

2016年8月10日 13:50-14:10 WEOM09

第13回日本加速器学会年会
高周波加速空洞/LLRF口頭発表

EUV光源加速器に適した 9セル超伝導空洞のRF設計

○許斐太郎、梅森健成、久保毅幸、阪井寛志、加古永治(KEK)
沢村勝(QST)、太田智子(東芝)

発表内容

1.EUV空洞の設計目標

1. EUV計画について
2. cERLの実績について
3. EUV空洞の設計目標

2.EUV空洞の設計方法

1. センターセル形状の特性
2. ビームパイプ径
3. エンドセル形状の変形方法
4. HOMに対する最適化

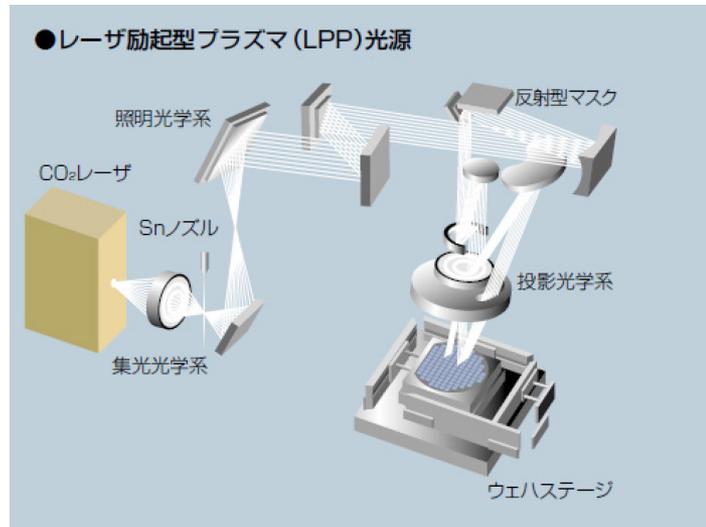
3.EUV空洞のパラメータ

1. 加速モードについて
2. HOMについて

4.まとめ

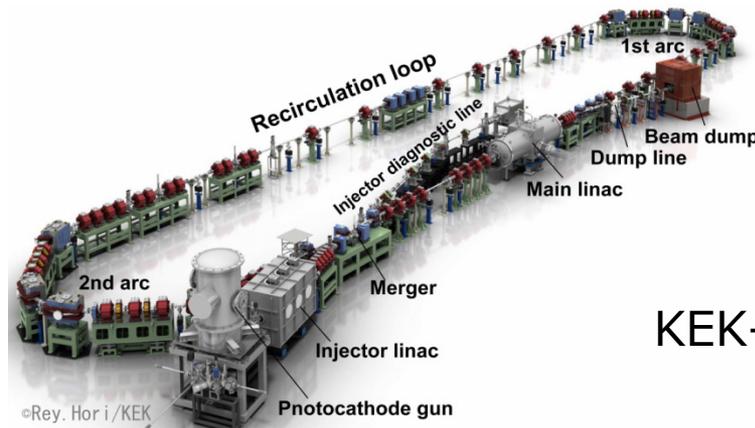
EUV空洞の設計目標 - EUV計画について

- 半導体微細加工のためのリソグラフィ用光源は短波長化し、
- 波長13.5nm,出力250WのLPP(Laser Produced Plasma)光源の開発が進んでいる。



ウシオ電気
光技術情報誌「ライトエッジ」No30
(2008.3)より

- 次世代光源として、13.5nm,10kW級の光源が要求されている。
- この要求を満たす方法の1つとしてERL+FEL光源が提案されている。
- KEKはCW-ERL(cERL)の経験を生かして迅速な設計開発が可能である。

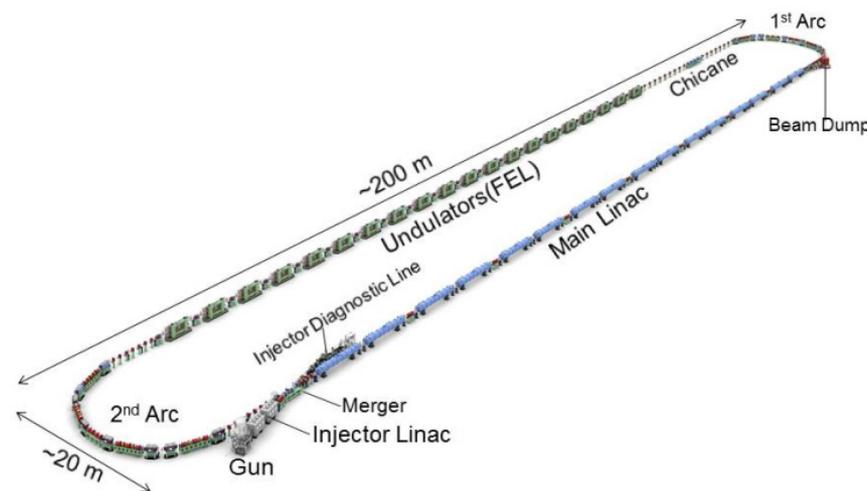


KEK-cERL (PEARL)

EUV空洞の設計目標 - EUV計画について

- cERLでは2台の9セル超伝導空洞を安定に運転してる。
- この実績に基づいてEUVに適した空洞設計を行う。

項目	EUV要求性能
波長	13.5 nm
出力	10 kW
バンチ電荷	60 pC
ビームエネルギー	800 MeV
超伝導空洞の加速勾配	12.5 MV/m
超伝導空洞の数	64台
ビーム繰り返し周波数	162.5 MHz
平均ビーム電流	9.75 mA



