

SuperKEKB／陽電子ダンピングリング用 高周波加速空洞の開発

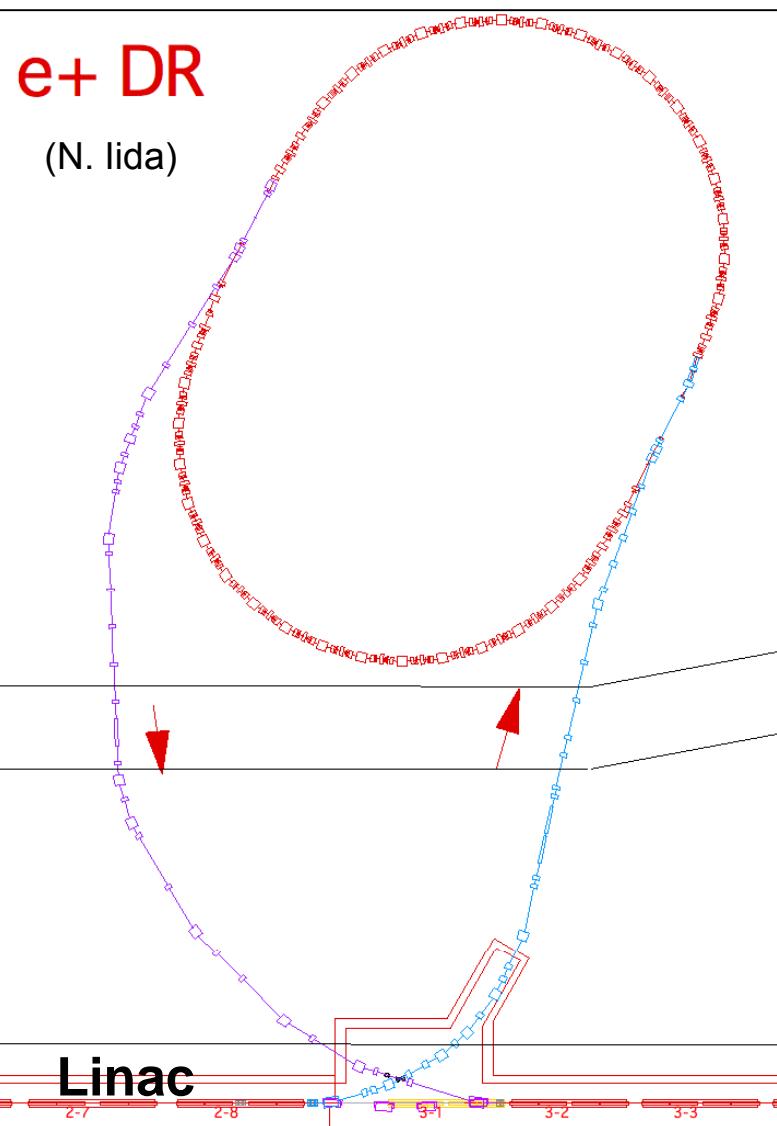
阿部 哲郎

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	MAC10
No. of bunch trains/ bunches per train	2 / 2		1.0
Circumference	135.5	m	
Maximum stored current*	70.8	mA	
Energy loss per turn	0.091	MV	
Horizontal damping time	10.9	ms	12.7
Injected-beam emittance	1700	nm	2100
Equilibrium emittance(h/v)	41.4 / 2.07	nm	14 / 1.4
Coupling	5	%	10
Emittance at extraction(h/v)	42.5 / 3.15	nm	17.6 / 5.1
Energy band-width of injected beam	± 1.5	%	
Energy spread	0.055	%	
Bunch length	6.5	mm	5.4
Momentum compaction factor	0.0141		0.0019
Number of normal cells	32		
Cavity voltage for 1.5 % bucket-height	1.4	MV	0.26
RF frequency	509	MHz	
Inner diameter of chamber	32	mm	
Bore diameter of magnets	44	mm	

* 8 nC/bunch

(M. Kikuchi, MAC11)

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。

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(次ページ)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) → **最大2MVの全加速電圧を保証**

3. 加速電圧(努力目標): 0.8[MV／空洞] (→壁面損失パワー: 180kW／空洞)

4. 最大蓄積ビーム電流: 70.8[mA] → (Super)KEKB-MR と比べると、ずっと小さい。

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

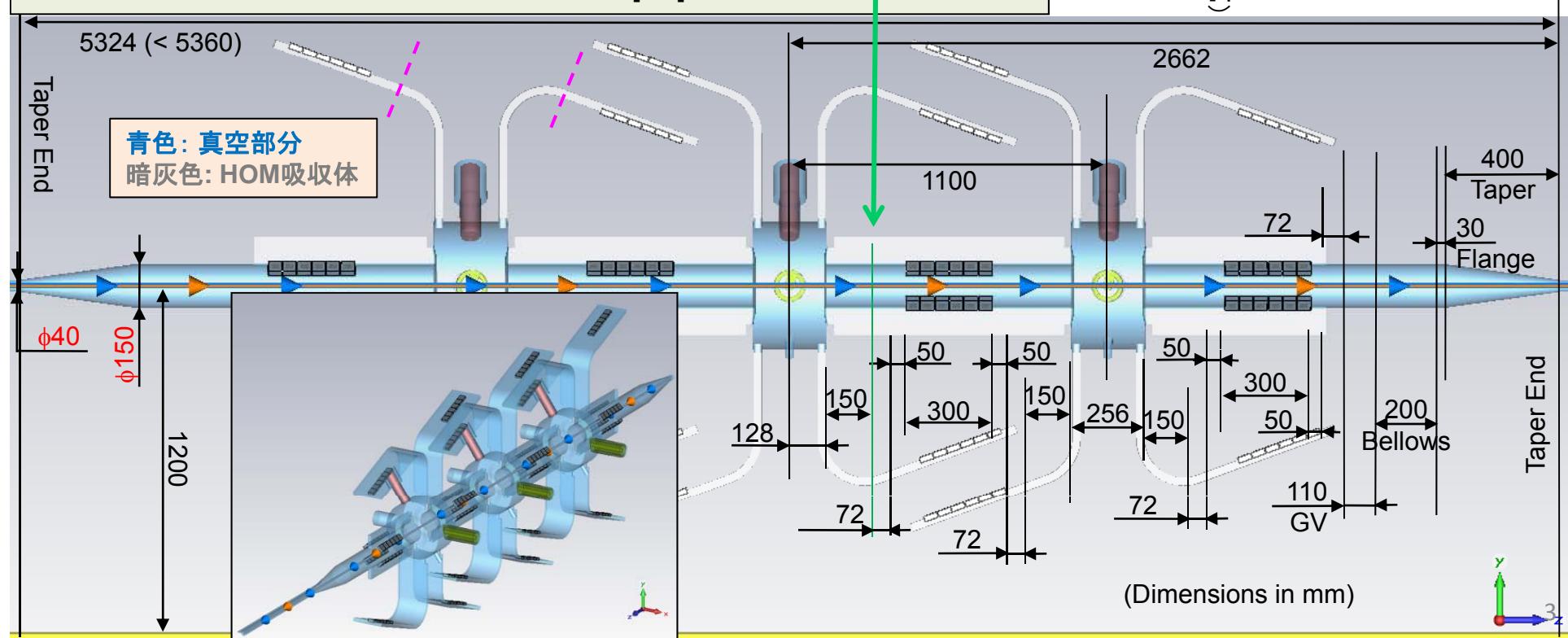
7. 空洞-GBP連結部にはフランジを用いない構造

8. 「マルチ・単セル空洞」構造

9. ハイパワー入力結合器: KEKB-MR／アレス空洞で使用したもの再利用

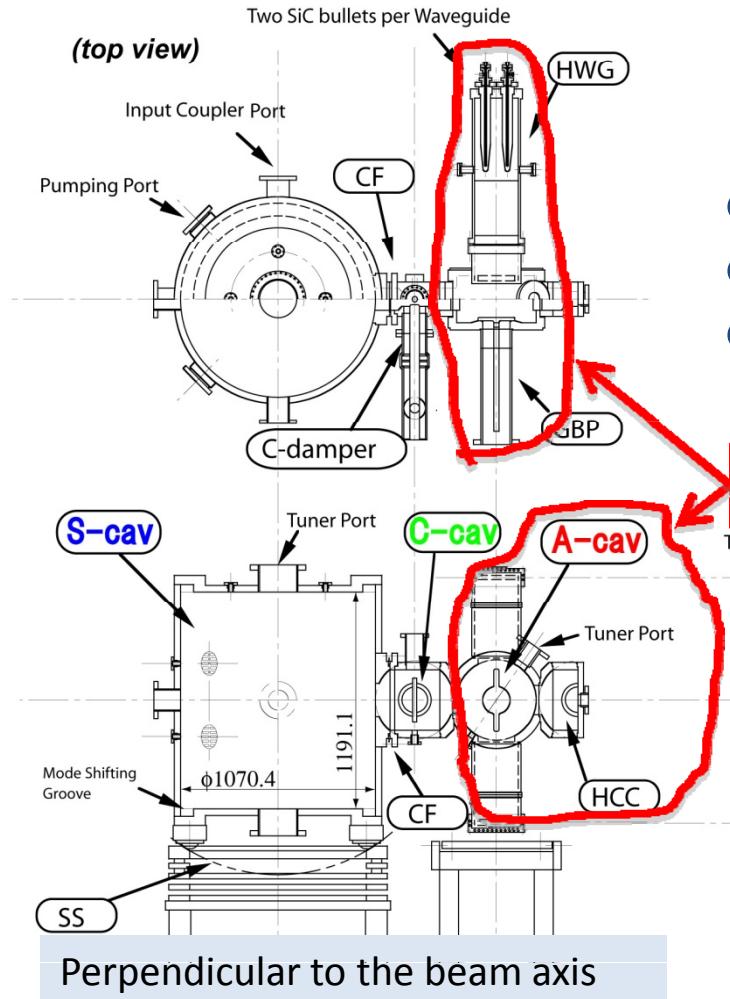
10. 各空洞に排気ポート→良い真空度(< 10^-6[Pa])で運転

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



Accelerator Resonantly-coupled with Energy Storage

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

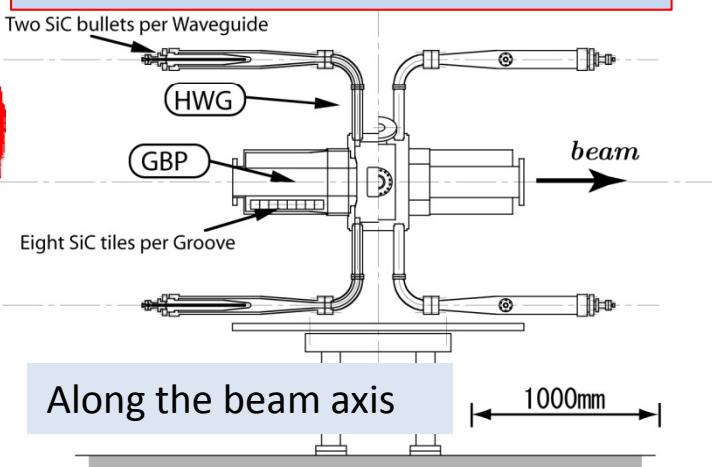


consists of

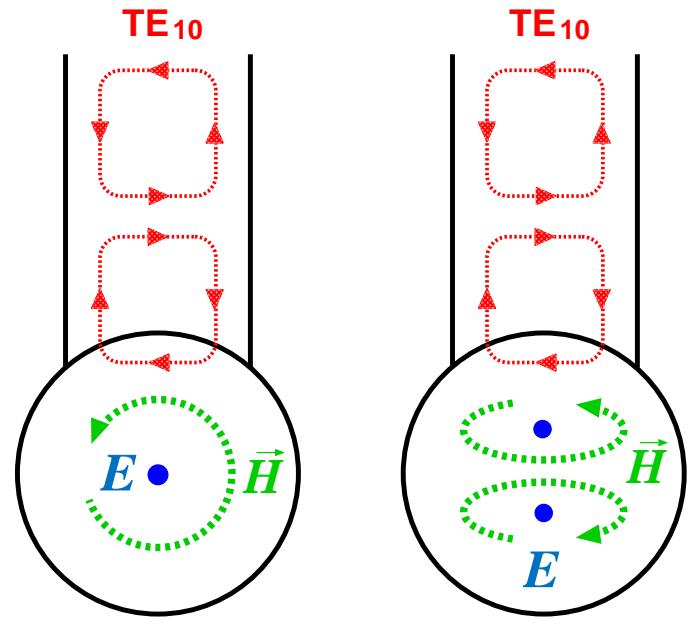
For KEKB-MR

- HOM-damped accelerating cavity (**A-cav**),
 - Energy-storage cavity with TE₀₁₃ (**S-cav**),
 - Coupling cavity (**C-cav**)
- with a parasitic-mode damper.

We use only this for the DR.



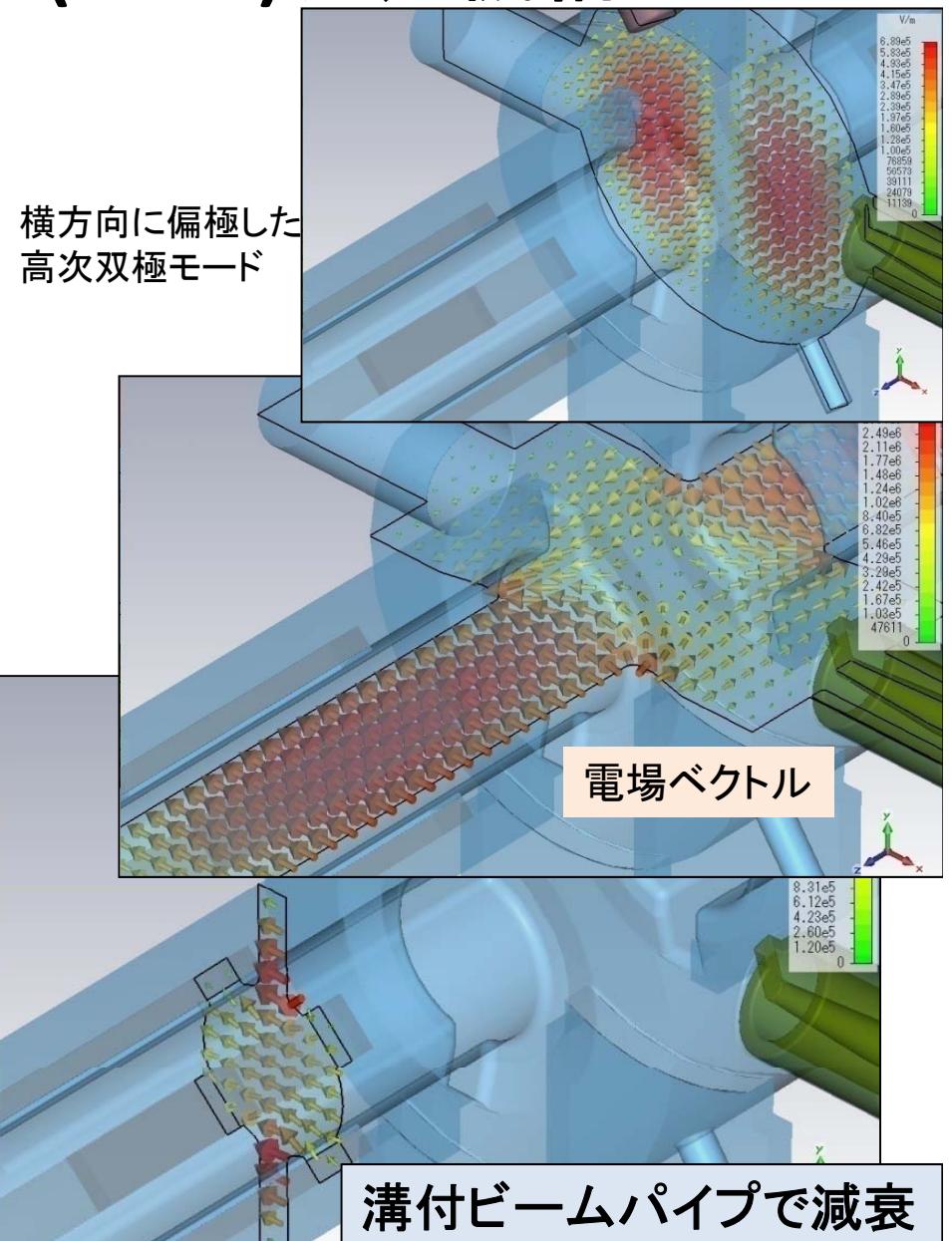
アレス空洞の Higher-Order-Mode(HOM)減衰機構



高次单極モード

縦方向に偏極した
高次双極モード

上下のHOM導波管で減衰



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) → **最大2MVの全加速電圧を保証**

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] → (Super)KEKB-MR と比べると、ずっと小さい。

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

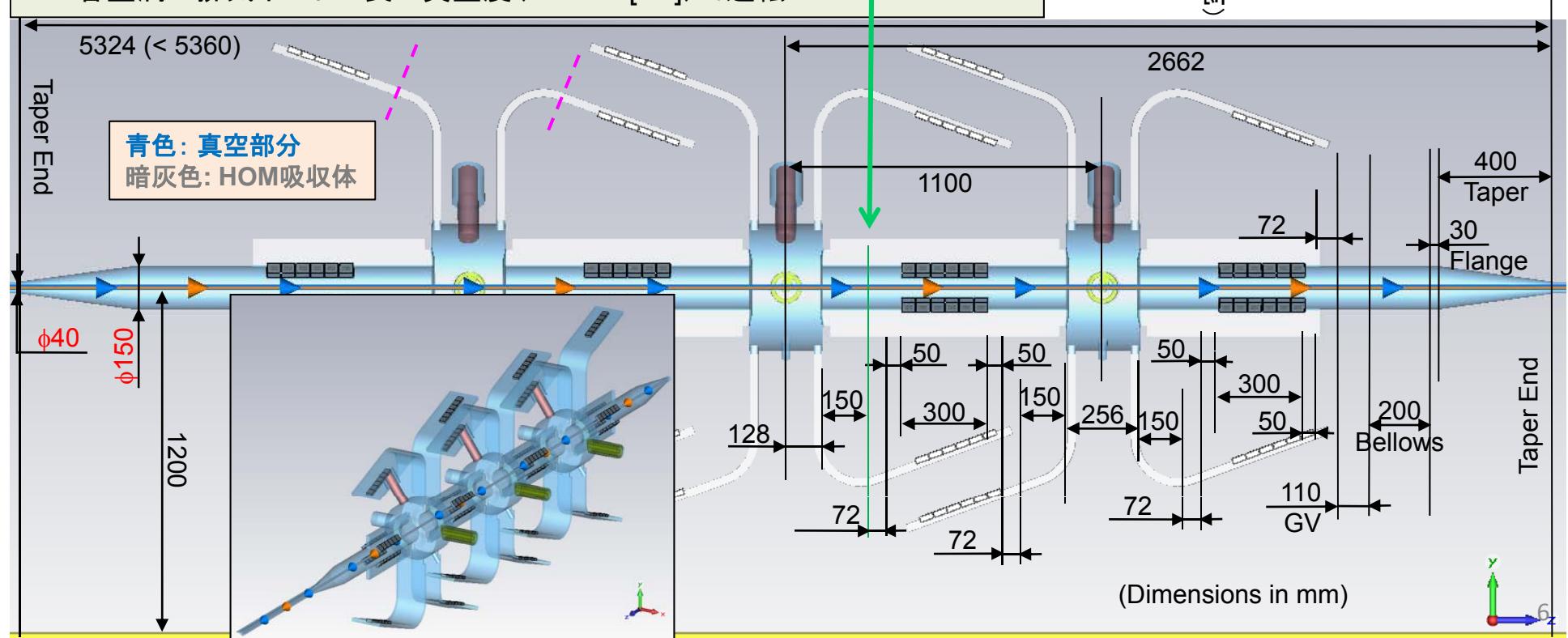
7. 空洞-GBP連結部にはフランジを用いない構造

8. 「マルチ・単セル空洞」構造

9. ハイパワー入力結合器: KEKB-MR／アレス空洞で使用したもの再利用

10. 各空洞に排気ポート→良い真空度(< 10^-6[Pa])で運転

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



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。

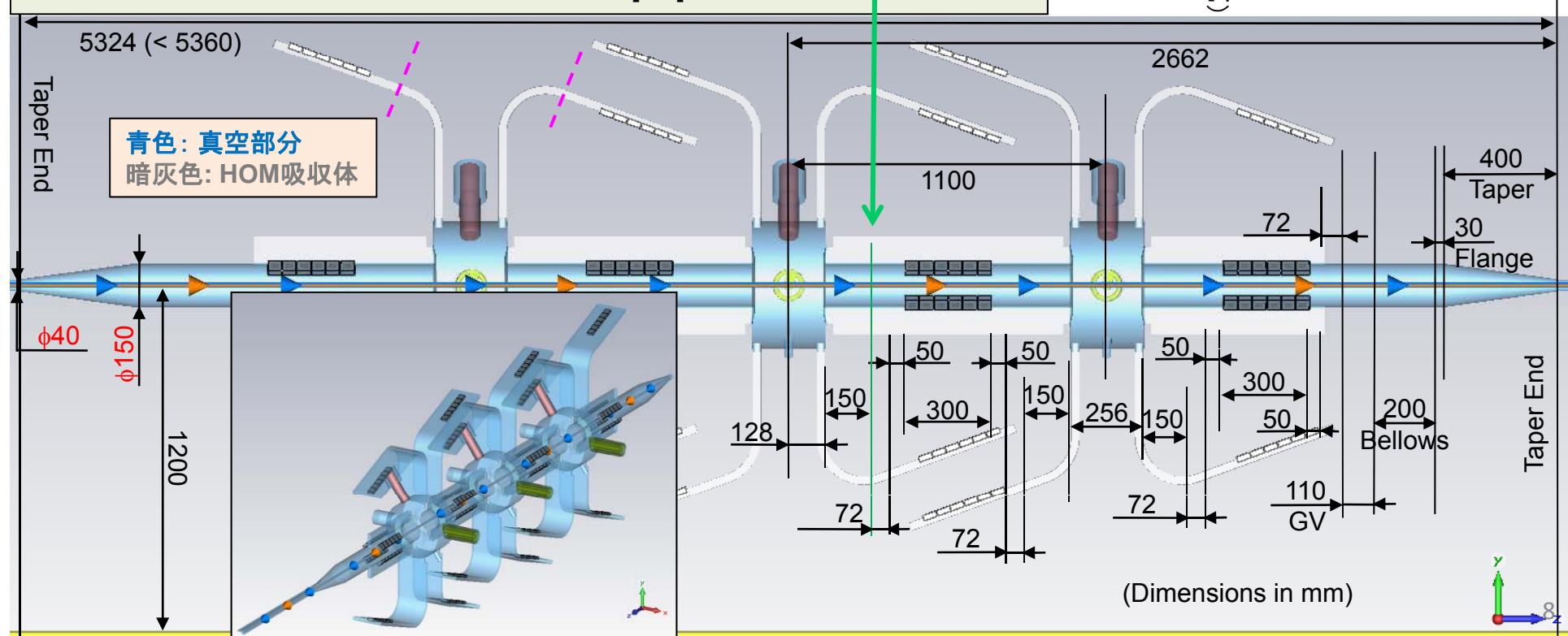
	空洞電圧 [MV]	壁面損失電力 [kW]	壁面温度計算値 [°C]
KEKBデザイン	0.50	60	50
最大連続定格 (時間制限無し)	0.70	133	74
最大瞬間定格 (30分間以内)	0.82	193	94

