

# SC回収リニアック

2008年9月4日 OHO '08

KEK-PF

梅森 健成

# 目次

- ERL放射光源の概要、ERLにおける加速空洞
- 高次モードとビーム不安定性
- 空洞デザインその1 ～大口径ビームパイプの効果～
- 空洞デザインその2 ～空洞セル形状の最適化～
- 偏心フルート型ビームパイプ
- 単セル空洞の縦測定と9セル空洞の進捗状況
- 周辺コンポーネント

# ERL放射光源の概要

## ERLにおける加速空洞

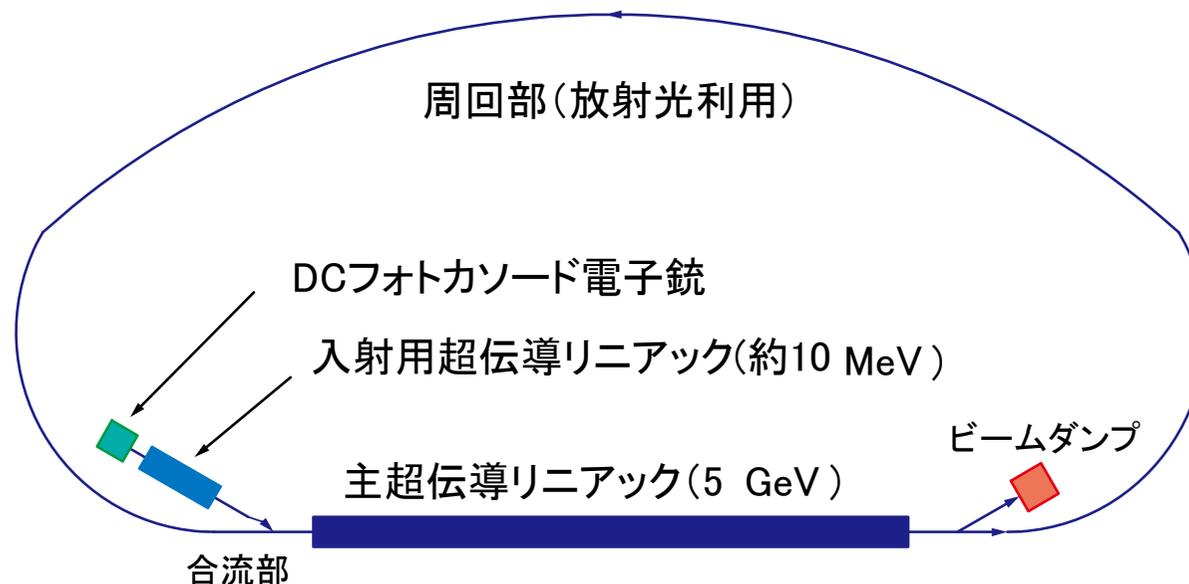
# ERL放射光源の概要

蓄積リングのエミッタンス、エネルギー幅等は放射励起と放射減衰の平衡で決まる。  
蓄積リングの技術は頭打ちになりつつある



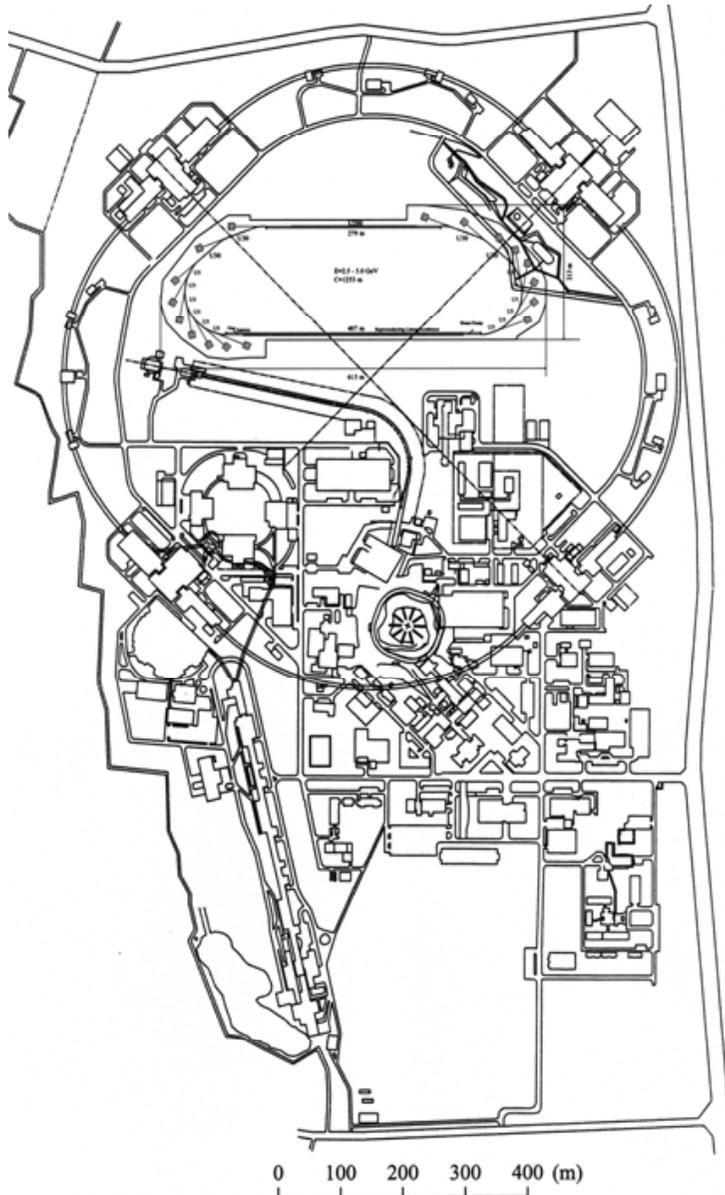
エネルギー回収リニアック(ERL)が次世代の放射光源として期待

- 超低エミッタンス  
(10 - 100 pm·rad)
- 超短パルス  
( $\sim 100$  fs rms)
- 共振器型X線FELへの応用  
(cf.) K.-J. Kim et al., PRL **100**, 244802 (2008).



ビームがリングを周回するのは1周のみ  
主リニアック部分の行きで加速、帰りで減速

# 5 GeV ERL放射光源の概要



加速器の主要なパラメータ

	パラメータ
ビームエネルギー	5 GeV
平均ビーム電流	10 - 100 mA
規格化エミッタンス	0.1 - 1 mm·mrad
エネルギー幅 (rms)	$(0.5 - 2) \times 10^{-4}$
バンチ長 (rms)	1 - 3 ps (通常モード) ~ 100 fs (バンチ圧縮時)
加速周波数	1.3 GHz

光源の代表的なパラメータ

	パラメータ
スペクトル範囲	30 eV - 30 keV
挿入光源からの平均輝度	$10^{21} - 10^{23}$ ph/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%bw
平均フラックス	$> 10^{16}$ phs/s/0.1%bw
挿入光源台数	20 - 30 台

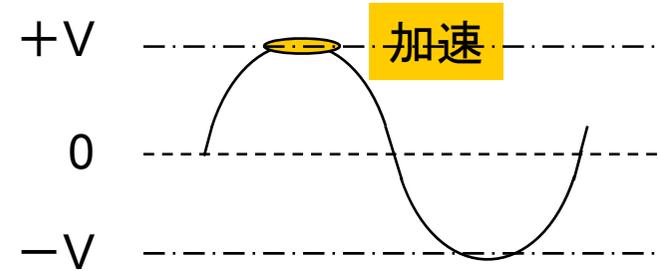
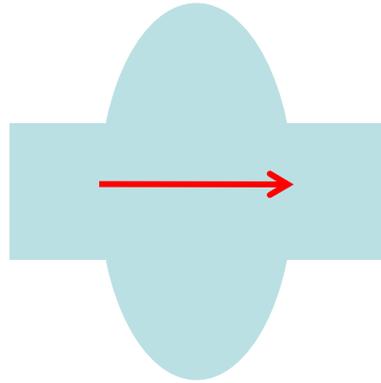
## ERLにおける特徴

- 1-passで高いエネルギーまで加速
  - 加速勾配の大きな加速空洞が必要
- 放射光実験を行うため、CW大電流が必要
  - 高次モード、冷凍機負荷が問題
- 通常の加速方式では膨大な電力が必要
  - エネルギー回収による電力の節約
- 短バンチでの運転
  - 高い周波数まで高次モードが発生

## ERLにおける加速空洞

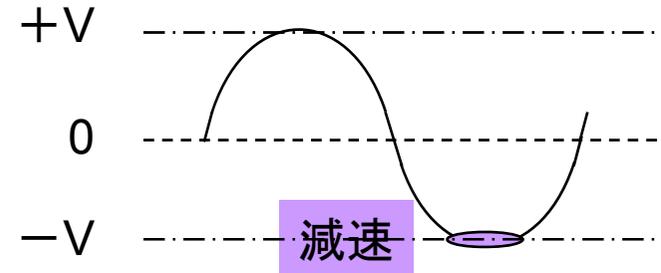
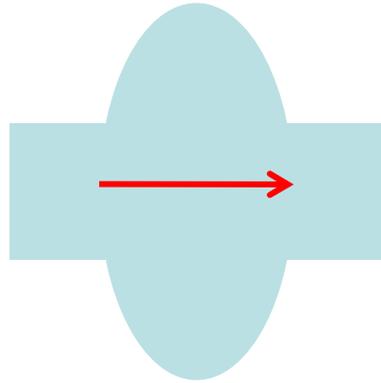
- 壁損失の少ない超伝導加速空洞を用いる
- 2Kまで冷却して運転
- 周波数は700～1500MHzあたり
  - KEKの計画では、1300MHzを採用
- 要求される加速勾配は15～20MV/m
  - 冷凍機や建設・運転コストとのバランス
- 大電流ERLにおける最大の問題点は高次モード(HOM)の減衰
  - ビーム不安定性の原因となるHOMを抑制
  - 低温部に設置されるHOMダンパーでの熱負荷を抑えるためにも、HOM対策は必要

# ビームの加速



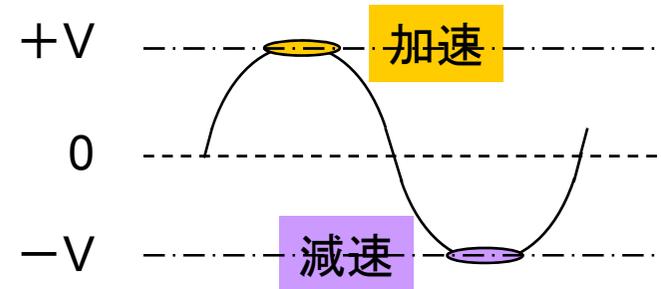
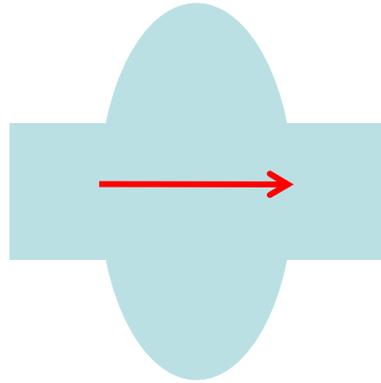
- 電圧 $V$ の立った高周波加速空洞内をビーム(電荷 $q$ )が通過する場合
  - 高周波の位相に応じて、電荷は $V\cos\theta$ だけ加速される( $\cos\theta > 0$ )
  - この時、 $qV\cos\theta$ のエネルギーが空洞からビームへ渡させる

# ビームの減速



- 電圧 $V$ の立った高周波加速空洞内をビーム(電荷 $q$ )が通過する場合
  - 高周波の位相に応じて、電荷は $|V\cos\theta|$ だけ減速される( $\cos\theta < 0$ )
  - この時ビームは、 $|qV\cos\theta|$ のエネルギーを失う
  - この $|qV\cos\theta|$ のエネルギーは空洞に蓄えられる(空洞とビームの系ではエネルギー保存)

# ビームの加速と減速 → エネルギー回収



- 加速ビーム ( $\theta=0$ )の半周期後 ( $\theta=\pi$ )にビームが来るとどうなるか？
  - 加速ビーム:  $V$ 加速される。 $qV$ のエネルギーを空洞からもらう
  - 減速ビーム:  $V$ 減速される。 $qV$ のエネルギーを空洞に渡す
  - 空洞:  $-qV+qV=0$ でエネルギーの収支はゼロ
- 減速ビームのエネルギーを次のビームの加速に用いる。これを繰り返す。 → これが**エネルギー回収**

# 加速空洞に必要なRFパワー

- ビーム加速
  - エネルギー回収なしだと、 $5\text{GeV} \times 100\text{mA} = 500\text{MW}$ という膨大な電力が必要
  - 1-passのCW大電流加速器では、エネルギー回収が必須。ERLでは、この500MW分を節約。
  - 位相補償分の電力、数MWは必要
- 空洞の壁損失
  - 常伝導の空洞だと熱負荷が大きくなりすぎる。数GWのRFパワーが必要
  - 超伝導空洞が必須。2Kで10kW程度の壁損失。ただし、大規模な冷凍機システムが必要。

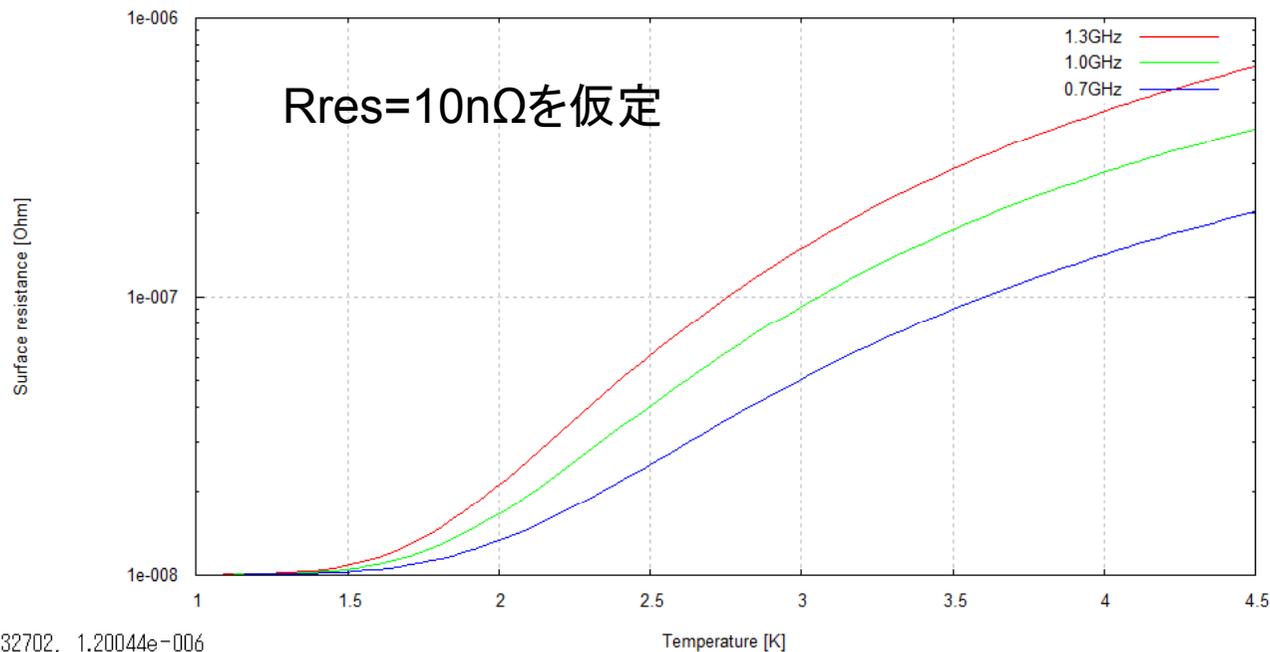
# 超伝導空洞の表面抵抗

- Cu(常伝導)の表面抵抗  
9mΩ(@常温)
- Nbの表面抵抗  
~500nΩ(@4.2K, 1.3GHz)  
~10nΩ(@2K, 1.3GHz)

$$R_S = R_{BCS} + R_{res}$$

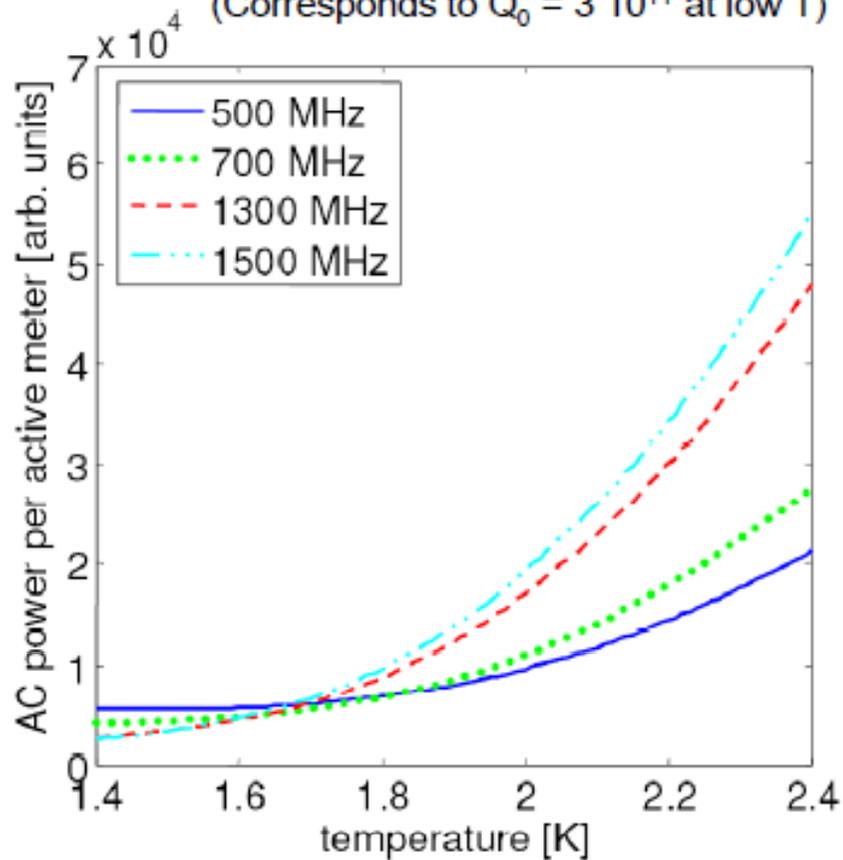
$$R_{BCS} = 2 \times 10^{-4} \frac{1}{T} \left( \frac{f}{1.5} \right)^2 \exp\left( -\frac{17.67}{T} \right)$$

f [GHz], T[K]

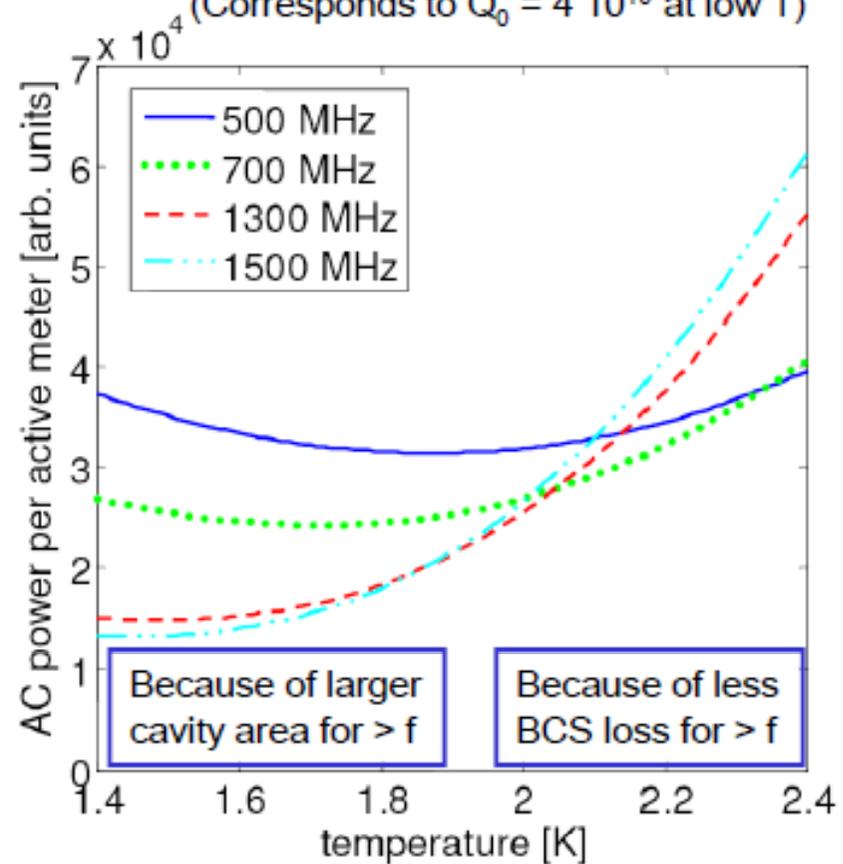


2Kでの運転  
が必須

**1 nΩ residual resistance**  
 (Corresponds to  $Q_0 = 3 \cdot 10^{11}$  at low T)



**7 nΩ residual resistance**  
 (Corresponds to  $Q_0 = 4 \cdot 10^{10}$  at low T)



⇒ 1.8K. Note: Lower T is unproven and might cause instability in the cryo-system.