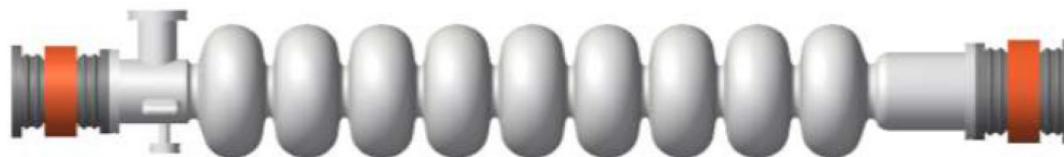
超伝導空洞に関する設計方針

cERLの100mA対応の設計から10mA対応の設計へ見直すことで、加速電界12.5MV/mの実現が可能である。

EUV空洞の設計目標 - cERLの実績について

- 大電流加速器ではBBUが最大の問題
⇒ cERLでは大口径アイリス(Model-2)を採用した。

Model-2空洞 大口径アイリス+両側 Large Beam pipe



フィールドエミッションにより安定運転電界が ~ 8.5 MV/mに制限される。

	Model-2	TESLA
周波数 (MHz)	1300	1300
アイリス径 (mm)	80	70
R/Q (Ω)	897	1036
G (Ω)	289	270
Ep/Eacc	3.0	2.0
Hp/Eacc (mT/(MV/m))	4.25	4.26

EUV空洞の設計

Ep/Eaccを2に下げることによって、Eacc 12.5 MV/mを実現する。

EUV空洞の設計目標 – EUV空洞の設計目標

100mA対応から10mA対応に変更した設計の見直しを行う。

加速モード

Model- 2 空洞の運転実績: 8.5 MV/m

Ep/Eacc比: 3:2

$$\text{予測電界} E_{acc} = 8.5 (MV/m) \times \frac{3}{2} = 12.75 (MV/m)$$

目標加速電界12.5 MV/mは十分達成可能。

Monopole HOM

cERLのHOMダンパー単体試験より数十Wの発熱は許容範囲
⇒ HOMの発熱を~10Wに抑えることを目標とする。

Monopole HOMの目標インピーダンス:

$$P_b = \left(\frac{R}{Q}\right) Q_{ext} I_0^2 \Rightarrow \left(\frac{R}{Q}\right) Q_{ext} = \frac{P_b}{I_0^2} = \frac{10W}{(0.02A)^2}$$

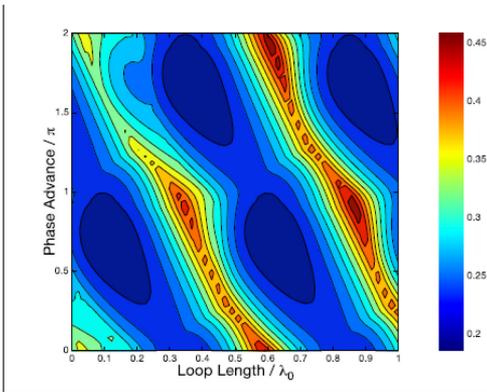
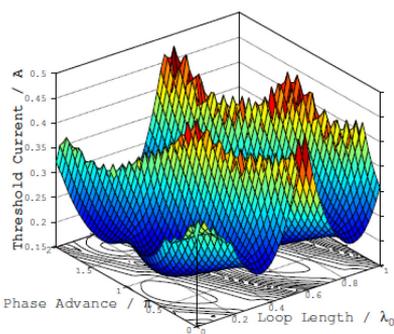
$$\left(\frac{R}{Q}\right) Q_{ext} < 2.5 \times 10^4$$

EUV空洞の設計目標 – EUV空洞の設計目標

Dipole HOM

Model-1空洞をEUVに用いたときのBBU limitは~190mAと予測される(S.Chen)。

Scan over $\Delta\psi$ and Δl for 325.0MHz rept. rate



Model-1空洞Dipole-HOM

Frequency [GHz]	Q_e	R/Q [Ω/cm^2]	$(R/Q) Q_e/f$ [$\Omega/\text{cm}^2/\text{GHz}$]
1.866	7732	6.43	26659
1.874	11655	8.77	54526
1.879	18360	1.95	19089
2.575	4899	21.32	40557
3.082	33608	0.98	10676