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

SuperKEKB/DR用高周波加速構造

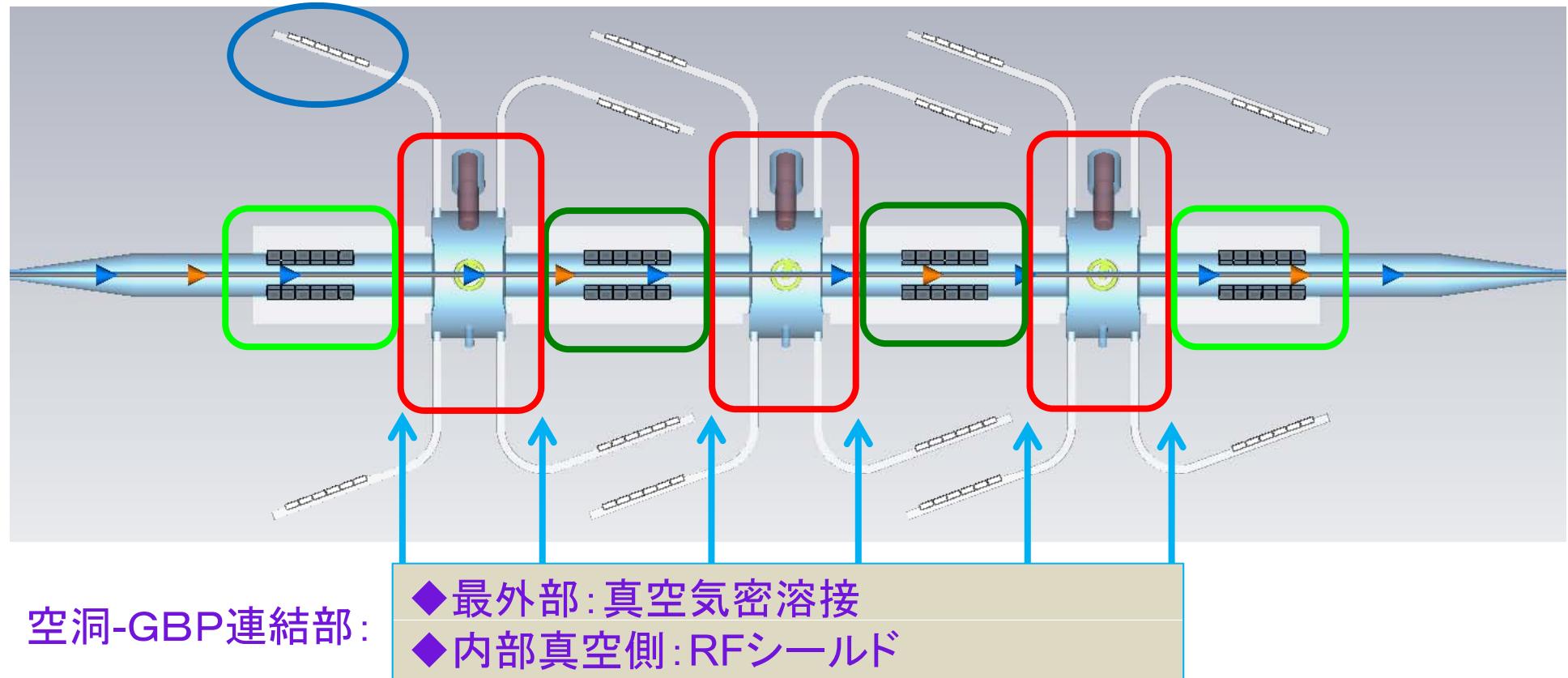
KEKB加速器にて長期安定運転の実績のあるアレス空洞をベース

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) → **最大2MVの全加速電圧を保証**
 3. 加速電圧(努力目標): 0.8[MV／空洞] (→壁面損失パワー: 180kW／空洞)
 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: KEKB-MR／アレス空洞で使用したもの再利用
 10. 各空洞に排気ポート→良い真空度($< 10^{-6}[\text{Pa}]$)で運転
- (空洞あたり)
- $$R/Q = 150 \Omega$$
- $$Q_0 = 31420 \text{ (IACS100\%)}$$
- $$R_{sh} = 4.7 \text{ M}\Omega$$



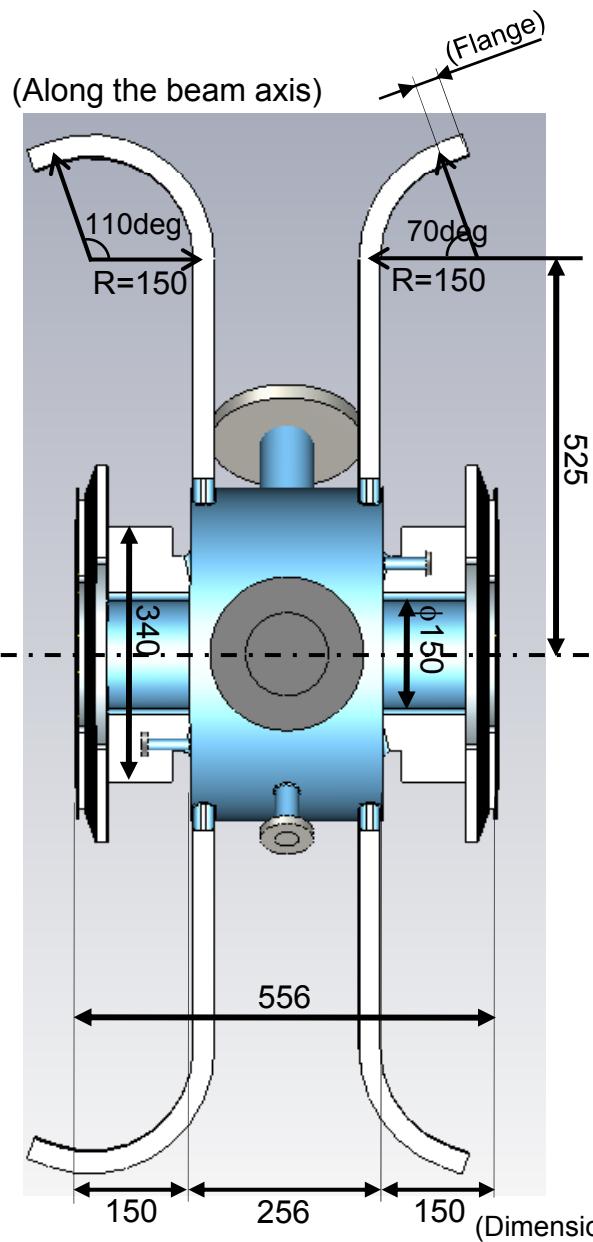
4種類のコンポーネント

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)

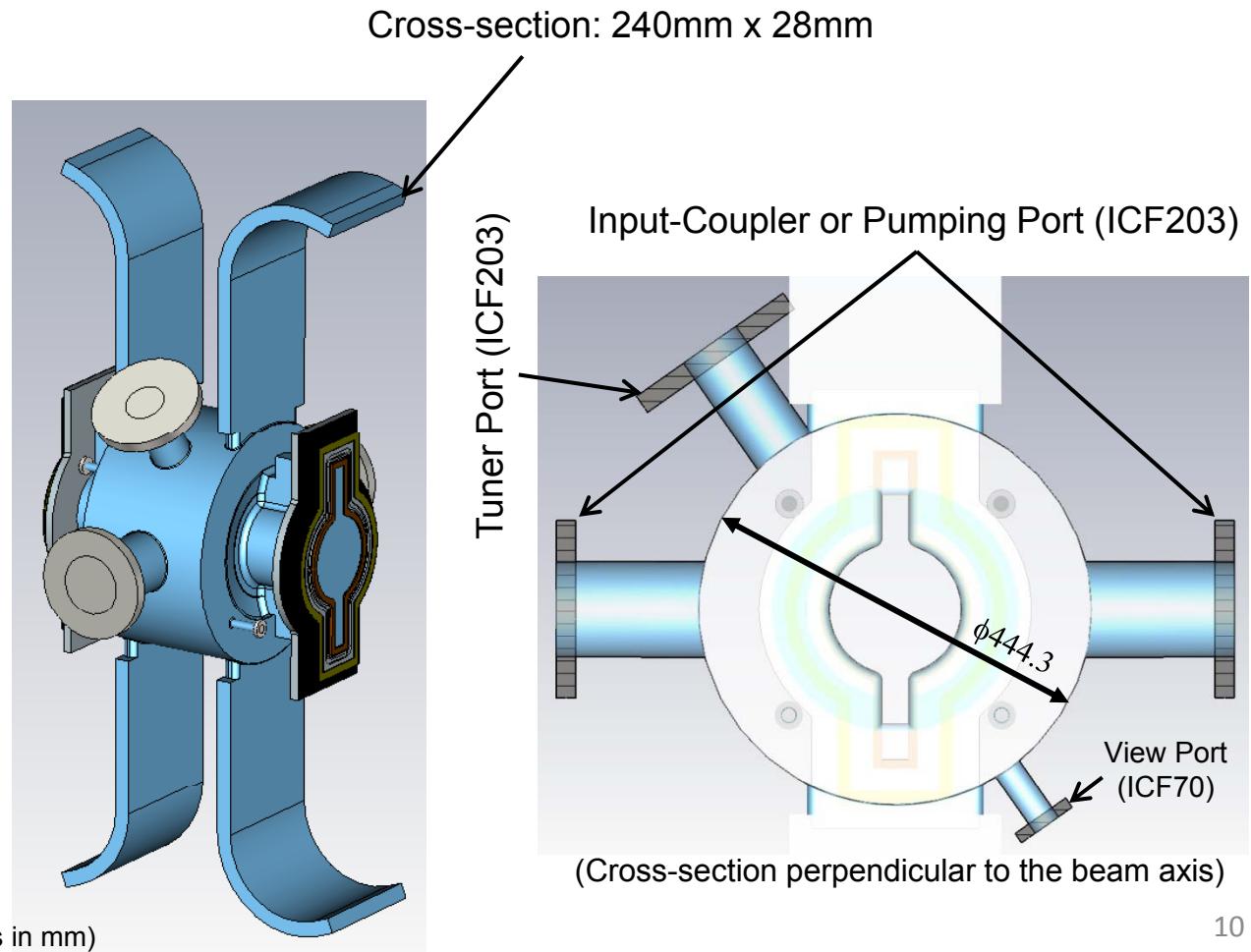


本構造は、以上のコンポーネントをブロックのように組み立てる方式。

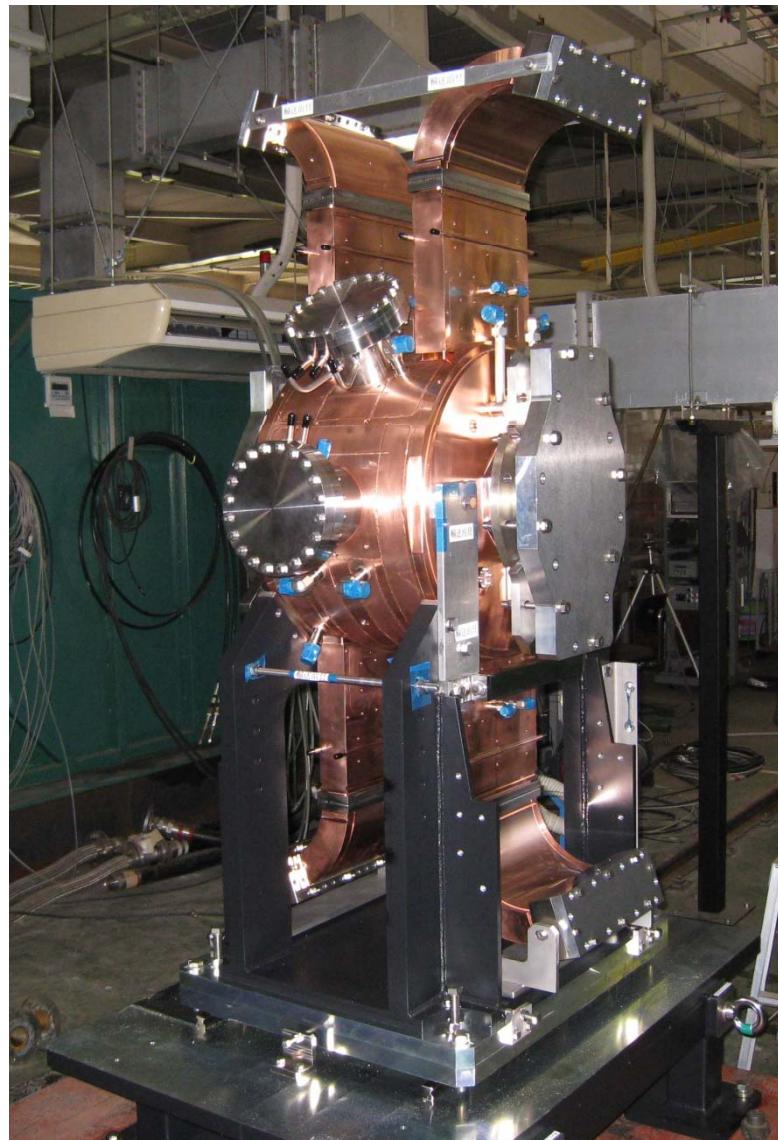
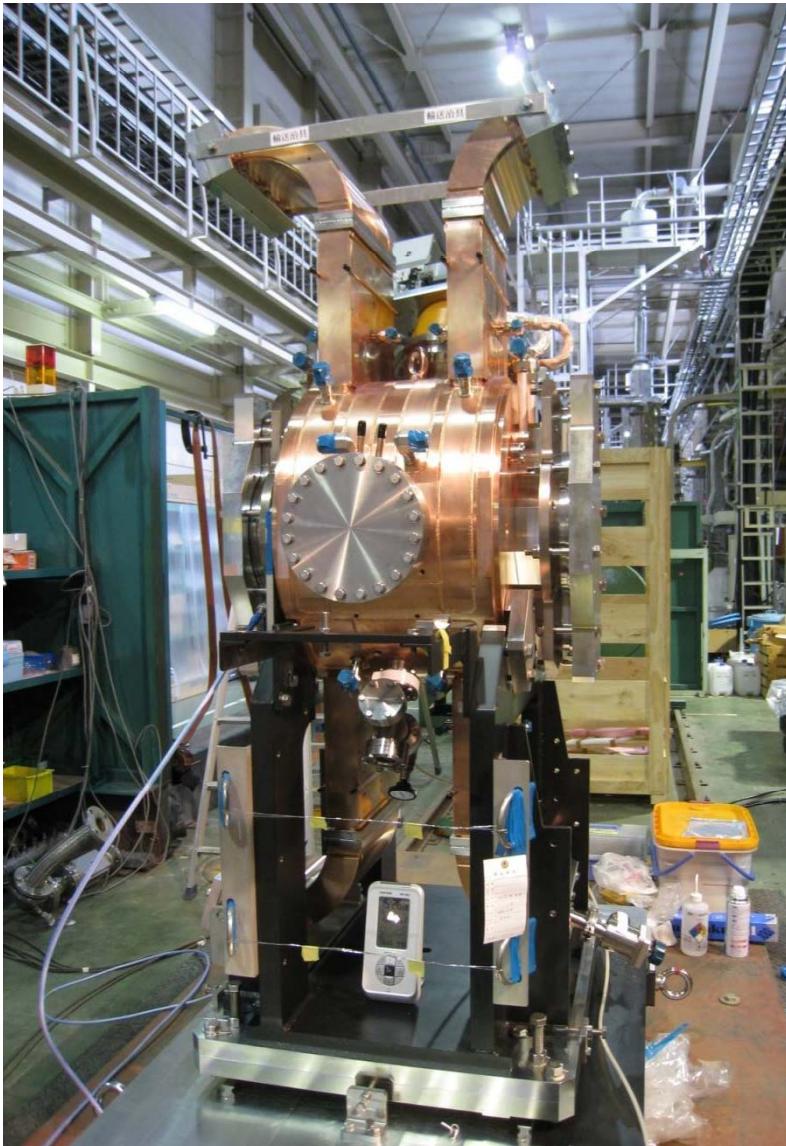
1. 空洞本体



- ✓ 材質: 無酸素銅クラス1(ポート、GBP、HOM導波管を除く)
- ✓ 鏡面対称(Eベンド、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)

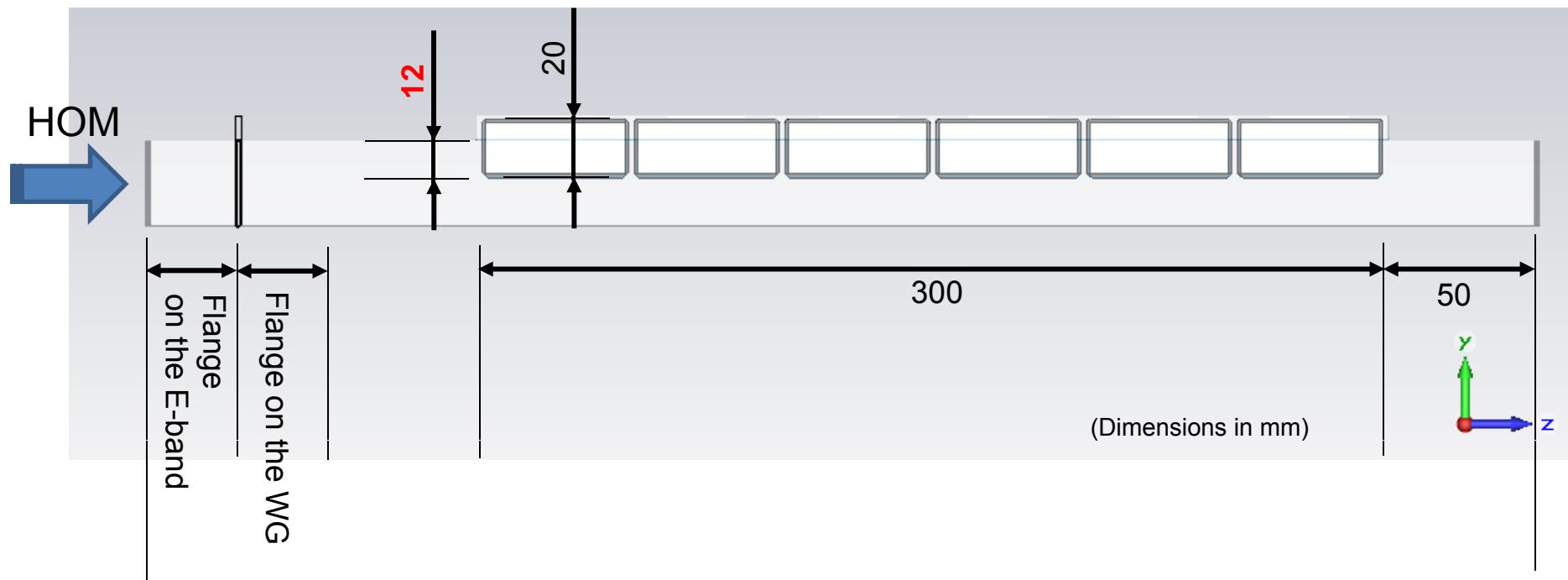
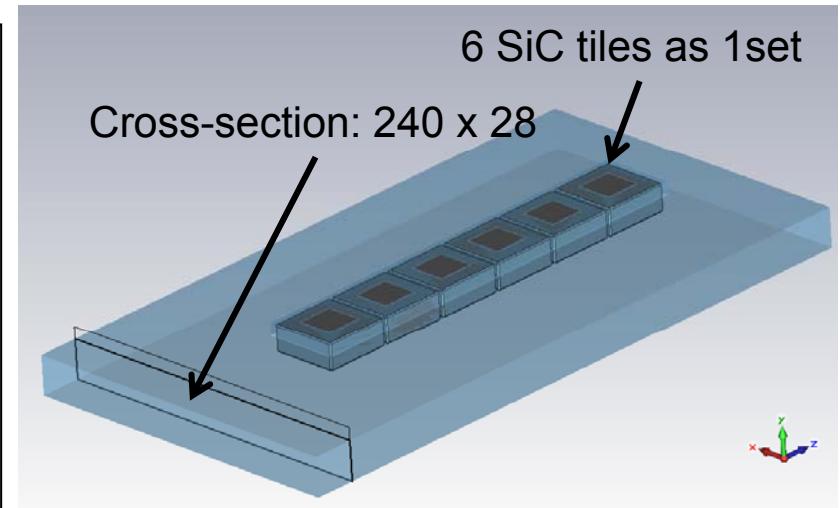


空洞本体の試験機 (2011年度製作)

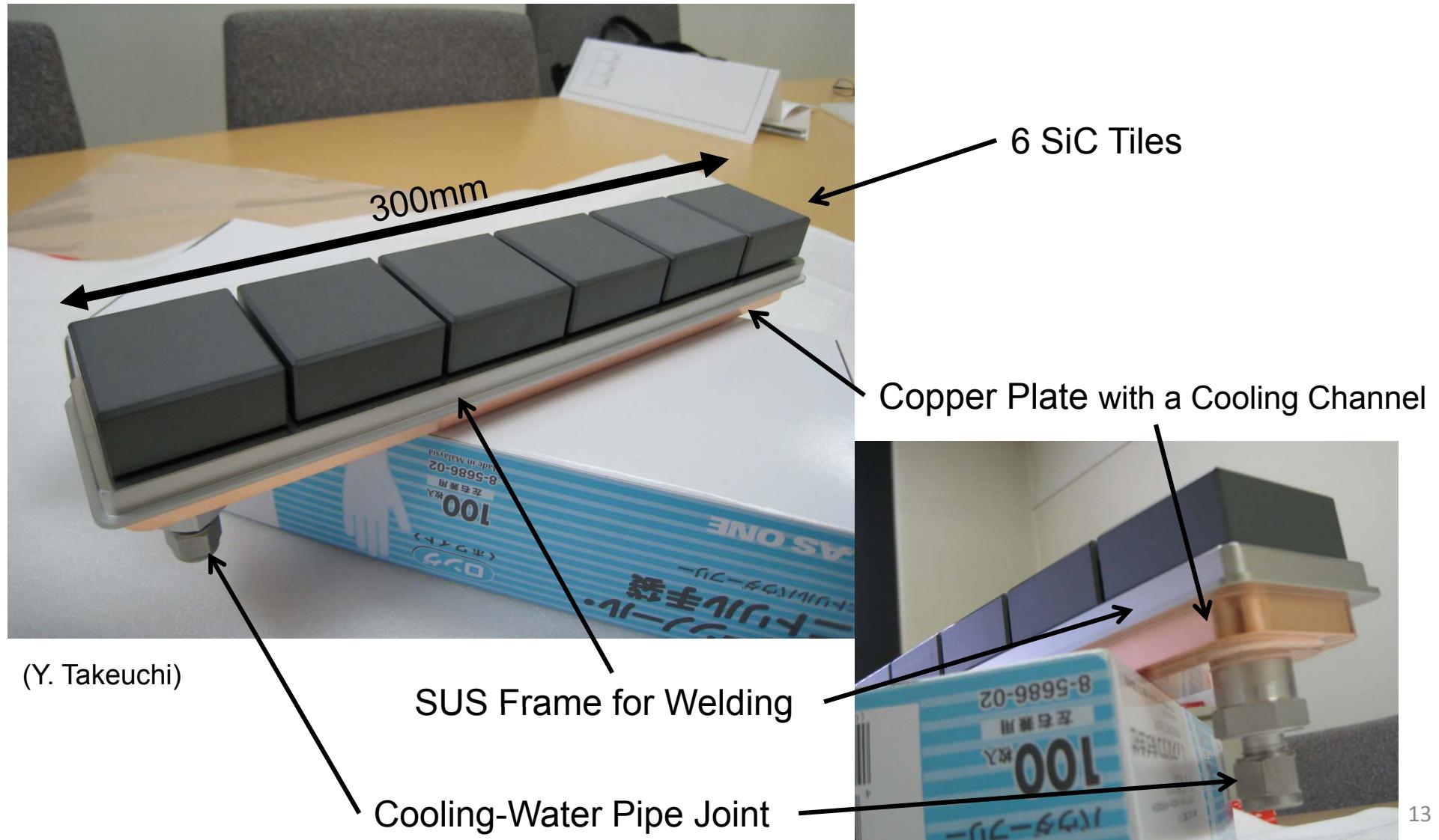


2. HOM導波管ロード

- ✓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: ~1kW/1set(@1.3GHz)
- ✓Max. HOM Power: ~30W／導波管ロード
- ✓Max. Accl.-Mode Power: ~100W／導波管ロード



