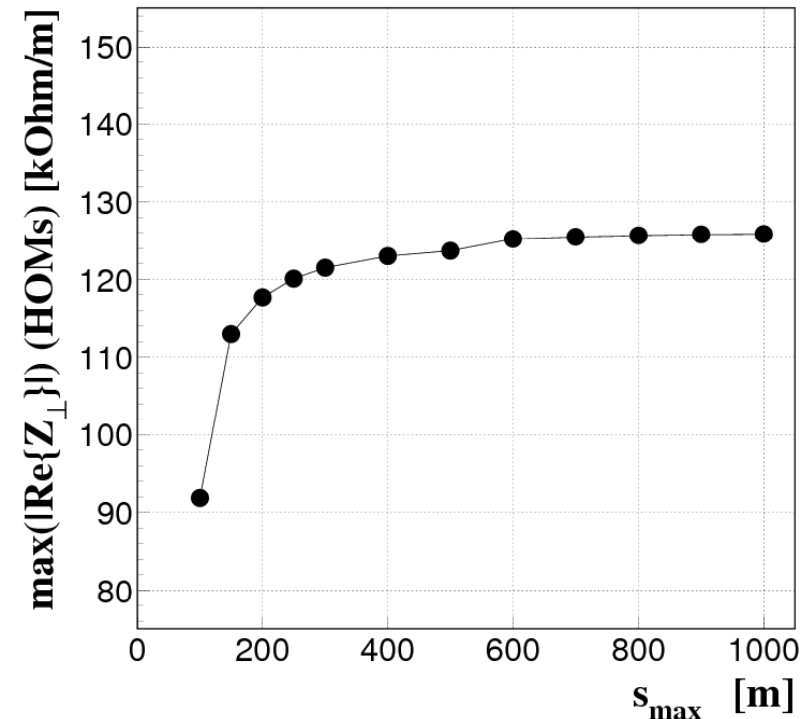
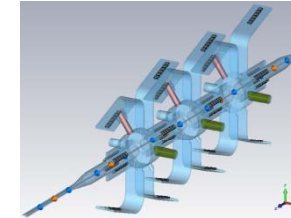
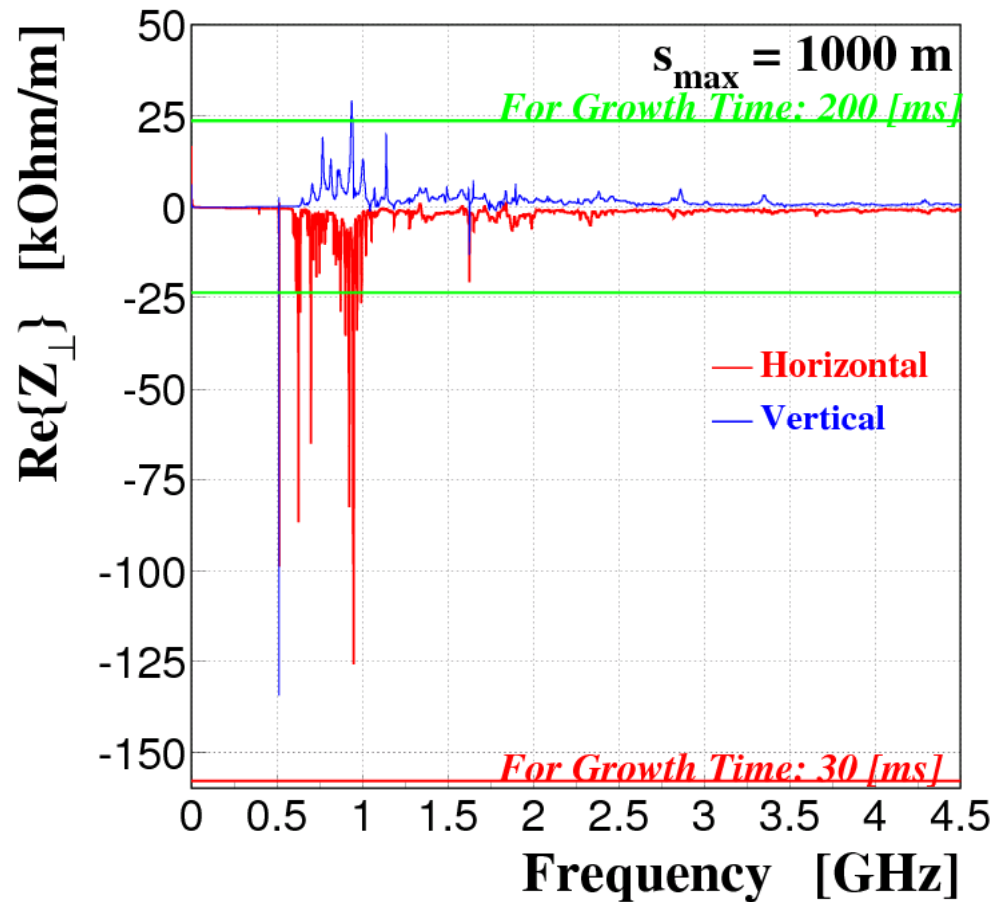
GdfidLの時間領域有限差分計算で得た  
ウェークポテンシャルのフーリエ変換



CBI Growth Time > 30ms > 5ms (放射減衰時間)

# 水平・垂直方向結合インピーダンス計算結果

GdfidLの時間領域有限差分計算で得た  
ウェークポテンシャルのフーリエ変換

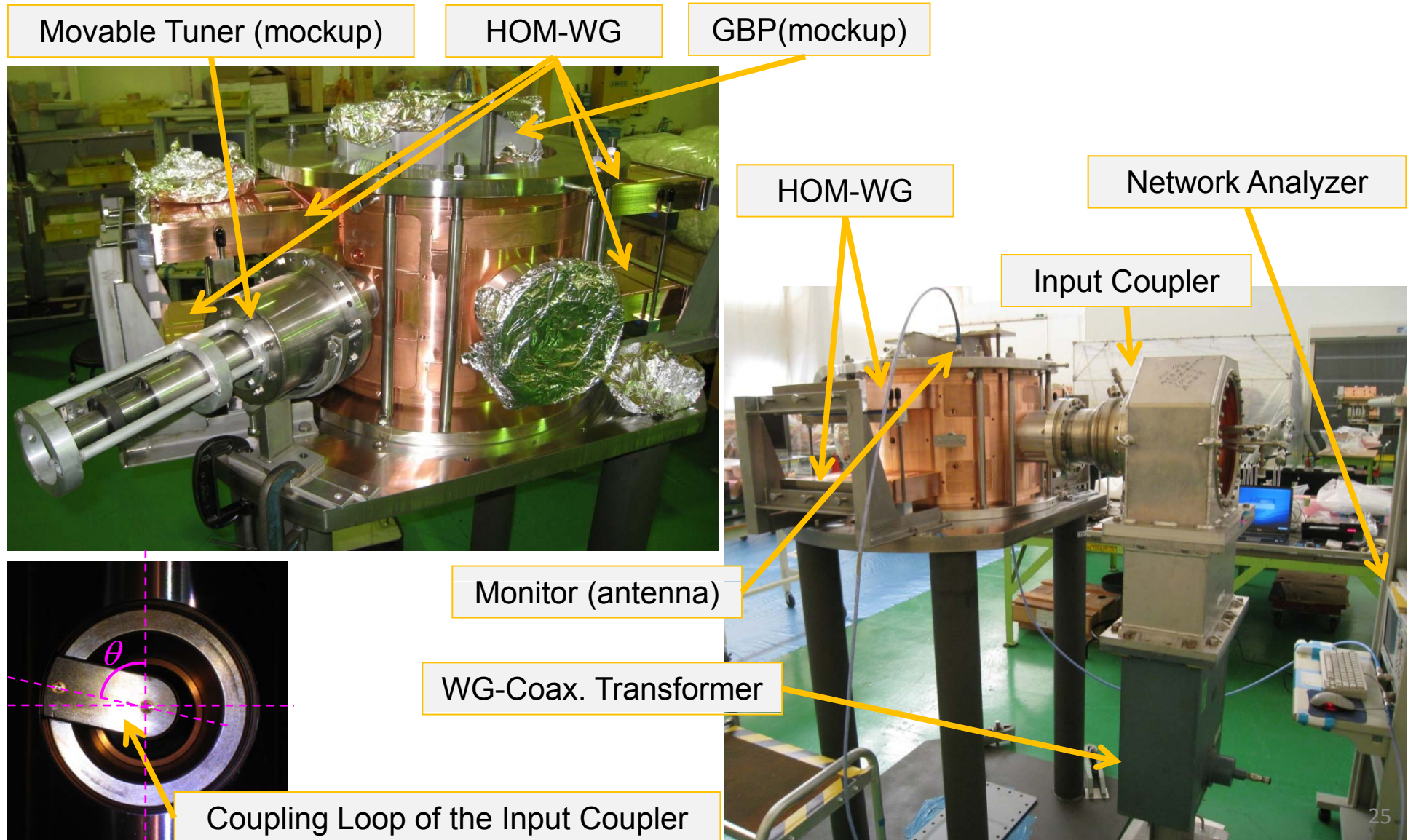


CBI Growth Time > 30ms > 10ms (放射減衰時間)

加速モード( $TM_{010}$ )周波数



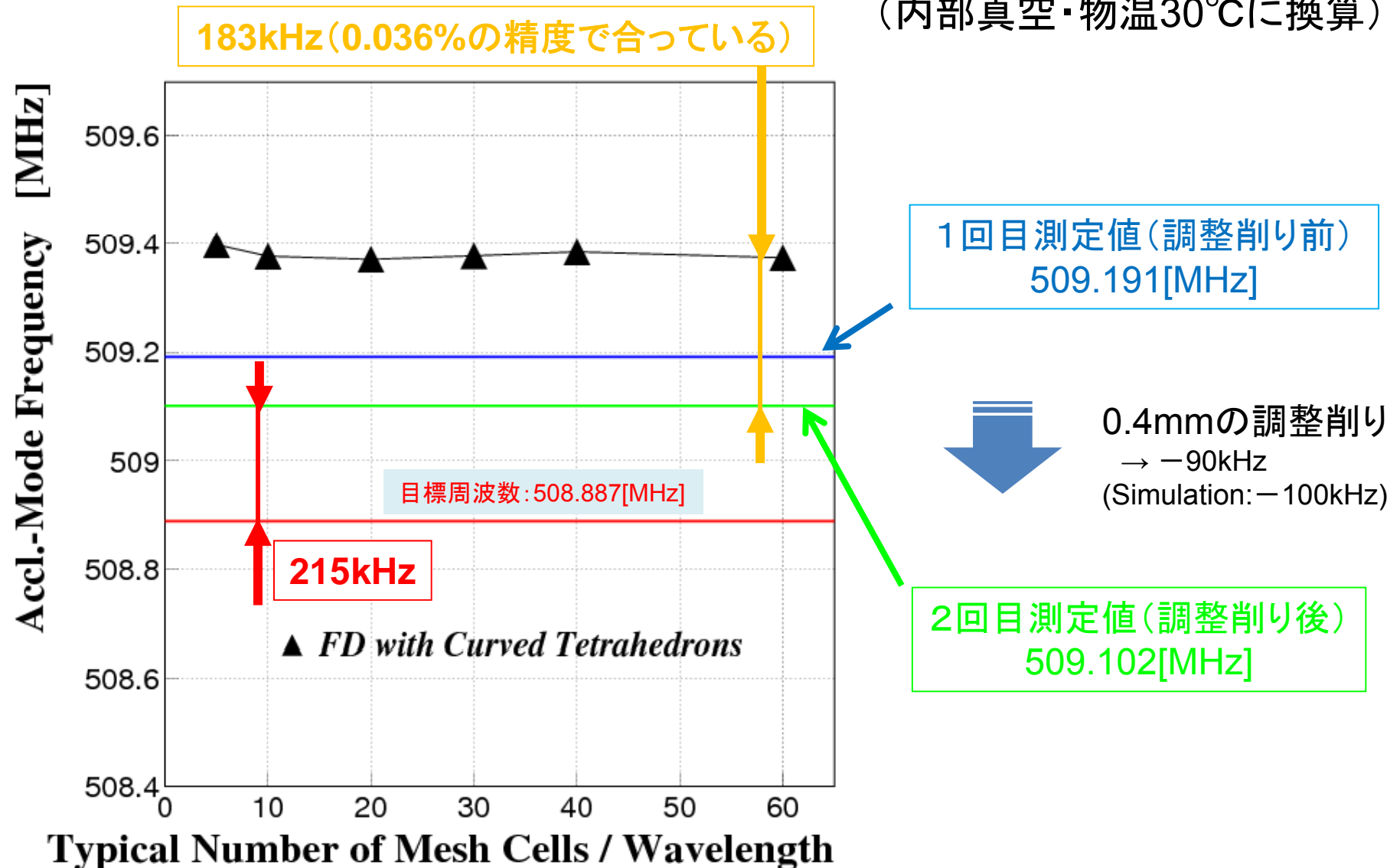
# 試験機の低電力RF測定





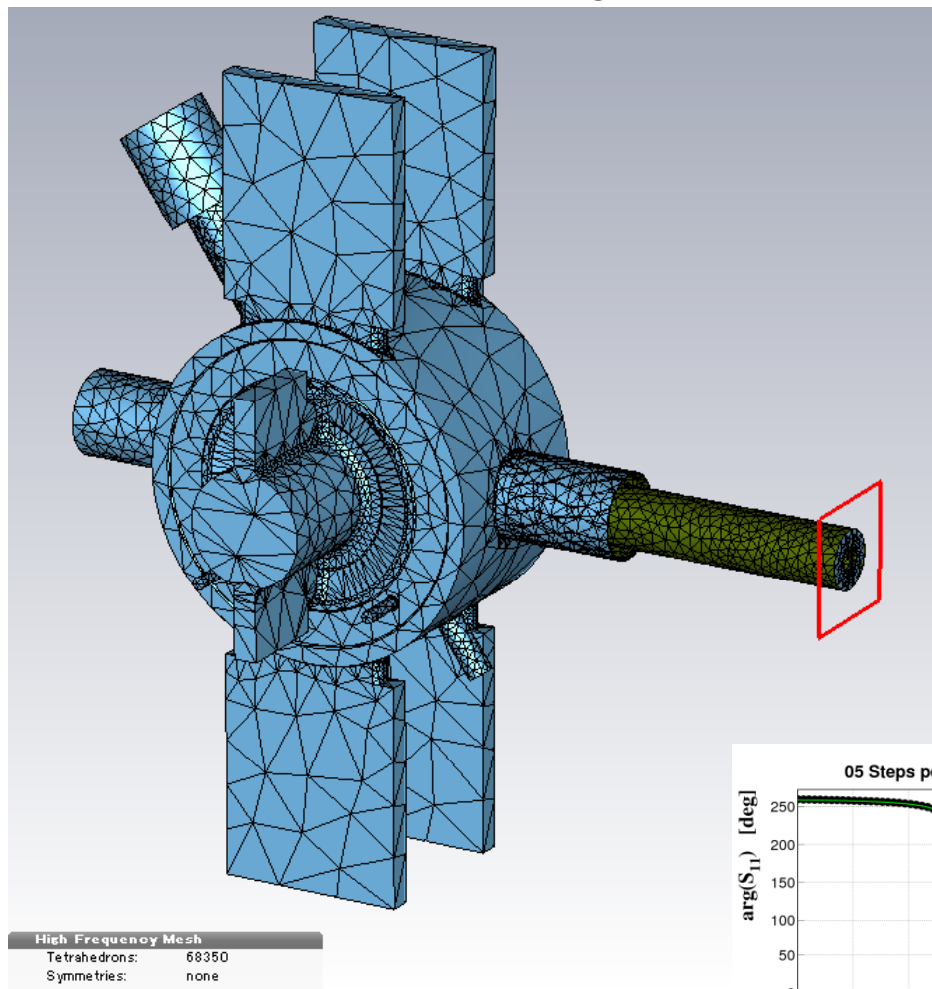
# 測定とシミュレーションの結果

(内部真空・物温30°Cに換算)

