

cERL 2セル空洞のまとめ

2012年1月23日 技術検討会

2012年2月24日 第59回 ERL検討会

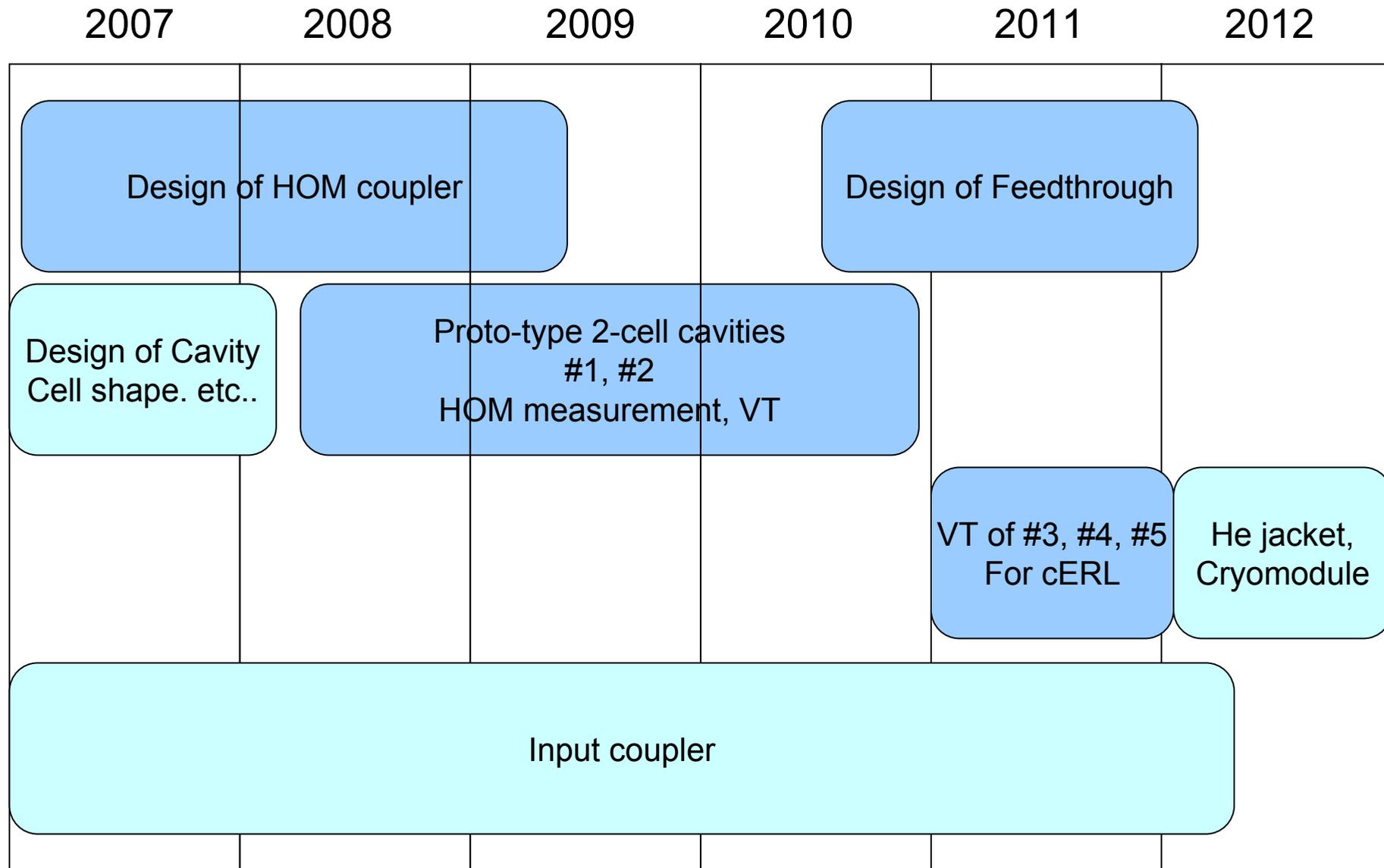
渡邊

入射器用空洞の開発項目

- ・空洞形状： 入力カップラーの結合度、HOM の染み出し、
高次モードの周波数(HOM couplerのBroadband特性も考慮する)
- ・空洞製作： 幾何学的欠陥の抑制、品質評価・空洞補修。
- ・表面処理： 電界強度、フィールドエミッションの抑制、Arガスパーズ置換。
- ・HOM damping： HOM coupler → RF設計、フィードスルーの開発
電氣的歪みを考慮したHOM couplerの配置
- ・電氣的調整： 周波数調整、フィールドモニター用アンテナの結合度
HOM couplerのチューニング
- ・入力カップラー： 大電力、結合度、電氣的歪みを考慮したcouplerの配置
- ・クライオモジュール： 冷却能力、冷却方式

など。

Outlook



Contents

HOM coupler (2007~2011)

- ・HOM coupler、フィードスルーの設計
- ・HOM 測定

2セル空洞 (2010~2012)

- ・空洞製作後の工程
- ・LLRF (周波数調整、Qext など)
- ・光学検査、補修、表面処理
- ・単体の性能測定(HOM pick-upあり)
- ・高圧ガス耐圧試験

まとめ

- ・3空洞の最終状態(連結化前)

はじめに: 入射器クライオモジュールの構成

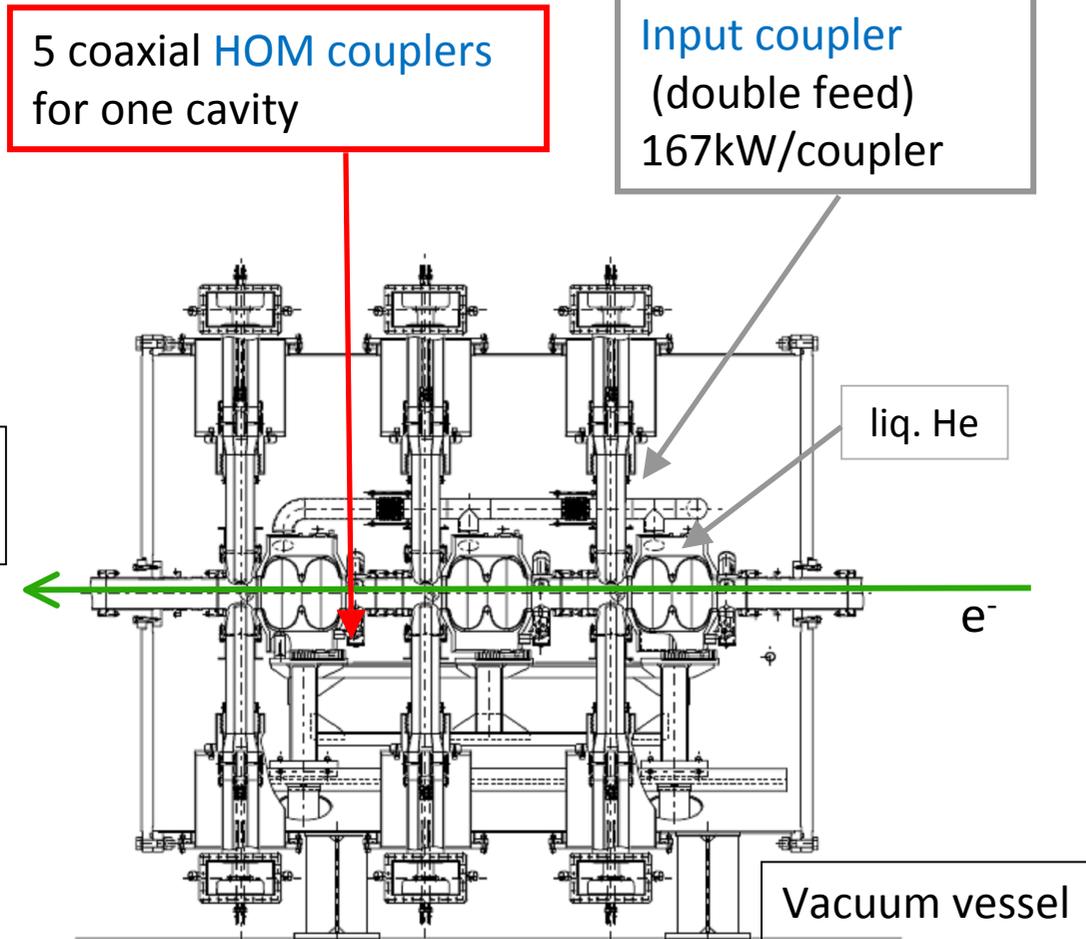
Target

* Accelerate to 10 MeV

Require

* 15 MV/m / cavity at CW

Cavity : 3 x 2-cell cavities
Slide-Jack tuner and piezo tuner



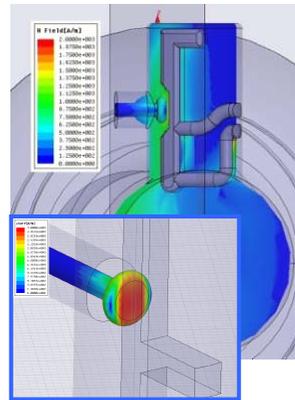
※HOM couplerの設計、空洞の受け入れ検査からモジュール運転を想定した
単体測定までを担当した。

HOM couplerの設計

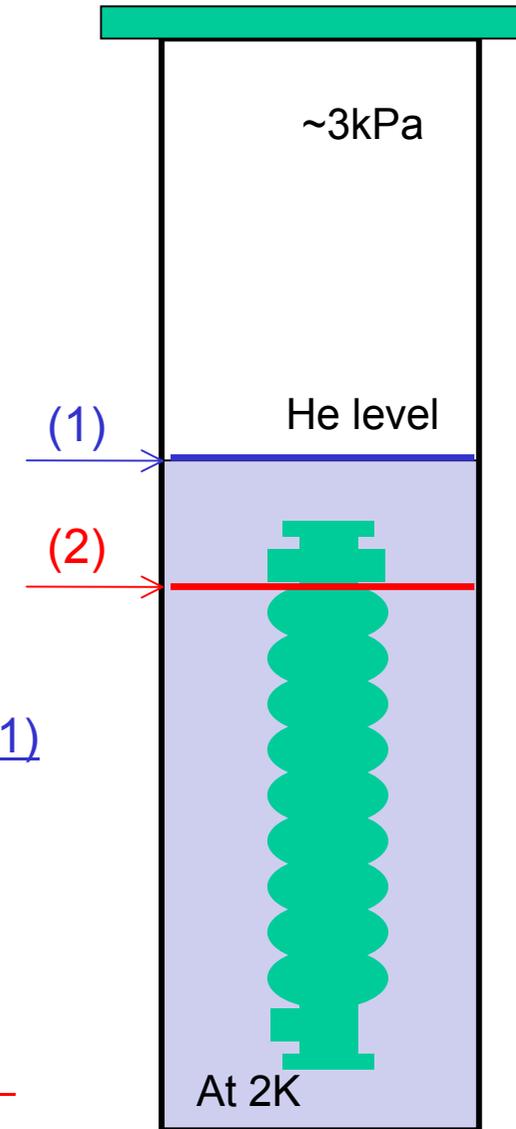
HOM coupler (1): Problem for CW operation

ベースデザイン

: TESLA-like HOM coupler (パルス運転)



N-type with Al₂O₃ window (Kyocera)



CW運転 (Duty=1) で用いると(たて測定、HOM pick-upあり)、

(1) HOM pick-upが発熱(約4000 A/m) ~ 14 MV/m、He level (1)
(数秒維持後、常伝導に転移する。フィードスルーの熱伝導。)

(2) 冷却条件が悪いと外導体が発熱 ~ 4 MV/m、He level (2)
(サーマルアンカー無しの場合。RFロスと冷却パスのバランス。)

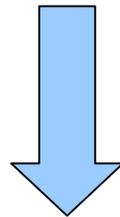
※TESLA-like空洞の構成では、HOM couplerの発熱が原因で、15MV/m(CW)の運転は出来ない。

HOM coupler (2): Design of HOM coupler

設計方針

HOM damping特性と損なわずに、

- ・HOM coupler内の表面電流値を下げる。
- ・熱伝導特性の良いフィードスルーを準備する。



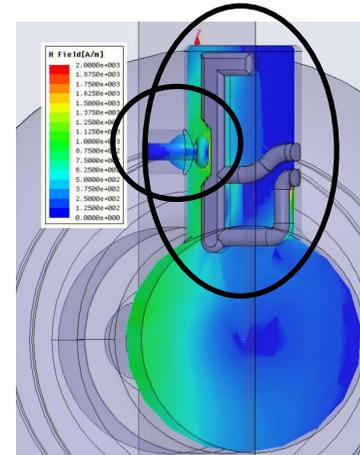
- ・ハイパスフィルターと突起の追加。

表面電流値 → 1/2まで低減(ロス: 1/4)

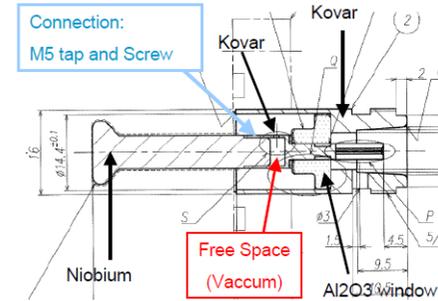
- ・フィードスルーの材料・接合方式の変更。

Kovar → Mo、Copper、SUS316

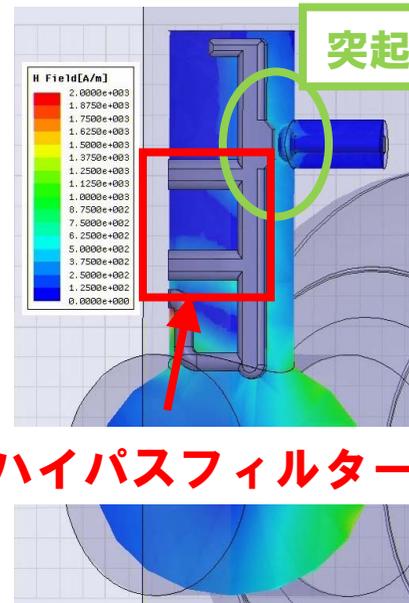
Screw → Brazing



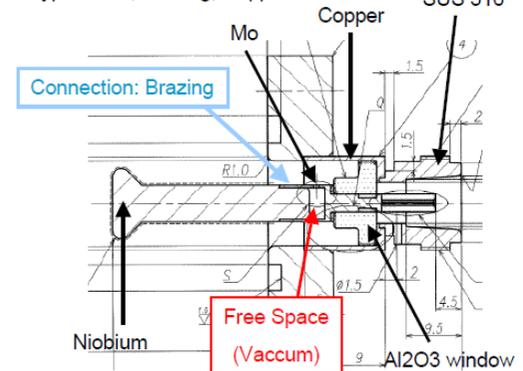
Type 0: Normal



Base



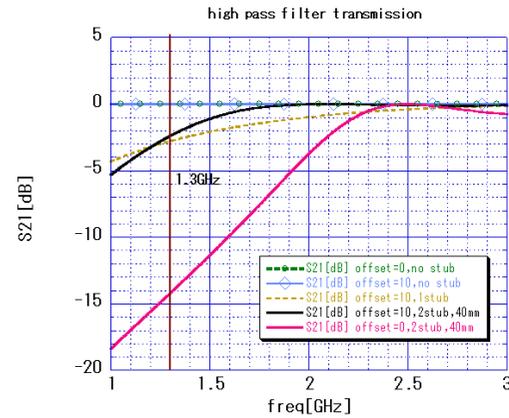
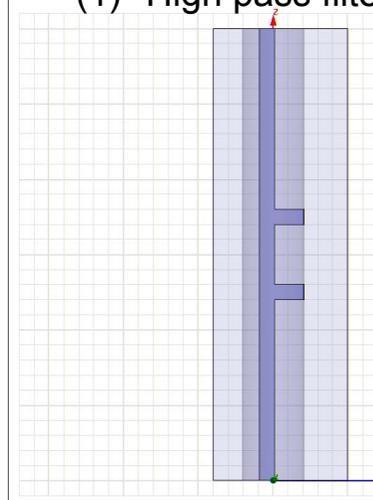
Type 2: Mo, Brazing, Copper



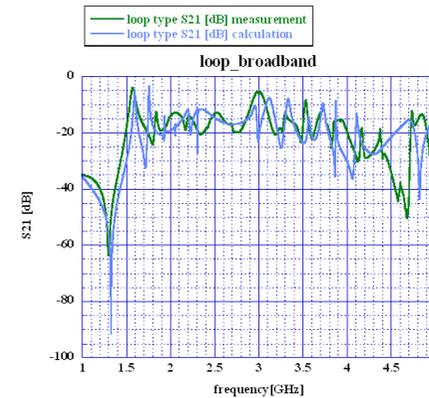
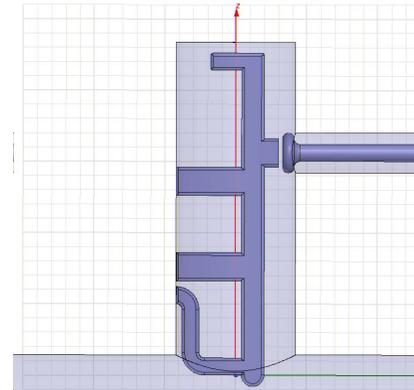
Modify

HOM coupler (3): Calculation by HFSS

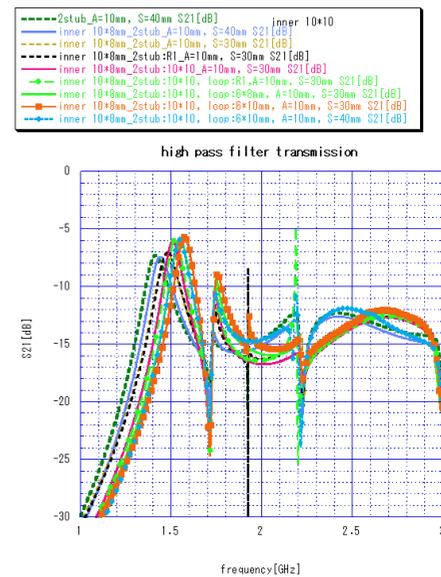
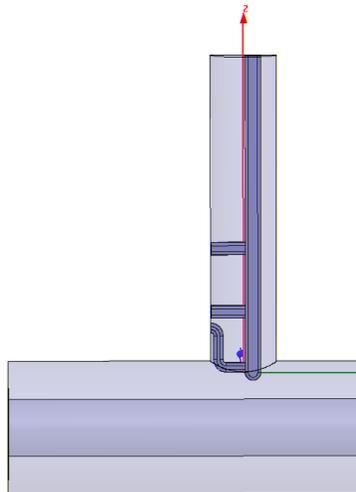
(1) High pass filter



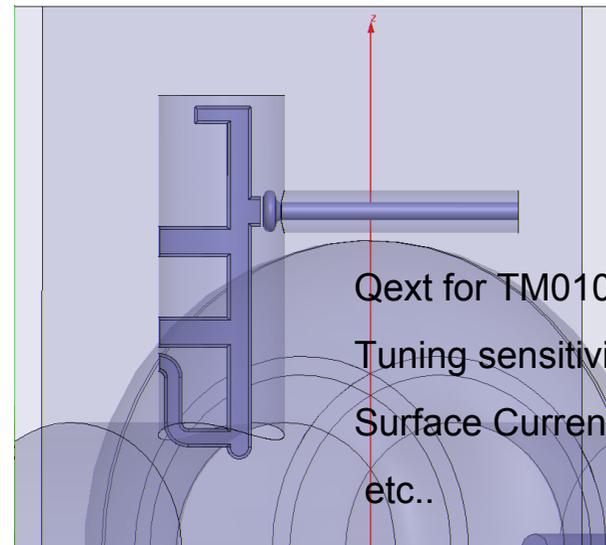
(3) High pass filter + Coupling loop antenna + Notch filter + Pick-up probe



(2) High pass filter + Coupling loop antenna

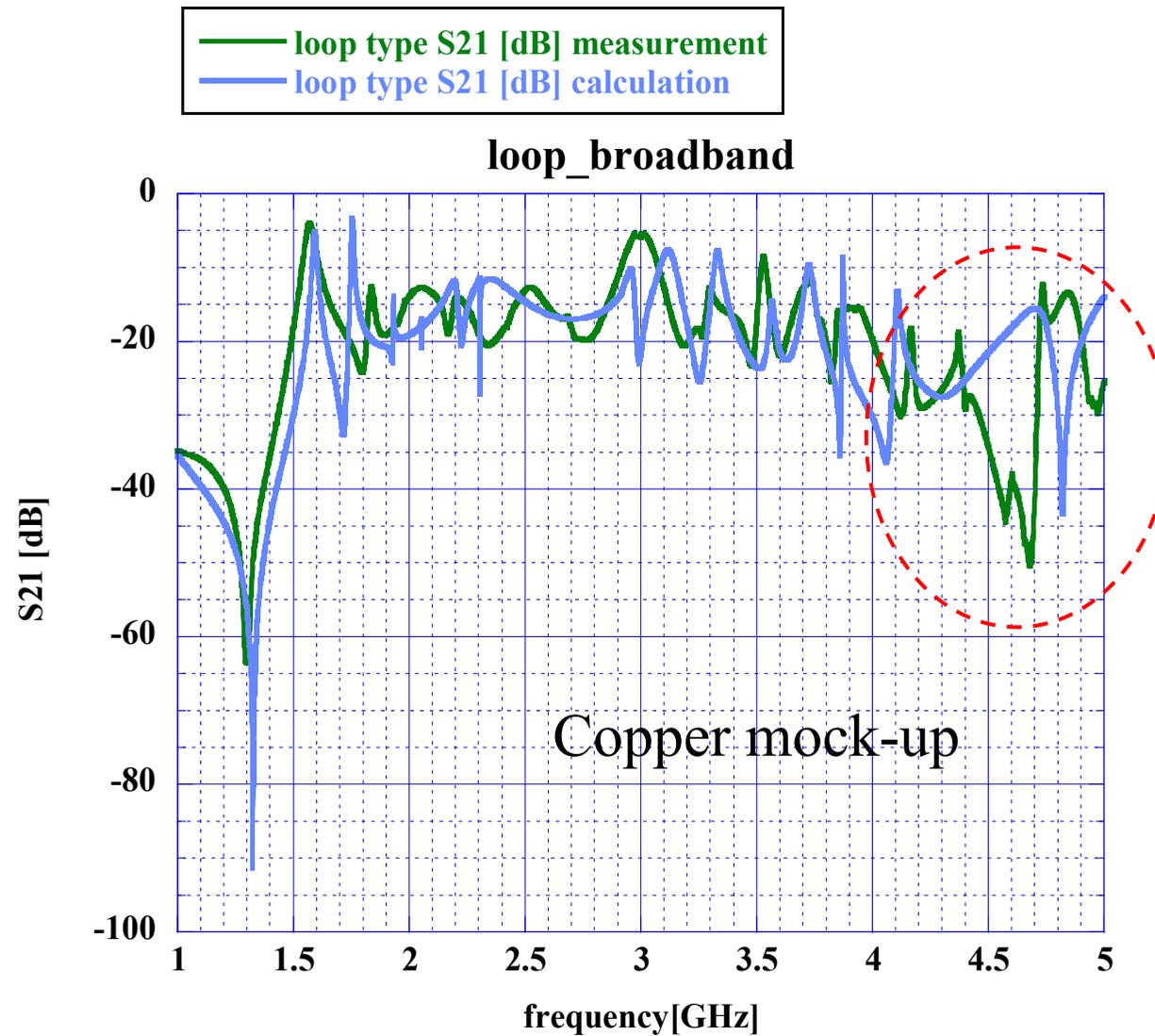


(4) HOM coupler + single or two cell cavity



Qext for TM010 and HOMs
 Tuning sensitivity of Notch filter
 Surface Current vs Eacc
 etc..

HOM coupler (4): Broadband performance



Notchの位置を考慮した上で、高次モードの周波数を含めた空洞設計が必要。

HOM coupler (5): Calculation and measurement of Qext and Surface Current

測定 TESLA銅空洞(シングルセル)

Cell shape : TESLA

Beam pipe = 78 mm

Probe gap = 0.5 mm

Probe Diameter = 12 mm

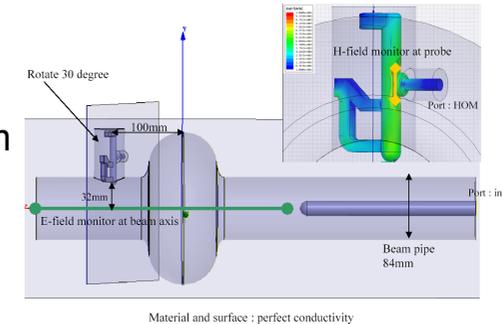


計算 Cell shape : STF end cell

Beam pipe = 84 mm

Probe gap = 0.5 mm

Probe Diameter = 12 mm



mode	Frequency (MHz)	Loop (Qext) 30° 回転	STF 1.5:L-type
TE111	L:1670.6	5.0×10^4	1.8×10^4
	H:1671.6	1.5×10^4	-----
TM110	L:1834.9	3.9×10^4	1.9×10^4
	H:1835.1	1.5×10^4	5.1×10^4
TM011	2426.2	3.2×10^4	4.1×10^4
Insert length		27.5 mm	29.5 mm
Bandwidth Qext>2x10 ¹¹		±2.6 MHz	±3.9 MHz

※空洞周波数の変化:常温→2K + 2.16 MHz

mode	Frequency (MHz)	Loop (Qext) 30° 回転	STF 1.5:L-type
TE111	L:1599.6	2.8×10^4	1.2×10^5
	H:1603.9	9.7×10^4	3.1×10^3
TM110	L:1836.7	5.4×10^3	2.3×10^3
	H:1837.9	6.3×10^3	4.4×10^4
TM011	2328.4	8.2×10^3	2.3×10^4
Insert length		30 mm	31 mm
Surface current on Probe at 15 MV/m		2000 A/m	4000 A/m

HOM coupler (6): Measurement of Notch frequency for Nb models

ERL 2-cell cavity(高压ガス対応品) : Loop-type HOM coupler Fnotch 測定

個数: 15機(5機×3空洞)

測定時間および受け入れ日: 2010年5月31日 13:00~14:30@KEK-STF

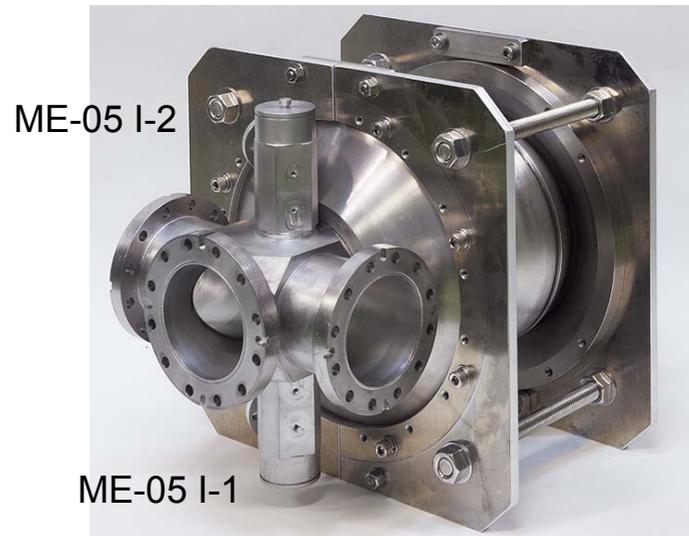
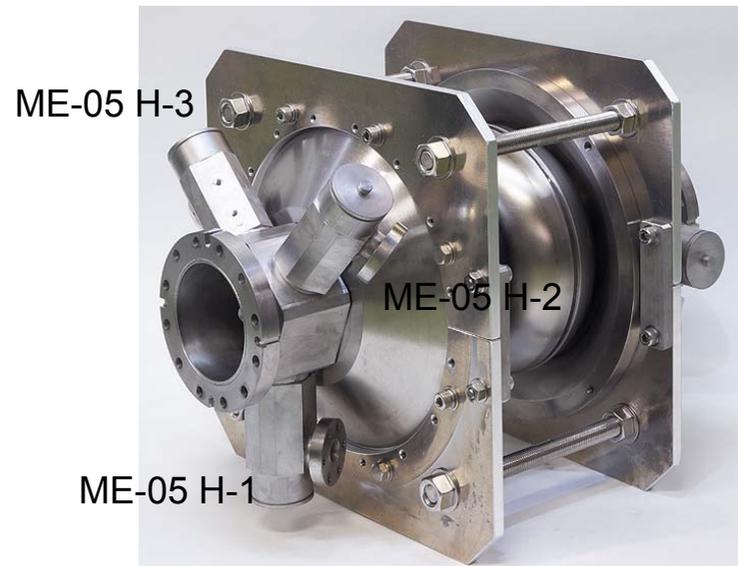
測定方法: 同軸管測定

