

SuperKEKBのための Sバンド球形空洞型パルス圧縮器 (SCPC)の設計

肥後 壽泰、惠郷 博文、東 保男 (KEK)

坂東佑星 (総研大)

野村 伊久磨, #佐治 晃弘, 井原 功介 (トヤマ)

林 显彩, 施 嘉儒 (清華大学)

SuperKEKBのための新型パルス圧縮器を開発している。球形空洞を用いたパルス圧縮器は、Xバンド帯でSLAC LCLS用に始めて開発されたが、清華大学ではそれに基づきSバンド帯での開発に成功した。

本件では後者と協力することにより、SuperKEKBでの高い平均電力で運転すること、安定に運転できること、またできるだけ安価に量産が可能な製造方法を見つけること、などを目的として進めてきている。

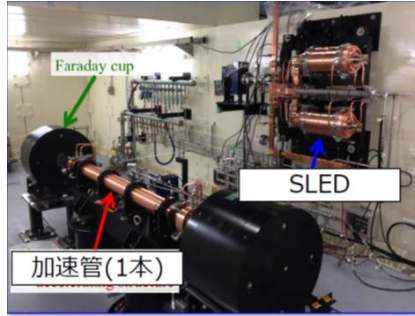
特に冷却効率を上げた設計を採用し、またできるだけ接合組立の場所を少なくすること、に注力した。

設計を終了し、試験機の仕上げ加工直前まで進展したので、その状況を合わせて報告する。

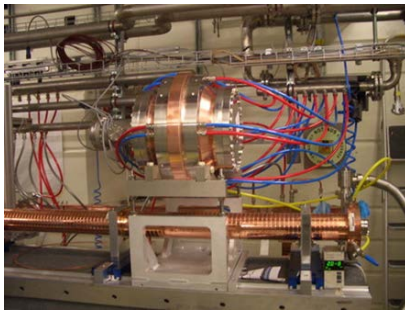
SuperKEKB状況とSCPC選択への経緯



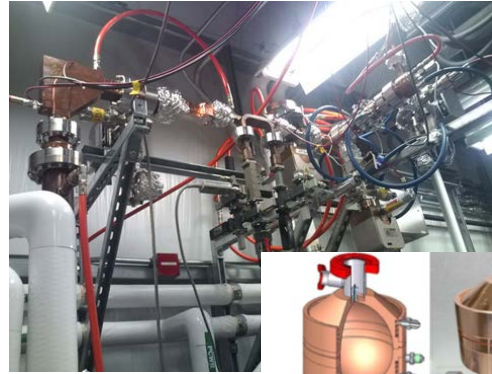
KEKB:
 シリンダー空洞型SLED
 老朽化・予備不足→
 現行圧縮器置き換え
 可能なモデルの開発



SACLA C-band SLED
 「SACLAにおける大電力RF機器の高
 繰返し化」、近藤力、他、2014年加
 速器学会、MOOL06 より



PSI C-band SLED
 Barrel Open Cavity



SLAC LCLS
 X-band
 球形空洞型SLED

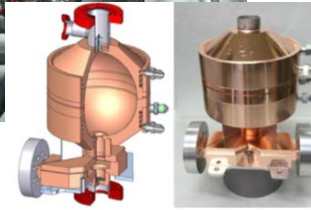
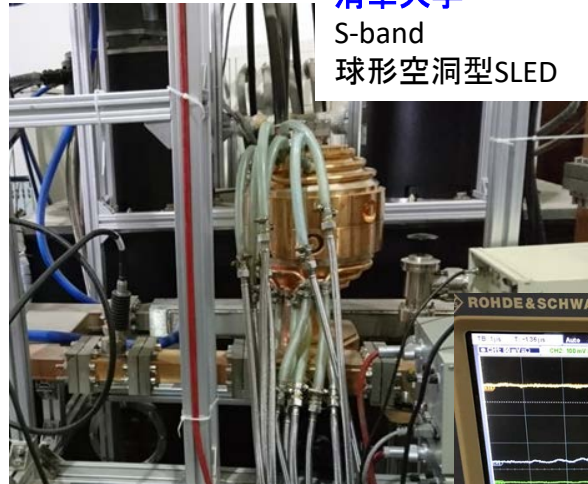
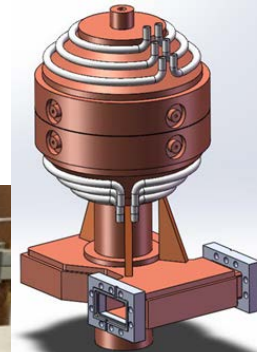