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



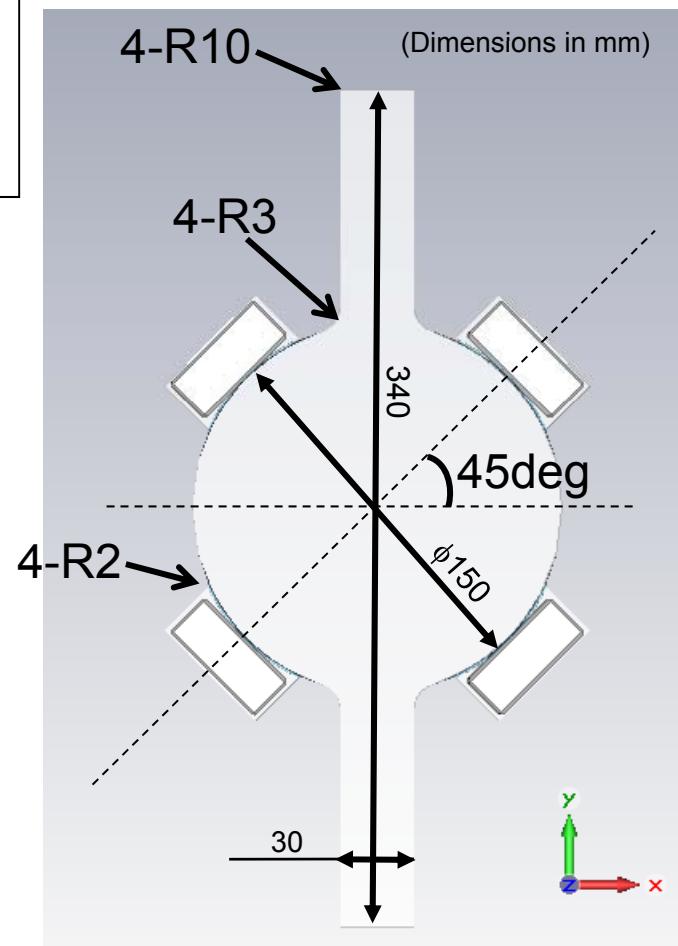
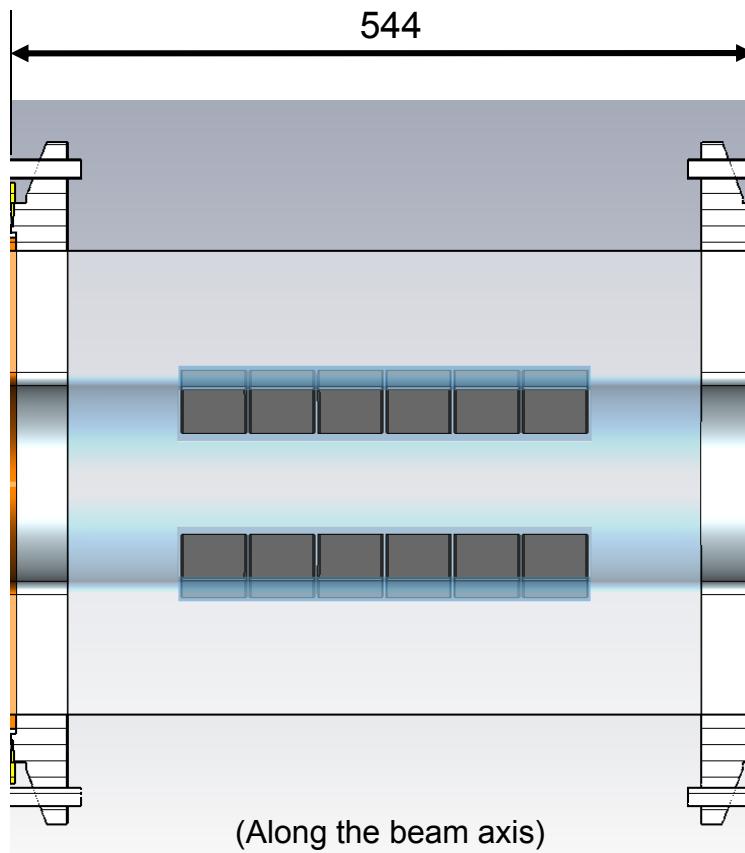
HOM導波口一ドの試験機

(2011年度製作)



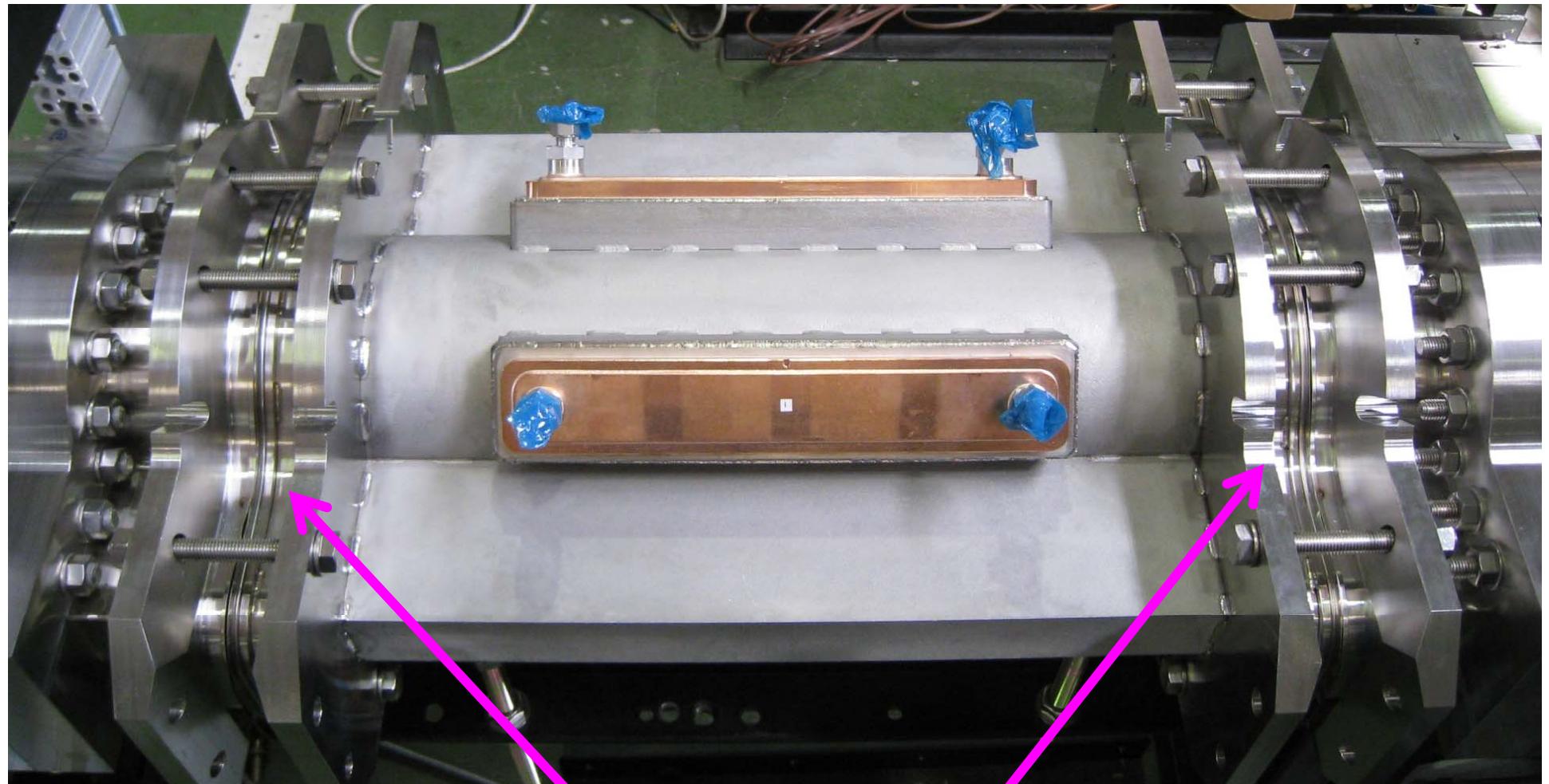
3. GBP(空洞間)

- ✓ 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



(Cross-section perpendicular to the beam axis)

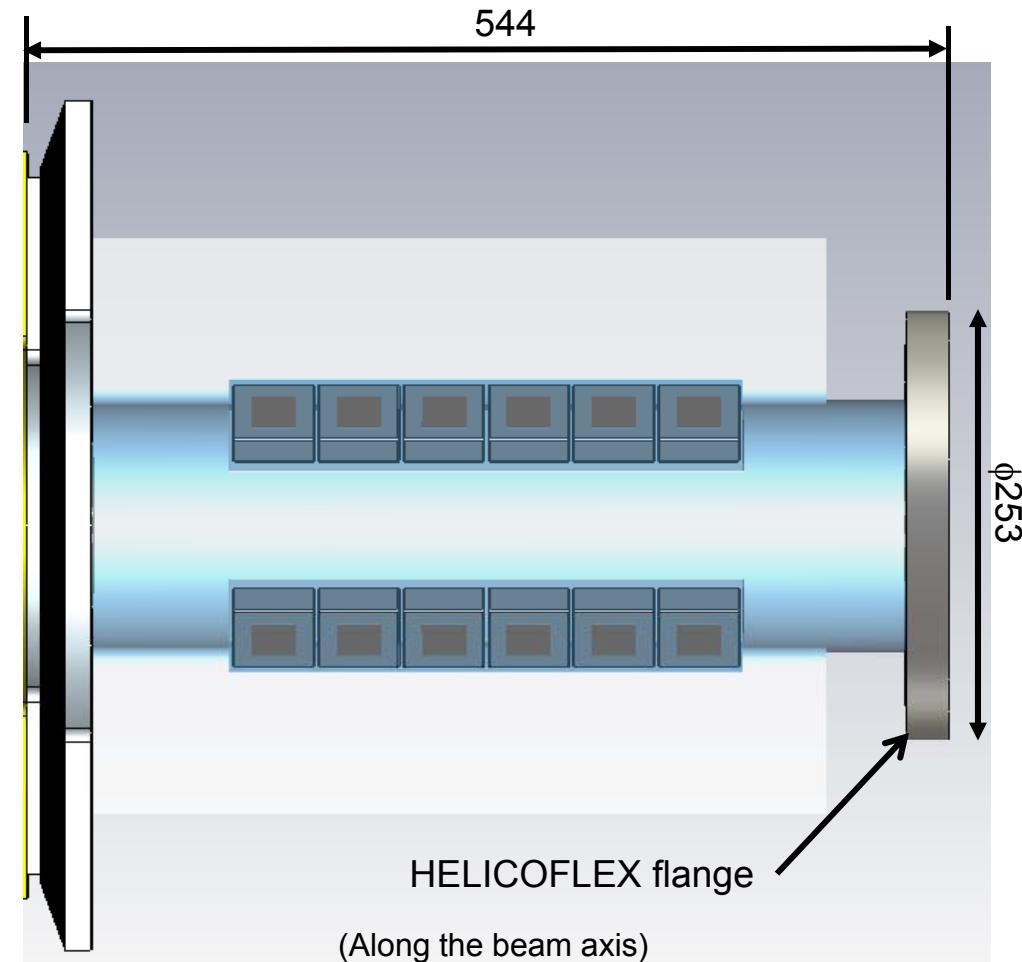
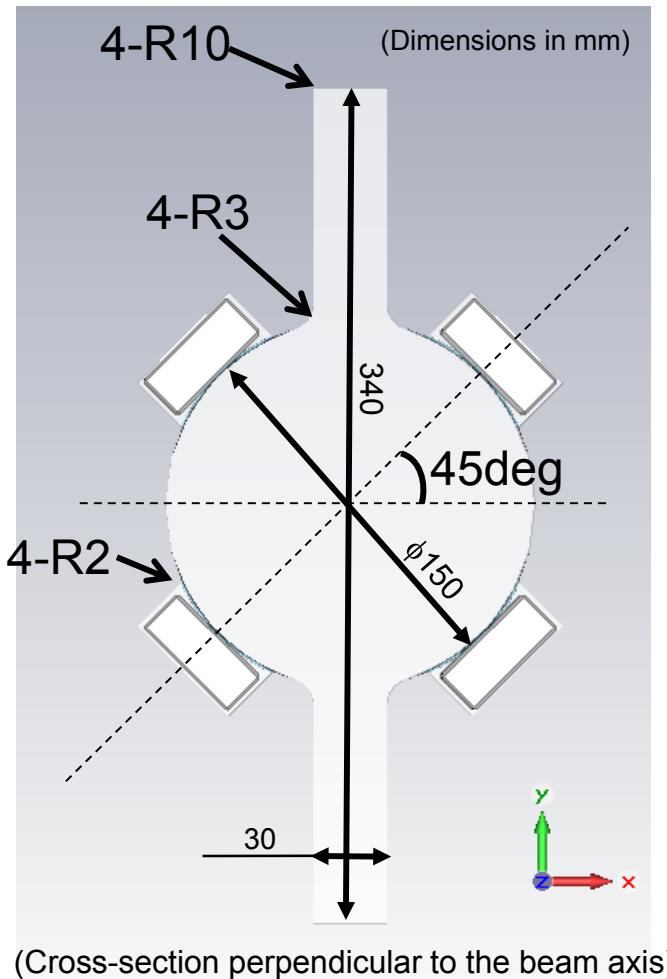
GBP(空洞間)の試験機 (2011年度製作)



GBP連結部

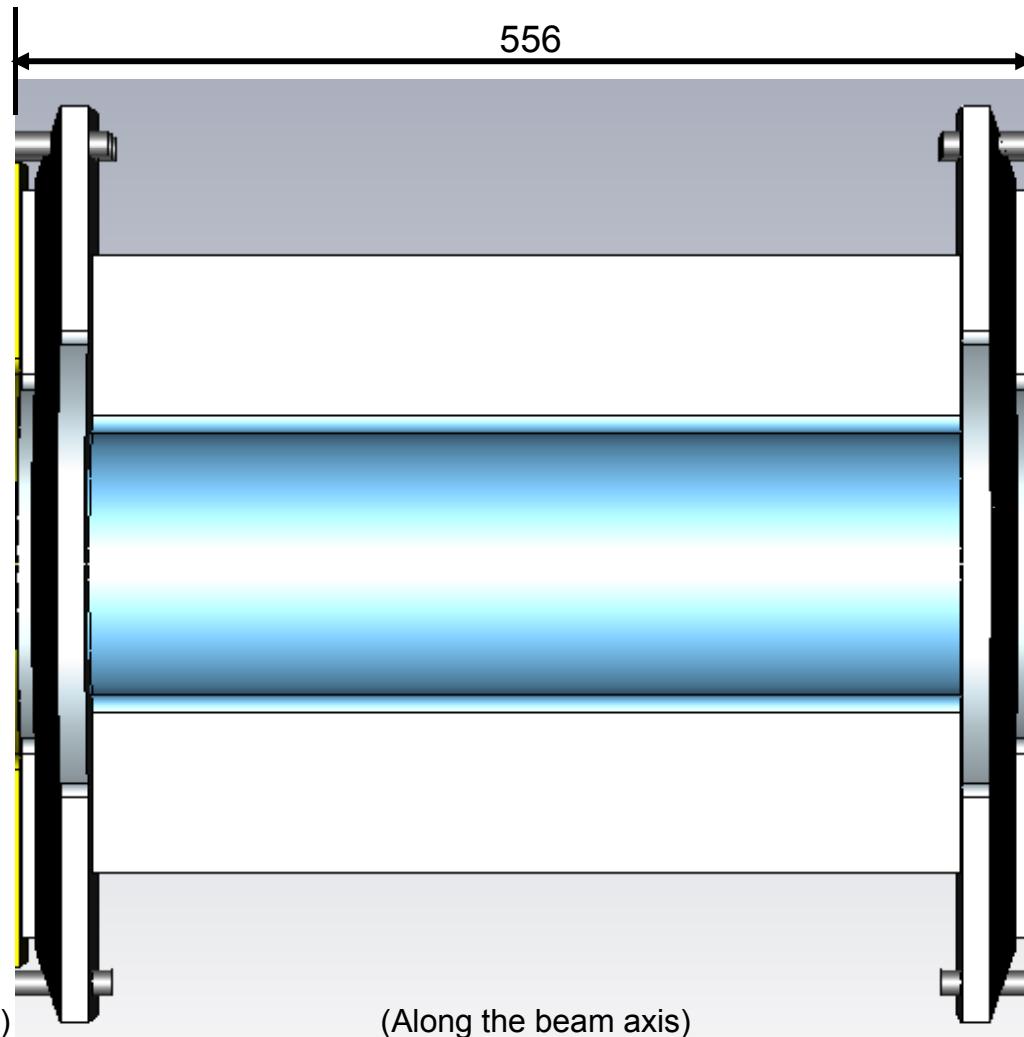
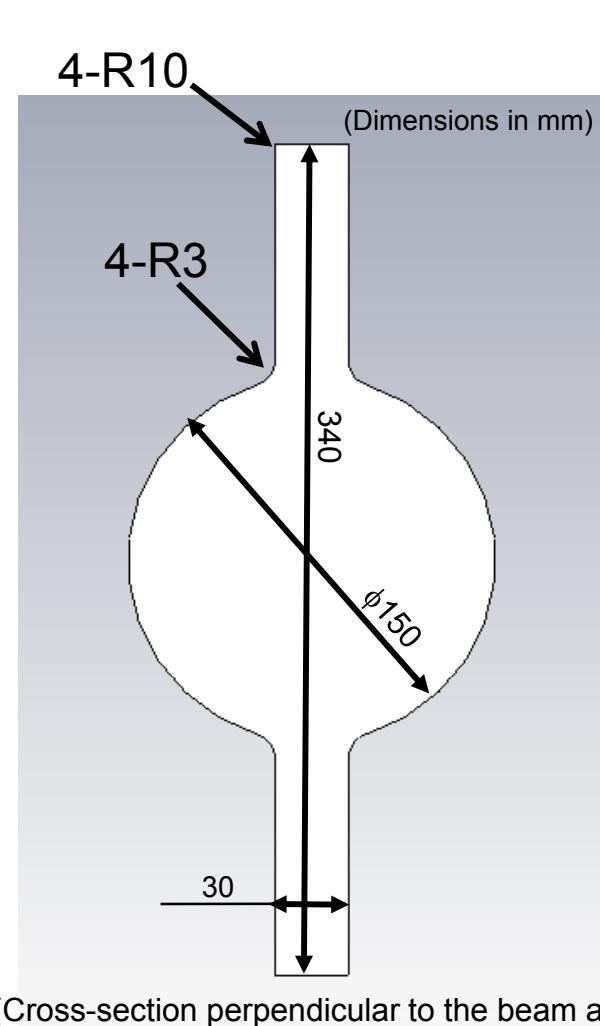
4. GBP(空洞端)

- ✓ 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

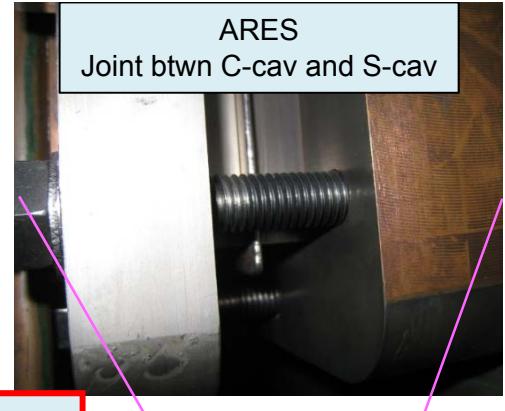
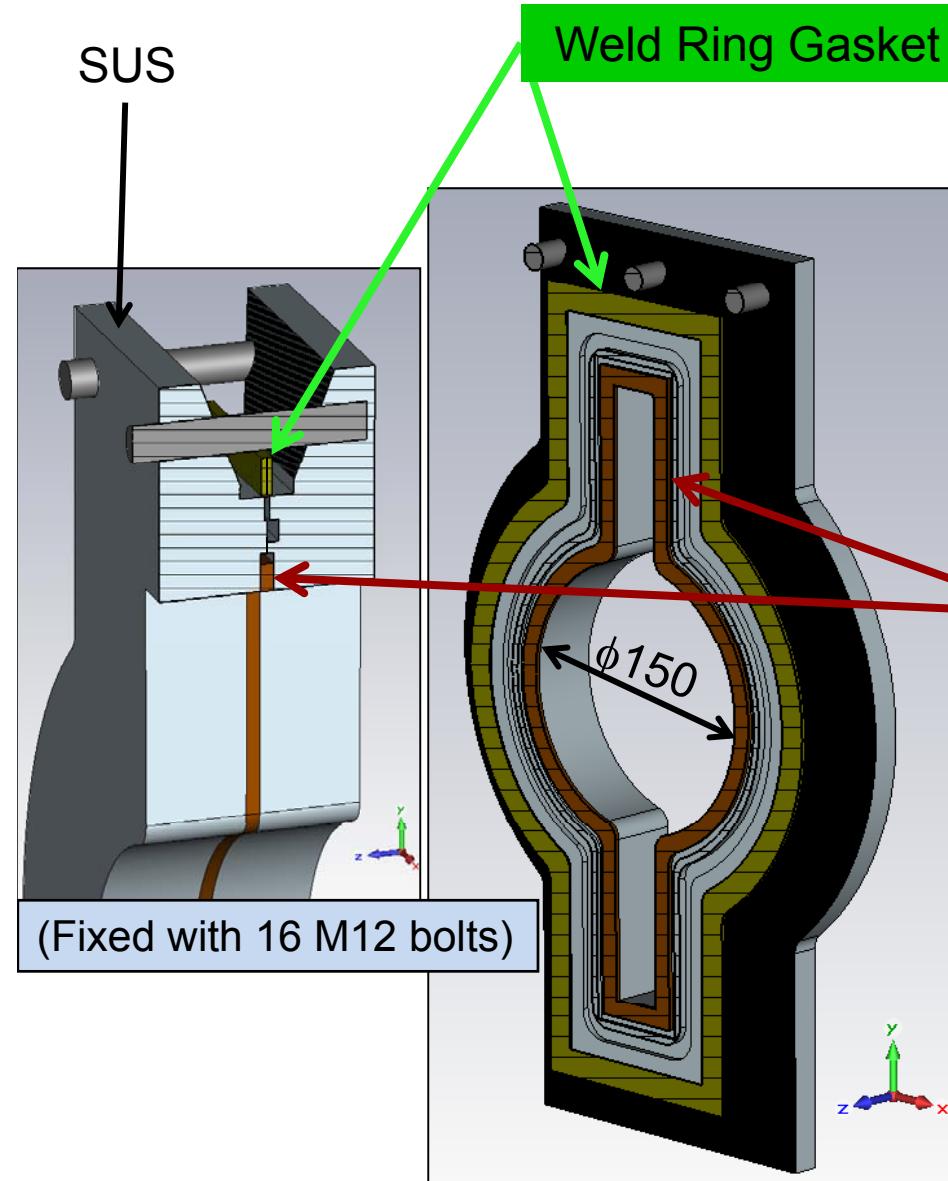


GBP(ダミー)