目標値: 1300MHz±10MHz (公差±0.1~0.2mm)



No.	刻印	ノッチ周波数
1	ME-6-I1	1306 MHz
2	ME-6-I2	1307 MHz
3	ME-6-H1	1304 MHz
4	ME-6-H2	1305 MHz
5	ME-6-H3	1306 MHz
6	ME-7-I3	1304 MHz
7	ME-7-I4	1301 MHz
8	ME-7-H4	1302 MHz
9	ME-7-H5	1299 MHz
10	ME-7-H6	1307 MHz
11	ME-8-I5	1304 MHz
12	ME-8-I6	1298 MHz
13	ME-8-H7	1303 MHz
14	ME-8-H8	1302 MHz
15	ME-8-H9	1303 MHz

HOM coupler (7): Qext measurement by #2 cavity



Dummy coupler付きで測定。
Dummy couplerが無いと、電磁場が歪む。
軸上の電界分布の測定(金属球)

HOM coupler (8): Qext measurement by #2 cavity

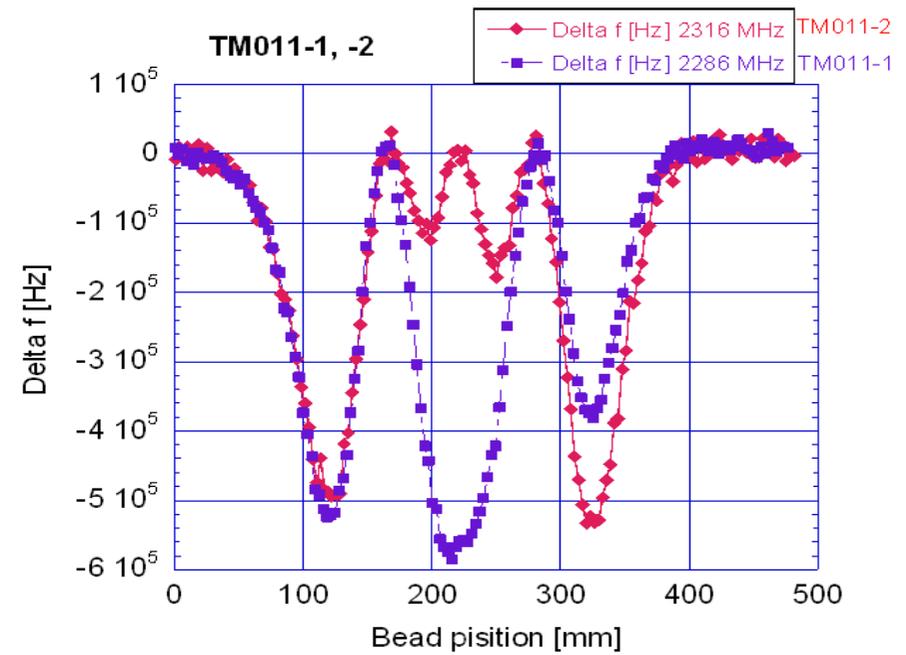
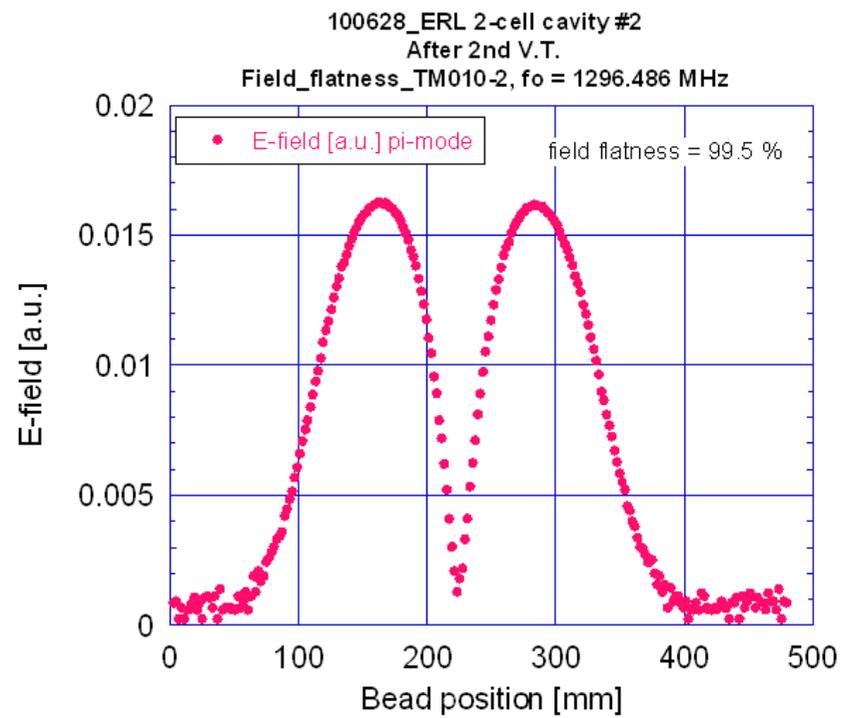
Mode	Frequency [MHz]	Qext, all couplers	ME5-I1	ME5-I2	ME5-H1	ME5-H2	ME5-H3
TE111-1	L: ????? H: 1595.098	---- 508	1120	7090	11300	1460	6290
TE111-2	L:1630.145 H:1642.807	292 436	1420 2450	1090 3230	839 782	2080 12300	8160 4680
TM110-1	L:1799.458 H:1801.098	7320 3240	183000 24600	37900 44300	17800 6420	24400 23000	131000 21500
TM110-2	L:1883.132 H:1884.692	10900 37100	79600 651000	79400 142000	23000 287000	147000 70300	79600 1480000
TM011-1	2286.072	894	3970	3840	11300	13600	4570
TM011-2	2316.156	1120	2120	3570	17700	10200	4700

※ダンピングが悪いモードがあることの原因:

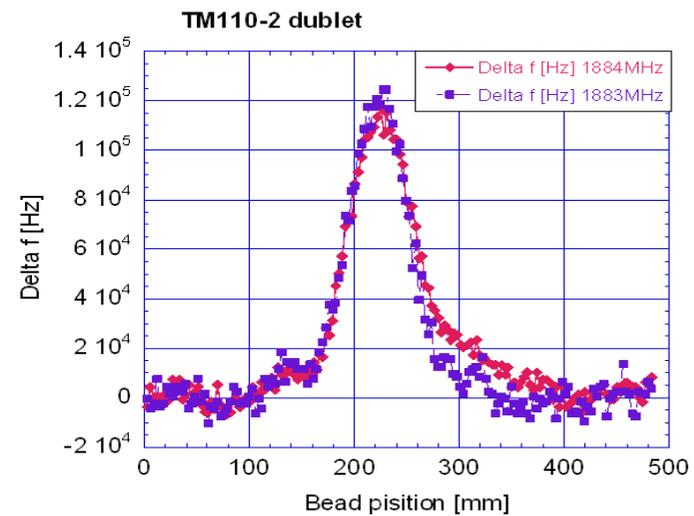
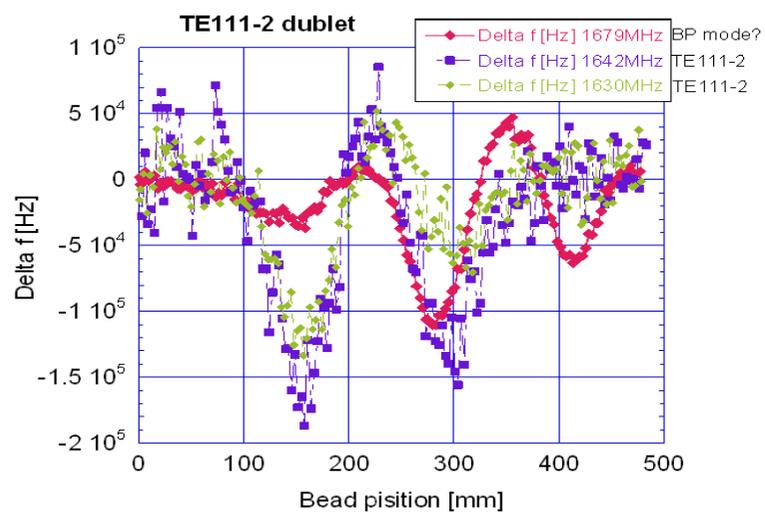
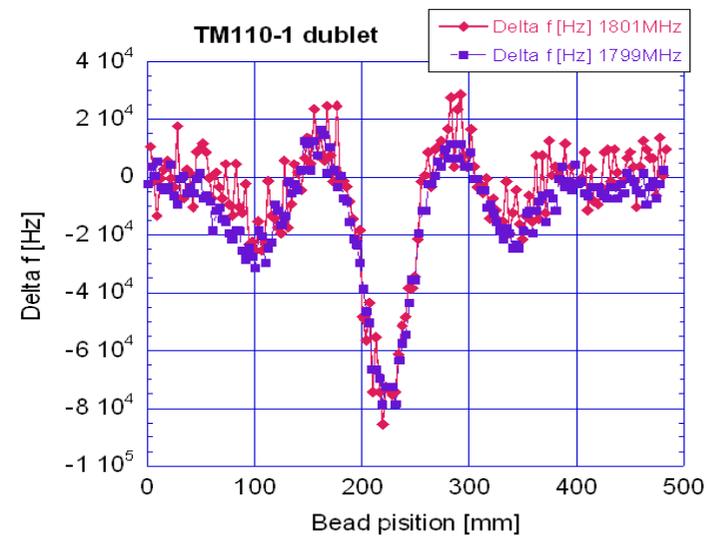
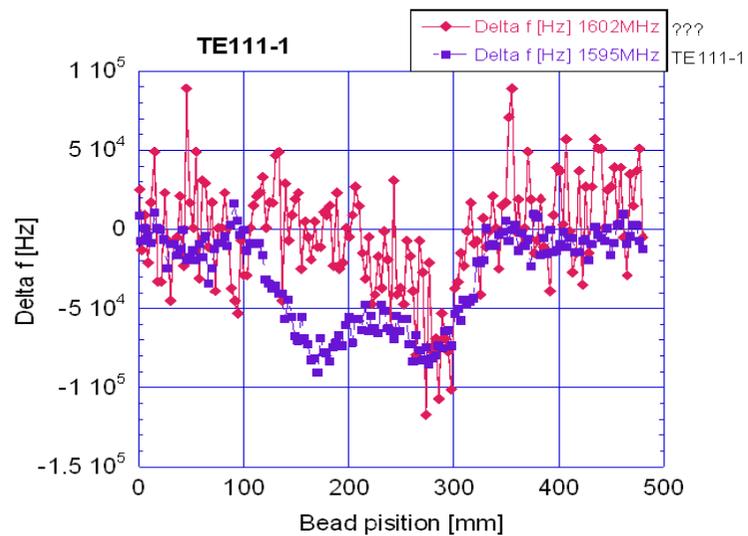
空洞周波数とHOM couplerのブロードバンド特性の不一致。

HOM Couplerの配置による効果(上流側の3機の配置が悪い)。

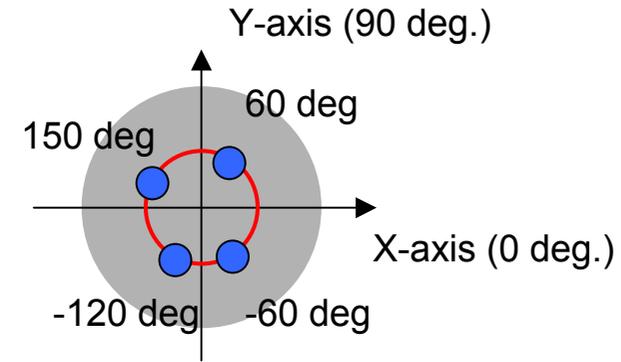
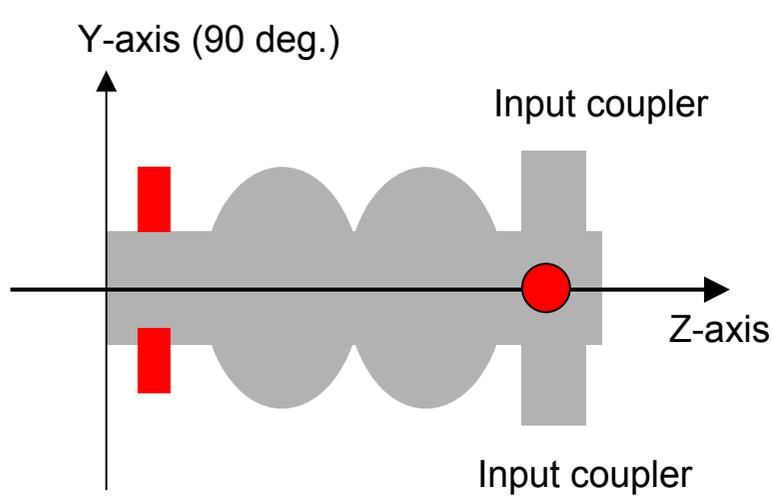
HOM coupler (9): Field distribution of HOMs (#2 cavity)



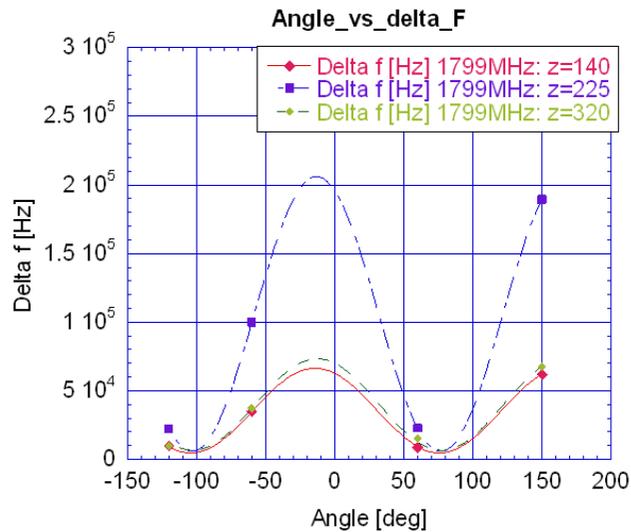
HOM coupler (10): Field distribution of HOMs (#2 cavity)



HOM coupler (11): Polarize direction measurement for cavity BPM



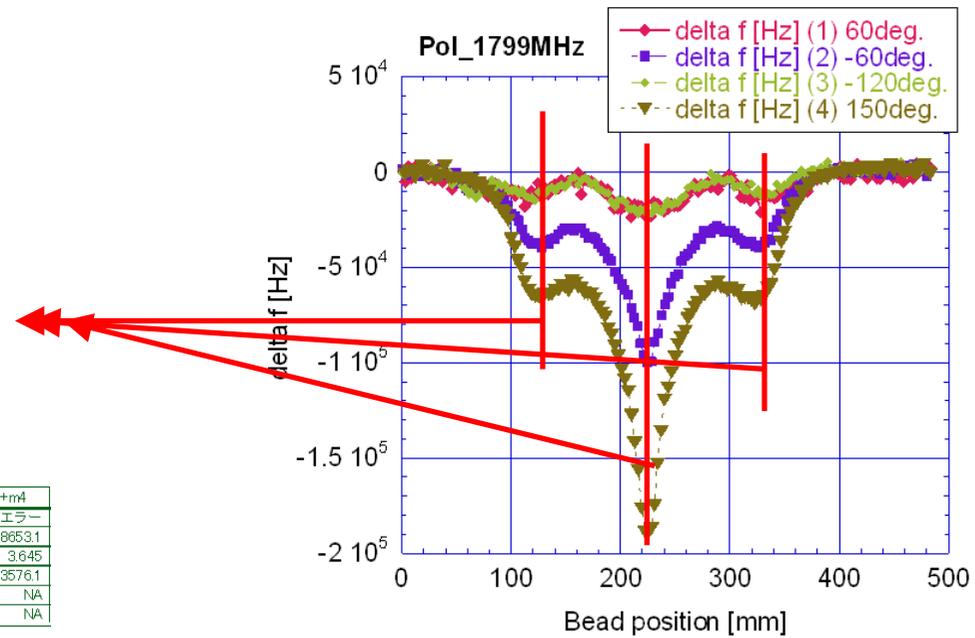
$r=30\text{mm}$ の位置を通過する角度を変えてスキャンした。
Iris = 70 mm、使用ビーズ: 誘電球 $\Phi 6\text{mm}$



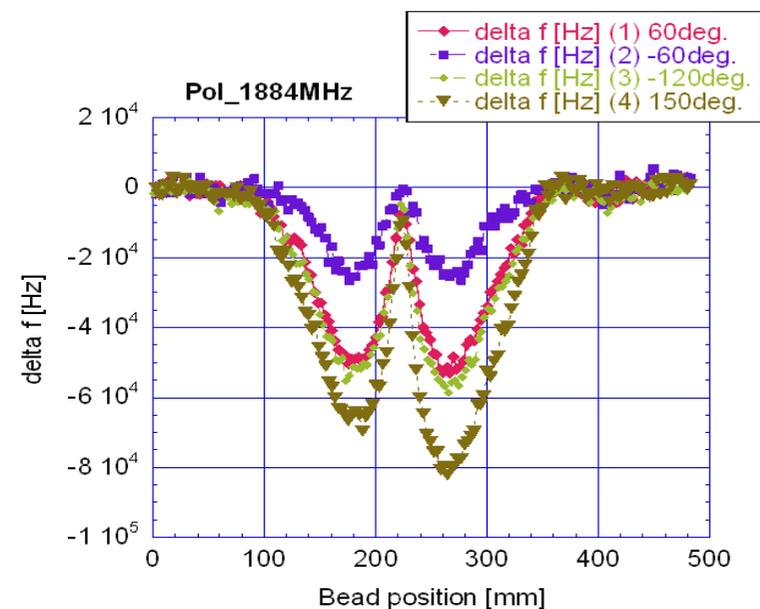
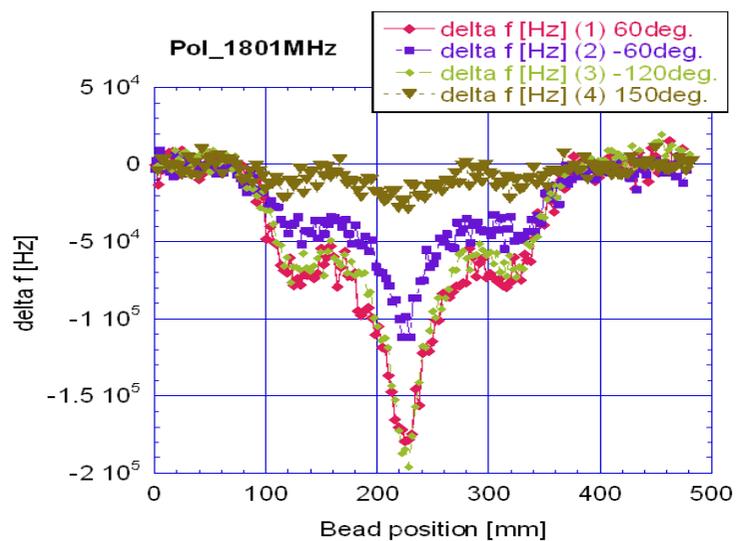
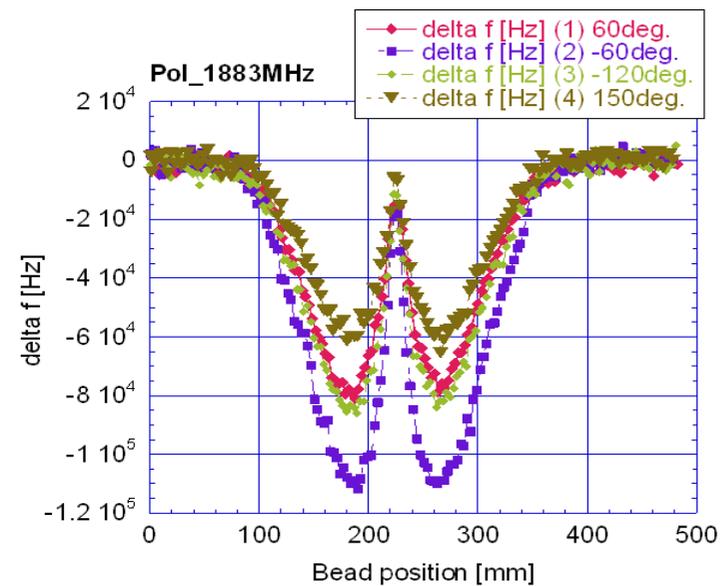
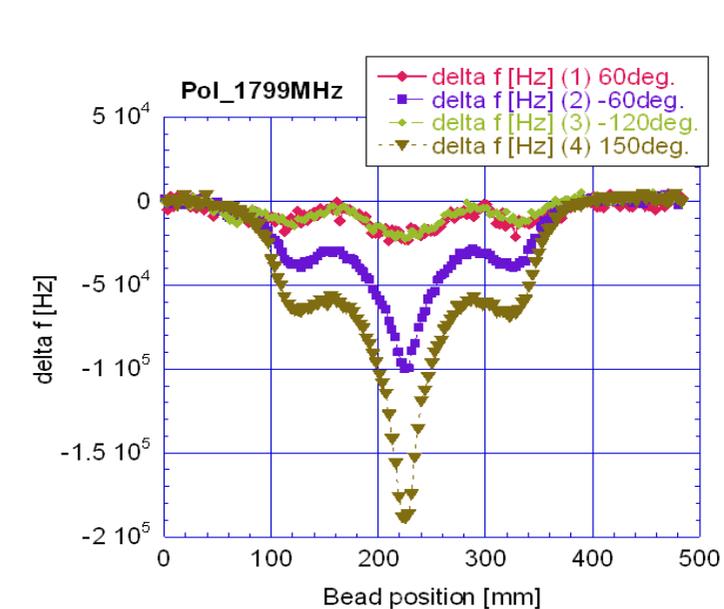
$y = m1 * \cos(m0+m3)^2 + m4$		
	値	エラー
m1	61706	1659.5
m3	14.284	0.82016
m4	4768.4	688.45
カイ2乗	5.8753e+5	NA
R	0.99885	NA

$y = m1 * \cos(m0+m3)^2 + m4$		
	値	エラー
m1	2.0026e+5	656.89
m3	13.24	0.094659
m4	5899.3	271.76
カイ2乗	86945	NA
R	1	NA

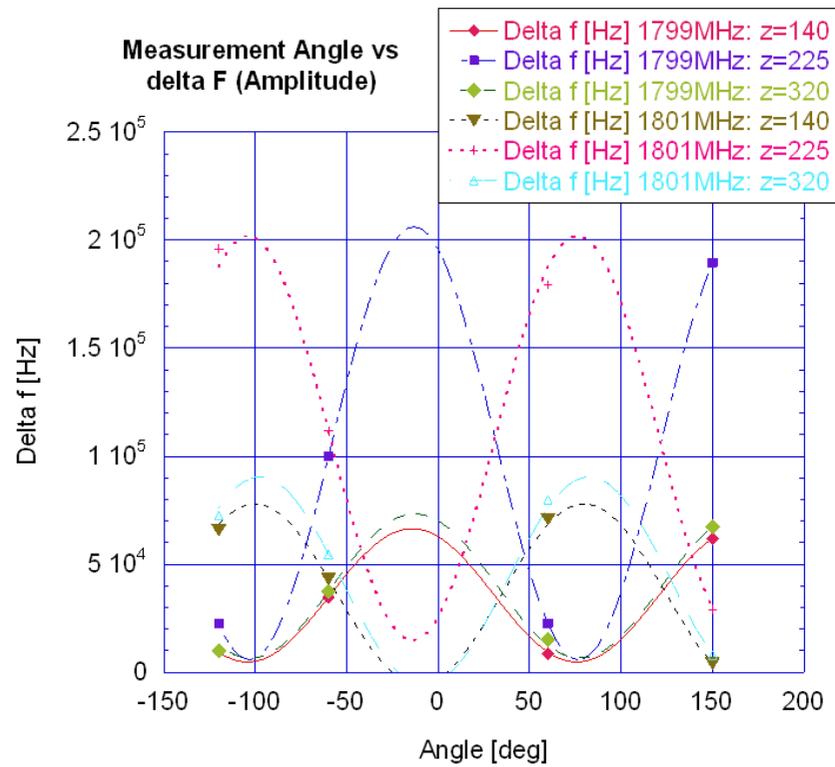
$y = m1 * \cos(m0+m3)^2 + m4$		
	値	エラー
m1	66663	8653.1
m3	12.723	3645
m4	6667.4	3576.1
カイ2乗	1.4683e+7	NA
R	0.99642	NA



HOM coupler (12): Polarize direction measurement for cavity BPM



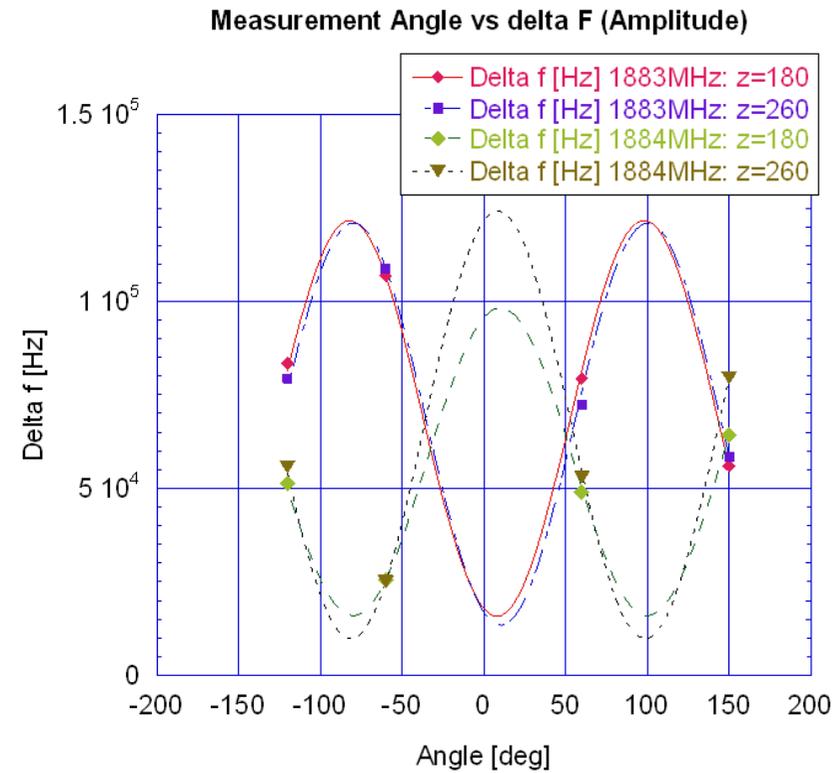
HOM coupler (13): Polarize direction measurement for cavity BPM



TM110-1

X-dipole (1799 MHz) $\hat{=}$ -13 deg

Y-dipole (1801 MHz) $\hat{=}$ 79 deg



TM110-2

X-dipole (1883 MHz) $\hat{=}$ 9 deg

Y-dipole (1884 MHz) $\hat{=}$ 99 deg

HOM coupler (14): Conclusion

- TESLA-like空洞のHOM couplerをベースにCW用に改造した。

表面電流値: 半分まで低減。(ロス: 1/4)

