

The Development of a Superconducting RF Electron Microscope

N. Higashi^a, T. Furuya^b, Y. Funahashi^b, K. Ueno^b, M. Sawabe^b
M. Nishiwaki^b, H. Sakai^b, Michizono^b, M. Yamamoto^b
A. Enomoto^b, Y. Kamiya^b, M. Kuriki^c, S. Yamashita^d

^aThe University of Tokyo

^bHigh Energy Accelerator Research Organization(KEK)

^cHiroshima University, ^dICEPP, The University of Tokyo

Outline

- **Purpose of This Development**
- **Difficulty to Overcome**
- **Development Plan**
- **The State of The Development**
- **Conclusion**

Purpose of This Development

Strong demands to observe thicker specimens using electron microscopes(EM)

→ Get higher energy (more than 3 MeV) for a strong penetration power

↓
conventional electrostatic acceleration

Limited by Discharges

RF acceleration employing superconducting cavity

Other advantages expected ... compact TEM
good temporal resolution

Difficulty to Overcome

A sinusoidal field makes a spatial resolution worse.

Spatial Resolution : $\Delta r^2 = (\Delta x)^2 + r_s^2 + r_c^2$

Diffraction Aberration : $\Delta x = 0.6\lambda/\sin\alpha$

Spherical Aberration : $r_s = C_s\alpha^3$

Chromatic Aberration : $r_c = \alpha C_c \Delta E/E$

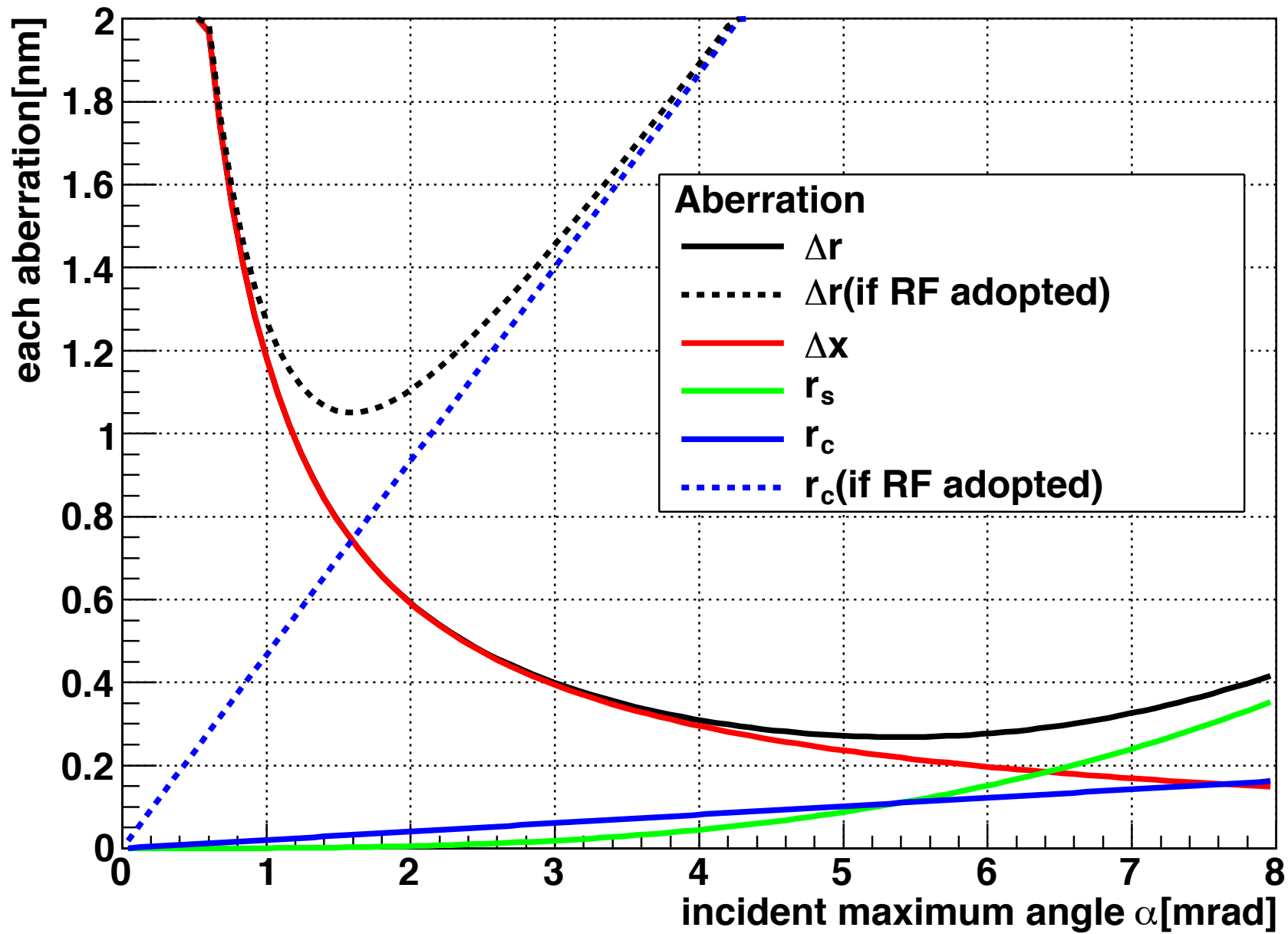
Conventional EMs' Energy Dispersion

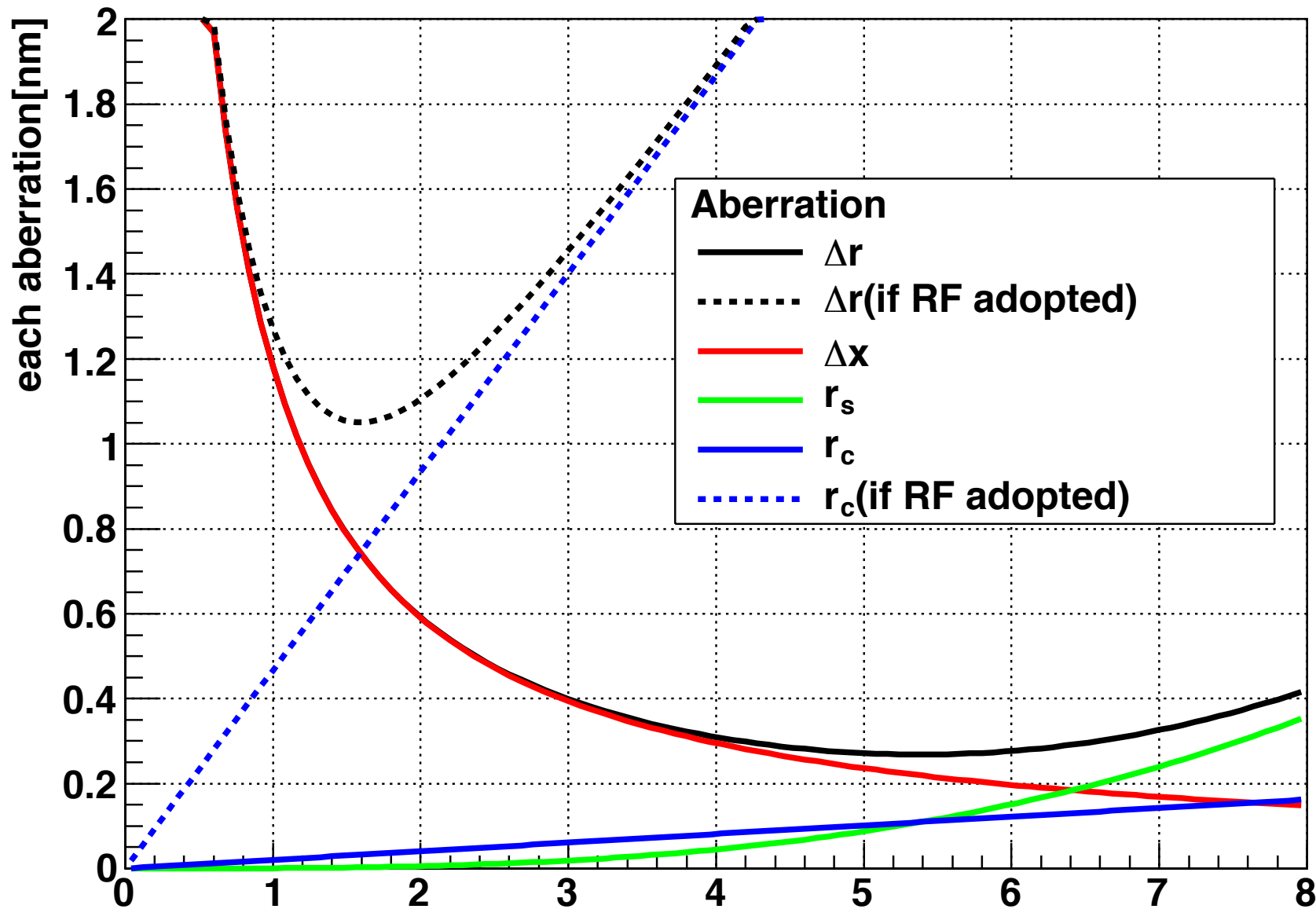
$$\Delta E/E = O(10^{-6})$$



RF Accelerators' Energy Dispersion

$$\Delta E/E > O(10^{-4})$$





We designed 2-mode Superconducting RF cavity.

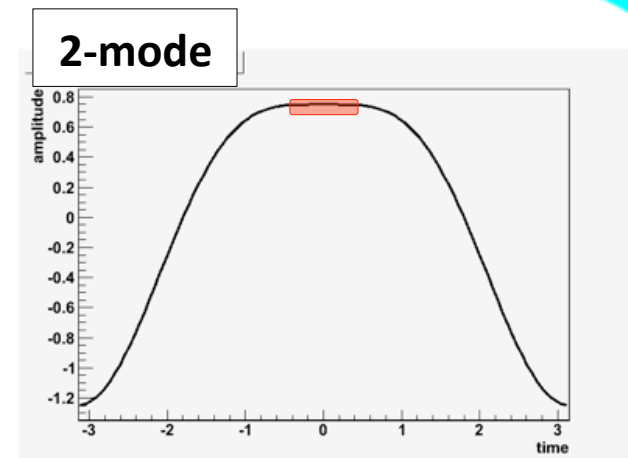
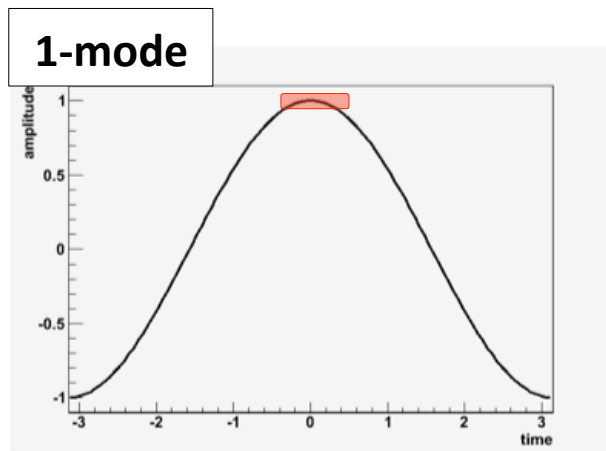
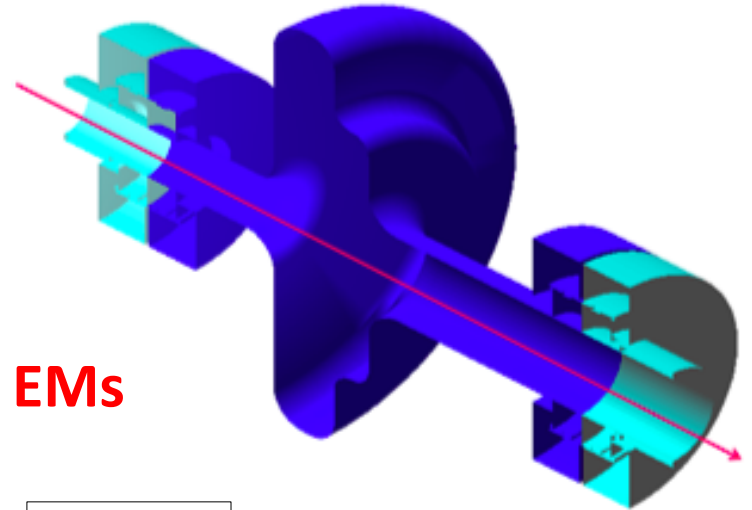
2-mode cavity

- The second harmonic field TM_{020} is superimposed on the first accelerating field TM_{010} .

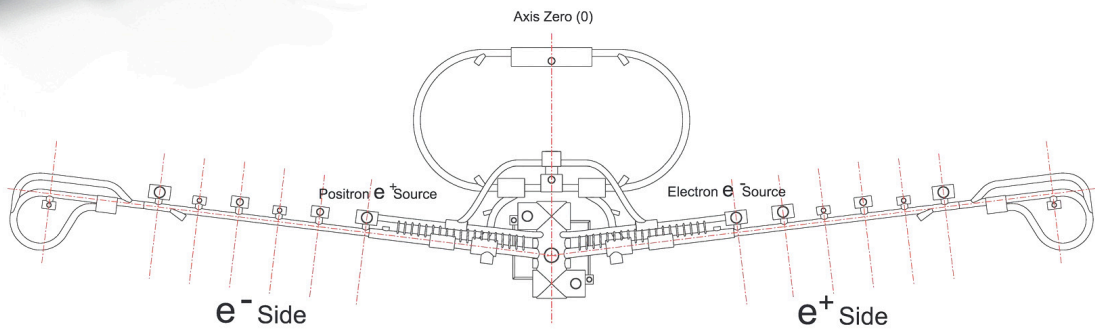
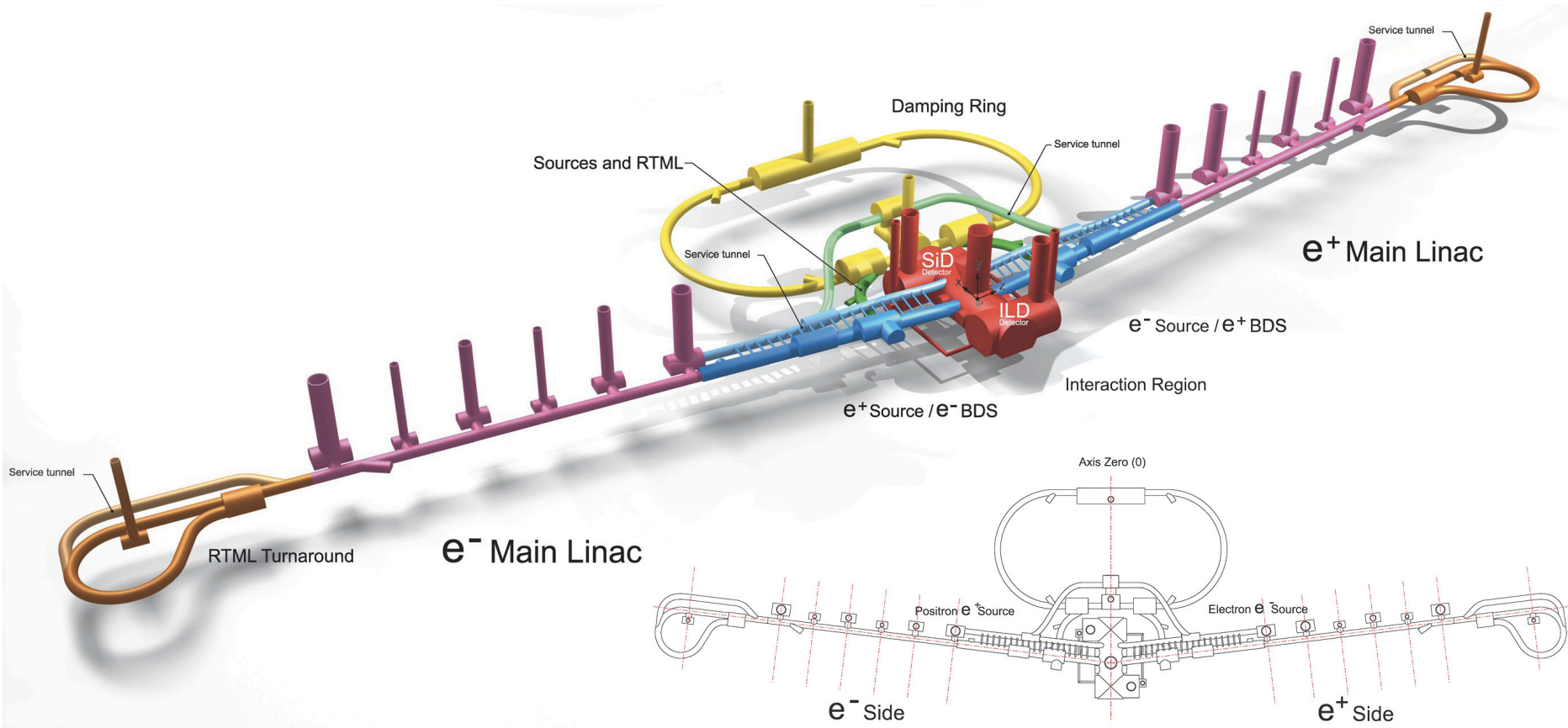
➔ a flat-crest of accelerating field

- We adopt Superconducting cavity.