# RFパラメーター

加速モードの $Q$ 値

$$Q_0 = \omega \frac{U_0}{P_0} = \frac{\omega \mu \int_v H^2 d\nu}{R_s \int_s H^2 ds}$$

$$U_0 = \frac{\mu}{2} \int_v H^2 d\nu = \frac{\varepsilon}{2} \int_v E^2 d\nu$$

$$P_0 = \frac{R_s}{2} \int_s H^2 ds$$

加速モードのシャント・インピーダンス

$$\frac{R_{sh}}{Q} = \frac{\left| \int Ez(r=0, z) e^{ikz} dz \right|^2}{\omega U_0} \quad [\Omega]$$

加速電圧

$$E_{acc} = \frac{1}{L_{cavity}} \left| \int Ez(r=0, z) e^{ikz} dz \right| \quad [\text{V/m}]$$

## 加速勾配と空洞台数

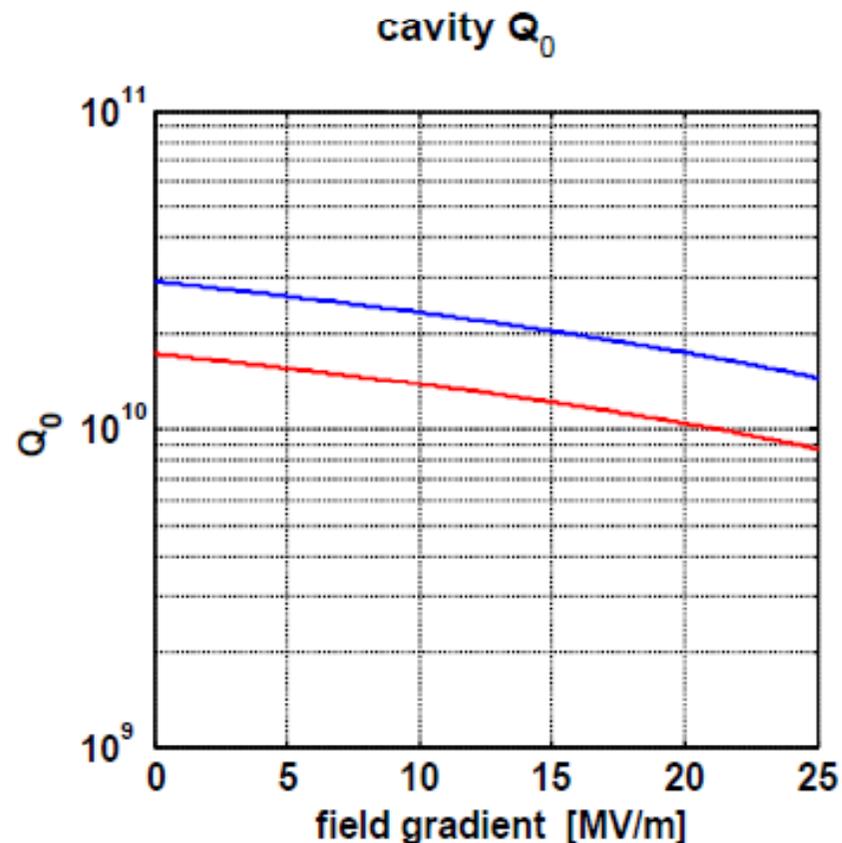
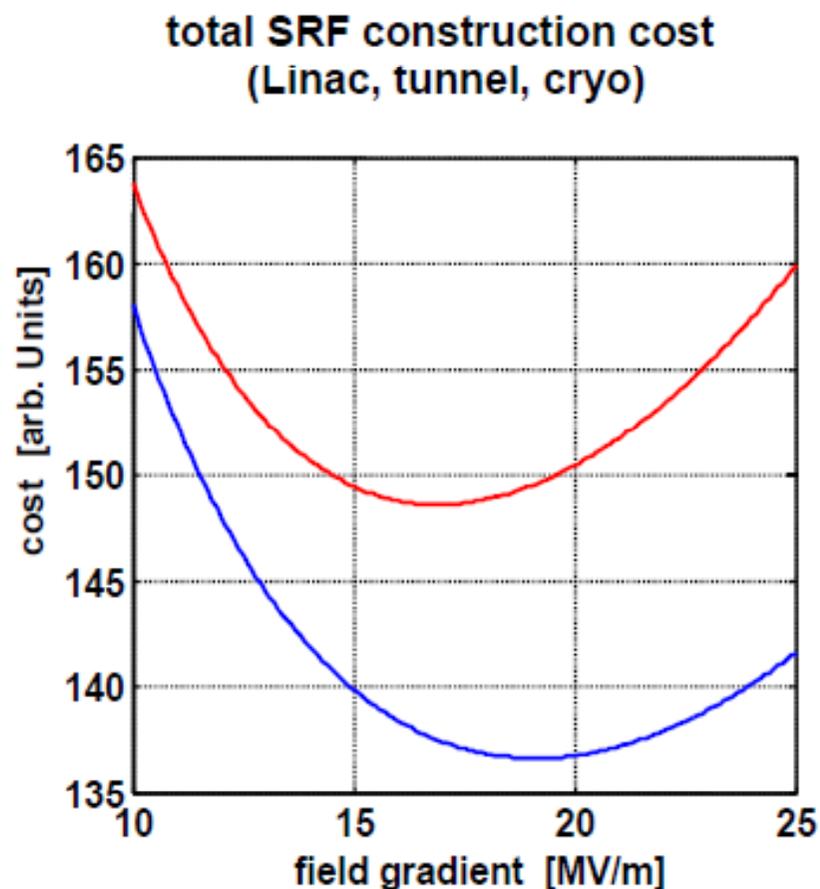
- 加速勾配と空洞台数は反比例
  - 空洞台数 =  $5 \times 10^9 / (V[V/m])$
- 全体での冷凍機負荷は加速勾配に比例
  - 空洞1台あたりの負荷:  $P = V^2 / ((R/Q) * Q)$
  - 全体での負荷:  $P = 5 \times 10^9 \times V / ((R/Q) * Q)$
- ビーム不安定性
  - 空洞台数が増えるとビーム不安定性が起きやすくなる



# Optimal field gradient



CHESS &amp; LEPP



Additionally the operational stability improves with lower voltage!

⇒ Average operation at 16 MV/m

## Field emission

- Field emissionとは、“emitter”からの電子放出。電場の強いところ(アイリス部)で起きやすい。
- Field emissionが生じるとQ値の劣化を引き起こし、冷凍機負荷を増す。
- 放出電子が軸上電場で加速したのちロスすると、放射線源となる可能性があるので、注意が必要
- CW運転を行うERLでは、Field emission freeの空洞であることが望ましい

RF Superconductivity for  
Accelerators, H. Padamsee

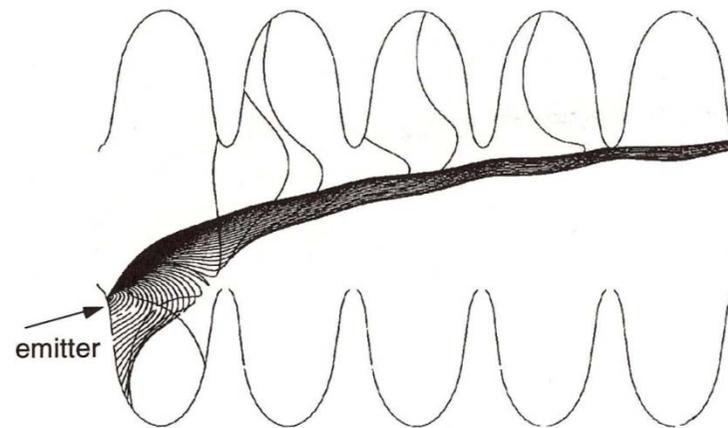


Figure 12.2: Calculated electron trajectories in a 5-cell 1.5 GHz cavity operating at  $E_{acc} = 20$  MV/m. The emitter is located in the end cell, where the

# ERL / ILC の加速空洞の比較

	ERL	ILC
周波数	1.3 GHz	1.3 GHz
ビームエネルギー	5 GeV	250 GeV
加速勾配	15~20 MV/m	31.5 MV/m
空洞台数	333~250 台	~8000 台
運転モード	CW	パルス
Duty cycle	100 %	0.5 %
平均電流	100 mA+100mA	45 uA
バンチ電荷	77 pC	3 nC
バンチ長	2~3 ps	1 ps
Q <sub>0</sub>	1x10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>10</sup>
Q <sub>L</sub>	2x10 <sup>7</sup>	3x10 <sup>6</sup>
空洞1台あたりの壁損失	22.5~40 W	0.5W (100 W)
トータルの壁損失	7.5~10 kW	4 kW

# 高次モードとビーム不安定性

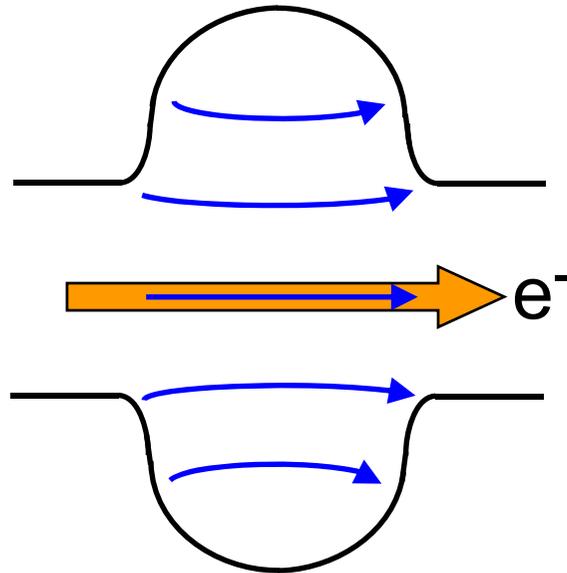
## 高次モード

- 電子ビームが空洞を通過する際には、空洞内に高次モード(HOM)を励振する
- この高次モードはしばしば運転に悪影響を与える
  - ビーム不安定性
  - 熱負荷
- ERLでは、いかにこの高次モードを抑えるかが勝負！

# ビームは空洞通過時に高次モードを励振

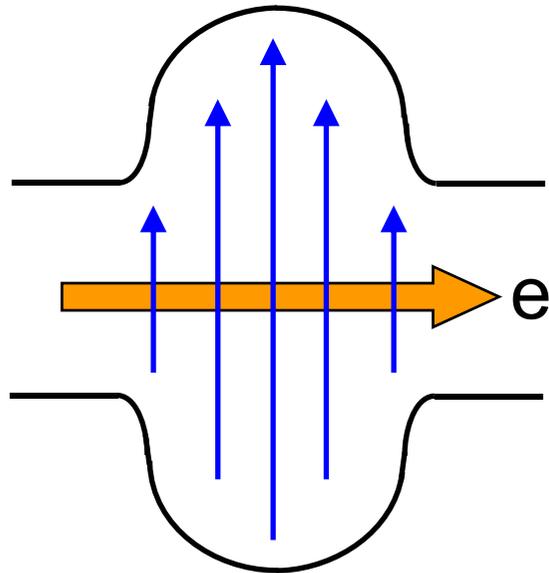
→ この高次モードはしばしば悪影響を及ぼす

加速モード  
TM010  
1300MHz



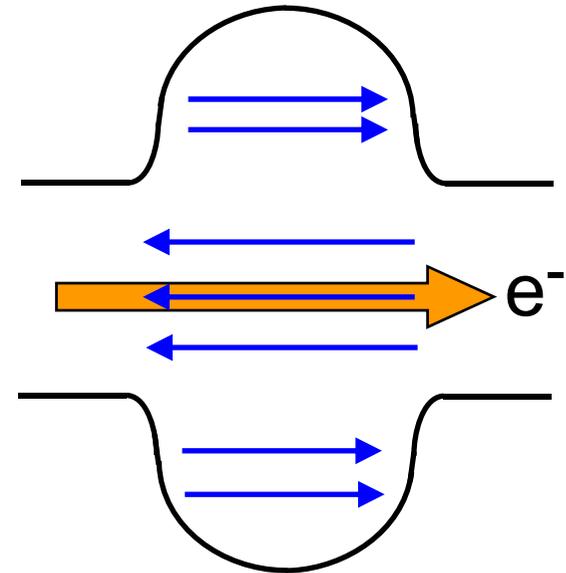
ビームを  
加速する

高次モード  
(dipole mode)  
TE111  
1500MHz



垂直方向への  
キック  
↓  
ビーム不安定性

高次モード  
(monopole mode)  
TM020  
2650MHz



ビームから  
エネルギーを奪う  
↓  
高次モードダンパー  
での熱負荷

# 高次モードのRFパラメーター

高次モードの $Q$ 値

$$Q_{HOM} = \omega \frac{U_{HOM}}{P_{HOM}} = \frac{\omega \mu \int_V H^2 dV}{R_s \int_s H^2 ds}$$

モノポールモードのシャント・インピーダンス

$$\frac{R}{Q} = \frac{\left| \int E_z(r=0, z) e^{ikz} dz \right|^2}{\omega U} \quad [\Omega]$$

ダイポールモードのシャント・インピーダンス

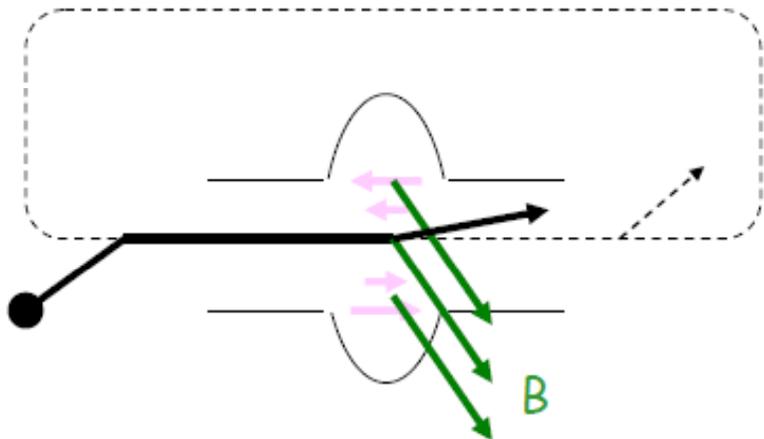
$$\frac{R_t}{Q} = \frac{\left| \int E_z(r=r_0, z) e^{ikz} dz \right|^2}{\omega U (r_0)^2} \quad [\Omega / cm^2]$$

Quadrupoleモードのシャント・インピーダンス

$$\frac{R_q}{Q} = \frac{\left| \int E_z(r=r_0, z) e^{ikz} dz \right|^2}{\omega U (r_0)^4} \quad [\Omega / cm^4]$$

# Beam Breakup(BBU)不安定性(1)

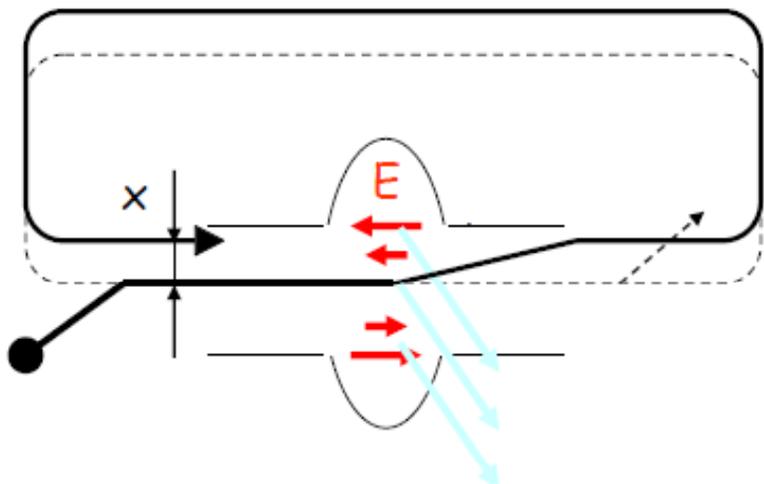
※ 最も簡単な場合： 空洞1台、高次モードも1つのみ



1st PASS

$$V(r = a) = V_a \cos(\varphi) = \int E_z^{\max}(r = a) dz \cos(\varphi)$$

$$x' = \frac{V_{\perp}}{V_b} = \frac{-\frac{cV_a}{\omega a} \sin(\varphi)}{V_b}$$



2nd PASS

$$x = m_{12} x'$$

$$\Delta U = -qV_a \cos(\varphi + \omega T_r) \frac{x}{a} + \frac{q}{2} \frac{x}{a}$$

$$V_q = qa^2 \frac{\omega}{2} \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(\frac{R}{Q}\right) \frac{x}{a}$$

ERL2005 E. Pozdeyev et. al.

# Beam Breakup(BBU)不安定性(2)

※ 最も簡単な場合： 空洞1台、高次モードも1つのみ

The threshold corresponds to equilibrium between deposited and dissipated power.

$$\dot{U}_{cav} = \dot{U}_{beam} - P_c = \langle \Delta U_{in} + \Delta U_{out} \rangle \cdot f_b - P_c$$

$$P_c = \frac{V_a^2}{(\omega/c)^2 a^2 \left(\frac{R}{Q}\right) Q_L}$$

At the equilibrium, the stored HOM energy does not change (dU/dt=0)

The formula yields two regions:

$m_{12} \sin(\omega T_r) < 0$  – unstable  
 $m_{12} \sin(\omega T_r) > 0$  – “pseudo”  
 -stable

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{V_a^2}{a^2} \left( I_b \frac{m_{12}}{V_b} \frac{c}{\omega} \frac{\sin(\omega T_r)}{2} + \frac{1}{(\omega/c)^2 \left(\frac{R}{Q}\right) Q_L} \right)$$

(Thorough analysis by  
 J. Bisognano, G. Krafft,  
 S. Laubach, 1987  
 Hoffstaetter, Bazarov, 2004)

$$I_{th} = -\frac{2V_b}{(\omega/c) \left(\frac{R}{Q}\right) Q_L m_{12} \sin(\omega T_r)}$$

ERL2005 E. Pozdeyev et. al.

## Beam Breakup(BBU)不安定性(3)

- 電流閾値の式から、 $m_{12}\sin(\omega Tr)$ をコントロールすればBBUを回避可能であることがわかる
- ただし、これは1空洞の場合で、5GeV ERLの場合に、全ての空洞に対して、この条件を満たしてやることは困難
- 結論としては、空洞の高次モードのインピーダンスを下げることが大切

# HOMへの要求 ～BBU～

- Dipole mode

- BBU (Beam breakup)不安定により制限
- Cornellのシミュレーションでの、100mAを実現するためのHOMのQ値

$$\left(\frac{R}{Q}\right)\frac{Q}{f} < 2.8 \times 10^5 \left[ \frac{\Omega}{\text{cm}^2 \text{GHz}} \right]$$

[I.V.Bazarov et al., EPAC04 p2197,

M.Liepe, Proc. of the 11<sup>th</sup> workshop on Superconductivity (SRF2003)]

(注) R/Qの定義の仕方により、上記論文中的の数値とは2倍異なる

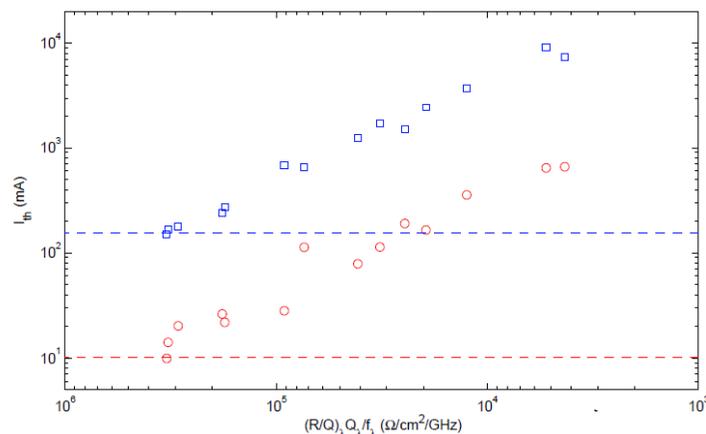
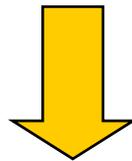


Figure 2: Threshold current for 14 worst HOMs for identical (red circles) and randomly (blue squares) distributed around nominal HOM frequencies (10 MHz interval).

# HOMへの要求 ~quadrupole BBU~

- Quadrupole mode
- 計算結果によると、ERLでは、quadrupole modeによるビーム不安定性(Quadrupole BBU)によっても、電流値が制限される可能性がある指摘されている。
- Cornellのシミュレーションでの、100mAを実現するためのHOMのQ値 [M.Liepe, Proc. of the 11<sup>th</sup> workshop on Superconductivity (SRF2003)  
(注) R/Qの定義が異なるため、上記論文中の数値と2倍異なる

$$\left(\frac{R}{Q}\right)\frac{Q}{f} < 8 \times 10^6 \left[ \frac{\Omega}{\text{cm}^4 \text{GHz}} \right]$$



- BBUを起こさないよう、十分quadrupoleのHOMも減衰させた設計とする

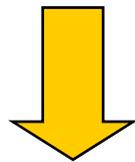
# HOMへの要求 ～熱負荷～

- Monopole mode

- HOM damperでの熱負荷により制限
- 100mA運転時にビームの持つ周波数成分がHOM周波数に直撃した場合(最悪の場合)に、100W以下となるためには

$$\left(\frac{R}{Q}\right)Q < 2500 [\Omega]$$

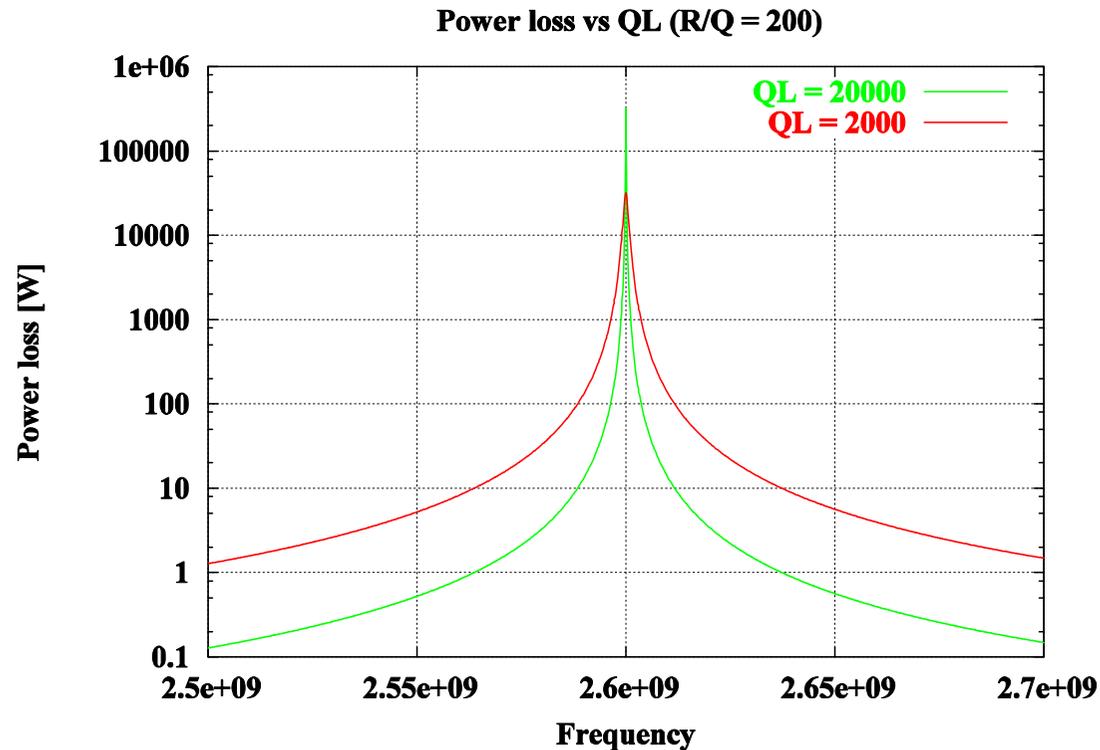
- ただし、運転周波数を選ぶことにより、HOM周波数の直撃を避けることは可能 → 運転条件に依存する



- ERL 1.3GHz運転で問題となる2.6GHzの整数倍の周波数に、インピーダンスの高いHOMが存在しない設計とする

# Power loss と frequency, QL の関係

QL = 20000, 2000の場合。



R/Q = 200, I=200mA,  $\sigma_z=100\text{fs}$ ,  $T_b=1/1.3\text{GHz} = 770\text{ps}$

QLが大きくなると共鳴場所ではpeakが大きくなり非常に危険であるが、共鳴幅は小さくなる。

- TESLA空洞+TESLA HOM couplerの場合の $(Rt/Q) \cdot (Q_{ext}/f)$ 
  - Dipole mode (Cornell threshold :  $1.4 \cdot 10^5$ )

	Freq [GHz]	Rt/Q [ $\Omega/\text{cm}^2$ ]	Qext	(Rt/Q) * Qext	(Rt/Q) * Qext/f
TM110 $6\pi/9$	1.865	6.5	50600	$3.3 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^5$
TM110 $5\pi/9$	1.875	8.8	51100	$4.5 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^5$
TE-iris	2.575	23.8	50000	$1.2 \cdot 10^6$	$4.6 \cdot 10^5$