HOM Qext、Notch filter: 劣化無し。

- HOM damping: TM110のダンピングが悪い。

HOM couplerのブロードバンド特性とモード周波数の不一致によるもの。

- Dipole modeの偏極方向

下記の通り、2セル空洞のTM110は空洞BPMとして使えそうなモードである。

TM110-1

X-dipole (1799 MHz) \doteq -13 deg

Y-dipole (1801 MHz) \doteq 79 deg

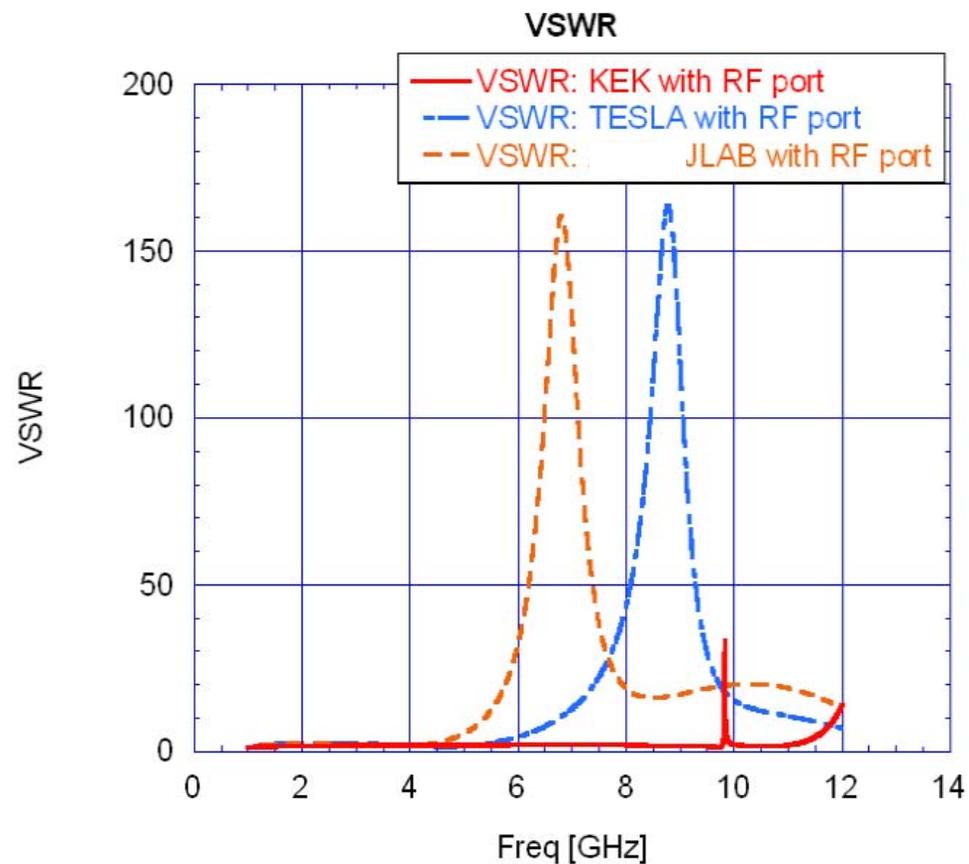
TM110-2

X-dipole (1883 MHz) \doteq 9 deg

Y-dipole (1884 MHz) \doteq 99 deg

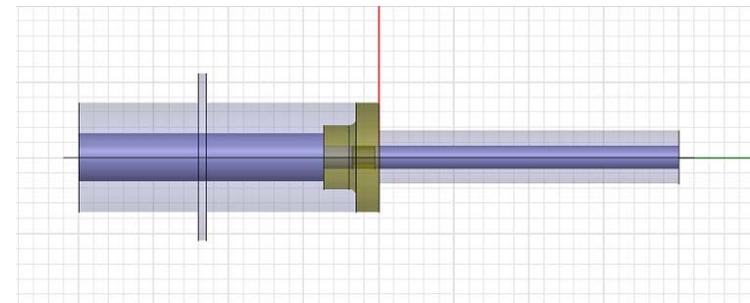
フィードスルーの設計

Feedthrough (1): Transmission performance of Each models



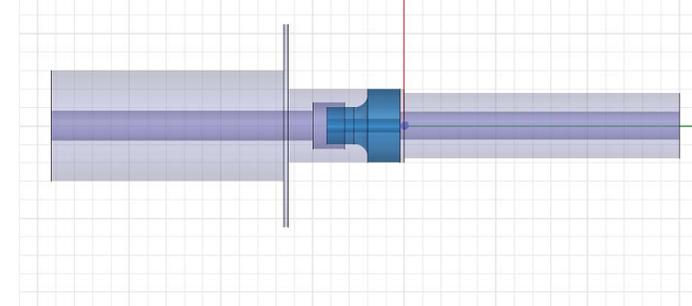
L-band 超伝導空洞に用いられているフィードスルーの透過特性。
JLAB、TESLA: 計算では > 4 ~ 6 GHz 以上の特性が悪い。
周波数特性を考えると、KEKで使用しているものが一番よい。

ILC, ERL (Al_2O_3): KEK

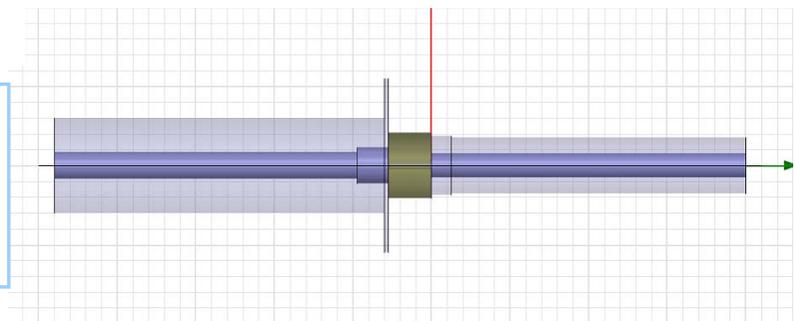


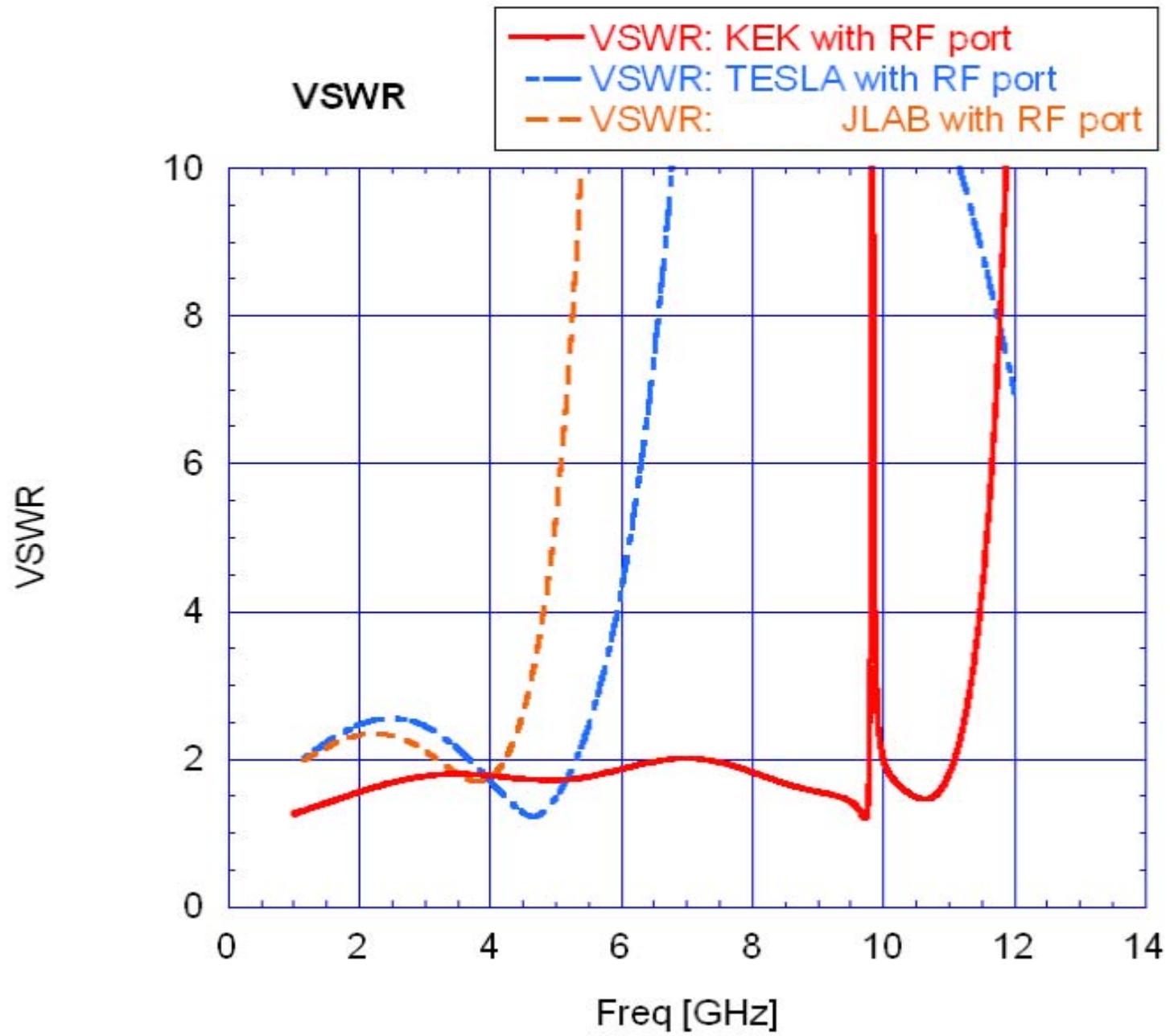
TESLA (Sapphire): DESY

複数のフィードスルーの内のひとつ。

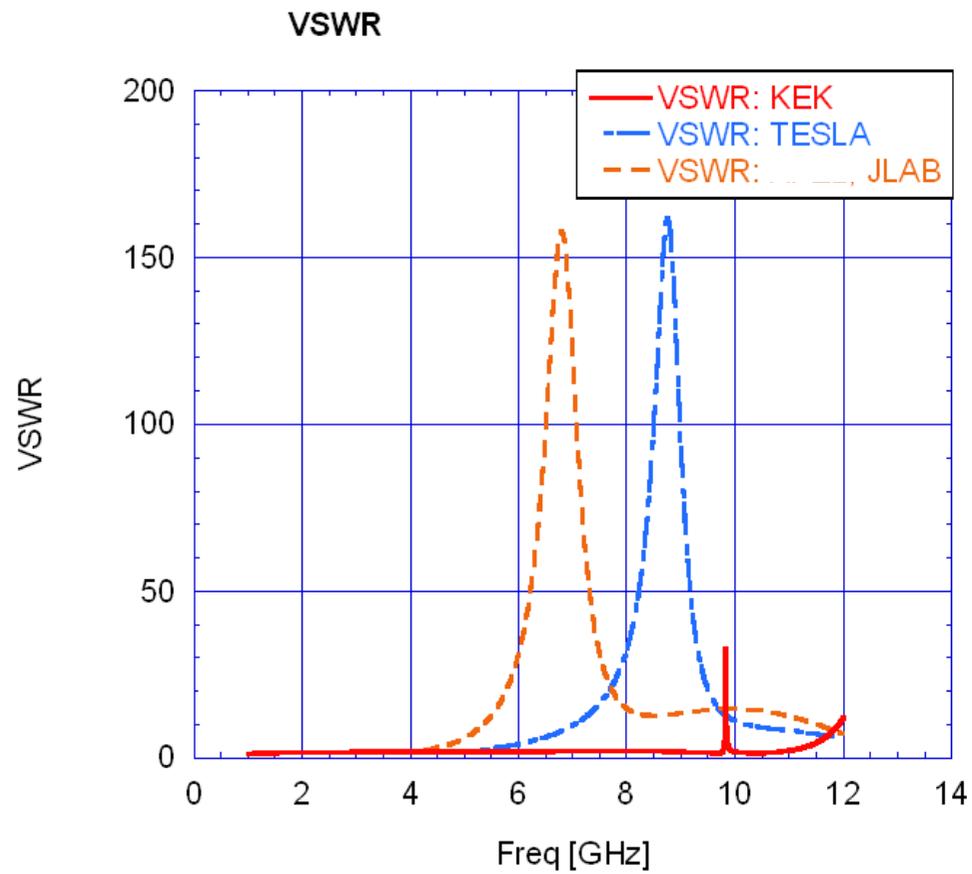


JLAB (Sapphire):

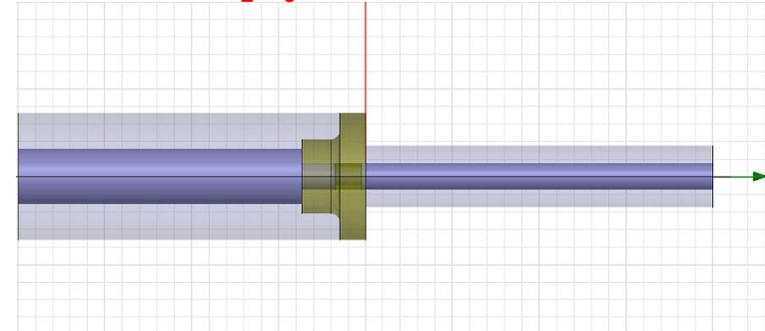




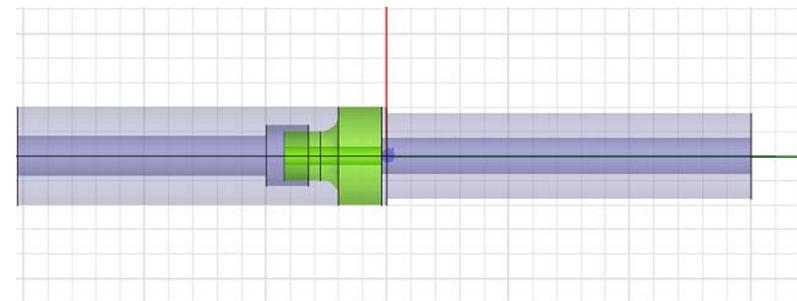
Broadband performance (VSWR) window only



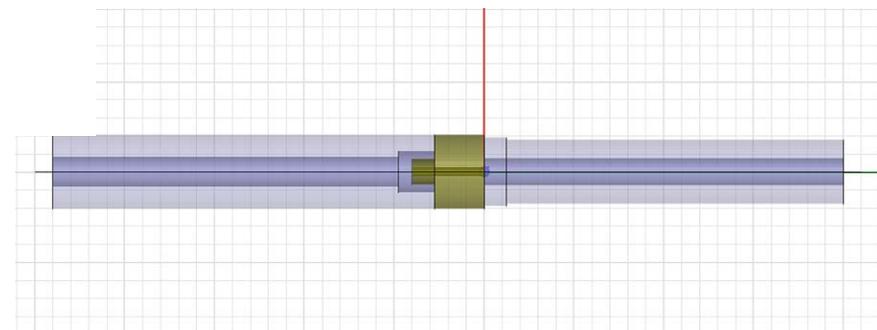
ILC,cERL(Al_2O_3): KEK

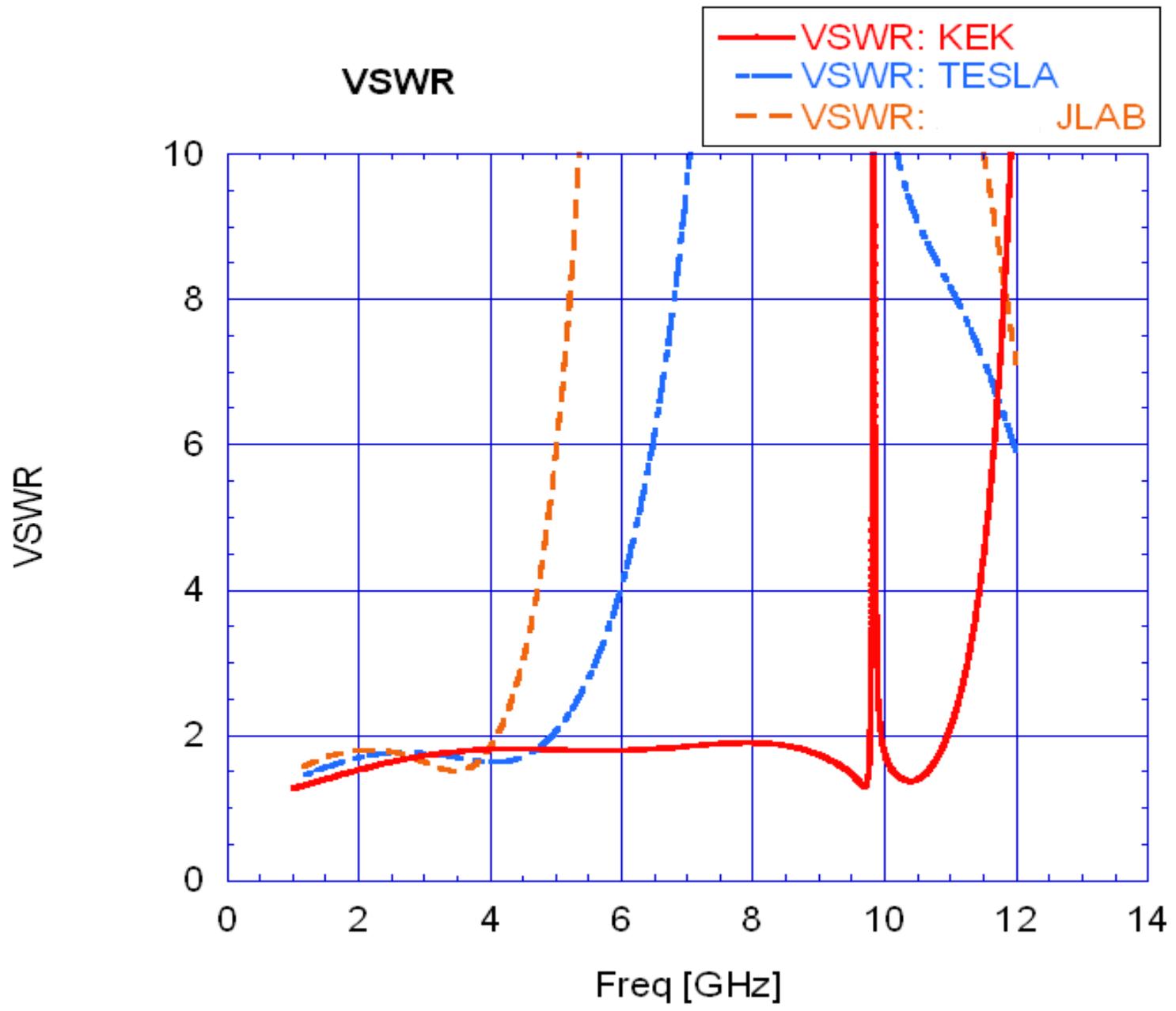


TESLA (Sapphire): DESY



JLAB (Sapphire)





Feedthrough (2): Kyocera N-R (Regular probe, call Type 0 Normal)

ベース: Kyocera N-R

アンテナ: ニオブ

接合方式: 螺子式

高周波窓: アルミナセラミック

外導体材料: Kovar(磁化する)

内導体材料: Kovar(磁化する)

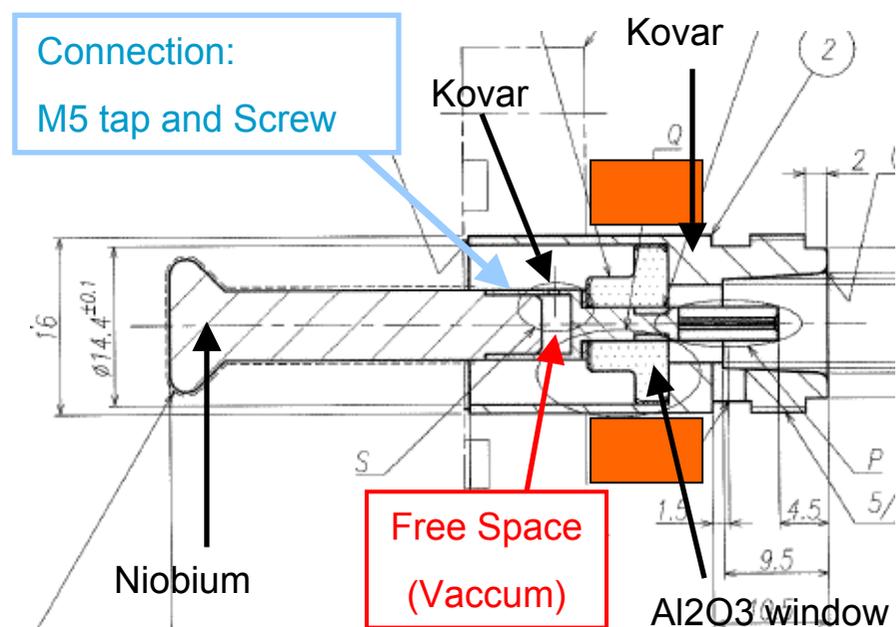
フランジ材料: SUS316L

9-cell で通常使用している組み合わせ。

たて測定の際、下図の様に銅製サーマルアンカーを取り付ける。アンカーとフィードスルー間にはインジウムシールを用いる。アンカーは2Kから取る。

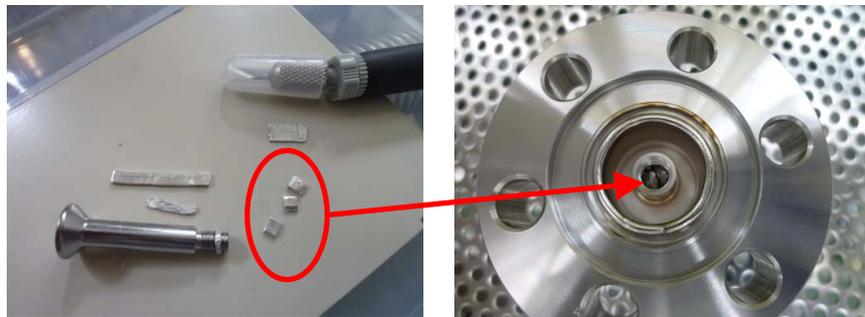
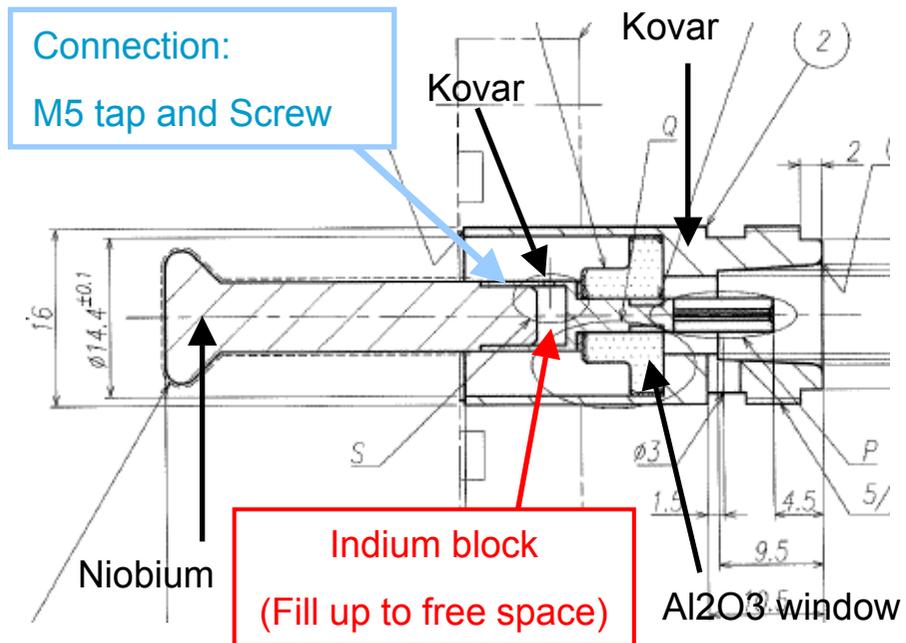
※6mm × 1t × 10ライン(断面積 60 mm²)

Type 0: Normal



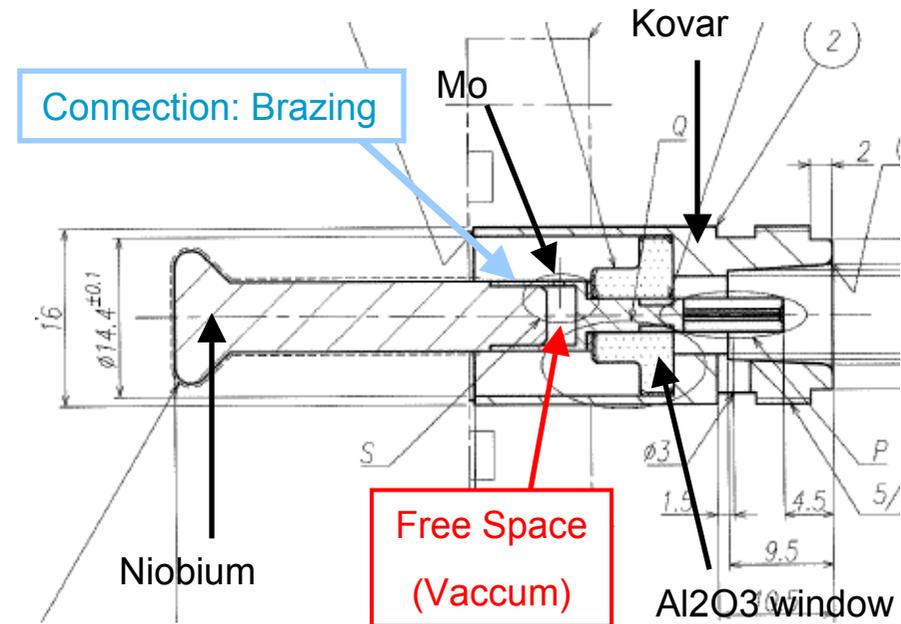
Feedthrough (3): Kyocera N-R (Type 0 Modify, Type 1)

Type 0: Modify



単純にインジウムブロックを用いて
 内導体とニオブアンテナの接触面積を増やした。
 ニオブアンテナとフィードスルーを別々に表面処理・洗浄が行える。

Type 1: Mo, Brazing

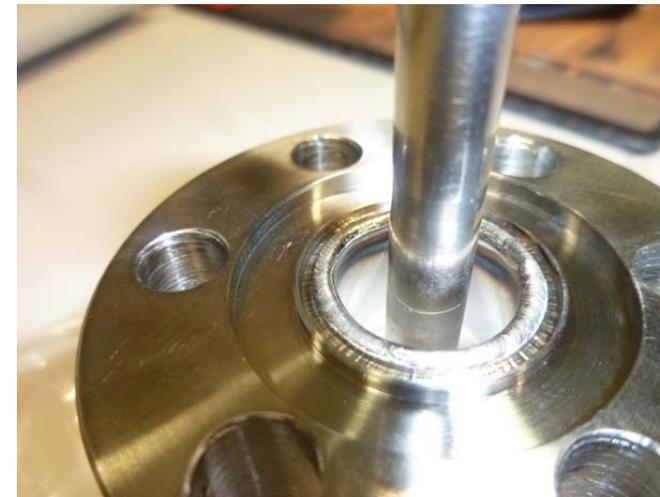
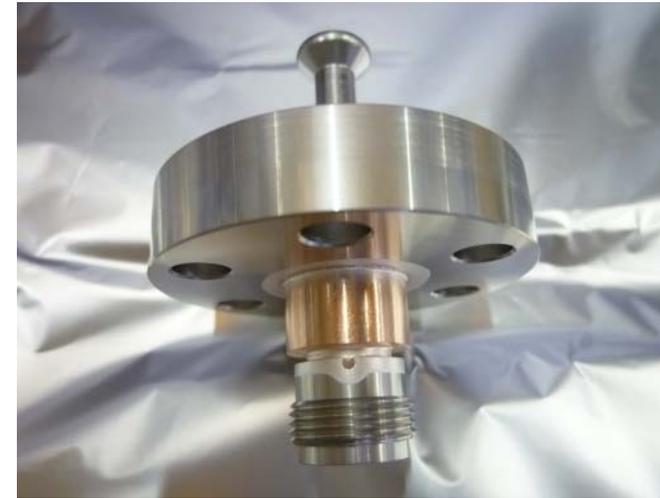
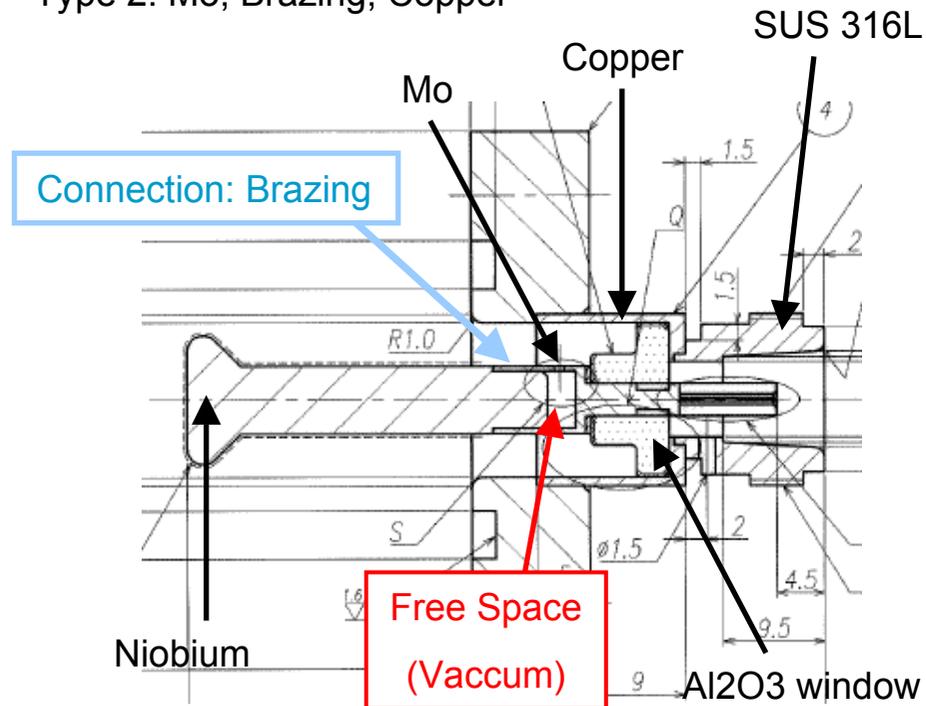