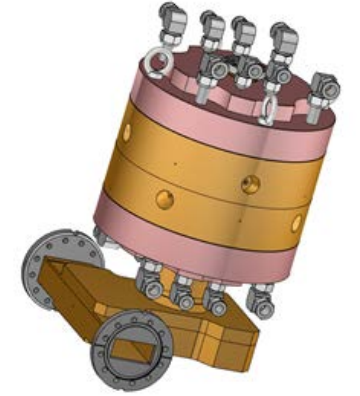
FIG. 11. Mechanical design and fabricated SLED assembly.



清華大学
 S-band
 球形空洞型SLED



SuperKEKB S-band
 高電力安定性の向上、誤
 差解析に基づく製作方法
 の最適化、高い平均電力
 対応の冷却効率の上昇、
 量産への見通しができる
 製作方法の適用、などの
 観点から検討し直した

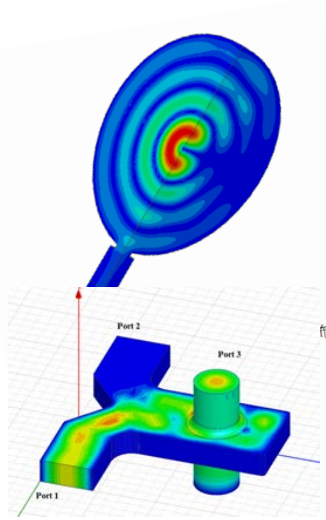


	SuperKEKB	KEKB
Frequency [MHz]	2856	2856
Coupling	6.4	6.4
Input pulse width [μ s]	4	4
Compressed pulse width [μ s]	1	1
Cavity shape	Spherical	Cylinder
Rep. rate [Hz]	50	50
Mode	TE ₁₁₂	TE ₀₁₅
Q ₀	1 x 10 ⁵	1 x 10 ⁵

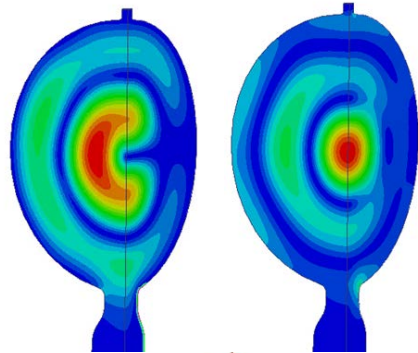
小型軽量化を目指して球形空洞型を採用し、高電力運転での安定性、量産への対応、等为目标として開発している



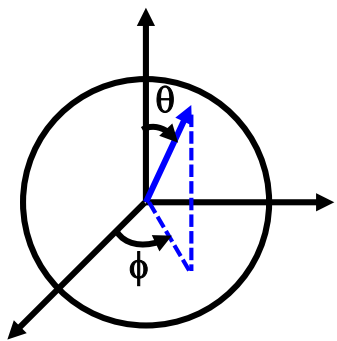
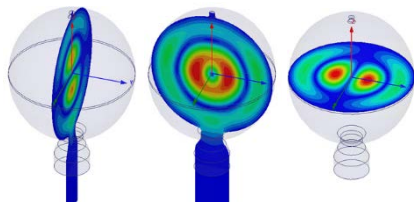
SCPC 空洞基本モードと偏極器