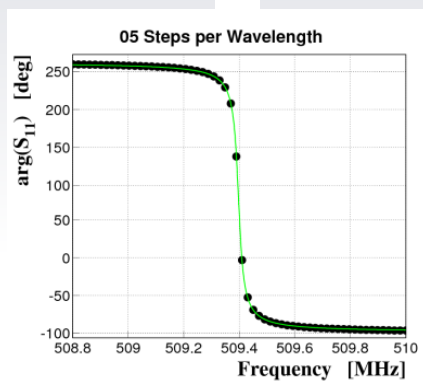
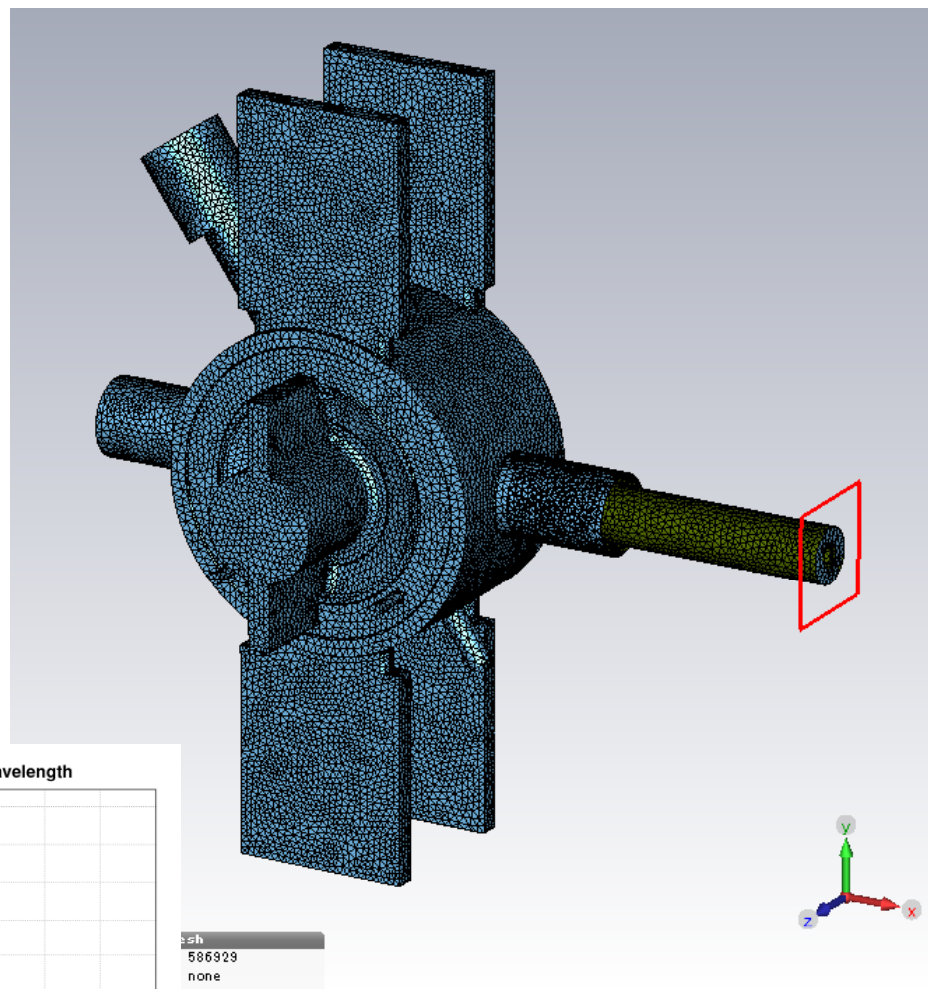


# 曲面四面体メッシュ

Steps / Wavelength: 5

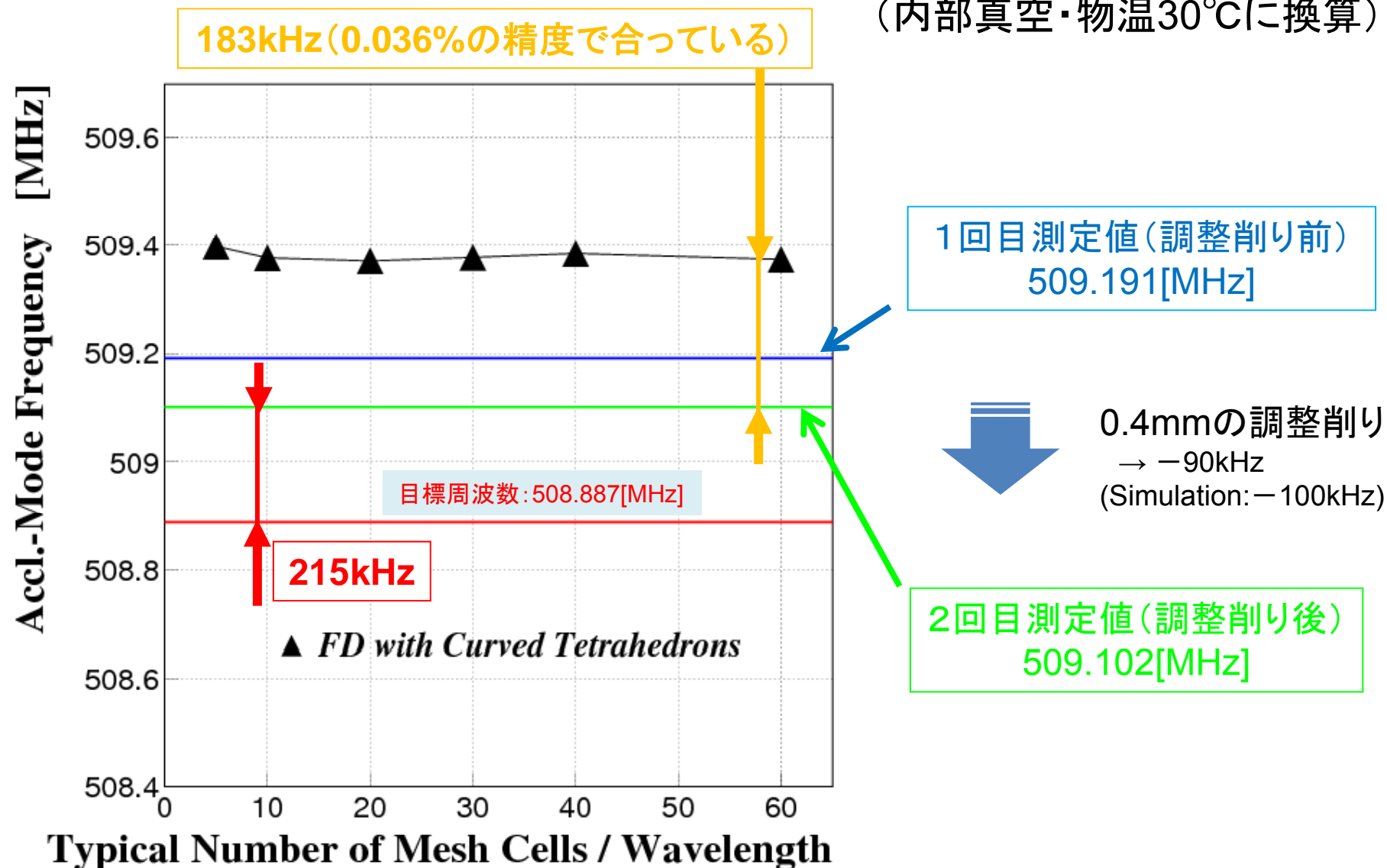


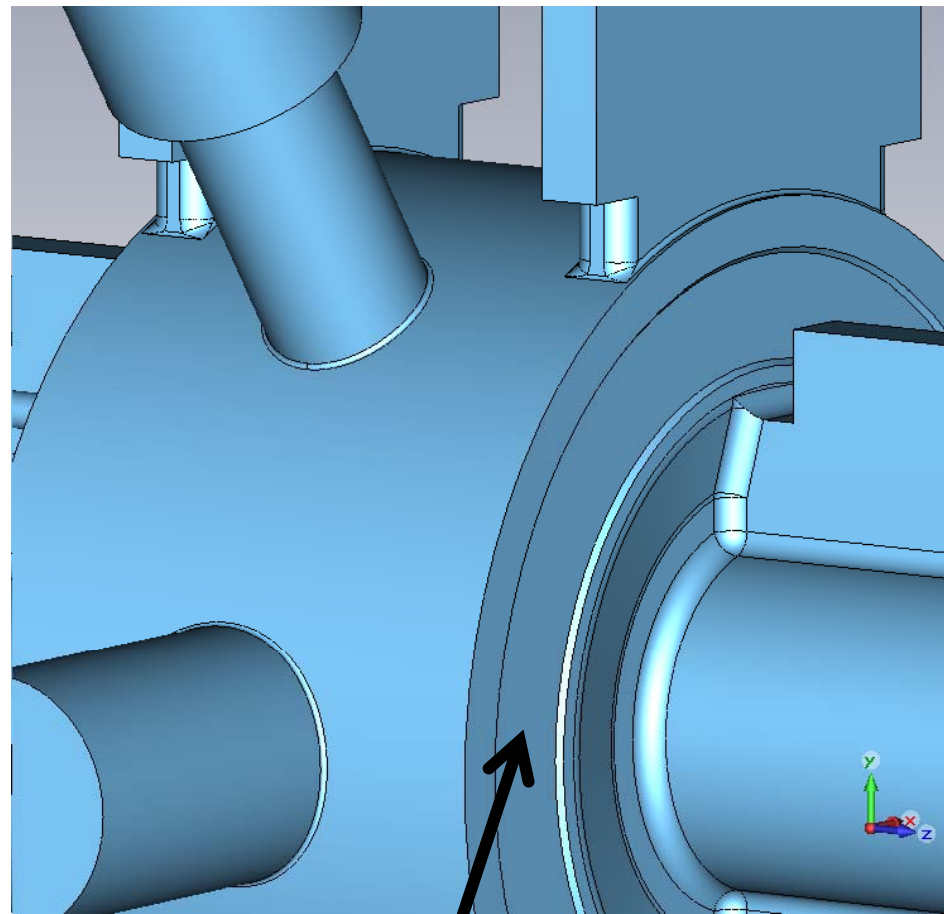
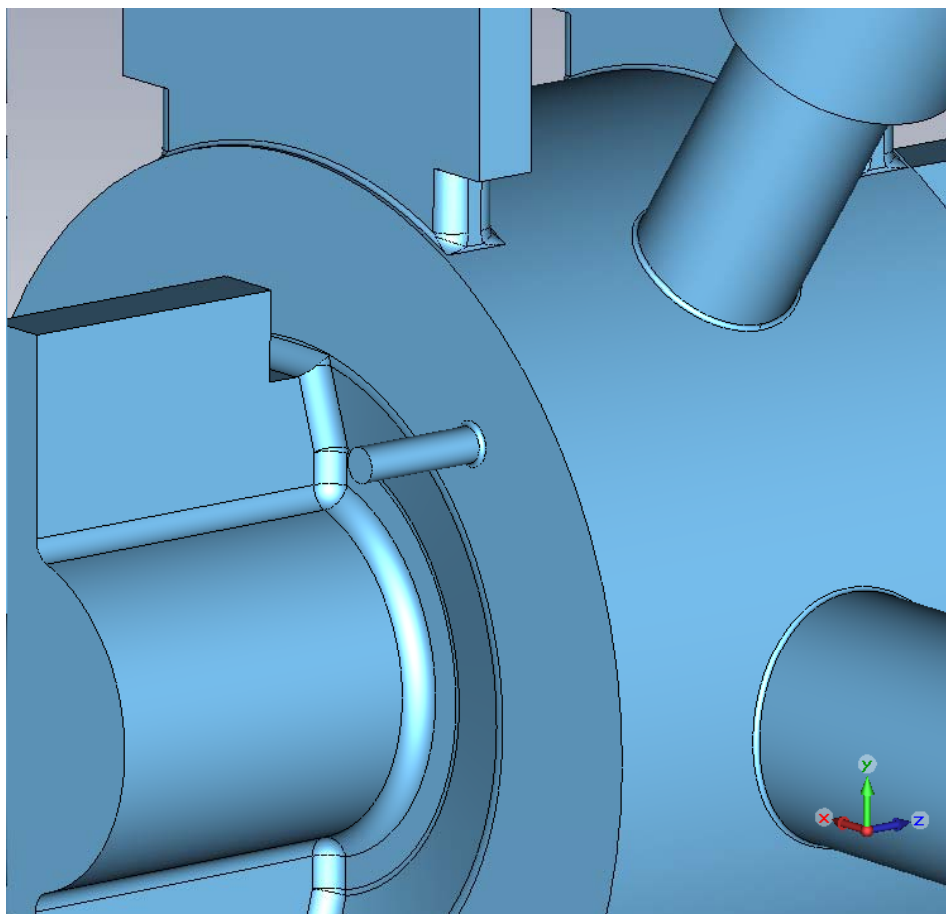
Steps / Wavelength: 40