- ✓ 材質: SUS
- ✓ HOM吸収体無し
- ✓ 空洞2台構成時に使用



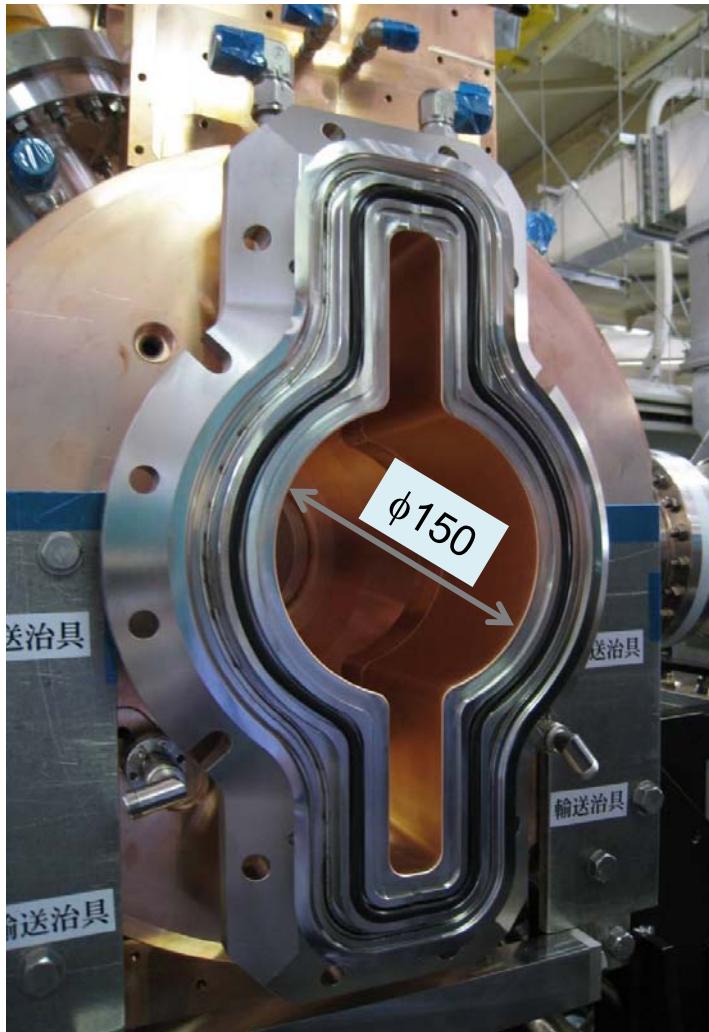
GBP連結部



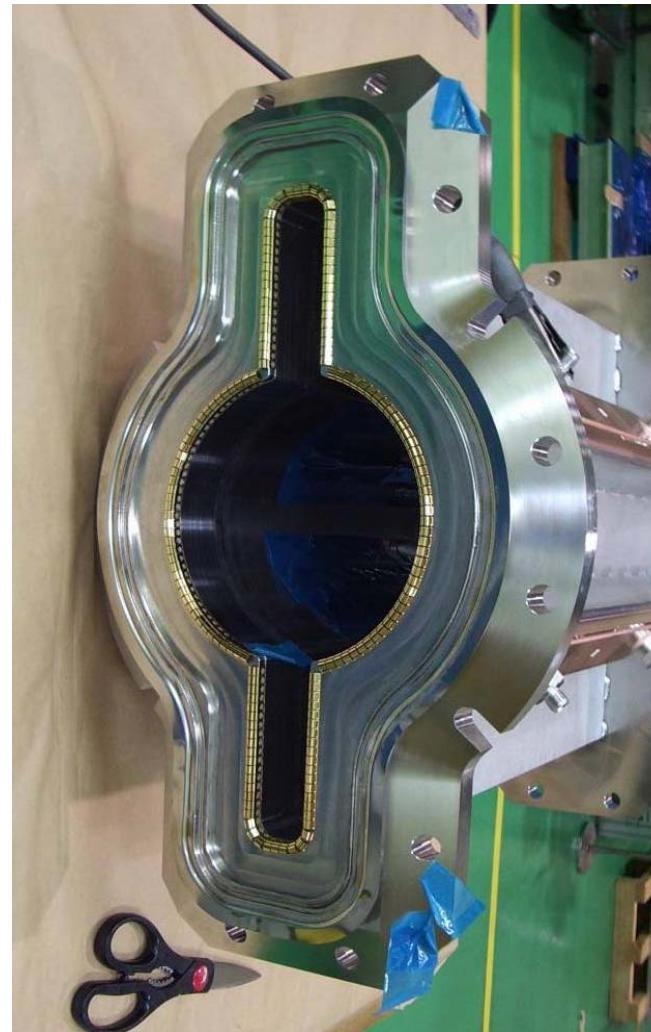
Single-Bunch-Mode Operation
- Beam current: 70 mA (max.)
- Bunch length: 24 mm

試験機のGBP連結部

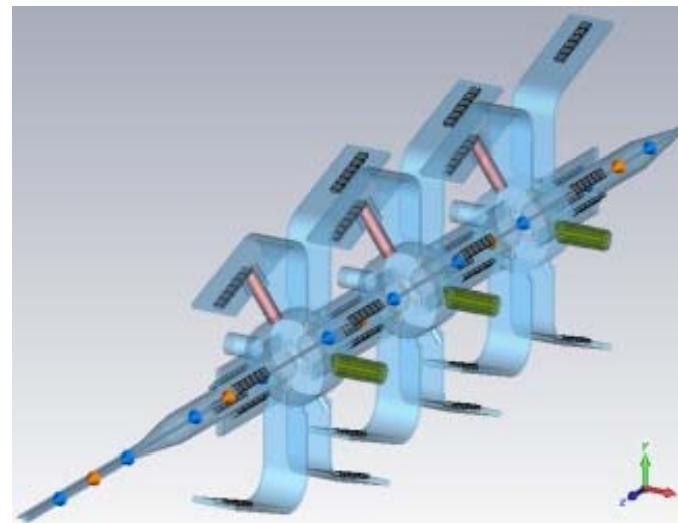
加速空洞側



GBP側

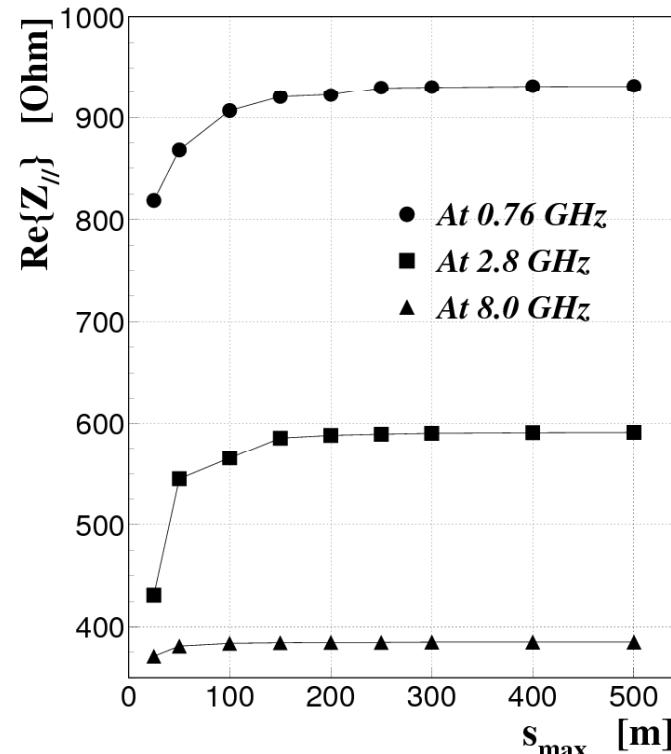
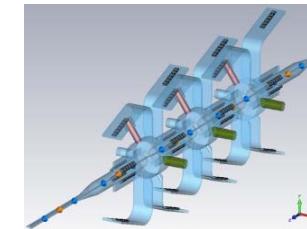
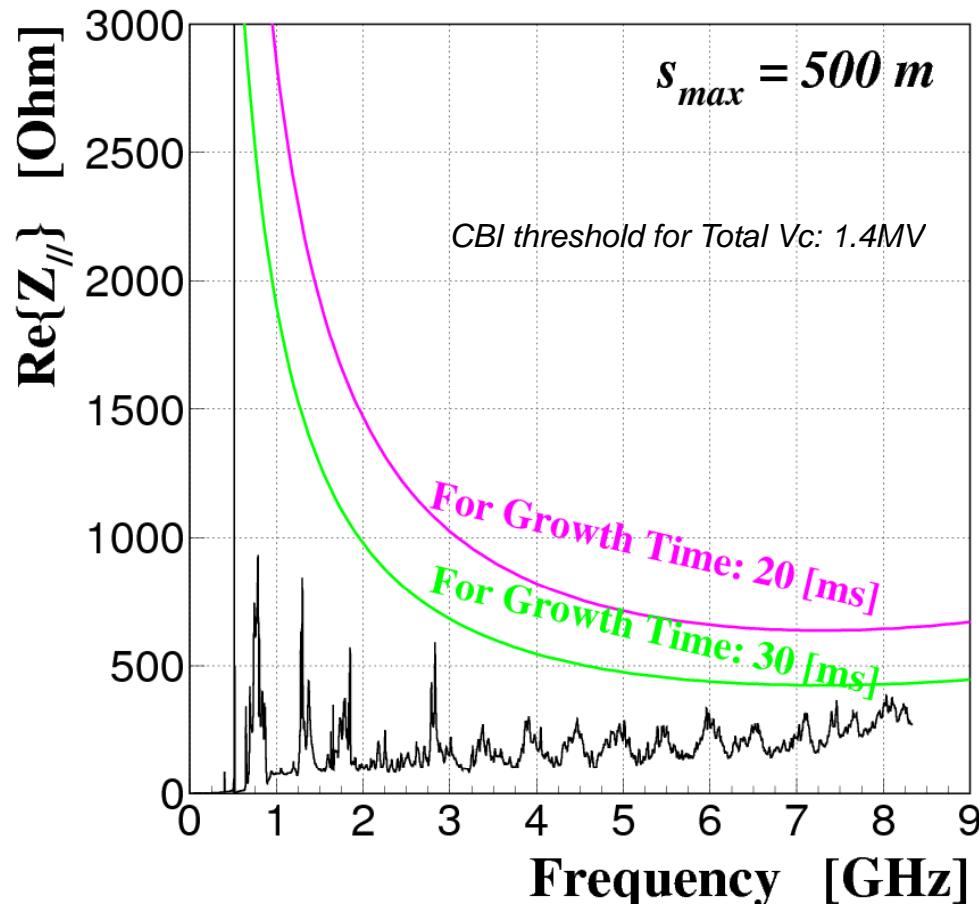


結合インピーダンスと 結合バンチ不安定性



進行方向結合インピーダンス計算結果

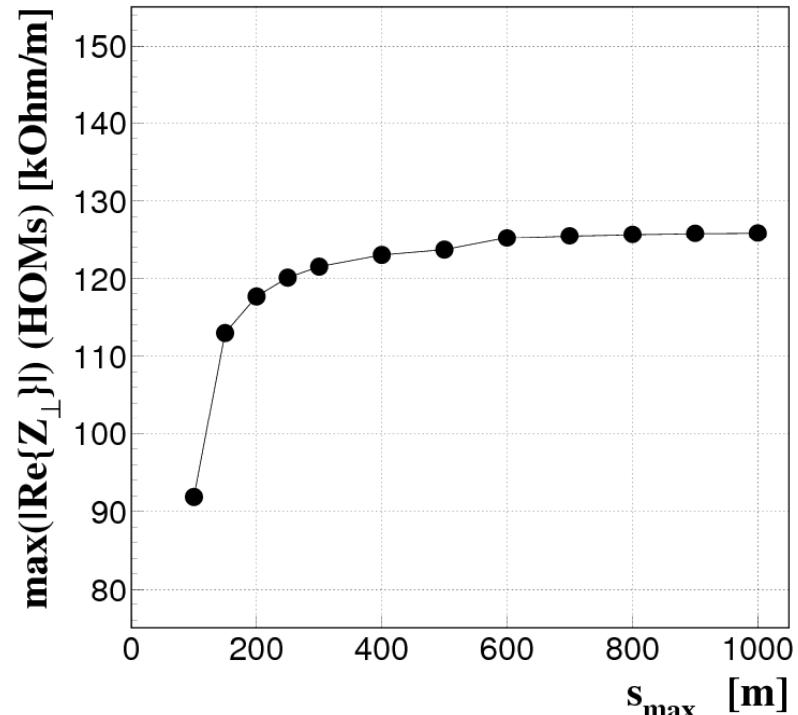
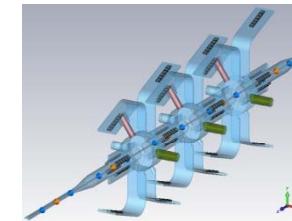
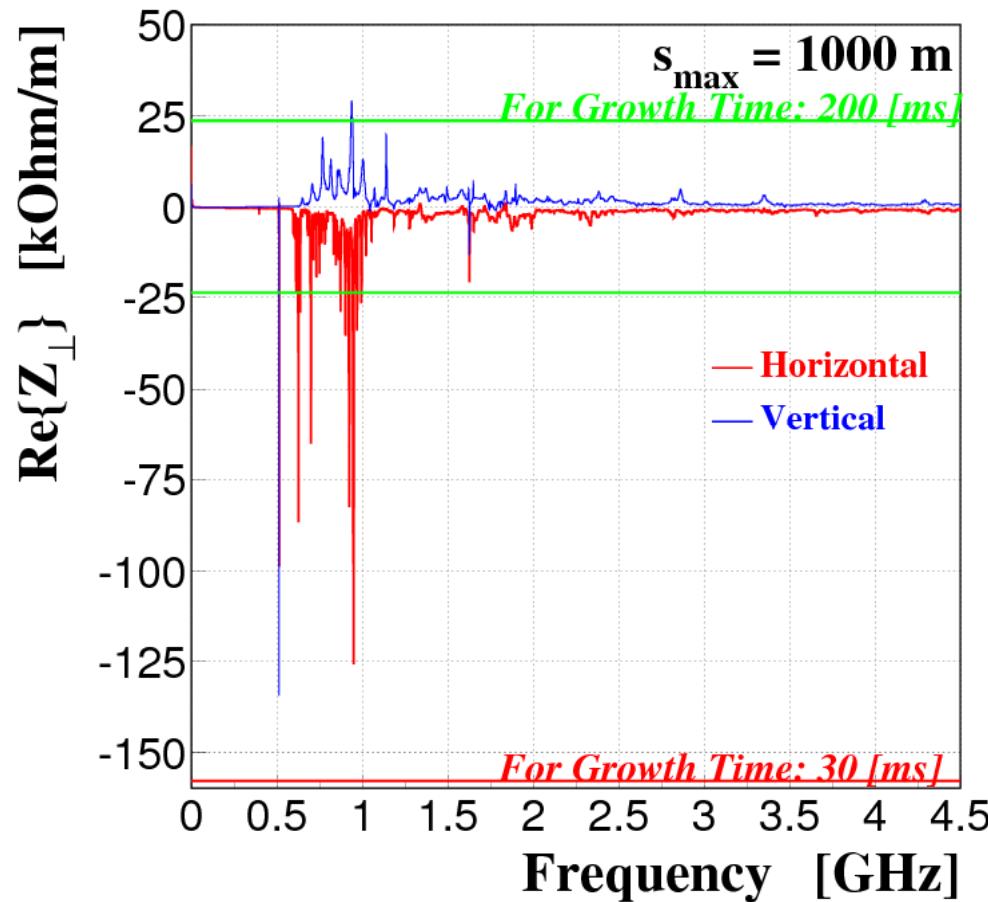
GdfidLの時間領域有限差分計算で得た
ウェークポテンシャルのフーリエ変換



CBI Growth Time $> 30\text{ms} > 5\text{ms}$ (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

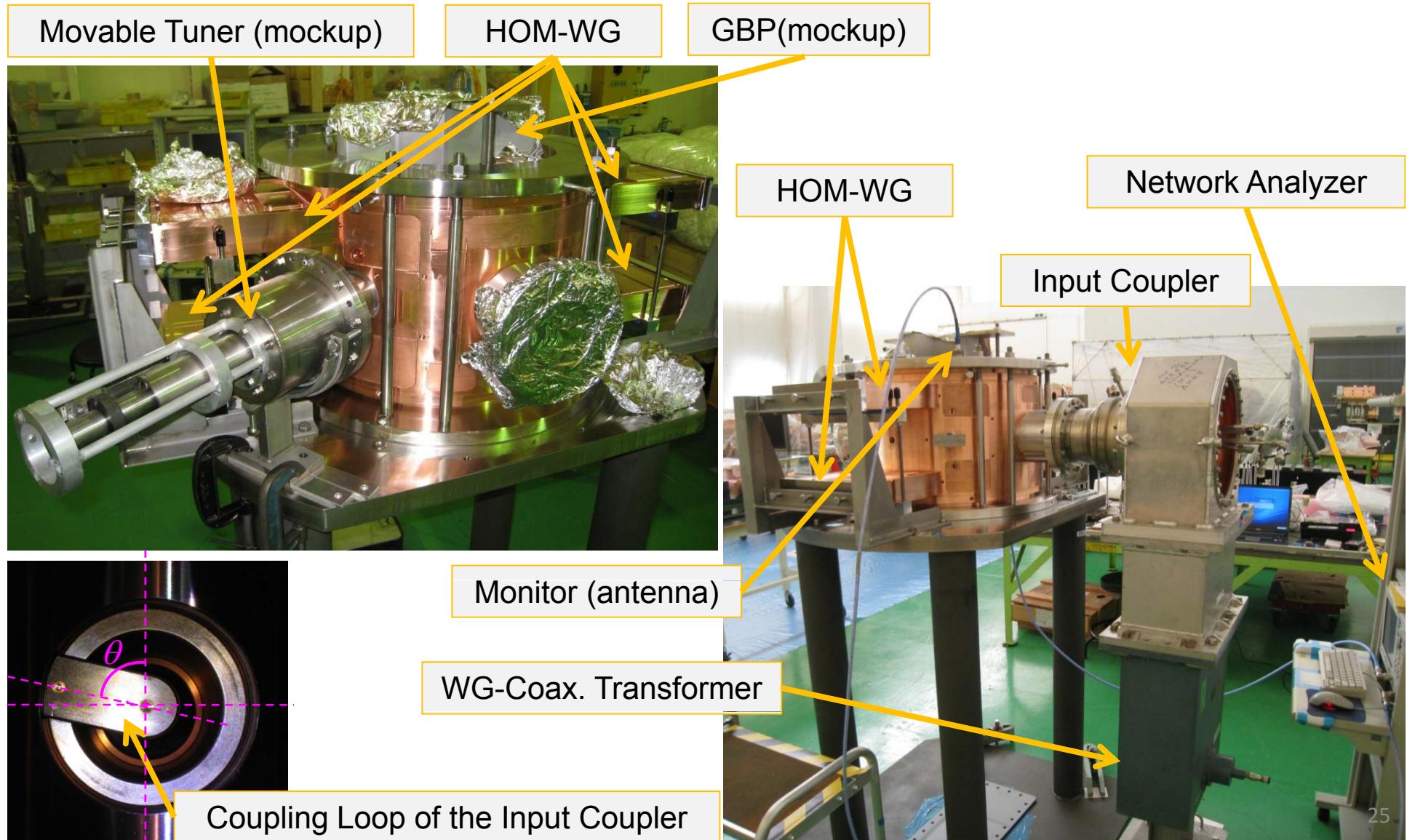
GdfidLの時間領域有限差分計算で得た
ウェークポテンシャルのフーリエ変換



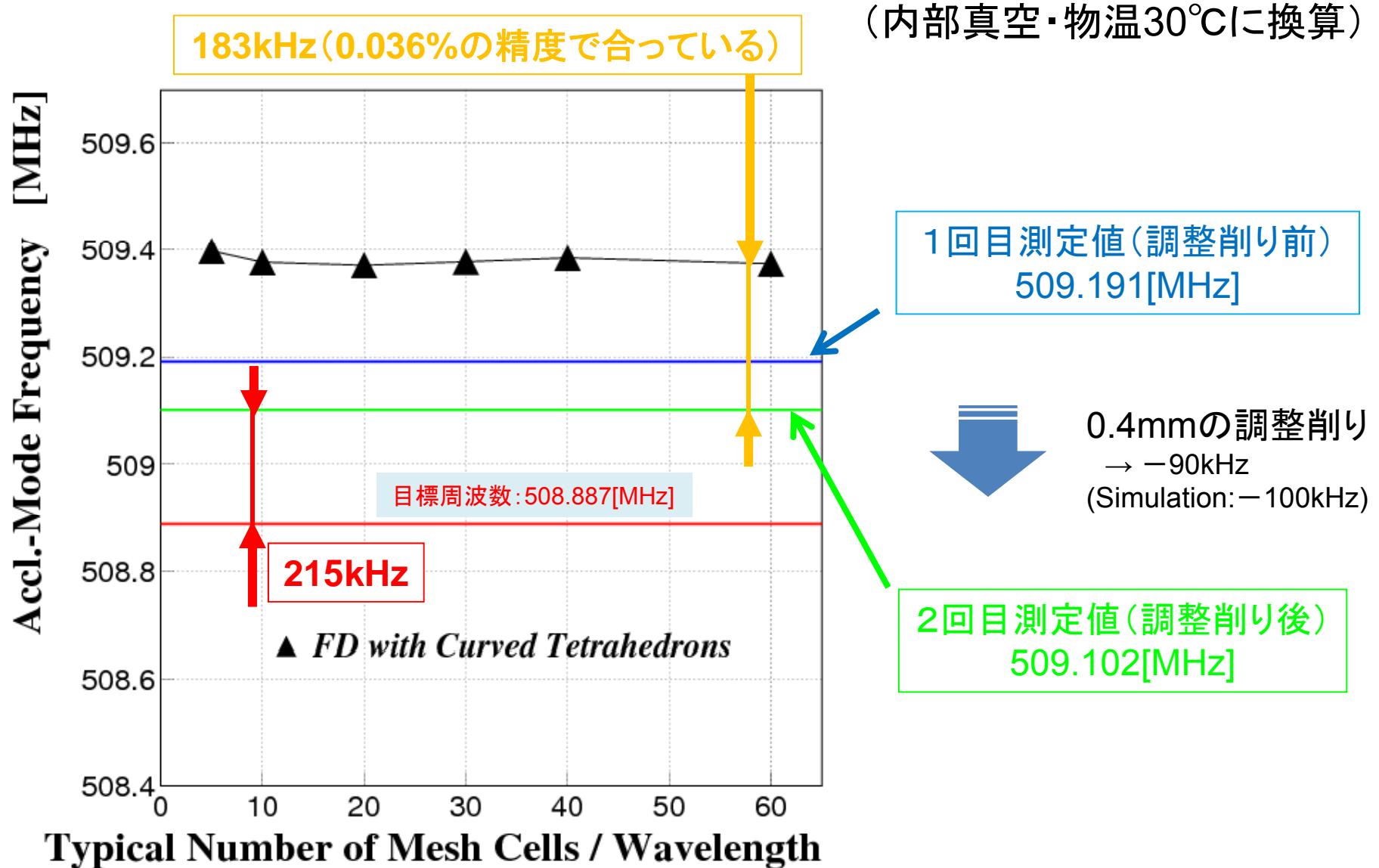
CBI Growth Time > 30ms > 10ms (放射減衰時間)