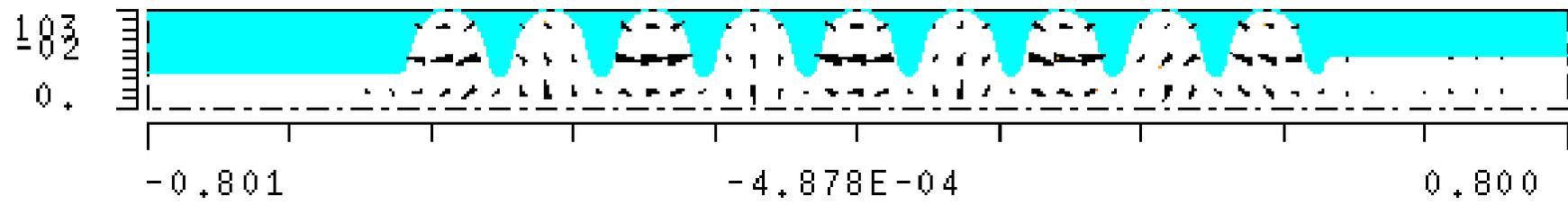
- Monopole mode (100W 相当 :  $2.5 \cdot 10^3$ )

	Freq [GHz]	Rsh/Q [ $\Omega$ ]	Qext	(Rsh/Q) * Qext
TM011 $\pi/9$	2.454	159	58600	$9.3 \cdot 10^6$
TM012 $8\pi/9?$	3.845	44	240000	$1.1 \cdot 10^7$

※ monopole modeはほとんど2500以上

- 100mA ERL用としては、十分なHOM減衰が得られていない

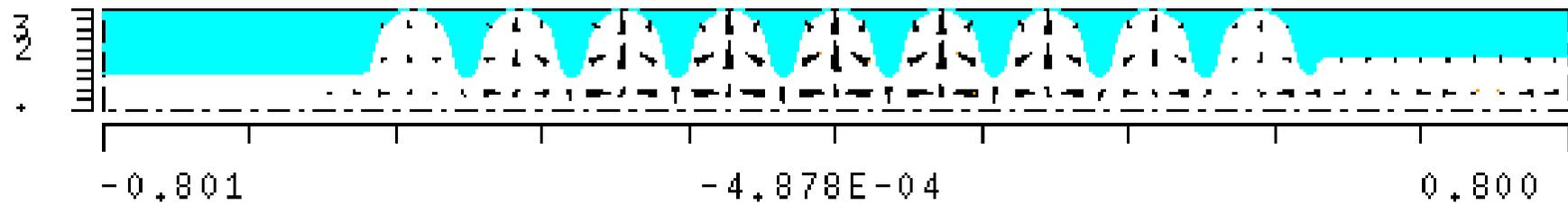
TM110  $5\pi/9$



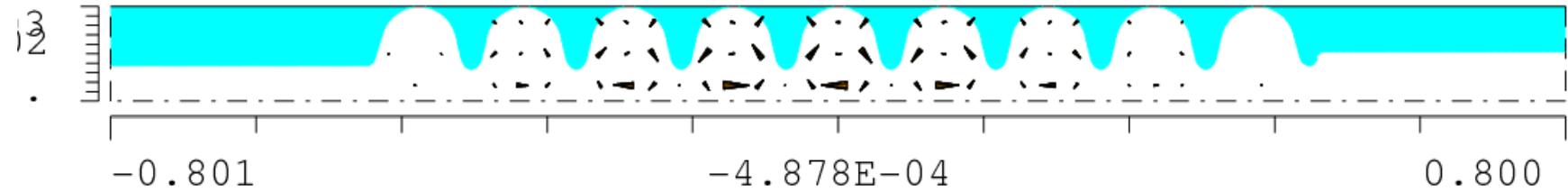
TE-iris



TM011  $\pi/9$



TM012  $8\pi/9$



# TESLA型HOM couplerの問題点

- ERLでの100mA運転を行うには、BBUを抑えるためにより強力なHOM減衰が要求される
- CW(またはhigh duty)では、HOM couplerのpickup probe部分での発熱が報告されており、ERL用には向かない

[P.Kneisel et. al. PAC2005, p4012]

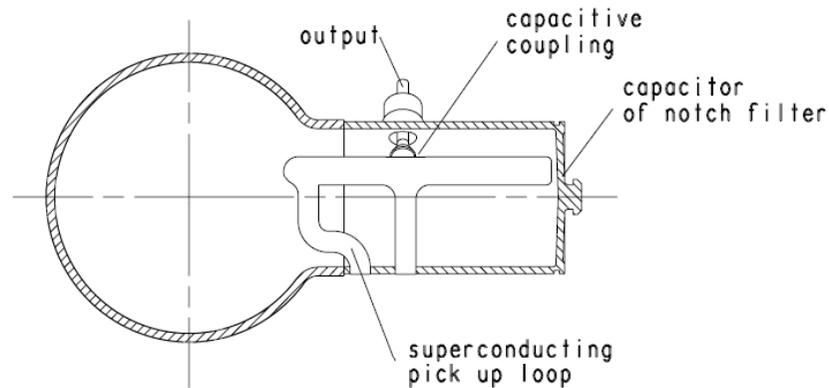


Figure 2.1.20: Cross-section of the higher order mode (HOM) coupler.

⇒ ERL仕様のHOM damper および空洞設計が必要

# 空洞デザイン その1 ～大口径ビームパイプの効果～

KEK-ERL model-1空洞

# 円形導波管内での電磁波の伝搬

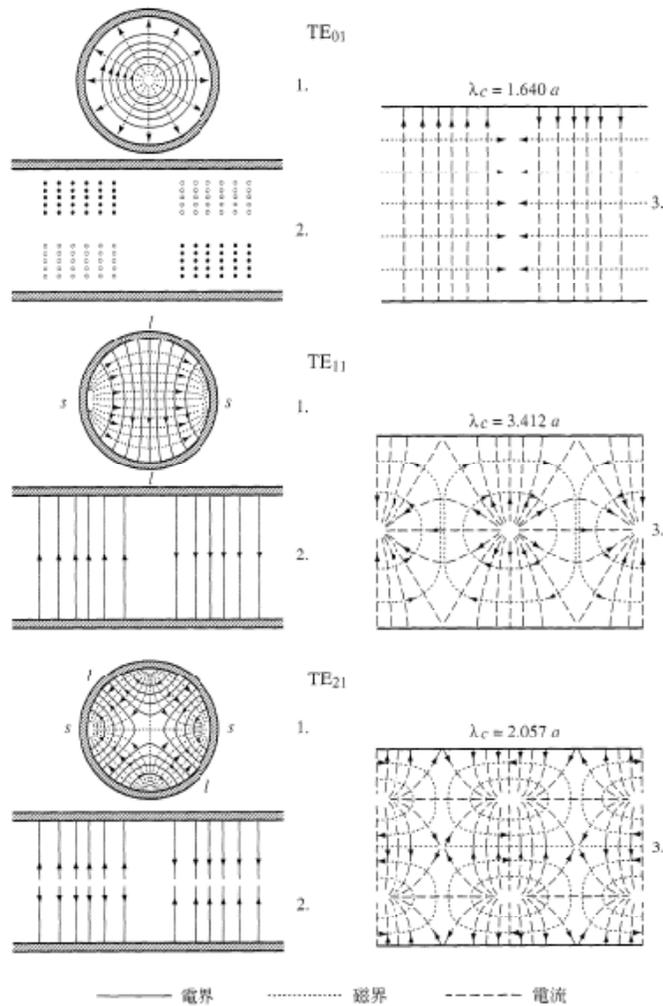


図 2.47 円形導波管のいくつかの TE モードの電磁界分布： 1. 断面図、2. 進行方向断面図、3. 表面図

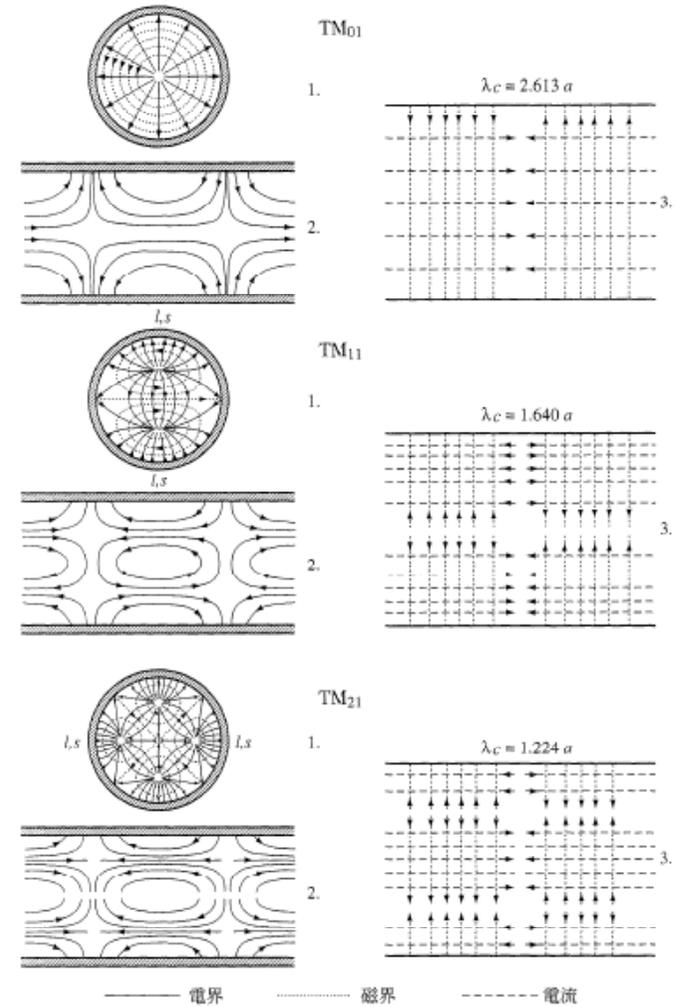


図 2.48 円形導波管のいくつかの TM モードの電磁界分布： 1. 断面図、2. 進行方向断面図、3. 表面図

# 円形導波管の遮断周波数

導波管の半径を  $a$ 、光速を  $c$  とする

また、 $J_m(\rho)=0$ の解を $q_{mn}$ ,  $J'_m(\rho)=0$ の解を $q'_{mn}$ とする

TE $_{mn}$ モード

$$fc = \frac{c q'_{mn}}{2\pi a}$$

$q'_{mn}$	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
$n=1$	3.832	1.841	3.054	4.201
$n=2$	7.016	5.331	6.706	8.015
$n=3$	10.173	8.536	9.969	11.346

TM $_{mn}$ モード

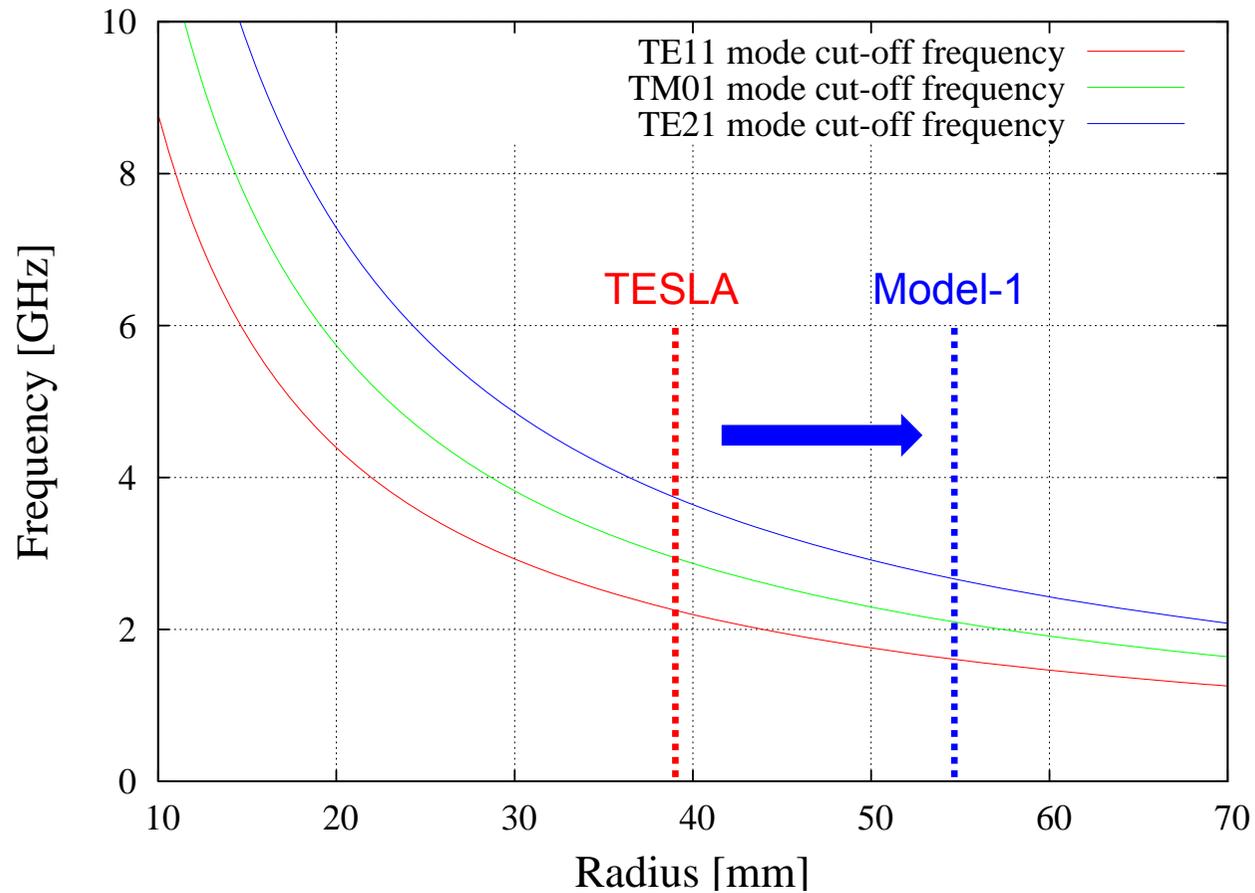
$$fc = \frac{c q_{mn}}{2\pi a}$$

$q_{mn}$	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
$n=1$	2.405	3.832	5.136	6.380
$n=2$	5.520	7.016	8.417	9.761
$n=3$	8.654	10.173	11.620	13.015

遮断周波数以下だと、次式に示されるように減衰

$$\alpha = \frac{2\pi}{c} \sqrt{fc^2 - f^2} \times 8.686 \quad [\text{dB/m}]$$

# ビームパイプ半径 vs 遮断周波数

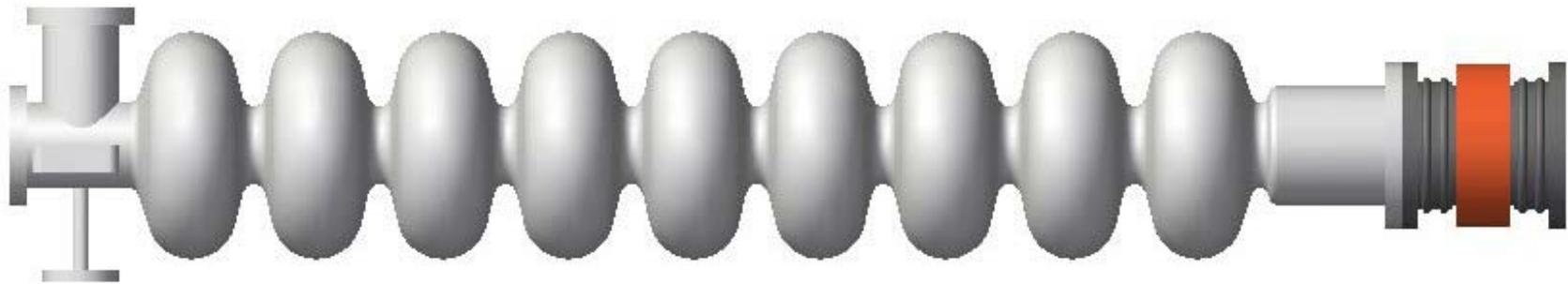


	Radius	TE11	TM01	TE21
TESLA	39 mm	2.25 GHz	2.94 GHz	3.74 GHz
Model-1	54 mm	1.63 GHz	2.13 GHz	2.70 GHz

# 108φLarge BeampipeによるHOM減衰

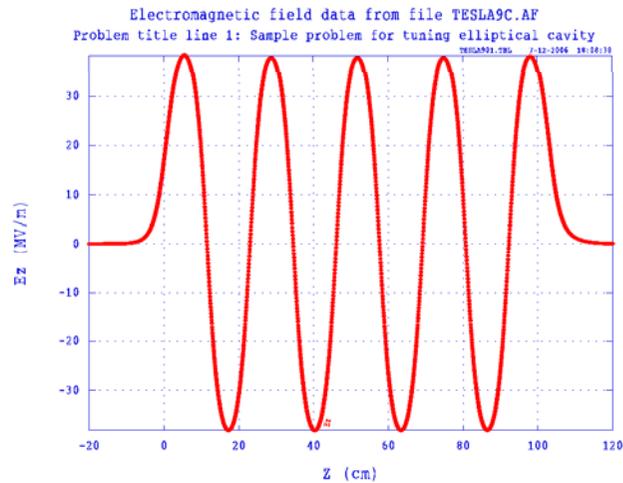
## 設計方針

- 片側のビームパイプを108φとして遮断周波数を下げ、HOMを伝播させる。HOMは吸収体で減衰させる。
  - » 遮断周波数: TE<sub>11</sub>=1.63GHz, TM<sub>01</sub>=2.13GHz
- センターセルはTESLA形状と同じ
- エンドセルは非対称とする。図の左エンドはTESLAのendcup2, 右エンドはendcup1をベースにして、加速モードのfieldがflatになるように形状を変更したもの
  - » インピーダンスの高いTM<sub>011</sub>を右エンドセルに寄せる

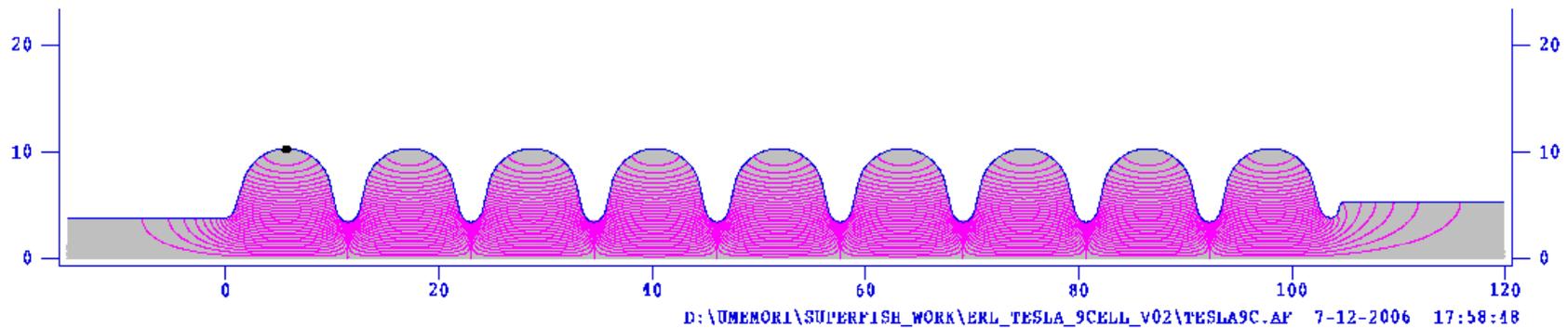


# 加速モードのパラメータ

基本的にはTESLA空洞とほぼ同じ



Frequency	1301 MHz
Transit Time Factor	0.728
Rsh/Q	1007 $\Omega$
Ep/Eacc	2.0
Hp/Eacc	4.2



# HOMのQ値の評価方法

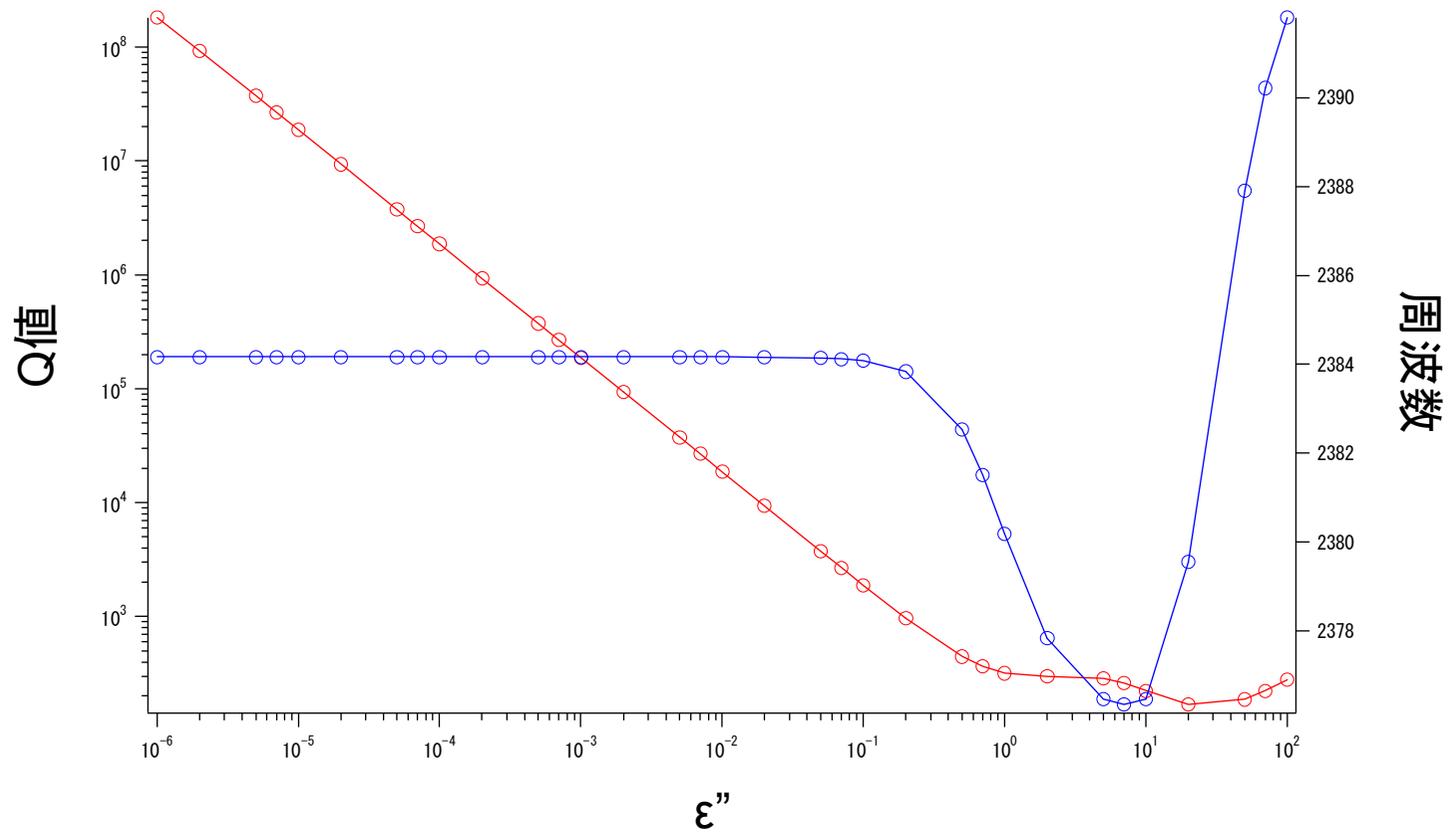
- Qextを評価
  - Superfishを用いて評価(理想的な吸収体でのロス計算)
  - MAFIAを用いて評価(2つの境界条件によるロスレス計算)
  - TM011, TM020でSuperfish/MAFIAを比較
    - » 最大factor2程度の違い。MAFIAがややover estimateの傾向。
    - » 全体的な傾向は良く一致している
- QLとQextの比較
  - 常温でのSiCおよびフェライト(KEKB使用)の誘電率、透磁率を吸収体の特性として与えて、Superfishで計算
  - TM011のモードでQextの値に近いQLが得られることを確認
  - 吸収体の低温試験は今後必要
- 以下の発表ではMAFIAを用いて求めたQextをHOMのQ値として示す