# 測定とシミュレーションの結果

(内部真空・物温30°Cに換算)

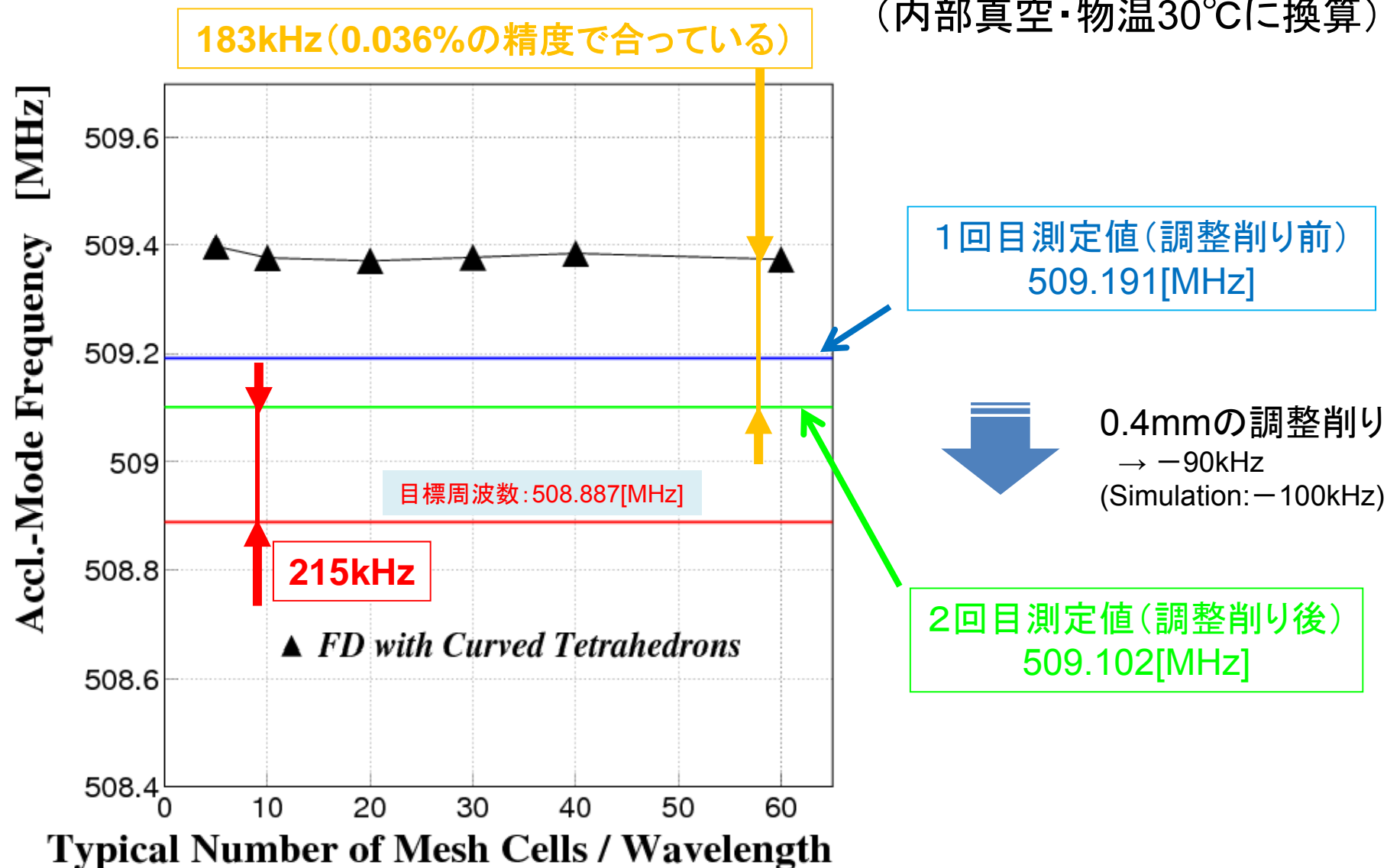




周波数調整用の削り代(高さ:2.5mm)  
(すべて削ると、-700kHz弱)

# 測定とシミュレーションの結果

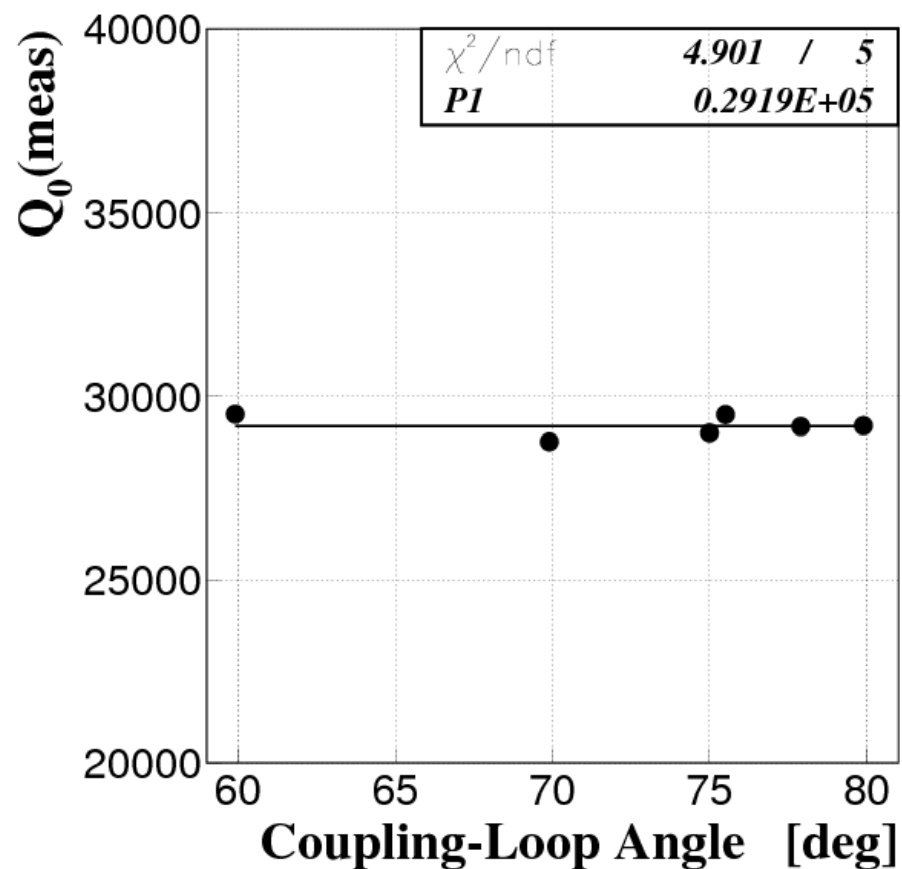
(内部真空・物温30°Cに換算)



内部Q値( $Q_0$ )

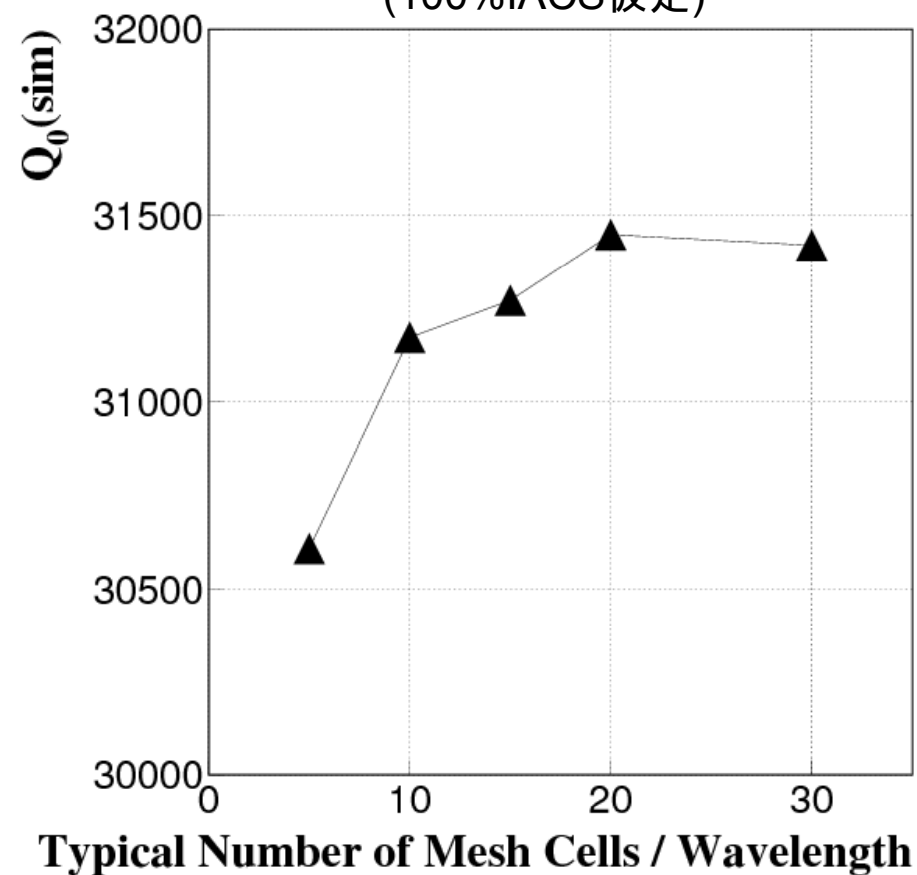


## 低電力RF測定



## シミュレーション

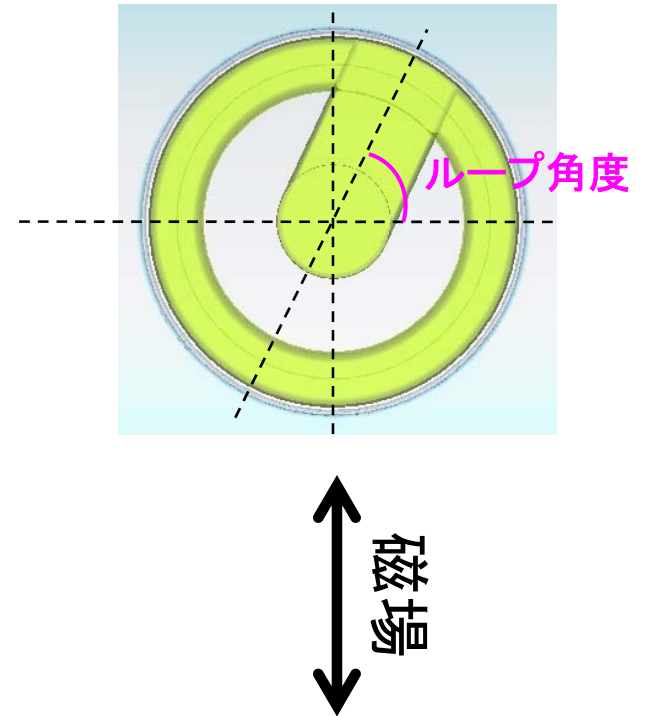
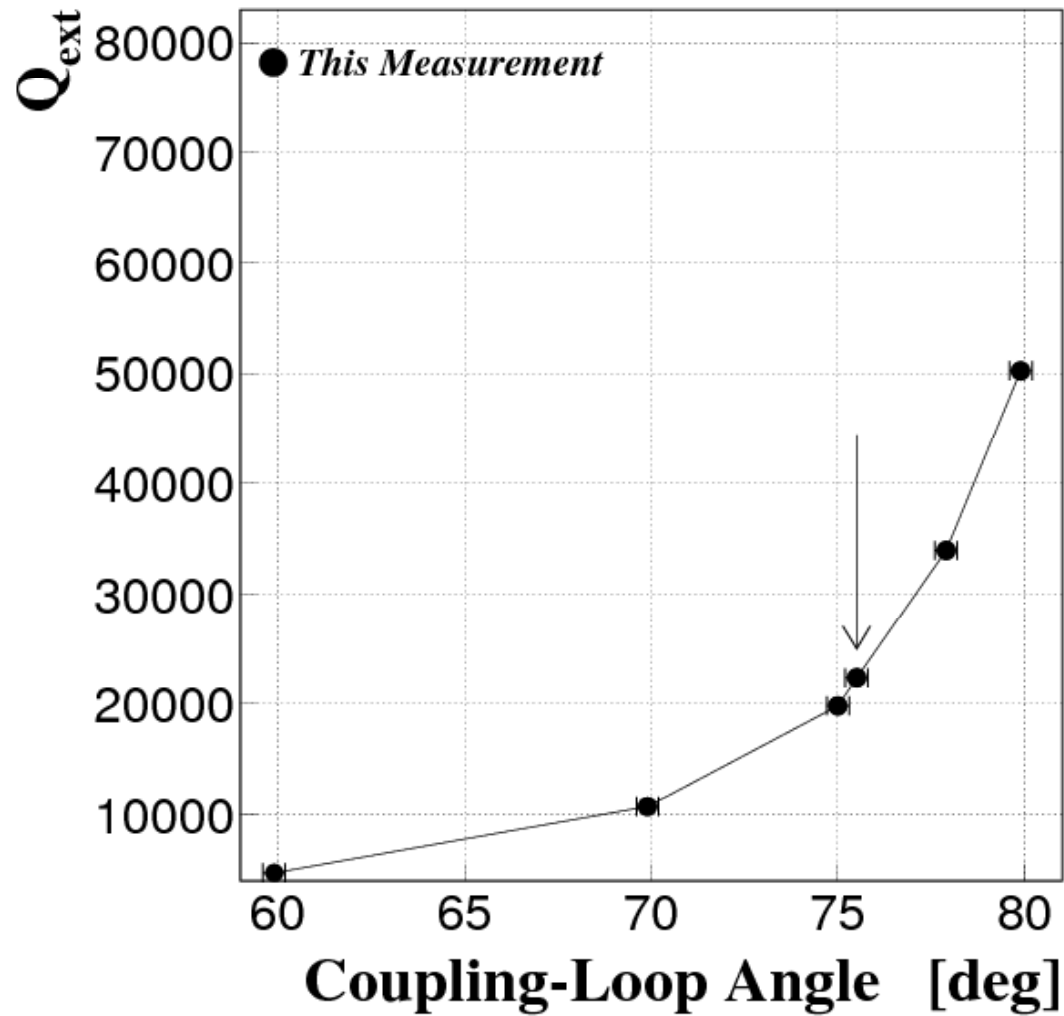
(100%IACS仮定)