加速モード(TM_{010})周波数

試験機の低電力RF測定

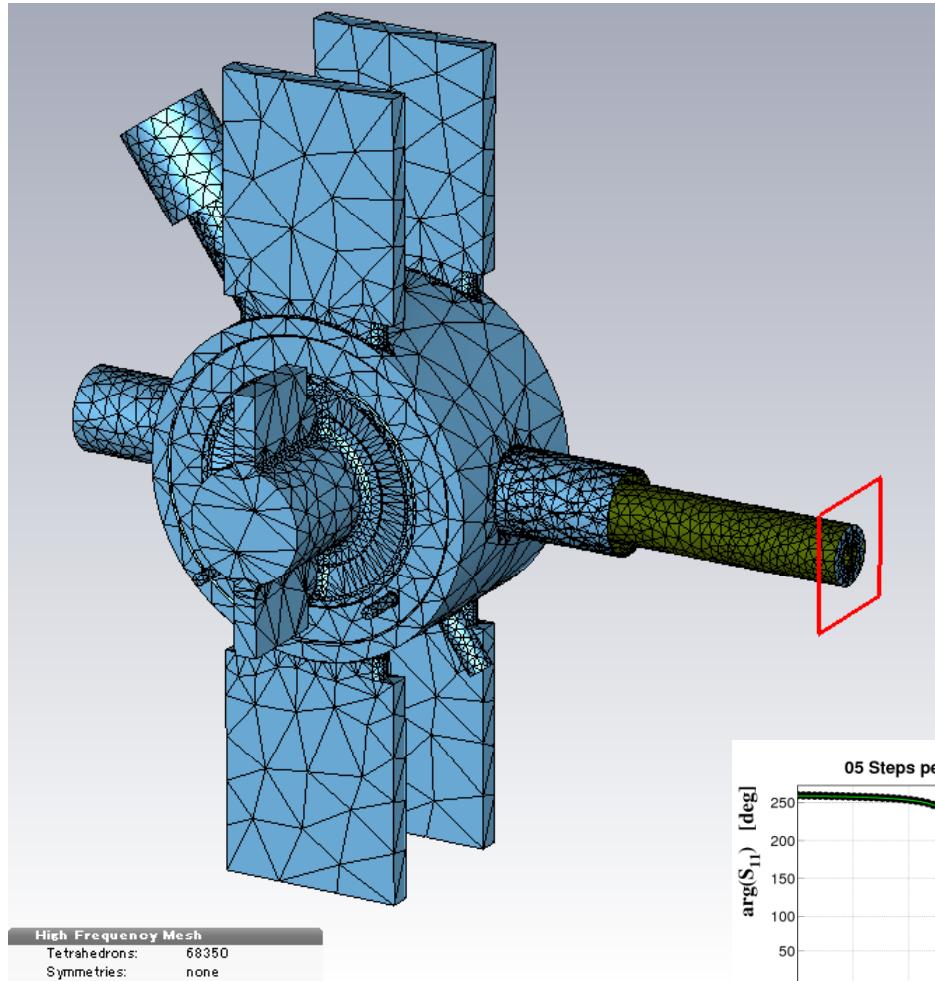


測定とシミュレーションの結果

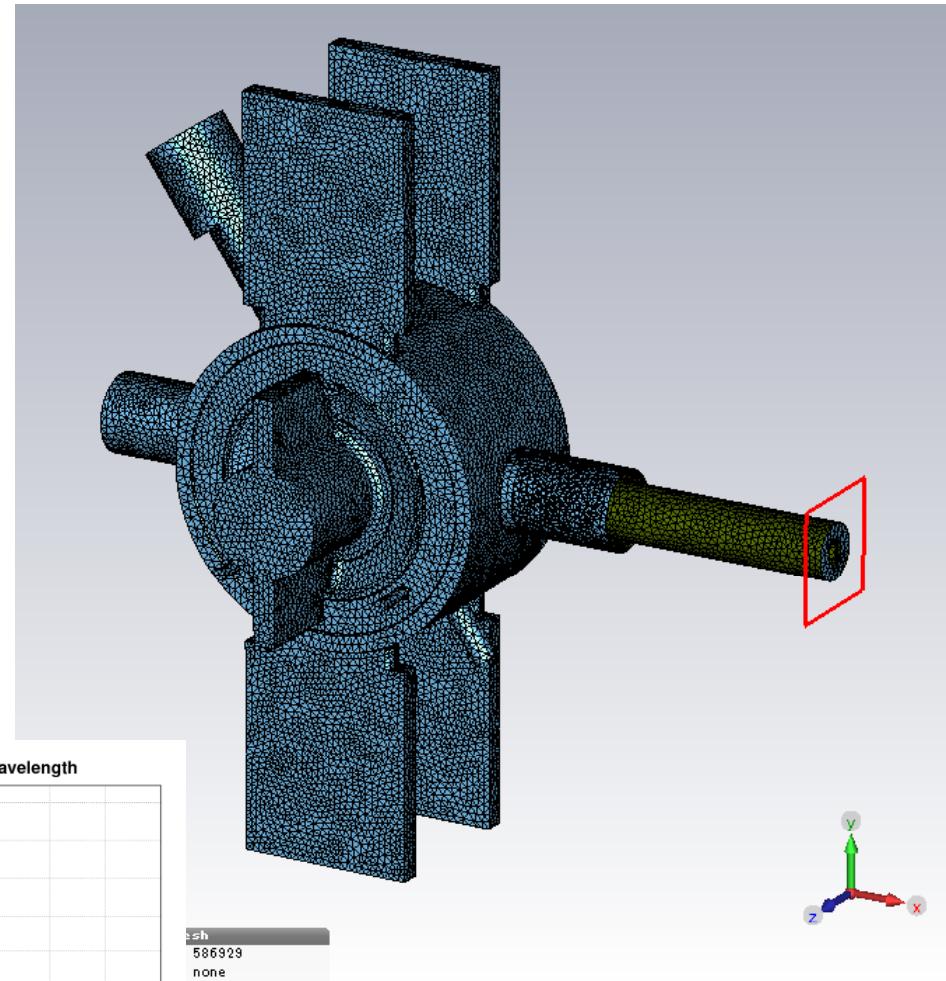


曲面4面体メッシュ

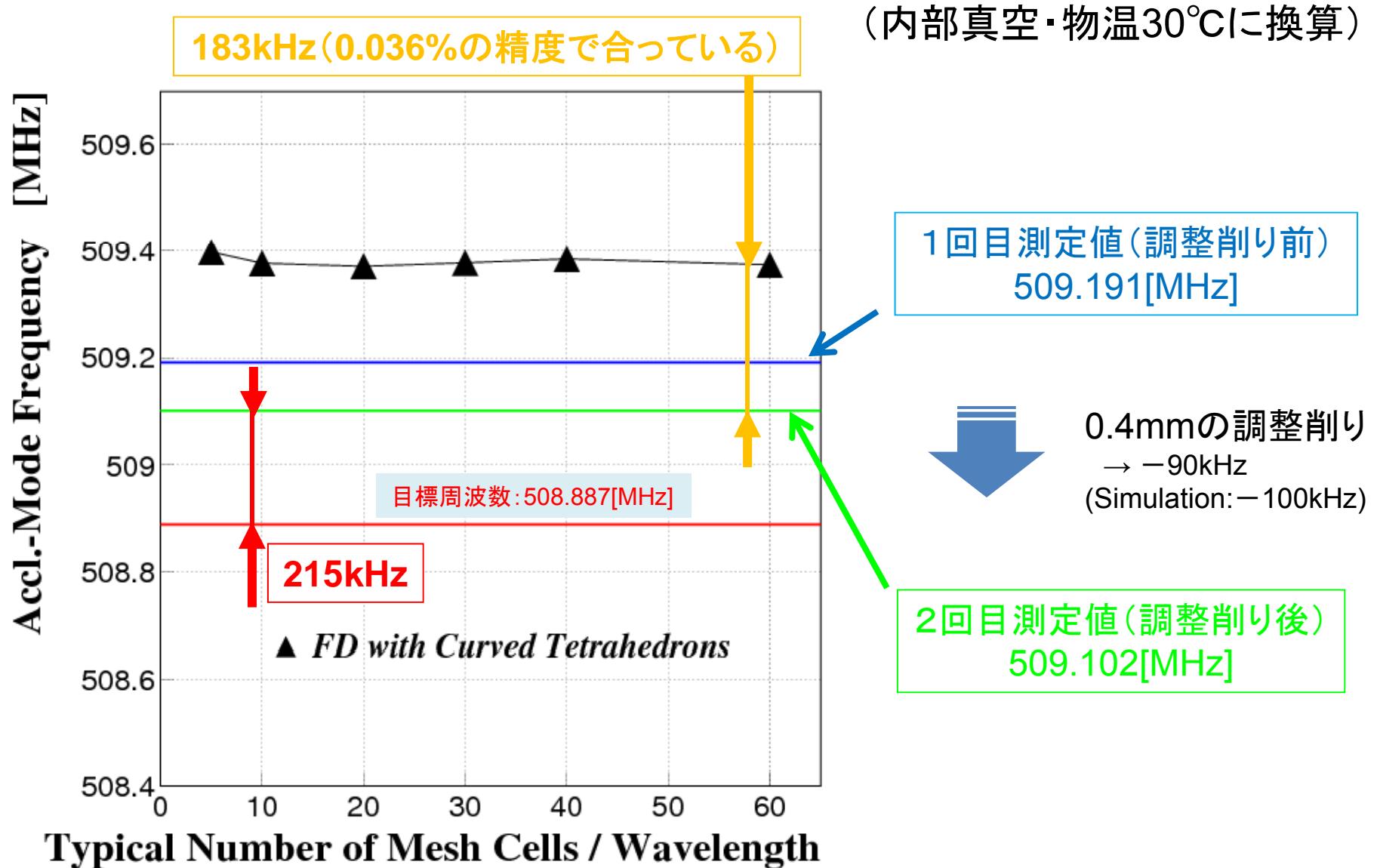
Steps / Wavelength: 5

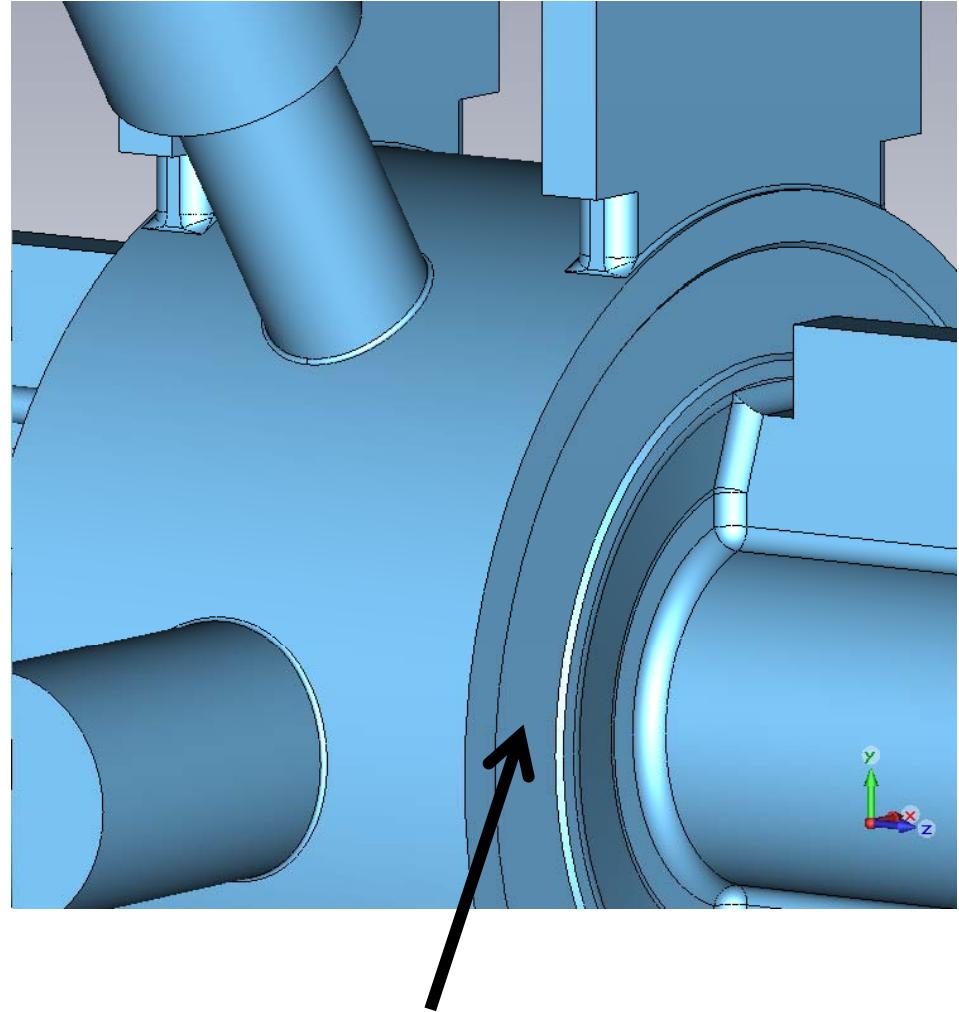
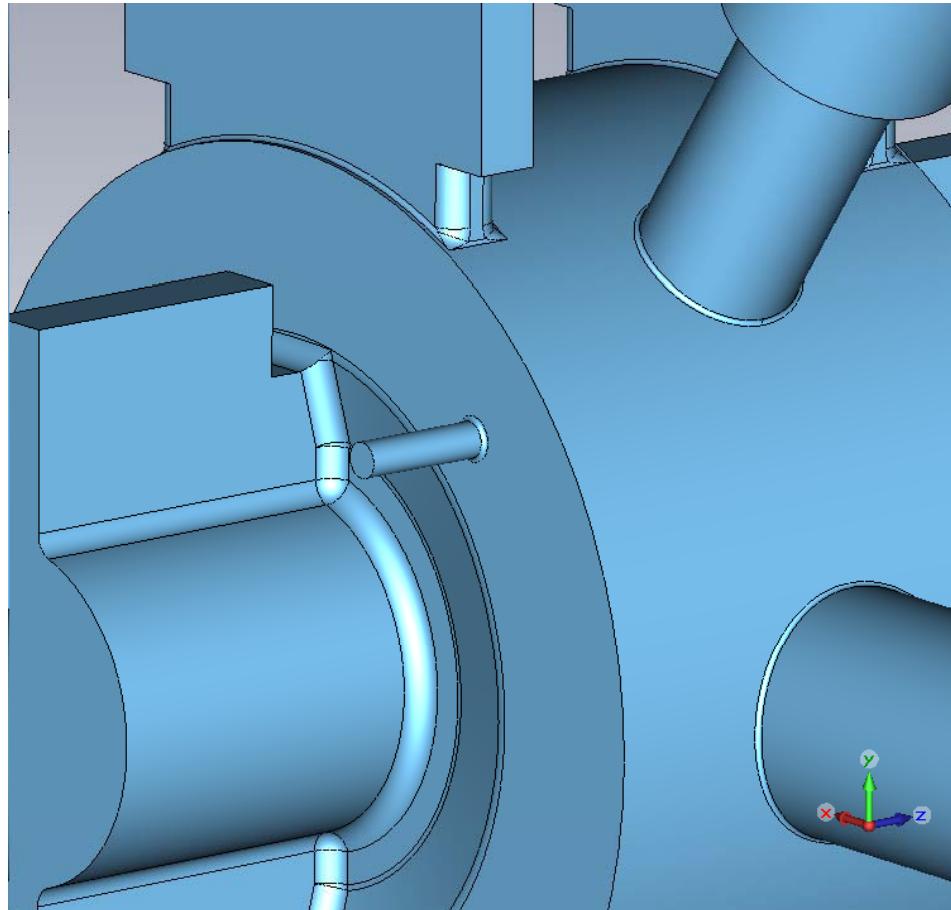


Steps / Wavelength: 40



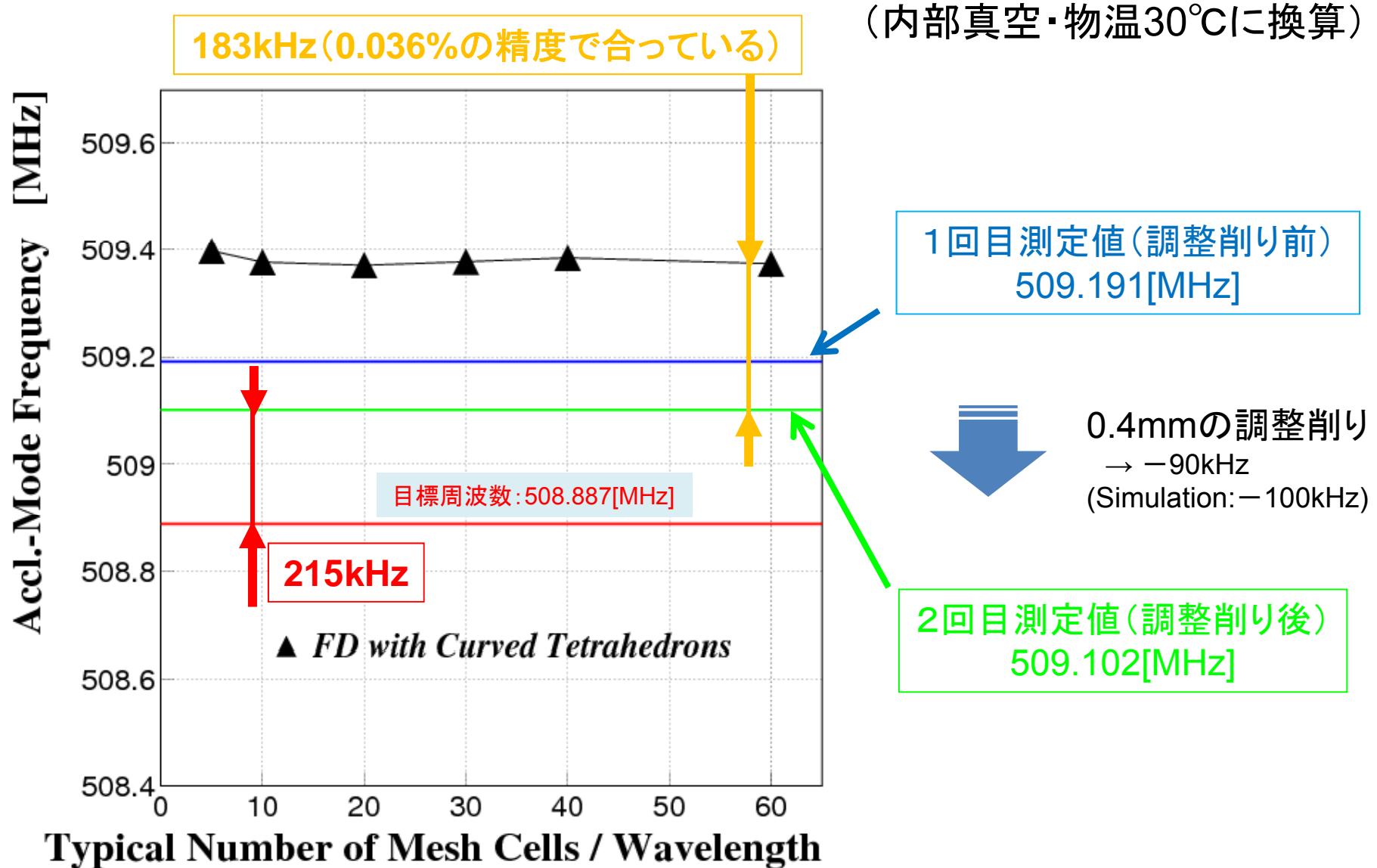
測定とシミュレーションの結果





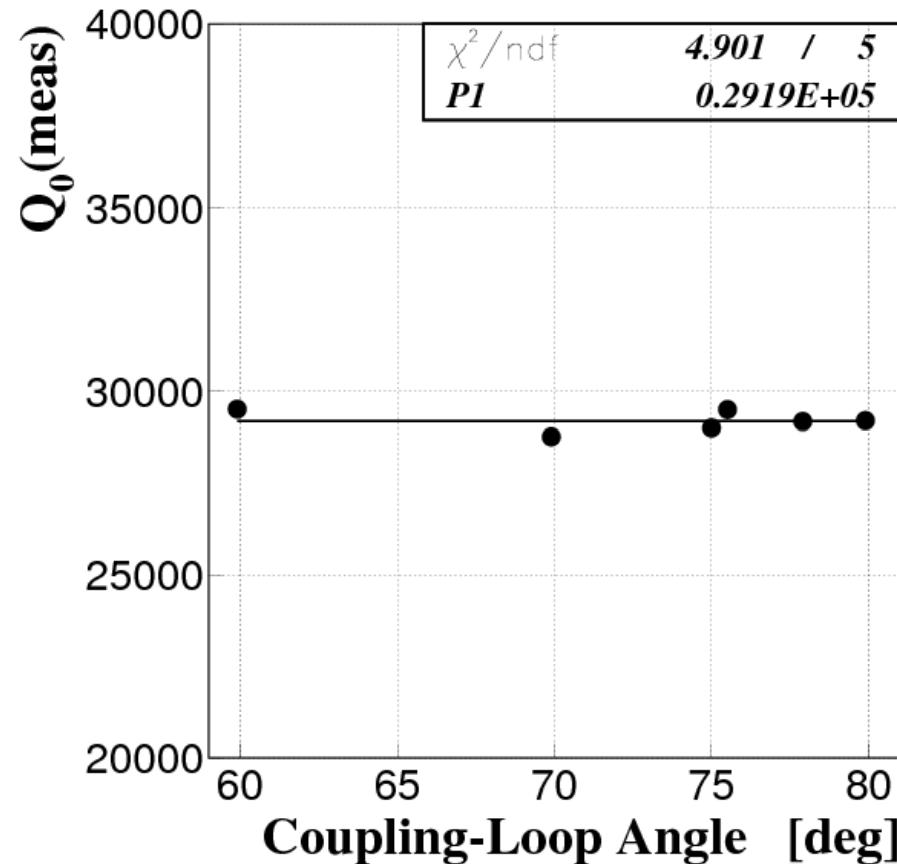
周波数調整用の削り代(高さ:2.5mm)
(すべて削ると、-700kHz弱)

測定とシミュレーションの結果

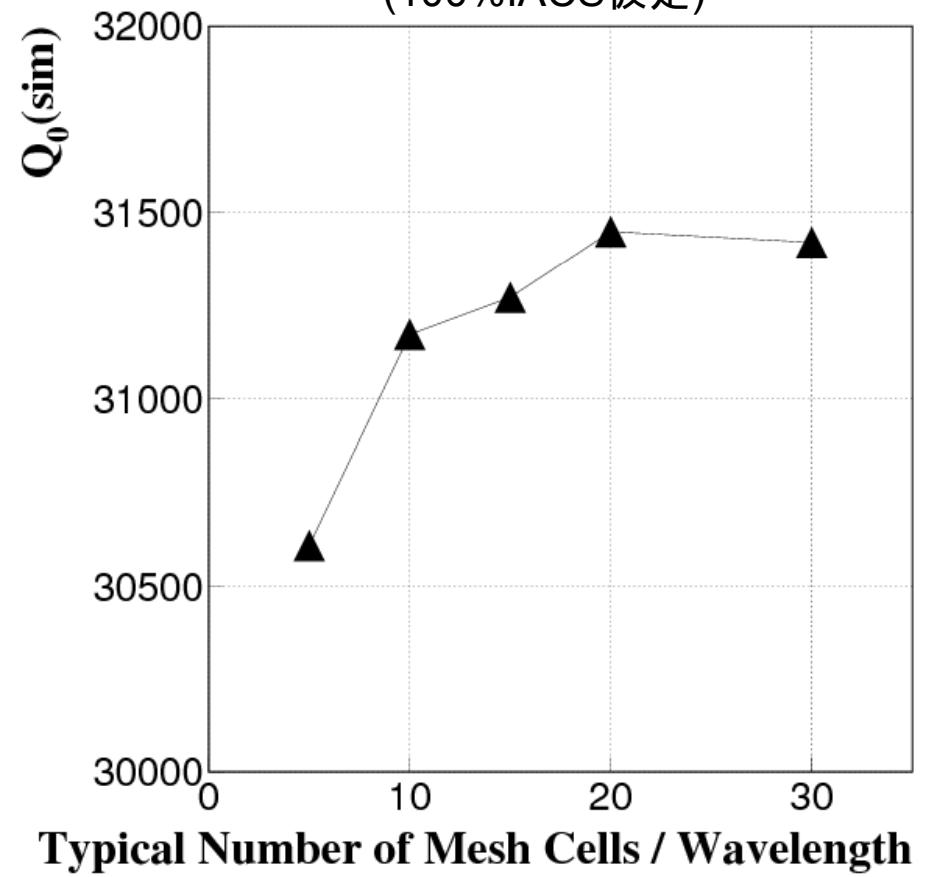


内部Q值(Q_0)