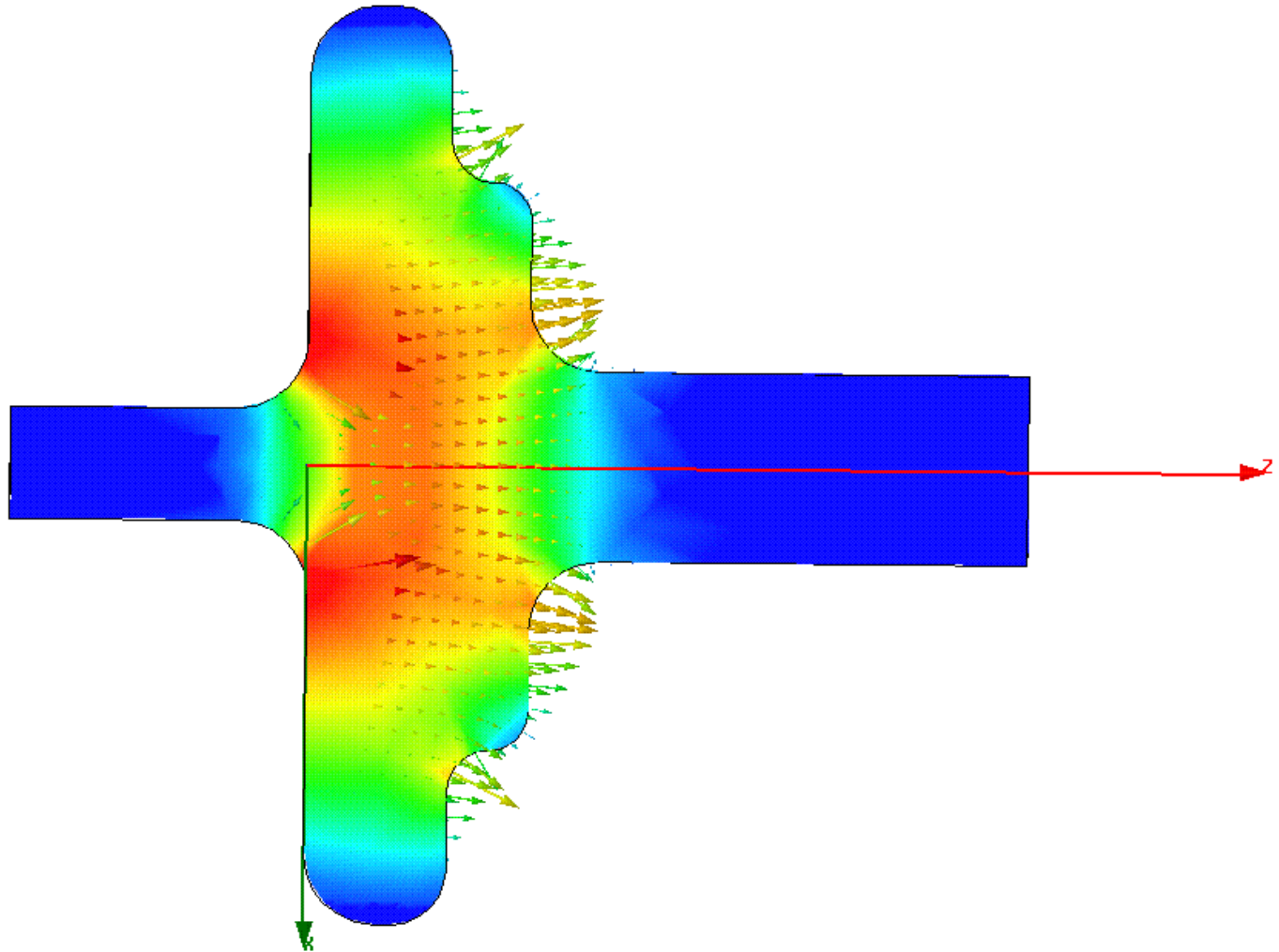
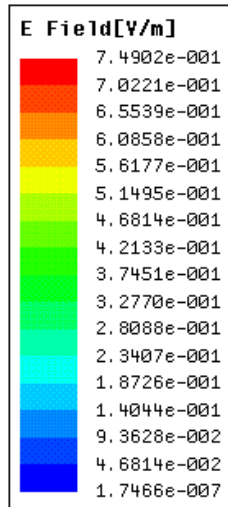
➔ stable accelerating field and beam current comparable to conventional EMs



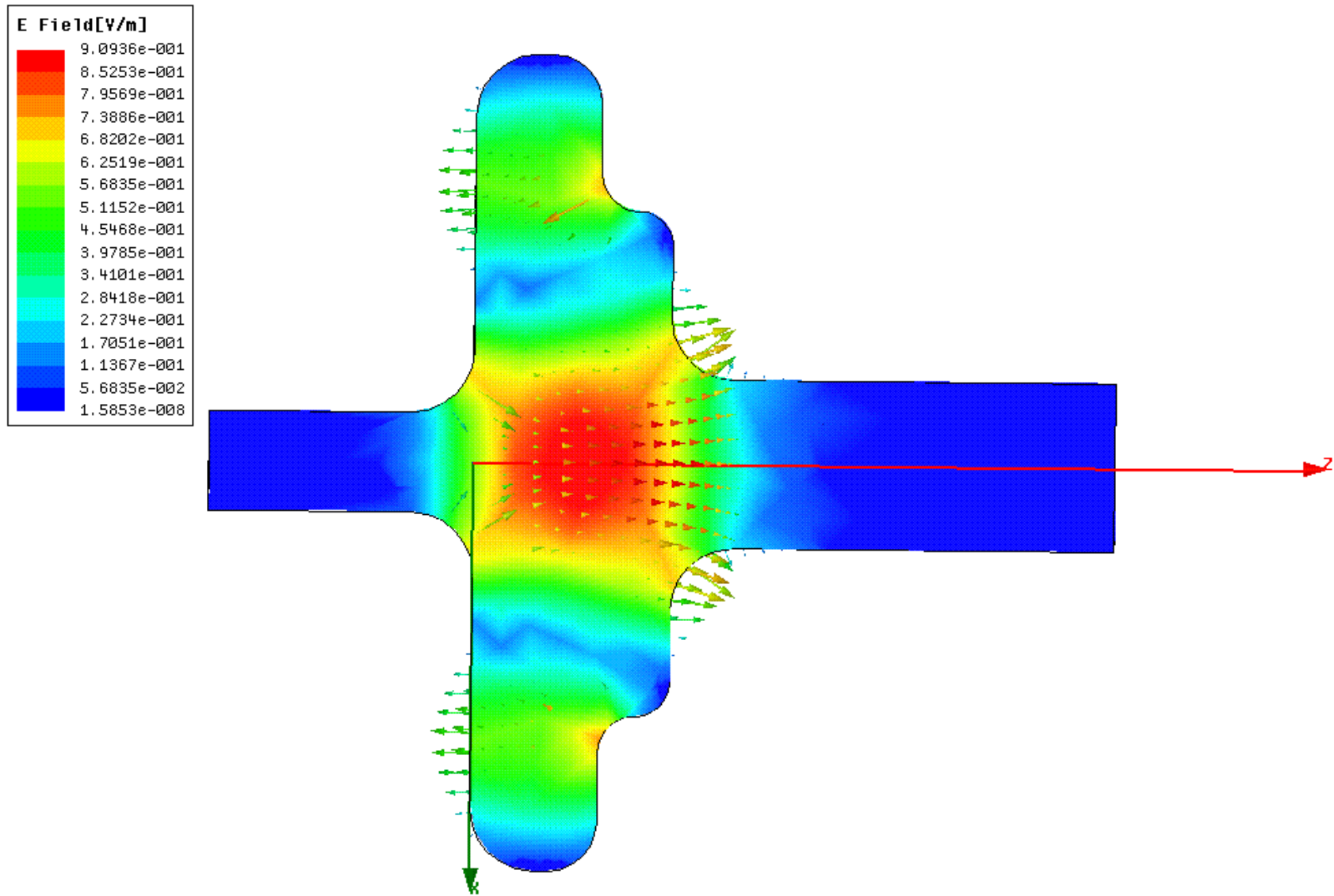
We have to search for optimum amplitudes and phases.



TM₀₁₀ mode (1.3GHz)



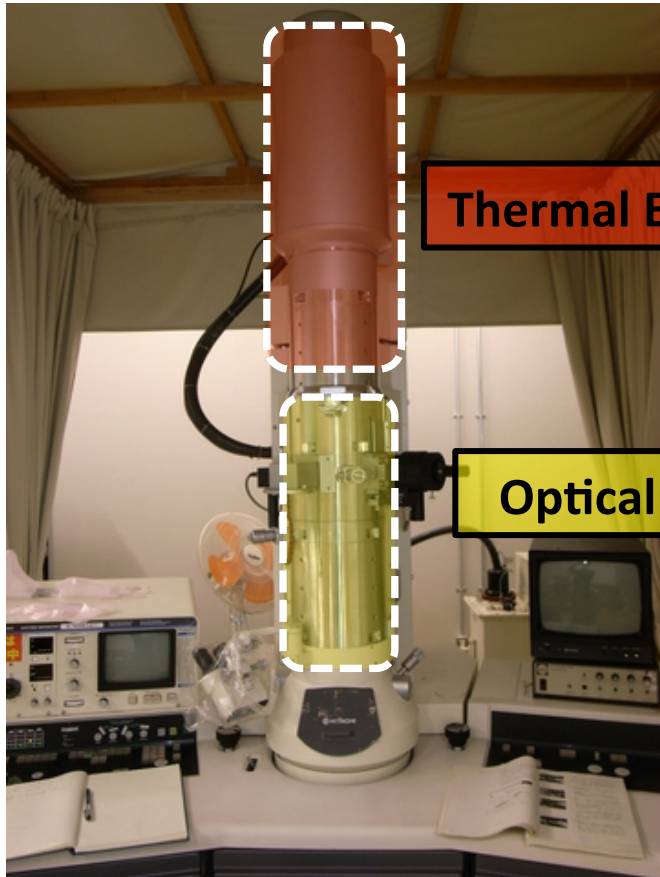
TM₀₂₀ mode (2.6GHz)



Development Plan

Prototype Development for proof-of-principle

conventional 300keV TEM located in KEK

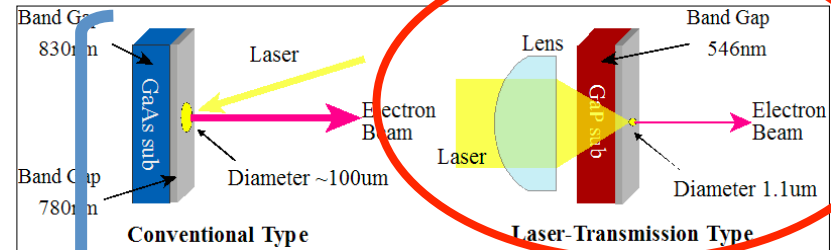


Thermal Electron Gun

Optical System

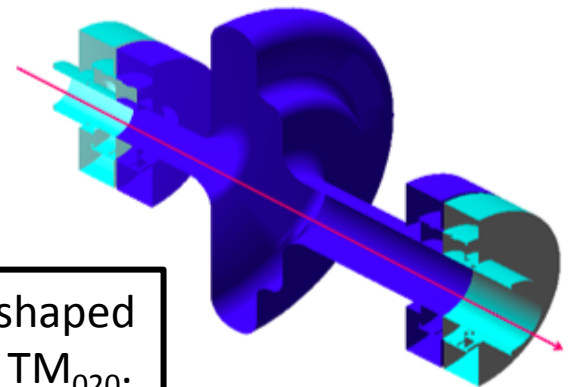
Reuse

2-mode cavity is specially-shaped to have both of TM_{010} and TM_{020} .