$$Q_0(\text{meas}) / Q_0(\text{sim}) = 93\%$$

# 入力結合器の外部Q値( $Q_{\text{ext}}$ )

# 測定結果

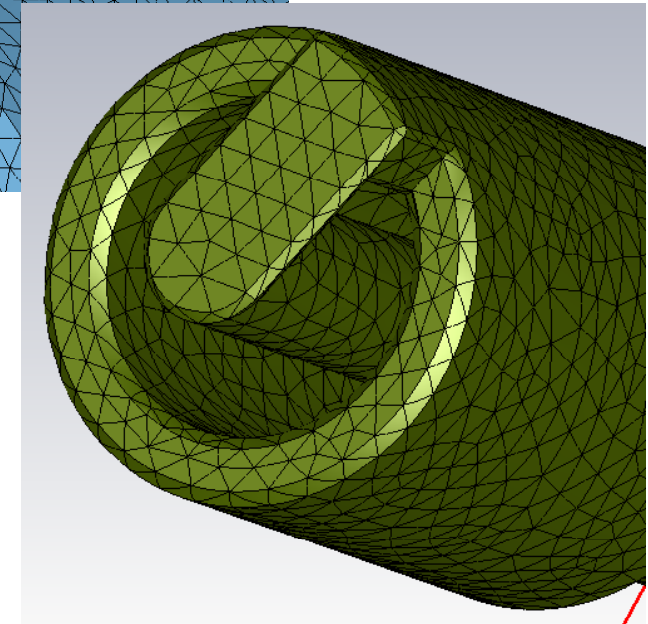
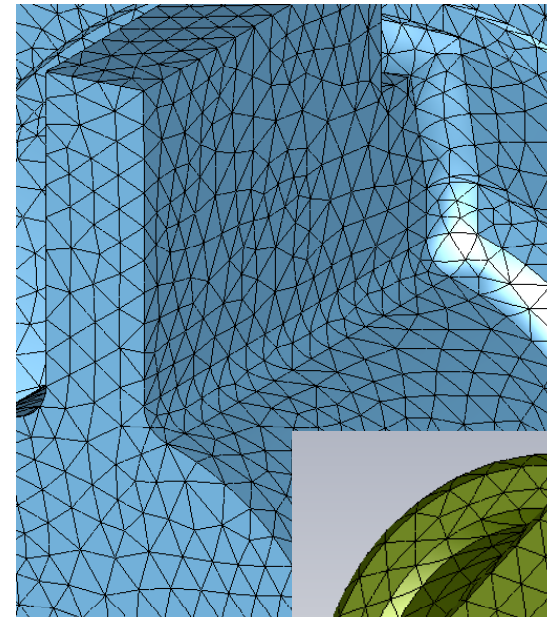
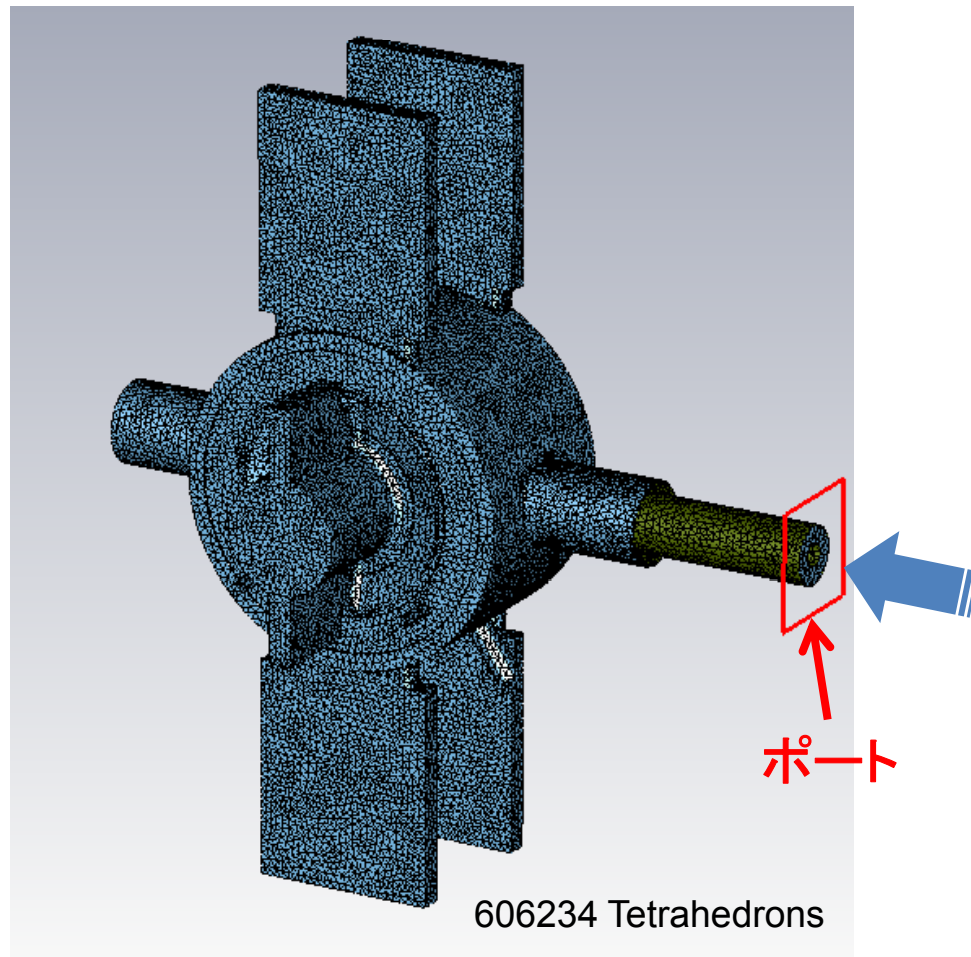


$Q_0$ @operation = ~26000 (80% IACS)

# $Q_{\text{ext}}$ の計算法1

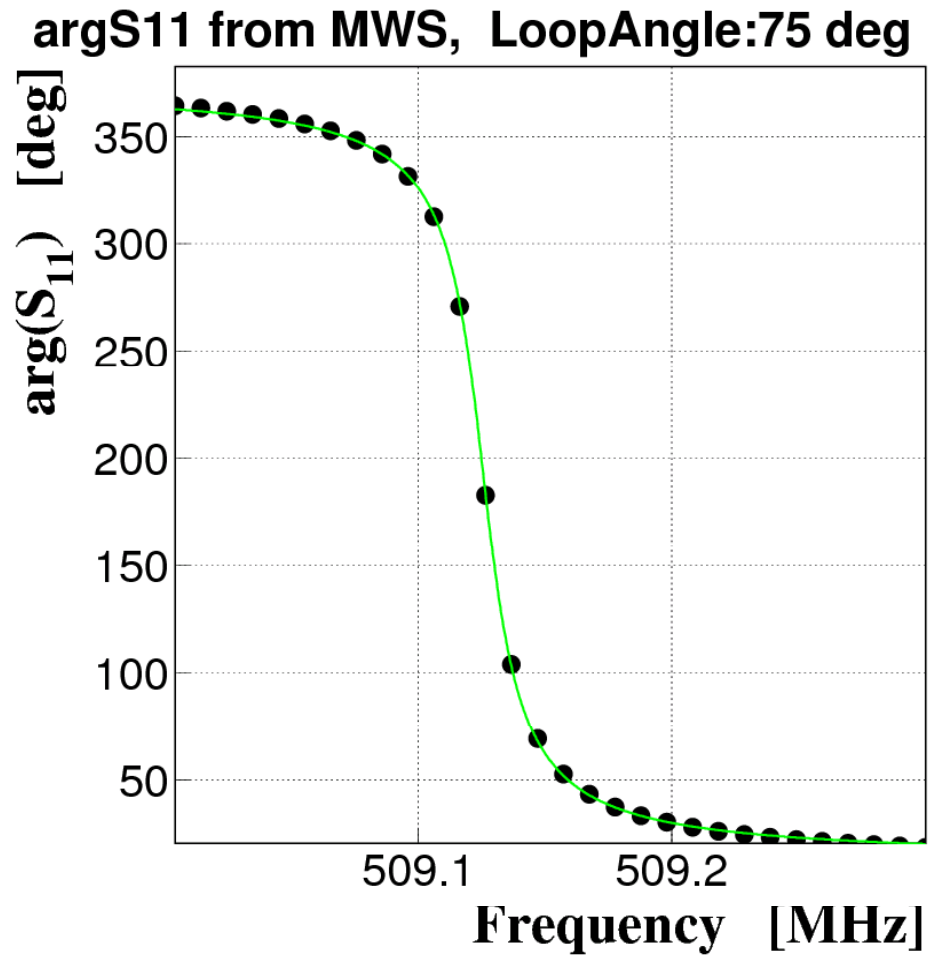
## CST-MWS / 曲面4面体メッシュ

Steps/Wavelength: 40 , Curved Element Order: 2



$Q_{\text{ext}}$  は  $\arg S_{11}$  から計算

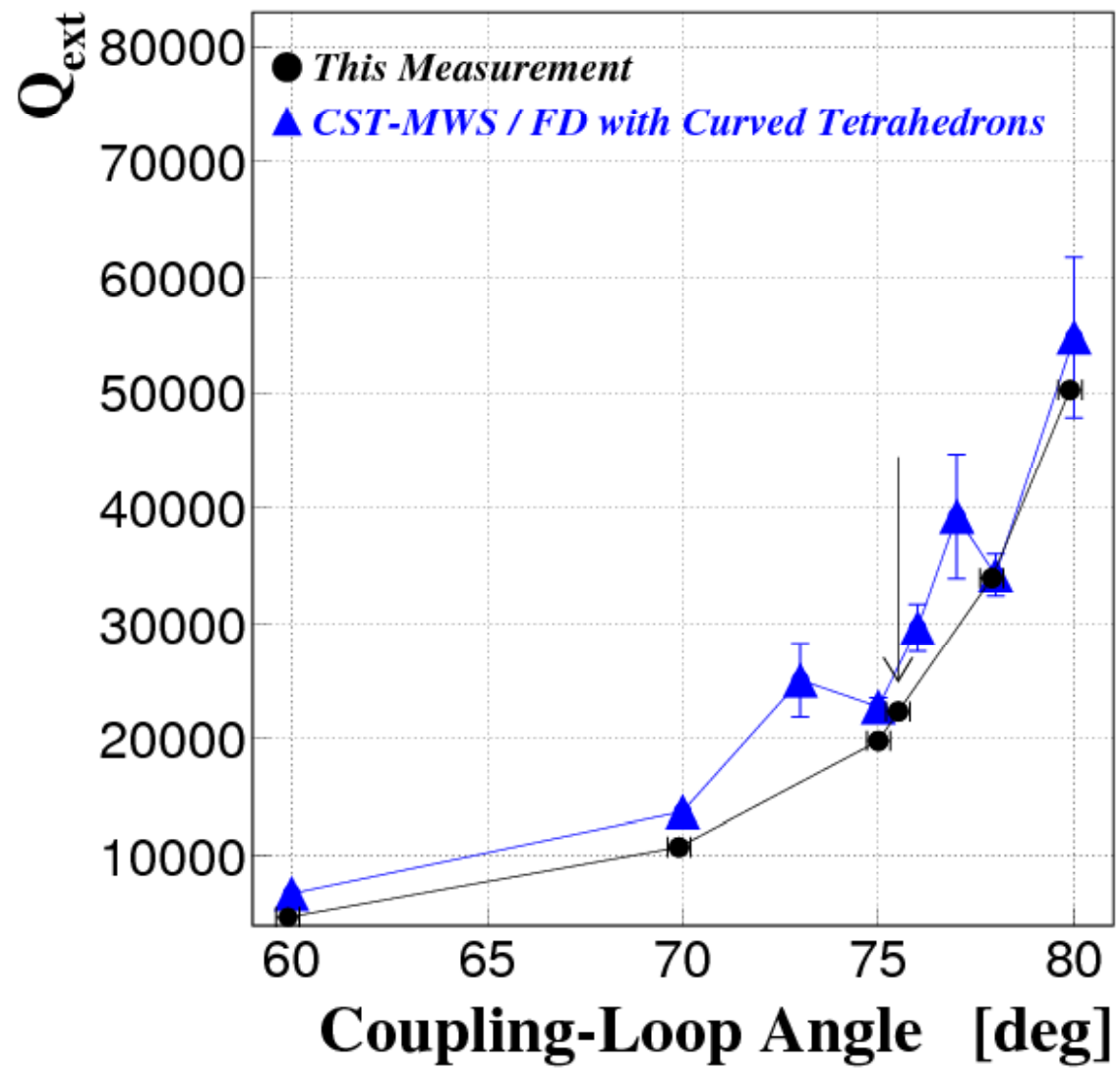
## 例. ループ角度: 75°



— Fit with the formula:

$$\arg(S_{11}) = -2 \tan^{-1} \left[ \textcolor{red}{Q}_{ext} \left( \frac{f}{\textcolor{red}{f}_a} - \frac{\textcolor{red}{f}_a}{f} \right) \right] + \textcolor{red}{\theta}_0$$

(Red: floating parameters in fitting)