低電力RF測定



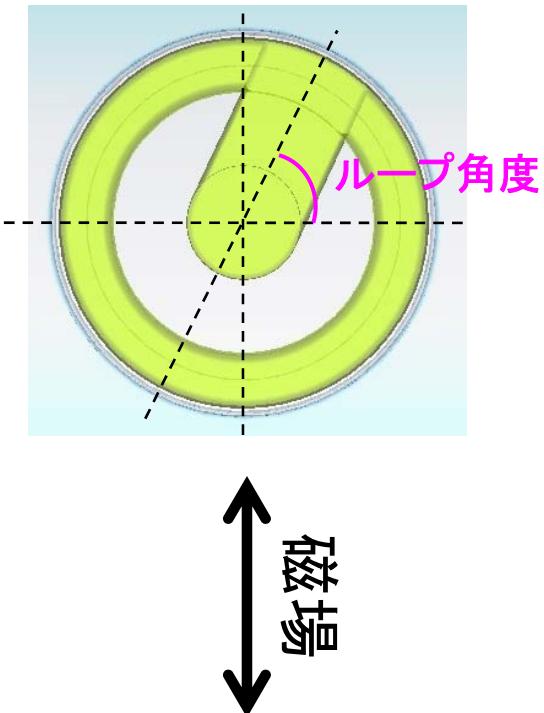
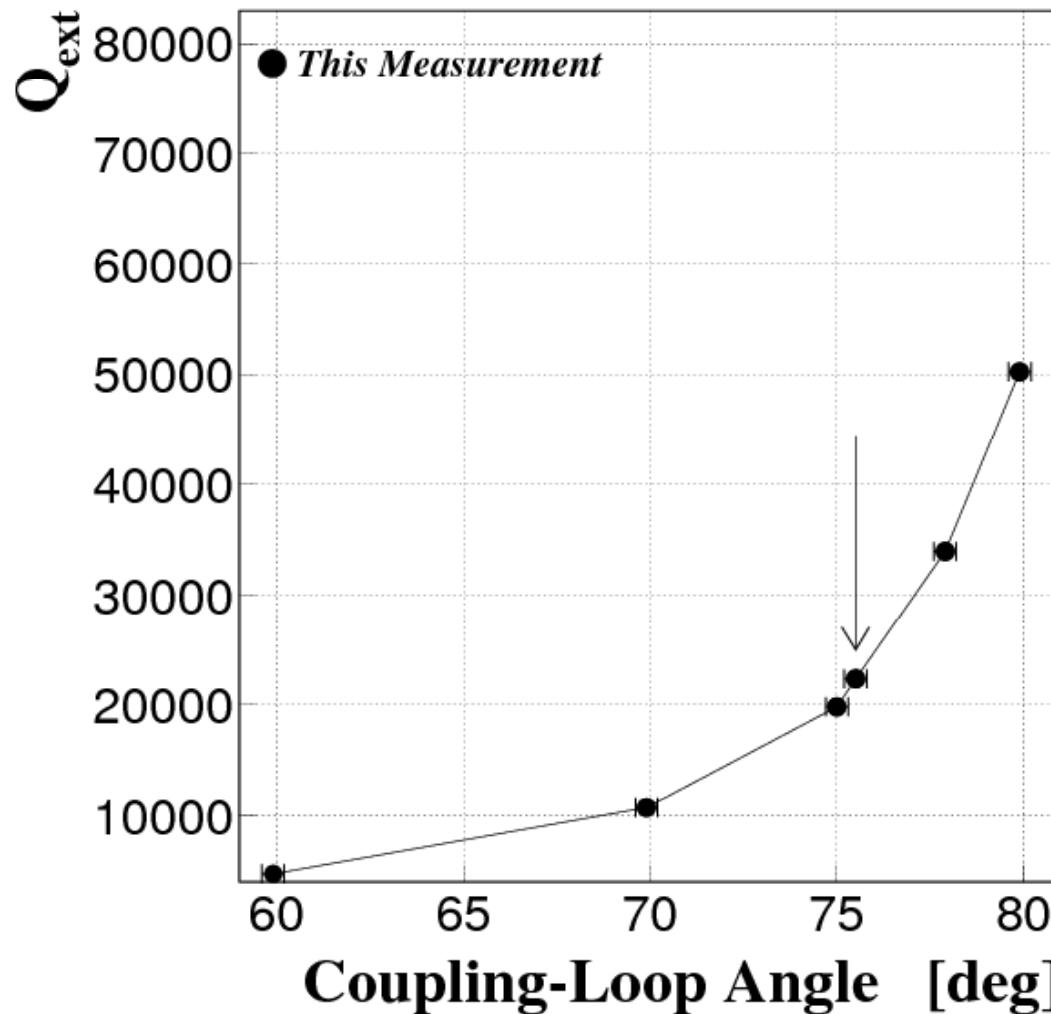
シミュレーション (100%IACS仮定)



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

入力結合器の外部Q値(Q_{ext})

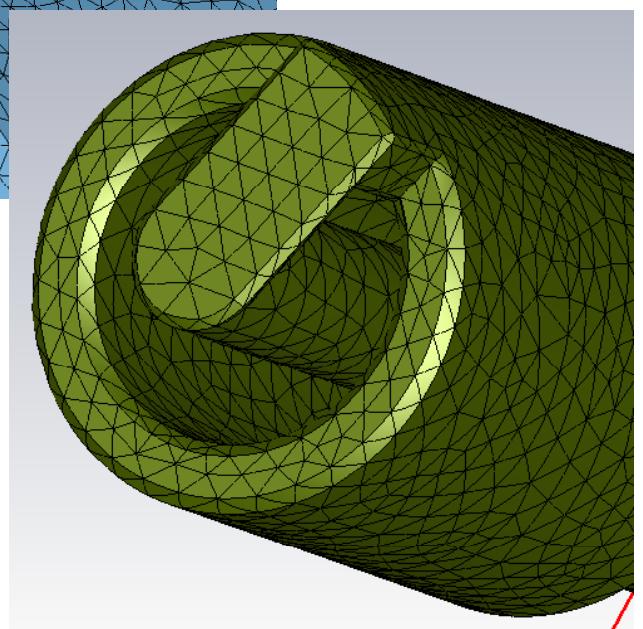
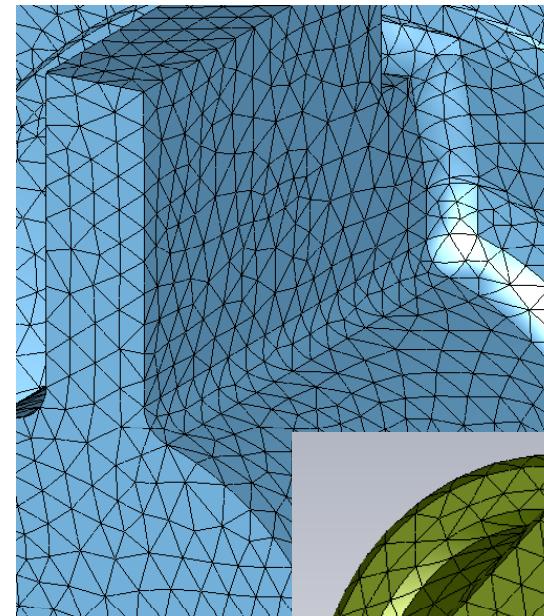
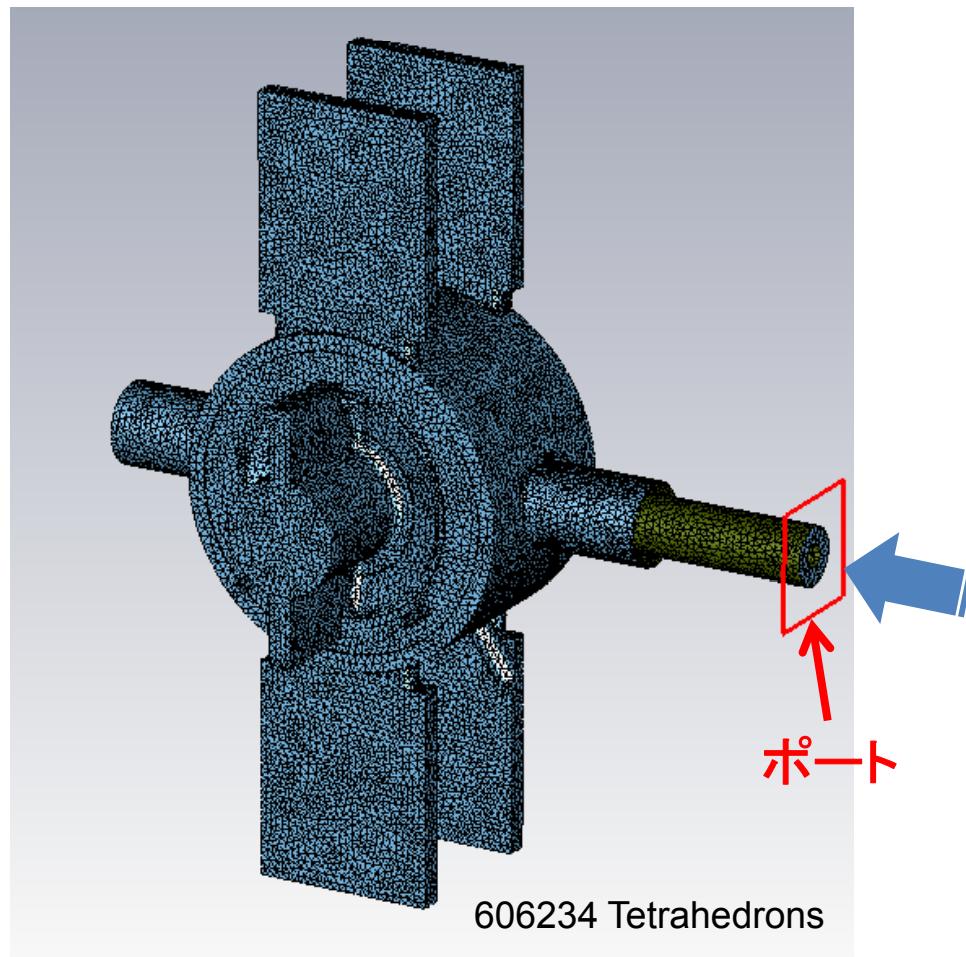
測定結果



Q_0 @operation = ~26000 (80%IACS)

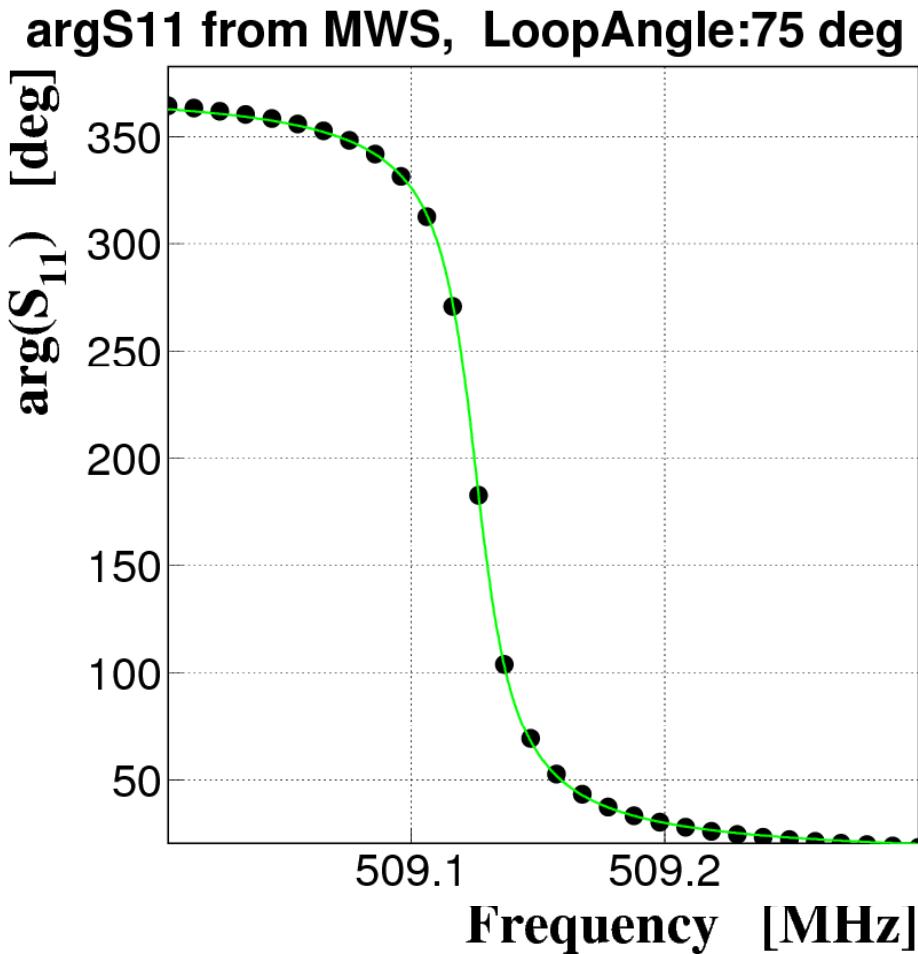
Q_{ext} の計算法1 CST-MWS / 曲面4面体メッシュ

Steps/Wavelength: 40 , Curved Element Order: 2



Q_{ext} は $\arg S_{11}$ から計算

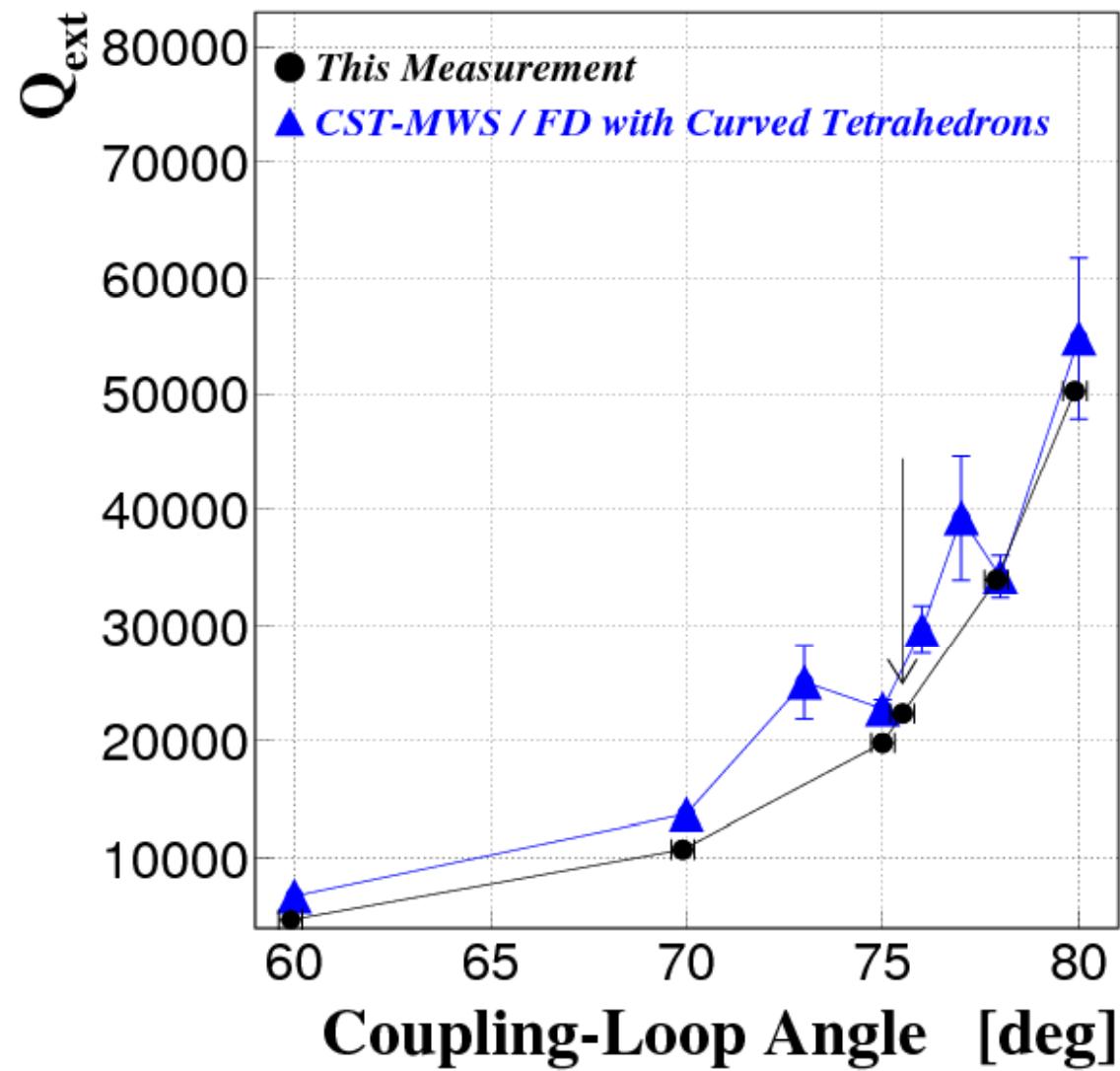
例. ループ角度:75°



— Fit with the formula:

$$\arg(S_{11}) = -2 \tan^{-1} \left[Q_{ext} \left(\frac{f}{f_a} - \frac{f_a}{f} \right) \right] + \theta_0$$

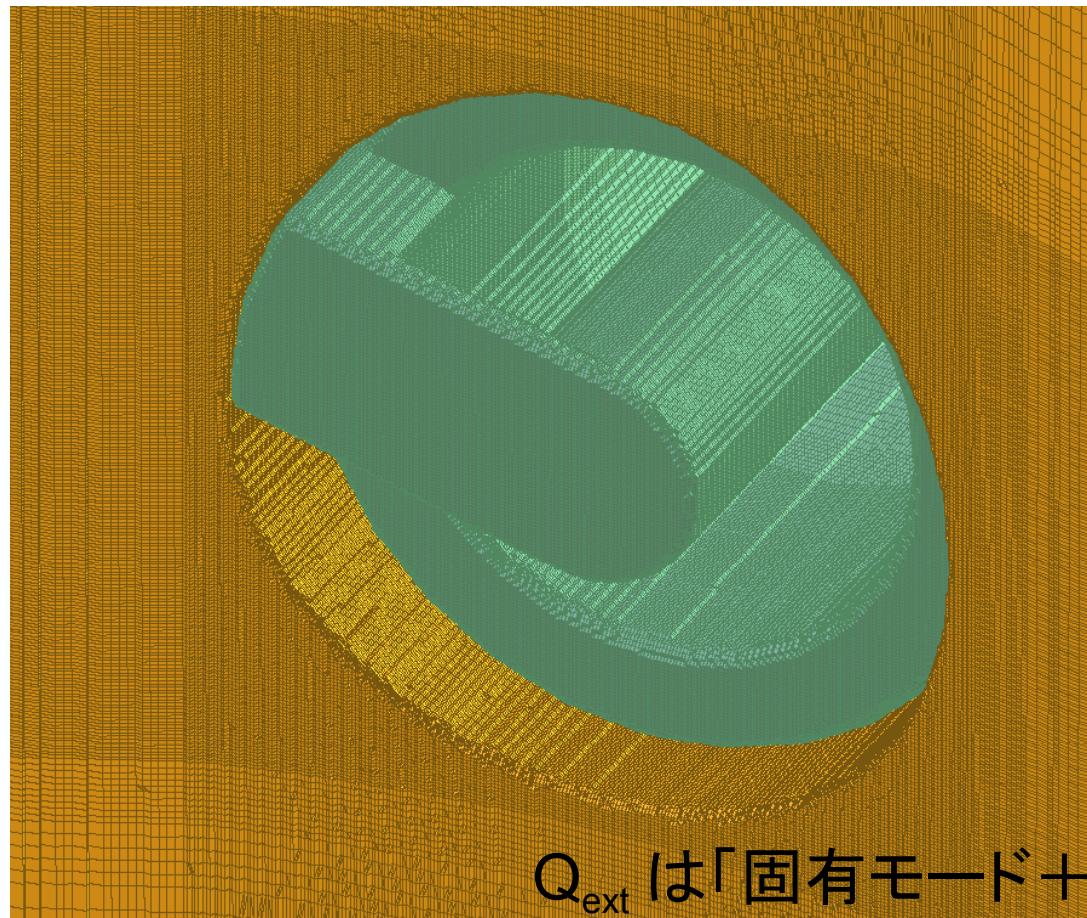
(Red: floating parameters in fitting)



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



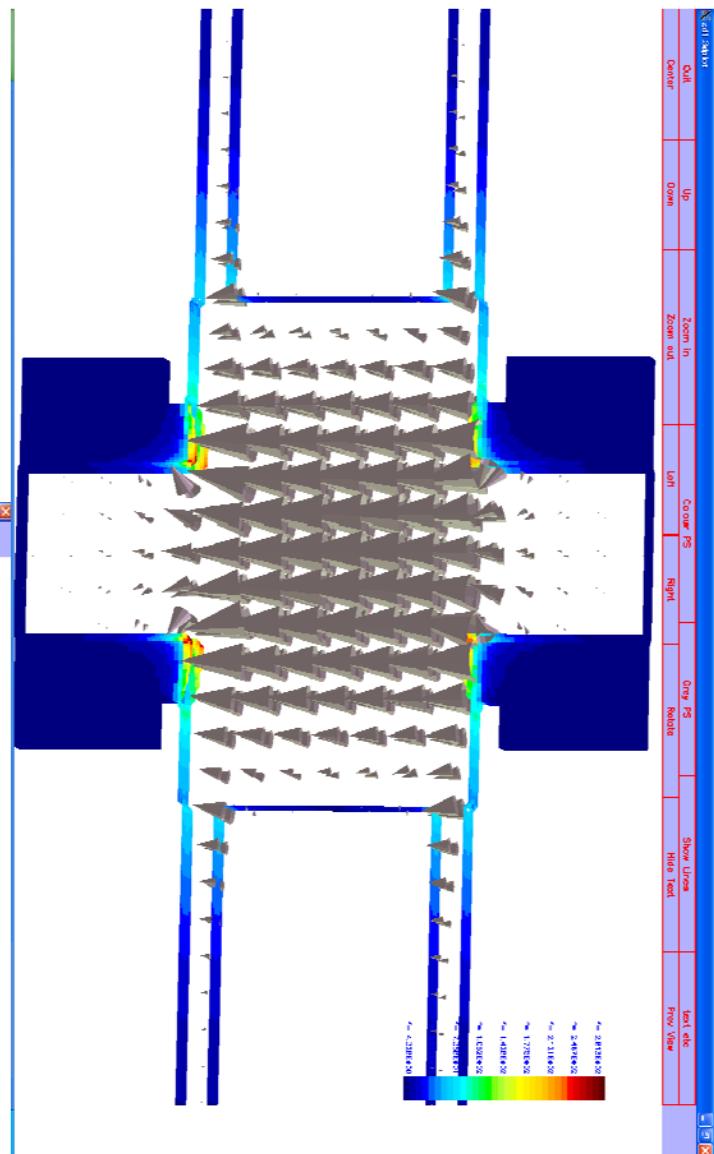
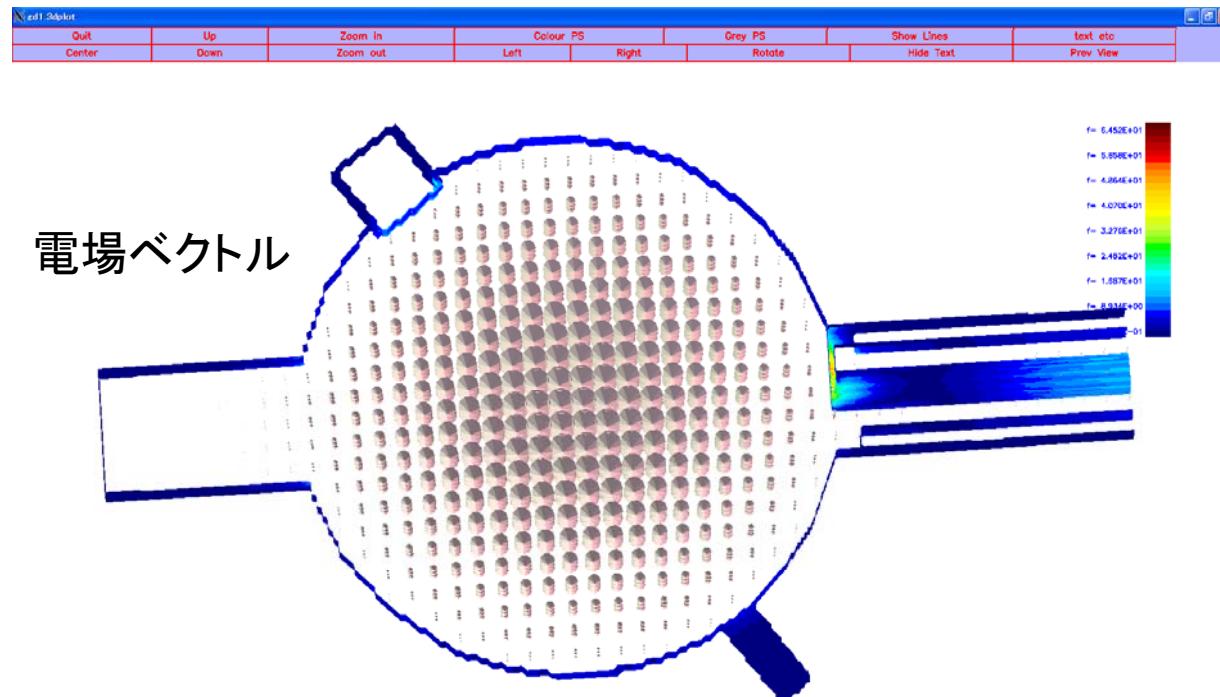
Q_{ext} は「固有モード+TD計算」