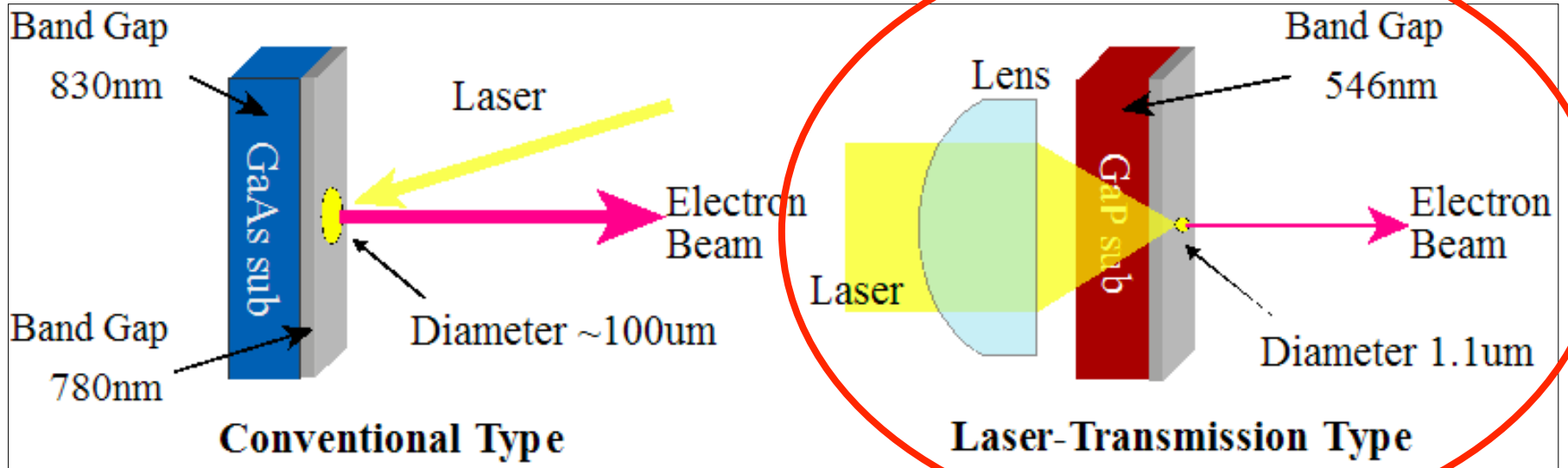


Photocathode Electron Gun

2-mode Superconducting RF Cavity



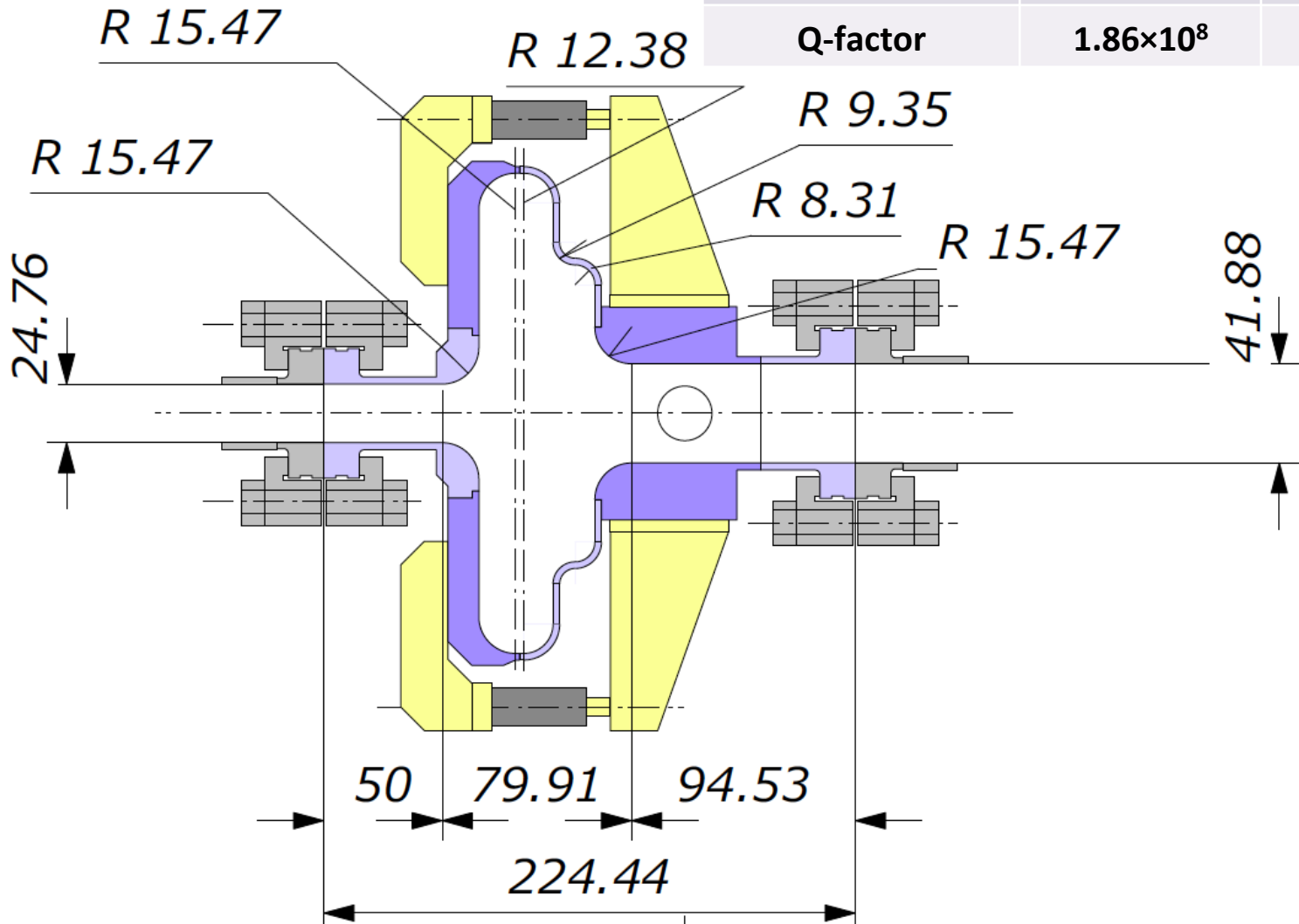
Photocathode Electron Gun



**Based on a Polarized Electron Gun.
A gun of the same type has been
already developed in Nagoya Univ. .**

2-mode cavity

Designed Values	TM ₀₁₀	TM ₀₂₀
Frequency[GHz]	1.3002	2.5999
Q-factor	1.86×10 ⁸	1.00×10 ⁸



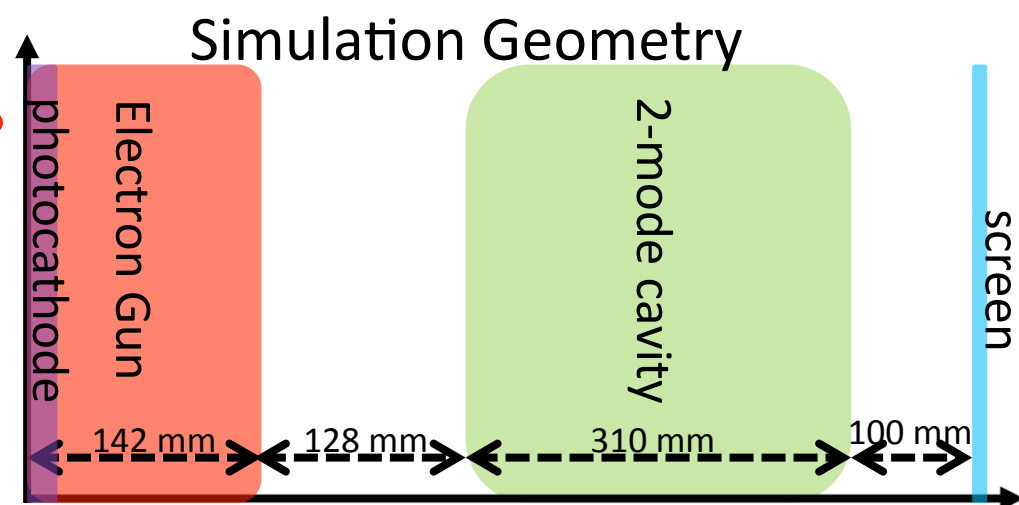
The State of The Development

1. Beam Dynamics Simulation

Searched for optimum amplitudes and phases to minimize the $\Delta E/E$

Input Parameters $0.13\mu\text{A}$

charge amount of each bunch	$-1.0 \times 10^{-16}\text{C}$
initial beam size on the cathode	$100\mu\text{m}$
resonant frequency for TM_{010}	1.3GHz
resonant frequency for TM_{020}	2.6GHz
initial energy	0.15eV
space charge effect	included



	E_{ap} of TM_{010}	E_{ap} of TM_{020}	E	ΔE	$\Delta E/E$
1-mode	9.85MV/m	-	304keV	61.8eV	2.04×10^{-4}
2-mode	8.21MV/m	9.25MV/m	278keV	10.2eV	3.68×10^{-5}

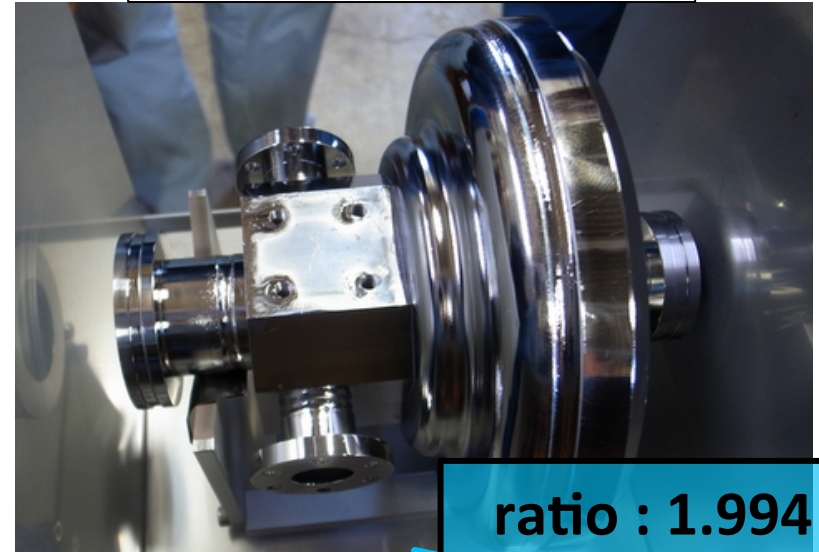
We can get the spatial resolution of 376 pm, which is only about 50 % deterioration of the existing 300 keV TEM, which is much smaller than 818 pm, the expected value of 1-mode cavity.

The State of The Development

2. Cavity Fabrication and Performance Tests

Cavity is made of Niobium.
Transition temperature is 9.3K.
Polished inside with EP & CP

Manufactured 2-mode cavity.



ratio : 1.994



The result of vertical tests

	TM ₀₁₀	TM ₀₂₀
resonant frequency[GHz]	1.2963	2.5851
Q ₀	$(1.41 \pm 0.45) \times 10^8$	$(0.89 \pm 0.18) \times 10^8$
E _{ap} [MV/m]	8.75±0.73	7.80±0.33

The performance almost achieved the requirement.

Conclusion

- **We are now developing a SC-RF TEM.**
- **For the proof-of-principle, we will replace the thermal gun with new photocathode gun and 2-mode cavity.**
- **We have already manufactured the cavity and performance tests have been done. It has been found that the electric fields are almost achieved to the requirements.**
- **Now we are fabricating the gun, and the beam test will be carried out this year.**

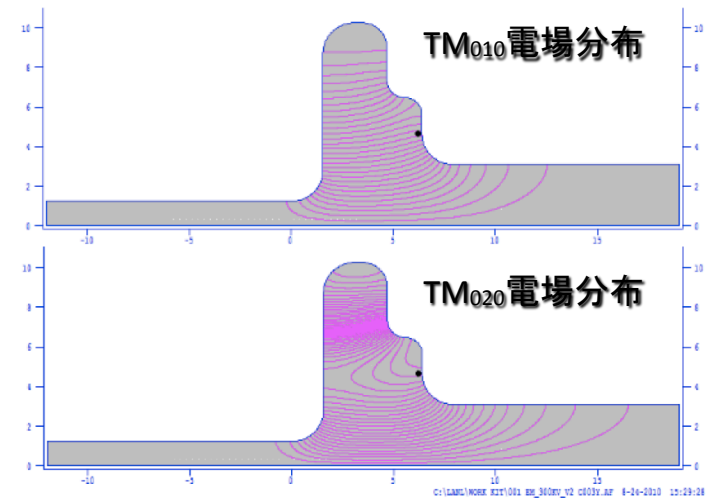
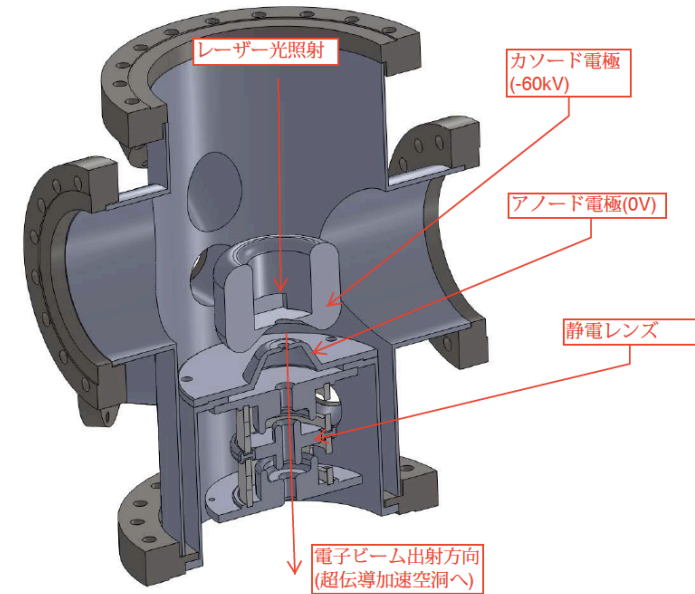
ビームダイナミクス・シミュレーション

設計・製作中の加速空洞と電子銃の想定される性能から得られるビームのエネルギー分散について調べる

使用ソフト: General Particle Tracer(GPT)

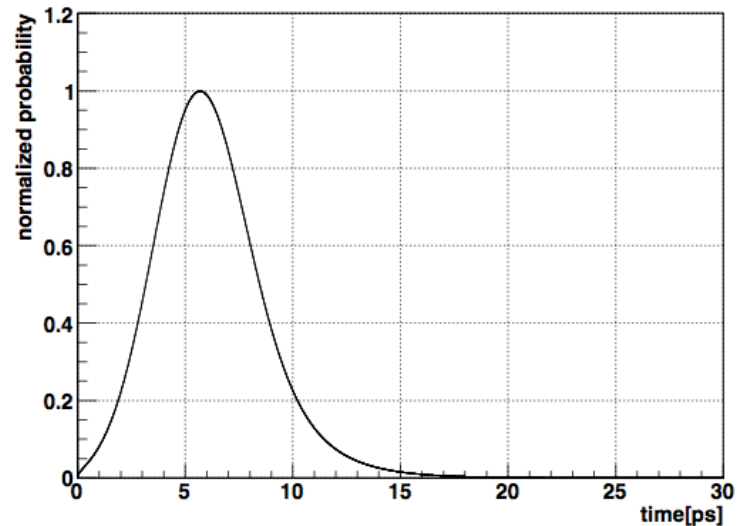
- ・6段5次埋込み型ルンゲクッタ法
- ・Powell法による最適化

1. 1モードと2モードの場合の $\Delta E/E$ の比較
2. 各モードが1つの空洞で共振する場合
3. カソード上ビームサイズの $\Delta E/E$ への影響
4. バンチの電荷量
5. 高エネルギーTEMの場合



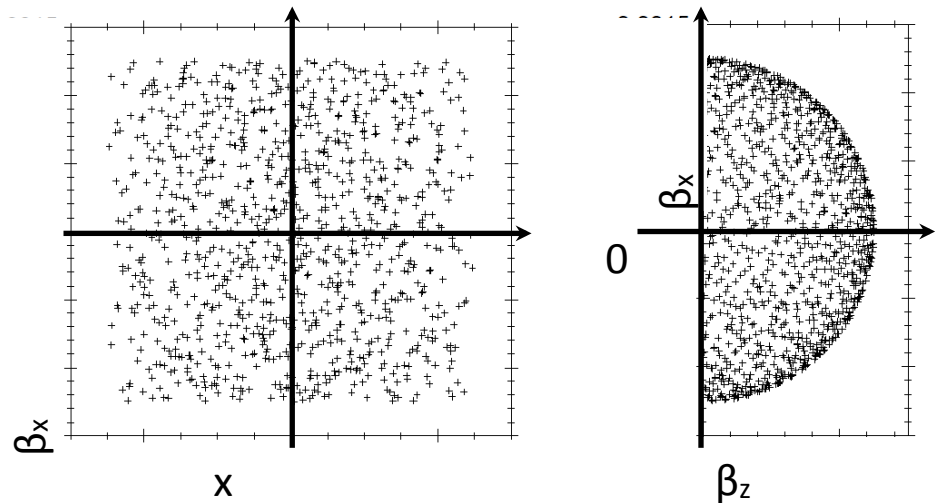
ビームの初期パラメータ

- ・レーザーによりカソードが励起
- ・ $\Delta E=0.15\text{eV}$
- ・x-y分布はガウス分布



カソードの応答

1 バンチの全電荷	$-1.0 \times 10^{-16}\text{C}$
カソード上でのビームサイズ	$100\mu\text{m}$
シミュレーション要素数	1000
TM ₀₁₀ の周波数	1.3GHz
TM ₀₂₀ の周波数	2.6GHz
初期エネルギー	0.15eV
空間電荷効果	有り



1. 1モードと2モードの場合の $\Delta E/E$ の比較

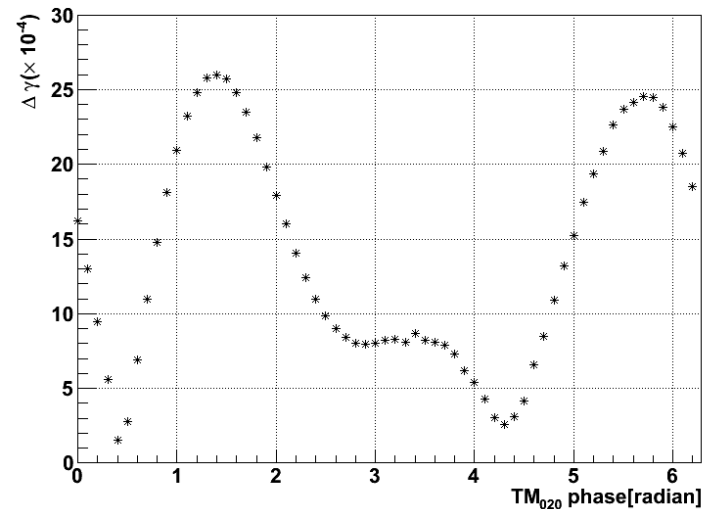
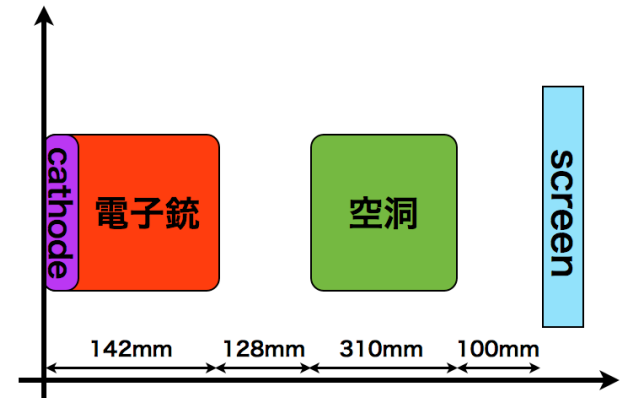
TM₀₁₀モードのみの場合の加速