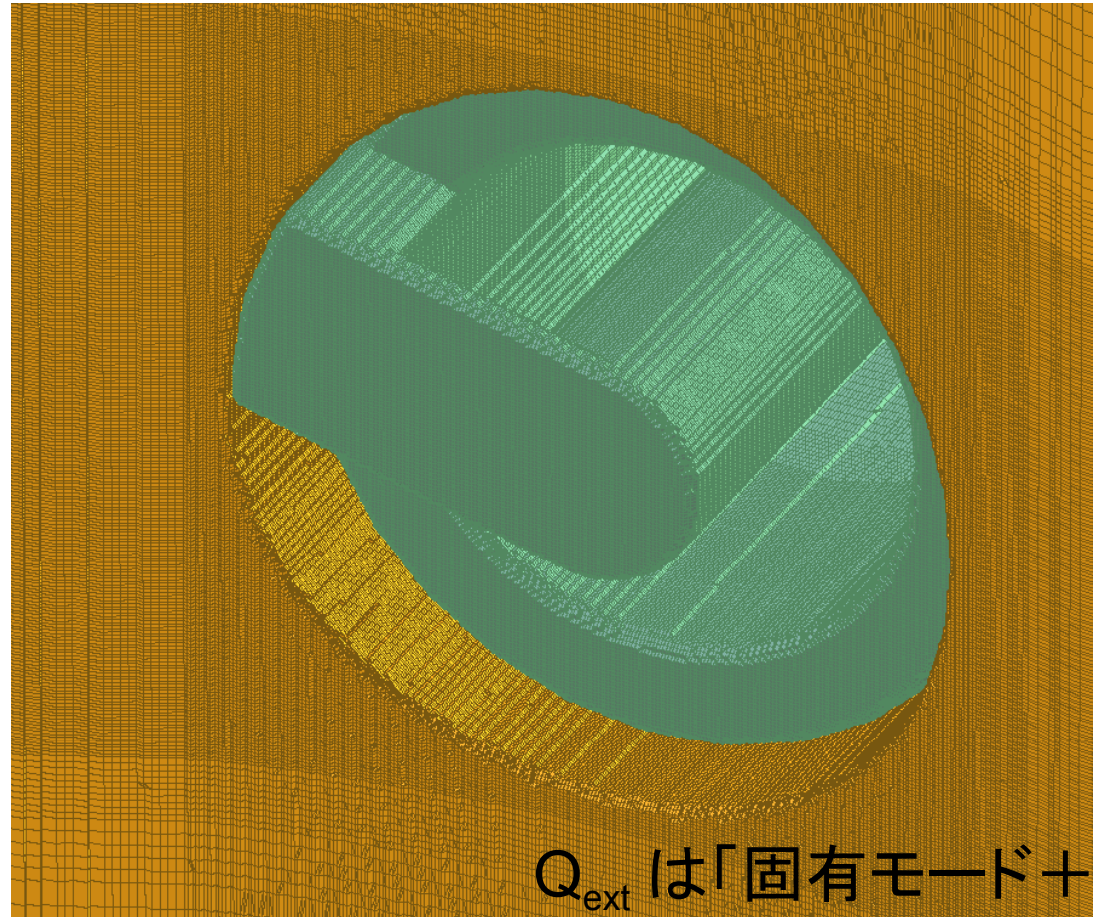




# Qextの計算法2

## GdfidL with Fine Meshing

- ソリッドモデルはCSTからコンバート
- 6面体メッシュだが、メッシュサイズを非常に小さく出来る:
  - ・ループ付近は0.5mm
  - ・ループから離れるに従って徐々に粗
  - ・最大:4.0mm



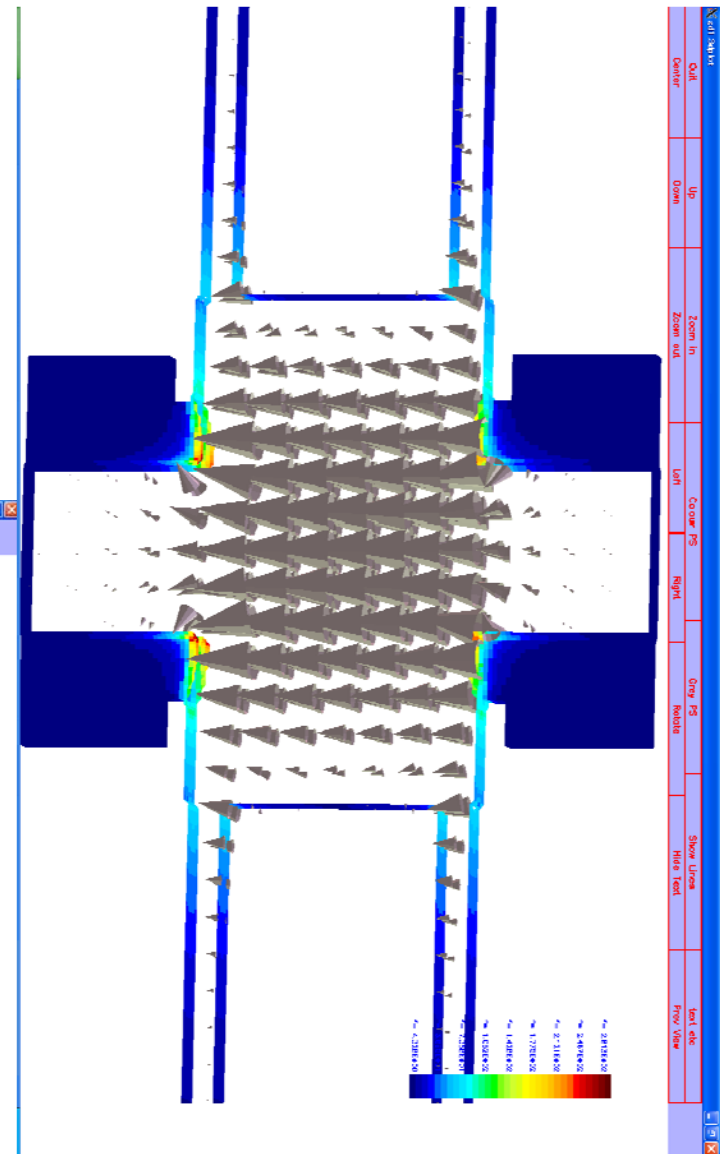
$Q_{\text{ext}}$  は「固有モード+TD計算」

# Step1: 固有モード解析

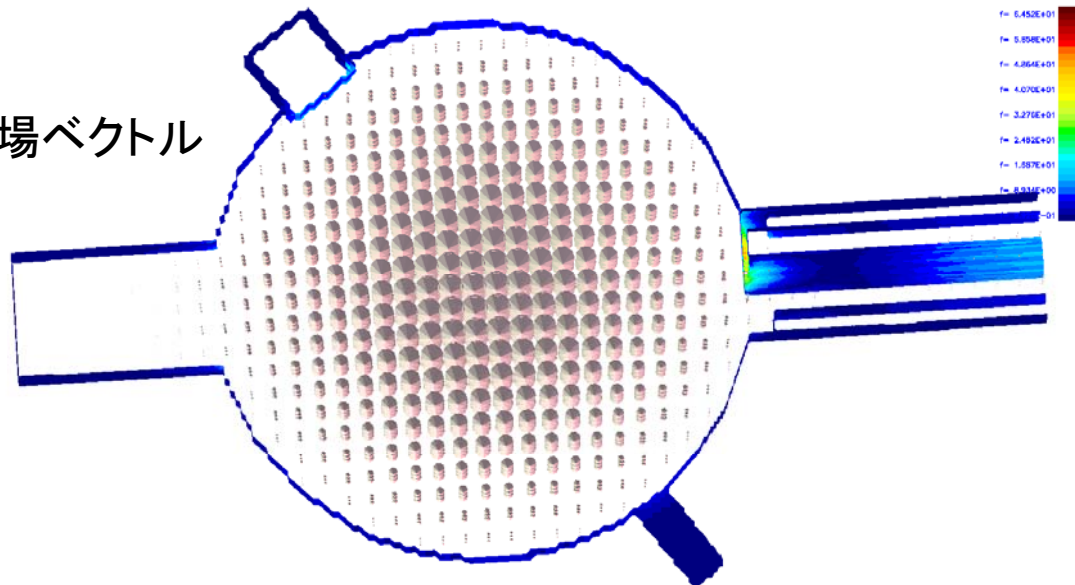


i	freq(i)	acc(i)	cont(i)
1	254.84271492e+6	0.0000000557	0.0000000309
2	510.41583895e+6	0.0000000256	0.0000000326
3	649.77267840e+6	0.0000001368	0.0000003185
4	668.37772731e+6	0.0000000215	0.0000003050
5	691.60438452e+6	0.0007661631	0.0114673342
6	702.35403838e+6	0.0001157096	0.0023163636
7	719.79626503e+6	0.0012450975	0.0257570621
8	726.65542243e+6	0.0000444834	0.0023593407
9	729.74293435e+6	0.0008523122	0.0115745701
10	756.71107756e+6	0.0003257351	0.0038506633

電場ベクトル



電場ベクトル



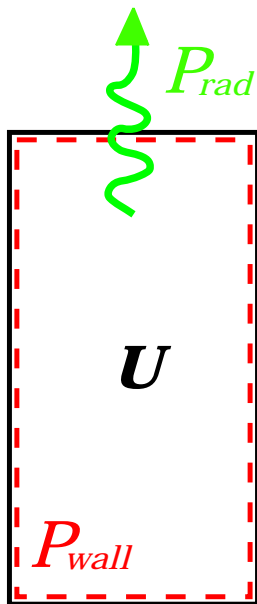
例. ループ角度: 75°

## Step2: TD

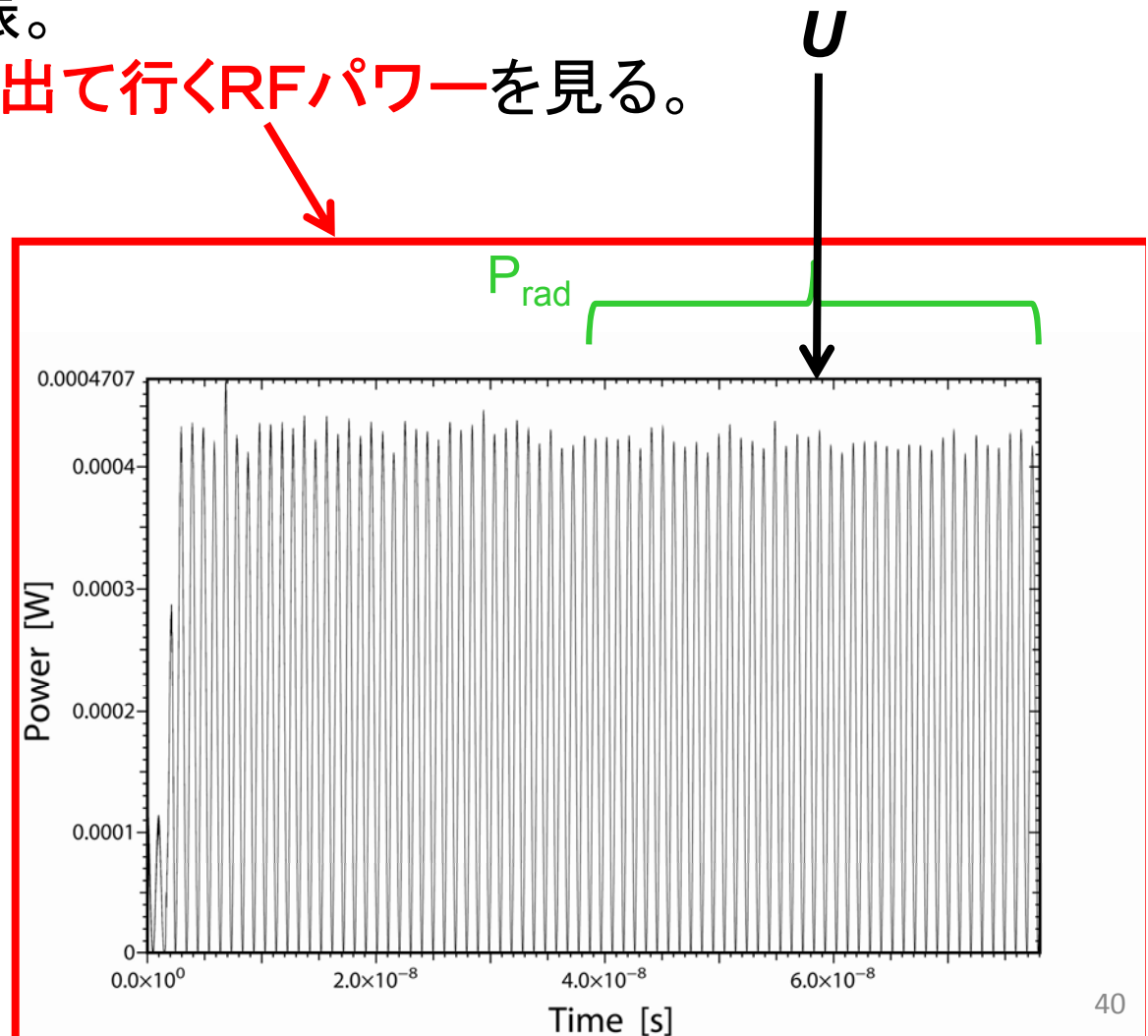
Step1で得た加速モードを初期フィールドとして、  
TD(Time Domain)で励振。

→ **入力結合器ポートから出て行くRFパワー**を見る。

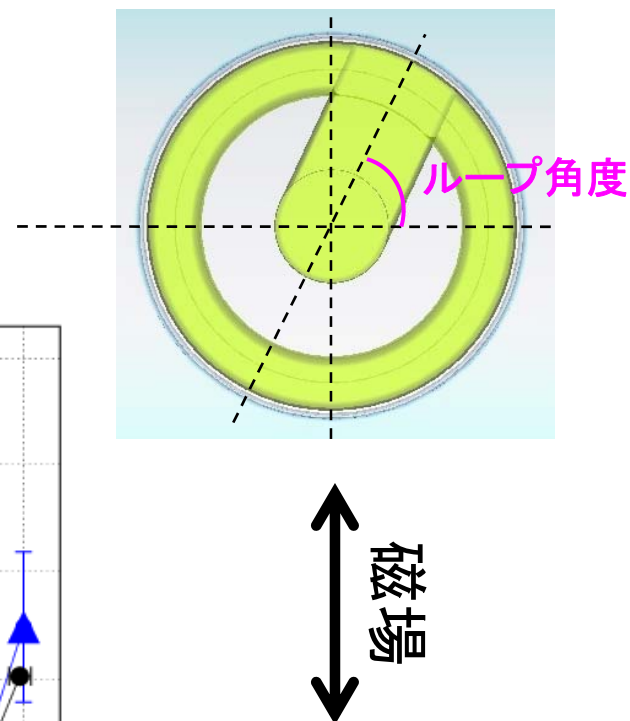
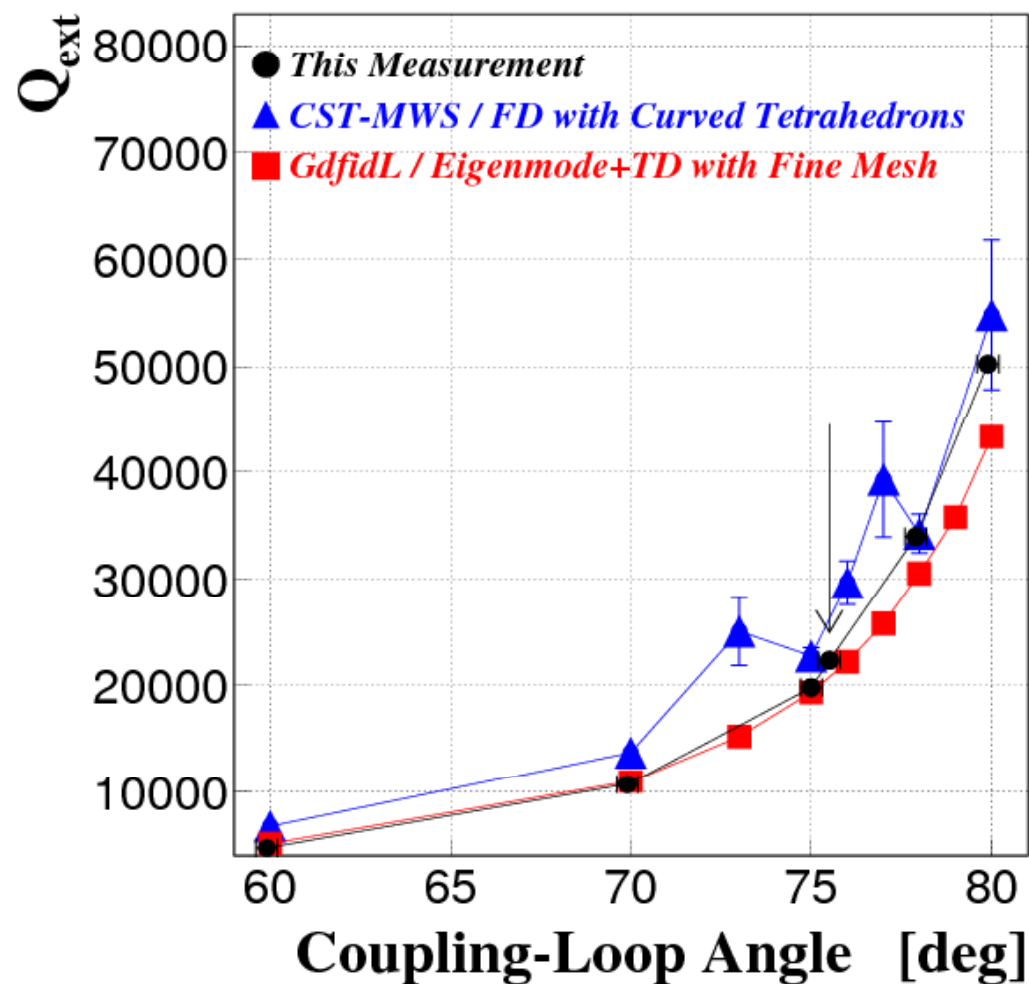
$$Q_{\text{ext}} = \omega \times U / P_{\text{rad}}$$