Step1: 固有モード解析

電場ベクトル



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



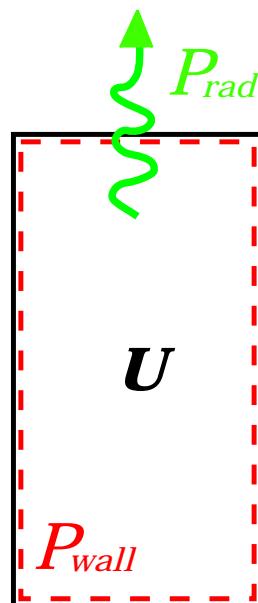
例. ループ角度: 75°

Step2: TD

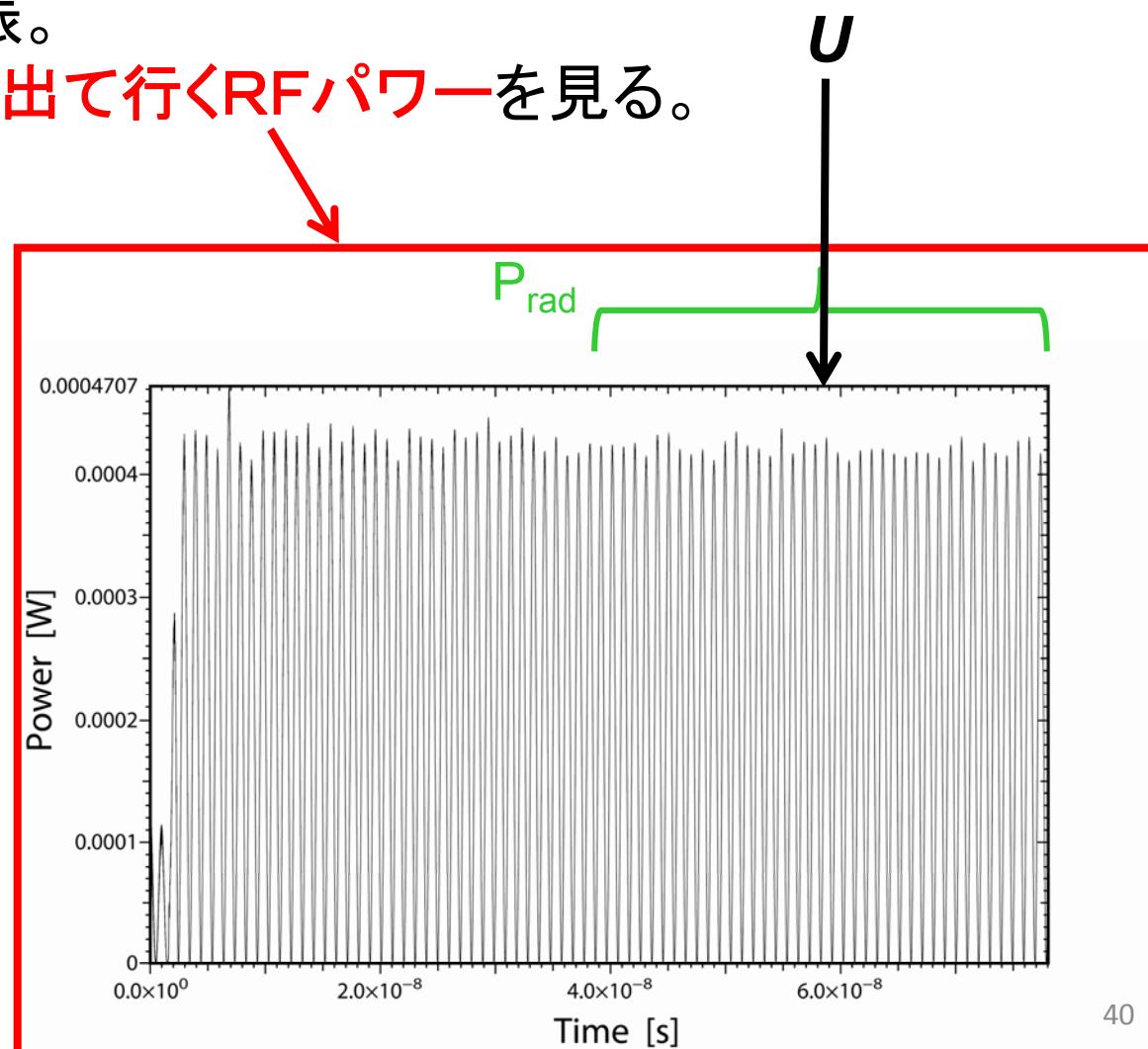
Step1で得た加速モードを初期フィールドとして、
TD(Time Domain)で励振。

→入力結合器ポートから出て行くRFパワーを見る。

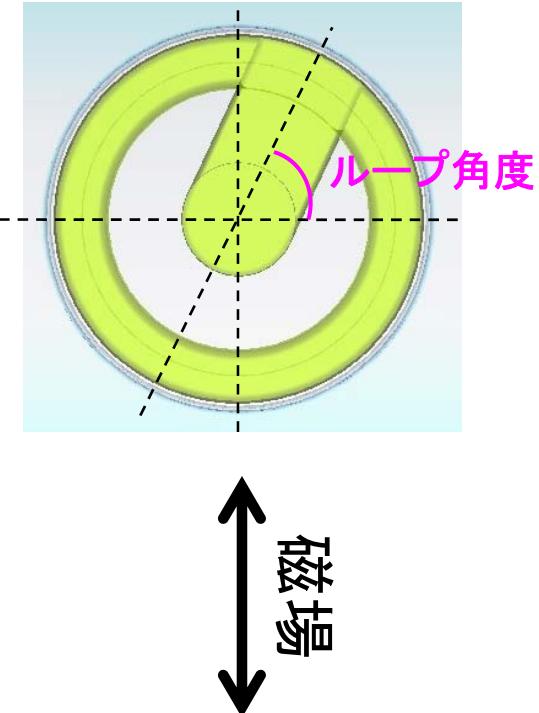
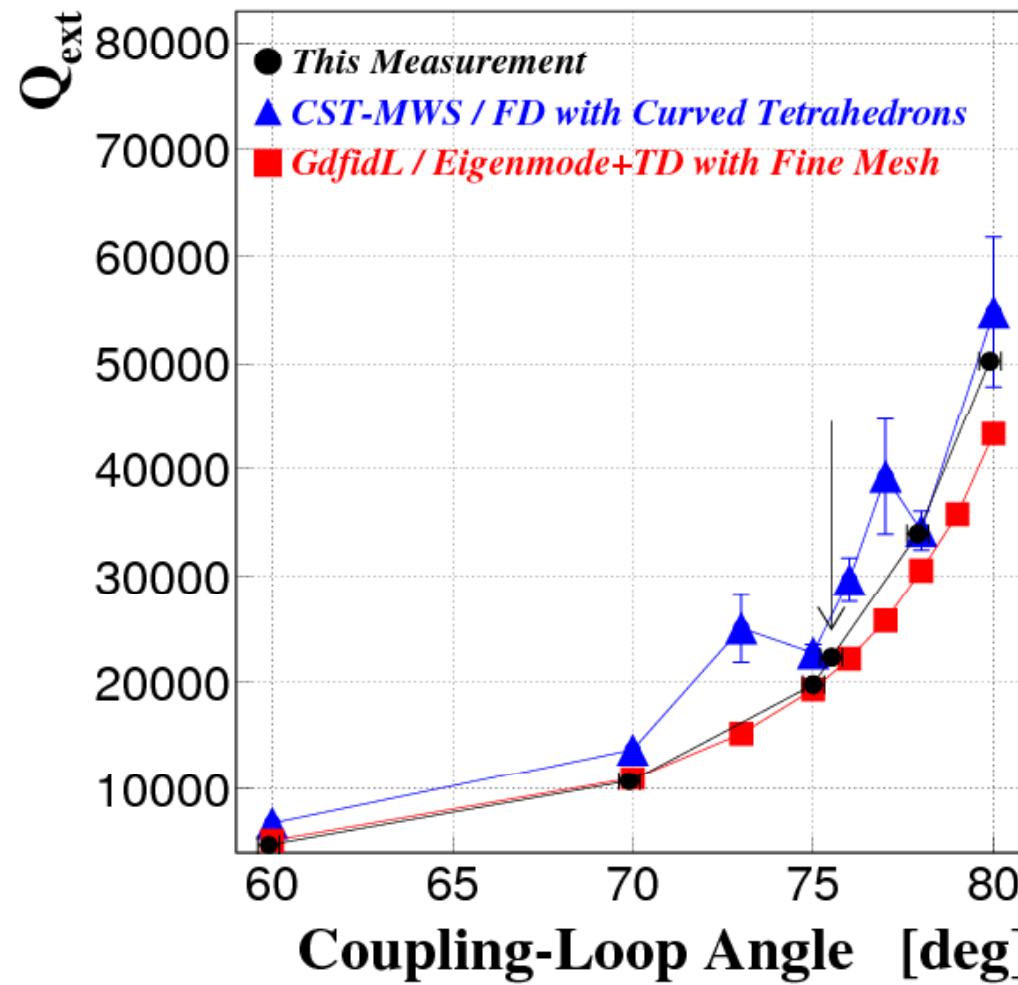
$$Q_{\text{ext}} = \omega \times U / P_{\text{rad}}$$



例. ループ角度: 75°



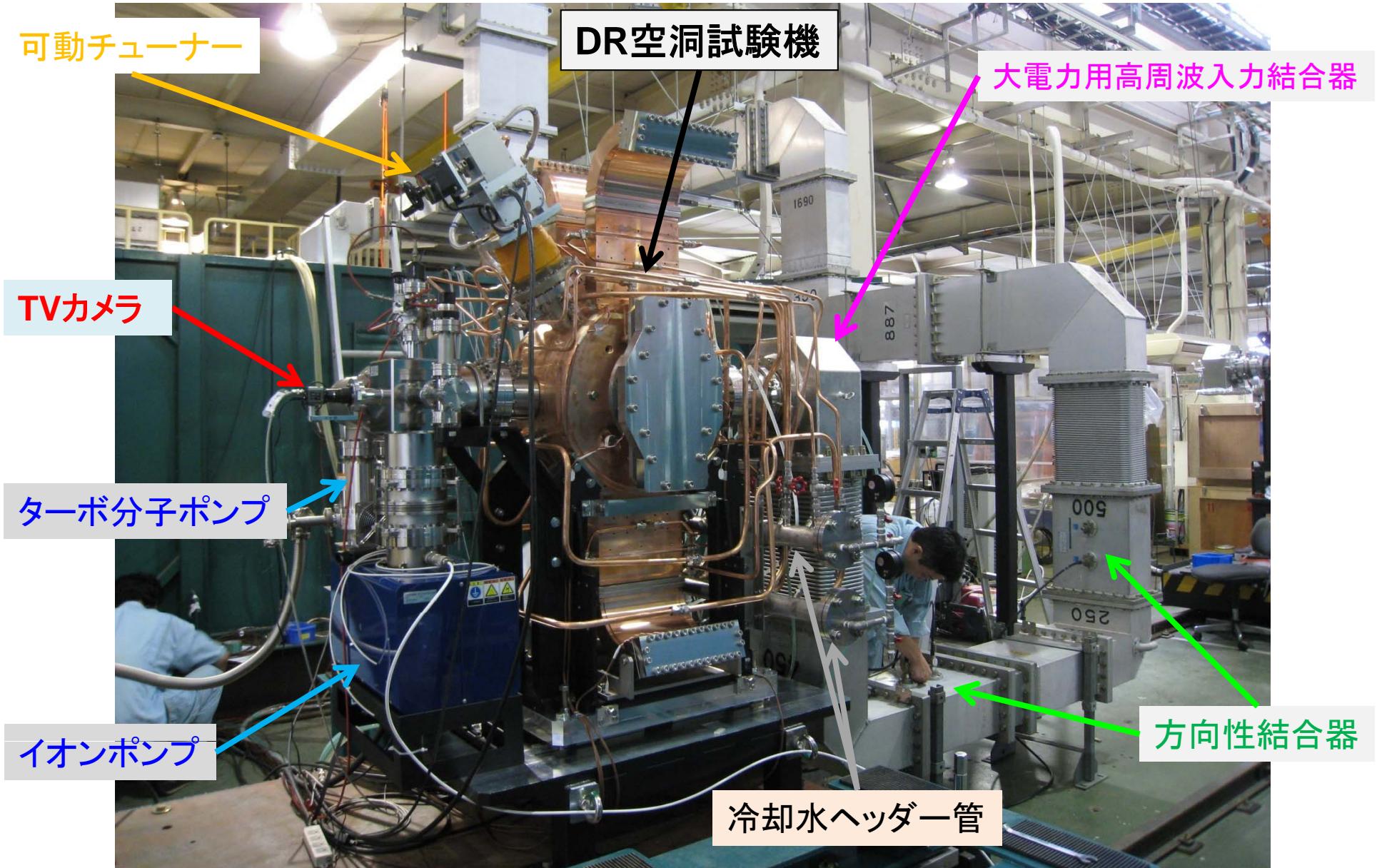
入力結合器の外部Q値



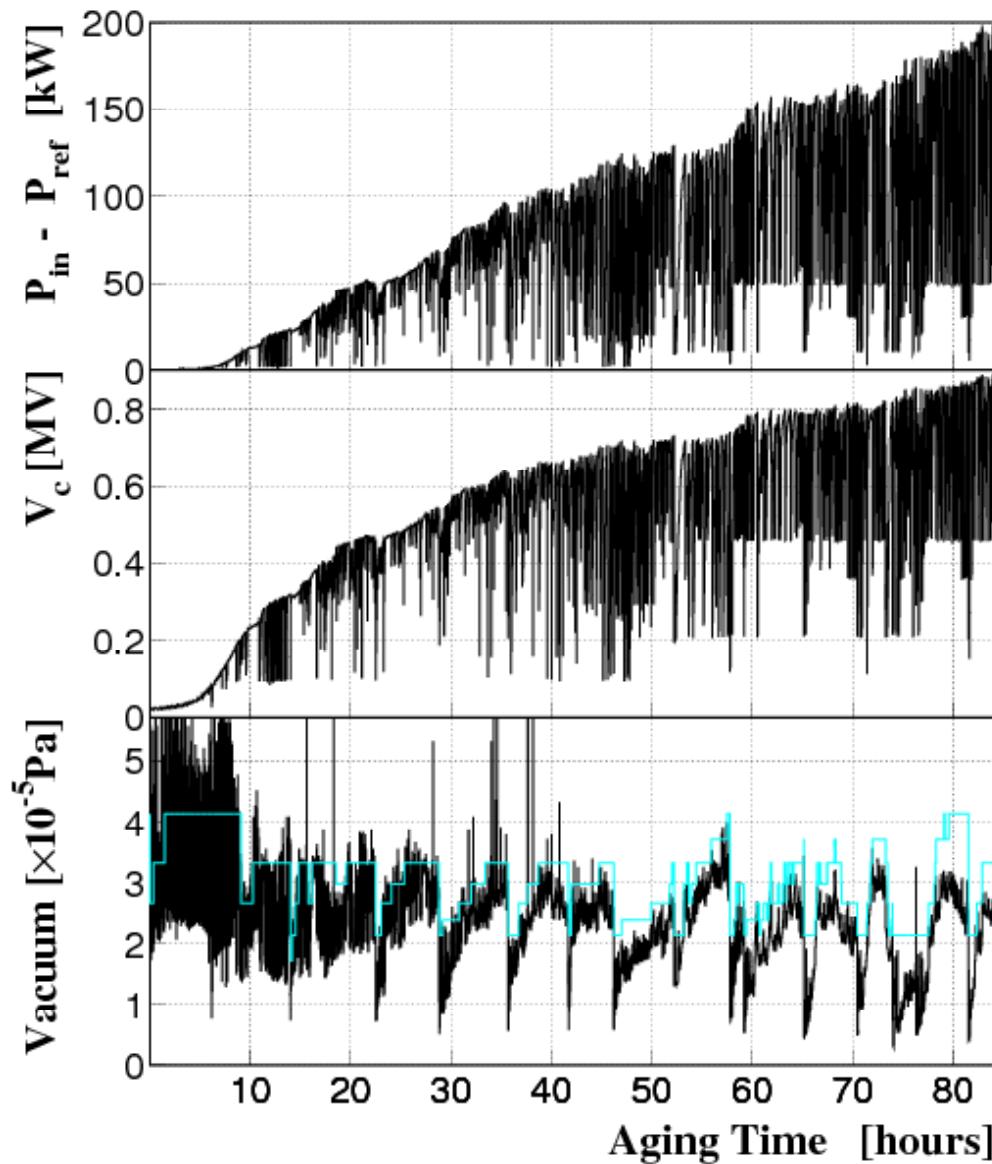
測定とシミュレーションは合っている。

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.)

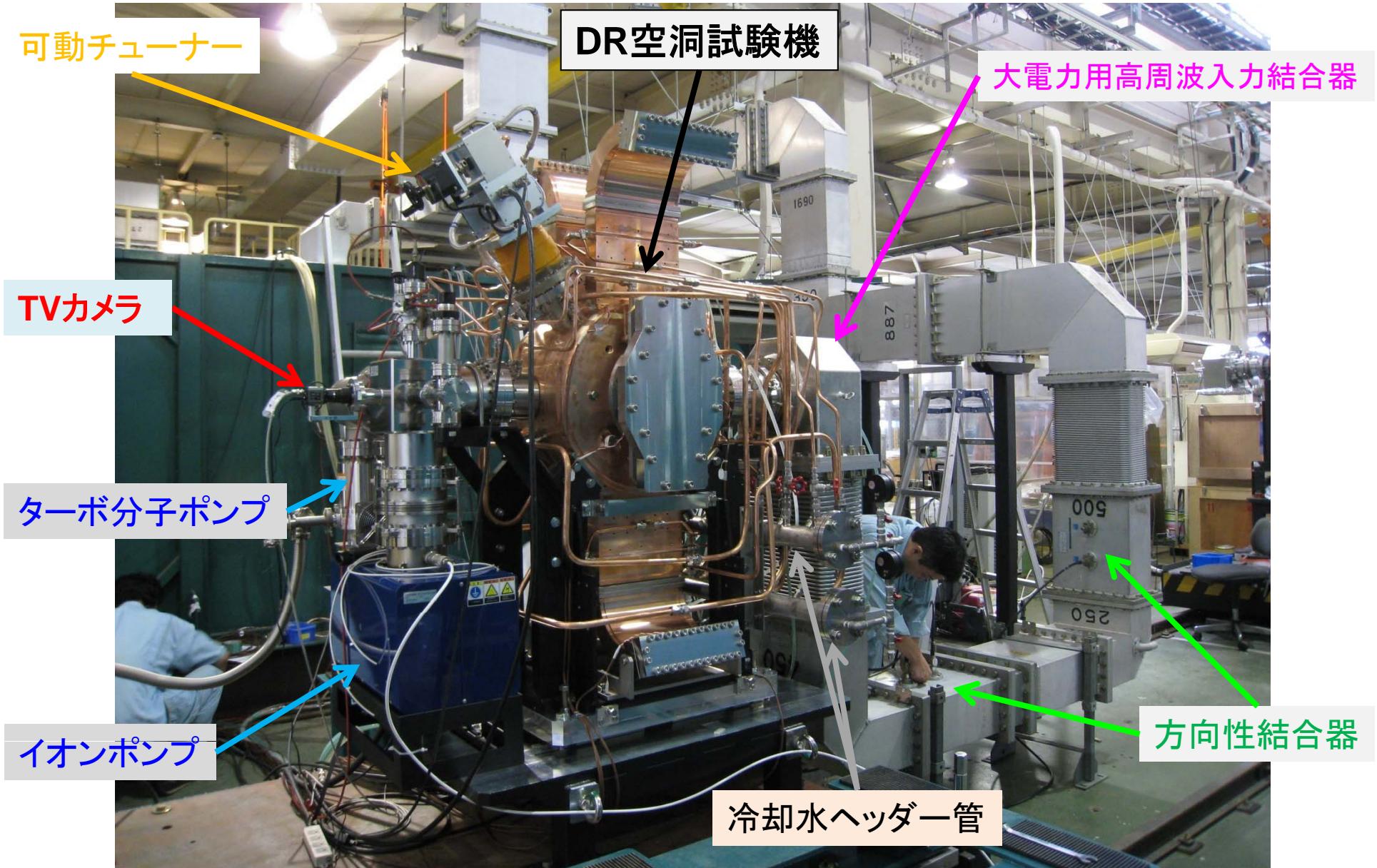
- 空洞への入力パワー有り
- 自動エージング
- 入力パワー < 目標パワー

← 0.896 MV (max.)