1バンチの全電荷	$-1.0 \times 10^{-16} \text{C}$
カソード上でのビームサイズ	100 μm
シミュレーション要素数	1000
TM ₀₁₀ の周波数	1.3GHz
TM ₀₂₀ の周波数	2.6GHz
初期エネルギー	0.15eV
空間電荷効果	有り

空洞電場
振幅と位相を最適化

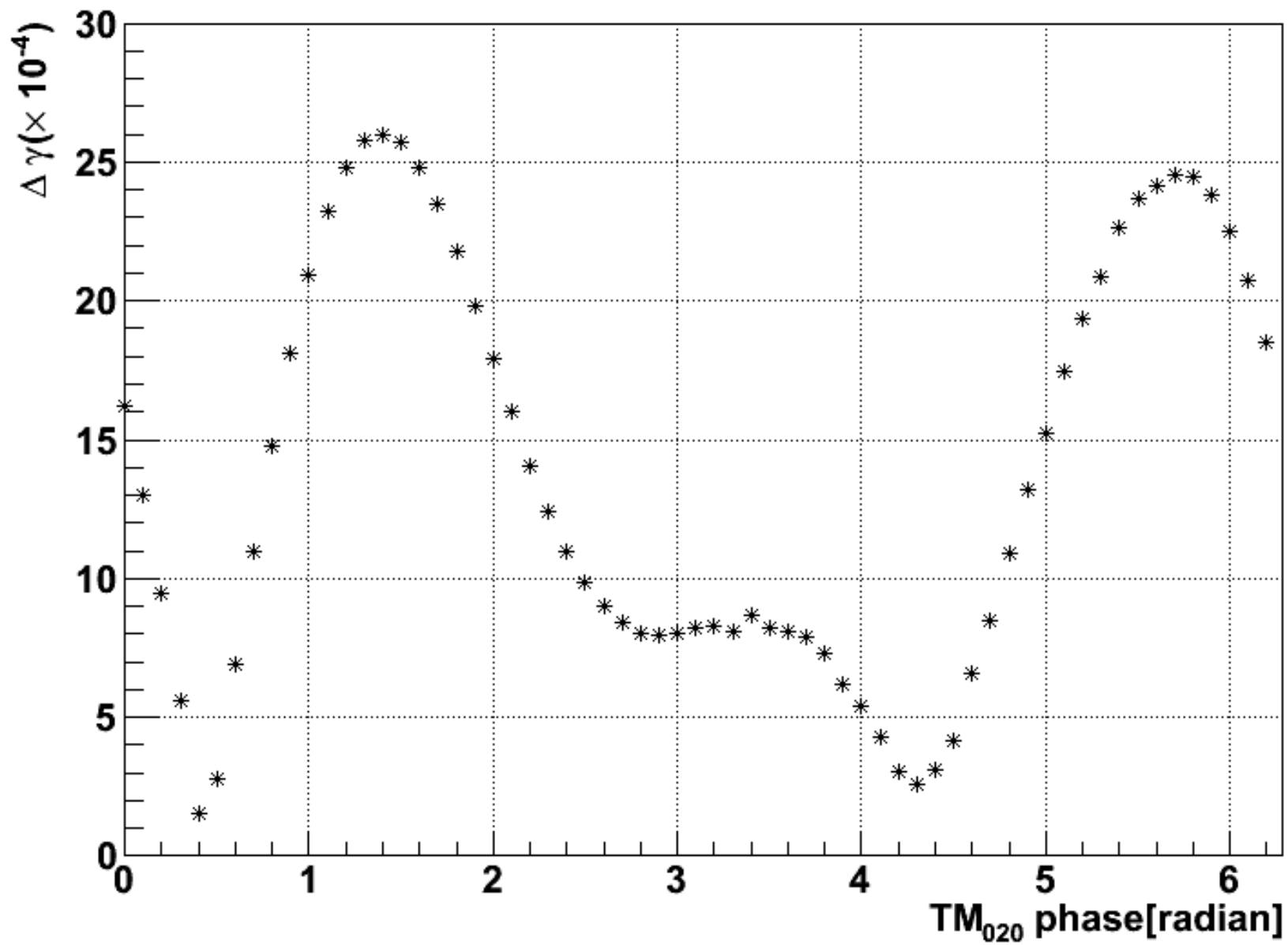
TM₀₁₀ + TM₀₂₀での加速

TM₀₁₀とTM₀₂₀
振幅・位相 4変数の最適化



TM₀₁₀にTM₀₂₀の位相を変えて足す

	TM ₀₁₀ の E_{ap}	TM ₀₁₀ の位相	TM ₀₂₀ の E_{ap}	TM ₀₂₀ の位相	E	ΔE	$\Delta E/E$
1mode	9.85MV/m	0.434	-	-	304kV	61.8eV	2.04×10^{-4}
2mode	8.21MV/m	0.235	9.25MV/m	0.118	278kV	10.2eV	3.68×10^{-5}



1. 1モードと2モードの場合の $\Delta E/E$ の比較

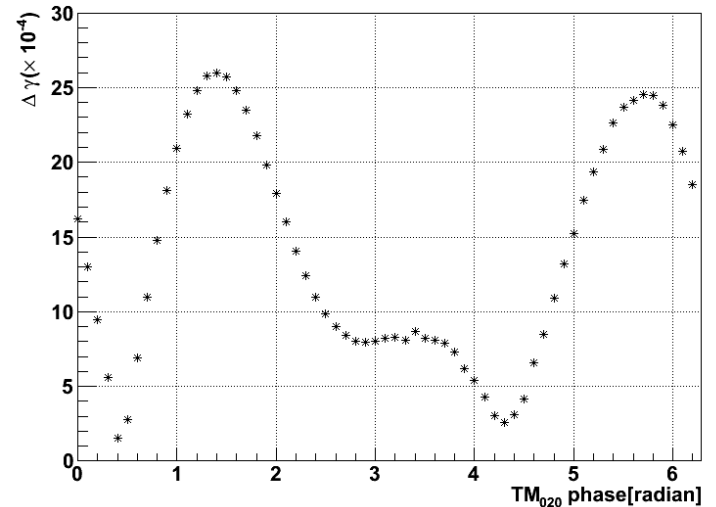
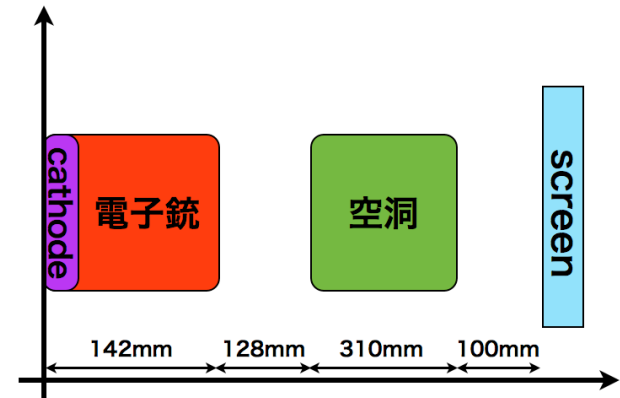
TM₀₁₀モードのみの場合の加速

1バンチの全電荷	$-1.0 \times 10^{-16} \text{C}$
カソード上でのビームサイズ	100 μm
シミュレーション要素数	1000
TM ₀₁₀ の周波数	1.3GHz
TM ₀₂₀ の周波数	2.6GHz
初期エネルギー	0.15eV
空間電荷効果	有り

空洞電場
振幅と位相を最適化

TM₀₁₀ + TM₀₂₀での加速

TM₀₁₀とTM₀₂₀
振幅・位相 4変数の最適化



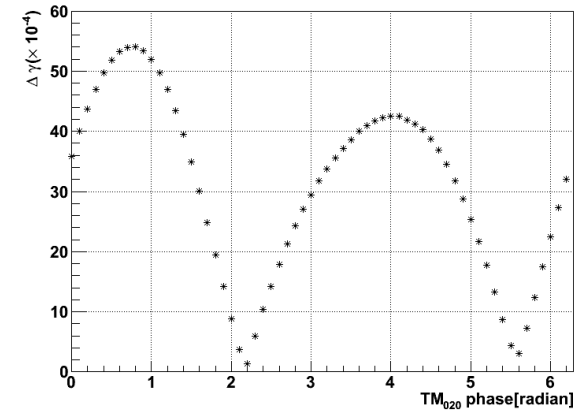
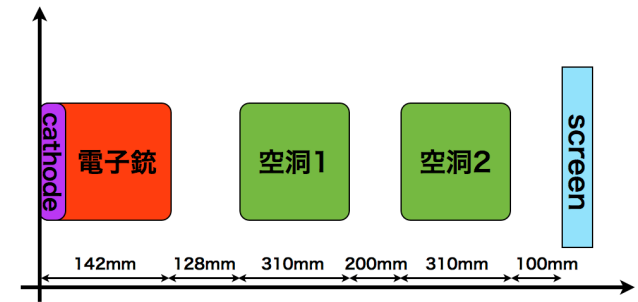
TM₀₁₀にTM₀₂₀の位相を変えて足す

	TM ₀₁₀ の E_{ap}	TM ₀₁₀ の位相	TM ₀₂₀ の E_{ap}	TM ₀₂₀ の位相	E	ΔE	$\Delta E/E$
1mode	9.85MV/m	0.434	-	-	304kV	61.8eV	2.04×10^{-4}
2mode	8.21MV/m	0.235	9.25MV/m	0.118	278kV	10.2eV	3.68×10^{-5}

2. 各モードが1つの空洞で共振する場合

- ・ TM_{010} が前段の空洞で、 TM_{020} が後段でそれぞれ共振する場合を考える
- ・この場合、それぞれの空洞で振幅と位相、2つの変数を最適化すればよい

→ $\Delta E/E = 8.07 \times 10^{-5}$



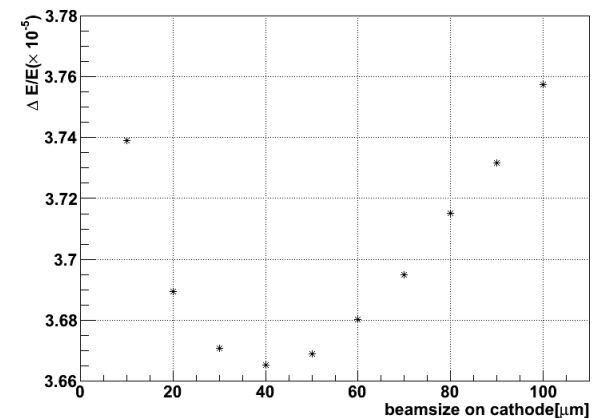
3. カソード上ビームサイズの $\Delta E/E$ への影響

- ・ビームサイズは小さく絞るほど輝度が高くなり、contrastの強い像を生成することができる。
- ・今回開発する光陰極電子銃は数 μm サイズまで絞ることができる
- ・絞り過ぎると空間電荷効果により $\Delta E/E$ が増大する



10~100 μm の範囲では3%程度しか変わらない

後段の TM_{020} の位相を変えて足し合わせる



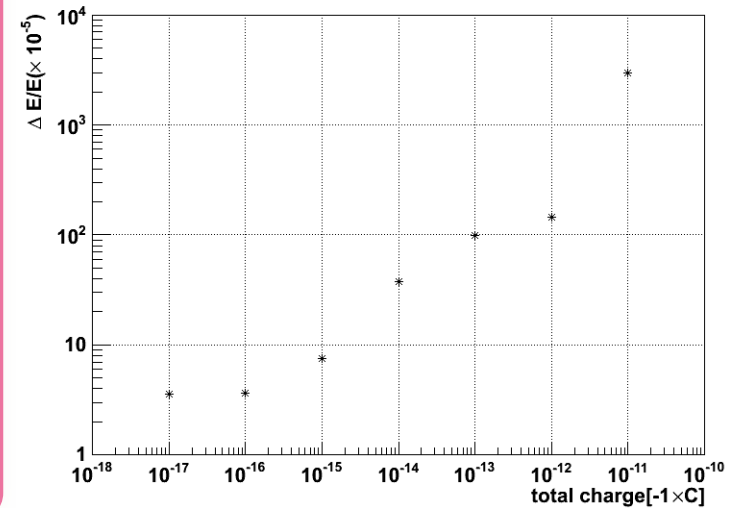
ビームサイズ vs. $\Delta E/E$

4. 全電荷の許容量

- ・TEMの場合、1つの像を得るのに少なくとも 10^6 個の電子が必要
- ・これまでの1バンチ $0.1\text{fC} \times 1.3\text{GHz}$ では、時間分解能は $1.23\mu\text{s}$ 程度
- ・時間分解能の向上のため全電荷を増やすと空間電荷効果により $\Delta E/E$ が悪化



1fc程度までが $\Delta E/E \sim O(10^{-5})$



全電荷と $\Delta E/E$

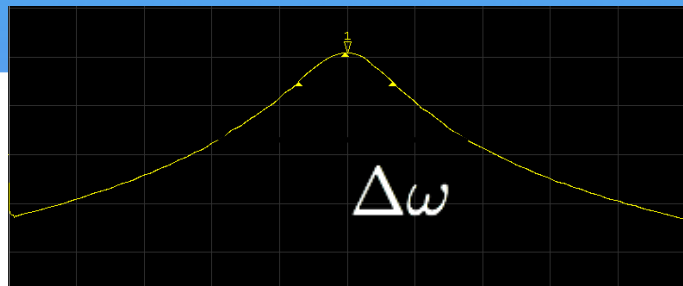
5. 高エネルギーTEMの場合

3.6MVでも2モード加速は有効
※計算上

	TM ₀₁₀ の E_{ap}	TM ₀₁₀ の位相	TM ₀₂₀ の E_{ap}	TM ₀₂₀ の位相	E	ΔE	$\Delta E/E$
1mode	107MV/m	0.9	-	-	5.17MV	446eV	8.62×10^{-5}
2mode	107MV/m	0.9	57.6MV/m	11.2	3.62MV	88.0eV	2.42×10^{-5}