例. ループ角度: 75°



# 入力結合器の外部Q値

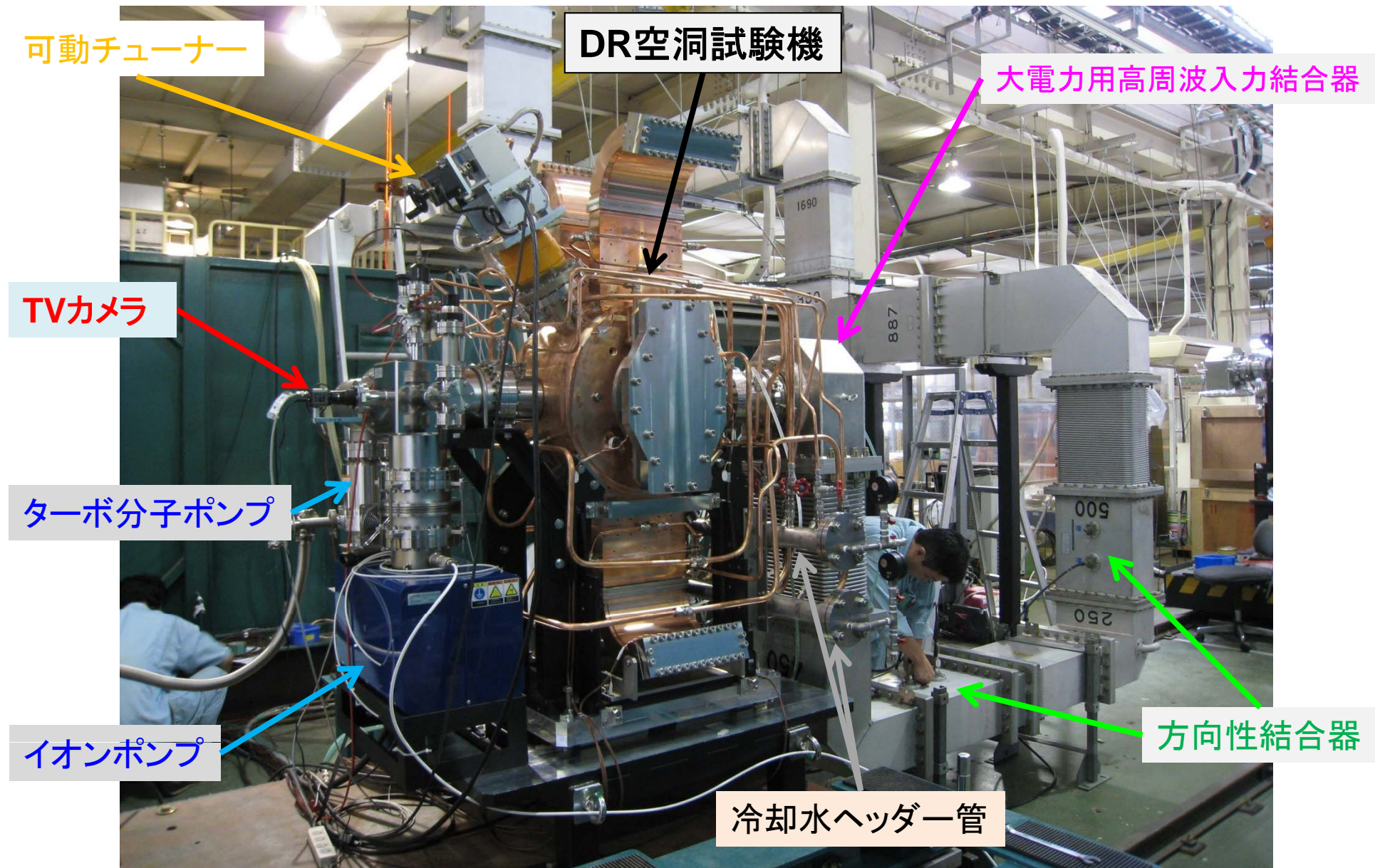


測定とシミュレーションは合っている。

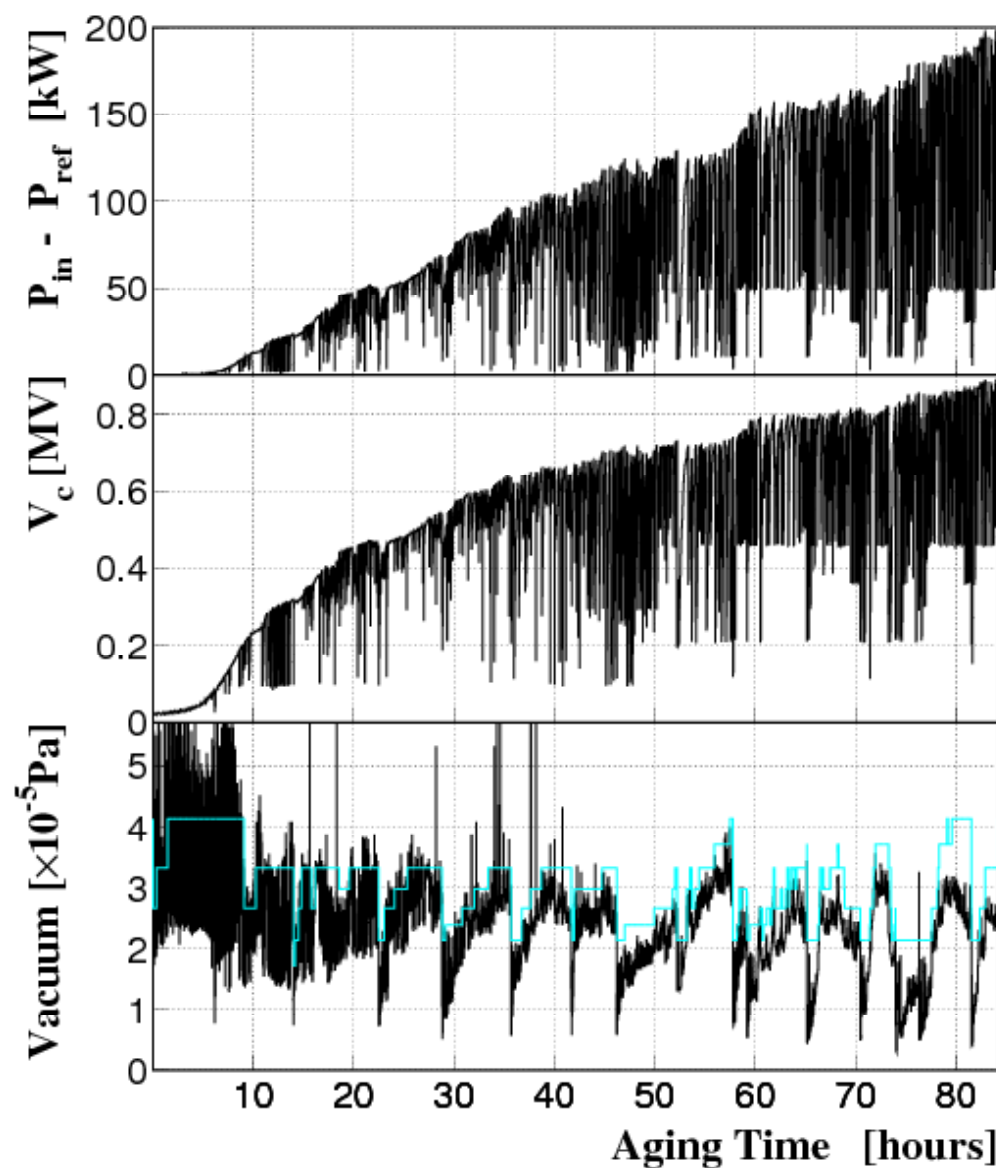
# 空洞本体試験機の大電力試験



# セットアップ@KEK/D1-Aテストスタンド



# エージング履歴



← 203 kW (max.)

- 空洞への入力パワー有り
- 自動エージング
- 入力パワー < 目標パワー

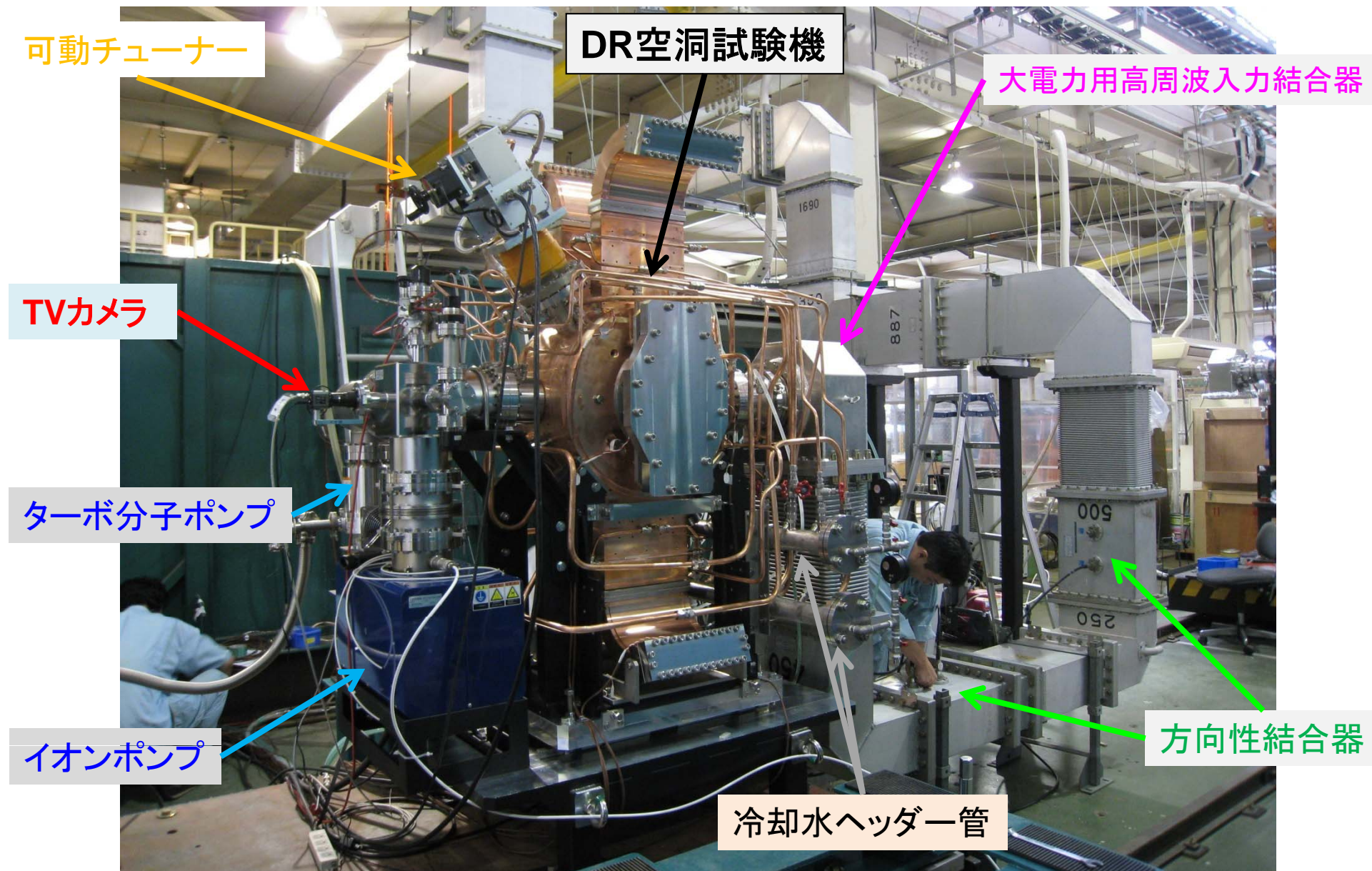
← 0.896 MV (max.)