SLAC LCLAS-II
X-band
TE114モード型



清華大 & SuperKEKB
S-band
TE112モード型



Spherical cavity

Vector potential: $A = r\psi^a, F = r\psi^f$

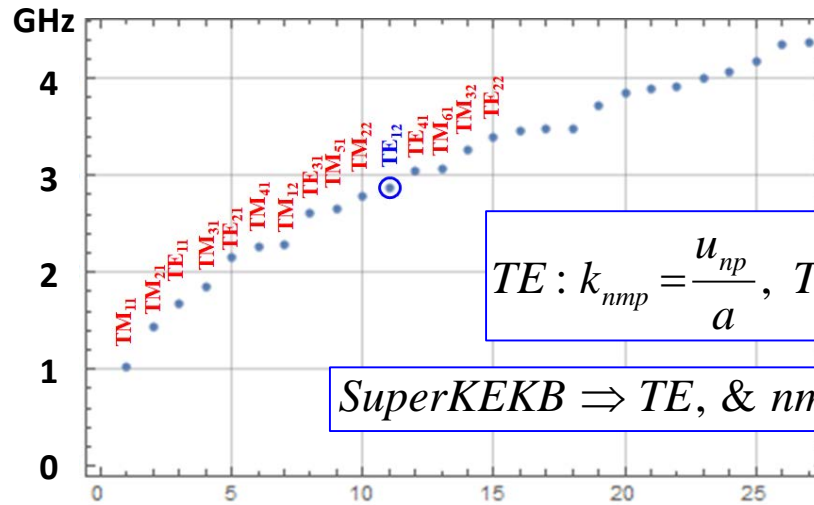
$$E = -\nabla \times r F + \frac{1}{\hat{y}} \nabla \times \nabla \times r A, H = \nabla \times r A + \frac{1}{\hat{z}} \nabla \times \nabla \times r F$$

TM in Spherical cavity

$$A_{mnp} = \hat{J}_n \left(u'_{np} \frac{r}{a} \right) P_n^m(\cos \theta) \begin{cases} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{cases}$$

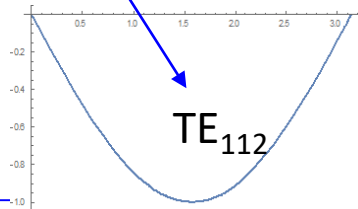
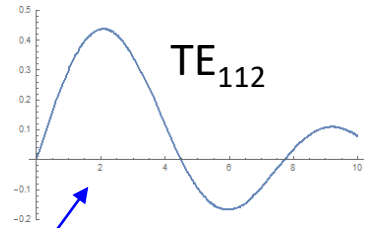
TE in Spherical cavity

$$F_{mnp} = \hat{J}_n \left(u_{np} \frac{r}{a} \right) P_n^m(\cos \theta) \begin{cases} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{cases}$$



$$TE : k_{nmp} = \frac{u_{np}}{a}, TM : k_{nmp} = \frac{u'_{np}}{a}$$

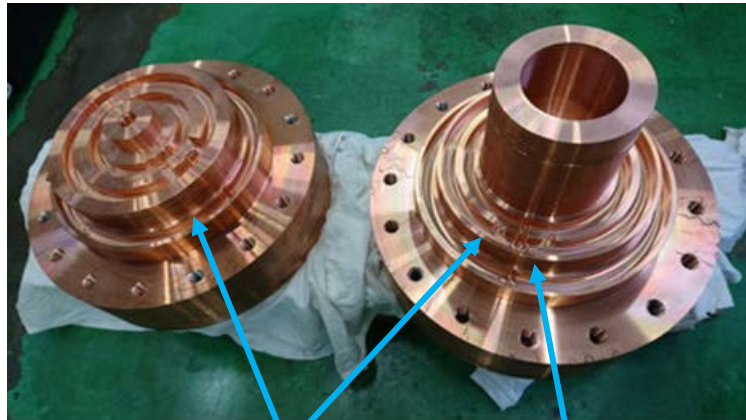
SuperKEKB \Rightarrow TE, & $nmp=112$



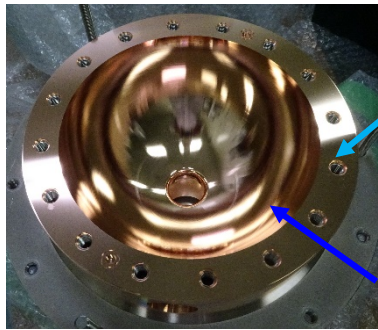
1. Spherical Bessel's function
2. Legendre function
3. Harmonic function