空洞の設計

TM₀₁₀モードの周波数 f_{010} とTM₀₂₀モードの周波数 f_{020} が $f_{020}/f_{010}=2$ となるように設計



$$Q_0 = \omega_0 / \Delta\omega$$

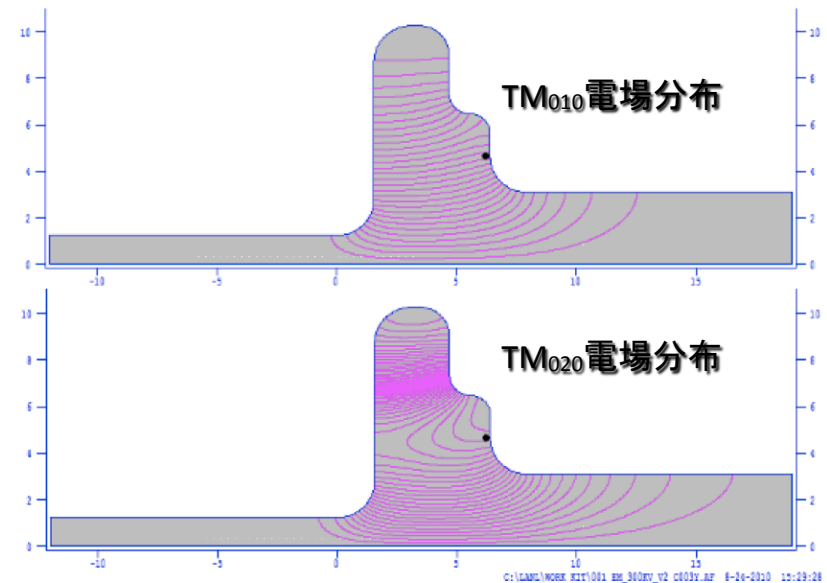
$$= \omega_0 U / P_c$$

ω_0 : 共振角周波数
 U : 空洞内のエネルギー
 $\Delta\omega$: U のFWHM
 P_c : 空洞壁で消費するパワー
 E_{ap} : 軸上最大電場

加速空洞のパラメータ

	TM ₀₁₀	TM ₀₂₀
周波数[GHz]	1.3002	2.6000
Q_0	1.86×10^8	1.00×10^8
E_{ap} [MV/m]	5.33	5.14

ただし、4.4K環境下で、平均軸上電場を1MV/mとしたとき



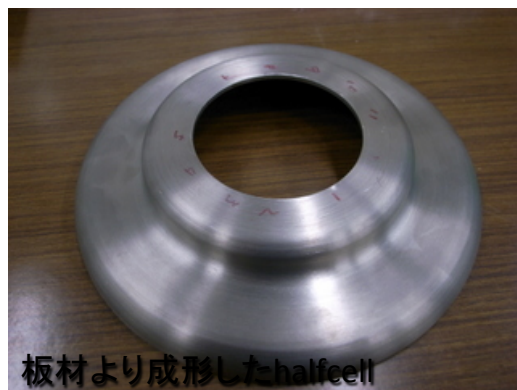
空洞製作

材料: 純ニオブ(超伝導転移温度9.3K)

- ・周波数tuningのために、インゴットと板材を使用
- ・溶接は電子ビーム溶接(EBW)
- ・空洞表面は高電圧印加と抵抗低減のため鏡面仕上げ



インゴットより成形したhalfcell



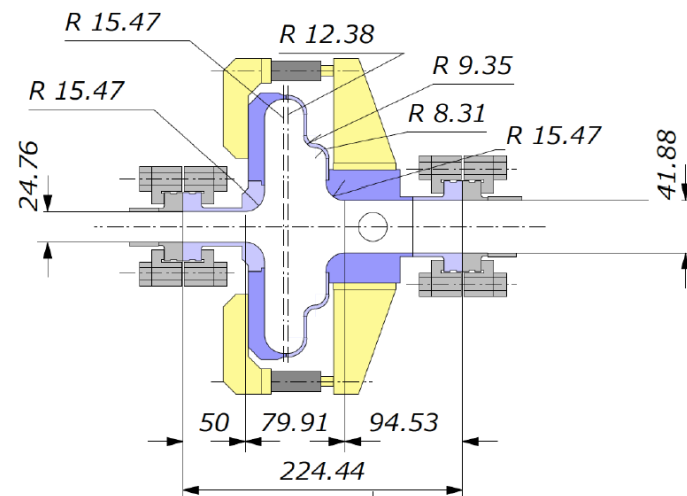
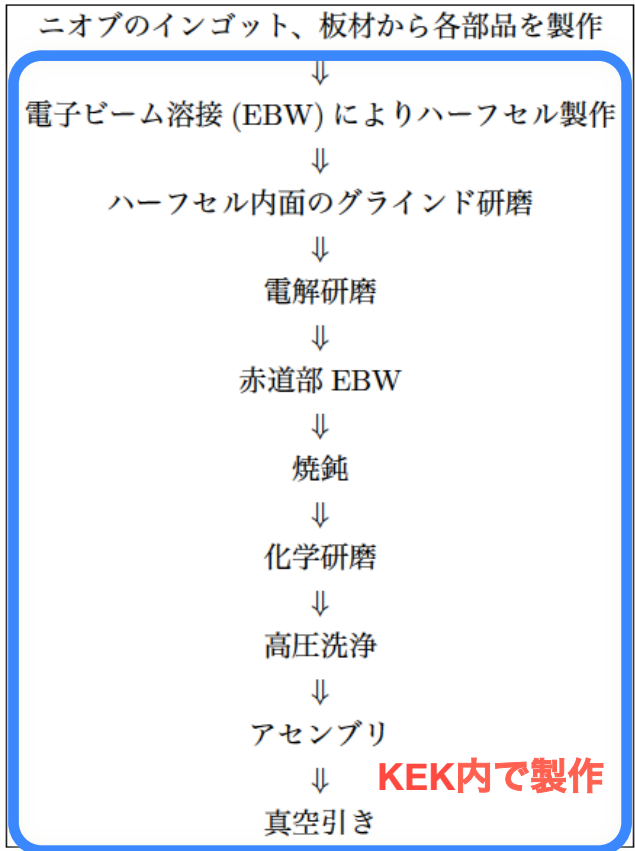
板材より成形したhalfcell



ビームパイプ



ポート部



電子ビーム溶接(EBW)

- ・従来と全く異なる空洞形状
- ・最適条件を求める

1. 電子ビームの電流値 [mA]
2. 電子ビームの加速電圧 [kV]
3. 溶接部の電子ビームに対する送り速度 [mm/s]
4. 溶接部と電子銃との距離 (Work Distance)[mm]
5. 電子ビームの焦点距離 [mm]

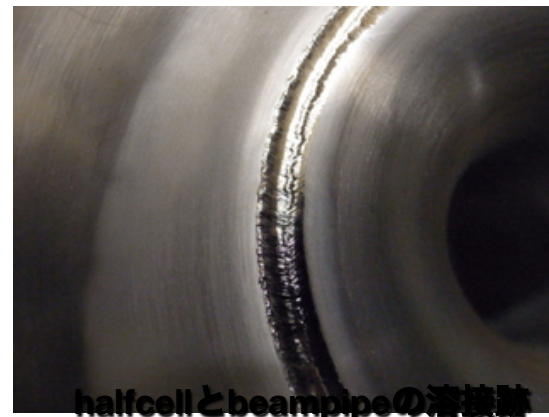
- ・今回、従来用いてきた2.8mmよりも厚い3.1mmを採用している部分があり、EBWの電圧を120kVから140kVに上げた
- ・結晶サイズが数十mmのインゴットのEBWに際して、粒界にて問題が無いことを確認
- ・赤道面の溶接跡はミラーと望遠カメラを用い確認



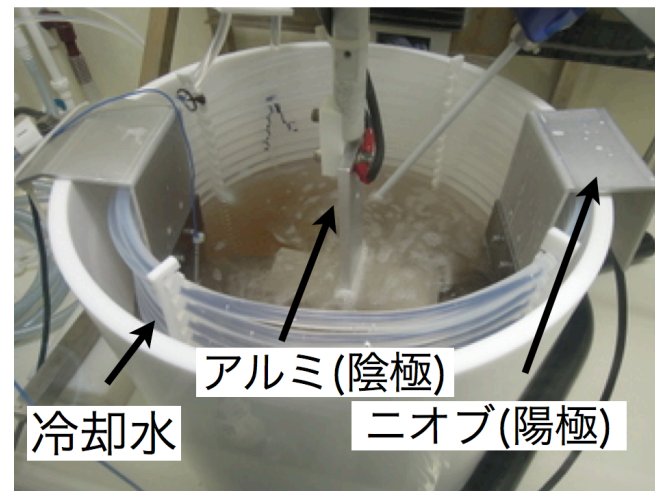
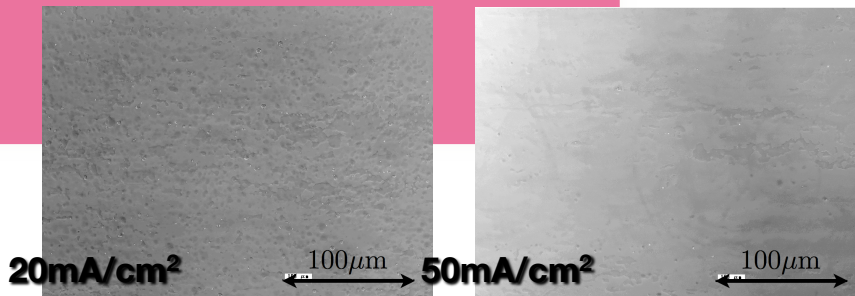
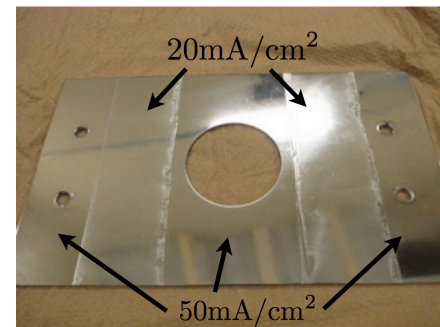
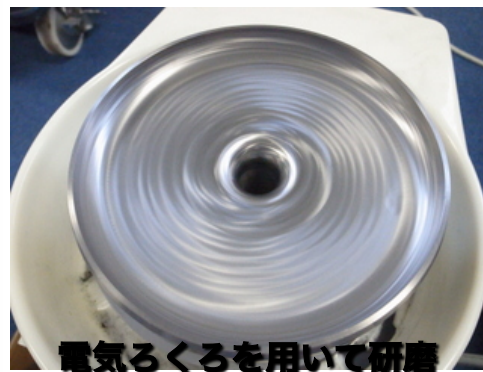
グラインド研磨

電解研磨

回転機にて溶接跡を研磨し滑らかにする

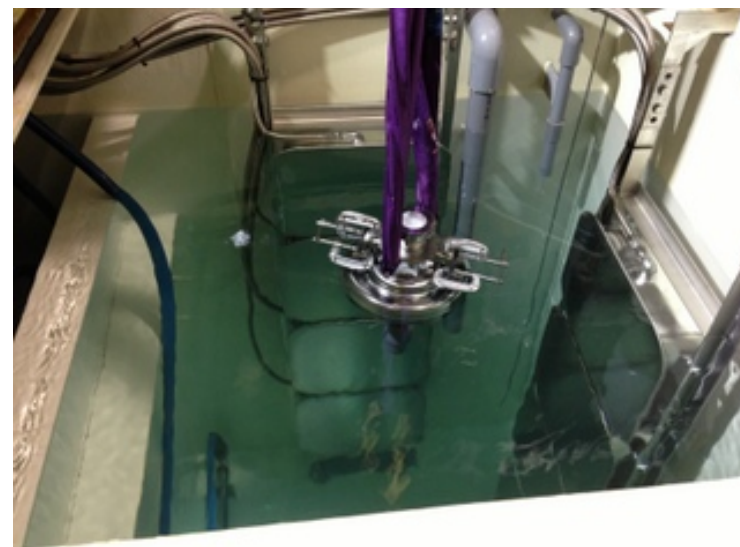
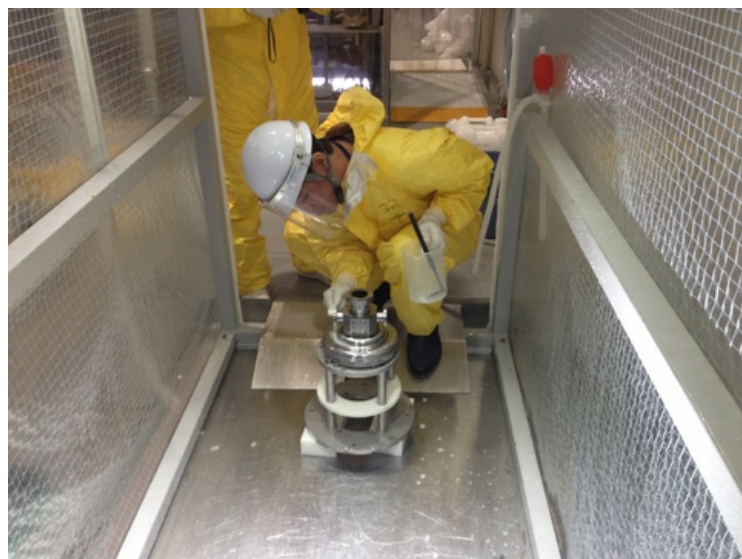
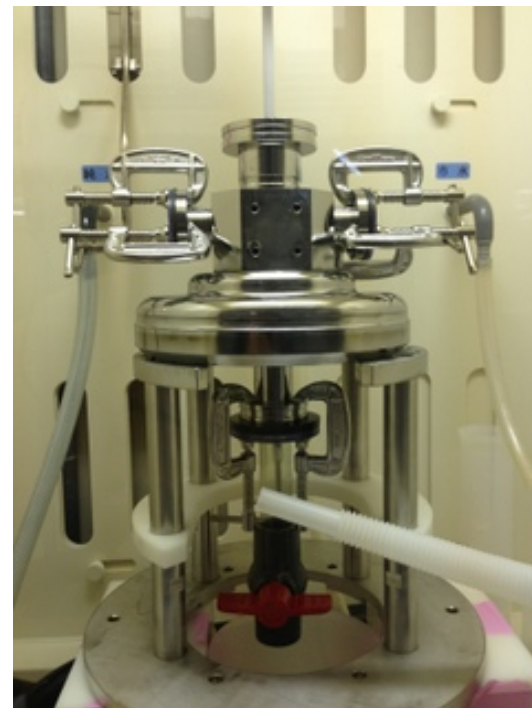


- ・ 特殊な形状 -> halfcellで電解研磨
 - ・ 硫酸とフッ化水素酸からなるEP液に空洞を浸し、空洞に陽極、さらにアルミからなる陰極がEP液に浸かり、空洞が研磨される
 - ・ 本番前にサンプルを用い研磨スピードによる仕上がりの状態を観察
- 50mA/cm²を採用
- ・ 研磨量は電流値から概算でき、今回はおよそ70μm



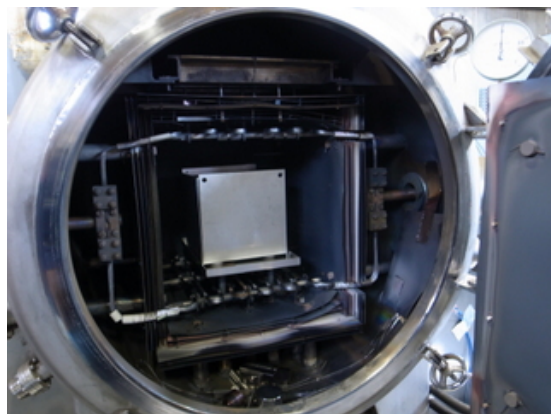
化学 研磨

- ・赤道EBW後の仕上げ研磨
- ・硝酸、フッ化水素酸、リン酸からなるCP液が空洞表面を研磨
- ・反応速度は $4\mu\text{m}/\text{min}$ 程度
- ・最終的な研磨量は、CP液中に溶け込んだNbの濃度から概算でき、今回は $33\mu\text{m}$ 程度
- ・CP後、空洞内に洗浄液を入れ超音波洗浄