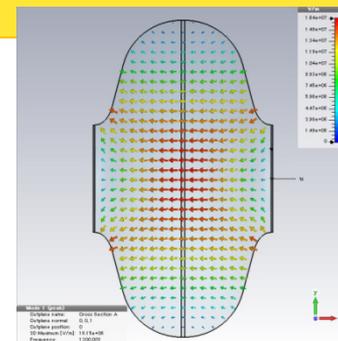
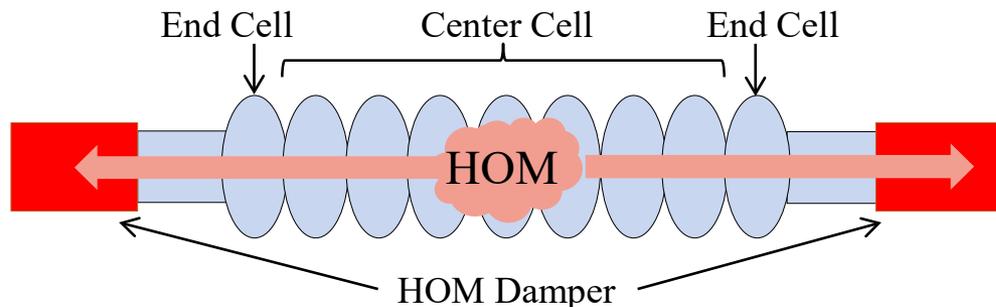
- $I_{th,max} \approx 485.78\text{mA}$, at $\Delta\Psi \approx 1.918367\pi$ and $\Delta l \approx 0.612245\lambda_0$.
- $I_{th,min} \approx 186.02\text{mA}$, at $\Delta\Psi \approx 0.693878\pi$ and $\Delta l \approx 0.122449\lambda_0$.
- Almost the same value as 162.5MHz repetition rate.

Dipole HOMの目標インピーダンスは

$(Rt/Q)Q_{ext}/f < 5.5 \times 10^4 [\Omega/\text{cm}^2/\text{GHz}]$

EUV空洞の設計目標 – Centerセル形状の特性

TESLA空洞をベースに、
“9-Cell空洞 + 両側Large BP + HOMダンパー” の組み合わせで最適形状を探す。
 CenterセルにTESLA形状を採用する。