Linearly polarized $\Rightarrow \cos m\phi, \sin m\phi$
Circular polarized $\Rightarrow j \exp(\pm m\phi)$

本モデルでの改良点と構造概観

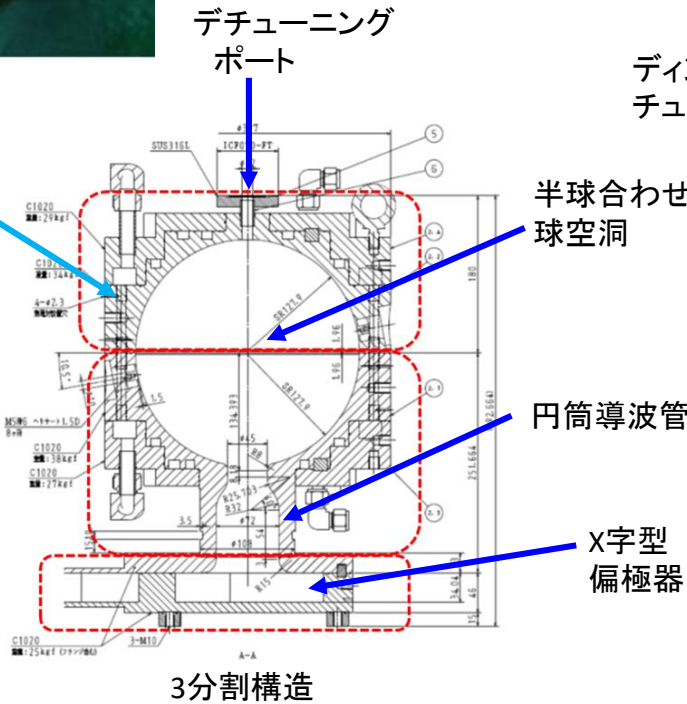


周回冷却水路



半球

軸と並行冷却水路



ディンプルチューナー

半球合わせ球空洞

円筒導波管

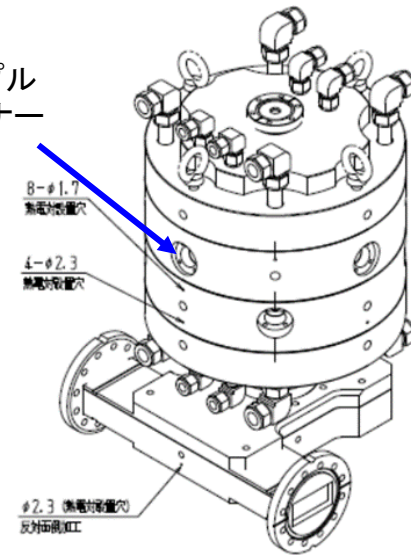
X字型偏極器

3分割構造

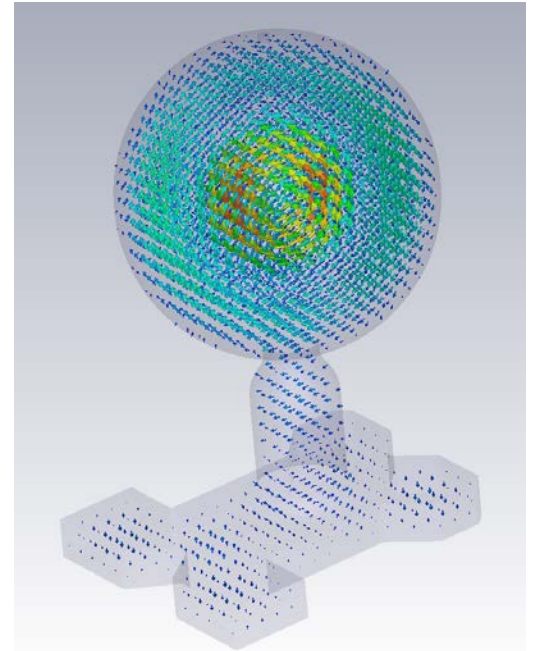
開発目標点
KEKB用と入替可能な構造に加えて
電気、熱、機械設計:
高電力安定性の向上
高い平均電力対応の冷却効率の向上
誤差解析に基づく製作方法の最適化
量産への見通しをもった製造方法適用
などの観点から検討し直した。