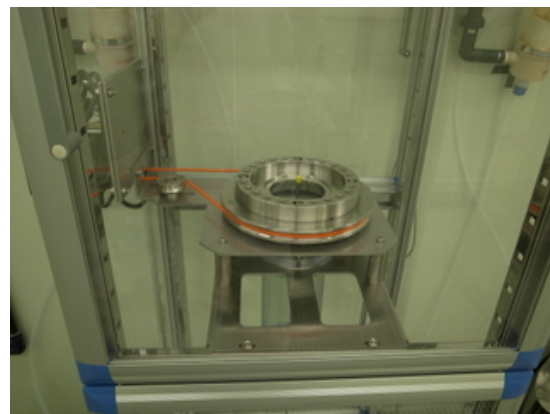


焼鈍

- ・空洞表面の脱ガス
水素病を防ぐ



真空炉内に設置した空洞



高圧洗浄の際にはこの回転台座を使用

高圧

洗浄

- ・CP後、加工中に付着したホコリや酸化ニオブなどを5MPaの高圧超純水で空洞を洗浄
- ・以後作業はクラス10のクリーンルーム内で行った

組み

立て

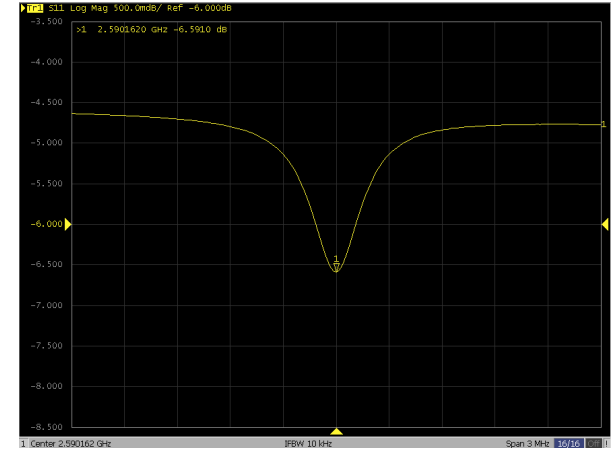
- ・測定に向けて、フランジやRFアンテナ、周波数チューニング用治具を取り付け
- ・フランジのシールにはガスケットではなくインジウムリボンを使用
- ・組み立て後真空引きを行う -> 2×10^{-6} Pa



インジウムリボン

空洞の性能評価

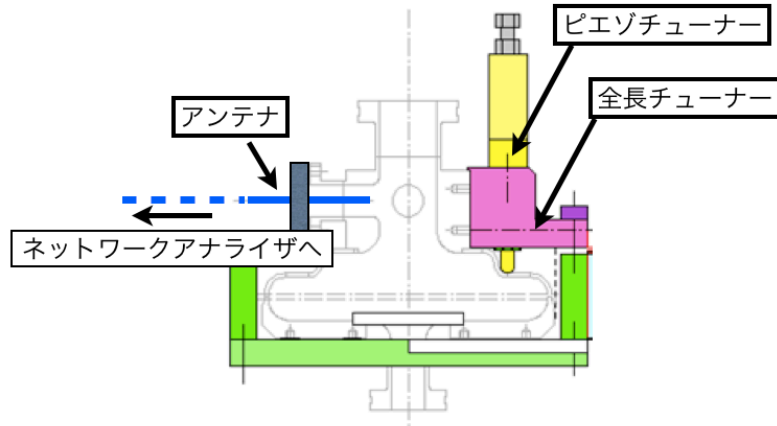
- TM₀₁₀とTM₀₂₀の共振周波数比がどの程度か(目標は2)
- 各モードのQ₀と軸上最大電場E_{ap}



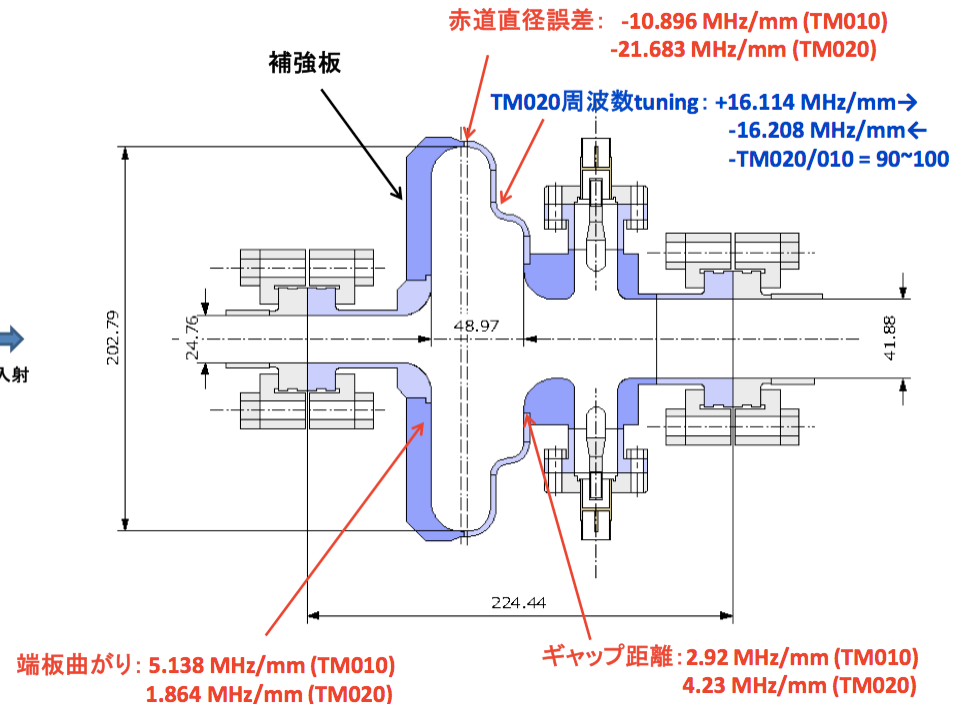
ネットワークアナライザによるS₁₁測定

室温下での周波数チューニング

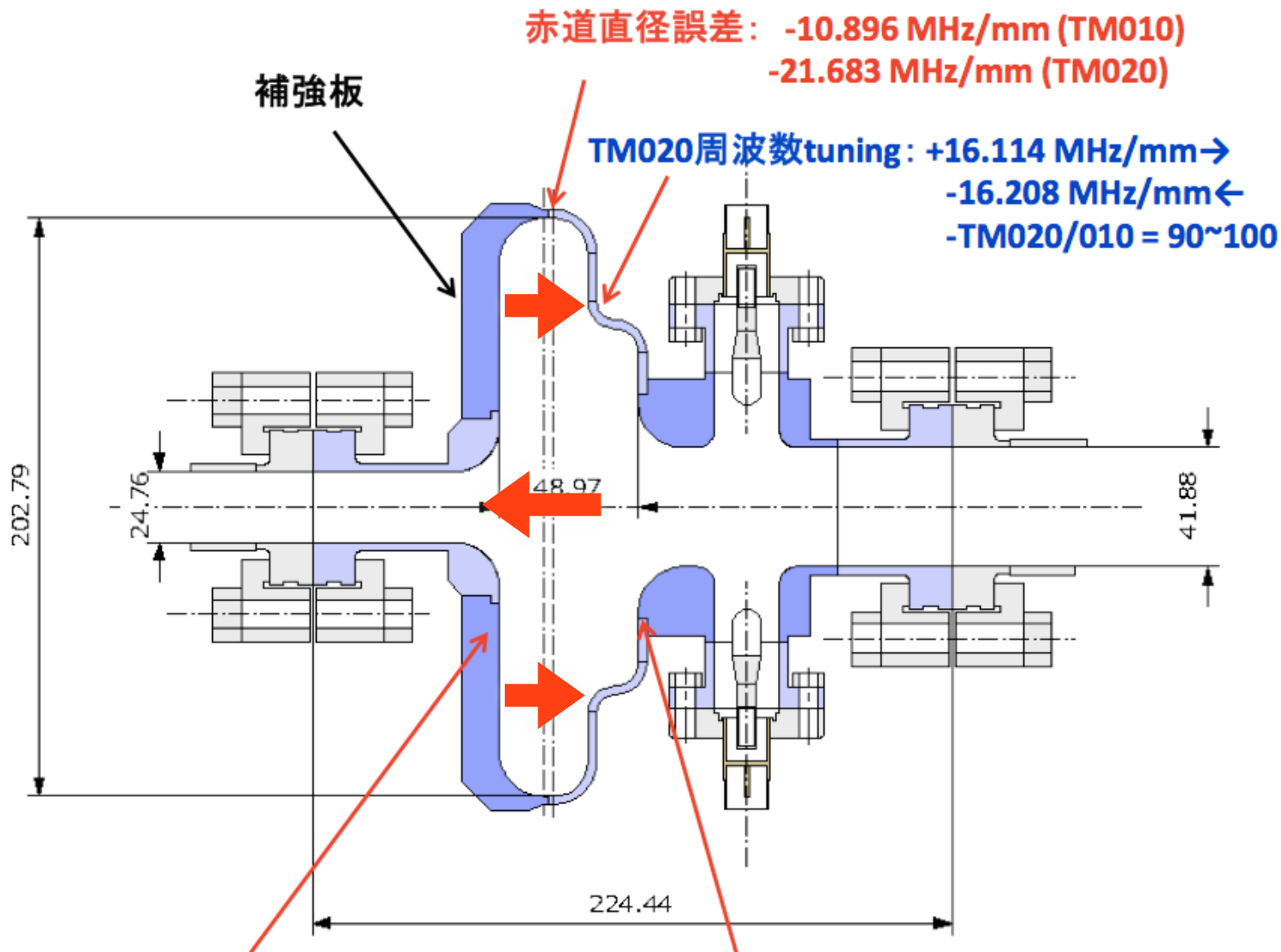
室温環境下で空洞を变形させることによる周波数の変化を測定する



電子入射



電子入射

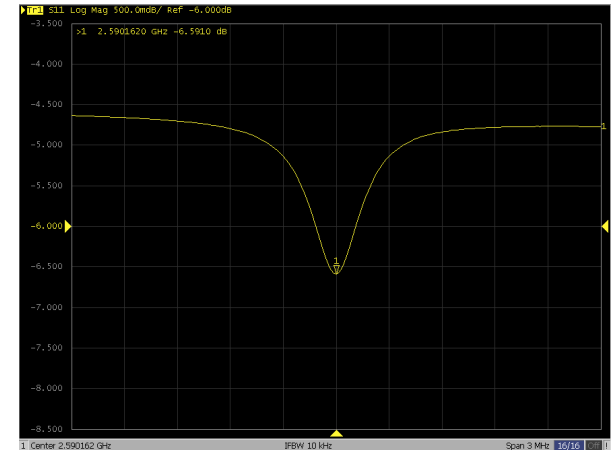


端板曲がり: $5.138 \text{ MHz/mm (TM010)}$
 $1.864 \text{ MHz/mm (TM020)}$

ギャップ距離: $2.92 \text{ MHz/mm (TM010)}$
 $4.23 \text{ MHz/mm (TM020)}$

空洞の性能評価

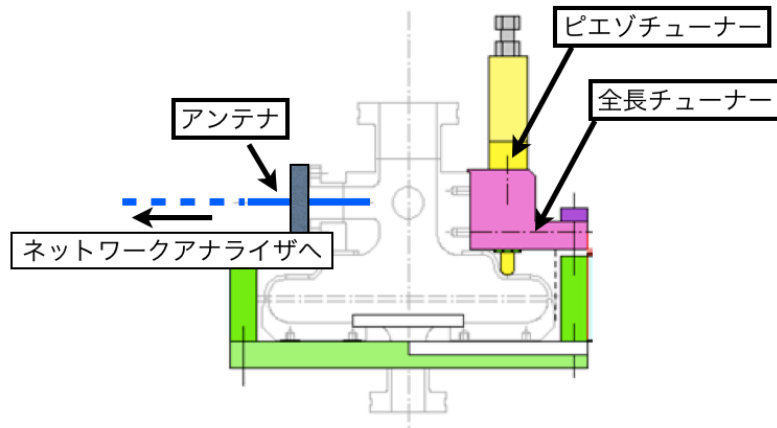
- TM₀₁₀とTM₀₂₀の共振周波数比がどの程度か(目標は2)
- 各モードのQ₀と軸上最大電場E_{ap}