Centerセルがパスバンドを支配する。

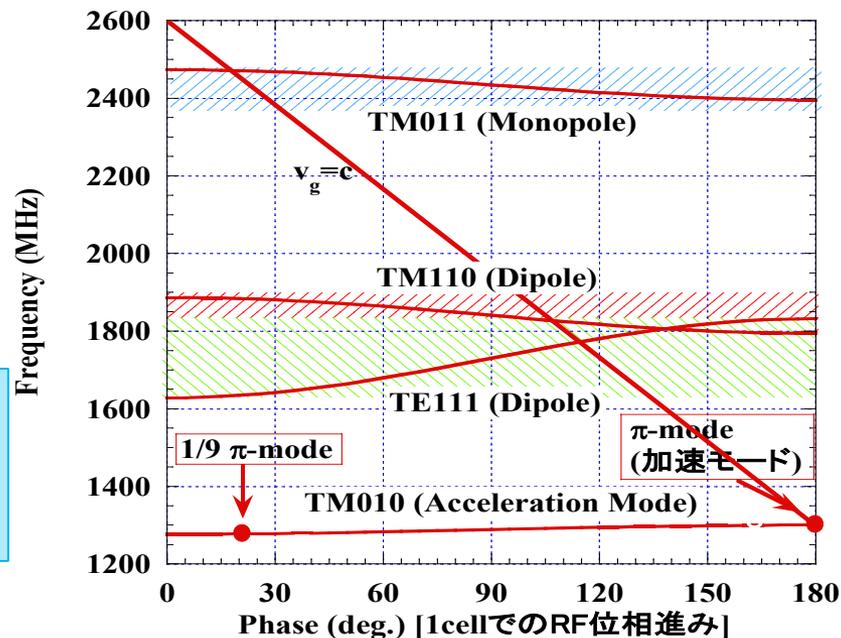


HOMのインピーダンスを下げるには、

- R/Q又は、 R_t/Q の変化は大きくない。
- Q_{ext} を下げるのが大事。

HOMはBPでダンプされるため、
 EndセルとCenterセルのインピーダンス、
 つまり、周波数を合わせる事が重要

TESLAセンターセルのパスバンド



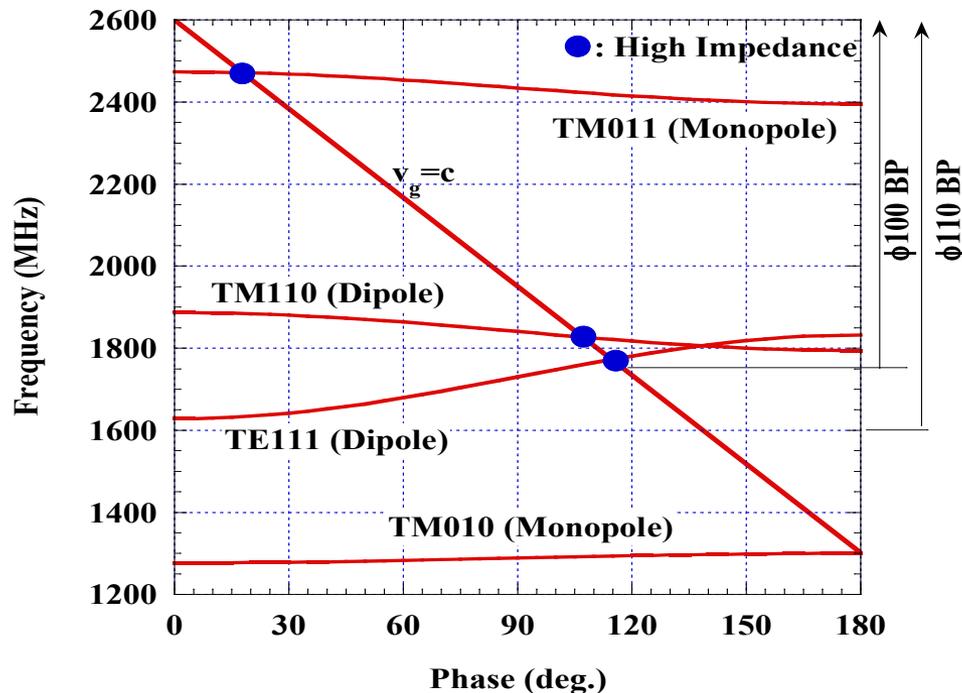
EUV空洞の設計方法 - Beam pipe 径

Beam Pipe径はφ100mmとφ110mmにする。

- 加速モードの染出しを抑えるために、Beam pipe径は小さくする。
- 周波数をコントロールしにくい高周波HOMのために非対称形状にする。
- Rt/Qが低いDipole(TE111)の低周波部分はφ110BPから抜く。
- それ以外のDipole、Monopoleは両側から抜く。

	ビームパイプ径	Cutoff monopole (TM01)	Cutoff Dipole (TE11)
右End Cell	φ110	2086.4	1597.1
左End Cell	φ100	2295.0	1756.8

TESLA Center Cellのパスバンド



Beam pipe径とCutoff周波数の関係

Monopole TM01-mode

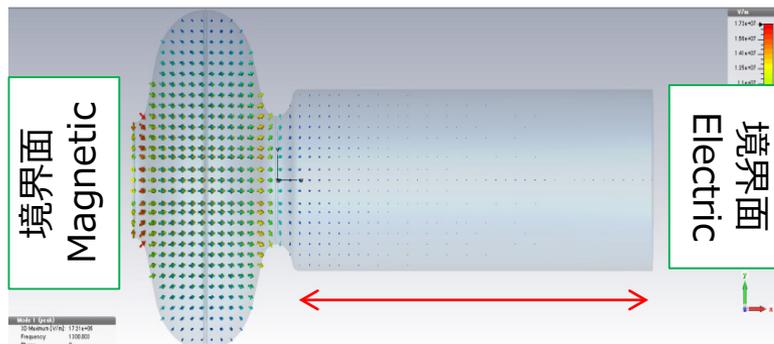
$$f_{TM} = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{j_{mn}}{a} \right) = \frac{229.50}{\phi} [MHz]$$

Dipole TE11-mode

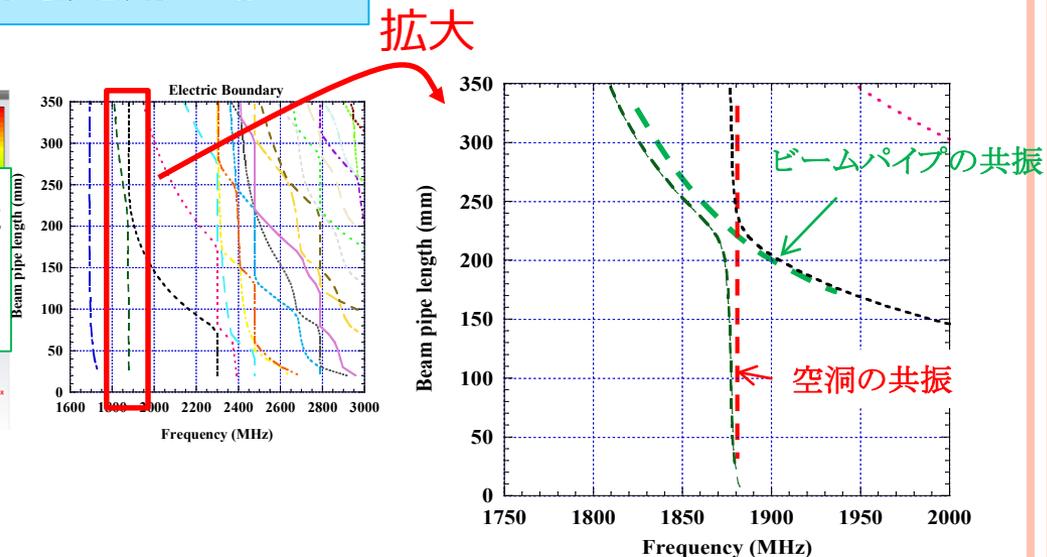
$$f_{TE} = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{j'_{mn}}{a} \right) \frac{175.68}{\phi} [MHz]$$