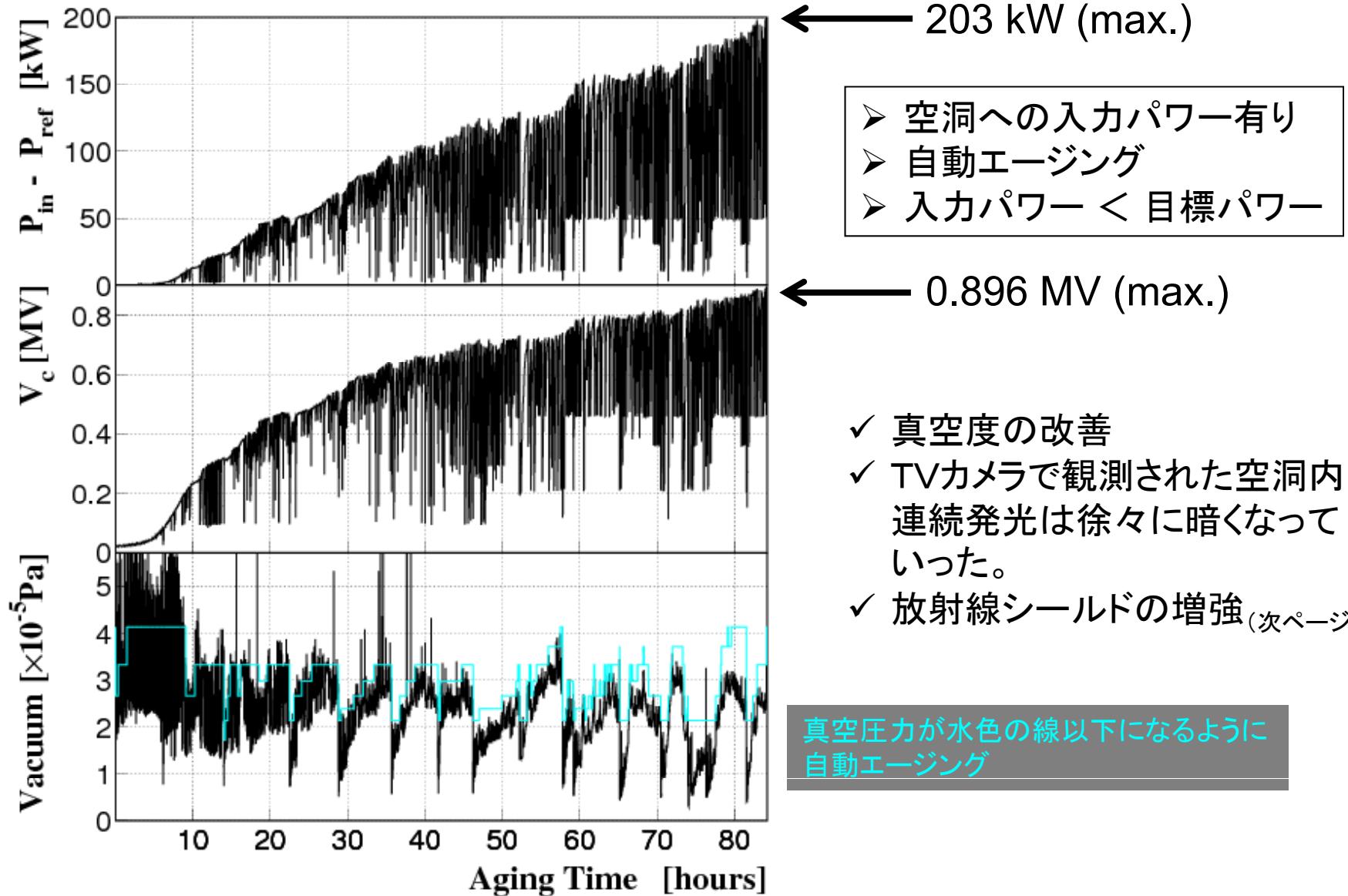
- ✓ 真空度の改善
- ✓ TVカメラ(次ページ)で観測された空洞内連続発光は徐々に暗くなっていった。
- ✓ 放射線シールドの増強

真空圧力が水色の線以下になるように
自動エージング

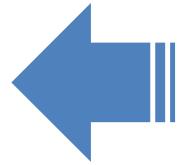
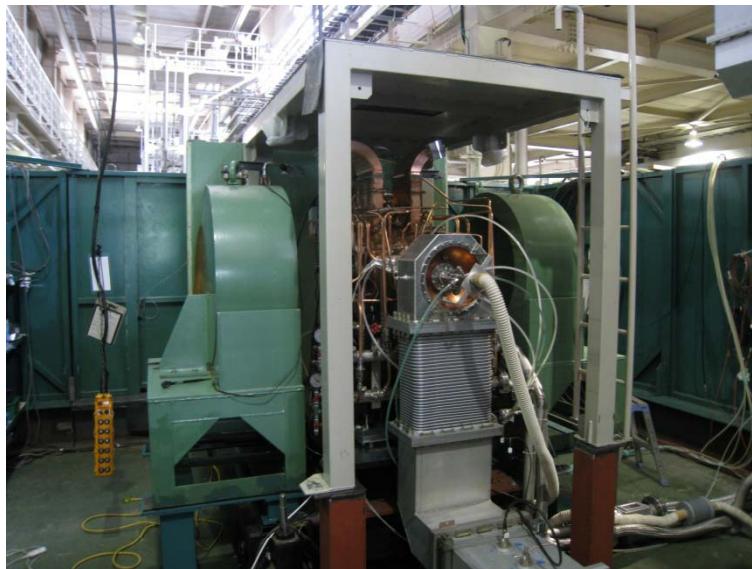
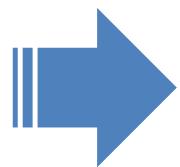
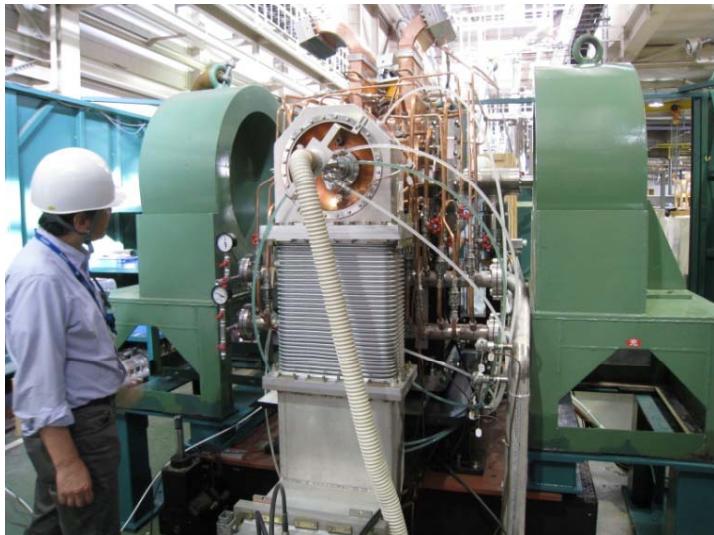
セットアップ@KEK/D1-Aテストスタンド



エージング履歴



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

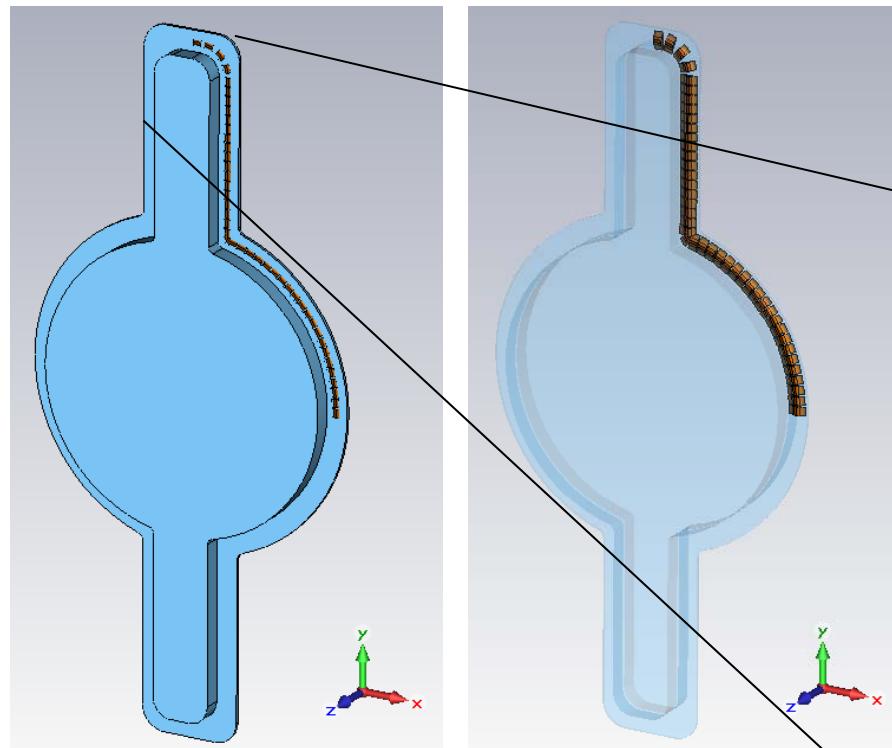
- 空洞電圧: 0.896MV(空洞入力パワー: 203kW)まで到達した
 - 定格: 0.7MV、努力目標: 0.8MV
- 合格！

■ 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

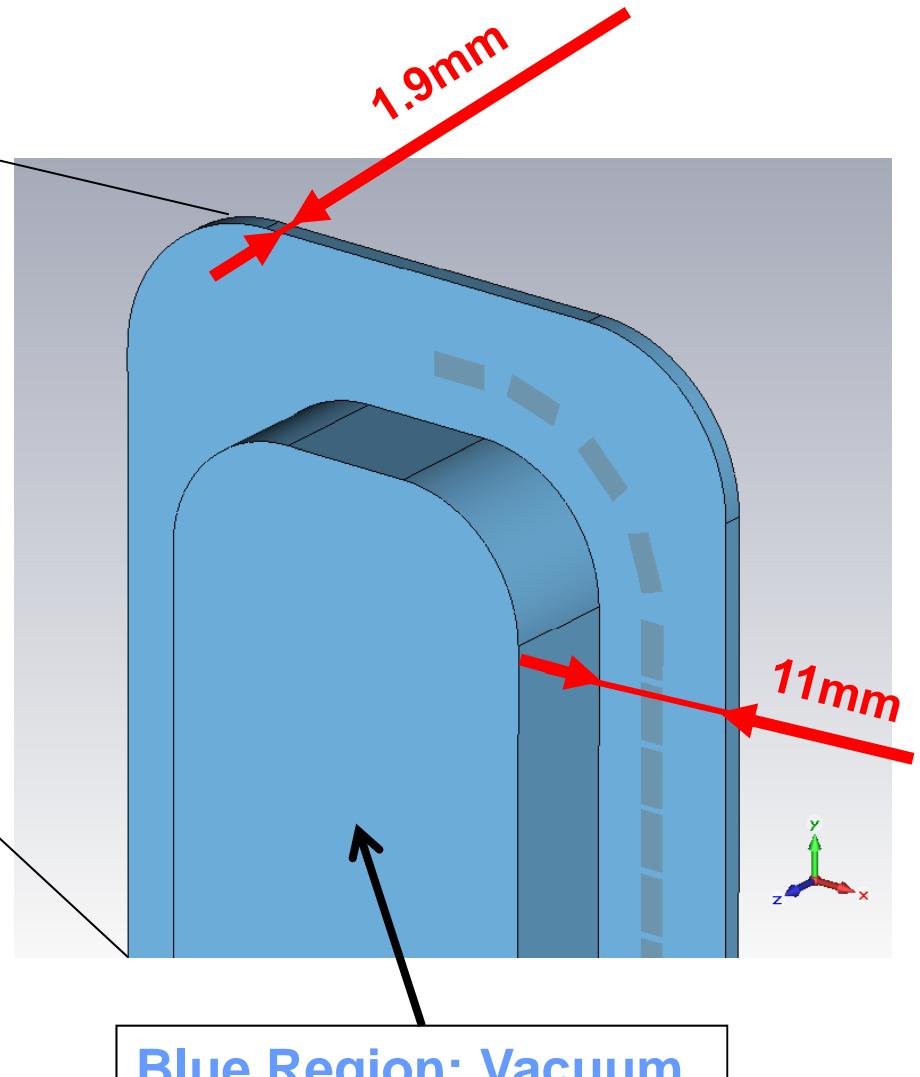
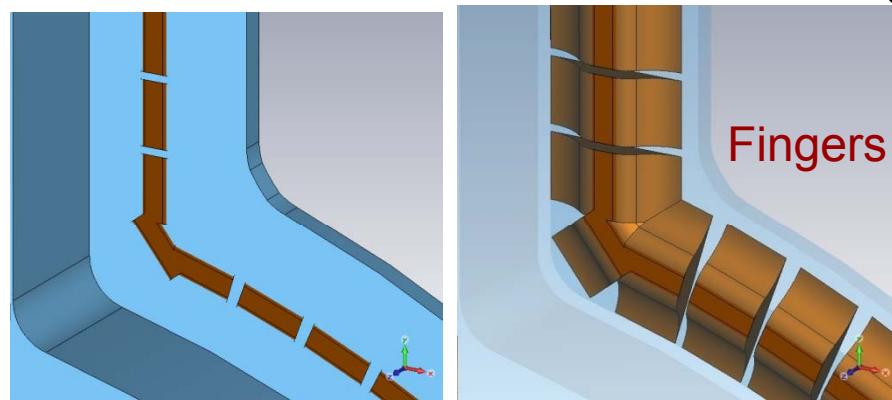
終

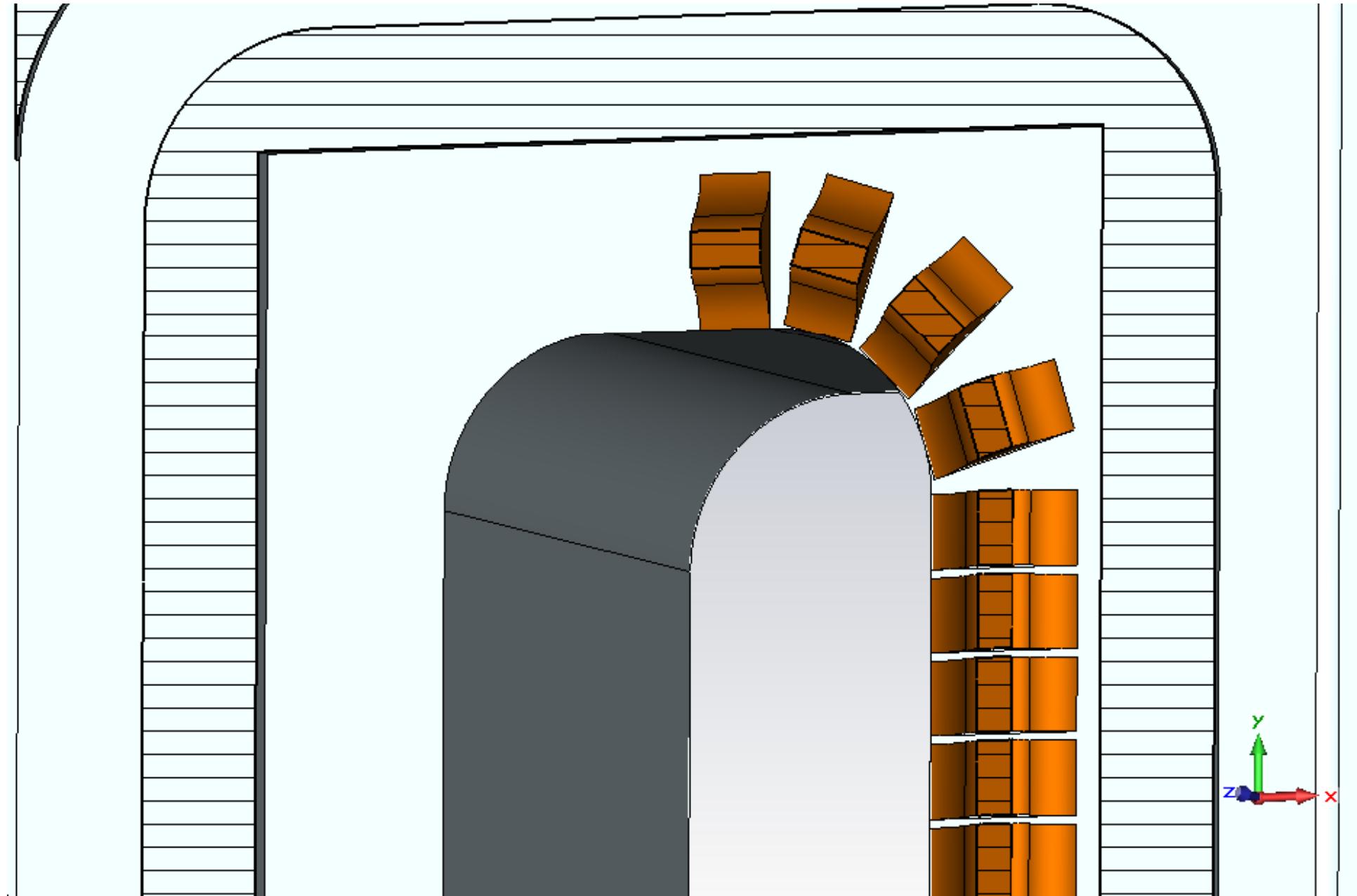
參考資料

GBP連結部におけるHOM発熱 Solid Model

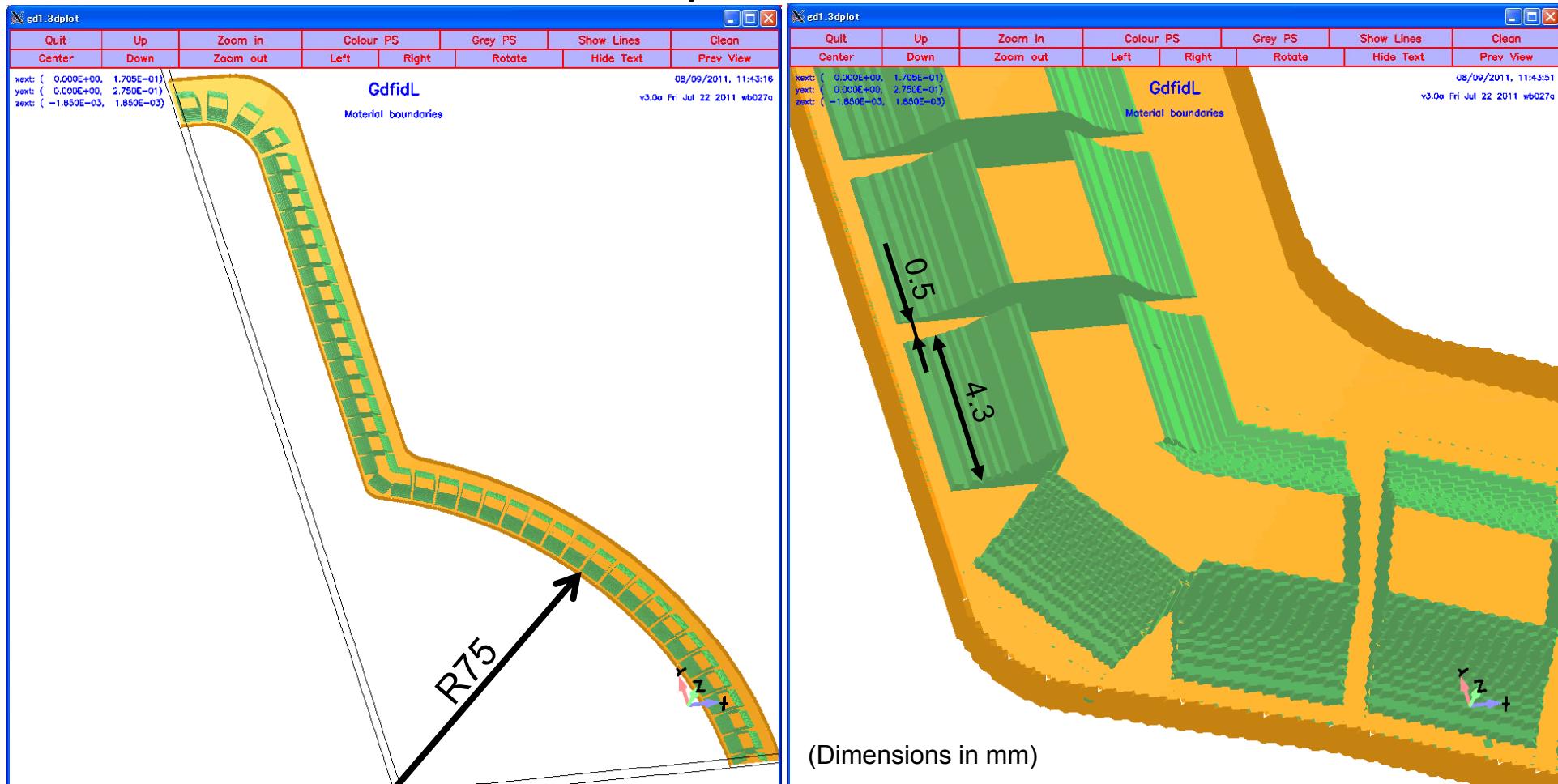


(Created by using CST STUDIO SUITE)





The Geometry Converted to GdfidL

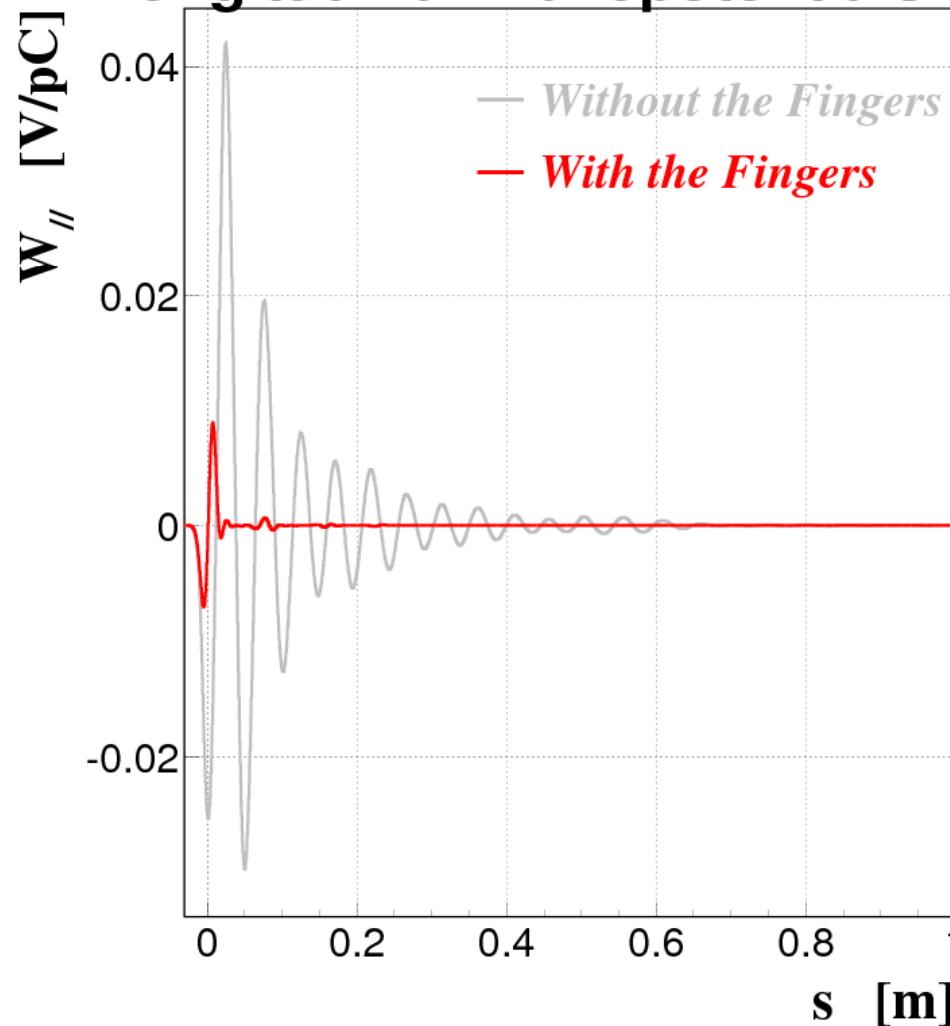


0.1mmのメッシュ・サイズにて
GdfidLによるウェーク場計算

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

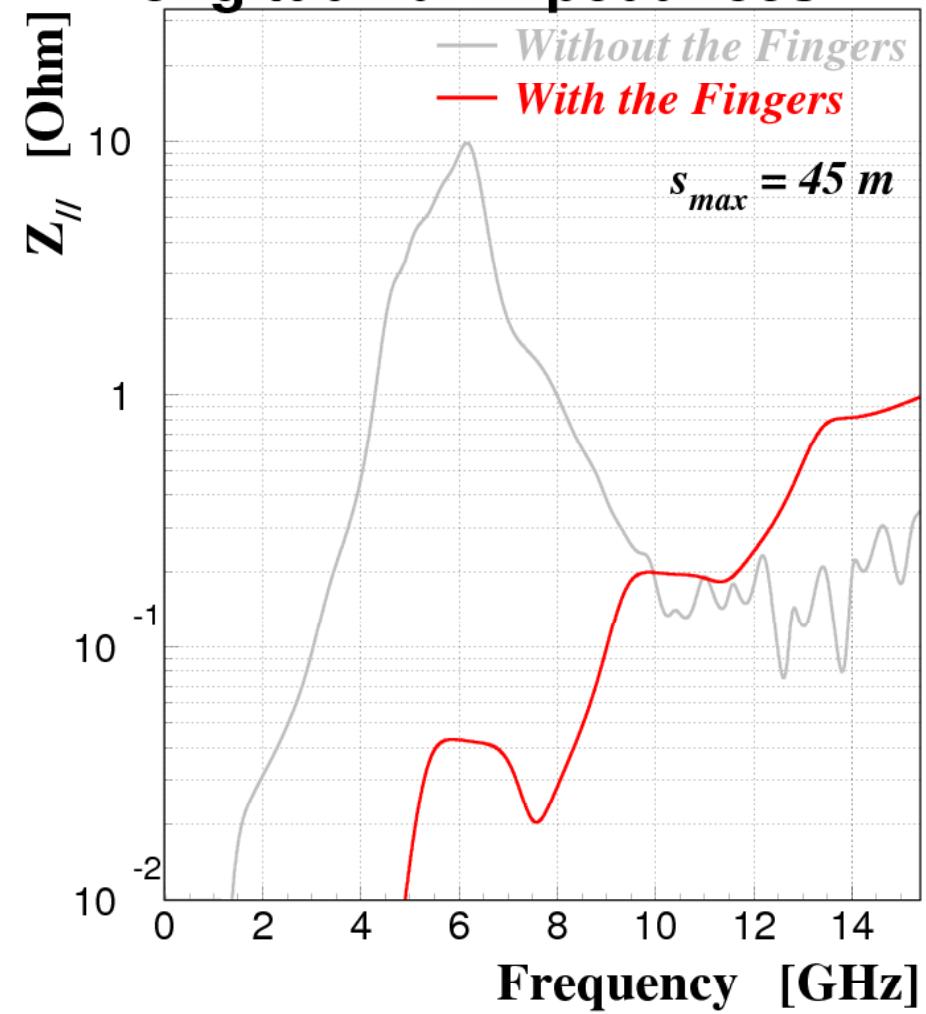
Results of the Calculation (1/2)

Longitudinal Wakepotentials



Suppressed and Damped!

Longitudinal Impedances



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	0.27

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