# SuperfishによるQextの評価

理想的な吸収体の場合のQ値を求めてQextとする

以下はTM011  $\pi/9$ モードの例

吸収体の誘電率を $\epsilon'=1$ とし、 $\epsilon''$ を大きくしながらQ値の変化を観測する



# MAFIAによるQextの評価

ビームパイプの境界条件としてE-boundary, M-boundaryのそれぞれでQ値を計算し、その値を足し合わせて求める  $\Rightarrow Q_{ext} = Q_1 + Q_2$   
 (もしくは近似的に $Q_1, Q_2$ のうち最大のものを $Q_{ext}$ とする)

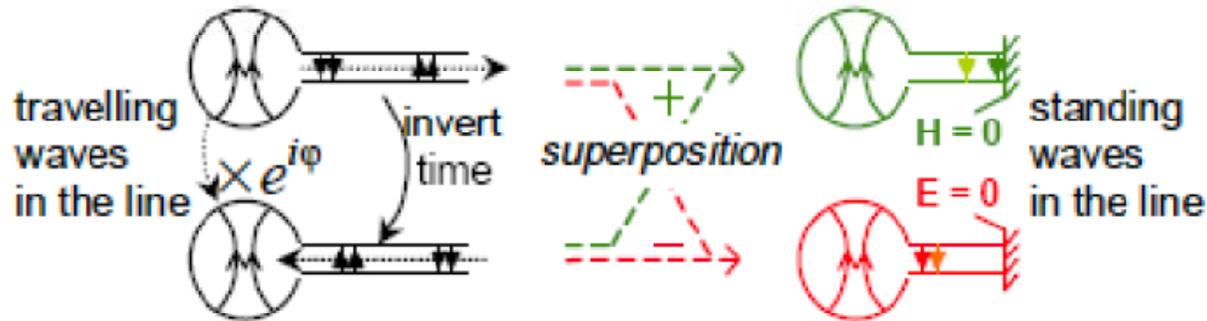
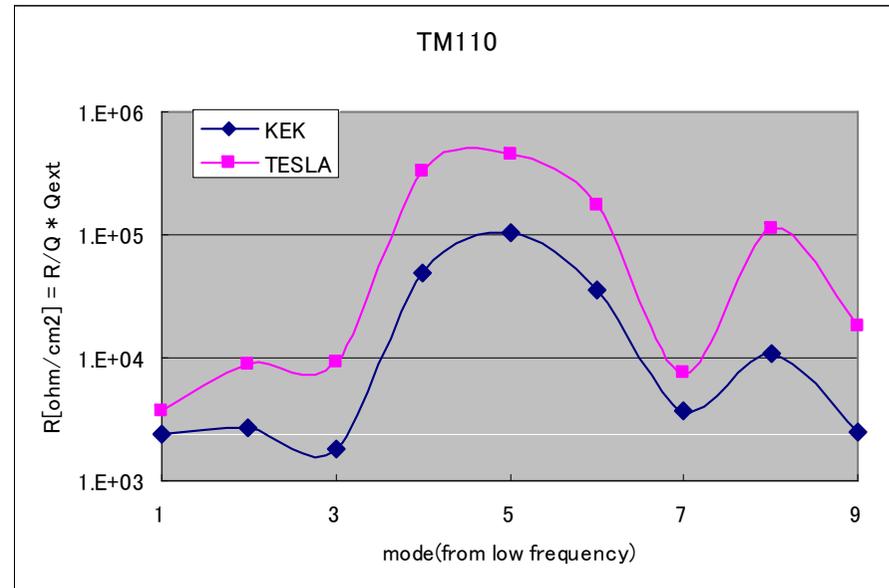
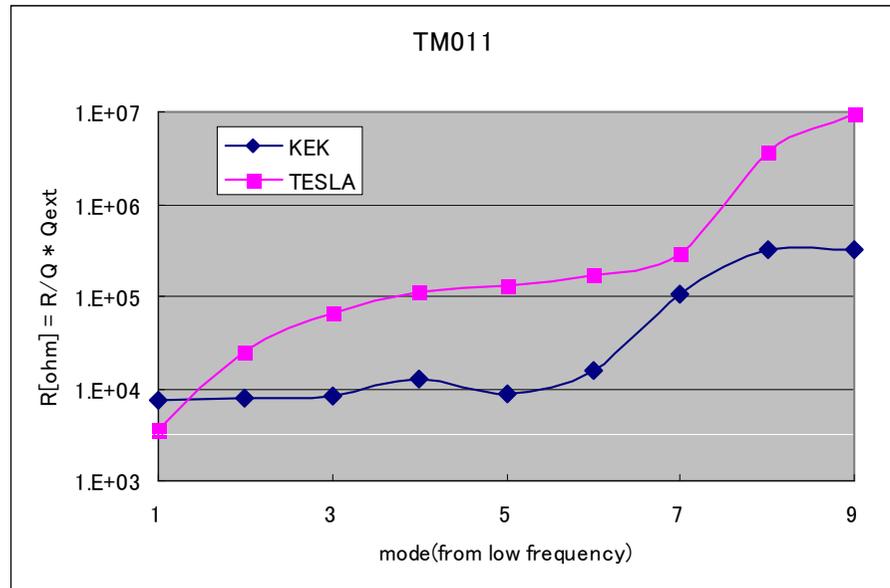


Fig. 1. Transforming a travelling-wave problem into a standing-wave one.

$$\left. \begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{\omega \iiint_{cavity} |E_1|^2 dv}{c \iint_{ref. plane} |E_1|^2 ds} = \frac{|1 + e^{i\phi}|^2}{4} Q_{ext} \\
 Q_2 &= \frac{\omega \iiint_{cavity} |H_2|^2 dv}{c \iint_{ref. plane} |H_2|^2 ds} = \frac{|1 - e^{i\phi}|^2}{4} Q_{ext}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 |1 + e^{i\phi}|^2 + |1 - e^{i\phi}|^2 &= 4 \\
 \Downarrow \\
 Q_{ext} &= Q_1 + Q_2
 \end{aligned}$$

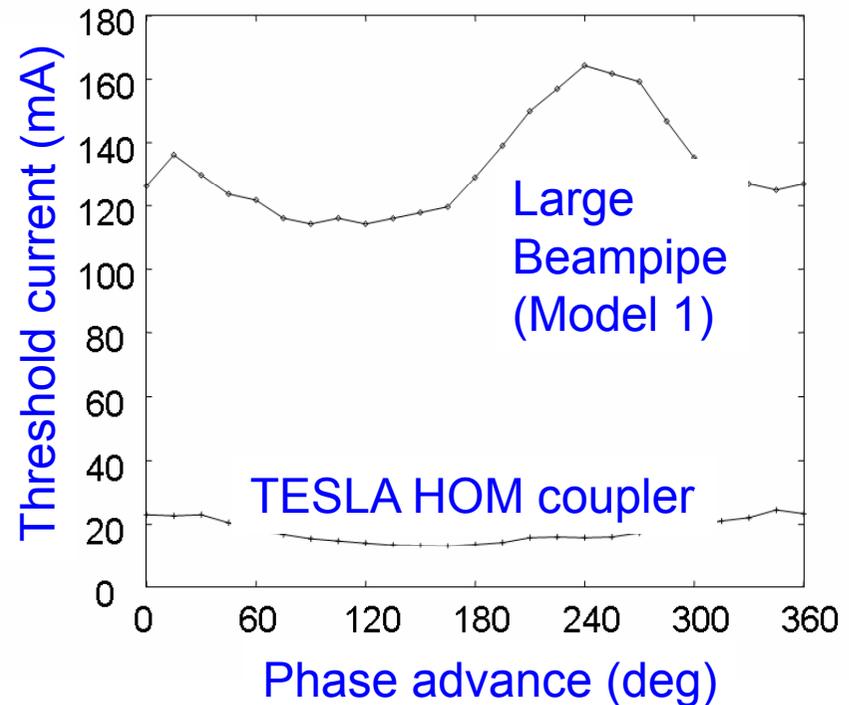
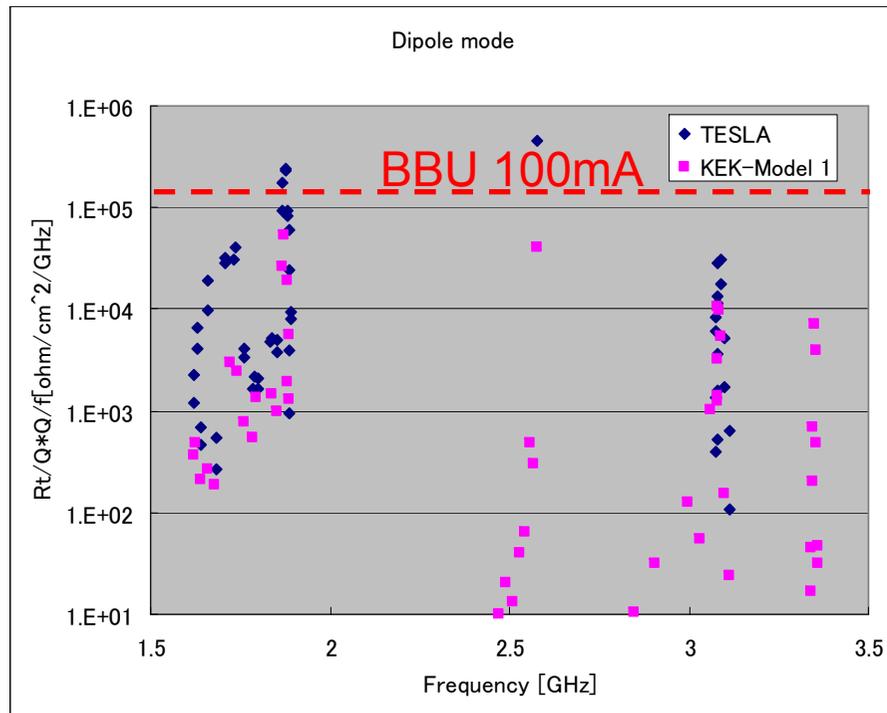
# TESLA型HOMカップラーとの比較



- 典型的な例としてTM011, TM110について示す
- TESLAと比較して、数倍～10倍のHOM減衰が得られている。 ⇒ Large beampipeは効果的である！！
- TM011, TM110以外のHOMにも効果的

# TESLA空洞 / KEK model 1のHOM比較

(TESLA loop coupler / Large beampipeの比較)



[羽島氏、放射光学会アブストラクト]

Large beampipeを用いることにより、TESLA model (TESLA 空洞 + TESLA ループ HOM coupler) より1桁近くHOMを減衰させることができる ⇒ Large beampipeは効果的

## さらなるHOM対策の検討... Model 2空洞へ

Model 1空洞でも計算上は100mA可能であるが、ERL用の空洞としてはさらにHOMに対してはマージンを持たせたい

- 空洞形状を変える ⇒ Model 2空洞
  - アイリス径、空洞半径、エンドセル...
- セル数を少なくする ⇒ 今回は採用しない
  - インピーダンスを半分程度にする効果はある

		9セル			7セル		
		Rsh/Q	Q	Rsh	Rsh/Q	Q	Rsh
TM011	$\pi/9$	159	1730	$2.8 \times 10^5$	156	868	$1.3 \times 10^5$
TM012	$8\pi/9$	46	118000	$5.4 \times 10^6$	33	44500	$1.5 \times 10^6$
		Rt/Q	Q	Rt	Rt/Q	Q	Rt
TM110	$5\pi/9$	9	10700	$9.4 \times 10^4$	7	8000	$5.8 \times 10^4$
TE-iris		23	4256	$9.6 \times 10^4$	17	2100	$3.6 \times 10^4$

# 空洞デザイン その2 ～空洞セル形状の最適化～

KEK-ERL model-2空洞

## 空洞の設計方針

- BBUを引き起こすダイポールHOMのインピーダンスが小さくなるようにする
- 2.6GHzの整数倍付近にモノポールHOMが存在しないようにする
- 加速モードのインピーダンスをできるだけ落とさないようにする

# 空洞デザインのスタディー

- アイリス直径

- アイリス直径が大きい方が dipole modeのHOM減衰には効果的である

- ▶ アイリス径80~90mmあたりが良さそう

- その代わりに、アイリス径を大きくすると加速モードのRsh/Qは下がってしまう

- ▶ アイリス径70, 80, 90, 100mmの場合に、Rsh/Q はそれぞれ1000, 900, 800, 700Ω。

- Monopole modeは比較的インピーダンスの高いモードが現れる傾向がある

- 空洞直径

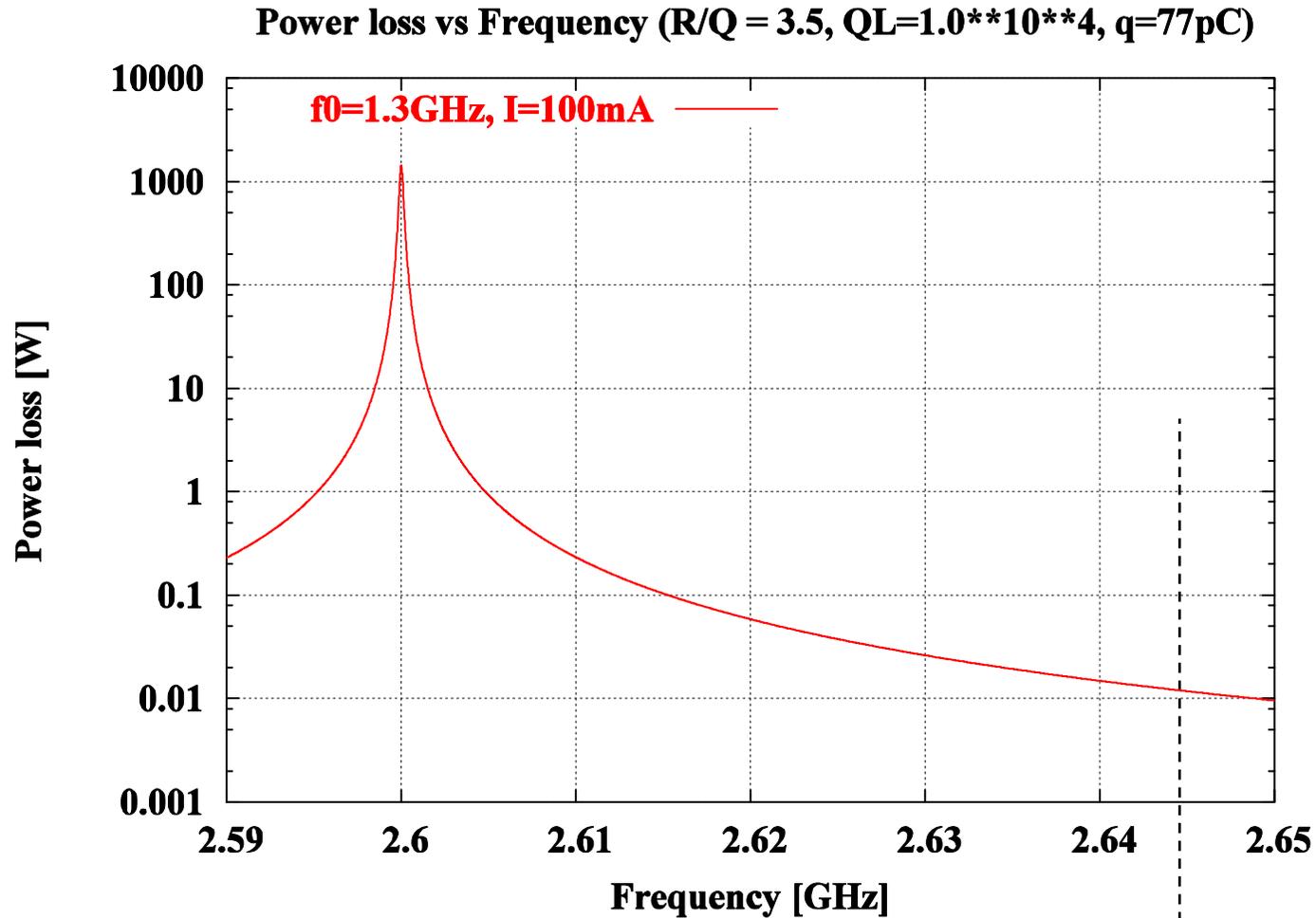
- 空洞直径はTM020のパスバンドが2.6GHzの周波数にかからないような設計にした。

# アイリス径のスタディー

	TM010	TE-iris			TM110		
	Rsh/Q	Rt/Q	Qext	Rt/Q*Q/f	Rt/Q	Qext	Rt/Q*Q/f
70phi	1010	22	9500	80000	9	10000	49000
80phi	890	11	4000	18000	6	7600	24000
90phi	780	5	4600	13000	4	7000	13000
100phi	690	3	1000	1000	4	9700	24000

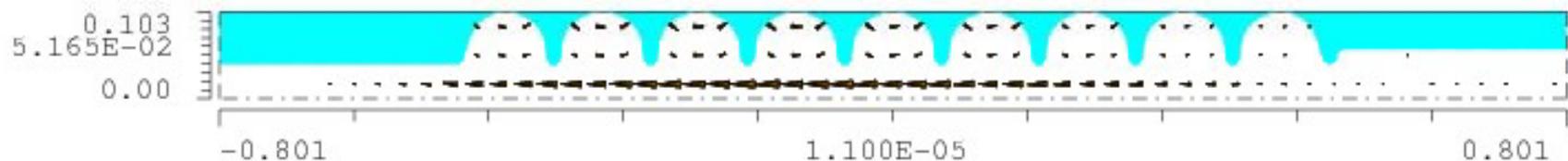
- このスタディー時の条件
  - セルの赤道部の形状はTESLA空洞の形状を用いた
  - ビームパイプはφ118mmとした
  - 左右対称形状を用いた
- 上記モードに限らず、dipole mode全般をかなり効率的に減衰できている様子

# モノポールモードの具体例2.645GHz (TM020 $\pi/9$ )



$R/Q = 3.5$ ,  
 $Q_L = 1.0 \times 10^4$ ,  
 $q = 77\text{pC}$  で計算。

$P = 0.011\text{W}$  at  
2.645 GHz



# KEK-ERL Model-2空洞のデザイン

## 設計方針

DipoleのHOMのインピーダンスが小さくなるよう設計

2.6GHzの整数倍付近にHOMがない設計

### 1) 空洞セル形状をERL用に設計

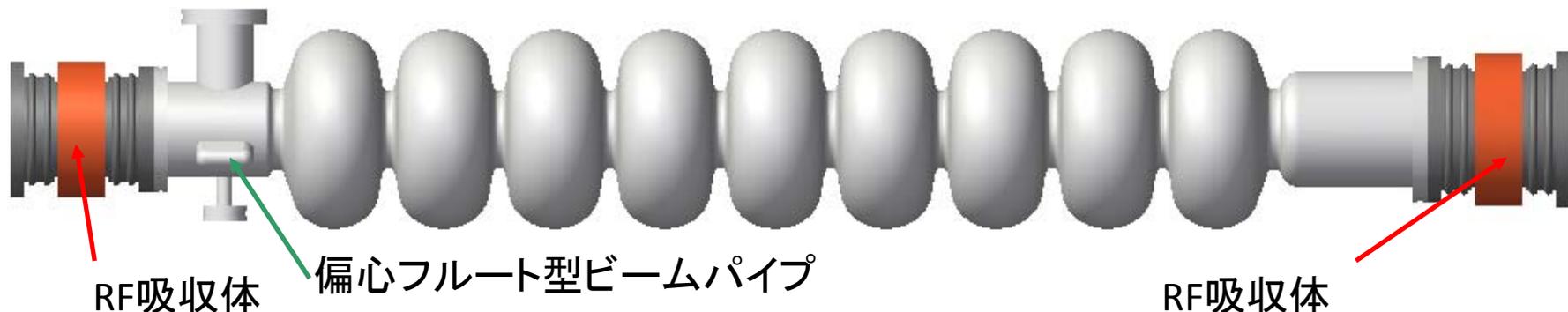
➤ アイリス直径 80mm, 赤道部には楕円形状を採用

### 2) 大口径ビームパイプ+RF吸収体で高次モードを減衰

➤ ビームパイプ直径 120mm & 100mm

### 3) 偏心フルート型ビームパイプ

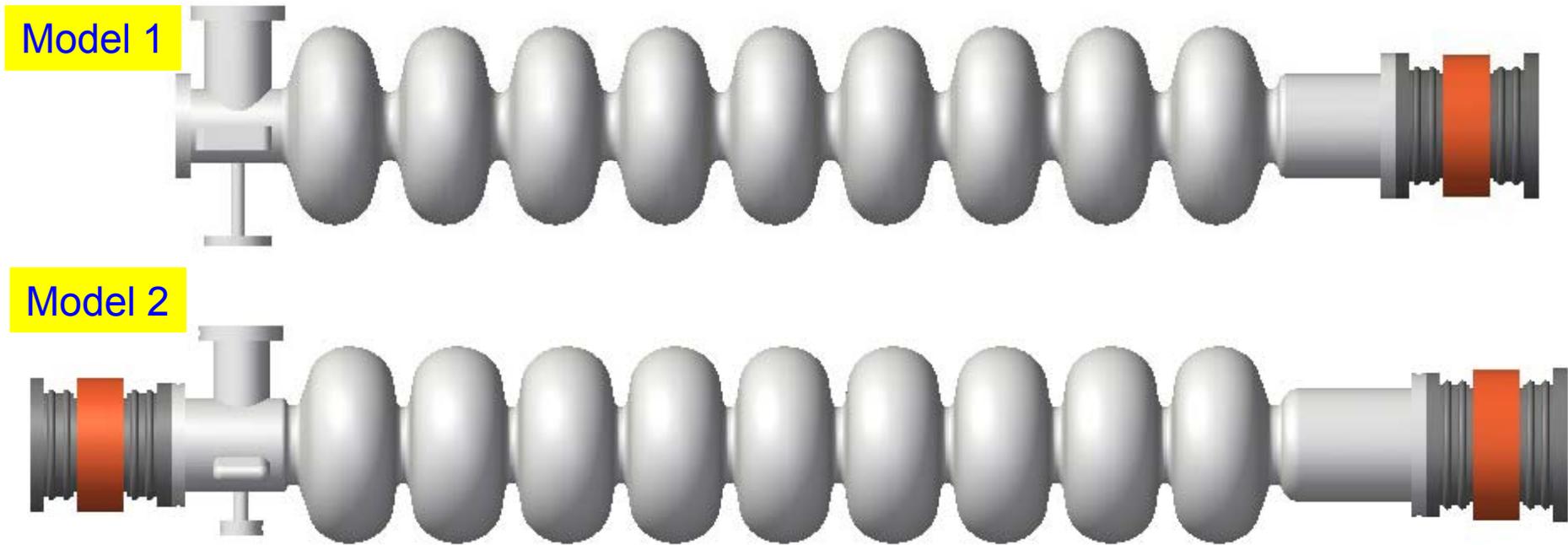
➤ Quadrupoleの高次モードのインピーダンスを落とす



## セル形状

	左エンドセル	中央セル	右エンドセル
半セル長	57.7 mm	57.7 mm	57.7 mm
半径	103.3 mm	103.3 mm	103.3 mm
赤道長軸(Z)	41.0 mm	46.8 mm	42.0 mm
赤道短軸(R)	41.0 mm	42.0 mm	42.0 mm
赤道直線部	1.0 mm	1.0 mm	1.0 mm
アイリス短軸(Z)	9.7 mm	6.7 mm	7.9 mm
アイリス長軸(R)	9.7 mm	13.4 mm	7.9 mm
アイリス直線部	1.0 mm	1.0 mm	1.0 mm
ボア(アイリス)径	42.0 mm	40.0 mm	42.0 mm
Wall angle	15.9 deg	9.2 deg	17.1 deg