EUV空洞の設計方法 - End セル形状の変形方法

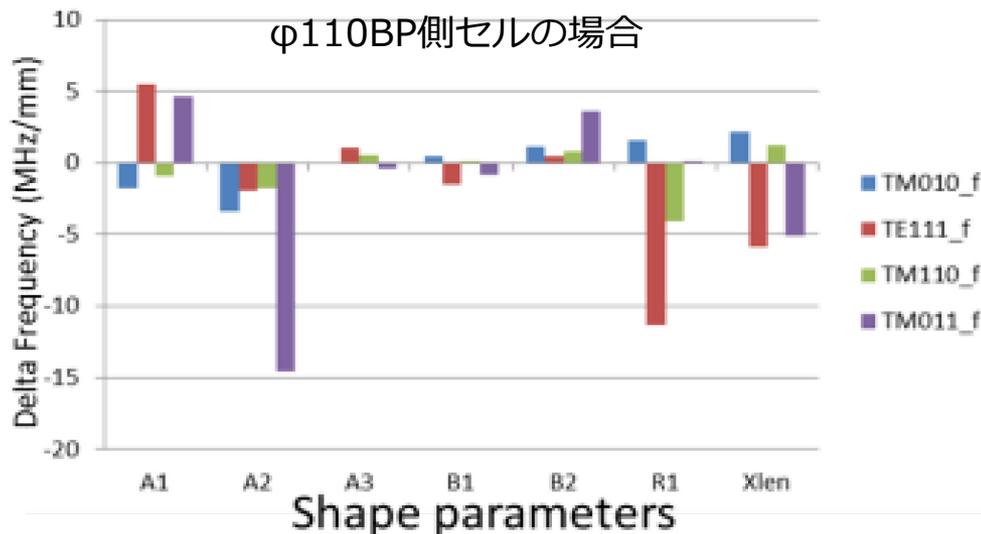
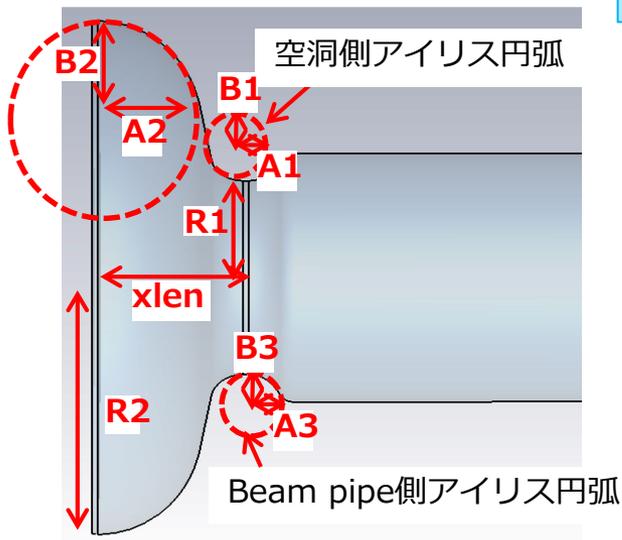
End Cellの周波数計算には同調曲線法を用いる。