- ✓ 真空度の改善
- ✓ TVカメラ(次ページ)で観測された空洞内連続発光は徐々に暗くなっていった。
- ✓ 放射線シールドの増強

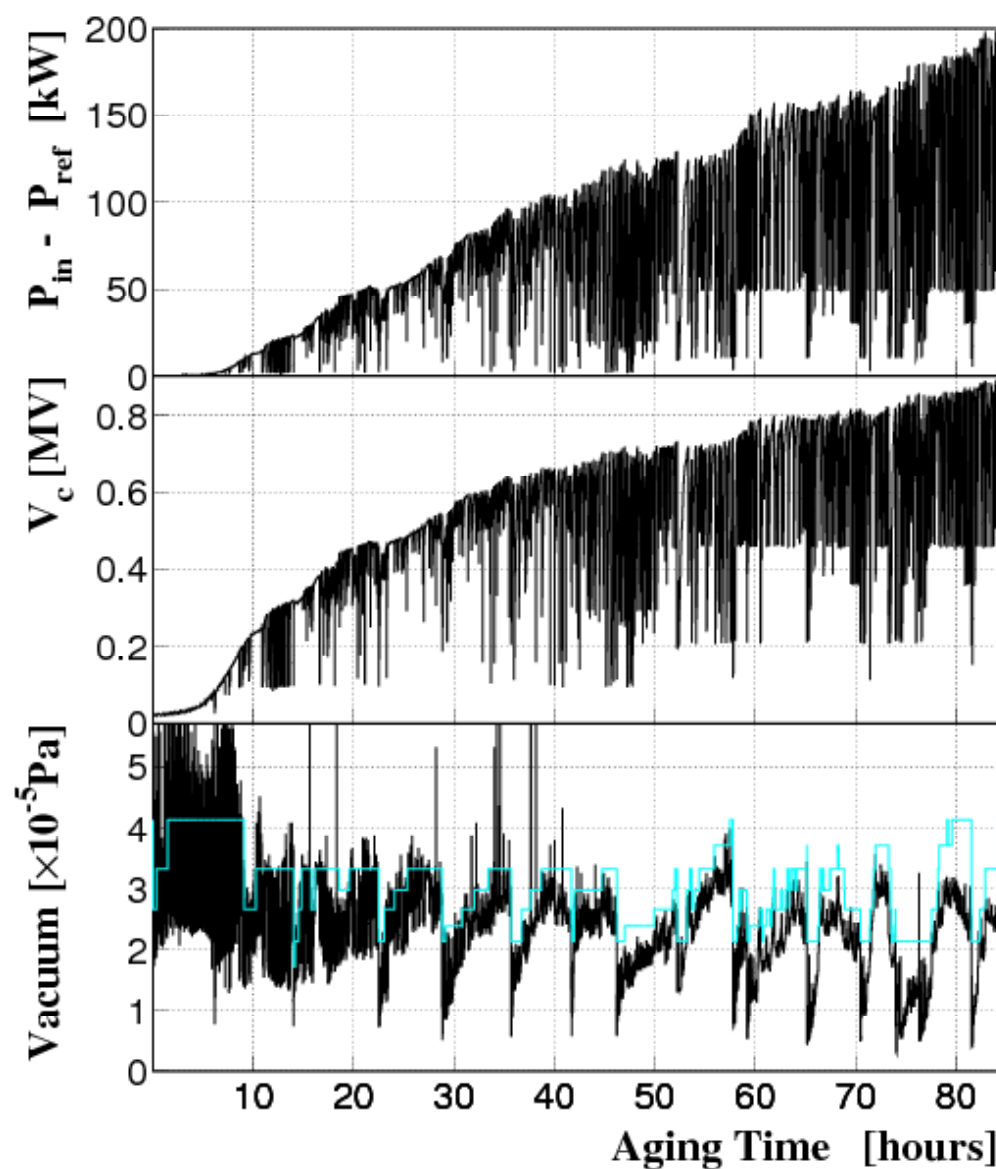
真空圧力が水色の線以下になるように自動エージング



# セットアップ@KEK/D1-Aテストスタンド



# エージング履歴



← 203 kW (max.)

- 空洞への入力パワー有り
- 自動エージング
- 入力パワー < 目標パワー

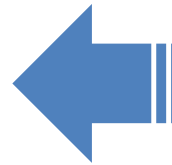
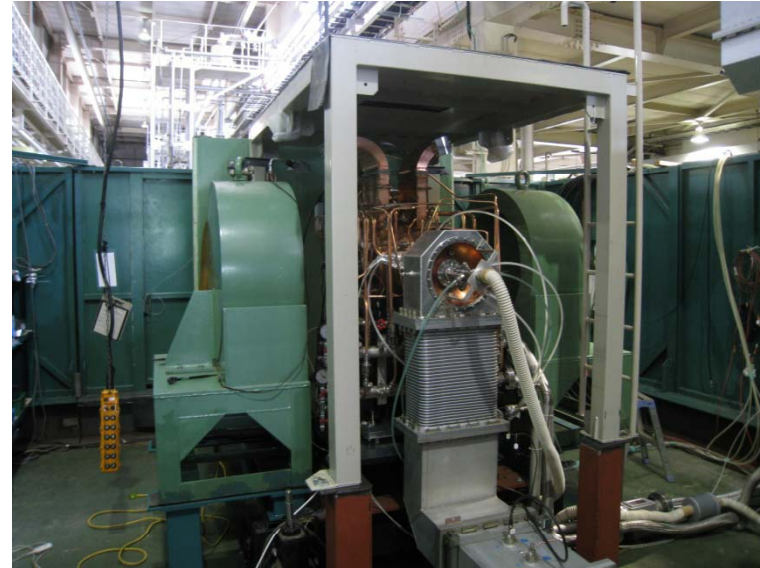
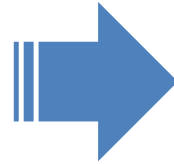
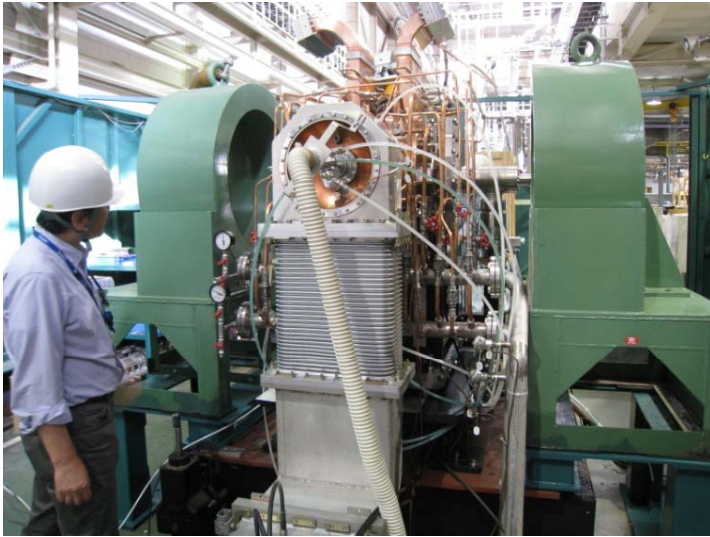
← 0.896 MV (max.)

- ✓ 真空度の改善
- ✓ TVカメラで観測された空洞内連続発光は徐々に暗くなっていった。
- ✓ 放射線シールドの増強 (次ページ)

真空圧力が水色の線以下になるように自動エージング



# D1-A／放射線シールド増強





# まとめ

## ■ SuperKEKBにおけるダンピングリング用常伝導高周波加速構造を提案・設計

- KEKB加速器／主リングで長年の安定運転実績のあるアレス空洞をベース
- 最大2MVの全加速電圧を保証する3連空洞構成
- RF区間の結合インピーダンスは十分小さい
  - － 全ての関係するHOMは十分減衰

## ■ 試験機の製作

- 低電力RF測定の結果 ( $f_a$ ,  $Q_0$ ,  $Q_{ext}$ ) はシミュレーションとよく合うことを確認

## ■ 試験機の大電力試験

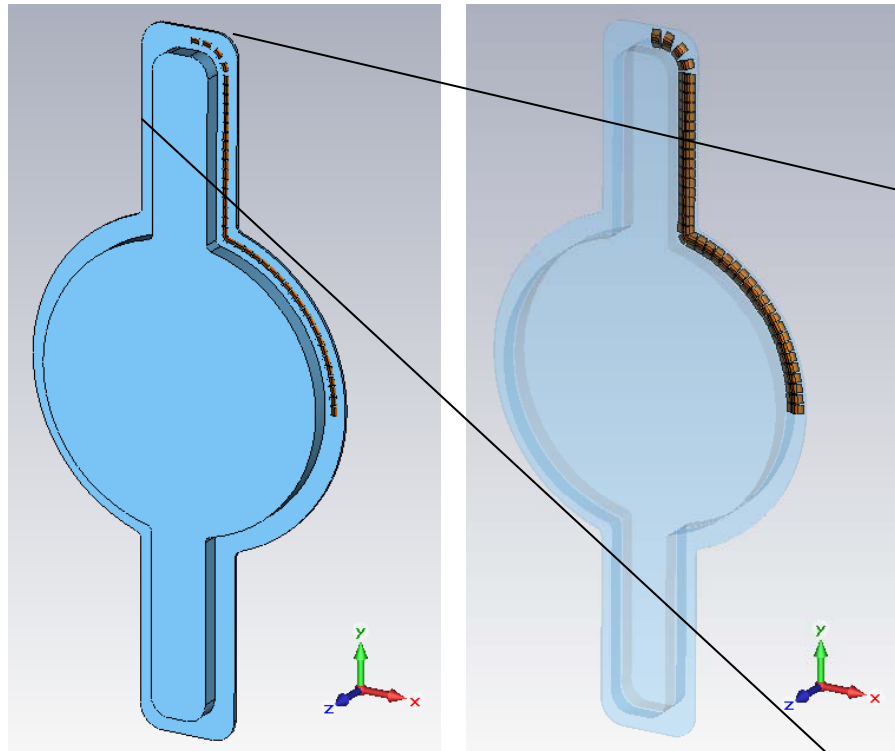
- 空洞電圧: 0.896MV (空洞入力パワー: 203kW) まで到達した
  - ＞ 定格: 0.7MV、努力目標: 0.8MV
- 合格！

## ■ 本試験機の製作・試験結果を実機1号機にフィードバック

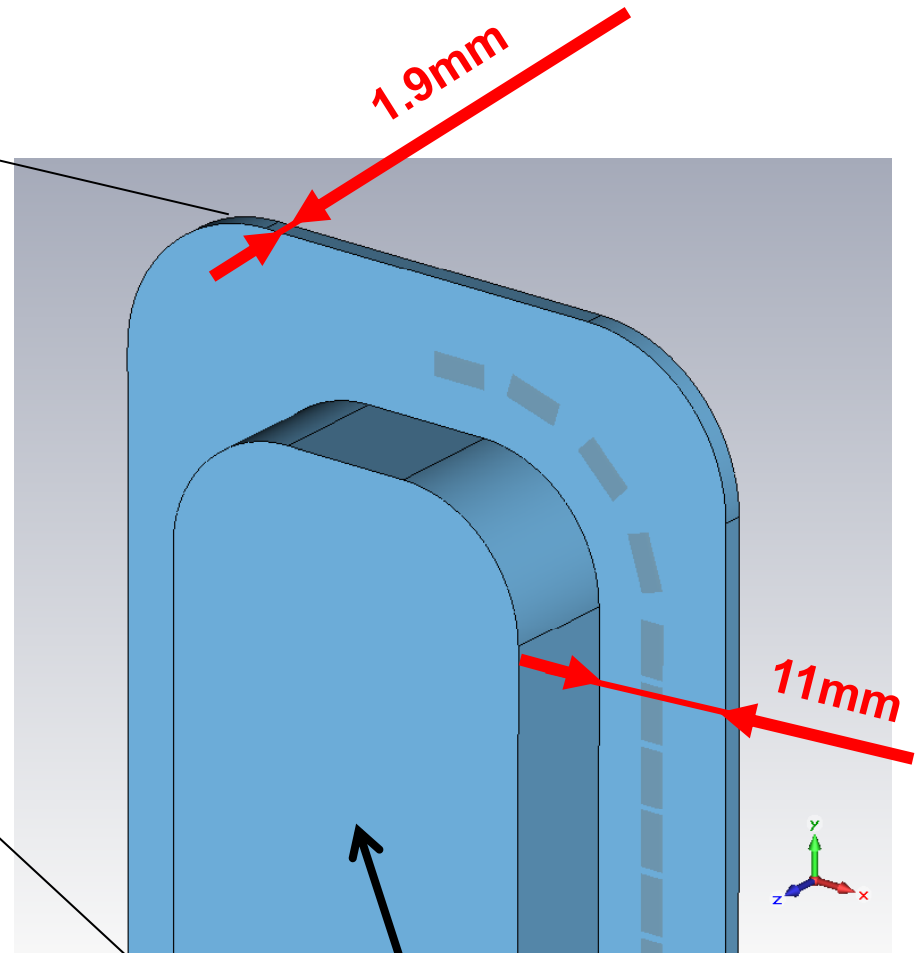
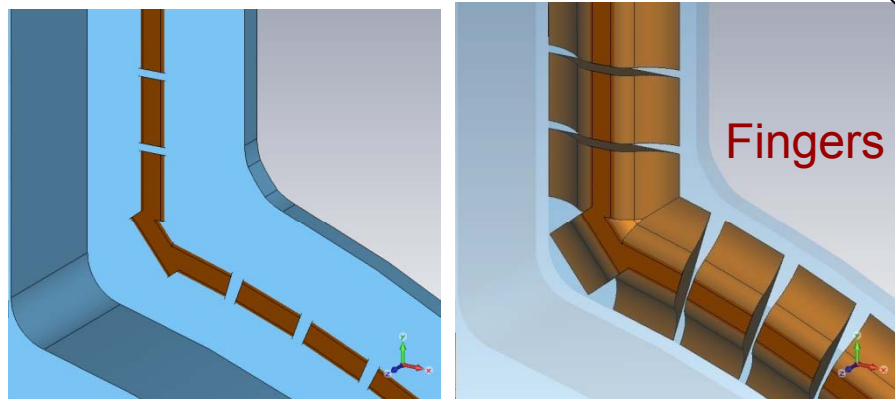