内導体を熱伝導特性の良い材料に変え、接合方式をロウ付けにし、一体化した。

ニオブアンテナ部の表面処理の手順、ロウ材染み出し部の除去が問題。

Feedthrough (4): Kyocera N-R (Improvement, Type 2)

Type 2: Mo, Brazing, Copper



内導体: 熱伝導特性の良い材料に変更
外導体: 高周波窓周辺の外導体材料を銅に変更、
また、Nコネクター接続部をSUS316Lに変更
接合方式: ロウ付け

- ・ロウ材染み出し部の除去
- ・表面処理領域の改善(ニオブアンテナの根元まで)

Feedthrough (5): Remove a brazing material at inner conductor

発熱の原因(ロウ材の染み出し部)と考えられる対策(ロウ材の除去)

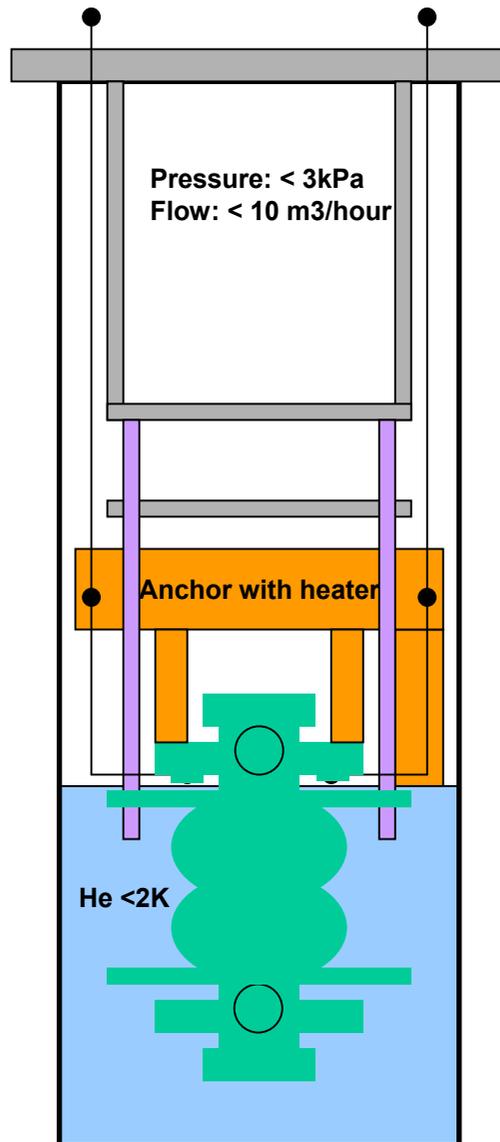


ロウ材の染み出し部分を除去後の様子。

ルーターを使用。内導体のMo表面に流れたロウ材も機械研磨で出来る限り除去した。

あとは、Nbアンテナの根元までCPを行い、洗浄する。

Feedthrough (6): フィードスルーの性能試験



液体ヘリウムの液面とフローレートを制御して、空洞上部の冷却条件を悪化させた状態を作って、CWで維持可能な電界強度を測定している。

(CHECIAのような空洞単体でよこ測定を行う設備がないため)

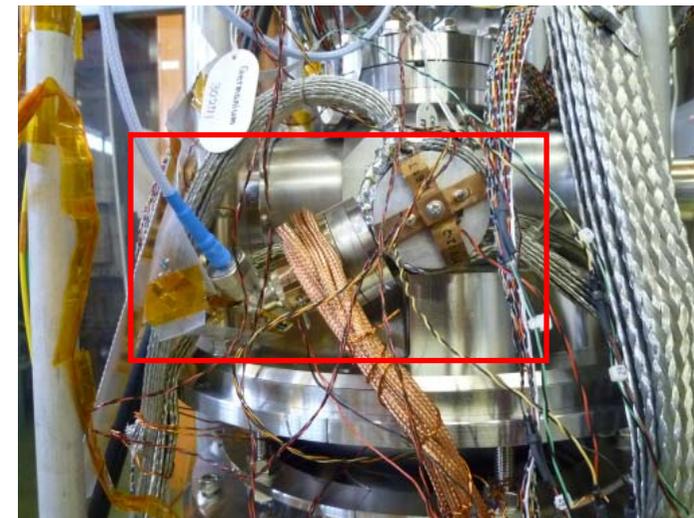
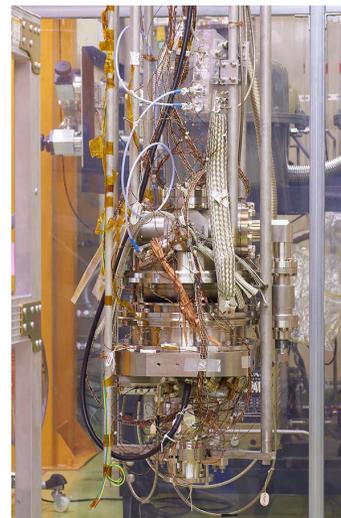
空洞全体がヘリウムに浸った状態でエージングを行った後、

※ヘリウムの液面 vs 維持可能な電界強度の測定

アンカーにヒーターを設置しているので、ビームチューブ周りの温度もある

程度制御できる。温度センサーとHOM pick-upからの出力電力の変化(Qext)

からフィードスルーの発熱状況を評価した。

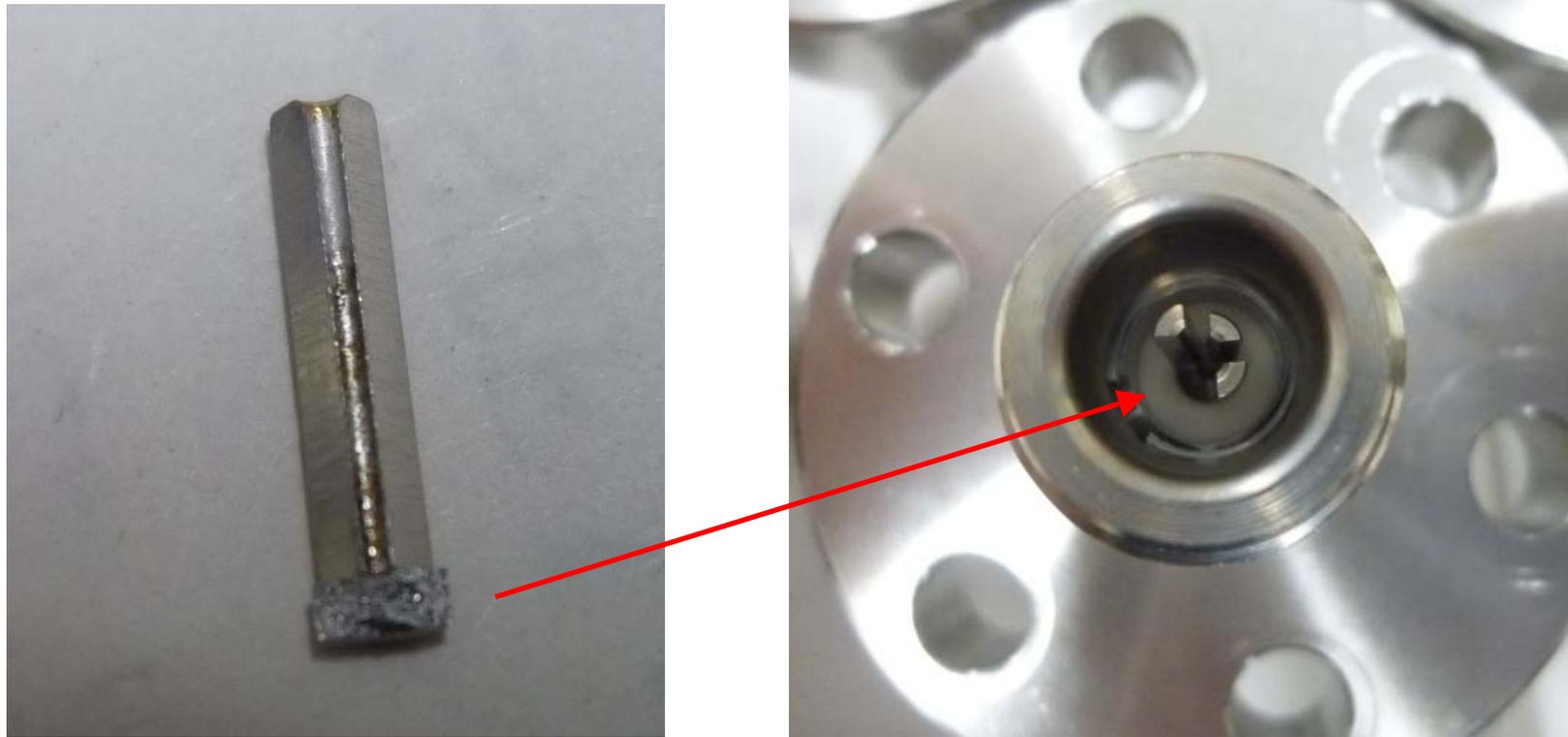


Feedthrough (7): Results

Type	内導体	外導体	高周波窓	接合方式	コネクタ	維持可能な電界強度 Eacc (He外 at 2K)
Type 0 Normal	Kovar	Kovar	Al ₂ O ₃	螺子式	メス	13 MV/mで発熱。
Type 0 modify	Kovar	Kovar	Al ₂ O ₃	螺子式 (インジウムあり)	メス	25 MV/mで発熱。
Type 1	Mo	Kovar	Al ₂ O ₃	ロウ付け (ロウ材染み出し)	メス	ロウ材染み出しあり 5~12 MV/m (60 mm ²)で発熱。 ロウ材染み出し除去 7.5 MV/m (36 mm ²)で発熱。 ※表面状態、表面処理に課題。
Type 2	Mo	Cu SUS316L	Al ₂ O ₃	ロウ付け	メス	> 28.2 MV/m (36 mm ²) > 31.9 MV/m (60 mm ²) で発熱しないことを確認。 ブレード線の本数を変えた。

Feedthrough (8): 問題点

勘合部の破損(タイプ1、内導体材料(Mo)、勘合部内径(1mm))について



状況: 液体窒素にてサーマルサイクル試験×2回、

超伝導空洞実機へ取り付けて低温試験(2K、High field)の実施。

フィードスルーを空洞から取り外し、勘合部の目視検査を行ったところ、勘合部の膨れが見られた。

次回の測定のためにピンセットなどで位置の修正を行ったところ、上図のように勘合部の根元から内導体が折れたものがあった。

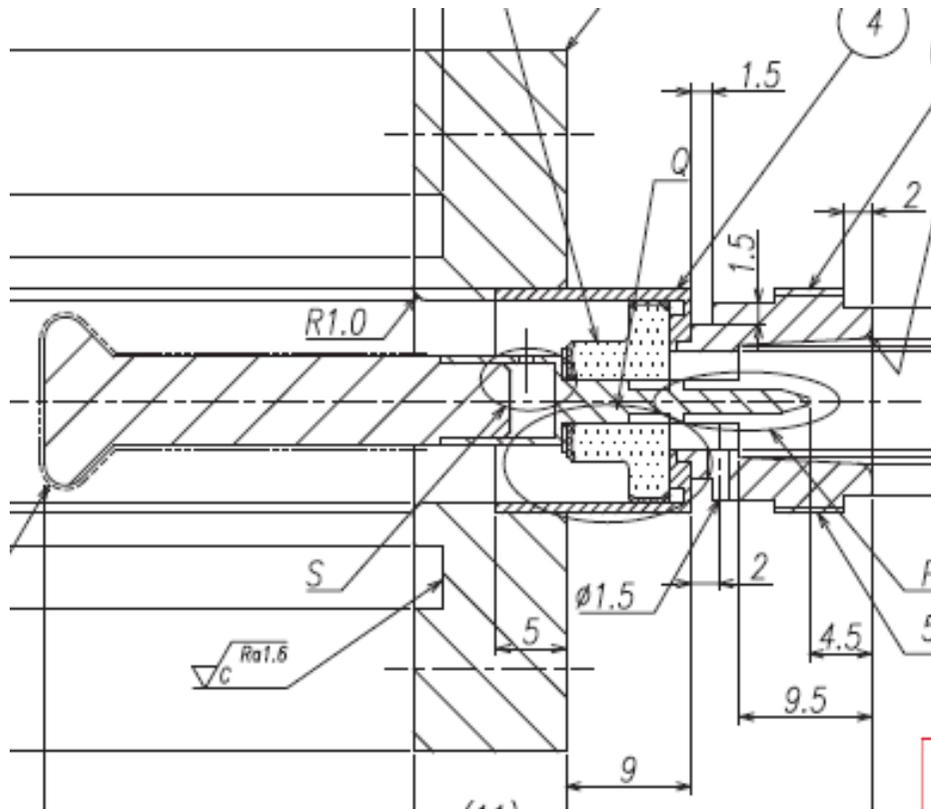
Feedthrough (9): 勘合部の割れ具合



上図は、タイプ1 (Mo) の10個の様子、現状では勘合部の根元から折れたものは2個ある。ピンセットなどで膨れを修正したものについて、折れてはいないが修正中に“ペキ”という異音が聞こえたものが数個あった。この状態で超音波洗浄を行うと、ピンが取れたものもある。

左図は内導体がKovarの通常のN-R変則型である。勘合部に膨れは見られるが、均一に変形しており、膨れの修正を行ってもこれまで、破損は見られなかったそうである。こちらも勘合部の内径は1mmである。通常は、 $\Phi 1.65\text{mm}$ である。

Feedthrough (10): 対策



ピンの破損に対して、
オスピンにして対応。

RFケーブルとの接続は
L-アダプタ(メス-メス)を用いることで
対応する。

現在手配中。必要に応じて、連結化
の際、付け替える。

Feedthrough (11): 熱伝導率(参考)

材料	熱伝導率 [W/(m·K)] 常温	熱伝導率 [W/(m·K)] 4.2 K
銅	401	840
SUS 316L	16.7	0.26
Kovar	17	---
ニオブ	53.7	27
モリブデン	138	66
単結晶サファイヤ	42	42 ?
アルミナ	24 - 32	24 - 32 ?

参照： 真空ハンドブック、低温ハンドブック、理科年表、メーカーのカタログより

Feedthrough (12): Conclusion

- ・Kyocera N-RのRFデザインとTESLA, XFEL の材料構成を採用し、高熱伝導特性を持つN-typeフィードスルーの製作を行った。
- ・製作後の問題の対策、表面処理手順の開発を行った結果、耐電圧特性が向上した。
従来品: 13 MV/m → 新規モデル: > 32MV/m (He外)
(Current 2.5倍、ロス 6.25倍)
- ・勘合部の割れのような材料特有の問題については、ピン形状を変更することで対応する。

About 2-cell Cavity

Cavity(1) fabrication

2011年3月までに、高圧ガス対応2セル空洞3台が製作された。
(#3~#5空洞: ME-06, ME-07, ME-08)

2011年4月~12月

- ・受け入れ検査
- ・表面処理
- ・単体の性能試験
- ・フィードスルーの開発(2011年6月~12月)



2012年1月~3月

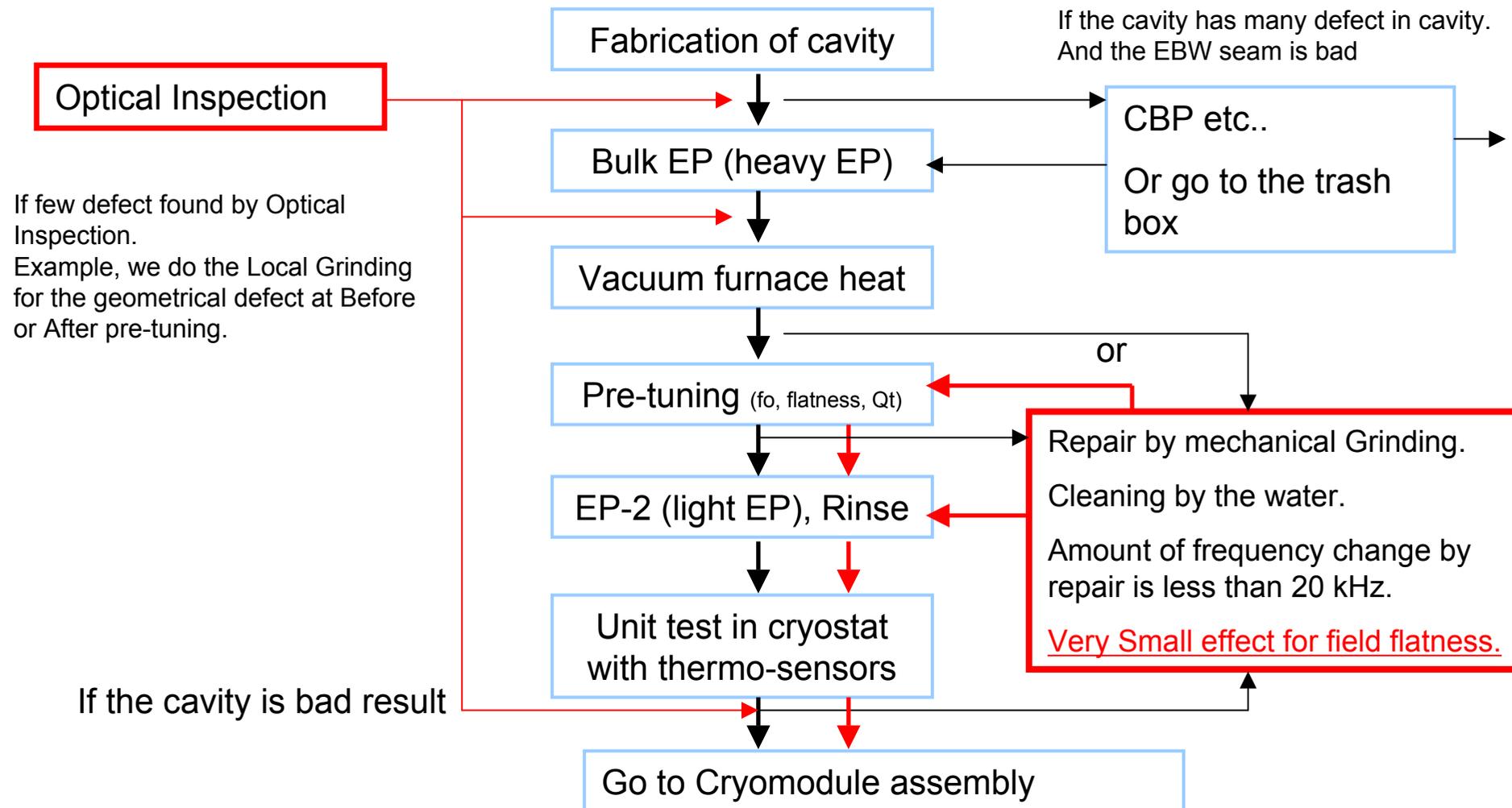
- ・Heジャケット溶接
- ・モジュールアセンブリ

2012年4月~

- ・冷却、モジュール運転

Frequency	1.3	GHz
Number of cell	2	
R / Q	205	Ω
Operating Gradient	14.5	MV / m
Number of Input Coupler	2	
Coupler Power	167	kW
Coupler Coupling Q	3.3×10^5	
Number of HOM coupler	5	
Operating Temperature	2	k

Cavity(2): Surface treatment, RF tuning and Test



Feature: Combination of mechanical grinding and light EP without re-pre tuning, Bulk EP and Vacuum furnace heat process for Cavity Repair.

Cavity(3): History of Frequency Tuning

	#3 cavity [MHz]	#4 cavity [MHz]	#5 cavity [MHz]
受け入れ	<u>1301.184 (472.5mm)</u>	<u>1297.274 (476.0mm)</u>	<u>1297.564 (476.5 mm)</u>
プリチューニング	1298.725 (470.5mm)	<u>1298.200</u> (476.5mm)	<u>1298.247 (477.0mm)</u>
Bulk-EP(105um)+ アニール後	1297.831	1297.284	1297.384
Final EP VT stand (常温、真空)	1298.091 (20um研磨)	1297.560 (20um研磨)	1297.665 (20um研磨)
1st VT at 2 K	<u>1299.947</u>	<u>1299.433</u>	<u>1299.518</u>
After VT VT stand (常温、大気圧、窒素)	1297.728	---	---
再プリチューニング (常温、大気圧、空気)	1297.661→ 1297.195 (Repairあり)	1297.135→ 1297.488 (Repairあり)	1297.255 なし
再プリチューニング2	1297.195→ 1297.481 (<u>469.0mm</u>)	---	---
Final EP、VT stand (常温、真空)	1297.620 (30um研磨)	1297.650 (30um研磨)	--- (10um研磨)
2nd VT at 2K	<u>1299.533</u>	<u>1299.532</u>	<u>1299.427</u>
再チューニング3		1297.280 (Repairあり) → 1297.420 (<u>476.5 mm</u>)	
Final EP、VT stand (常温、真空)		1297.660 (20um研磨)	
3rd VT at 2K		<u>1299.517</u>	

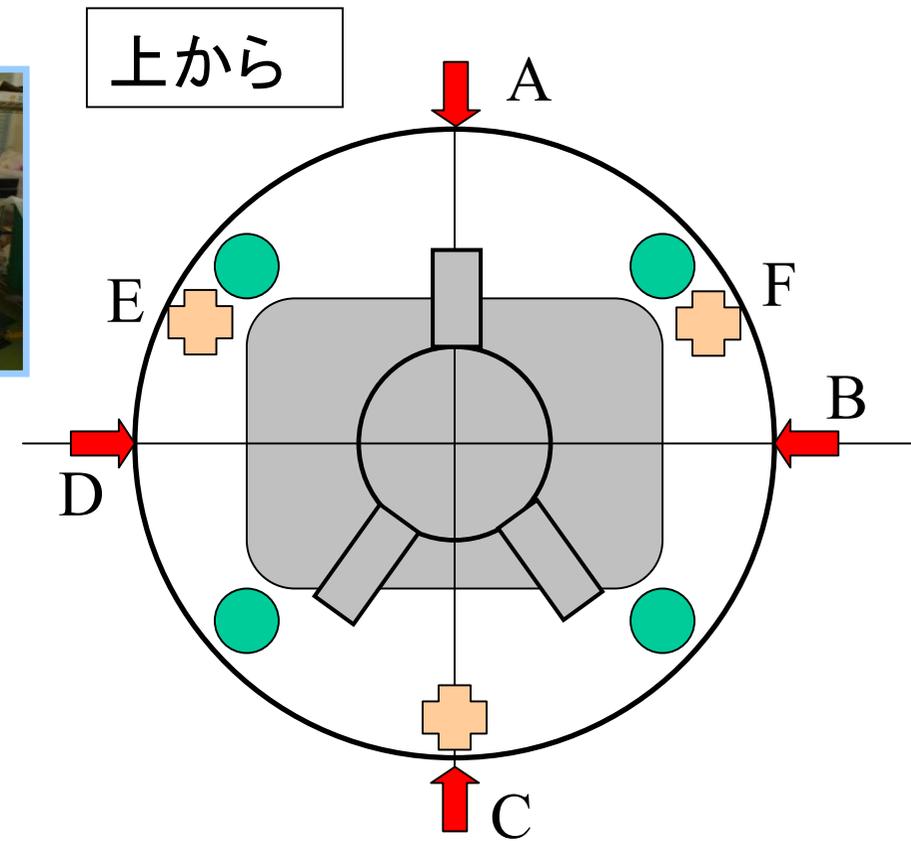
Cavity(4): Set-up of Frequency Tuning



Tuning 方法

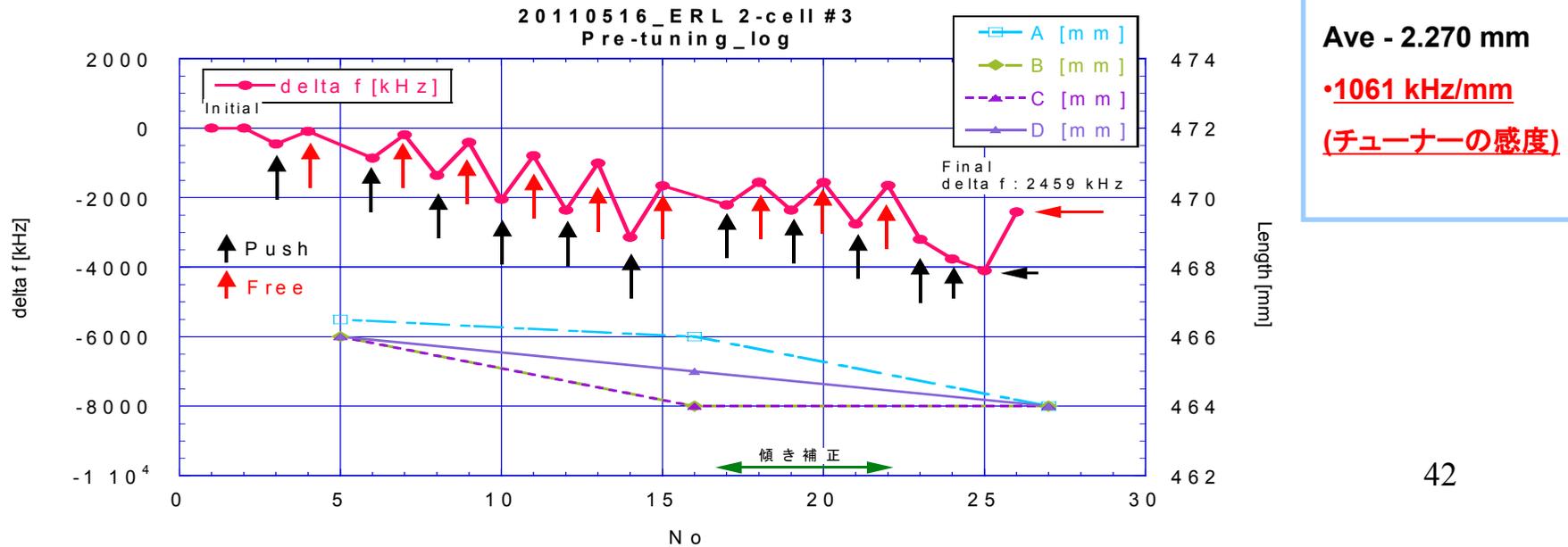
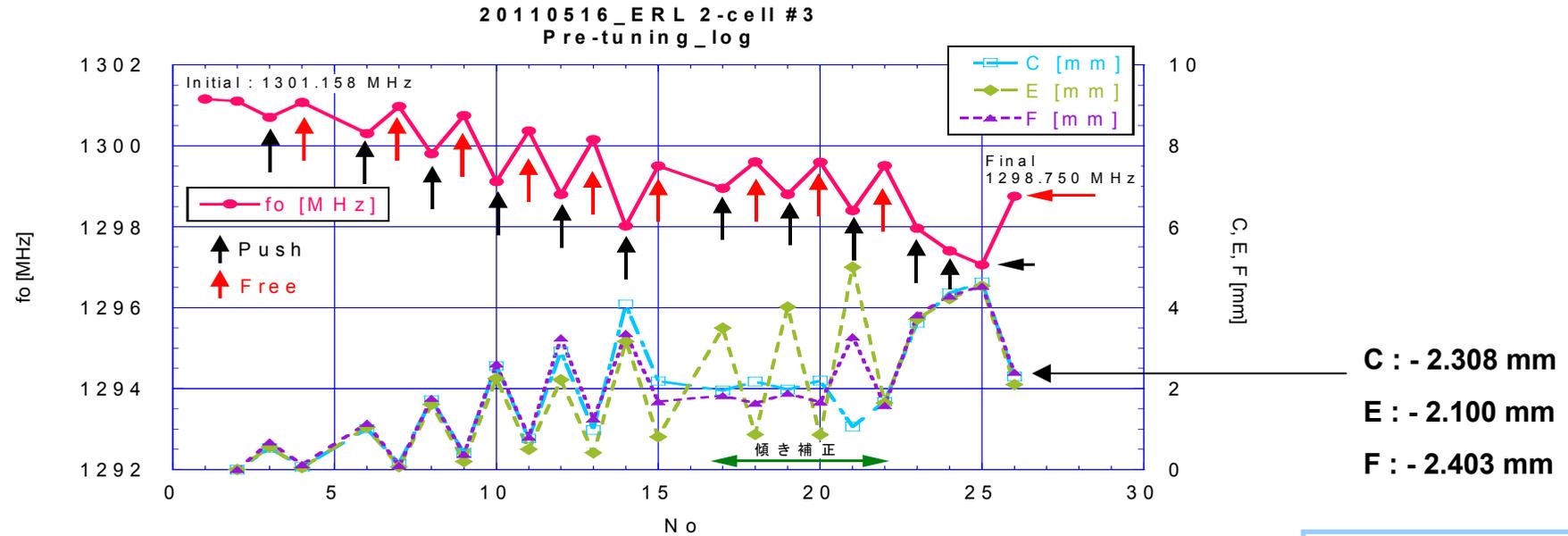
スタッドボルト(4箇所)を締めて、空洞長を変化させる。
 リニアゲージを見ながら変形させていく。空洞が傾かないように注意する。全長(Length)も測定する。
 ($\pm 0.3\text{mm}$ 以下で調整)