Beam pipeの長さを変えて周波数を計算
 離調時短絡面の境界はMagnetic
 ⇒ π モードが計算される



TM010, TE111, TM110, TM011の4つの周波数を調節する。
 空洞長さ、アイリス径が周波数に大きな影響を与える。

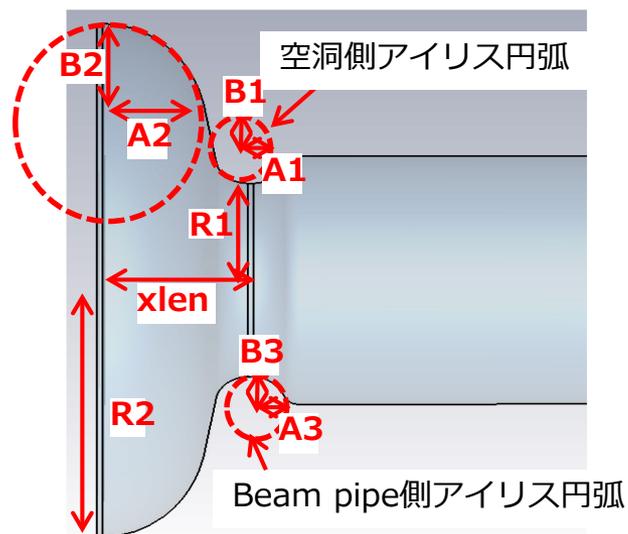


EUV空洞の設計方法 - End セル形状の変形方法

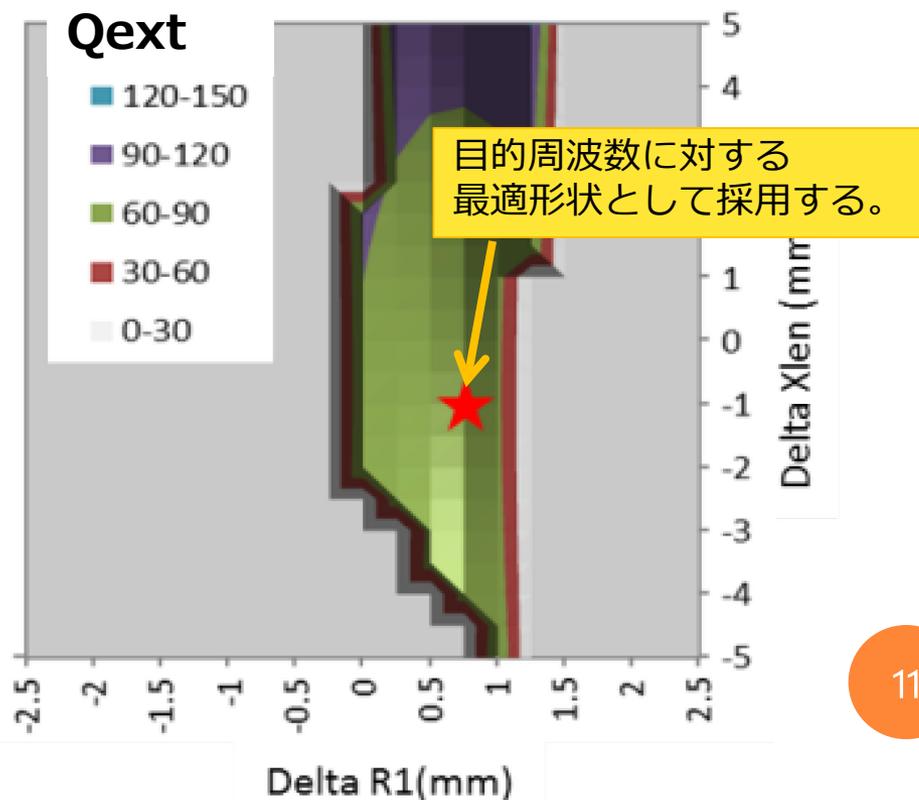
Endセル周波数をCenterセル周波数に合わせたい

しかし、同時に3つ以上のHOM周波数を合わせると不可能な形状になるため不可。

- φ110BP側セルはTE111、TM011を合わせる。
- φ100BP側セルはTM110、TM011を合わせる。



φ110BP側セルを Δf (TE111)=0MHz、 Δf (TM011)=0MHzとした場合の Q_{ext} (TE111)



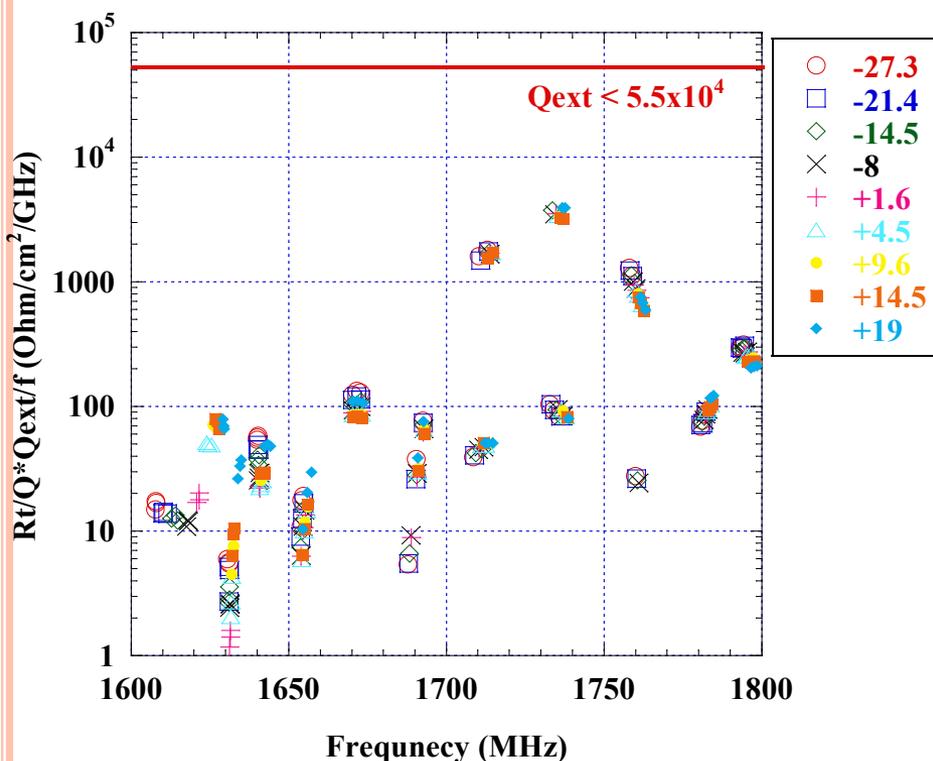
最小 Q_{ext} の形状を探索する条件

- リエントラントにならない形状：
 $X_{len} - A1 - A2 > 0\text{mm}$
- プレス可能な形状：
絶対値 $> 5\text{mm}$
- 現実可能な形状：
変化量 $< 20\text{mm}$