## Model 1とModel 2空洞の比較

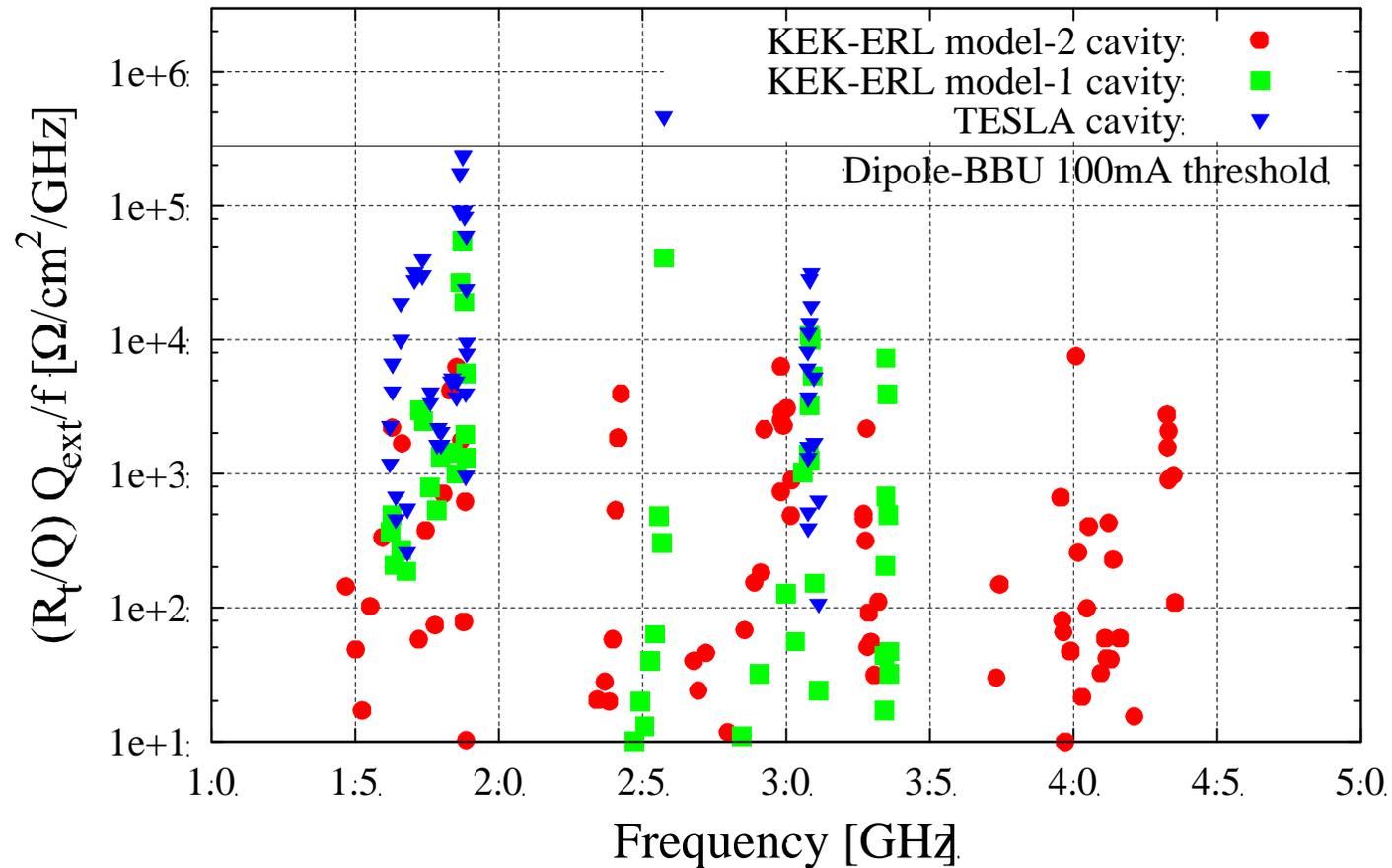


### 加速モードのパラメータ

	Model 2	Model 1		Model 2	Model 1
Frequency	1300 MHz	1300 MHz	Iris diameter	80 mm	70 mm
Rsh/Q	897 $\Omega$	1007 $\Omega$	$Q_0 \times R_s$	289 $\Omega$	272 $\Omega$
Ep/Eacc	3.0	2.0	Hp/Eacc	42.5 Oe/(MV/m)	42.0 Oe/(MV/m)
Coupling	3.8 %	1.9 %			

# Dipole mode

## ～ TESLA / Model 1 / Model 2 比較～



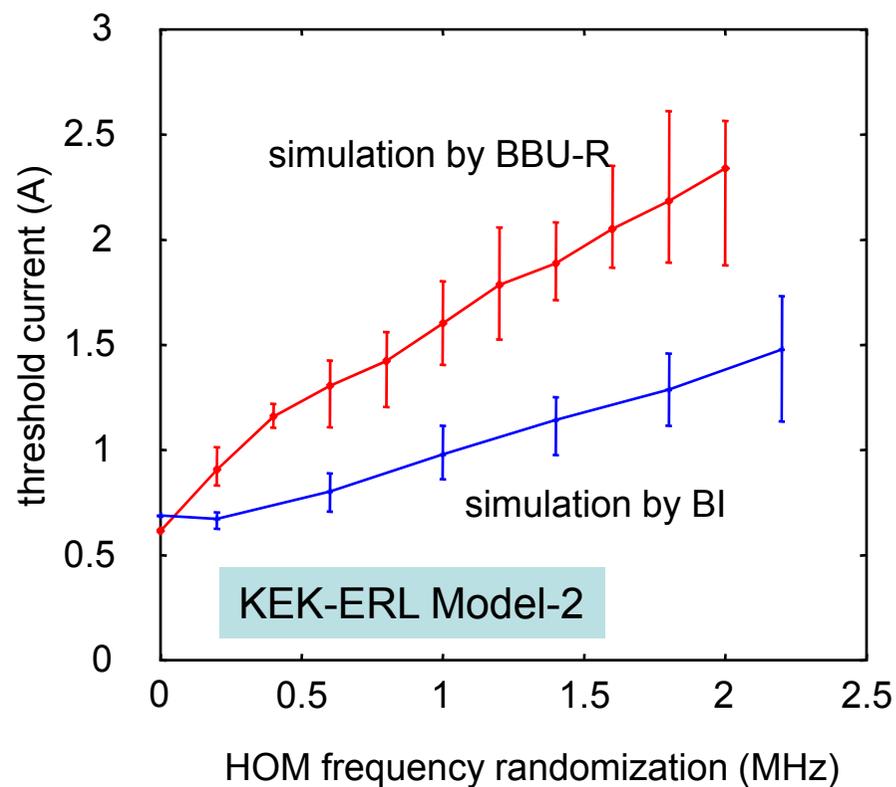
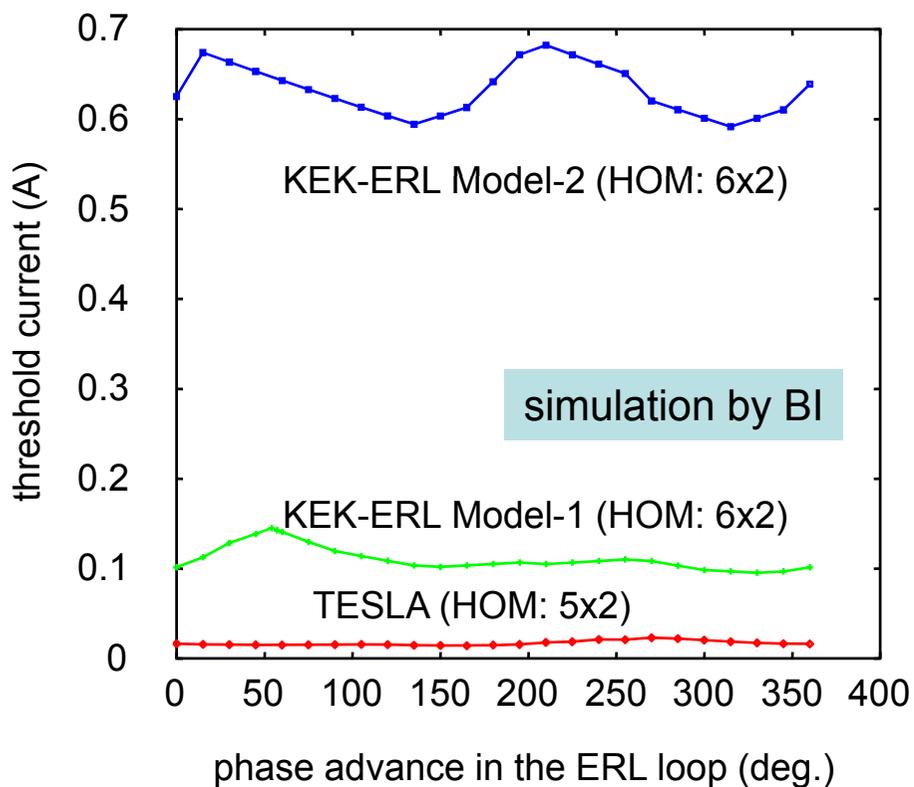
ERL 100mA 運転で要求されるよりも 1桁以上、HOM インピーダンスを小さくすることができた

# HOM-BBU 閾値電流

(原子力機構・羽島氏による計算結果)

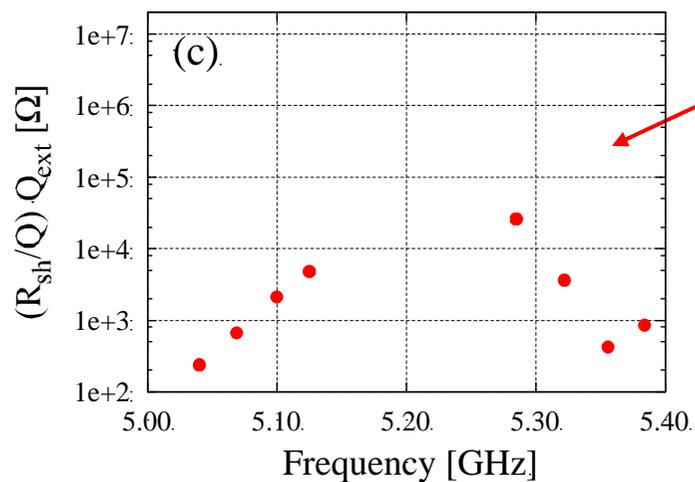
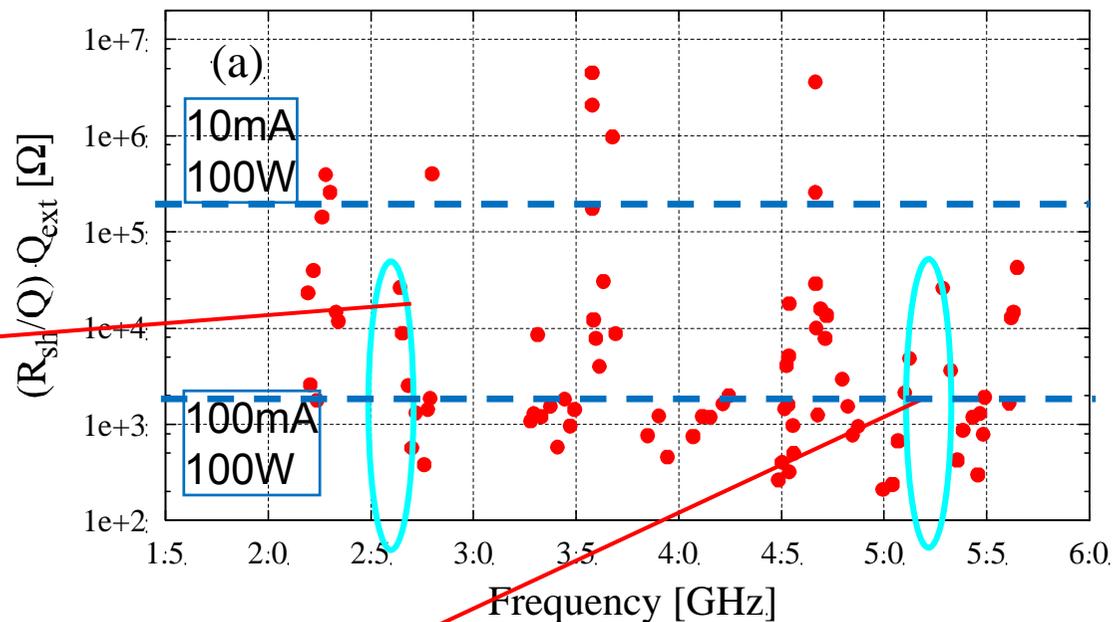
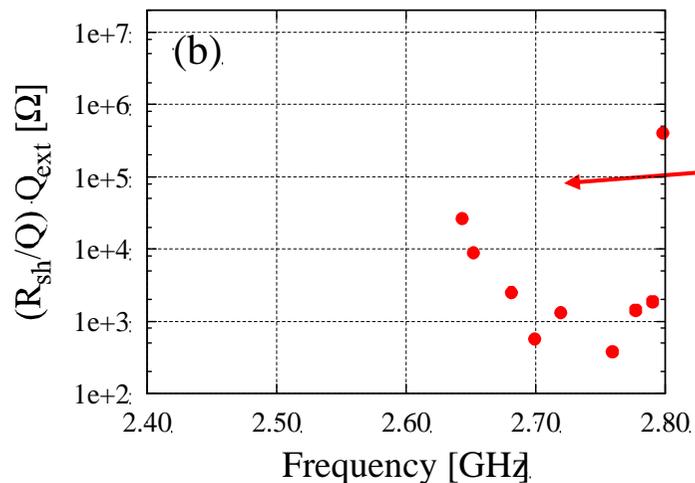
$E_{inj} = 10 \text{ MeV}$ ,  $E_{loop} = 5 \text{ GeV}$ ,  $E_{acc} = 20 \text{ MV/m}$

BI : Cornell大学で開発された計算コード  
BBU-R : 原子力機構で開発されたコード



BBU不安定性の閾値電流が大幅に改善された  
KEK-ERL model-2 cavityでは600mA以上が見込まれる

# Monopole mode



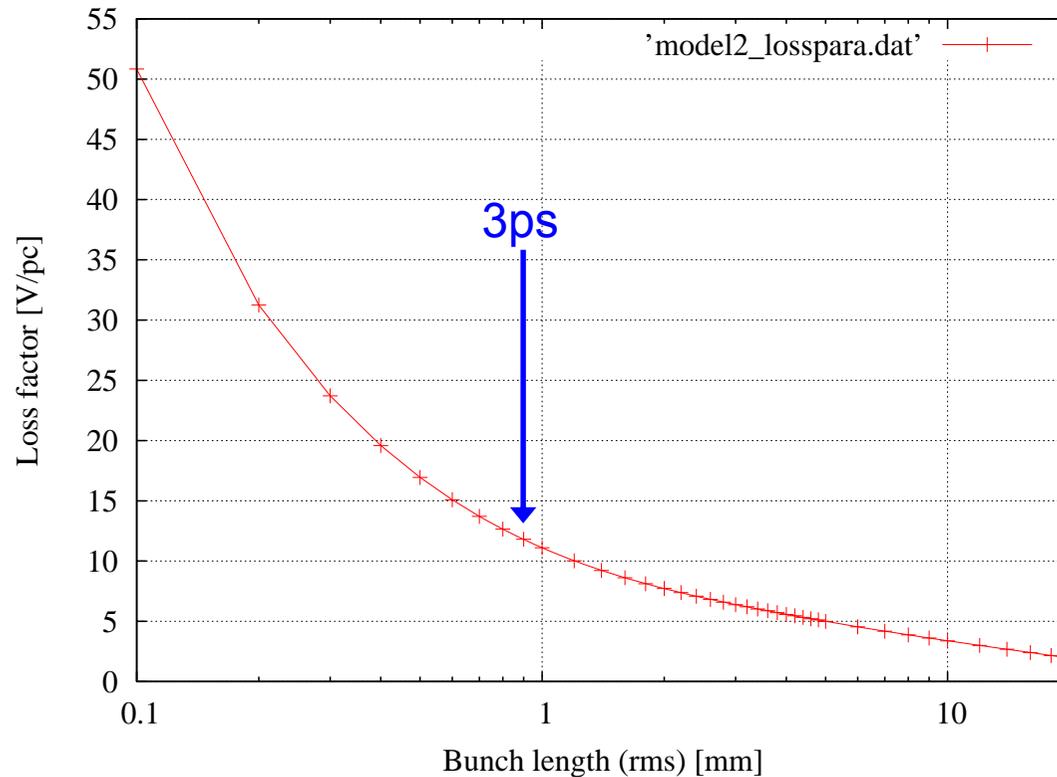
2.6GHzならびに5.2GHz周辺にはインピーダンスの高いモードは無い

3.9GHz周辺もOK

それ以外の周波数にはインピーダンスの高いモードがあるので、周波数を落とした運転を行う時には、注意が必要

# ロスファクター

[KEK-PF 伊澤氏より]



- 上記計算結果は、加速モードのloss factor ( $\sim 2\text{V/pC}$ ) 込みの値。空洞形状からのロスのみ。RF吸収体は含まず。
- バンチ長  $3\text{ps}$  ( $=0.9\text{mm}$ ) の時、HOMによるロスファクターは  $12-2=10\text{V/pC}$   
→  $77\text{pC/bunch}$ ,  $1.3 \times 2 = 2.6\text{GHz}$  のビーム繰り返しだと  $\sim 150\text{W}$

## 空洞設計のまとめ

- ERL用に最適化した空洞デザインを行った。
- 大口径のビームパイプを用いることでHOM減衰を強化した。
- 空洞形状も検討し、アイリス径を大きくすることで、特に dipole modeのHOMを強力に減衰できる空洞とした。BBUしきい値に対して1桁近いマージンを持った設計となっている。
- Monopole modeは1.3GHz運転時に問題となる2.6GHz, 5.2GHz周辺にはHOMは存在しない。ただし、それ以外の周波数にはインピーダンスの高いモードが存在するので、1.3GHz以外の周波数で運転する際には注意が必要。
- 加速モードは $R_{sh}/Q \sim 900$ ,  $E_p/E_{acc} = 3.0$ となった。

# その他の大電流ERL用空洞(1) JLAB

## Concepts

ERL07 R. Rimmer

Take the best from JLab experience and high-current storage ring technology\*.

General layout:

- Waveguide damped 5-cell cavities.
- Six cavities per cryomodule at 16.7 MV/m - 20 MV/m.
- Good packing factor with real-estate gradient  $\sim 10$ -12 MV/m.
- HOM power dissipated at room temperature.
- High-current optimized cell shape gives good efficiency
- Cell shape also has good HOM frequency spectrum.

\* PEP-II storage ring designed for 3A stored beam at 9 GeV



Voltage	100-120 MV
Length	$\sim 10$ m
Frequency	748.5 MHz
Beam Aperture	$>3''$ (76.2mm)
BBU Threshold	$>1$ A
HOM Q's	$<10^4$
Beam power	0-1MW

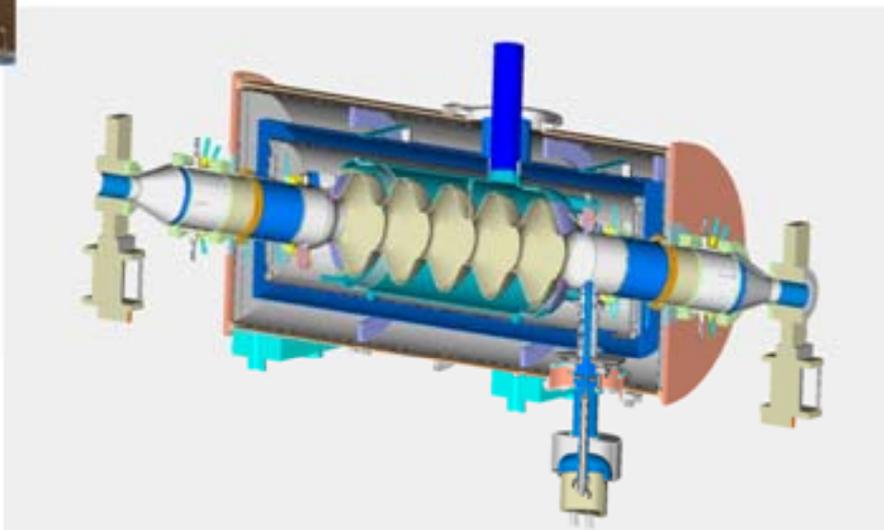
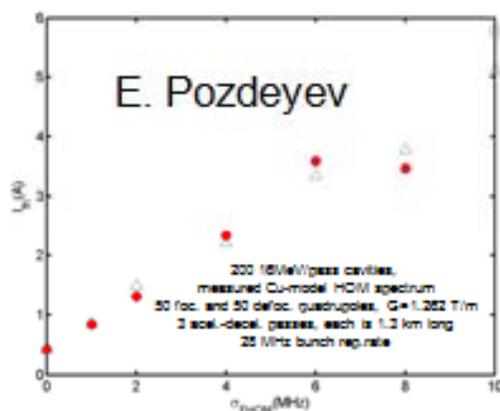
# その他の大電流ERL用空洞(2) BNL

## ERL Ampere-Class Cavity

ERL07 I. Ben-Zvi



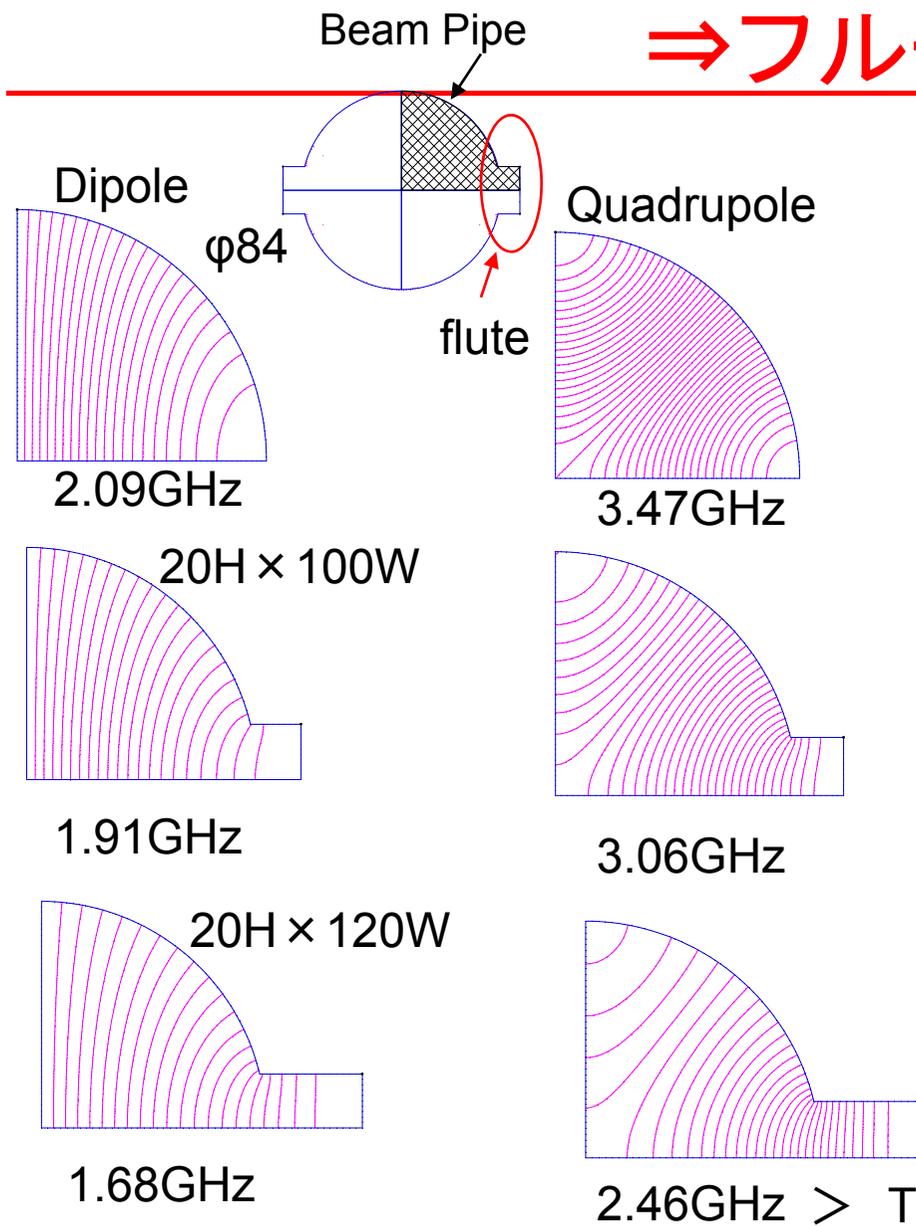
Fully damped "single mode" cavity at 703.75 MHz  
Allows ~ampere in 3 pass eRHIC.  
Also used for electron cooler.