# 参考資料

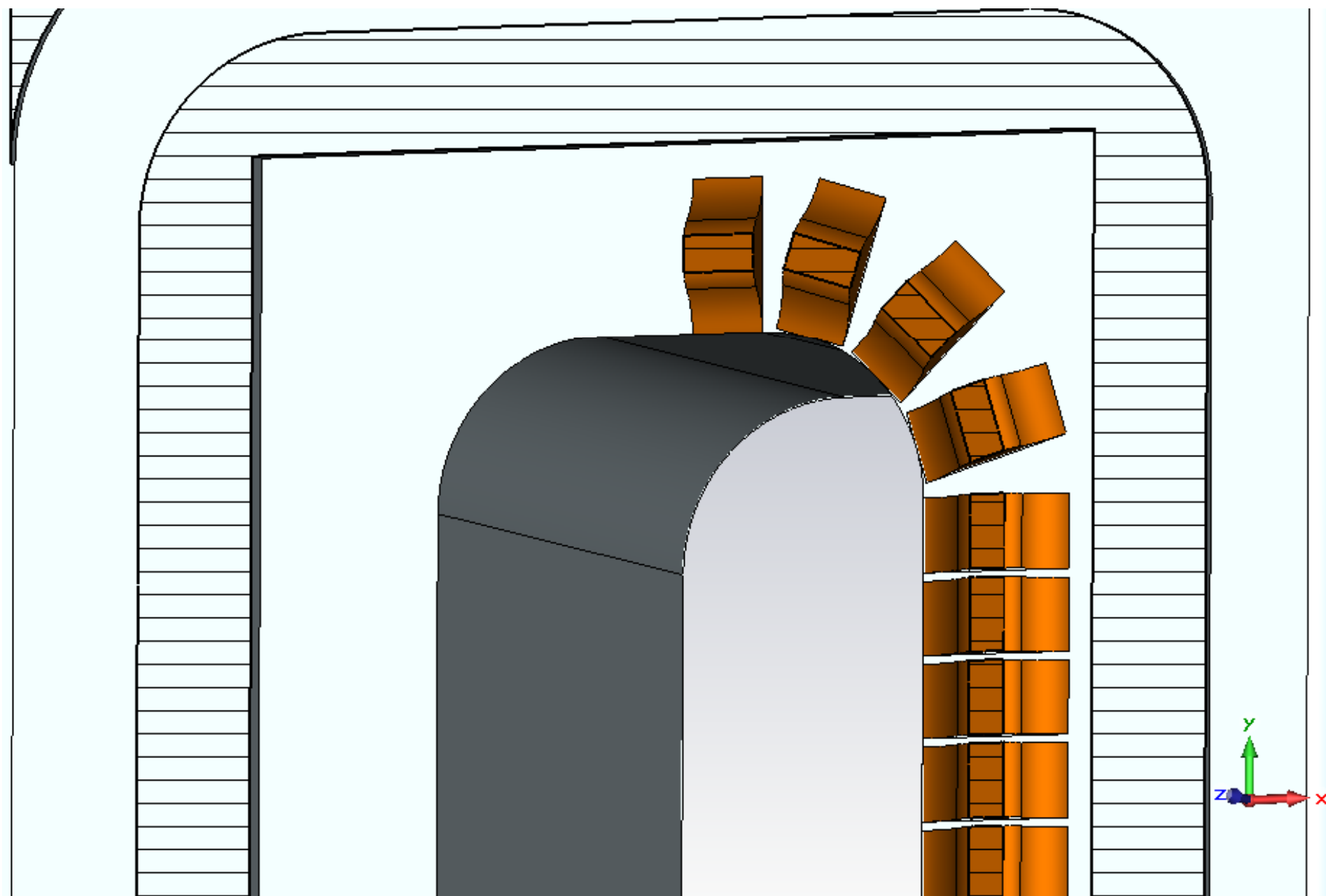
# GBP連結部におけるHOM発熱 Solid Model



(Created by using CST STUDIO SUITE)

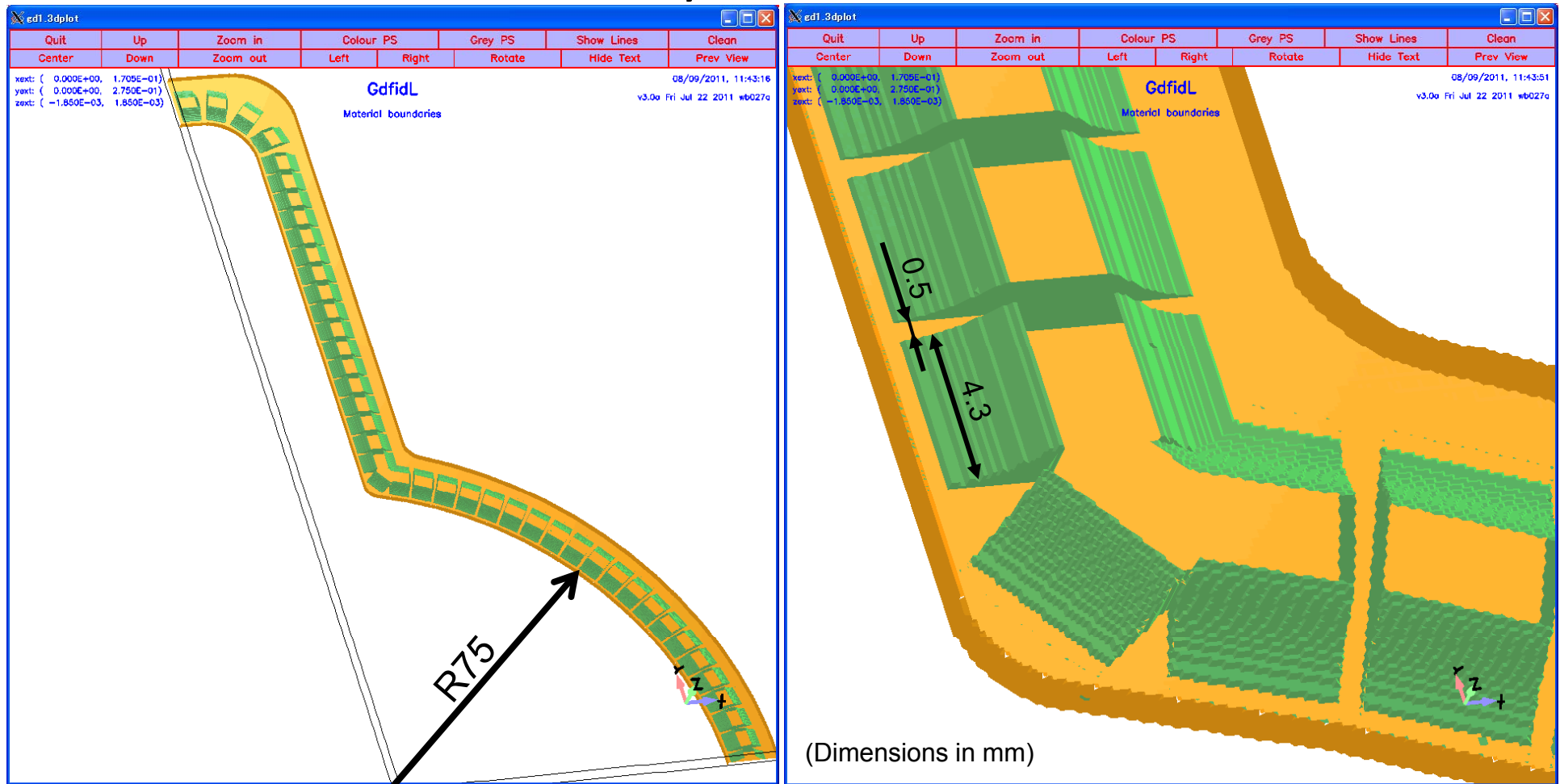


Blue Region: Vacuum





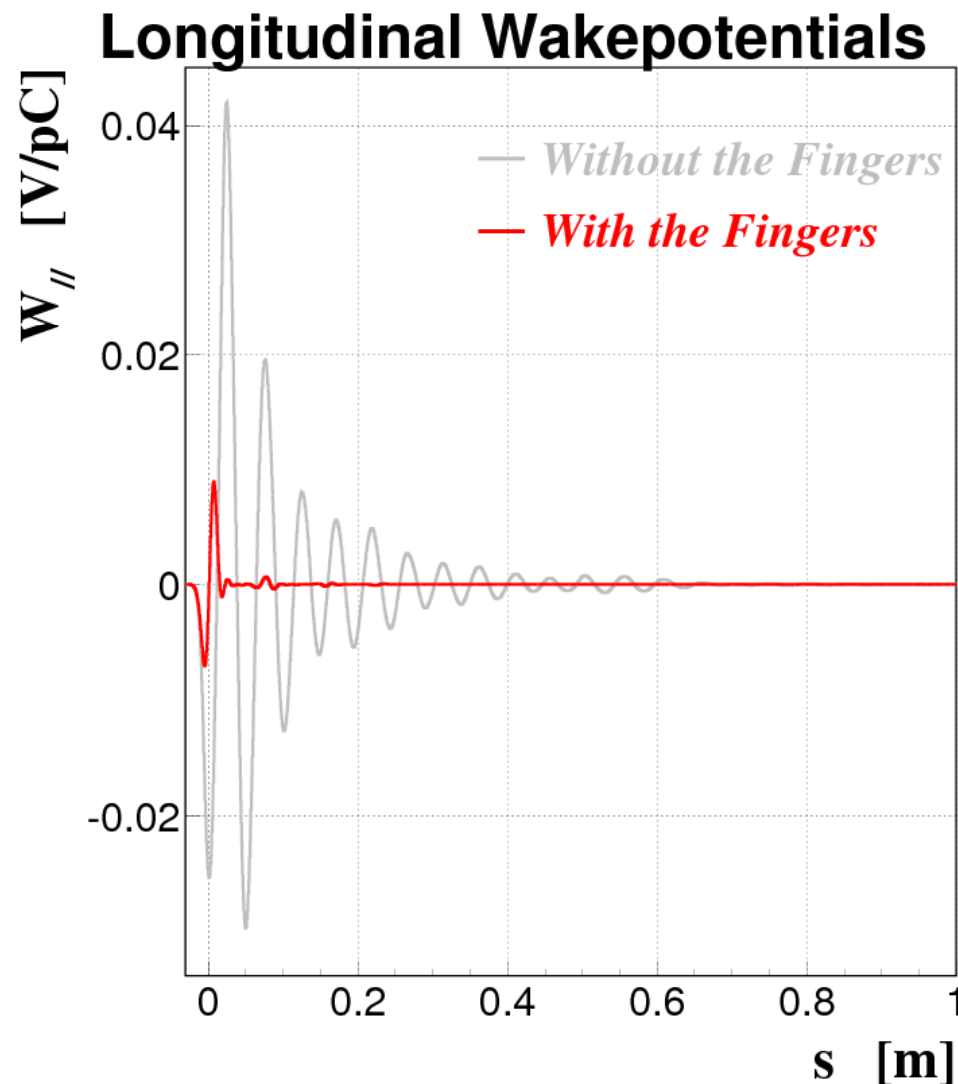
# The Geometry Converted to GdfidL



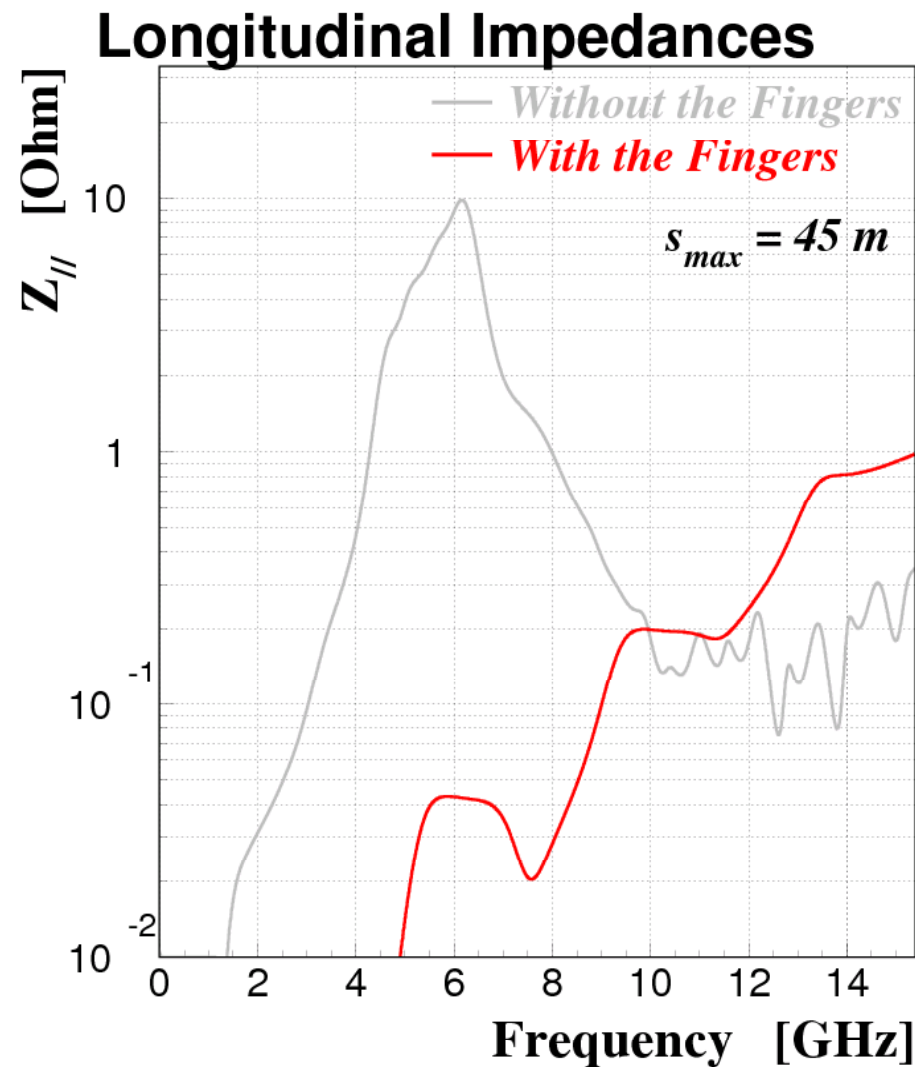
0.1mmのメッシュ・サイズにて  
GdfidLによるウェーク場計算

*Finite-Difference Time-Domain parallel computation  
using 10GB-memory and 64-cores in the PC cluster*

# Results of the Calculation (1/2)



Suppressed and Damped!



No Resonance!

## Results of the Calculation (2/2)

	Loss Factor [V/pC]	Loss Power from the Loss Factor [W]
Without the Fingers	0.017	9.7
With the Fingers	0.00048	<b>0.27</b>

For the DR Parameters:  
- Bunch Charge: 8nC  
- Bunch Length: 6.5mm  
- # of Bunches: 4/ring  
- Circumference: 135.5m

発熱に寄与するパワーは  
0.27Wよりも小さい！



*End of This File*