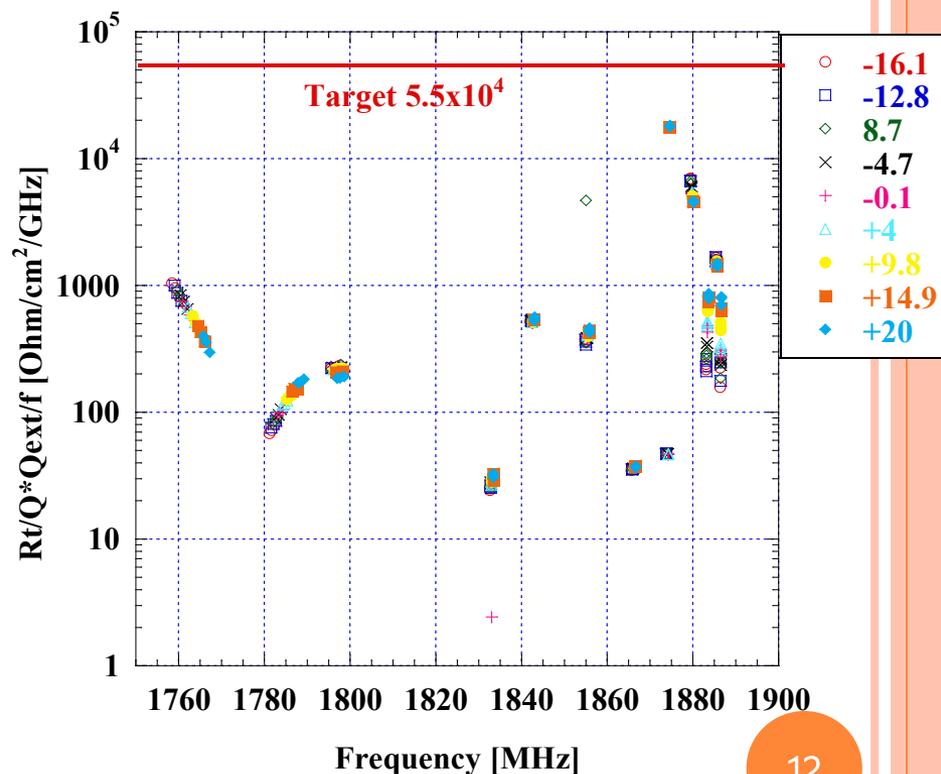
EUV空洞の設計方法 - Dipole HOMに対する最適化

Endセルの計算では π モード周波数を計算しているため、インピーダンスの高いモードと合わせるためには周波数を振って探索する。

TE111に対する ϕ 110BP側セルの調節



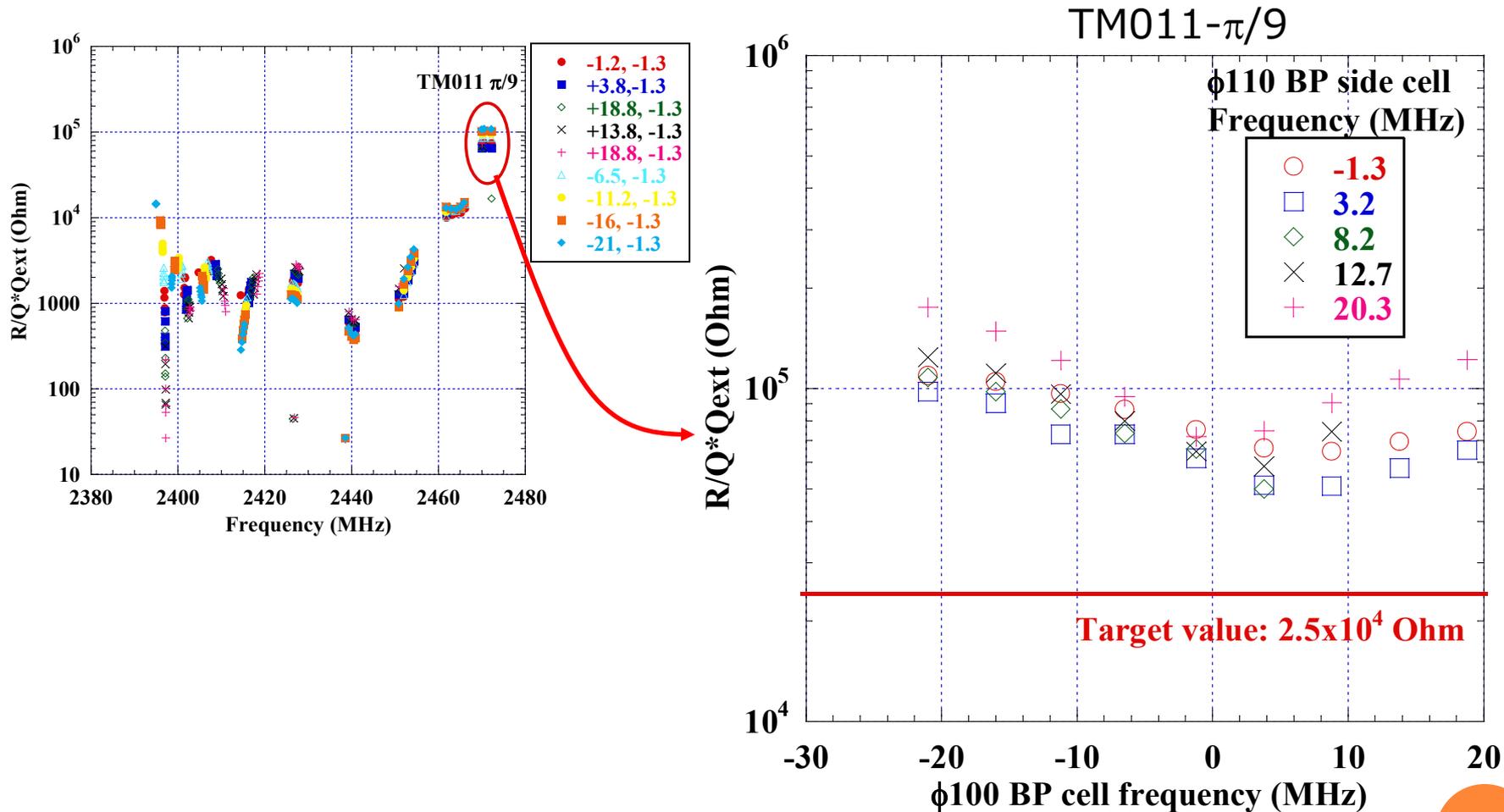
TM110に対する ϕ 100BP側セルの調節



Dipole Modeはどちらも目標値を下回る。⇒ Monopole HOMに対して最適化する。

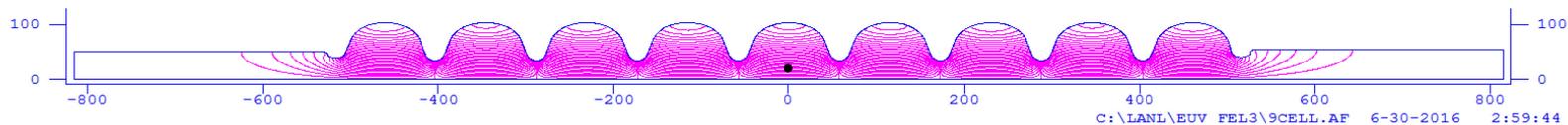
EUV空洞の設計方法 - Dipole HOMに対する最適化

最もインピーダンスの高いMonopole HOMはTM011- $\pi/9$
 両側Endセル周波数を調節し最適形状を探索する。



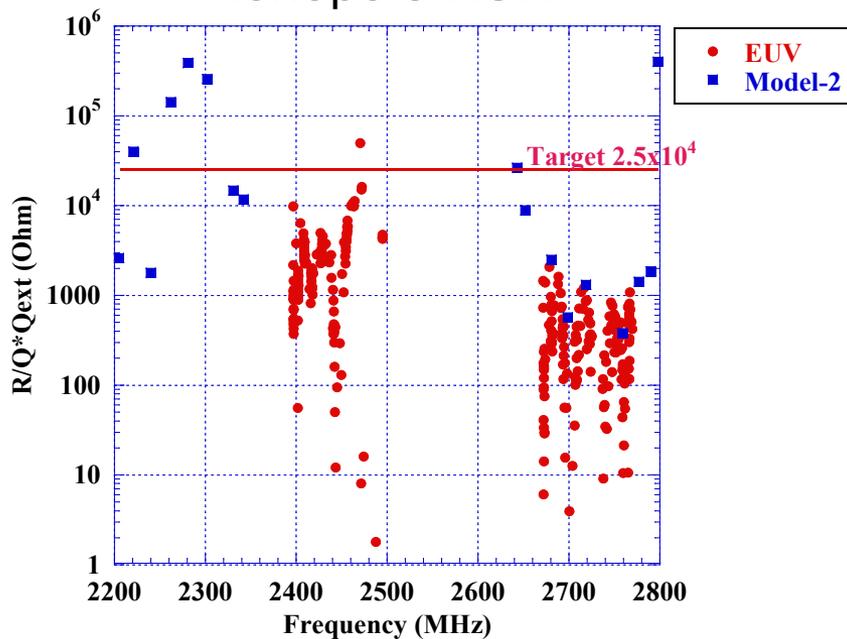
最適化した最小は $R/Q * Q_{ext} = 5 \times 10^4$ Ohmである。
 10Wの目標はクリアできないが、20Wの発熱に抑えることができる。