# 偏心フルート型ビームパイプによるQuadrupole HOMの抑制

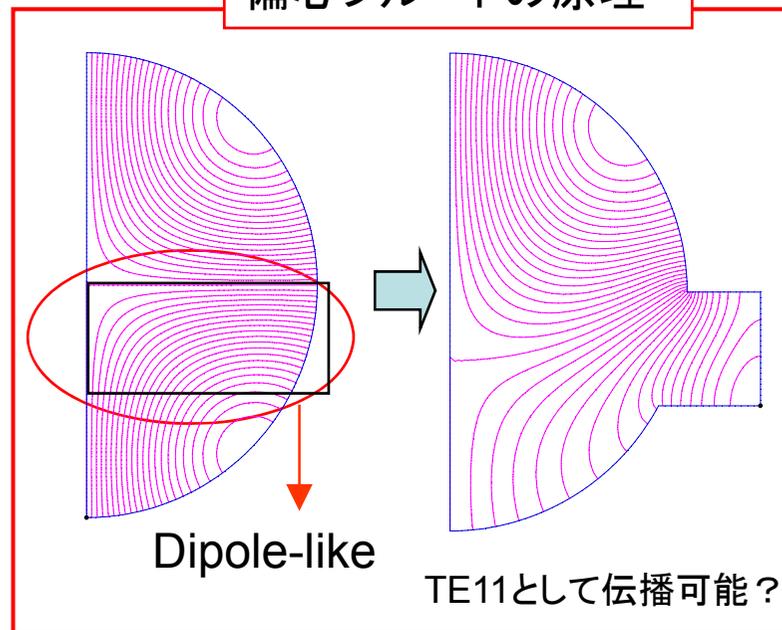
# 遮断周波数を下げる

## ⇒フルート付ビームパイプ

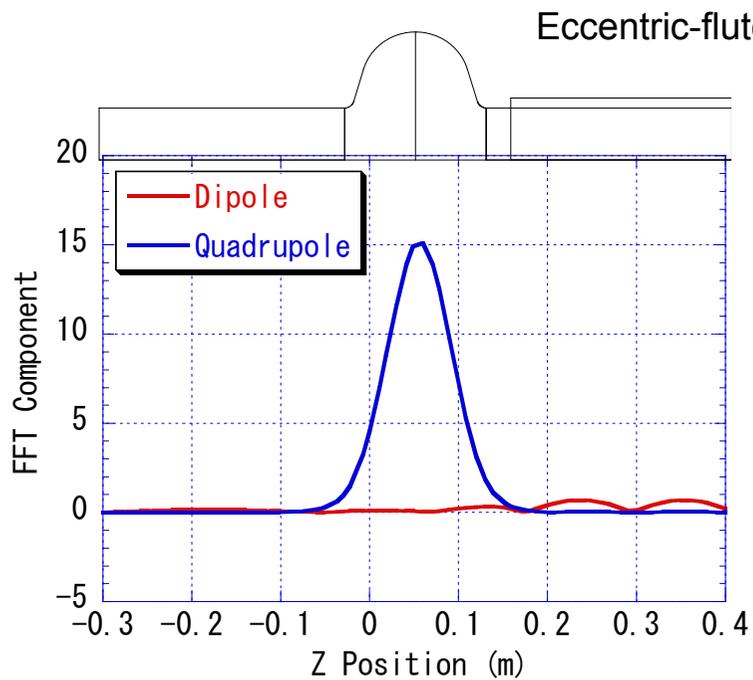
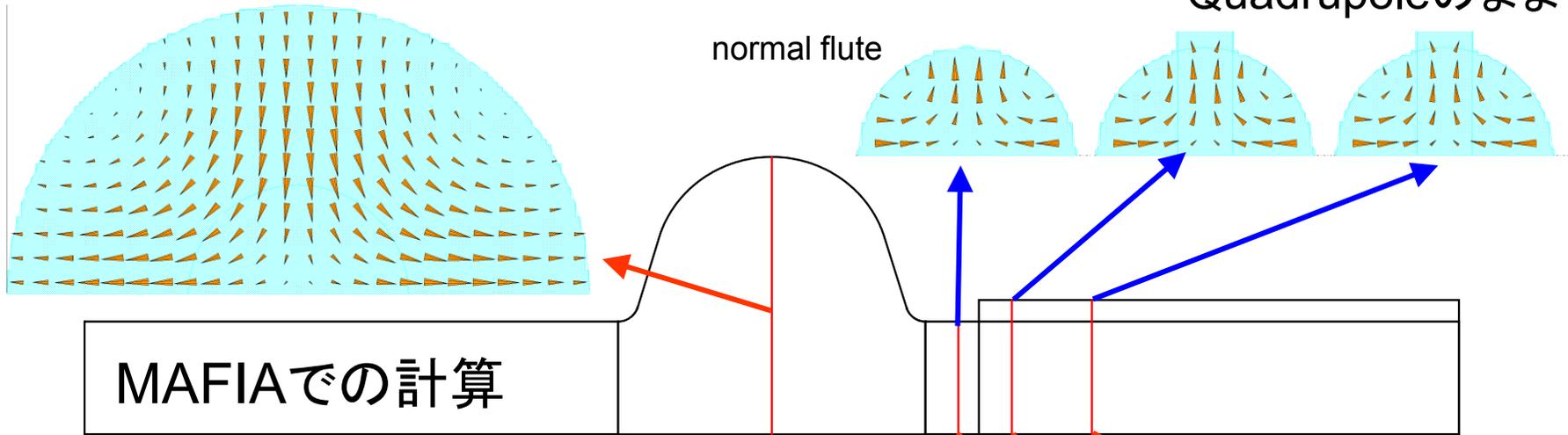


FLUTEによりQuadrupoleの遮断周波数も下がるがモードはQuadrupoleのまま

偏心フルートの原理



# 電界断面図



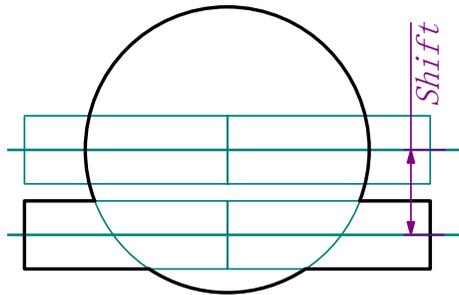
フーリエ成分



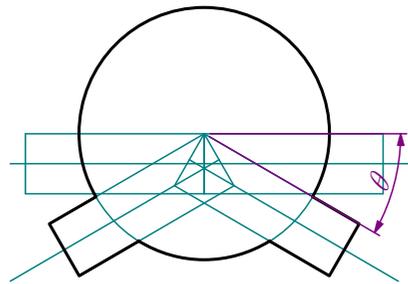
- Eccentric-fluteにより Quadrupoleから Dipoleに変遷

# 偏心フルートの設計

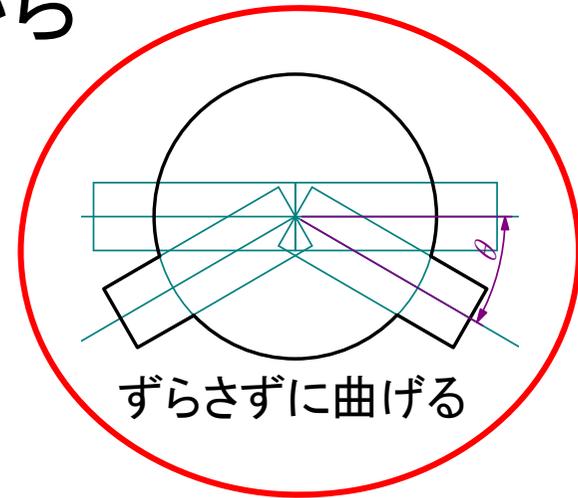
- 偏心の仕方⇒製作しやすさから



平行にずらす

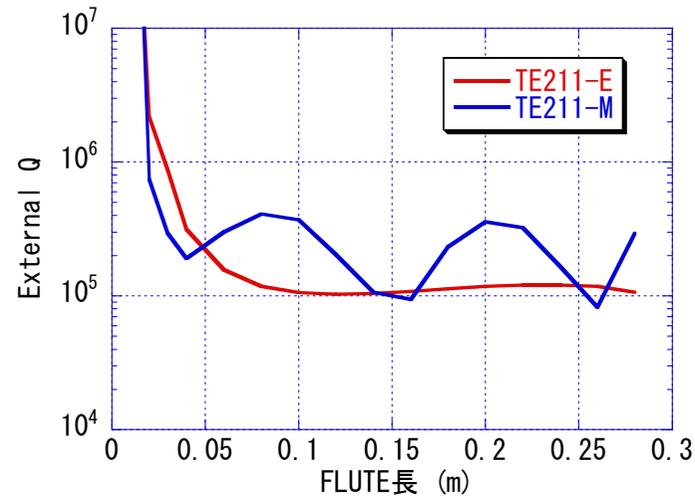


平行にずらして曲げる



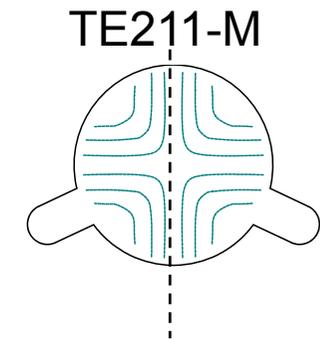
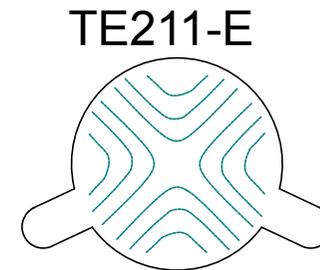
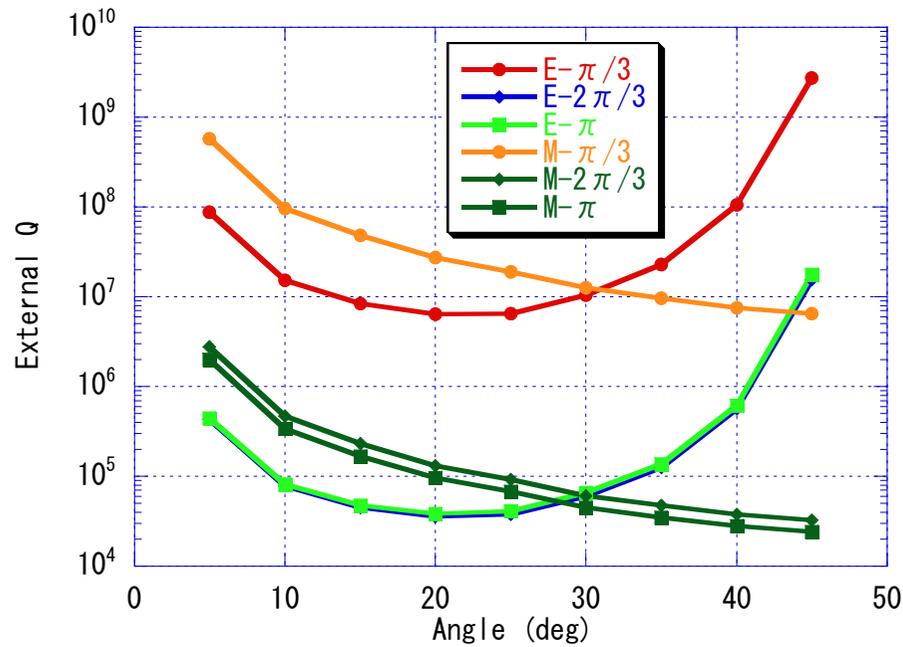
ずらさずに曲げる

- 長さ⇒5cm程度あれば良い



# 偏心フルートの設計(続き)

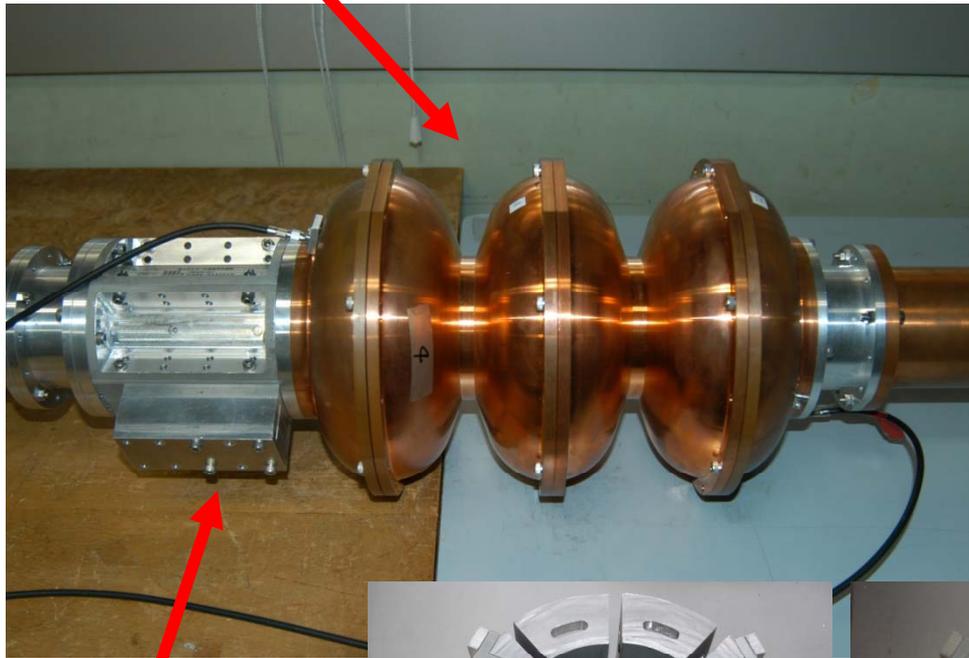
- 角度 $\Rightarrow 20\sim 30^\circ$  なら両モードとも低くなる



対称面の境界条件が  
Magnetic

# Model空洞による計算との比較

- TESLA空洞3セル

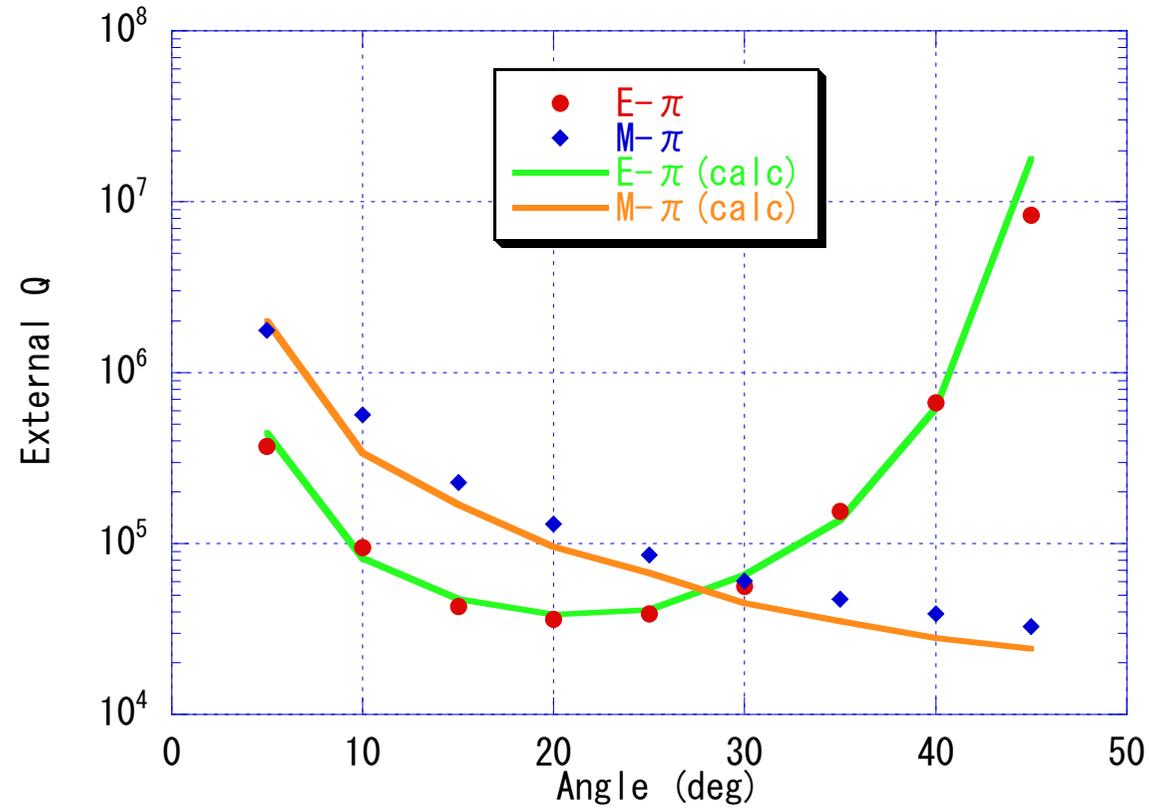


角度可変

- 偏心フルート



# 測定結果



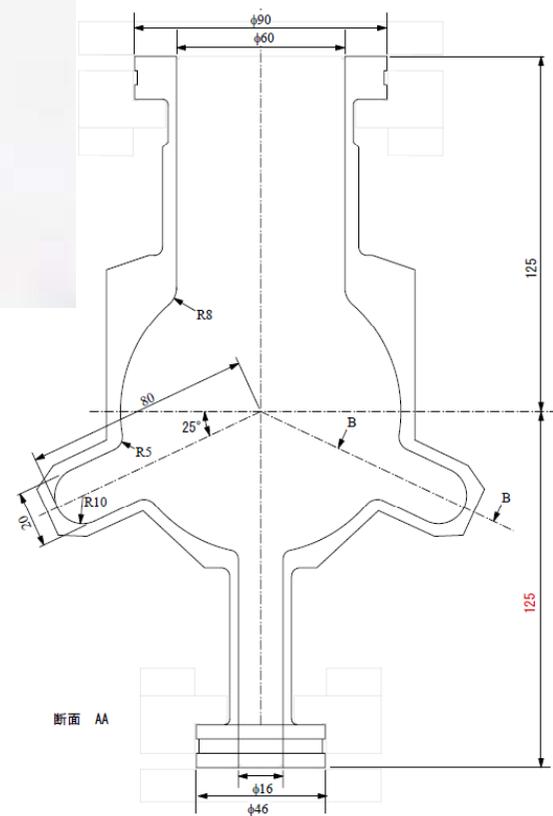
- 計算と測定結果とほぼ一致した

# Nb9セル空洞 & 偏心フルート



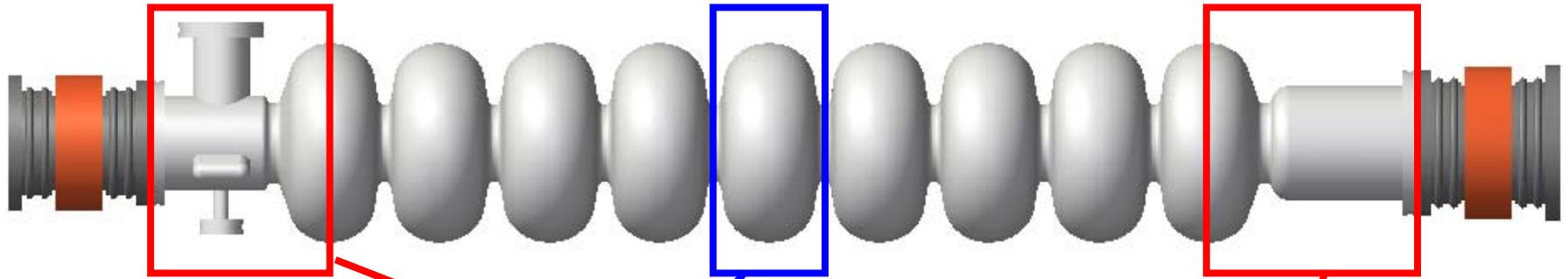
偏心フルート

ビームパイプ  
断面図



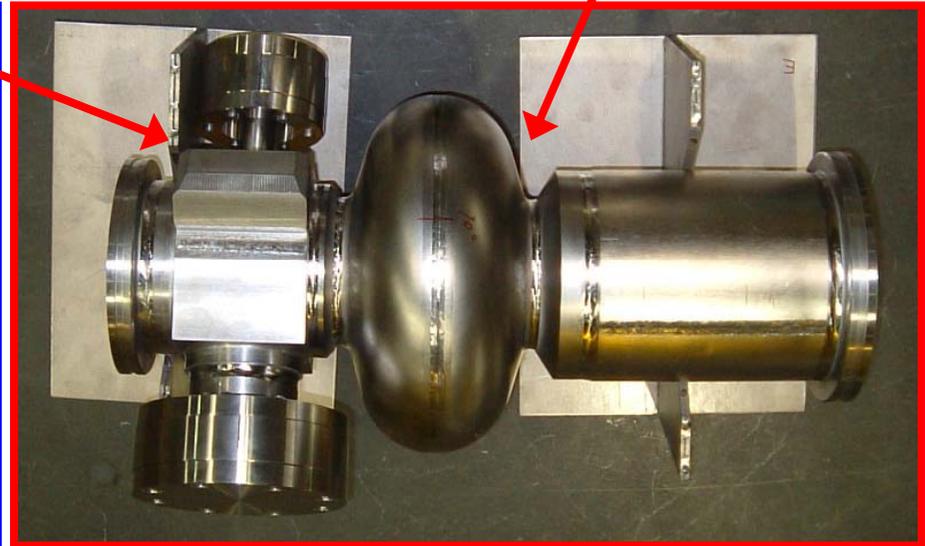
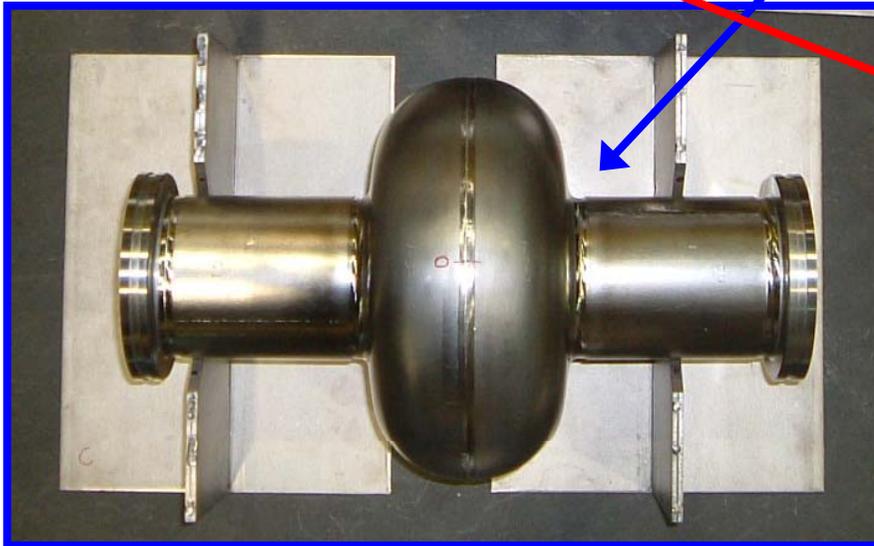
# 単セル空洞の縦測定による 性能試験