変形 → フリー の繰り返しでターゲット周波数まで調整する。S21でモニターした。

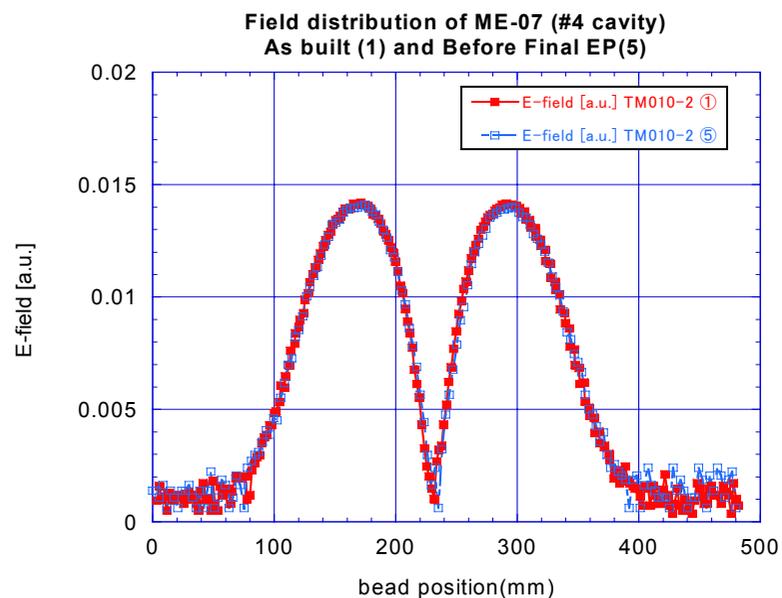
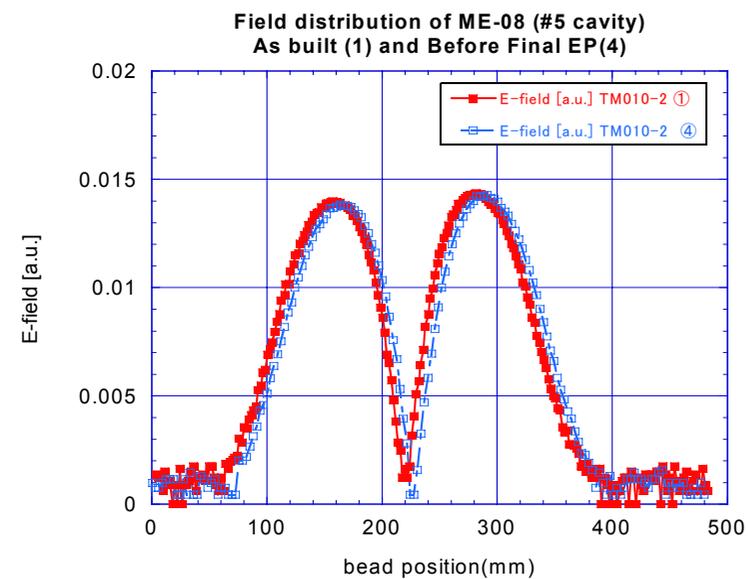
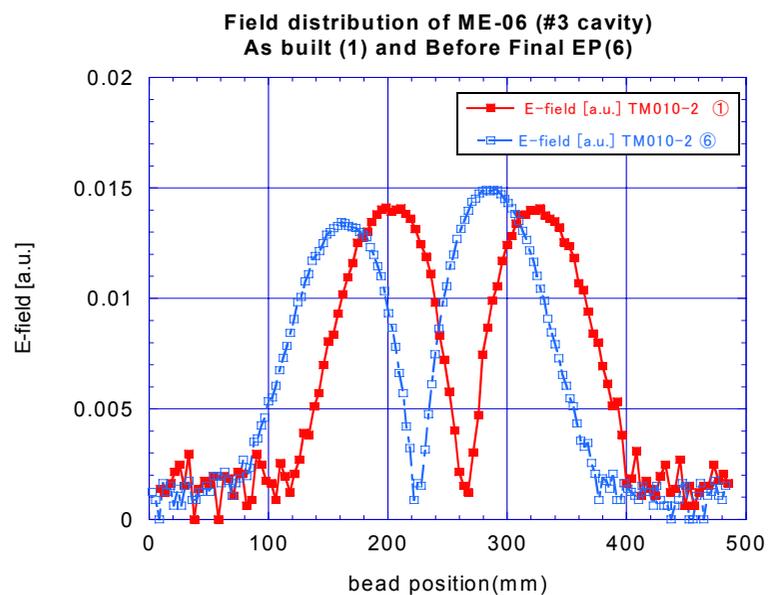


- スタッドボルト: モリコート忘れずに
- + リニアゲージ(1 μm 分解能)
- ↑ Length の測定点

Cavity(5): Example, Frequency Tuning of #3 cavity



Cavity(6): Field distribution before and after frequency tuning



チューニングの方向性(潰す↓、伸ばす↑)

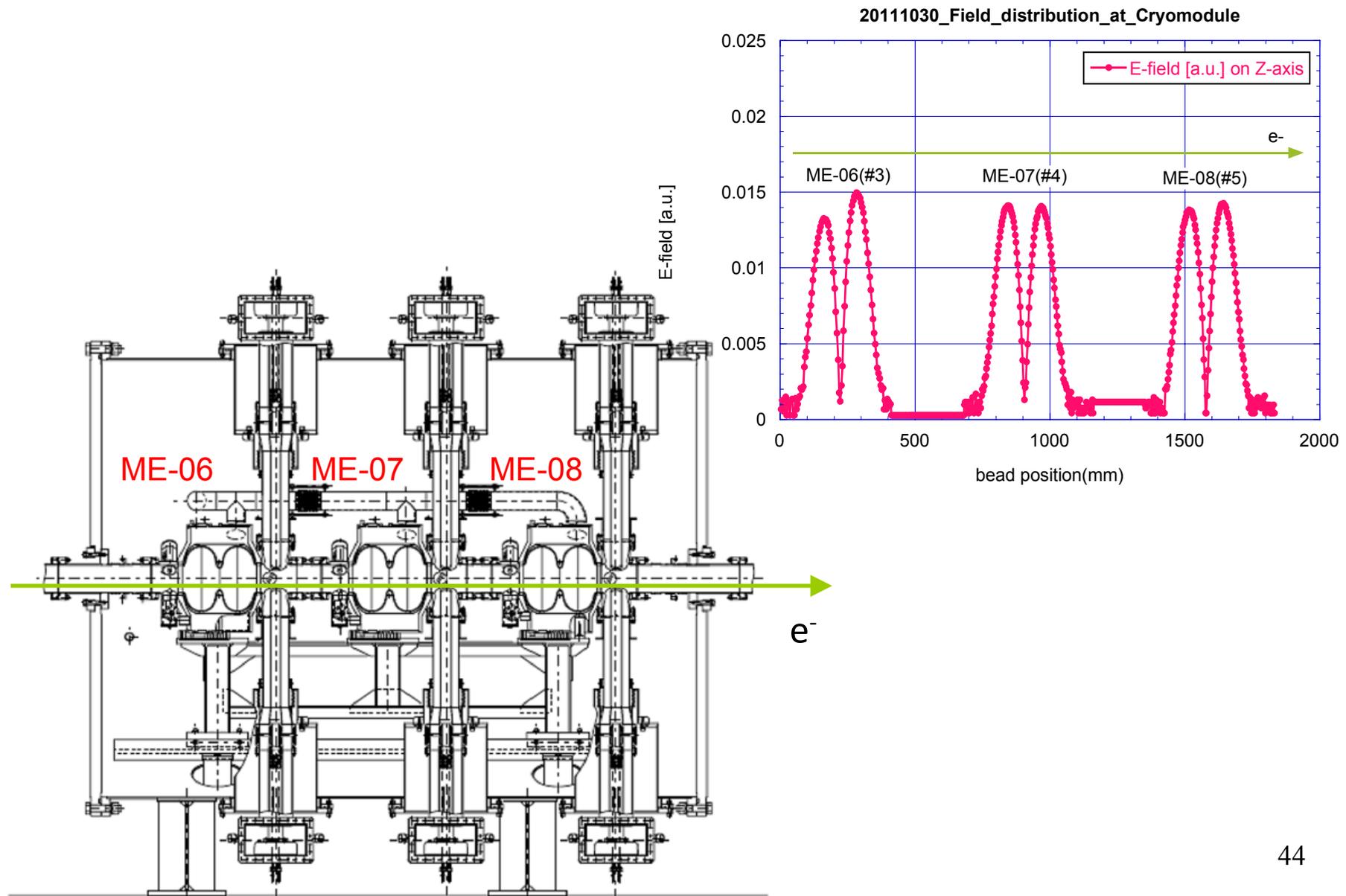
#3: 潰す → フリー の繰り返し。

#4: 伸ばす → フリー の繰り返し

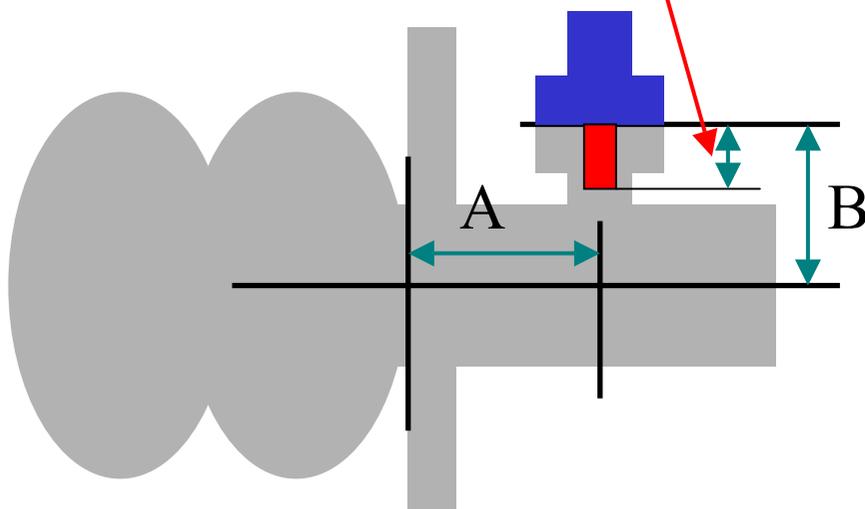
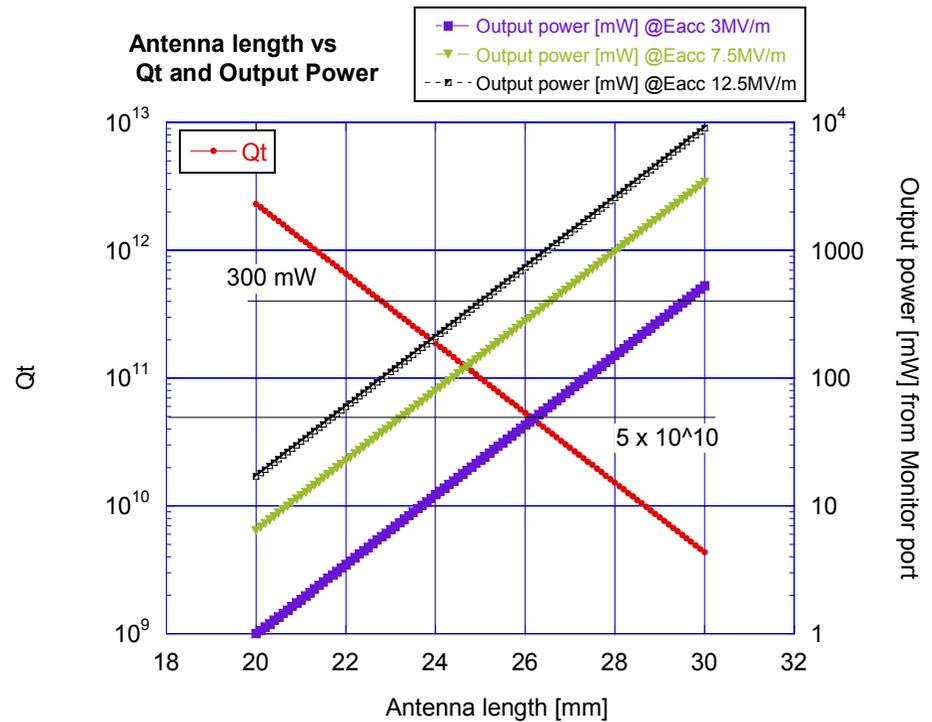
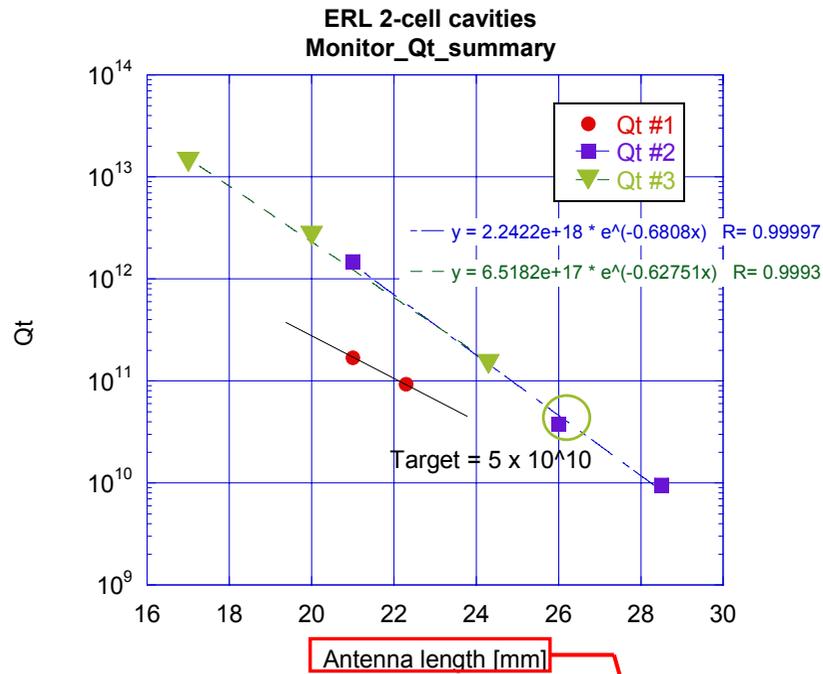
#5: 伸ばす → フリー の繰り返し

厚み
センターセル: 3.5t
エンドセル: 5t

Cavity(7): Field distribution on Beam axis



Cavity(8): Qt measurement for field Monitor and Feed-Back



Target value : 5×10^{10} (26.2 mm)

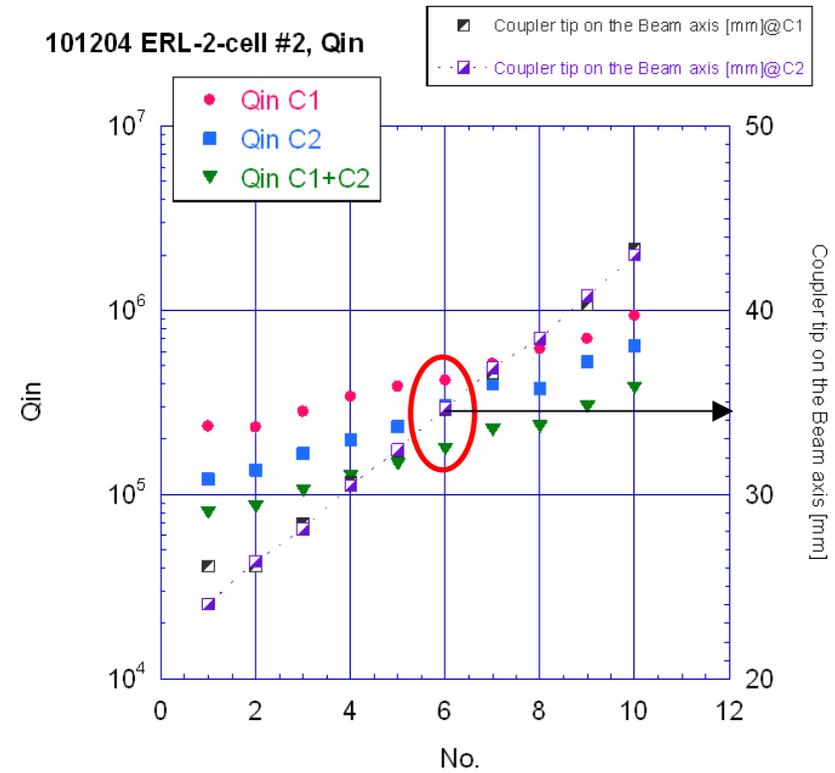
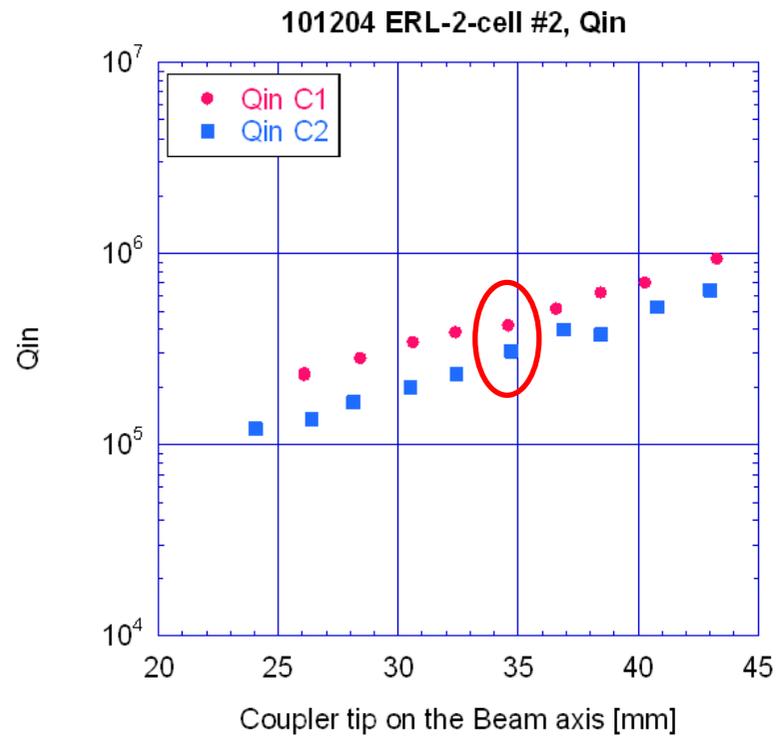
Result: #3: $Qt = 5.8 \times 10^{10}$

#4: $Qt = 5.0 \times 10^{10}$

#5: $Qt = 4.2 \times 10^{10}$

$\pm 0.2 \sim 0.3 \text{mm}$ の範囲内

Cavity(9): Q_{in} measurement by Dummy Input couplers

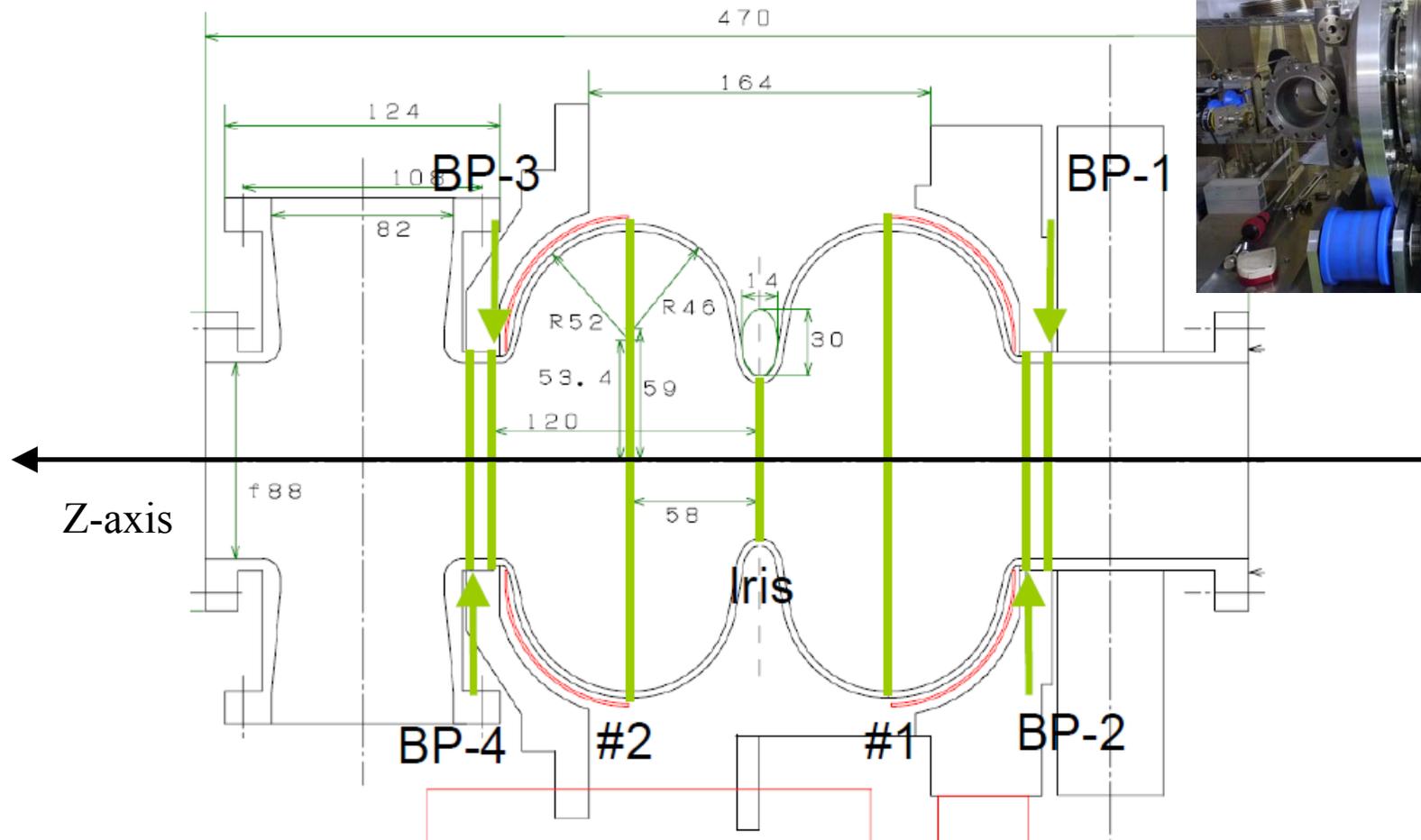


アンテナ先端がビーム軸から
35mmあたりで、目標値に達する。

$$Q_{in} = 3.3 \times 10^5 / \text{Coupler}$$

Cavity(10): Optical Inspection and Repair

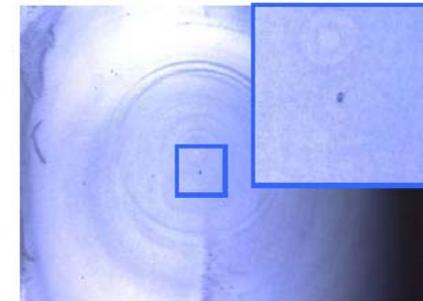
観察箇所



Cavity(11): Optical Inspection and Repair: #3 Cavity

Bulk-EP 105um
 EP-2 (1) 20 um
 EP-2 (2) 30um (Repair)
 Total = 155 um removed

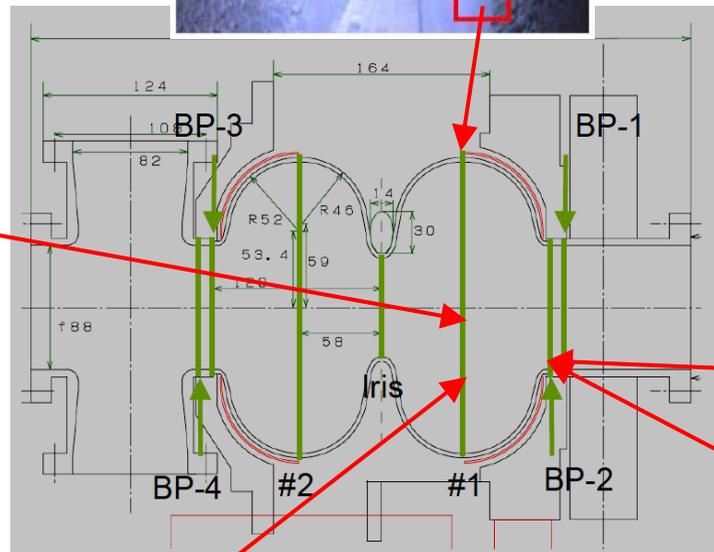
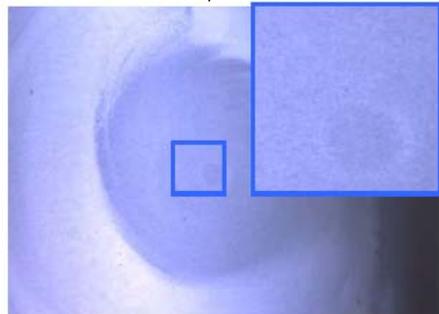
After EP-2 (1)



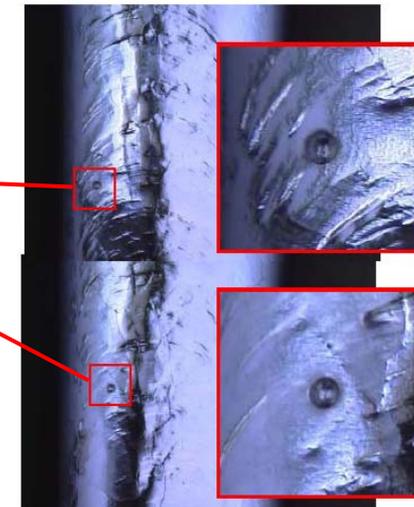
After EP-2 (1)



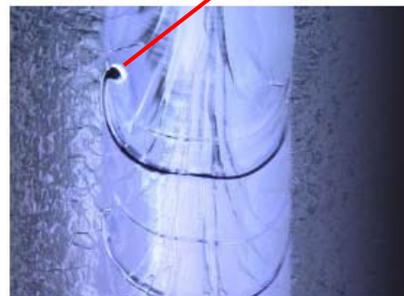
Repair



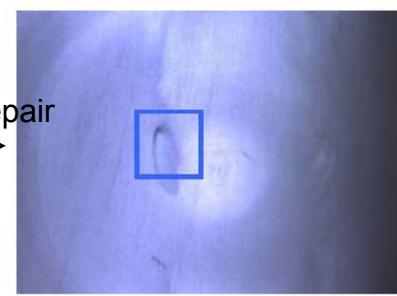
After EP-1 (1)



After EP-2 (1)



Repair

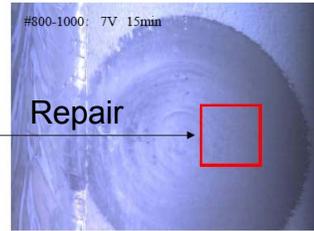
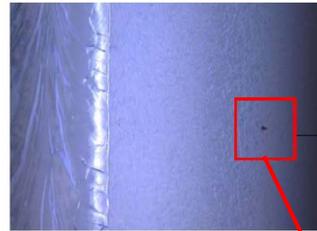


Repair for quench at cell

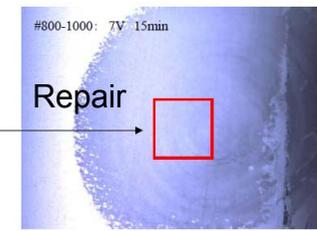
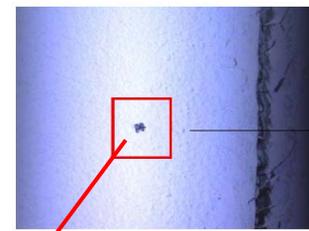
Cavity(12): Optical Inspection and Repair: #4 Cavity

Bulk-EP 105um
 EP (1) 20 um
 EP (2) 30um (Repair)
 EP (3) 20 um (Repair)
 Total = 175 um removed

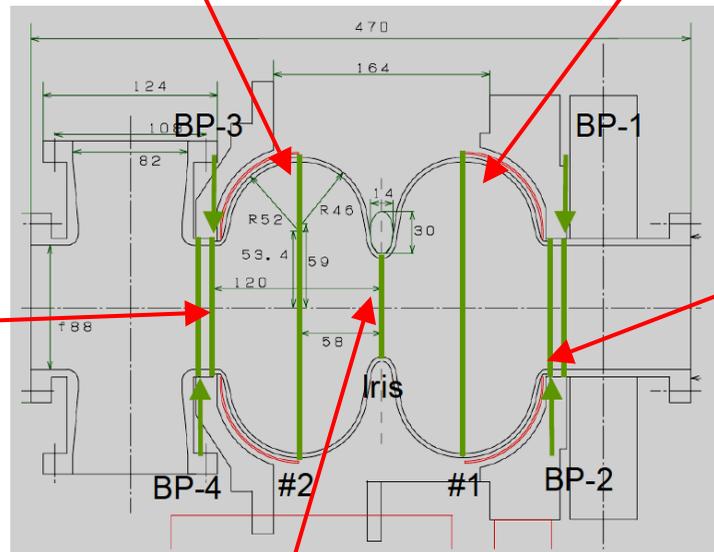
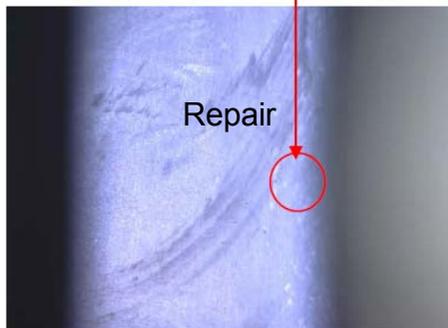
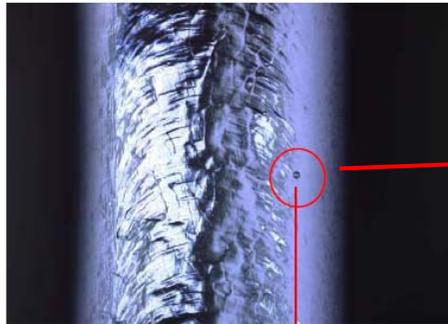
After EP (1)



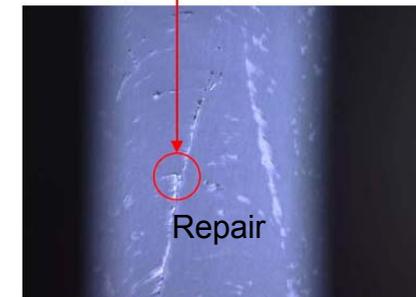
After EP (1)



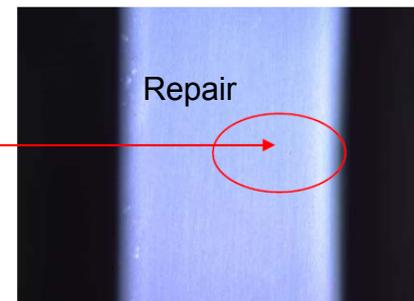
After EP (2)



After EP (2)



After EP (2)



Repair for Heavy F.E.