具体的な項目:

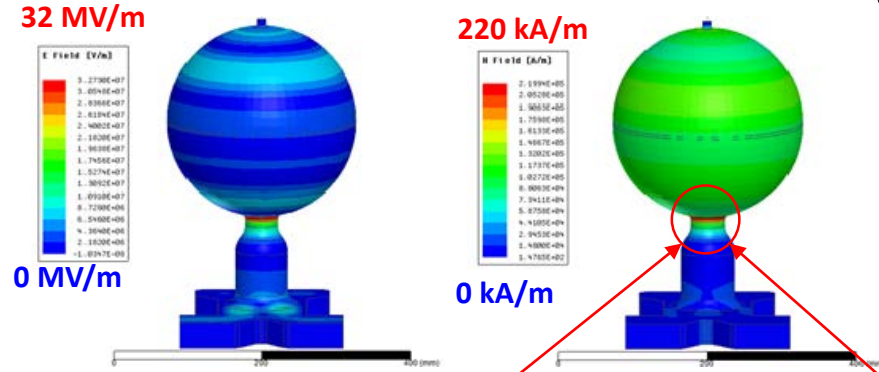
1. 3分割構造
2. 2段ロウ付け
3. 半球に水路彫込
4. X字型円形モード変換器
5. 材料はC1020
6.



高さ < 500mm + デチューナー
本体直径 ~327mm
総重量 ~155kg

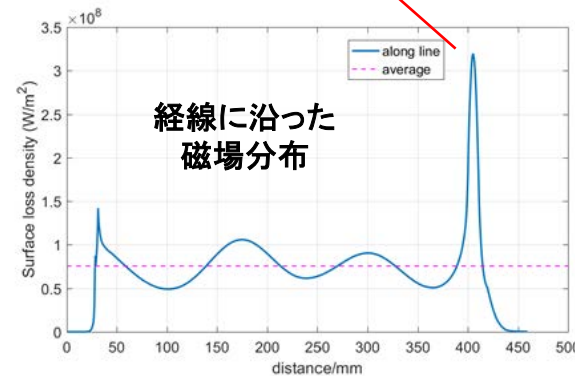
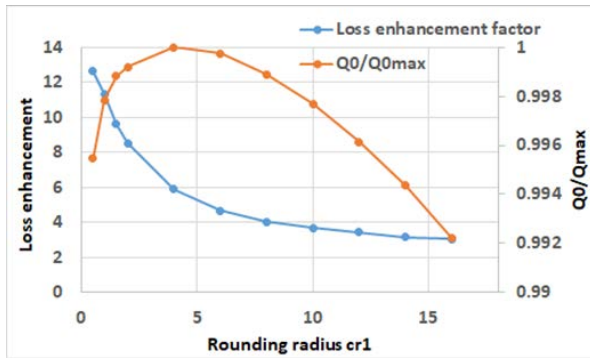


表面電磁界と関連する特性



表面電場(左)と磁場(右)