# シングルセル空洞の目的



センター型シングルセル空洞

エンド型シングルセル空洞



## 目的

- 新しく設計したセル形状の検証  
主にセル赤道部でのマルチパクタリング
- 空洞内面の表面処理工程の確認

## 目的

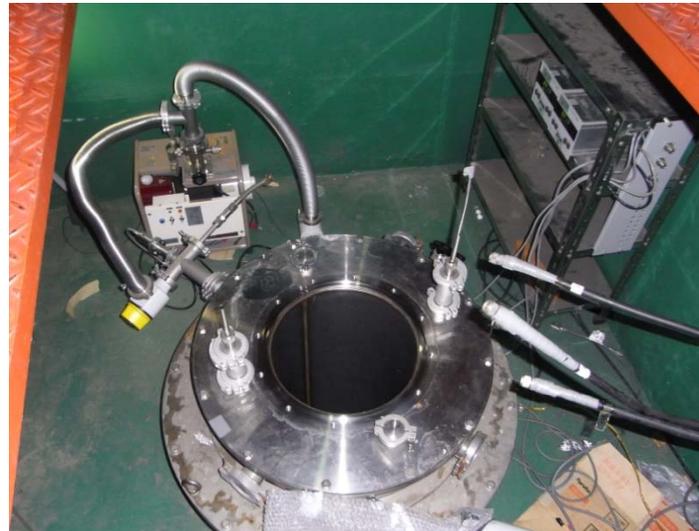
- ビームパイプ部分の形状の検証  
(偏芯フルート、テーパ形状、入力ポート、ピックアップポートなど)

## 表面処理、縦測定 of 工程

バフ研磨	溶接部を#400で研磨
バレル研磨	約60um研磨(5時間×2回)
電解研磨(EP-1)	約100um研磨
アニール	750°C、3時間
電解研磨(EP-2)	約20um研磨
超音波洗浄	50°C、1時間
純水高圧洗浄	8MPa、1.5時間
空洞アセンブリ	
ベーキング	130°C、24時間
縦測定	2007/10/11-12に測定

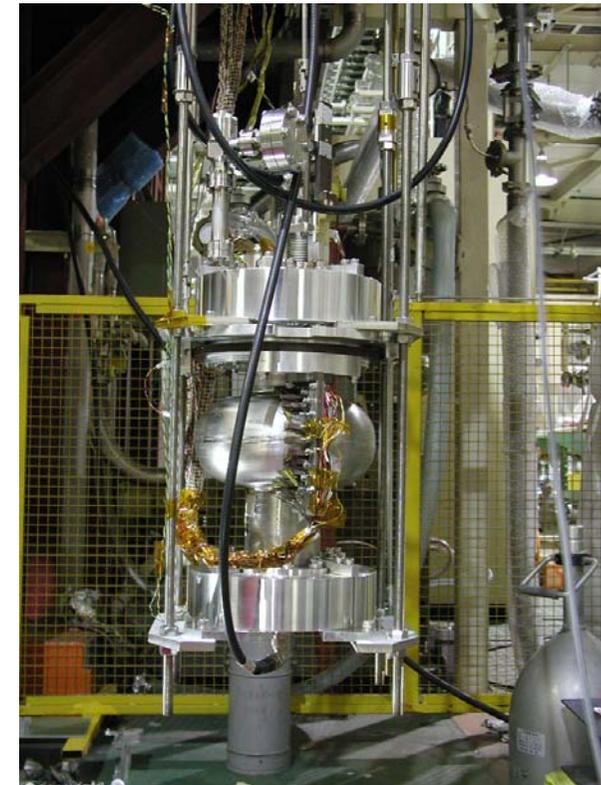
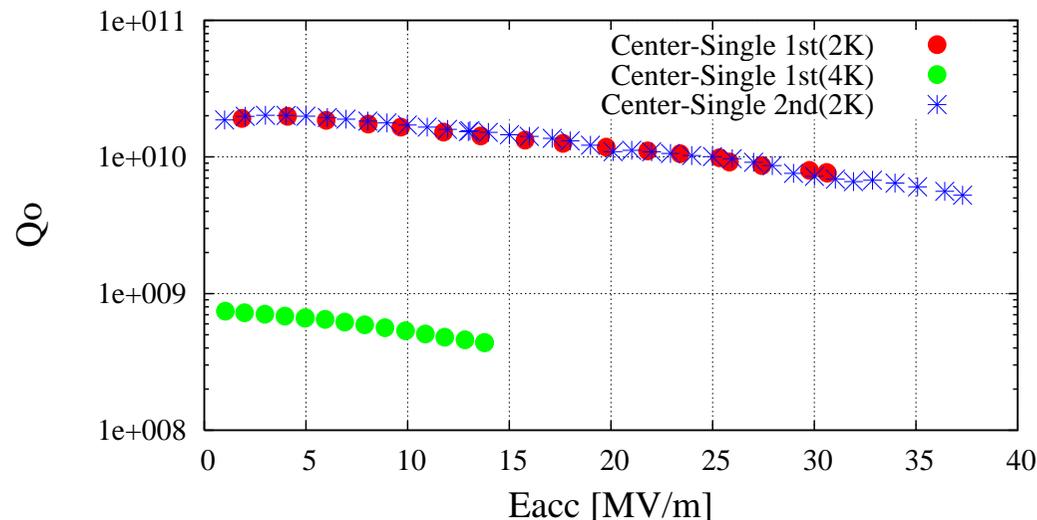
※ バフ研磨を除いて、基本的にSTF-BLグループの工程と同じ

# KEK-D10エリアでの 単セル空洞の縦測定



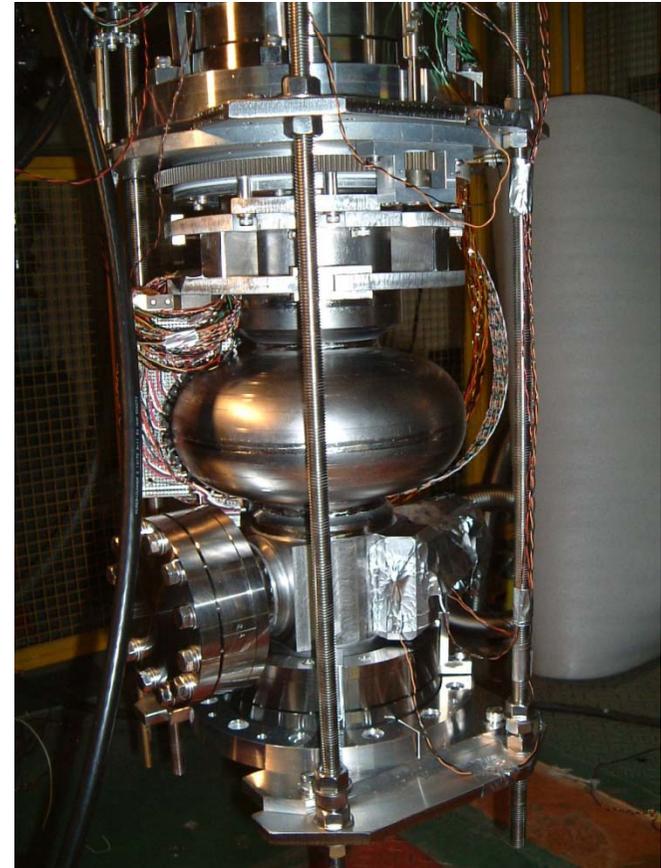
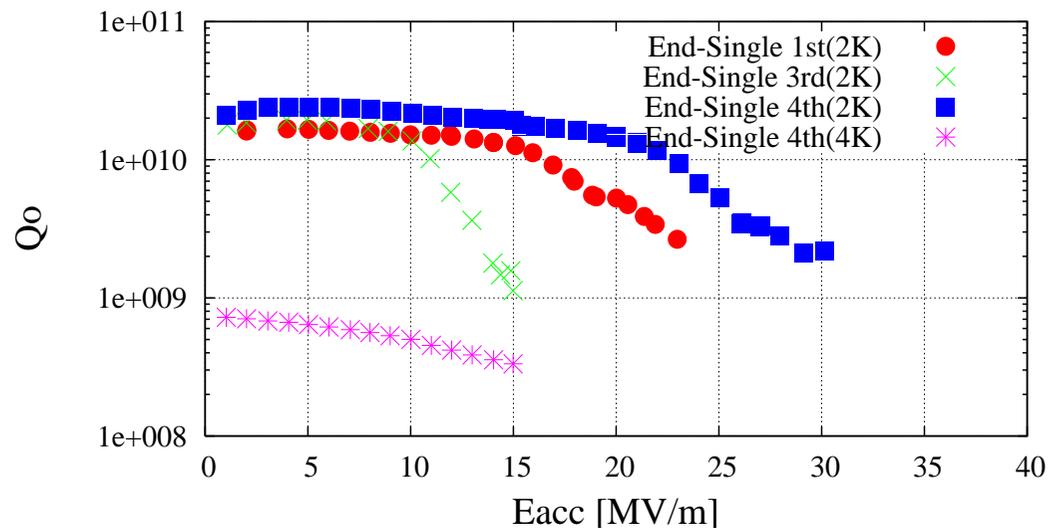
# センターセル型単空洞の縦測定結果

- セル形状の検証、表面処理工程の確認
- D10電源棟にて縦測定
- 35MV/m以上の高電界を達成
- $Q > 1e10$ を25MV/mで達成
- リミットは排気容量によるもの



# エンドセル型単空洞の縦測定結果

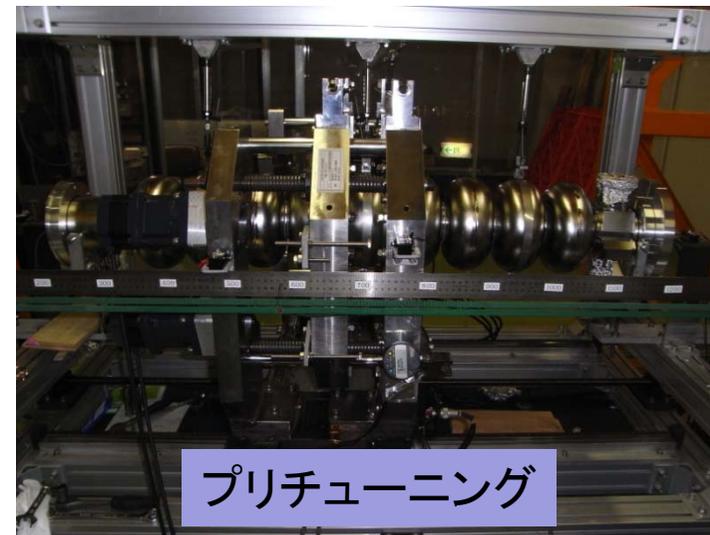
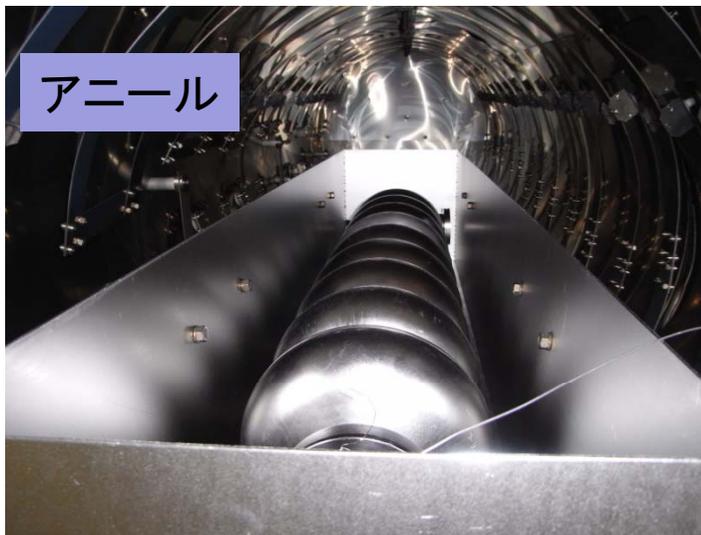
- ビームパイプの構造の検証
- D10電源棟にて縦測定
- 2回目の電解研磨 (EP-2) にて、30MV/mを達成
- 22MV/mで $Q > 1e10$ をクリア
- フィールドエミッションで制限





# 9セル空洞の開発状況

- 昨年度、ERL用9セル空洞が完成
- 電解研磨 → アニール → プリチューニング → 仕上げ電解研磨 → アセンブリ → ベーキングの一連の表面処理工程を終えた。
- 9月にKEK-STF棟にて最初の縦測定を予定



# 周辺コンポーネント

入力カップラー

HOMダンパー

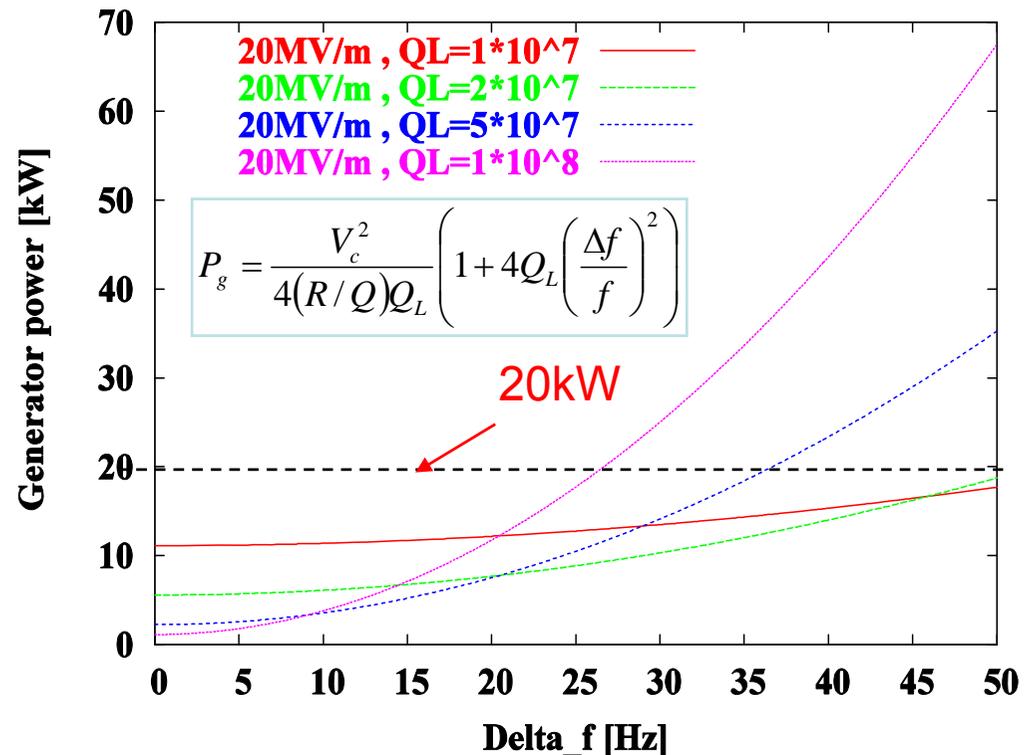
周波数チューナー

クライオモジュール

# Input couplerの設計

ERLではエネルギー回収と超伝導空洞の高いQ値のおかげで投入パワーは少なくすむが、実際には高いQL値では超伝導空洞の共鳴幅が非常に狭くなり、外乱の影響などによる周波数のずれからデチューニングが厳しくそれを補うための投入パワーが大きくなる。(右図参照)。今のところ外乱の影響は大体50Hz以下と見積もられており、そこから逆算すると $QL = 2 \times 10^7$ にて20kWのパワーが必要となる。さらにpulseでのカップラーのconditioningなどを考えて我々はさらに低いQLに変えるような設計方針とした。

投入パワーと周波数のずれの関係

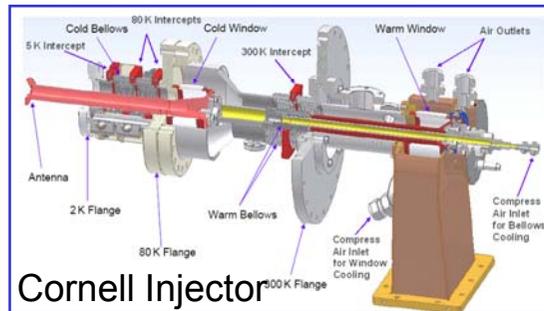
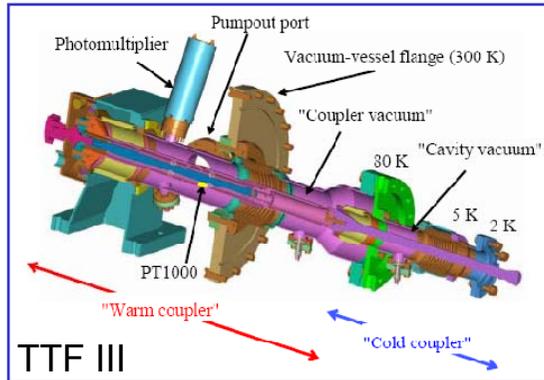


共振周波数からの周波数のずれ

ERL main linac couplerパラメータ

- ・周波数：1.3GHz
- ・加速勾配：最大 20MV/m
- ・投入パワー： CW 20kW
- ・カップリング可変：  $QL = 5 \times 10^6 - 2 \times 10^7$

# 超伝導空洞カップラーの代表例(1.3GHz対応)



TTF III (for LC & XFEL):

- Adjustable coupling (16 mm)
- Cylinder type ceramic window
- 5 kW CW SW (BESSY)

我々の  
ERLに採用

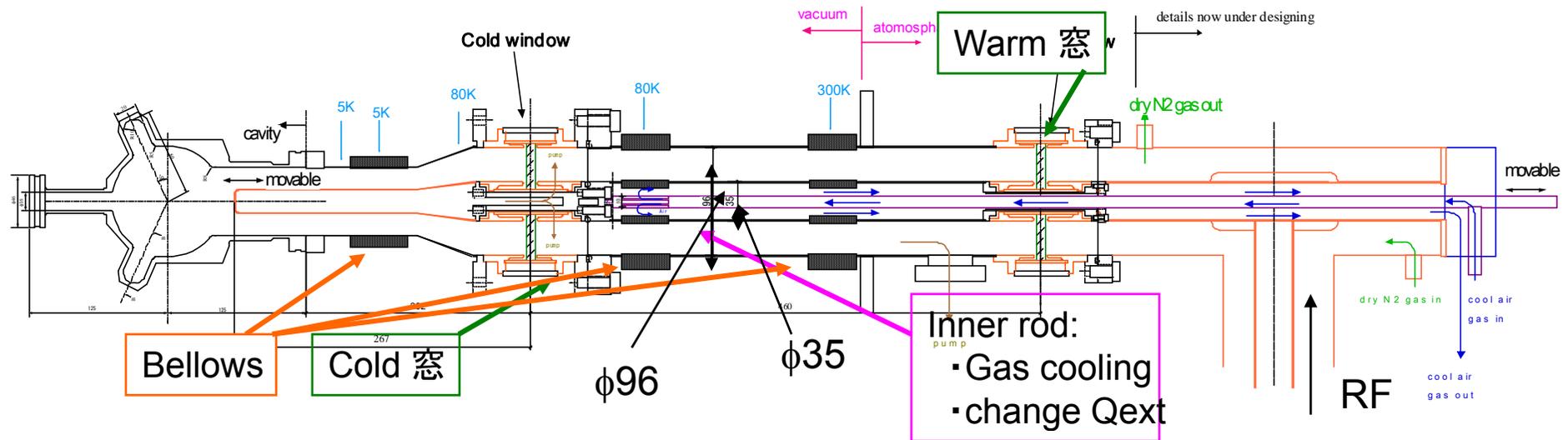
Cornell Injector (for ERL):

- Adjustable coupling (16 mm)
- Cylinder type ceramic window
- Upto 50 kW CW TW (Cornell)  
inner cooling by air

KEK STF-Baseline (for ILC):

- Fixed coupling
- TRISTAN type coaxial ceramic window
- (CW Max 800kW @500MHz)

# ERL main linac のinput couplerのデザイン



## 具体的な設計のポイント

- CW 20kW投入時の熱負荷(特に内導体)を減らす。  
インピーダンス 60Ω(内導体の熱負荷を減らす。)  
セラミックの誘電損失を少なくする。(純度99.7%のものを使用。)  
内導体をgas cooling。(inner rodに流す。)
- カップリング可変 ( $QL = 5 \times 10^6 - 2 \times 10^7$ )  
inner rodにて内導体を動かす。  
Cold窓と空洞の間にベローズを設け、可変にする。
- Reliability :  
セラミック窓は実績のあるトリスタンタイプの同軸窓を採用。  
粉塵混入を避けるため同じものを2つ使う。

# RF設計(coupling)

Measure :  $f_0, \Delta f, \Gamma_1, \Gamma_2$

$$\beta_{01} = \frac{1 \mp |\Gamma_1|}{1 \pm |\Gamma_1|} \quad \beta_{02} = \frac{1 \mp |\Gamma_2|}{1 \pm |\Gamma_2|} \quad Q_L = \frac{f_0}{2 \cdot \Delta f}$$