Cavity(13): Optical Inspection and Repair: #5 Cavity

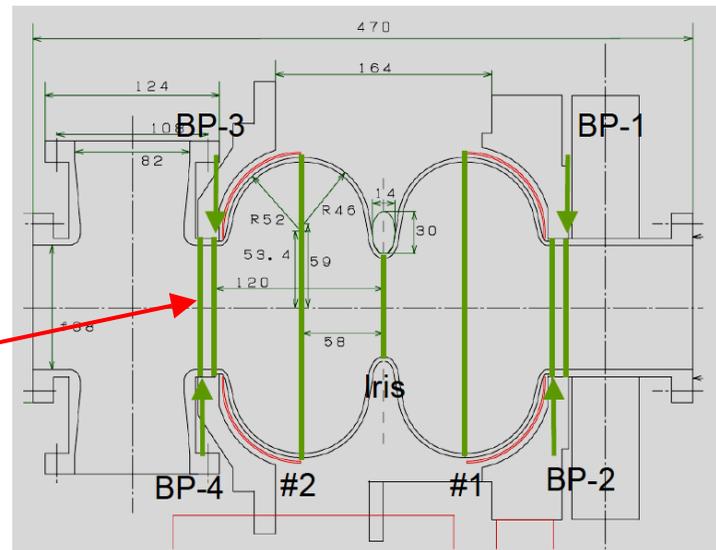
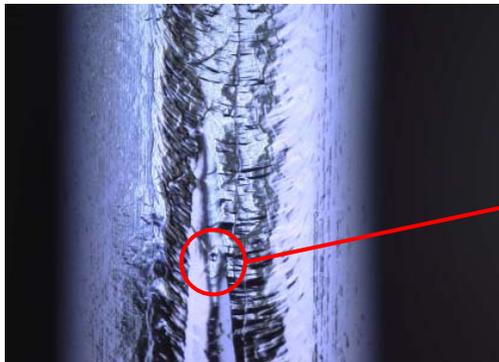
Bulk-EP 105um

EP-2 (1) 20 um

EP-2 (2) 10um

Total = 135 um removed

After EP (1)



No Repair for #5 cavity.

Cavity(14): Process of Surface treatment

Bulk EP: 105 um, 50 mA/cm²、アニール

Final EP: 10 ~ 30 um 37-38 mA/cm²
アイドリング: 30min、3rpm

EP液抜き: 5min、2min、2min N₂ガス加圧
一次水洗: 水封入 40min(振動)、水置換 20min
水平回転 40min 計 100min

物理洗浄: ブラシ → BP、HOM coupler内
FM-20: 50°C、30min、超音波
物理洗浄: ブラシ → BP、HOM coupler内

HPR: 4.5hour、10~15 mm/min、2rpm
4.5hour (SUSフランジあり)

組み立て (Sn鍍金ヘリコを使用。)
ベーキング (100°C、~ 48hour キープ)
※真空パーツの準備、ニオブアンテナの表面処理

温度安定化のため
冷却方法の改善。



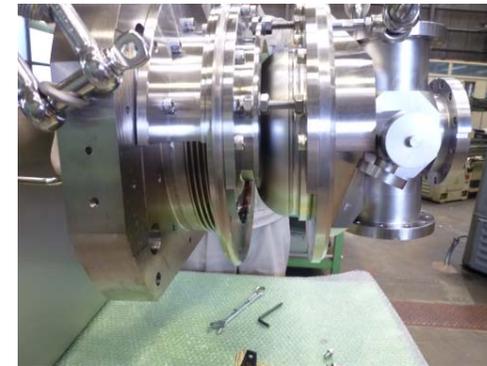
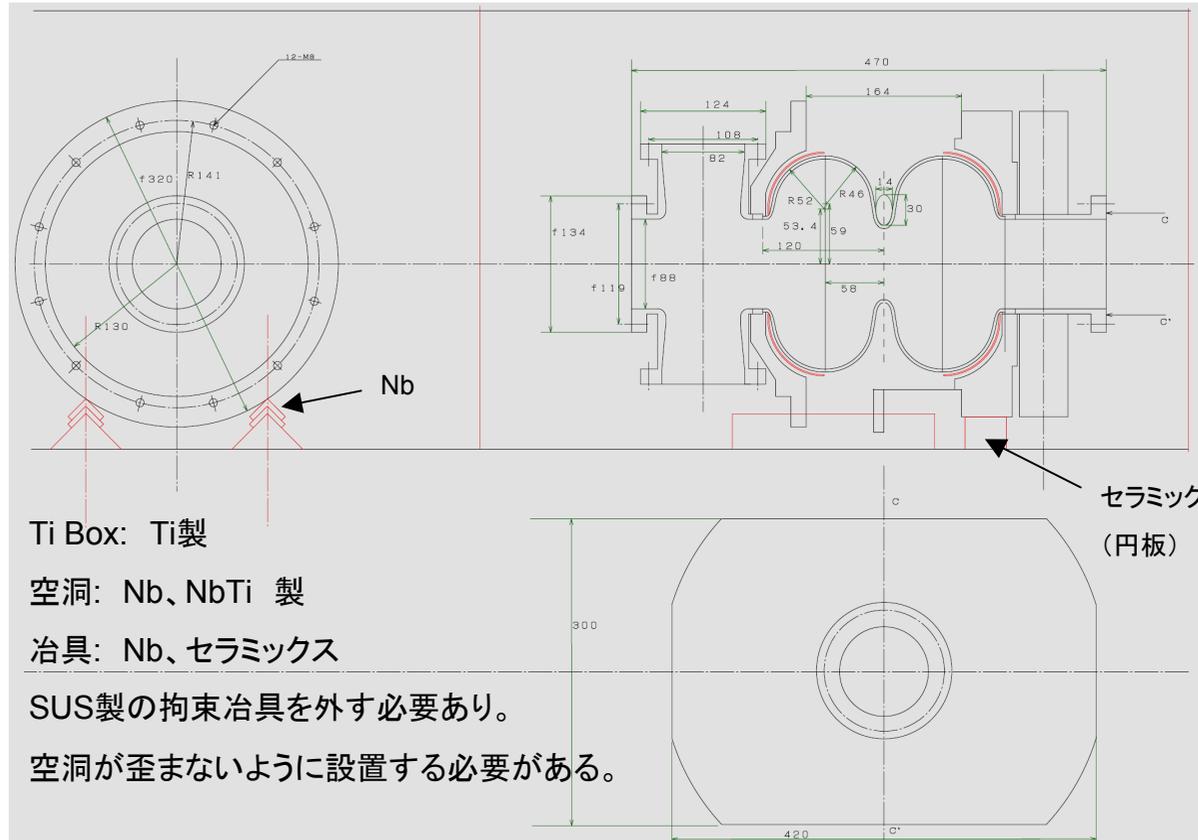
物理洗浄の導入。
表面の汚染物質を確実に除去するため。



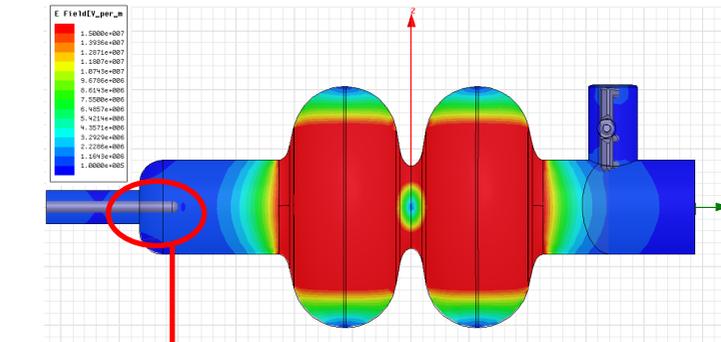
RFに見える部分のクリーン化
コンタミ混入の抑止。



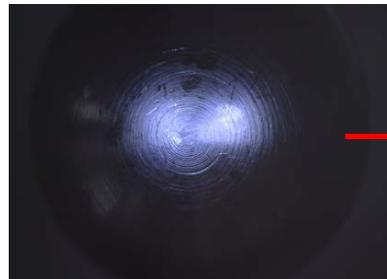
Cavity(15): Anneal



Cavity(16): ニオブアンテナの準備



研磨前

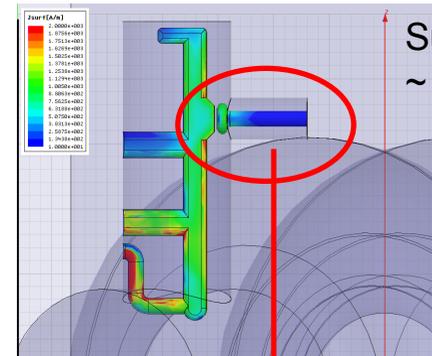


研磨後



旋盤の加工跡がはっきり見える。

この粗さがエミッターにならないか？

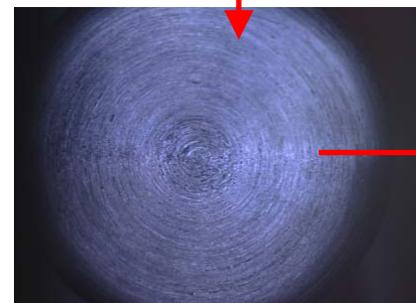


Surface Current on HOM pick-up,
~ 2000A/m at 15 MV/m

$H_{hom} / H_{pk}: 1/45$



研磨前



研磨後



粗さは表皮抵抗の増加につながるので、

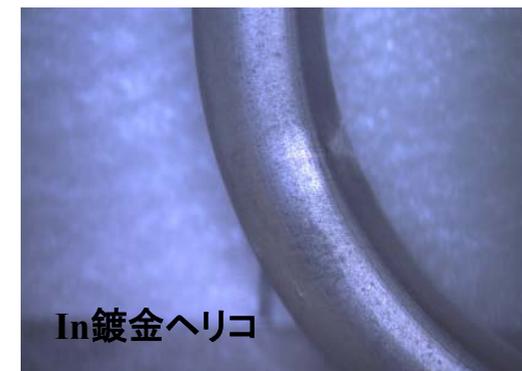
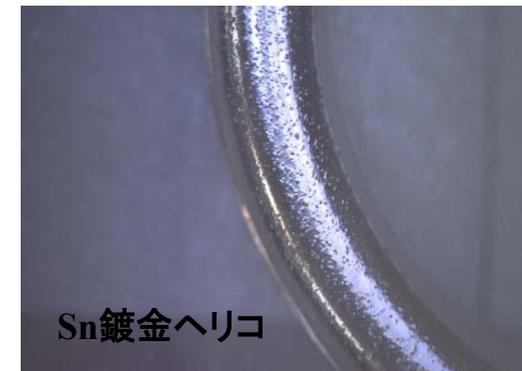
研磨の追加工は必要ではないか？

フィールドエミッションの対策の一つ、HOM pick-upの耐電圧特性改善のために、Nbアンテナの表面粗さを小さくした。その後、CPを行う。

Cavity(17): Vacuum seals

真空シール材

- ・アルミ合金製ヘキサゴン
- ・ヘリコフレックス(Sn鍍金)
- ・ヘリコフレックス(In鍍金)
- ・インジウムシール



Key

- ・微粒子の発生頻度: フランジ面における鍍金の残留
シール材からの汚染
- ・洗浄によるシール材へのダメージ

- ・組み立て工程が失敗した場合、どのような
工程で対応するか? 何処まで戻るか?
真空パーツ付き(シール材あり)でHPRは可能か? →
(ヘキサゴン: 可能、Sn: 実績あり、MHI-08、ERL#3)



Cavity(18): Vacuum seals

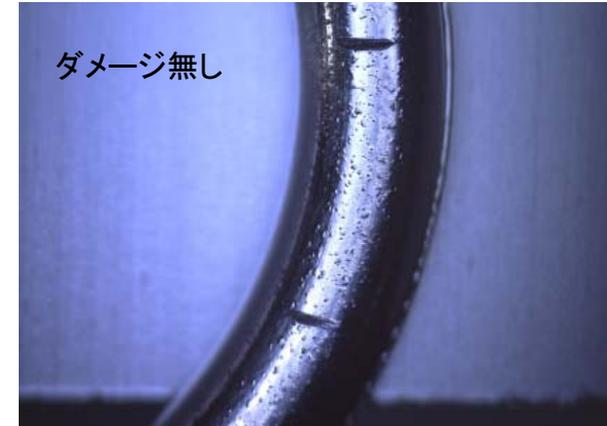
Sn鍍金ヘリコ:新品



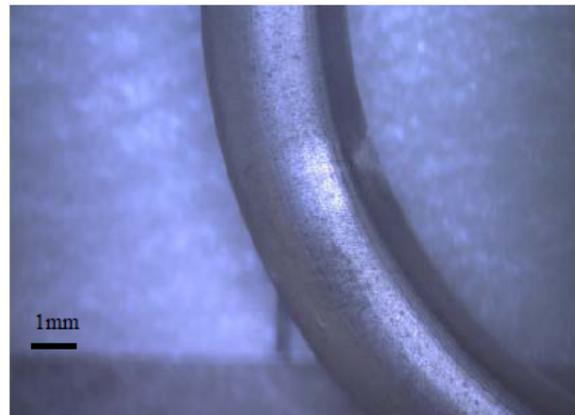
Sn鍍金ヘリコ:使用済み 常温のみ



Sn鍍金ヘリコ 超音波洗浄 60min



In鍍金ヘリコ:新品



In鍍金ヘリコ:使用済み ペーキングあり



In鍍金ヘリコ 超音波洗浄 60min



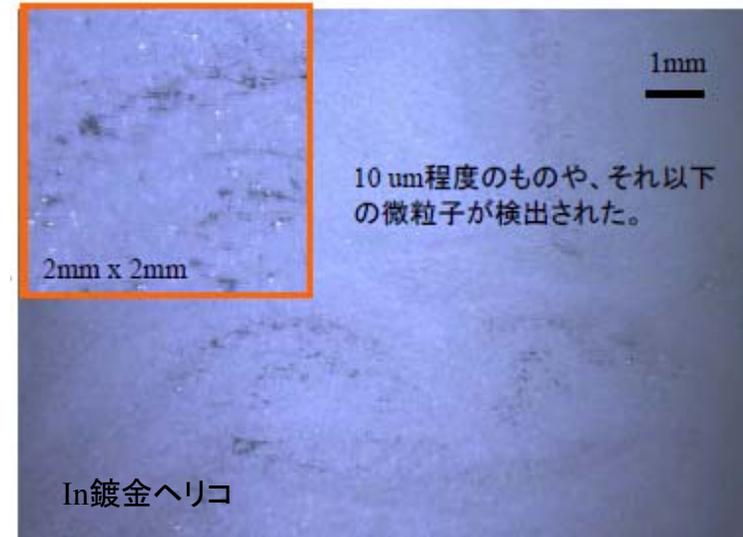
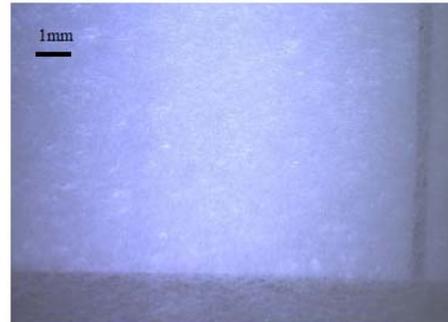
※ヘキサゴンは変化無し。

Cavity(19): Vacuum seals

シール材のクリーニング(ベンコット+エタノール)



ベンコットのみ: プランク



結果

・ヘキサゴン: ダストなし。

・Sn鍍金ヘリコ: ワイピング回数に応じて、黒い粒子状のダストは減少した。最後は、剥がれた鍍金の部分? が支配的となった。

・In鍍金ヘリコ: ワイピングを4回やったが、黒い粒子状のダストは無くならなかった。Inは軟らかいのでベンコットで擦ると削れるから?



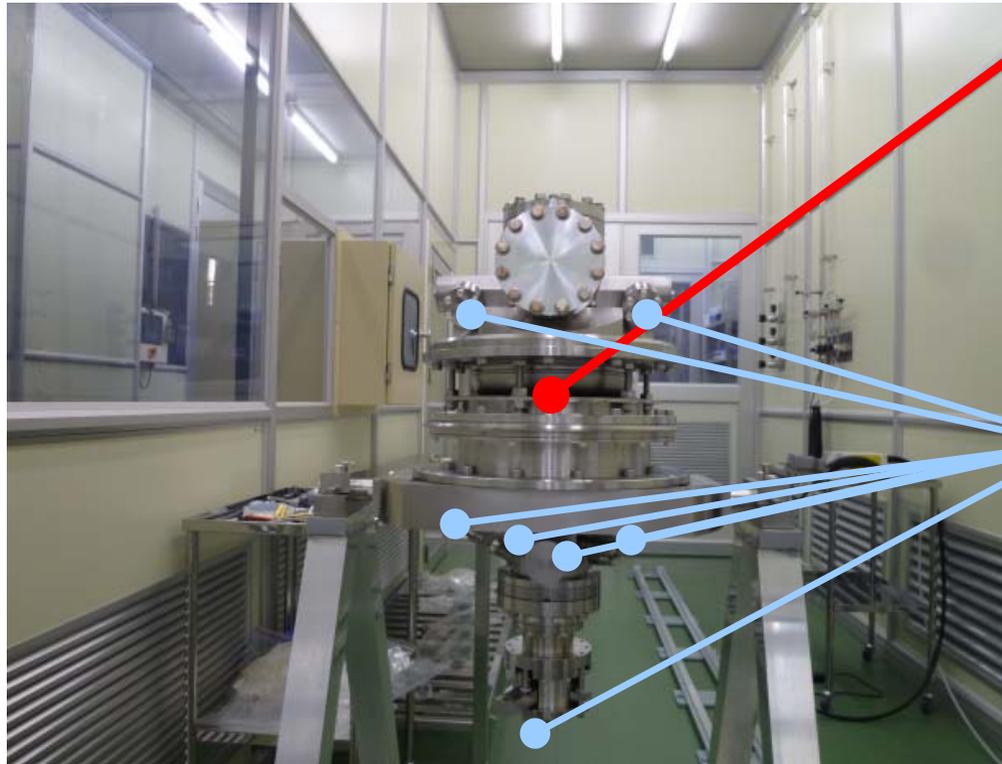
Cavity(20): Cavity Assembly

Key

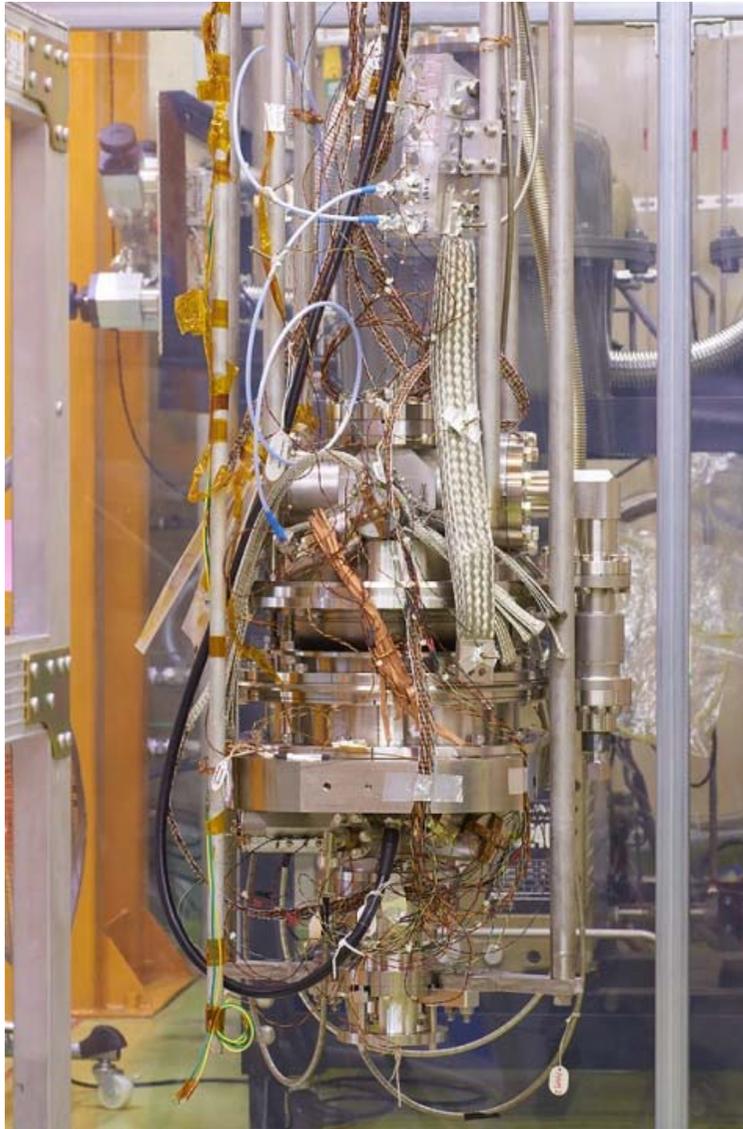
: 空洞内部の表面状態
(EP、リンス、HPR、作業環境・手順)

: 真空シール(微粒子の発生)

: ニオブアンテナの表面状態
入力(1)、HOM用(5)、Monitor(1)
(機械研磨、CP、洗浄)



Cavity(21): from Vertical test to Pressure test for He jacket

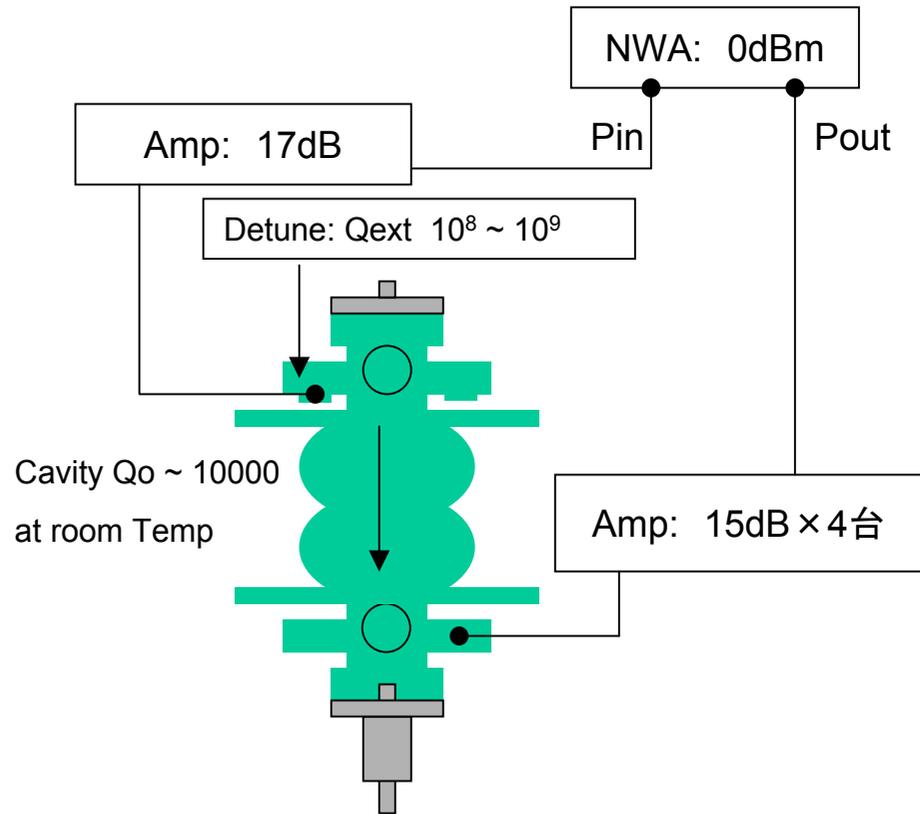


- ・Cavity をVTスタンドへ移動した後、
 - (1) 排気系の接続
 - (2) 加速モードに対するHOM couplerのtuning
 - (3) サーマルアンカーの取り付け
 - (4) 温度センサー、RFケーブル などの取り付け
 - (5) クライオスタットへ移動
 - (6) 冷却 常温 → 4K
 - (7) 冷却 4K → 2K :Rres、Q value
 - (8) Processing (2K High field)
 - (9) He level vs CWで維持可能な電界強度 ●
 - 発熱箇所の同定 など
 - (10) 昇温、真空封じでの切り離し
 - (11) Ar ガスパージ、輸送用フランジへ付け替え
 - (12) ヘリウムジャケット溶接、耐圧試験
 - (13) 連結化、モジュールアセンブリ ←

性能劣化なしでモジュール化できるか？
(ボルト、シール材からのダスト)