EUV空洞のパラメータ

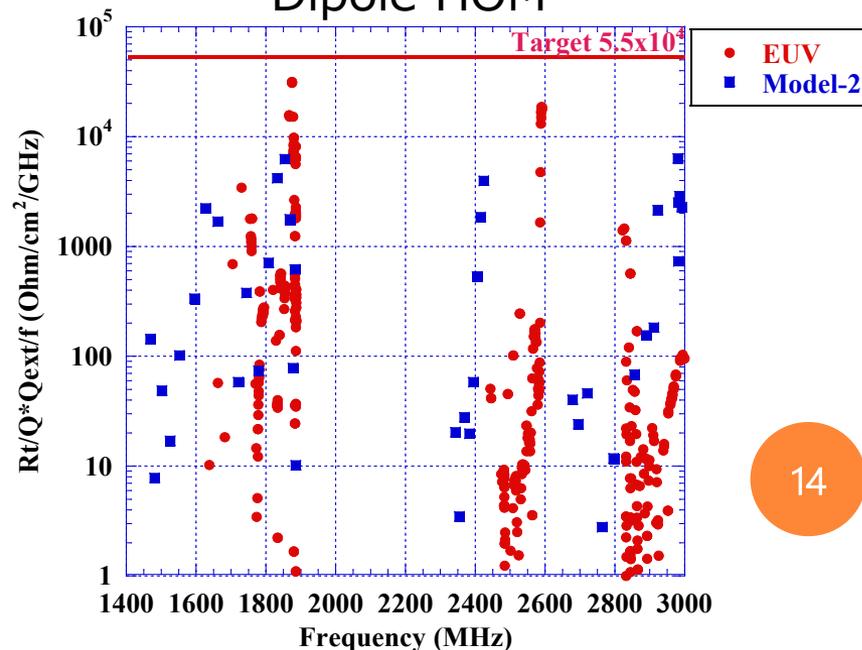


Parameter	EUV	Model-2	TESLA
RF Frequency (MHz)	1300	1300	1300
R/Q (Ohm)	1009.2	897	1036
Geometrical Factor (Ohm)	269.2	289	270
Ep/Eacc	2.03	3.0	2.0
Hp/Eacc (mT/(MV/m))	4.23	4.35	4.26

Monopole HOM



Dipole HOM



まとめ

- Monopole HOM (TM011)に重点を置いて検討し、EUV用10mA級対応の主超伝導加速空洞を設計した。

EUV主要空洞パラメータ：

- 加速電界12.5MV/mを実現するために、cERLの実績を反映させて $E_p/E_{acc}=2.03$ とした。
 $E_p/E_{acc} \sim 2$ のTESLA空洞をベースとした。
- Dipole HOMは 3×10^4 Ohm/cm²/GHzが最大で、BBU limitは190 mA以上。
- Monopole HOMは 5×10^4 Ohmが最大で、最大20Wの発熱がある。