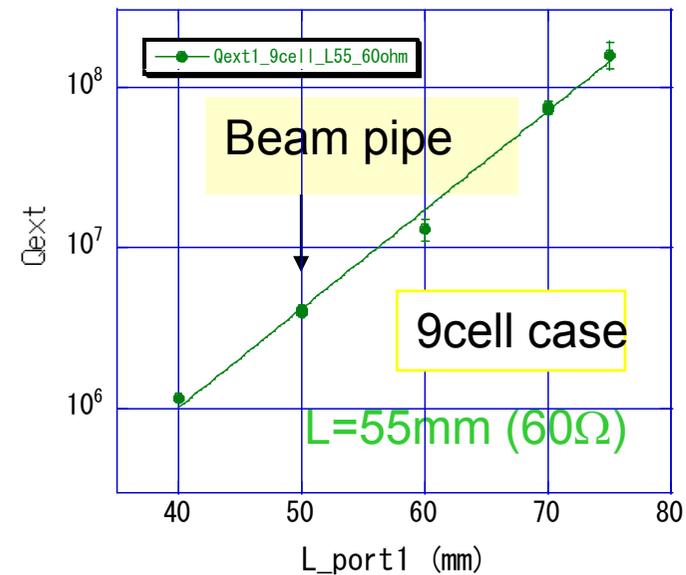
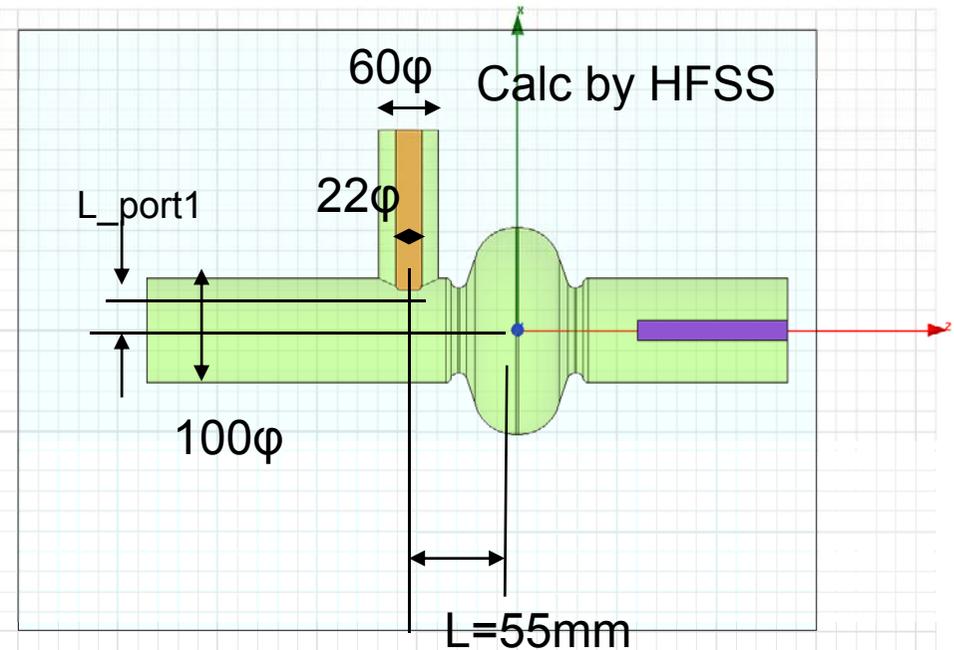
under or over

$$\beta_1 = \frac{\beta_{01}(1 + \beta_{02})}{1 - \beta_{01}\beta_{02}} \quad \beta_2 = \frac{\beta_{02}(1 + \beta_{01})}{1 - \beta_{01}\beta_{02}}$$

$$Q_0 = (1 + \beta_1 + \beta_2) \cdot Q_L$$

$$Q_{ext2} = \frac{Q_0}{\beta_2} \quad Q_{ext1} = \frac{Q_0}{\beta_1}$$

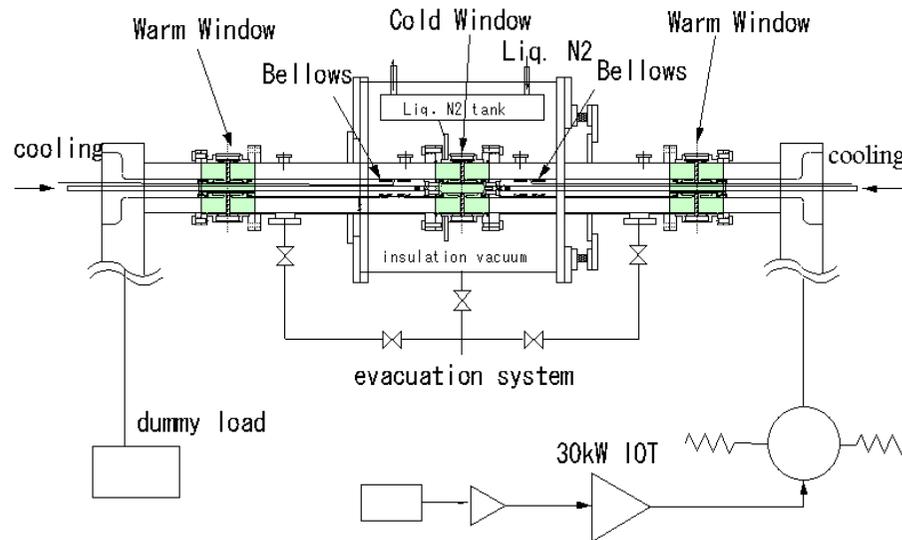
- $Q_{ext1} = 5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$   
 $\rightarrow L_{port1} = 51.3 \sim 61.1 \text{mm}$   
 Variable range =  $\pm 5 \text{mm}$



# カップラー開発の現在の状況

IOT 30kWを用いた  
セラミック窓とベローズの  
ハイパワーテストスタンドを構築  
20kW投入時の温度上昇  
マルチパクティングを測定。  
上記2つを真空状況下、低温状況下、RFの  
反射位相を変えて測定する。また、機械的  
特性や組み立て方法の出来を見る。

## カップラーテストスタンドsetup



Clean roomでの組み立て



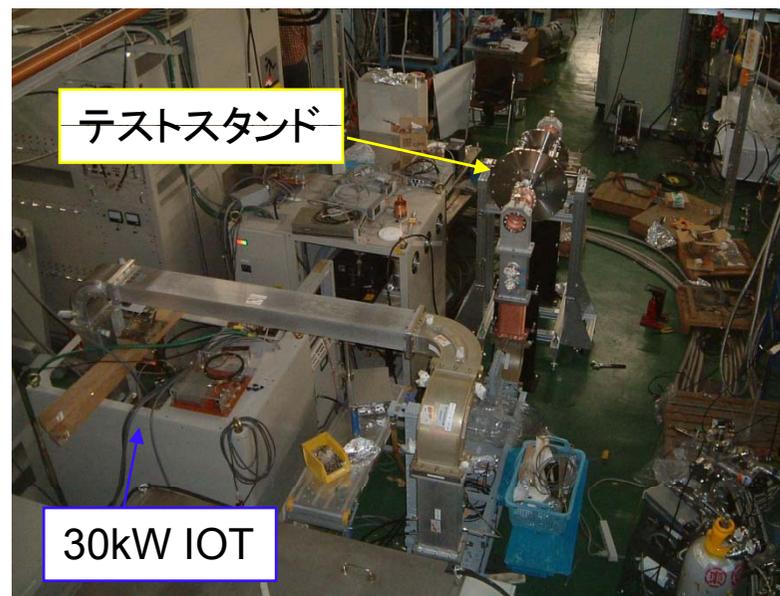
Warm窓

Cold窓



超純水洗浄

カップラーテストスタンド全景



テストスタンド

30kW IOT

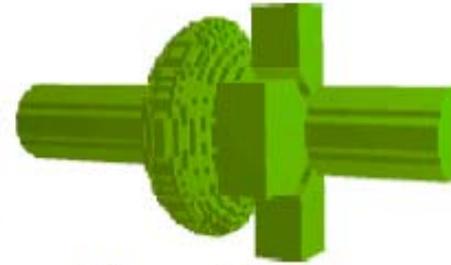
# HOM damper (1)



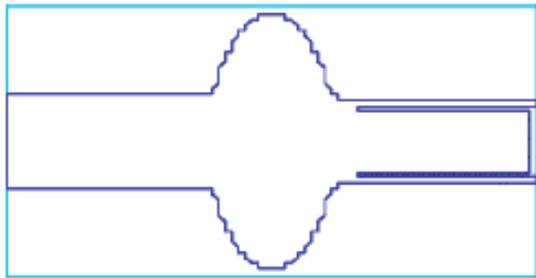
Enlarged beam pipe.  
(KEK, BNL, Cornell ERL)



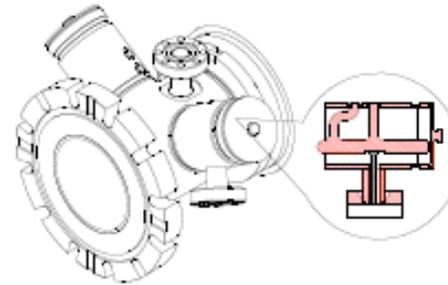
Fluted beam pipe.  
(Cornell, CESR)



Waveguide dampers  
(CEBAF, PEP-II)



Coaxial/radial beam pipe  
(KEK, JAERI)



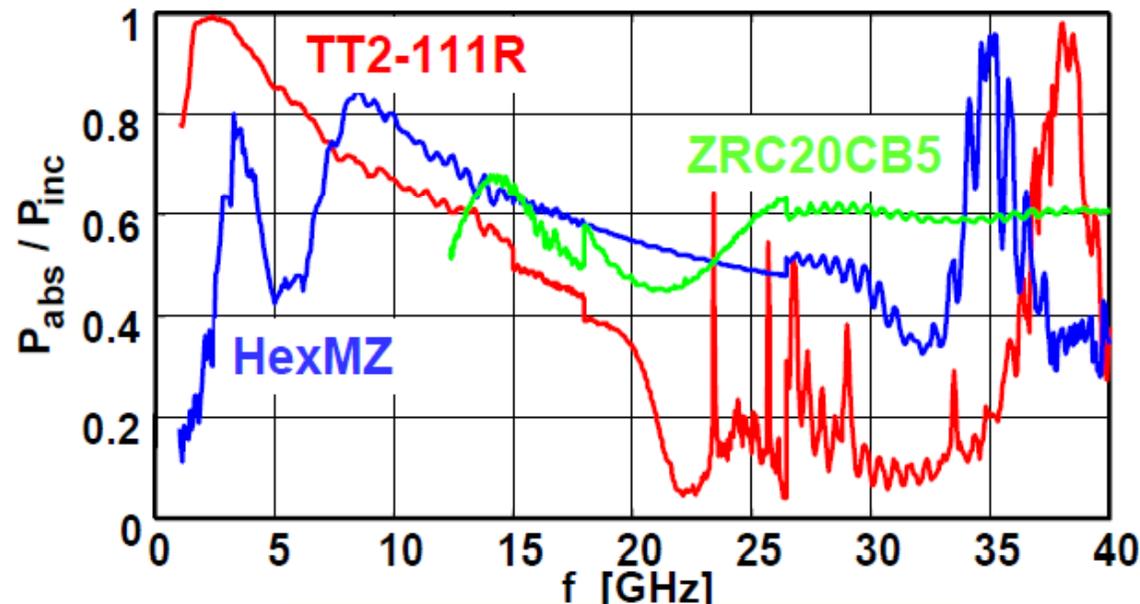
Multiple coaxial loops  
(DESY, CERN)

[ERL2005 R. Rimmer]

- 様々なHOMカップラーが使用されているが、KEK-ERLでは、ビームパイプ型を採用

## HOM damper (2)

- バンチ長が短いため、数10GHzまで有効なRF吸収体が必要
- コーネル大学では、2種類のフェライトと1種類のセラミックを用いる予定
- 70Kで使用する。RF吸収体の接合方法、ヒートサイクルへの耐性などが課題



[ERL2005 V. Shemelin et. al.]

# HOM damper (3)

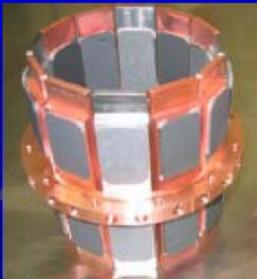
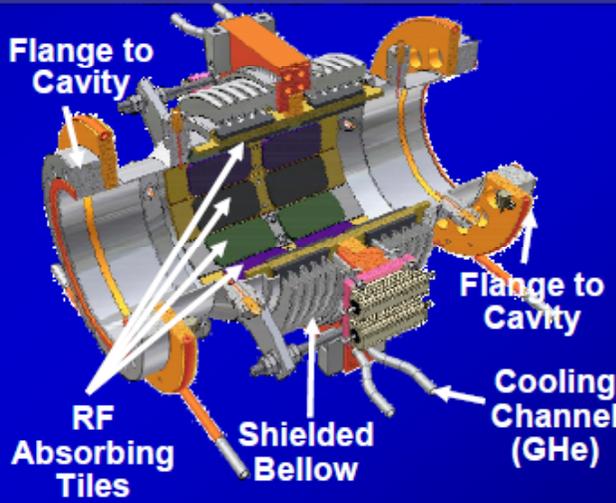
コーネル大学のHOMダンパーのデザイン

 **Beam Line HOM Loads**

Power per load	26 W (200 W max)
HOM frequencies	1.4 – 100 GHz
Operating temp.	80 K
Coolant	He Gas
RF absorbing tiles	TT2, Co2Z, Ceralloy

- 2 proto-types fab'ed by Cornell
- 6 production loads fab'ed by industry

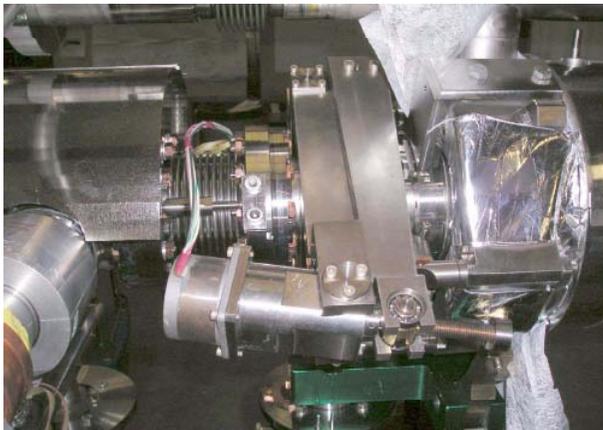
Matthias Liepe



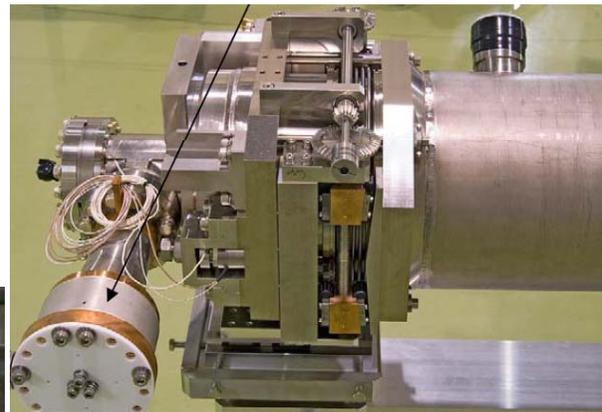
[SRF2007 M. Liepe]

# 周波数チューナー

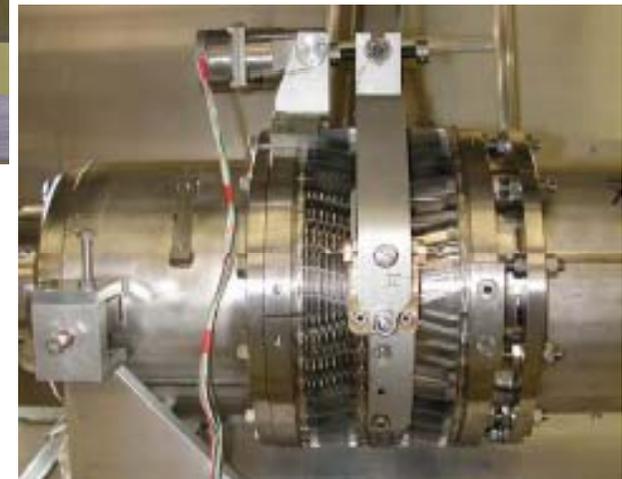
- 機械式チューナーによる粗い調整
- ピエゾ式チューナーによる高速周波数調整が必須



TTFチューナー(レバー式)



KEKチューナー  
(スライドジャッキ式)



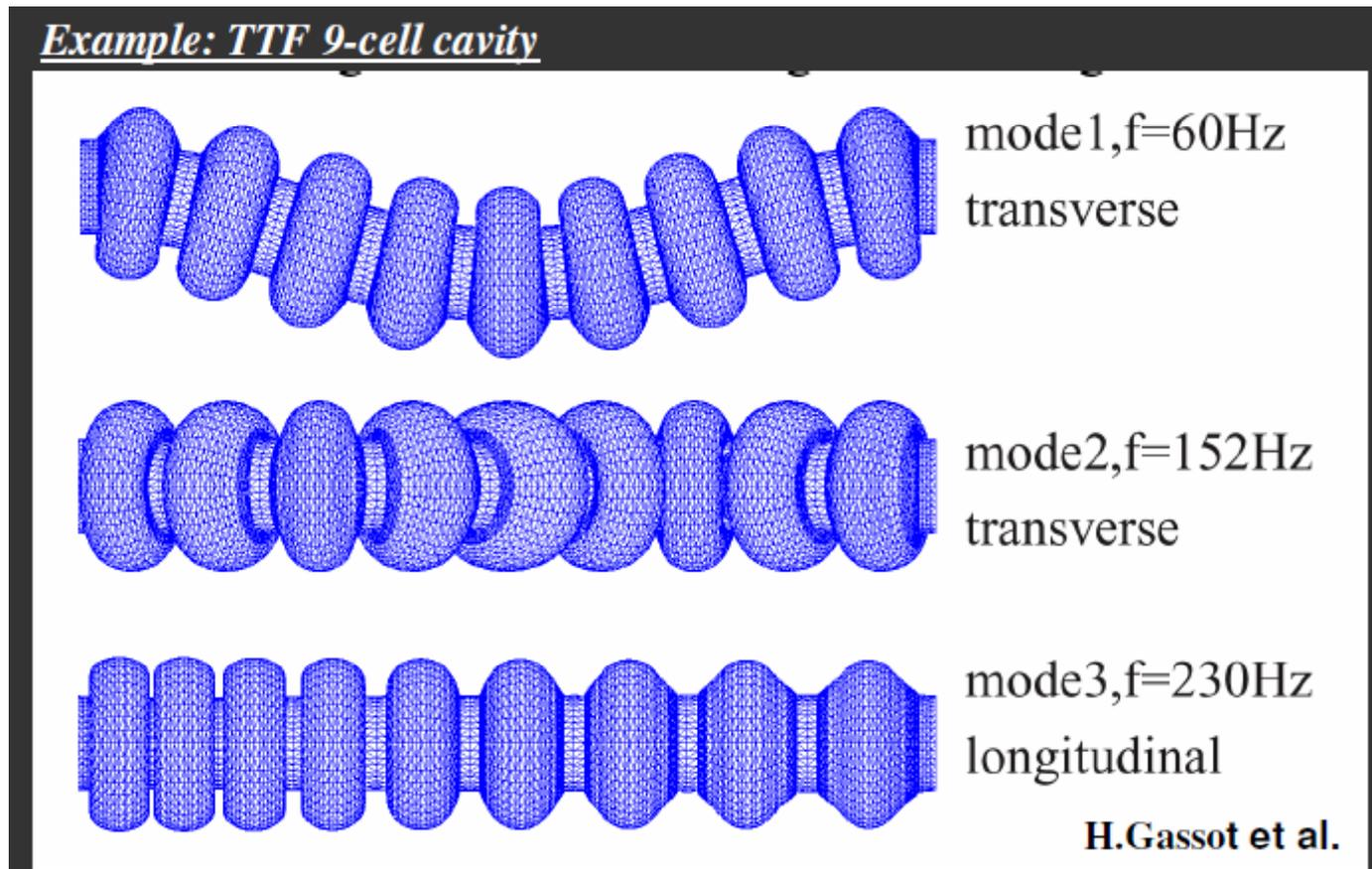
INFNチューナー(ブレード式)

## クライオモジュール

- 空洞、入力カップラー、HOMカップラー、周波数チューナーを整合性良く搭載したデザイン
- 熱侵入の小さいデザイン
- ERLでは、CW運転のため空洞1台あたりのHeの戻り量が多い
- 高圧ガスの申請を通す必要あり
- Microphonicsを抑制したモジュールができれば、入力RFパワーを削減できる可能性あり

# Microphonics (1)

周辺から空洞へ与えられる振動による共振周波数のデチューニング  
→ デチューンした分の振幅と位相を補正する必要あり

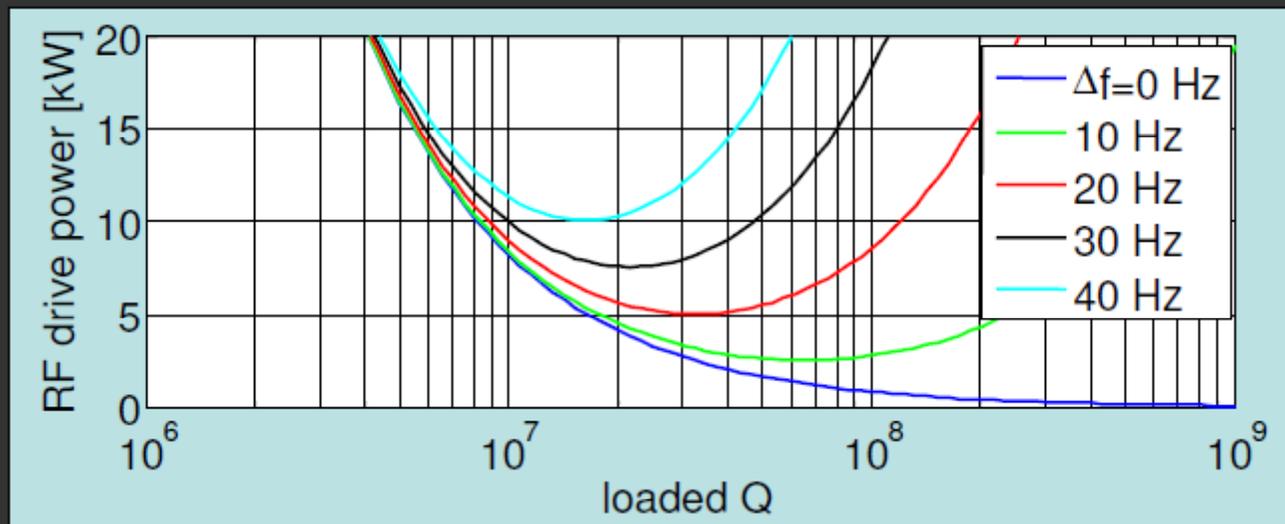


[ERL2005 M. Liepe]

## Microphonics (2)

Microphonicsを抑制できると、必要なRFパワーが少なくてできると。その時、 $Q_L$ を大きくした方が効果的

**In an main linac ERL cavity, the required peak drive power is proportional to the peak microphonics detuning!**



$$P_g = \frac{V^2}{8 \frac{r}{Q} Q_L} \left( 1 + \left( \frac{\Delta f}{f_{1/2}} \right)^2 \right)$$

$$Q_{opt} = \frac{1}{2} \frac{f_0}{\Delta f}$$

$$P_{g,min} = \frac{V_{acc}^2}{2r/Q} \frac{\Delta f}{f}$$

## おわりに

- ERLに向けての超伝導空洞の開発を進めている。
- 空洞自体は、ILC用空洞と同様にLバンドの空洞であるが、ERLの運転がCWであることに起因して、高次モード対策を始めとして、様々なコンポーネントでERL仕様を検討していく必要がある。
- 今後、開発を進めていくべきものがたくさんあるので、皆様のご協力のもと進めていけたら、と考えております。どうぞ、よろしくお願いいたします。
- 発表資料作成には、ERLSCグループを始めとする皆様のご協力をいただきました。どうもありがとうございました。