Cavity(21): HOM coupler tuning for VT

(1) 下側のHOM couplerのtuning



Target Q_{ext} value for HOM coupler $> 2 \times 10^{11}$

$Q_{hom} = 5 \times 10^{12}$, $S_{21} \sim -95$ dB

$Q_t = 5 \times 10^{10}$, $P_{out} (S_{21}) \sim -75$ dB

(2) 上側のHOM couplerのtuning

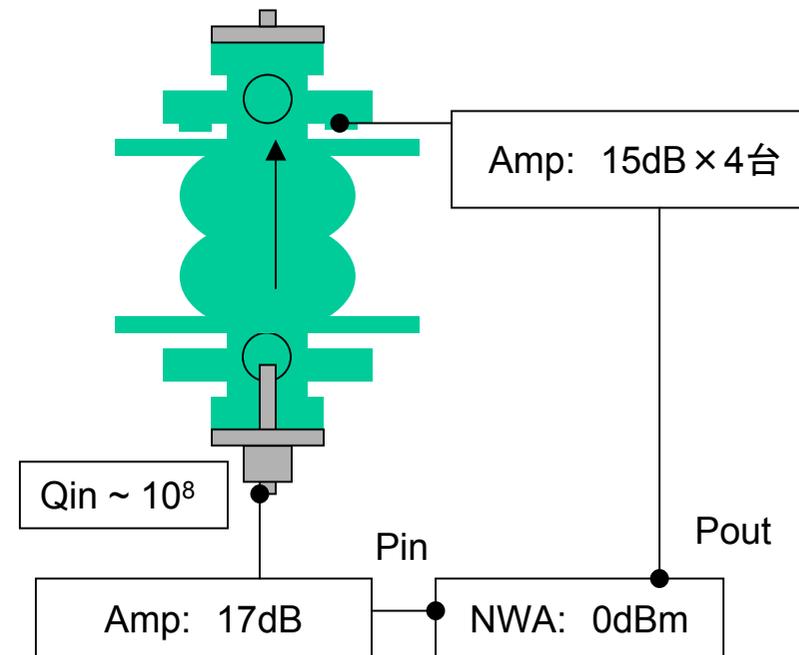


$Q_{hom} = 5 \times 10^{12}$,

$S_{21} \sim -90$ dB

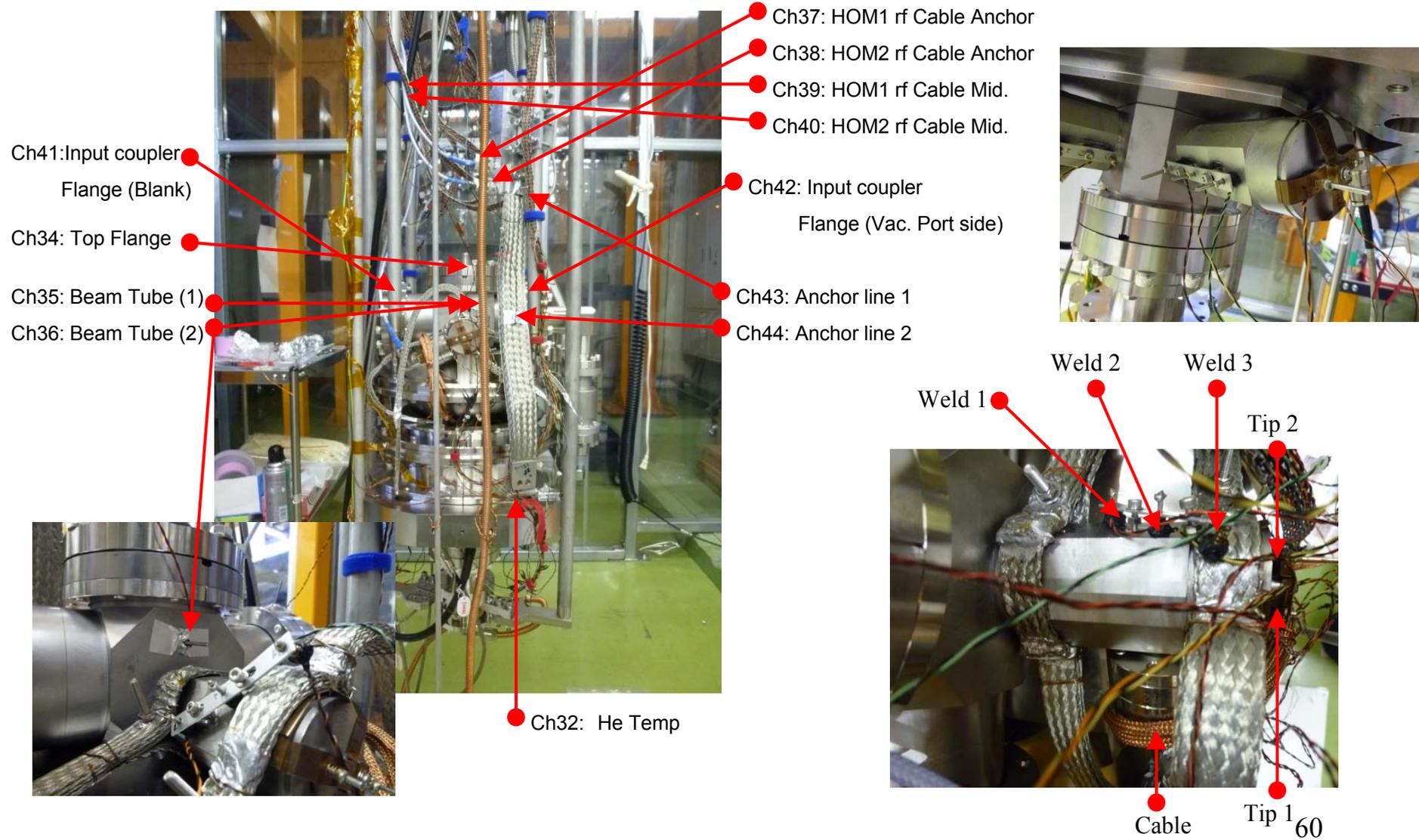
$Q_{probe} = 5 \times 10^{11}$,

$P_{out} (S_{21}) \sim -80$ dB

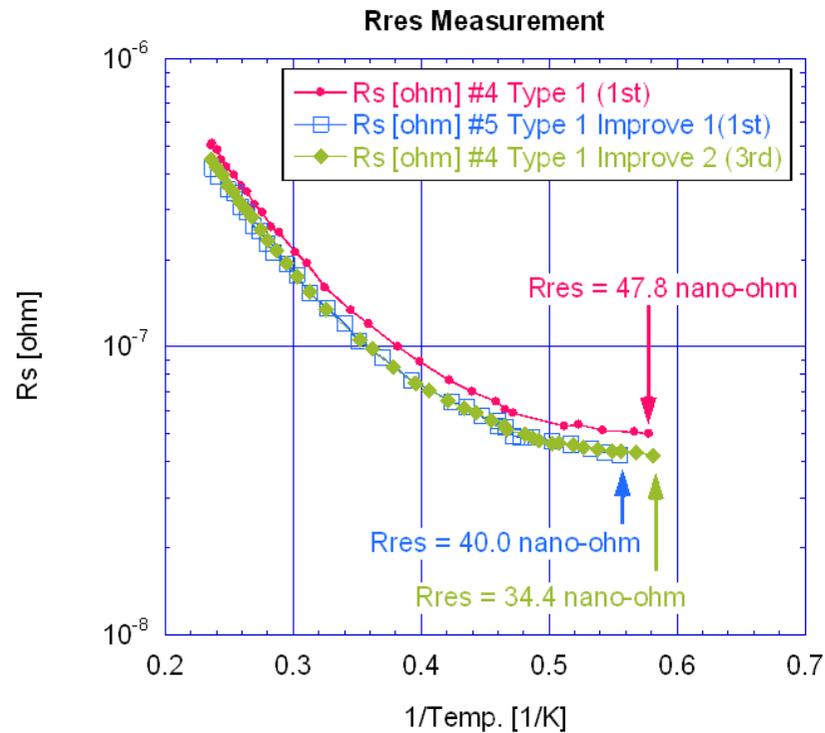


加速モードに対して、常温・真空中で最小出力となるように調整する。

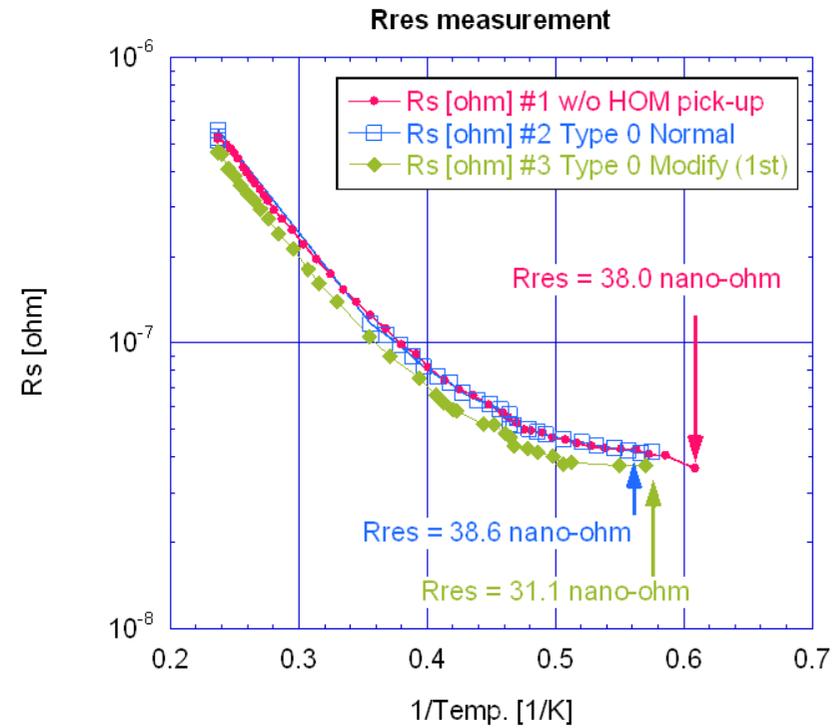
Cavity(22): Thermal anchor and Thermo-sensors



Cavity(23): Cool down and Rres (1)

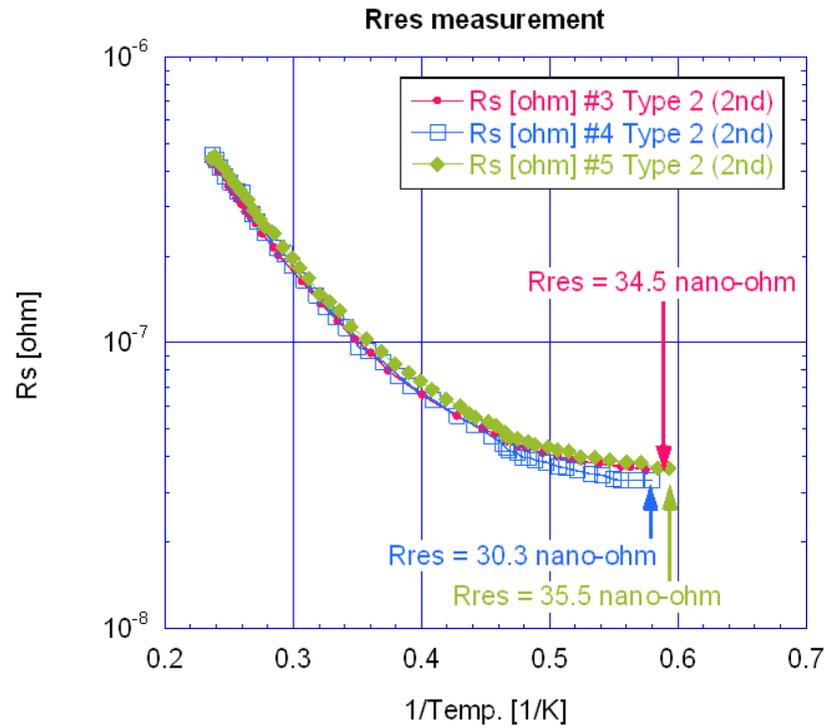


HOM pick-upのニオブアンテナの表面処理が異なる。
CPの面積、時間の変更。ロウ材の除去により改善した。



表面処理工程の変更(主にリンス工程)がある。
HOM pick-up: パーツごとの表面処理が可能。

Cavity(24): Cool down and Rres (2)



Type 1の失敗から学習したことを生かした。

(CPの面積、時間、ロウ材の除去)

#3 2ndでは、組み立て中に排気系の操作を誤り、リークさせた。真空パーツ付きでHPR、再組み立てを行った空洞。

Test	フィードスルー	Rres [nΩ] (field)
#1 cavity 04/Feb/2010	Without	38.0 (3.63)
#2 cavity 14/Oct/2010	Type 0 (normal)	38.6 (3.56)
#3 cavity 1st June/08/2011	Type 0 (modify)	31.1 (3.04)
#4 cavity 1st (will install CM) 20/Sep/2011	Type 1 (1 st test.)	47.8 (3.16)
#5 cavity 1st (will install CM) 04/Oct/2011	Type 1 (表面処理改善)	40.0 (3.13)
#3 cavity 2 nd 01/Nov/2011	Type 2 (ロウ材部の除去など)	34.5 (1.43)
#4 cavity 2 nd 15/Nov/2011	Type 2	30.3 (1.65)
#5 cavity 2 nd 29/Nov/2011	Type 2	35.5 (0.95)
#4 cavity 4th 13/Dec/2011	Type 1 (ロウ材部の除去など)	34.4 (1.57)

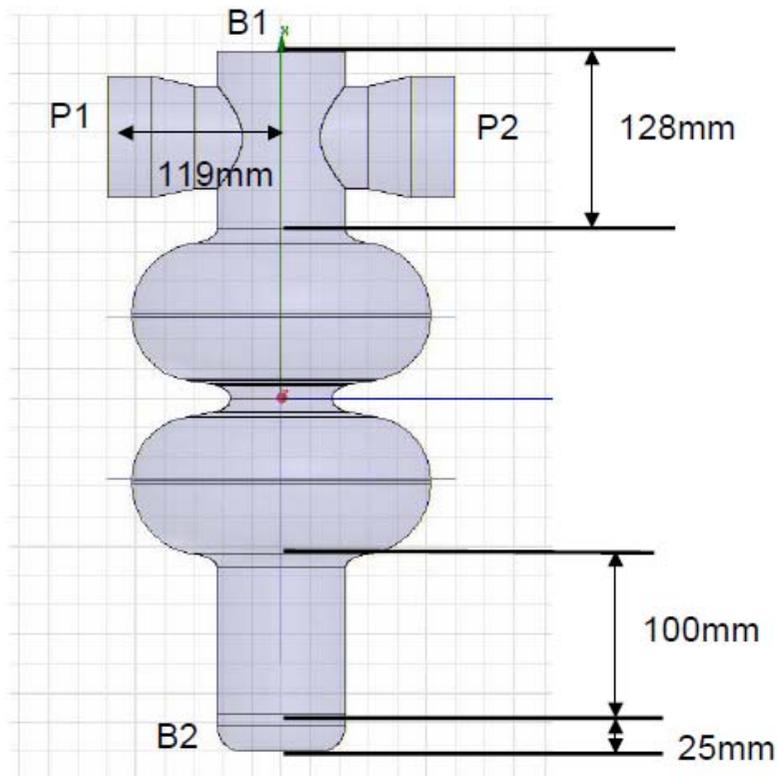
Cavity(25): Estimation of Qo value in case of VT setup

HFSS (固有値モード)を用いて、たて測定の際取り付けるSUS製ブランクフランジのQo値への影響を計算した。

SUS at 2K → 2.22×10^6 S/m

常温 → 1.1×10^6 S/m

ニオブ at 2K → 3.34×10^{19} S/m



評価方法

・各ポートの境界面をSUSに変えたときの、Qoの変化から、各SUSフランジによるRresの値を計算する。

※ $R_s = G/Q$: $G=287.8 \Omega$ 、 Q_o =計算値

$$R_{res}(P1) = 0.95 \text{ n}\Omega$$

$$R_{res}(P2) = 0.95 \text{ n}\Omega$$

$$R_{res}(B1) = 10.35 \text{ n}\Omega$$

$$R_{res}(B2) = 10.66 \text{ n}\Omega \text{ (キャップ形状)}$$

→B2端板形状のとき $R_{res}(B2)= 31.56 \text{ n}\Omega$

:キャップ形状とすることで20.9 nΩ小さくなる。

※すべてニオブのとき:

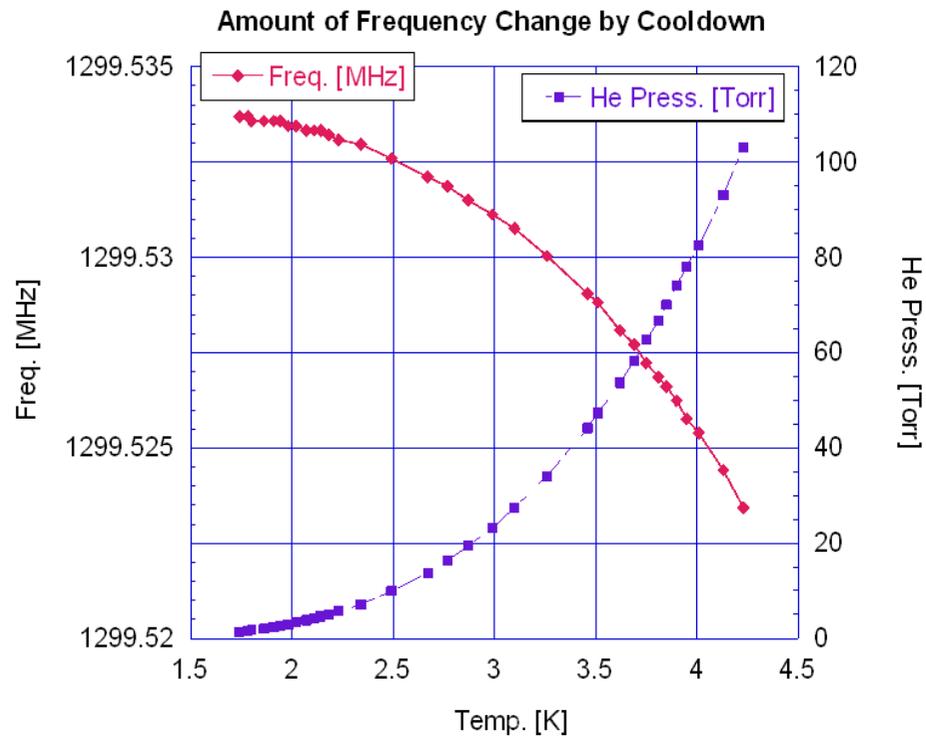
$$Q_o=2.05 \times 10^{10} \text{ (Rres=14.04 n}\Omega \text{)}$$

※すべてのフランジがSUSのとき:

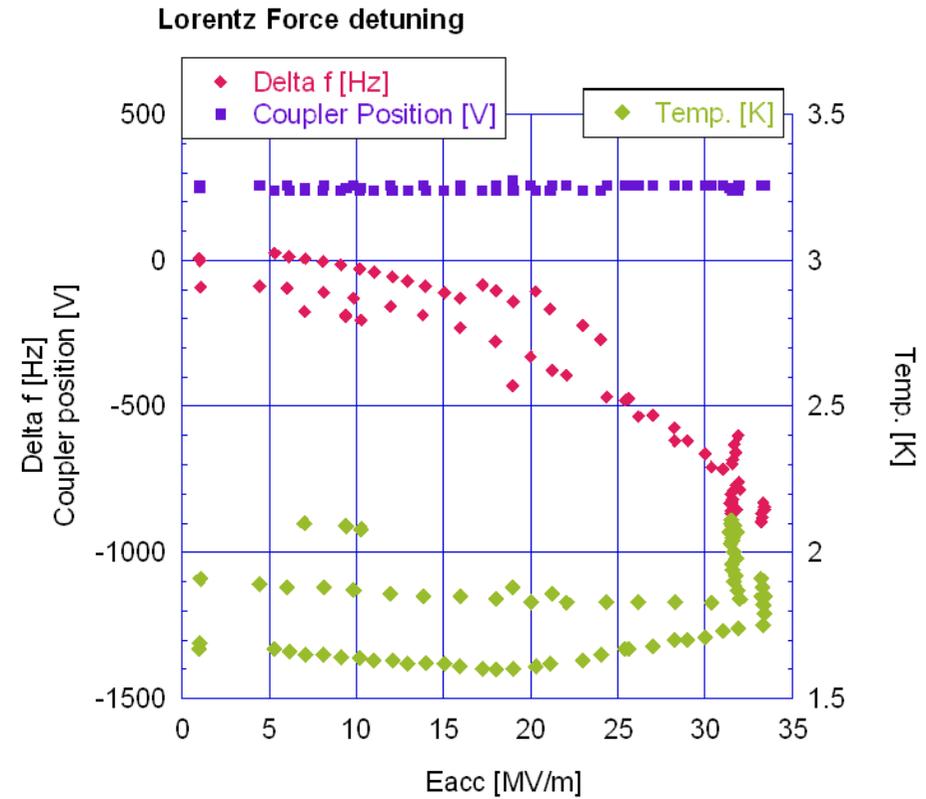
$$Q_o=7.73 \times 10^9 \text{ (Rres=37.21 n}\Omega \text{)}$$

$$37.21-14.04 = \underline{23.17 \text{ n}\Omega \text{ (SUSフランジのロス)}}$$

Cavity(26): Amount of Frequency Change by cool down and Accelerating field

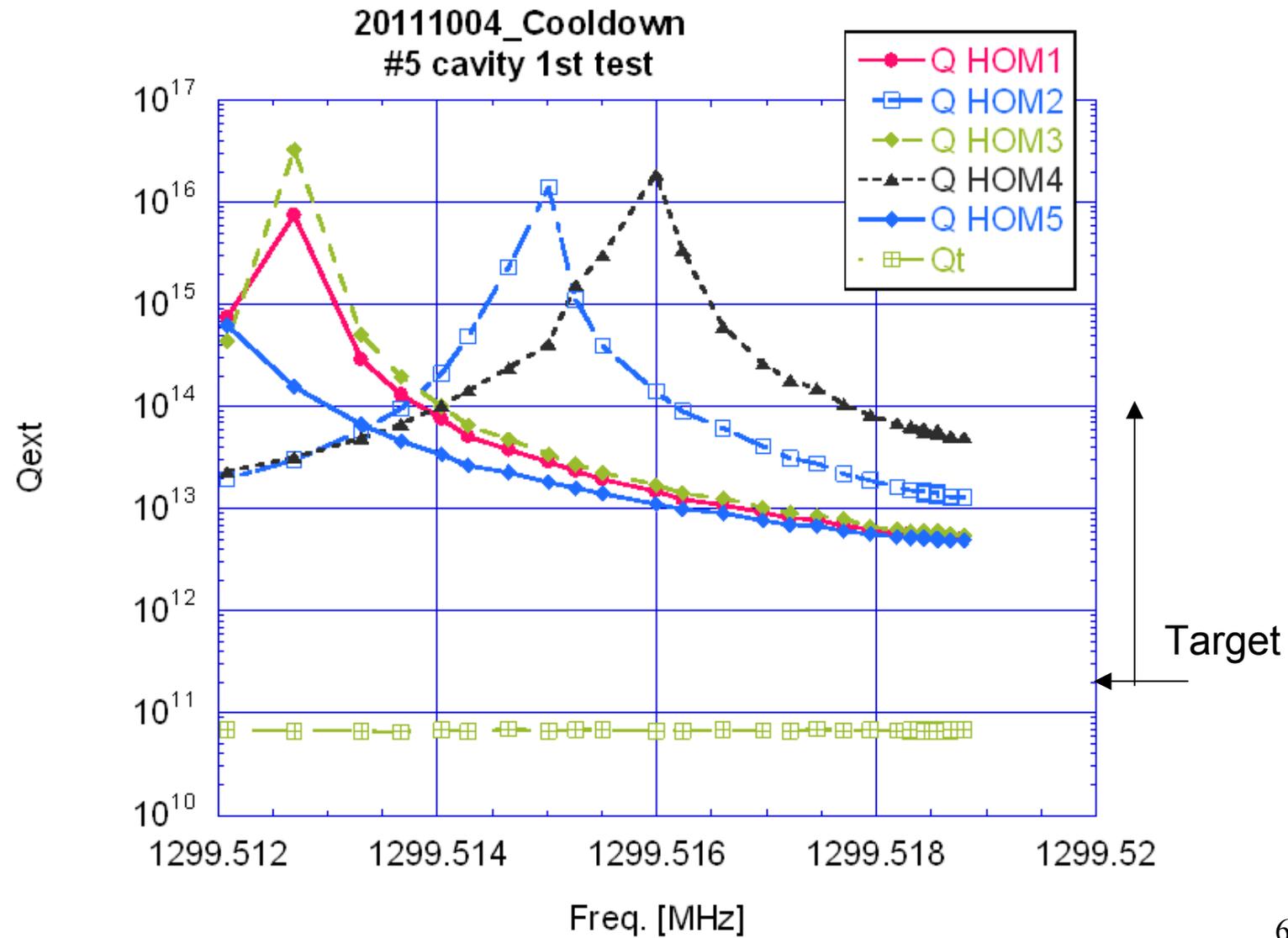


#3 cavity 2nd test
 +10.23 kHz by Cool down

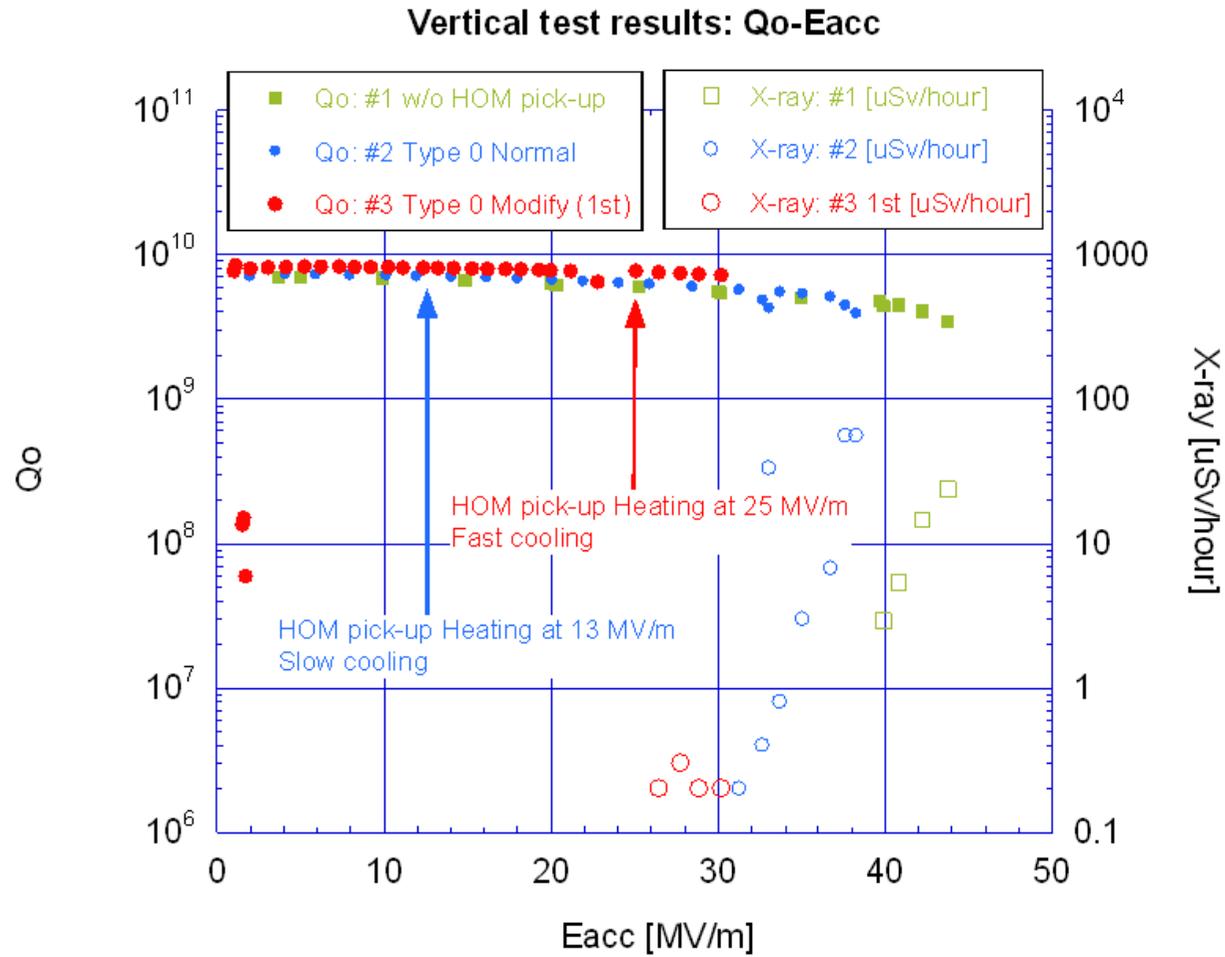


#3 cavity 2nd test
 $\cong -27 \text{ Hz} / (\text{MV/m})$

Cavity(27): Qext of HOM couplers for accelerating mode



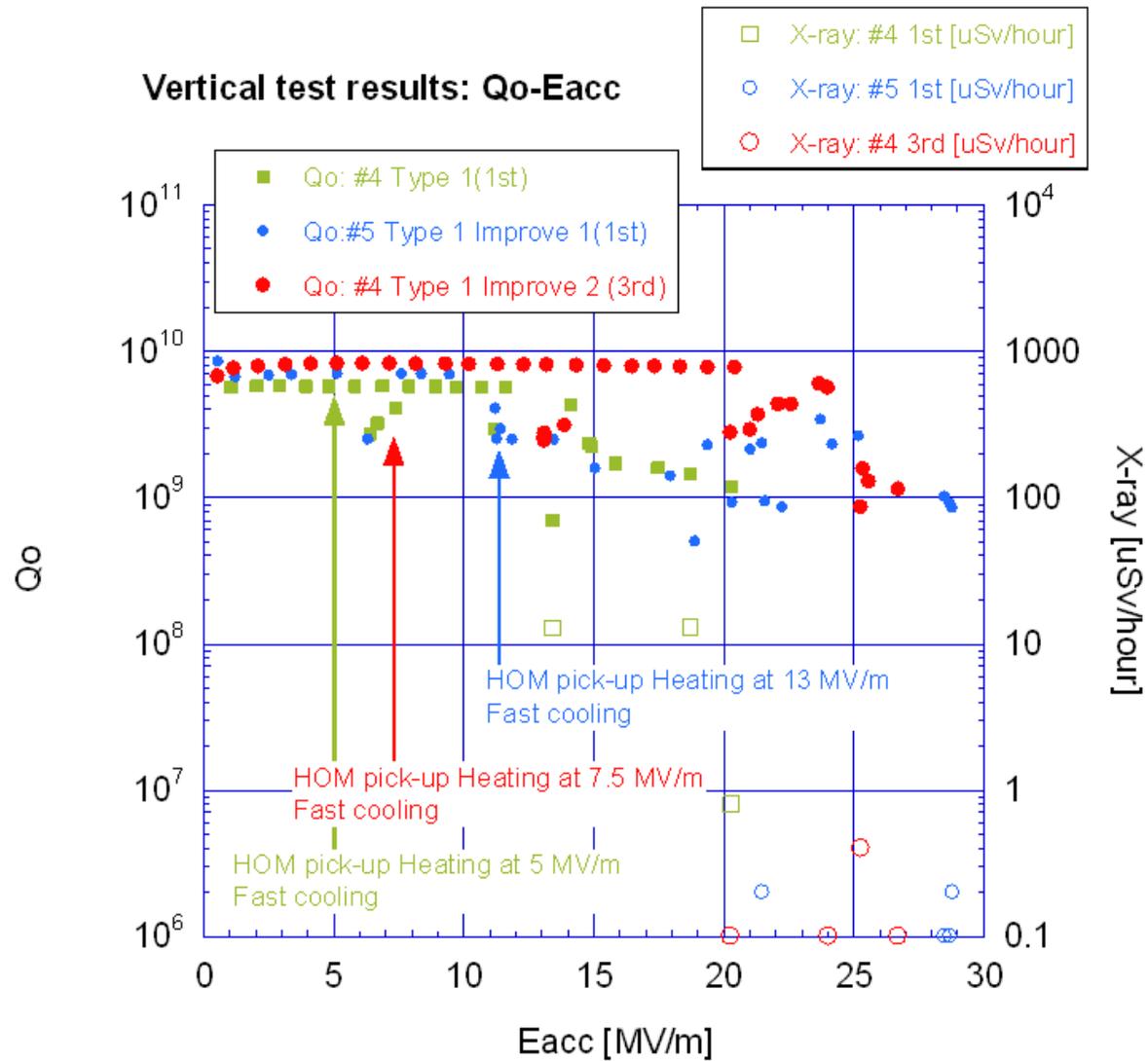
Cavity(28): Qo-Eacc (Type 0)