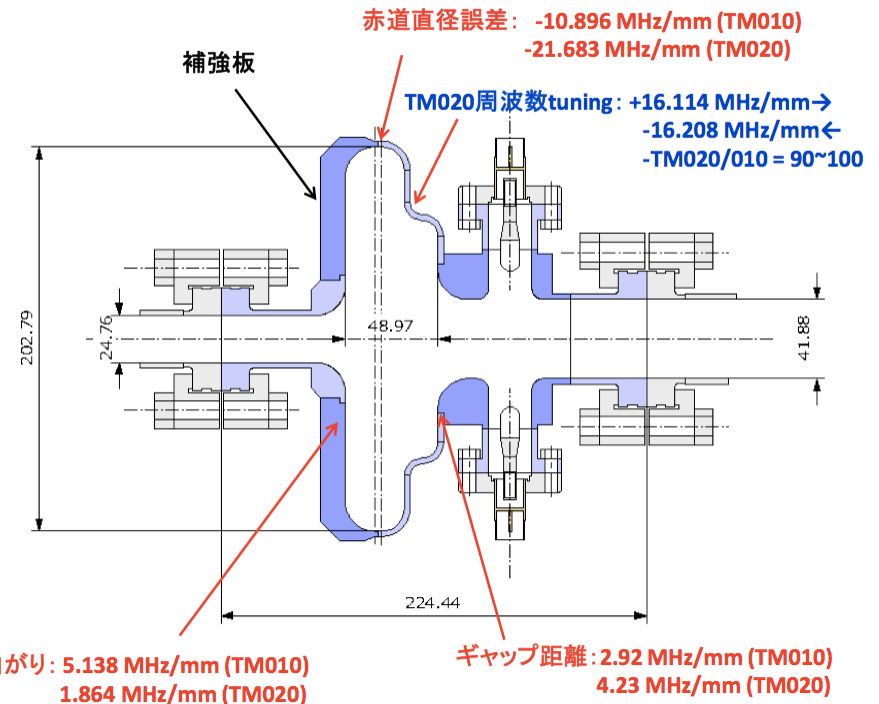
ネットワークアナライザによるS₁₁測定

1. 室温下での周波数チューニング

室温環境下で空洞を变形させることによる周波数の変化を測定する

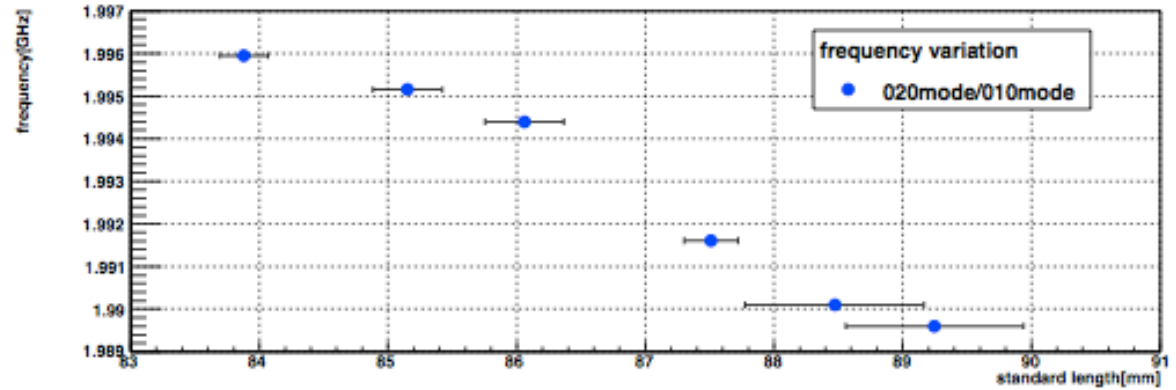
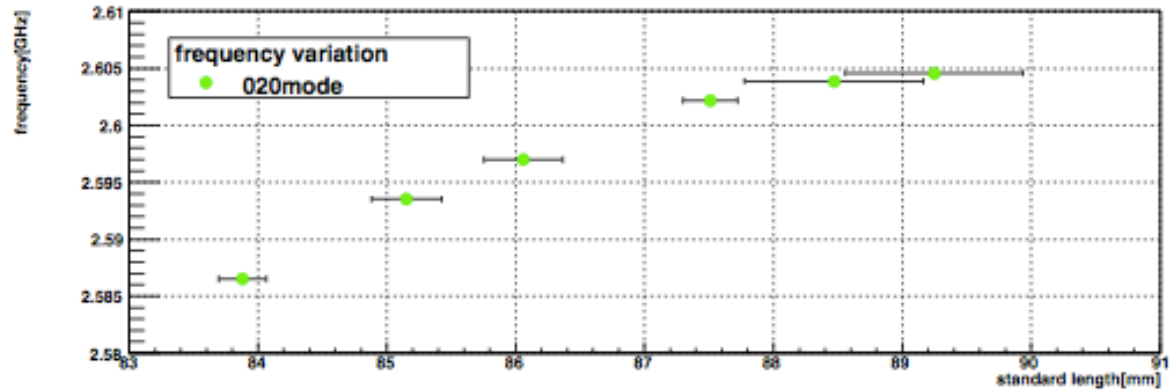
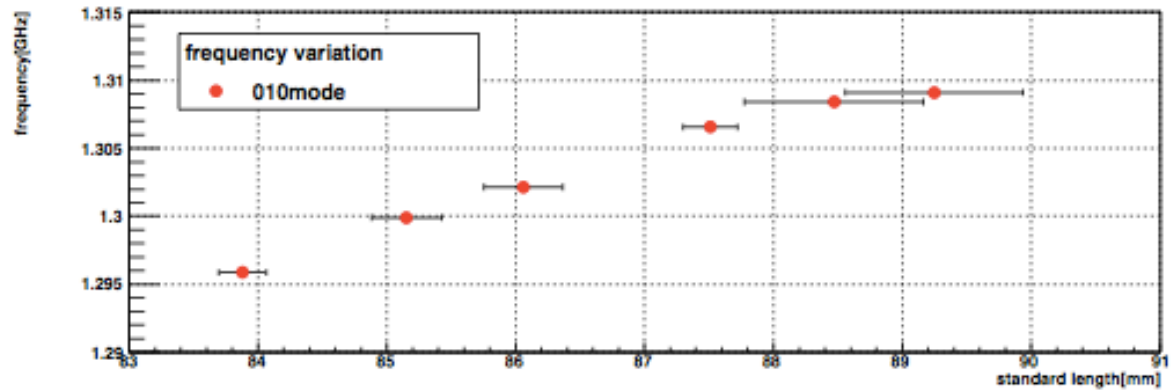
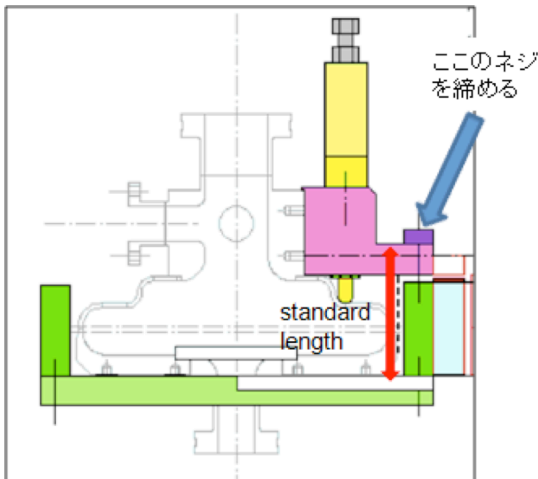


電子入射



全長チューナーによる 周波数チューニング

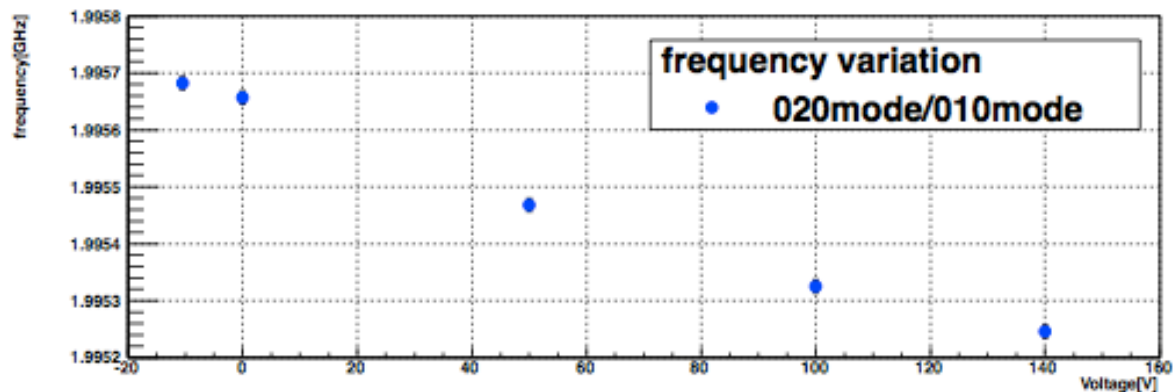
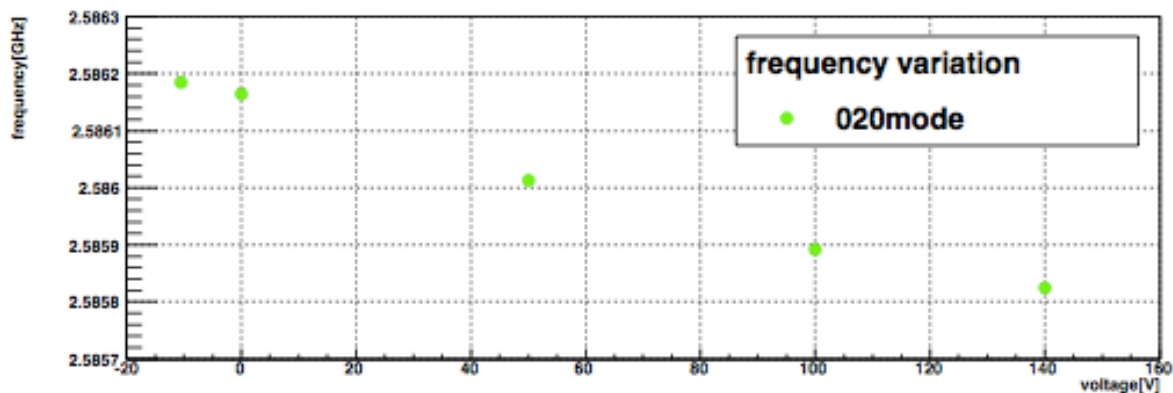
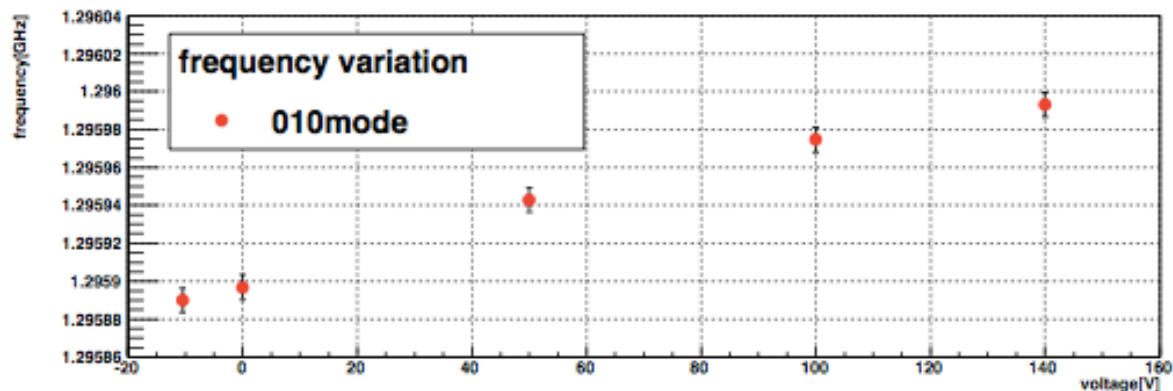
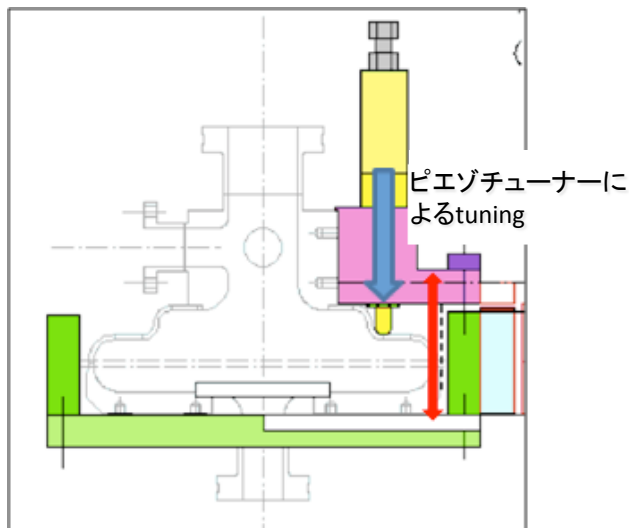
- ・全長チューナーにより ratio を大きく調整することが可能である
- ・ratio は 1.9948 から 1.9960 まで改善



ピエゾチューナーによる 周波数チューニング

TM₀₁₀はおよそ1.0kHz/V
TM₀₂₀はおよそ-2.7kHz/V

・ピエゾチューナーによ
りratioの微調整が可能
である

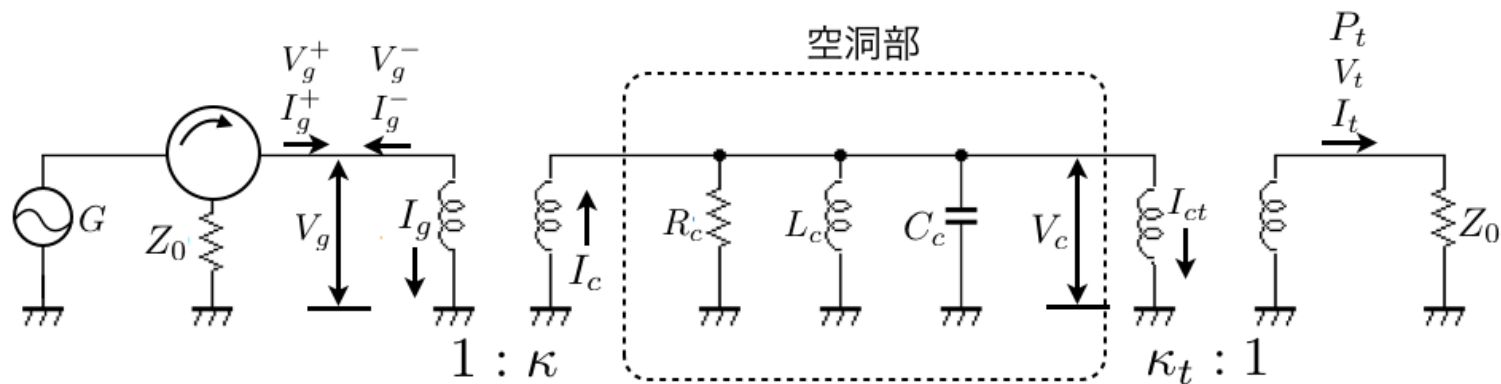
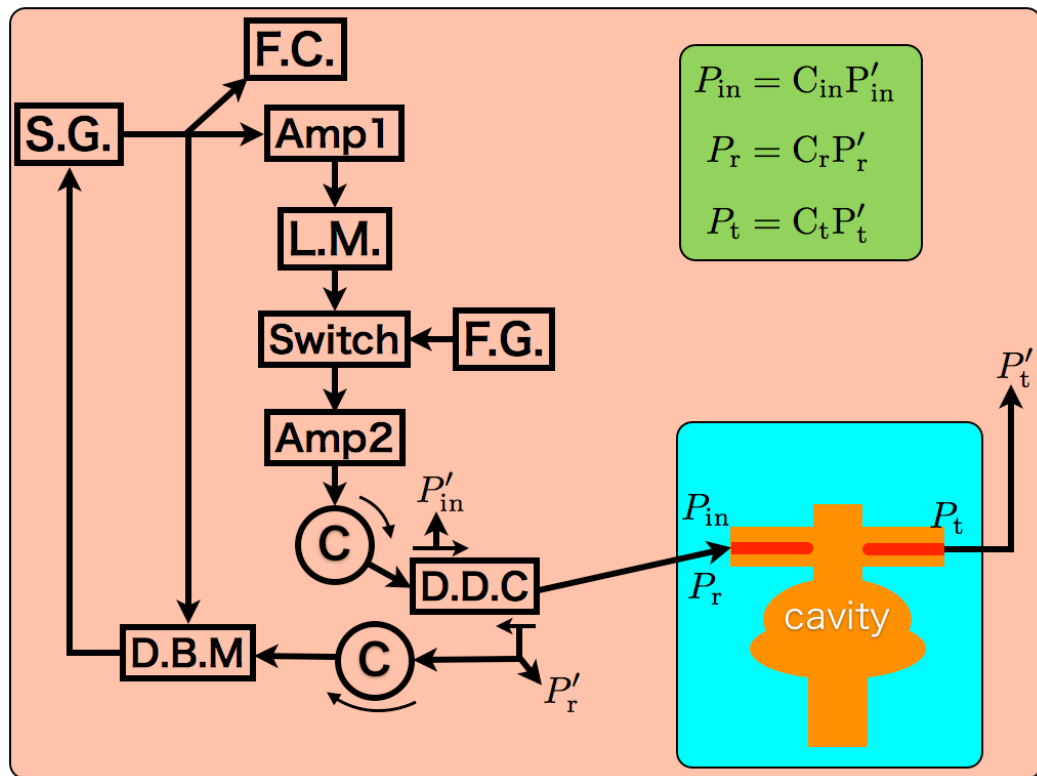


低温試験

・液体ヘリウム(4.2K)内に設置

・入射パワー
 反射パワー
 透過パワー

→ E_{ap} 、 Q_0



	TM ₀₁₀	TM ₀₂₀
周波数 [GHz]	1.3002	2.6000
Q ₀	1.86×10 ⁸	1.00×10 ⁸

設計値に近いQ₀

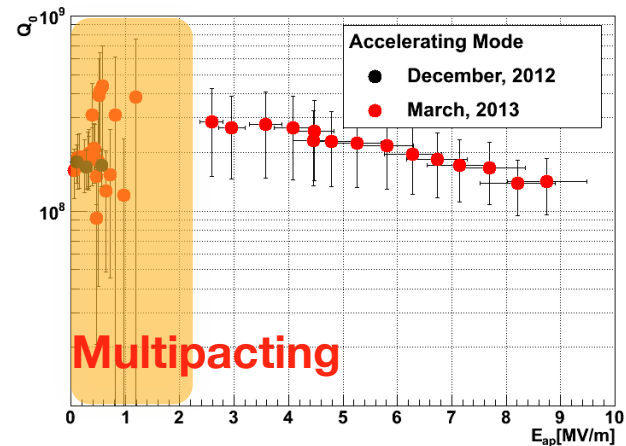
空洞製作法の確立

- TM₀₁₀においてMultipacting
2時間超のエージングにより、
要求値達成
- TM₀₂₀もほぼ要求値を達成

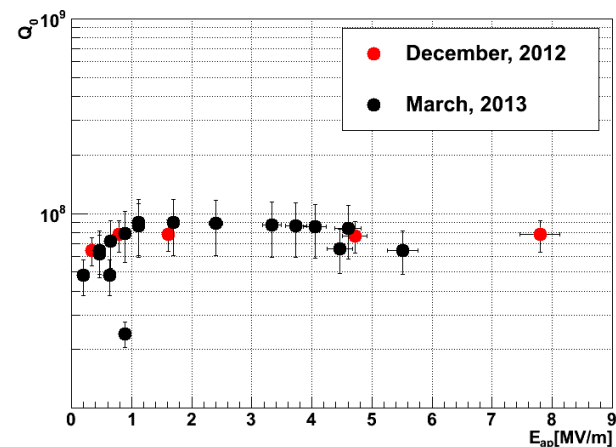


Multipacting現象(桃:反射、緑:透過)

	TM ₀₁₀	TM ₀₂₀
resonant frequency[GHz]	1.2963	2.5851
Q ₀	(1.41 ± 0.45) × 10 ⁸	(0.89 ± 0.18) × 10 ⁸
E _{ap} [MV/m]	8.75±0.73	7.80±0.33