開口部の磁場集中



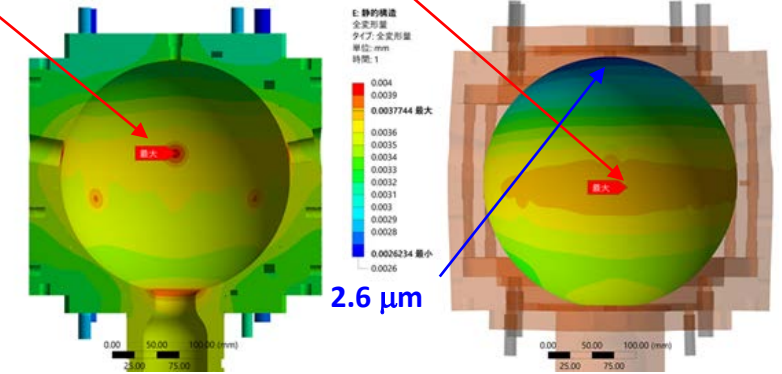
ディンプルチューナー部の局所上昇

32.8 degC

4 μm

30 degC
Water in

2.6 μm



詳細参照:熱設計 THPP39(佐治)

$$\delta F \approx 2856 \text{ MHz} \times \frac{0.004}{128} \approx 88 \text{ kHz}$$

この量をオフセットしておいた点から運転を開始する

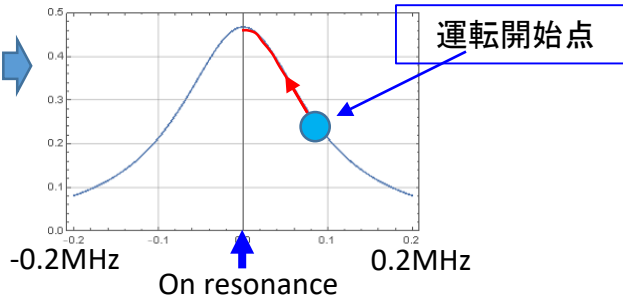
Surface field	Unit	SuperKEKB (present design)	Field in rectangular wave guide
E-field in cavity	MV/m	31.9 Coupling hole	6.0 Midline at broadside
H-field in cavity	kA/m	212 Coupling hole	11.6 Corner

各種依存性・誤差解析

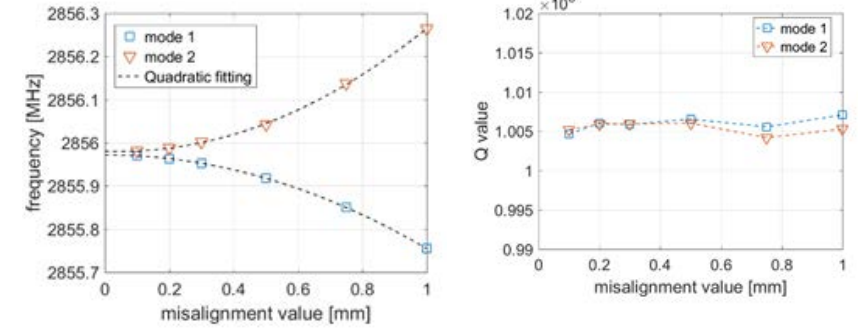
$$\xi \equiv \frac{Q_0}{1+\beta} \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \cong \frac{2Q_L \delta f}{f_0}$$

$$U(\delta f) = U_0(1 - \Gamma^2) = U_0 \frac{4\beta}{(\beta+1)^2} \frac{1}{1 + \xi^2}$$