Cause of limitation:

- #1: Power limit
- #2: HOM pick-up heating
- #3: HOM pick-up heating
(No heating at Max field in He)
- Good result

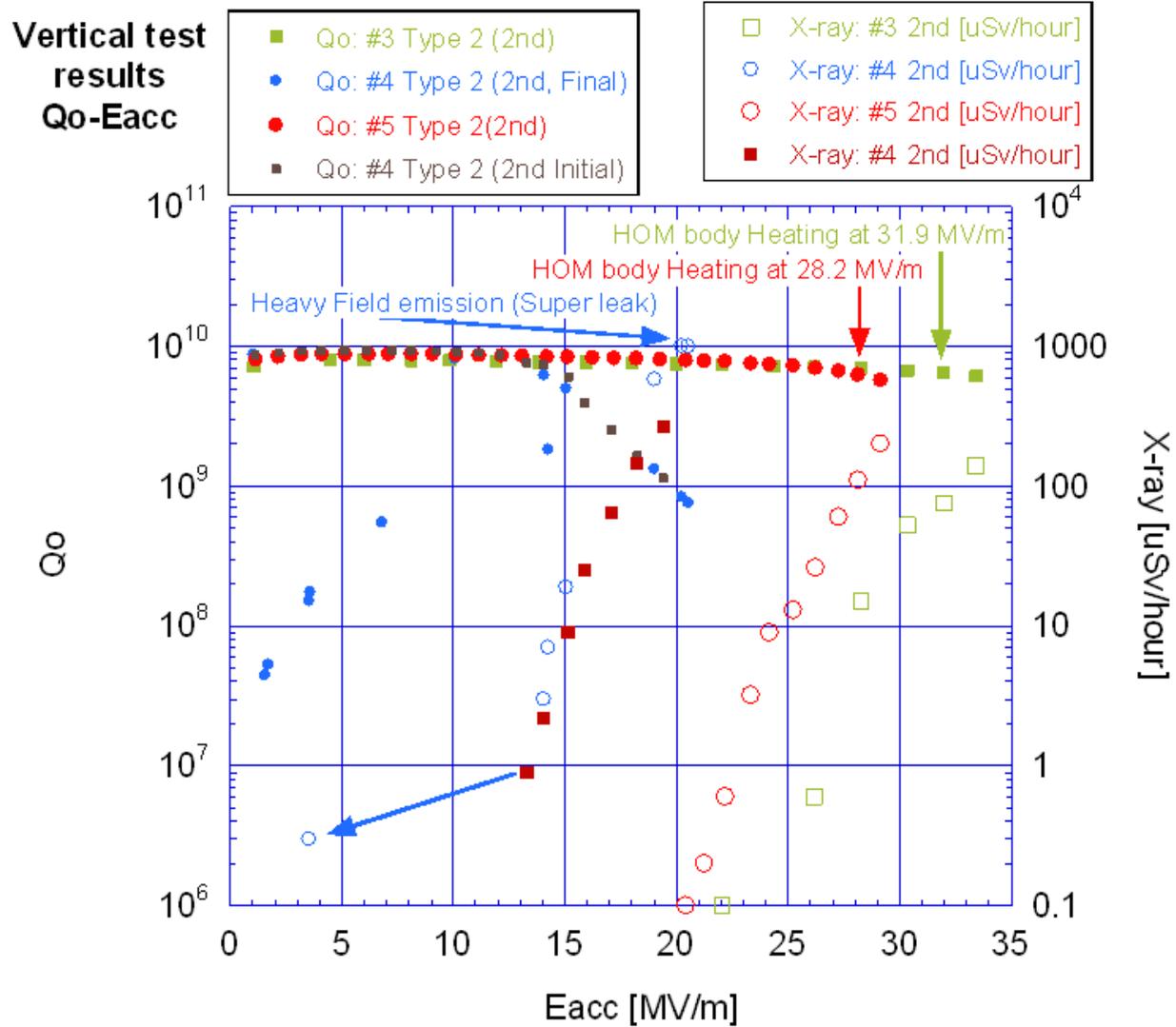
Cavity(29): Qo-Eacc (Type 1)



Cause of limitation:

- #4 1st : HOM pick-up heating
- #5 1st : HOM pick-up heating
- #4 3rd : HOM pick-up heating

Cavity(30): Qo-Eacc (Type 2)



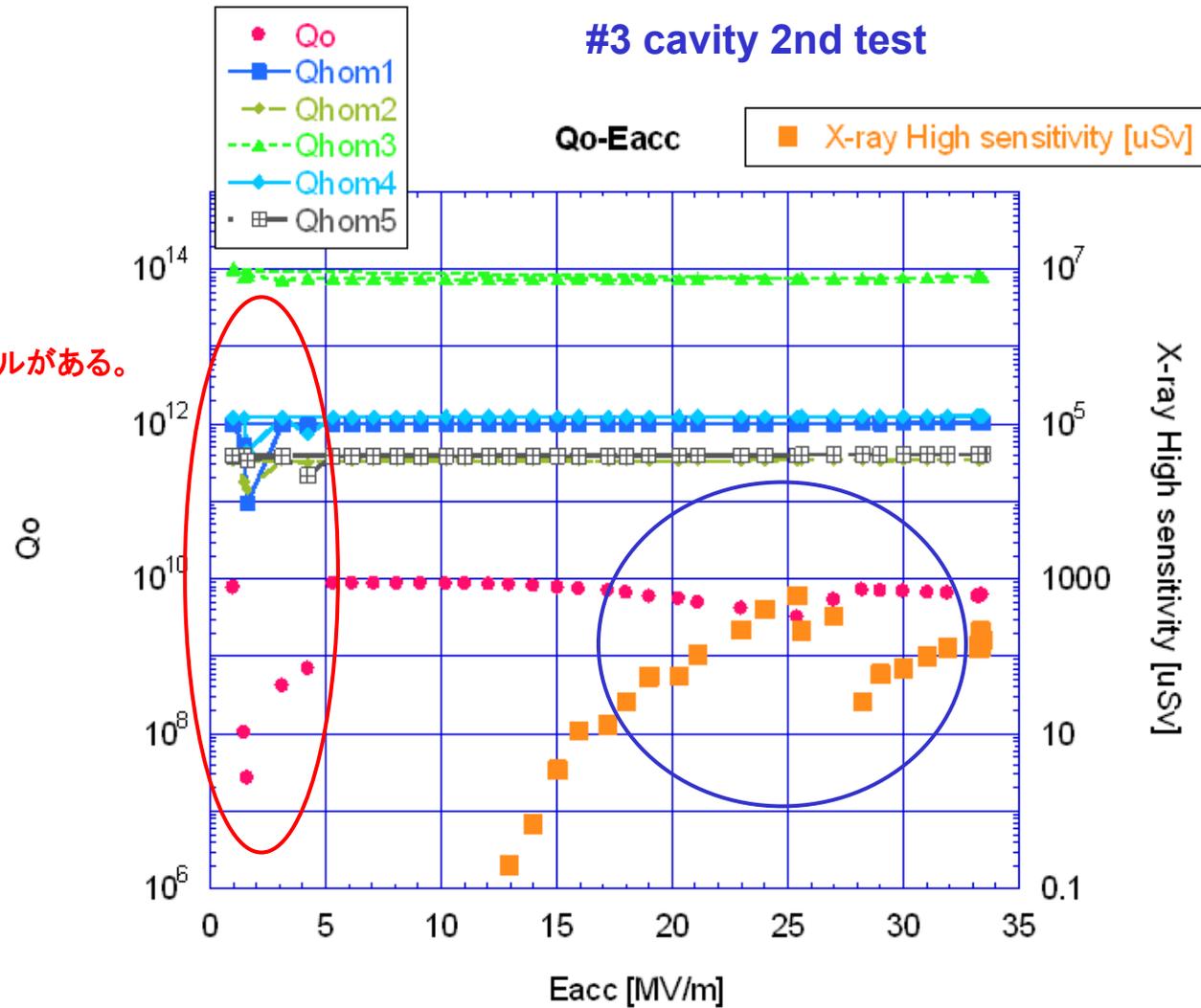
Cause of limitation:

- #3 2nd : HOM body heating
Very good result
- #4 2nd : Heavy field emission with Burst (13 -> 3.5). due to defects
- #5 2nd : HOM body heating
Very good result

Type2: Very Fast Cooling

Cavity(31): Problem of HOM coupler (Multi-pacting at Low gradient)

HOM coupler内:
 ~ 2MV/mにマルチパクターレベルがある。
 ~ 30min程度でプロセスされる。
 Qextの変化から発熱をしている
 Couplerを同定できる。

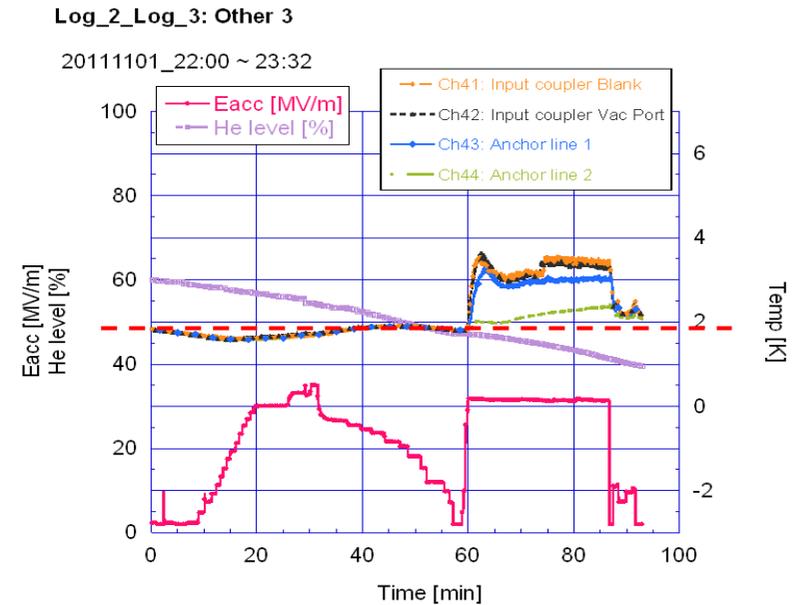
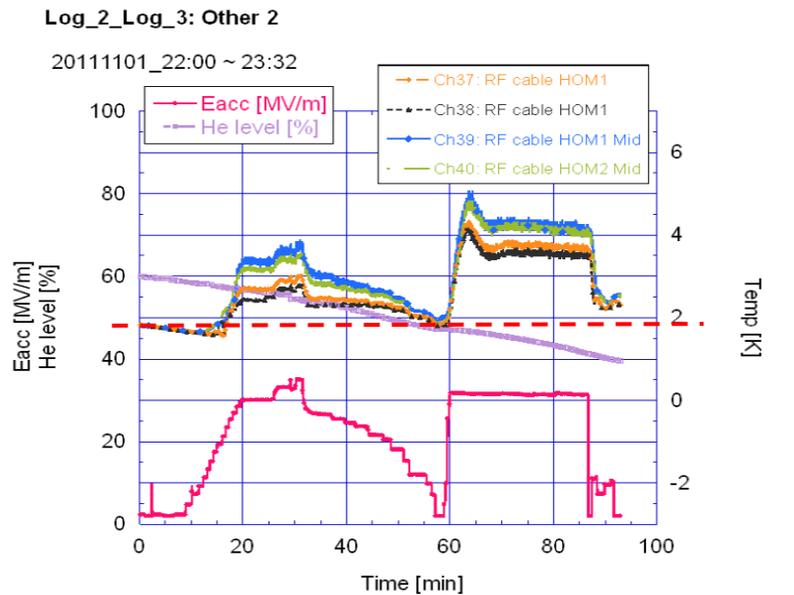
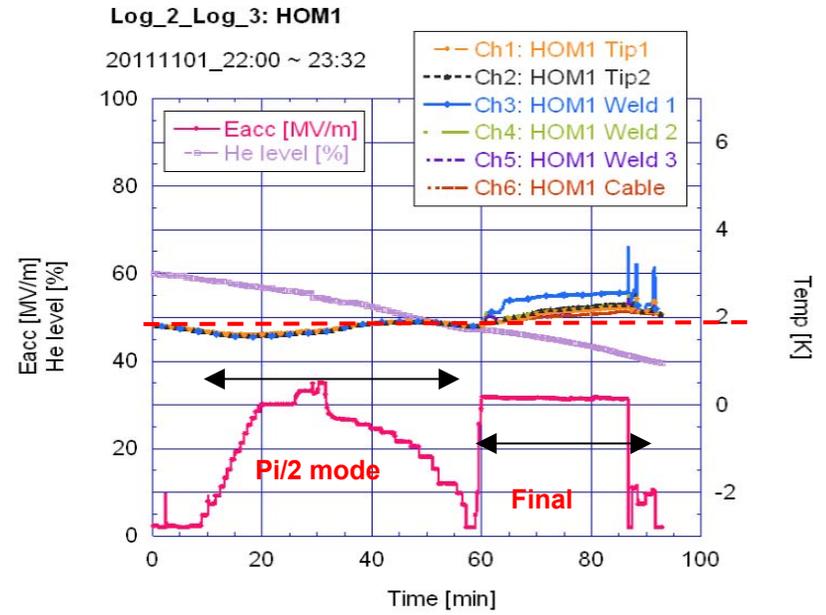
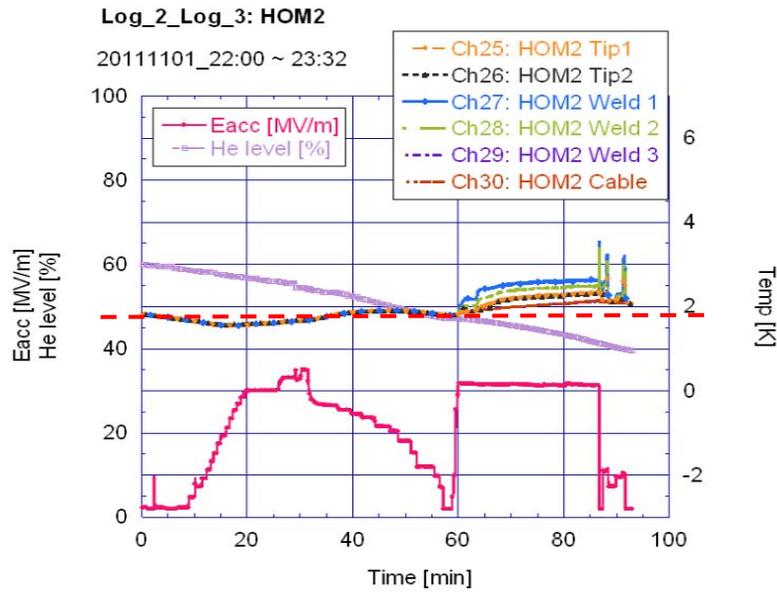


HOM1、HOM2、HOM4、HOM5でQextの変化があった。HOM pick-upの発熱によりQoが低下したと思われる。

High fieldではQhomに変化は見られなかった。20MV/m付近で見られるQoに低下はフィールドエミッションによるものである。⁶⁹

Cavity(32): Trend (#3 cavity 2nd test)

HOM couplerが液面から出るレベル - - - -



Cavity(33): Passband Measurement

パスバンド($\pi/2$)に対するHOM couplerのQext

ノッチフィルターのバンド幅の関係から、

$$Q_{ext} = 10^9 \sim 10^{10}$$

これを利用すると、

加速モードの表面電流負荷(耐電圧特性)

+ 透過電力(耐電力特性) の評価が出来る。

測定結果

Feedthrough	パスバンド (He中)
Type 0 Normal	11 MV/m, 3 [W]
Type 0 Modify	20 MV/m, 8 [W]
Type 2	25 MV/m, 13 [W]

以下、Qextと透過電力の比較

	Trans (Qt)	HOM1	HOM2	HOM3	HOM4	HOM5	Other
Pi-mode at 30MV/m	3.8 x 10¹¹ 0.623 [W]	7.2 x 10¹¹ 0.318 [W]	1.7 x 10¹³ 0.013 [W]	5.8 x 10¹³ 0.004 [W]	2.2 x 10¹² 0.010 [W]	3.8 x 10¹⁴ 0.0005 [W]	1299.956 MHz
Pi/2-mode at 20MV/m	2.5x 10¹¹ 0.425 [W]	1.2 x 10¹⁰ 8.21 [W]	2.9 x 10¹⁰ 3.57 [W]	1.9 x 10¹⁰ 5.57 [W]	2.1 x 10¹⁰ 4.88 [W]	1.5 x 10¹⁰ 7.08 [W]	1286.963 MHz

Cavity(34): Summary of VT data

Test	Eacc [MV/m] 維持可能な電界強度		フィードスルー	瞬間最大電界強度 [MV/m] (制限の理由)	Rres [nΩ] (field)
	ヘリウム中	ヘリウム外			
#1 cavity 04/Feb/2010	-	-	Without	43.7 (power limit) F.E onset (30)	38.0 (3.63)
#2 cavity 14/Oct/2010	18	13 (HOM pick-up) Slow cooling	Type 0 (normal)	42.6 (Heating HOM pick-up), F.E onset (31)	38.6 (3.56)
#3 cavity 1st June/08/2011	30.3 まで確認。	25 (HOM pick-up) Fast cooling	Type 0 (modify)	30.3 (Quench by defect) F.E onset (26)	31.1 (3.04)
#4 cavity 1st (will install CM) 20/Sep/2011	12	5 (HOM pick-up) Fast cooling	Type 1 (1 st test.)	20.3 (Heating HOM pick-up) (Quench by defect ?)	47.8 (3.16)
#5 cavity 1st (will install CM) 04/Oct/2011	16.5	12 (HOM pick-up) Fast cooling	Type 1 (表面処理改善)	28.8 (Heating HOM pick-up) F.E onset (28)	40.0 (3.13)
#3 cavity 2 nd 01/Nov/2011	33.4 まで確認。	31.9 まで確認。 (外導体が発熱)	Type 2 (ロウ材部の除去など)	33.4 (Quench: Self Pulse、中間状態) コンタミ? 欠陥?、F.E. onset (26)	34.5 (1.43)
#4 cavity 2 nd 15/Nov/2011	20.2 まで確認。	---	Type 2	Super leak due to F.E. アイリス部に傷あり、BPに内部欠陥あり、 パーストが起こった様子。 F.E onset (13 → 3.5)	30.3 (1.65)
#5 cavity 2 nd 29/Nov/2011	30.6 まで確認	28.2 まで確認。(外導体が発熱) (アンカー減らした。1/2)	Type 2	30.6MV/m (Quench: Self pulse、中間状態) F.E. onset (21)	35.5 (0.95)
#4 cavity 4th 13/Dec/2011	20.5 HOM pick-up	7.5 HOM pick-up (アンカー減らした。1/4)	Type 1 (ロウ材部の除去など)	26.7 (HOM pick-up heating) No Emission at Max field、リペア品	34.4 (1.57)

Cavity(35): Conclusion

2セル3空洞の最終状態(VT result), 20111226

	Frequency[MHz]@ 2K (Pre-tuning, EP)	Field flatness	Qt	Eacc Max [MV/m]	F.E. onset [MV/m]
#3	1299.533 (1297.481, 30um)	90.3 (0.903:1)	5.77×10^{10}	33.4 (Type 2)	26
#4	1299.517 (1297.420, 20um)	99.4 (1:0.994)	4.96×10^{10}	26.7 (Type 1)	26.7 (No emission)
#5	1299.427 (1297.255, 10um)	96.9 (0.969:1)	4.16×10^{10}	30.6 (Type 2)	21

Target Operating gradient : 15 MV/m at CW

※ #4 については、連結化のときに Type 2 に付け替える。

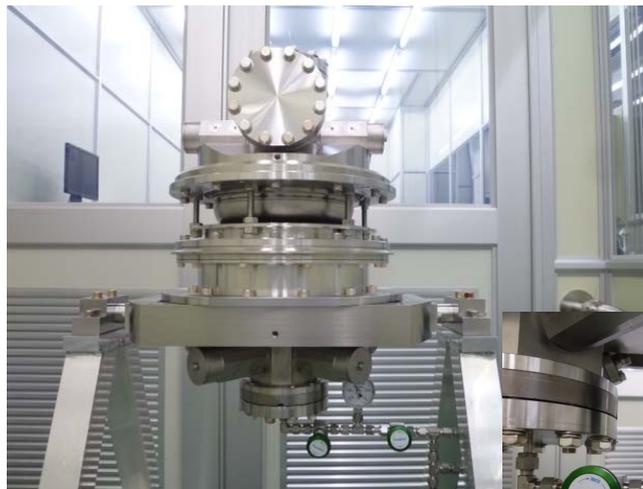
※ Type 2(メス) については勘合部の破損が考えられるため、納期が間に合えば、
Type 2(オス)に付け替えてもらう。

※ 空洞性能としては、目標値に到達したので、モジュール化のために空洞グループへ引き渡す。

Cavity(36): Purge by Ar gas for next step



空洞外面を洗浄して、クリーンルームへ移動する。



← Bottom, Input (Vac)をブランクフランジへ交換。
空洞内圧をチェックして
大気圧で封じきる(0 MPa)。



真空引き→Arガスパージ

Cavity(37):ヘリウムジャケット溶接後の高圧ガス耐圧試験

高圧ガス耐圧試験(2011年12月21日)

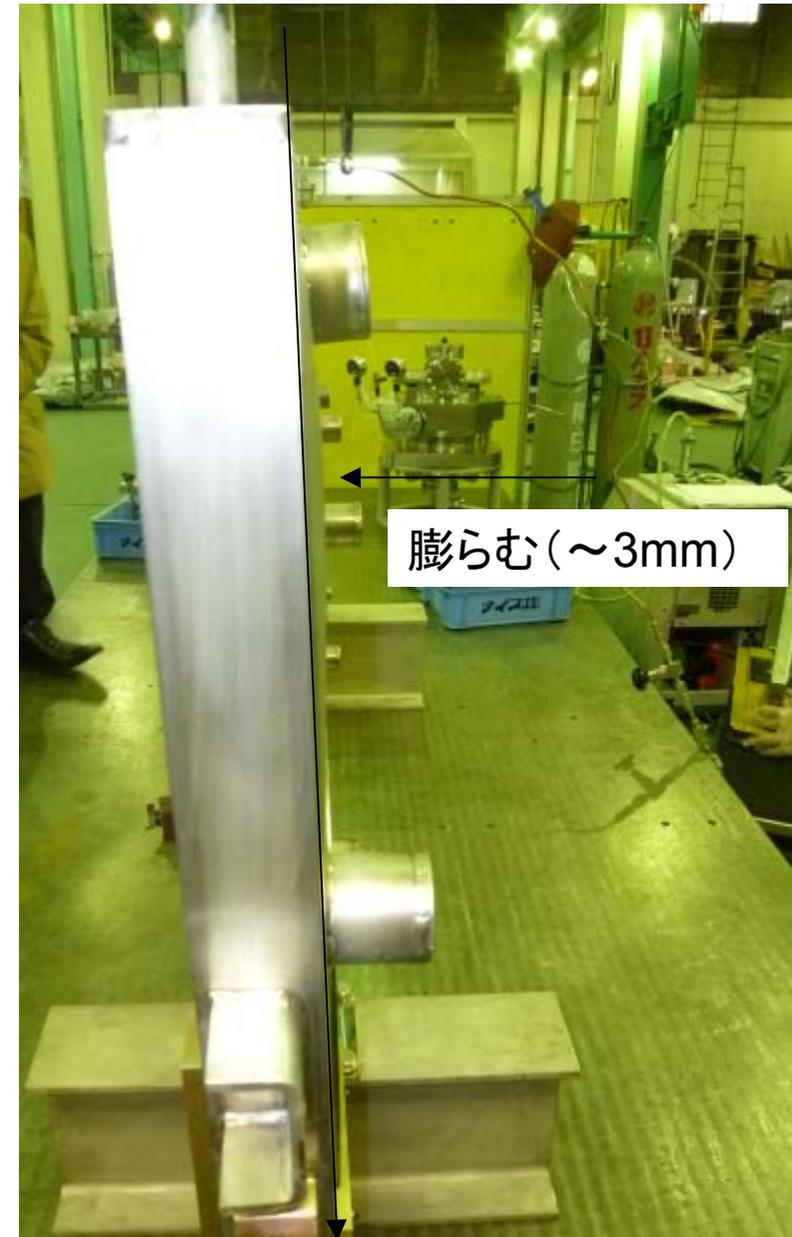
- ・2セル#3空洞(Heジャケット溶接後)
 - :Heガス 1.25倍耐圧(0.17MPa)、スニフアー
- ・Heパネル(試験用)
 - :水 4倍耐圧(0.53MPa)、目視など



Cavity(38): ヘリウムジャケット溶接後の高圧ガス耐圧試験



溶接施工法の承認を得るためのモックアップ。
試験後は廃棄する。



終