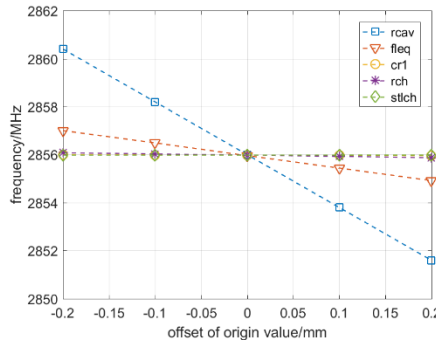
運転開始時のパワーフロー



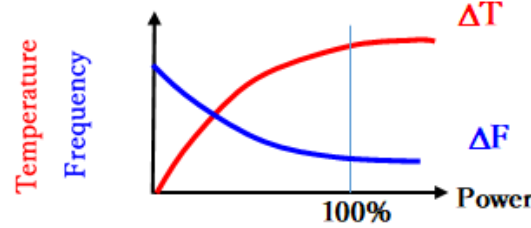
縮退状況
半球ずれによる周波数変化



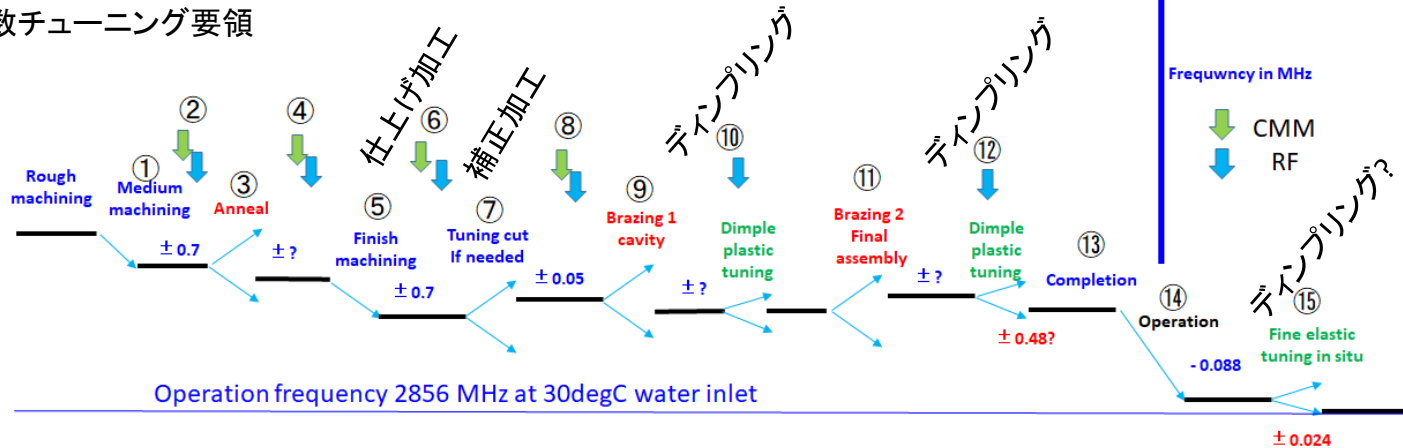
周波数変化感度



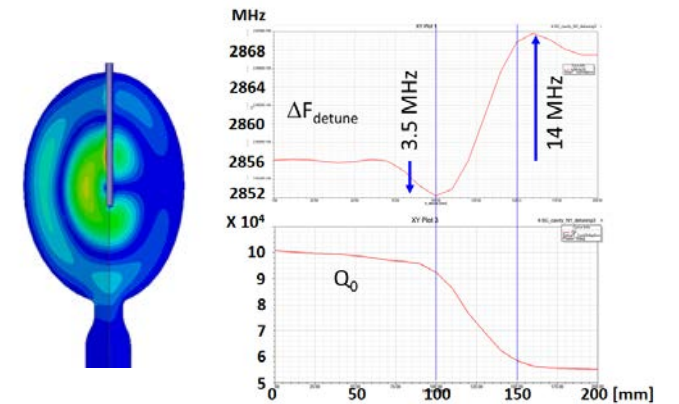
運転開始に伴う変化



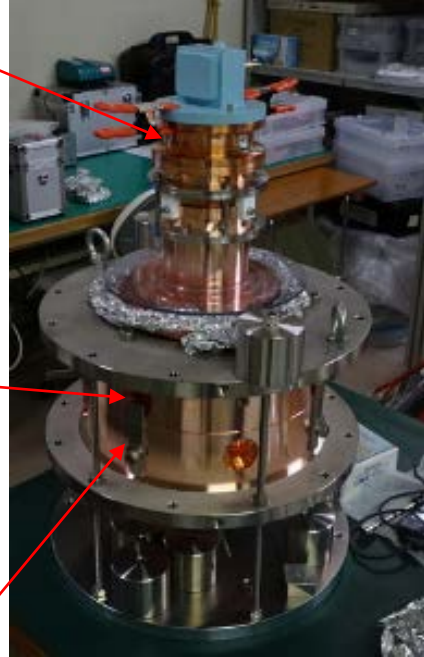
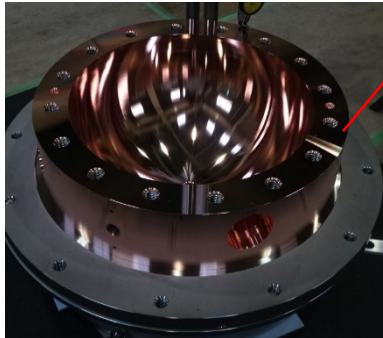
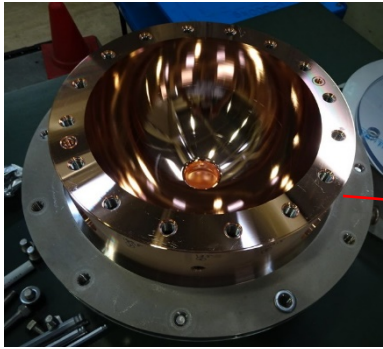
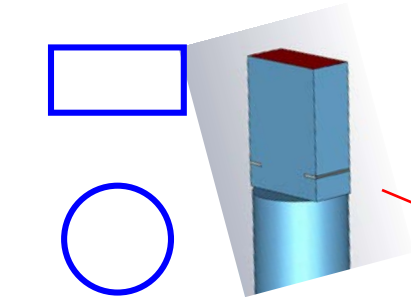
周波数チューニング要領



デチューニング特性

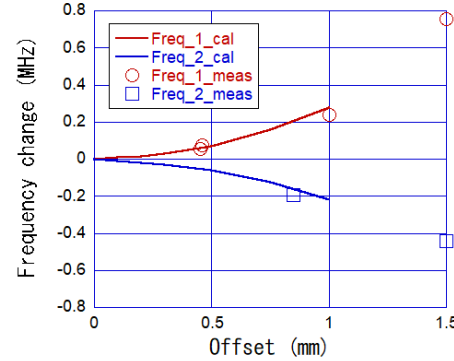


試験機 (#0) 開発の現状



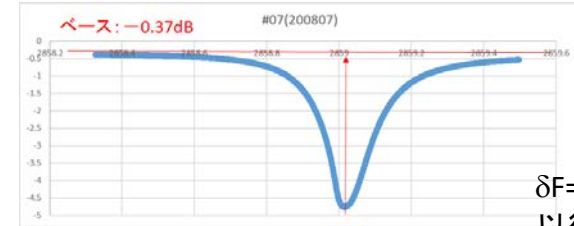
現状：
 中仕上げ状態
 0.2mmアンダーカット
 今後：
 仕上げ加工後
 周波数、結合の再計測
 追加工で補正
 その後：
 ロウ付け組立
 偏極器の組込とチューニング

半球ずれに対する周波数変化

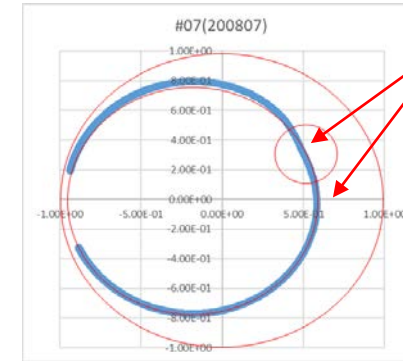


半球同士のアライメントは0.1程度の良い

現在 中仕上げ状態
 線形偏極したモードで計測した共鳴状態



$\delta F = 20 \sim 30 \text{ kHz}$ 程度
 以後のディンプル
 チューニング必要



計測結果と設計値からのずれ

周波数	Freq_meas - Freq_cal	-0.14 MHz
Q_0 値	Q_0 / Q_{0_cal}	62 %
結合度	Q_{ex} / Q_{ex_cal}	91 %

中仕上げ現在は平面前面
 面当たり&平面当たりの
 不完全さ→パワーしみ出しによる

結合孔をアンダーカット
 して計測し補正する