TM₀₁₀におけるE_{ap} vs. Q₀



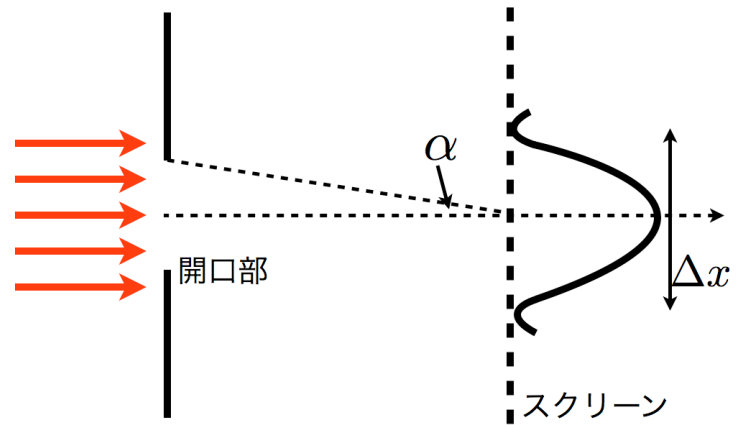
TM₀₂₀におけるE_{ap} vs. Q₀

超伝導体の特性

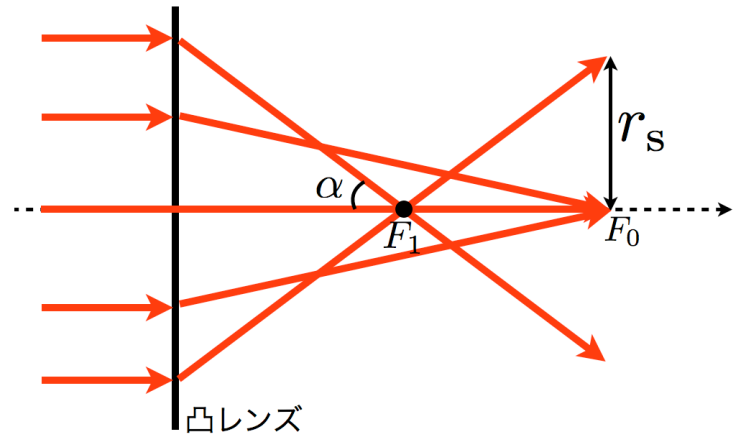
	Tc[K]	Hc1[kOe]	Hc2[kOe]
Nb	9.3	0.4~1.1	3.0~5.5
Nb3Sn	18.3	0.17	221
NbTi	9.5	0.15	120
Pb	7.2	0.80	-

$1\text{T} \equiv 10^4\text{Oe}$

$$1/f = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



回折収差



球面収差

高周波加速方式の課題

位置分解能 Δr

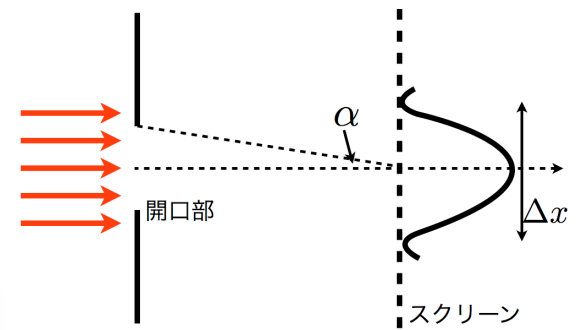
$$\Delta r^2 = (\Delta x)^2 + r_s^2 + r_c^2$$

回折収差 $\Delta x \approx \frac{0.6\lambda}{\sin \alpha}$

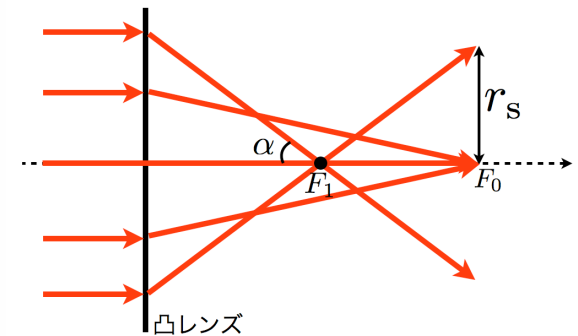
球面収差 $r_s = C_s \alpha^3$

色収差 $r_c = \alpha C_c \frac{\Delta E}{E}$

波長: λ
最大収束角: α
球面収差係数: C_s
色収差係数: C_c

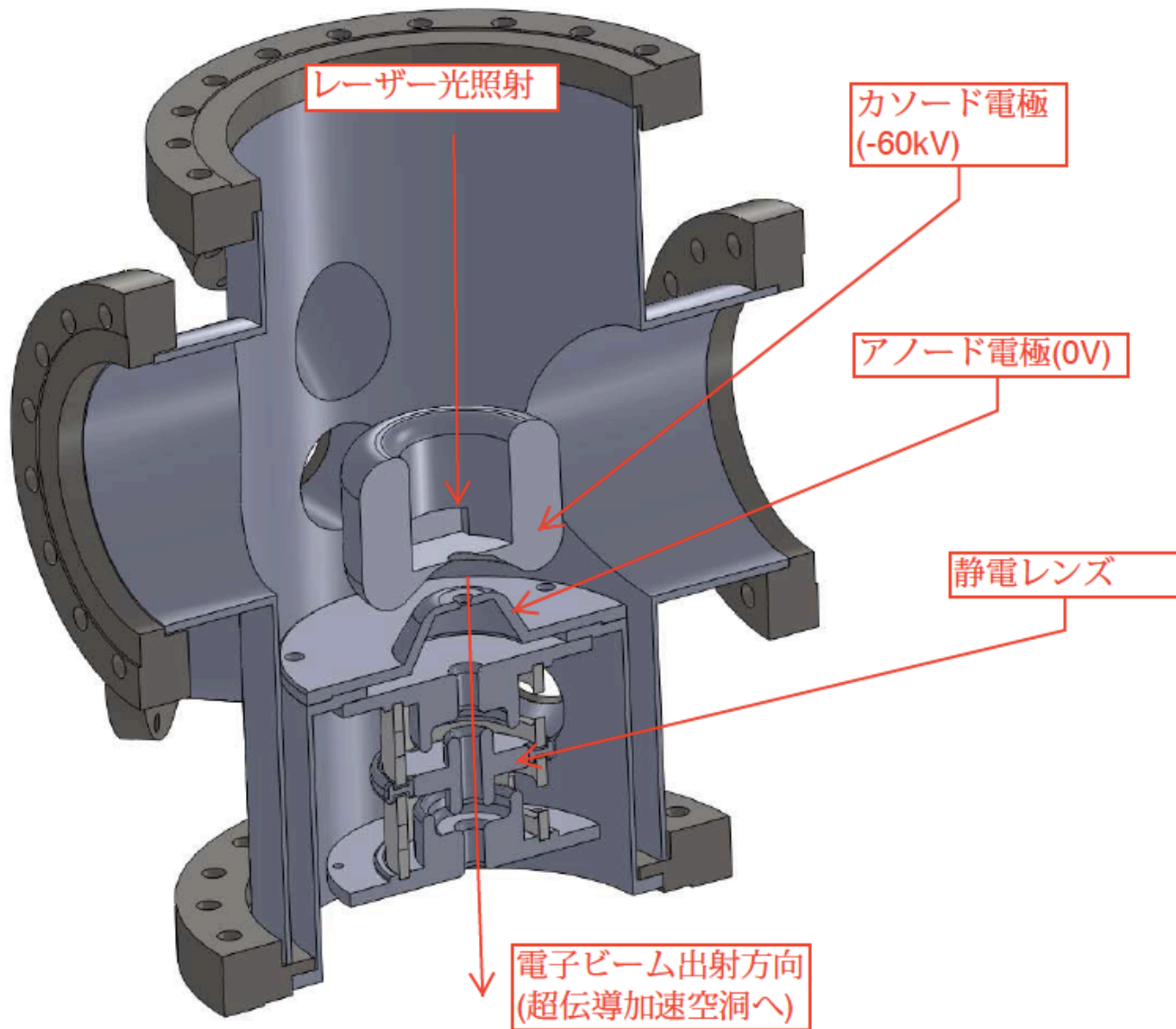


回折収差



球面収差

エネルギー分散 $\Delta E/E$ を抑える必要



3. RF制御の誤差裕度

TM₀₂₀モードの位相と振幅が最適値から変位した時のエネルギー分散の劣化を調べた



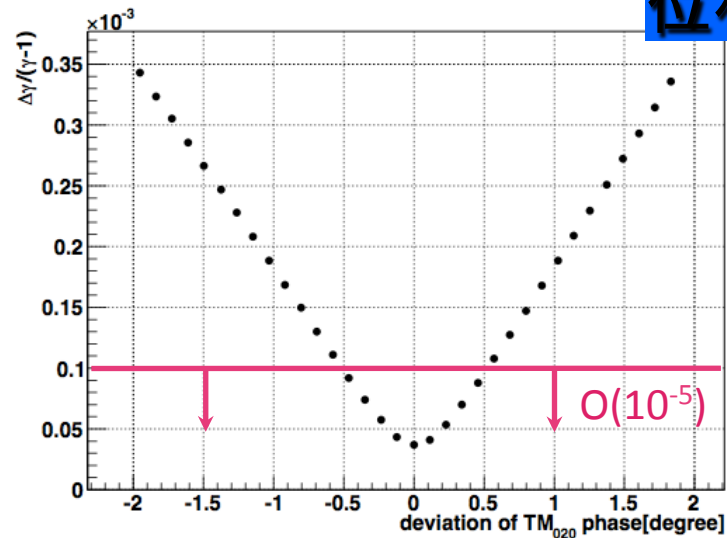
振幅は1.5%、位相は0.5deg.程度の変位でエネルギー分散は $O(10^{-4})$ と悪化してしまう

KEKにおけるS1-Globalのlow level RF制御で振幅49ppm、位相15mdeg.のstabilityを達成

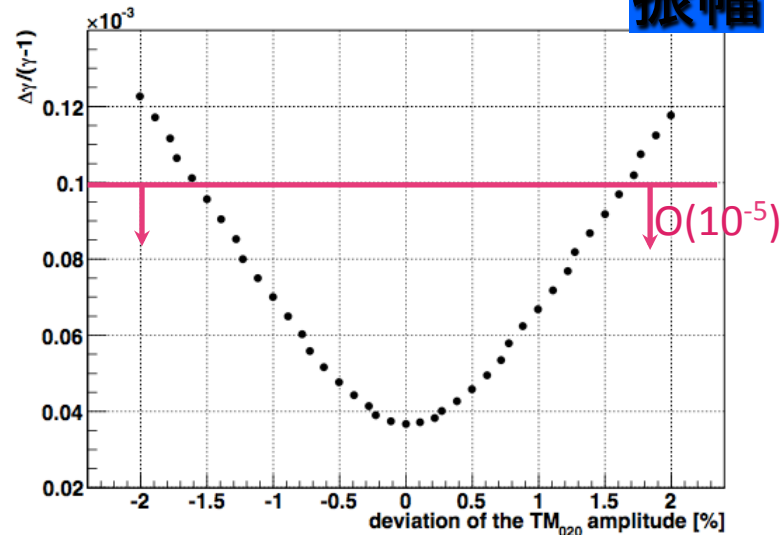
さらに今回はCWで安定

これと同様の制御システムを採用すれば電頭に十分に適用できる

位相



振幅

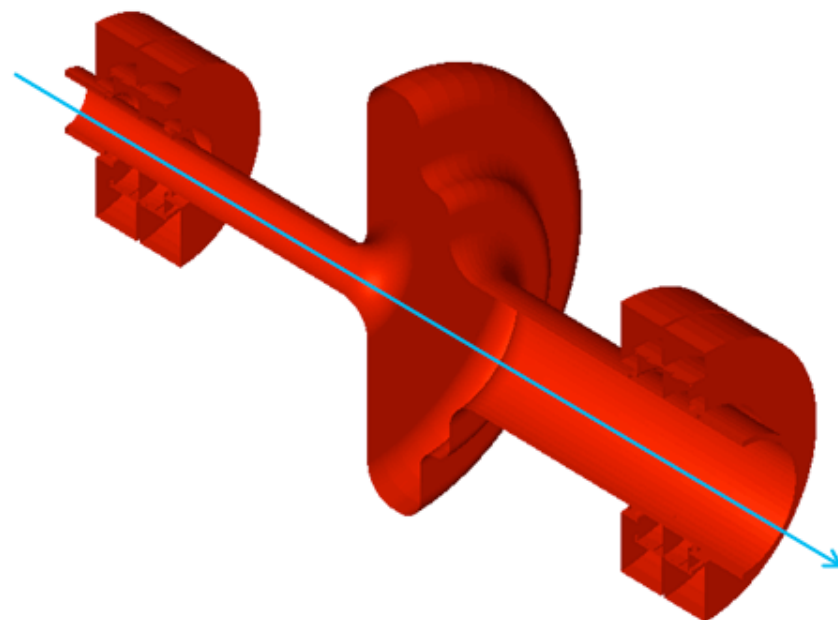


(C) 超伝導空洞、RF源の開発

空洞設計 (MODEL : SCEM-C003Y) (一つ案)

1.3GHz (TM010)と2.6GHz (TM020)の混在型
(dual-harmonic)

(TM010) S(Ez) = 1MV/m			
周波数	1299 MHz	R/Q @beta=1	114 ohm
Q0 at 2K	0.794E+10	Pcav	69.1 mW
Q0 for Cu	15000	Pcav	36.55 kW
Eap = 213.1*SQR(P*Q) V/m		Esp = 282.9*SQR(P*Q) V/m	
Esp/Eap	1.33	Hsp = 0.4968*SQR(P*Q) A/m	
(at 300 keV)			
Eaxis peak	8.60 E+06 V/m	Esurf peak	11.4 E+06 V/m
Hsp	20050 A/m		
(TM020) S(Ez) = 1MV/m			
周波数	2599 MHz	R/Q @beta=1	33.1 ohm
Q0 at 2K	0.467E+10	Pcav	82.6 mW
Q0 for Cu	23927	Pcav	16.12 kW
Eap = 228.4*SQR(P*Q) V/m		Esp = 209.2*SQR(P*Q) V/m	
Esp/Eap	0.916	Hsp = 0.4051*SQR(P*Q) A/m	
(at 300 keV)			
Eaxis peak	12.3 E+06 V/m	Esurf peak	11.2E+06 V/m
Hsp	21788 A/m		



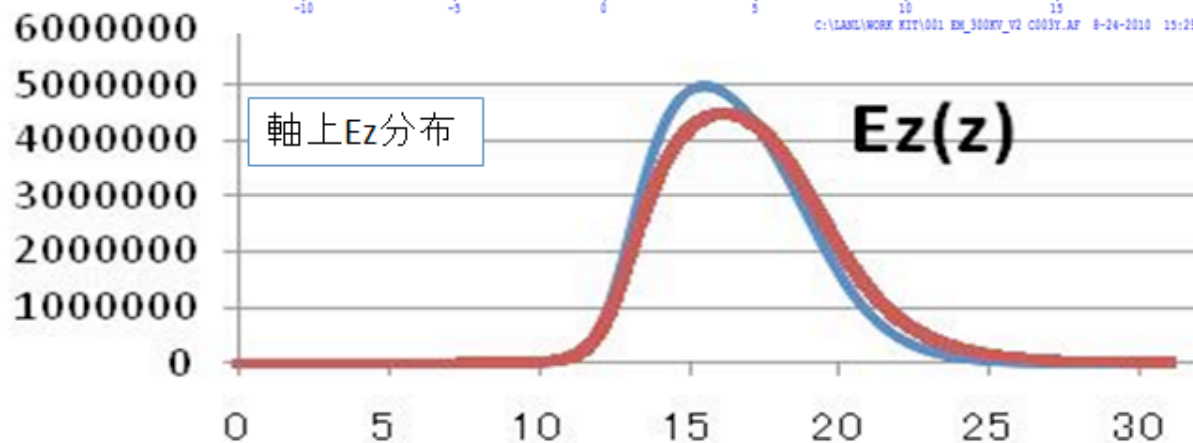
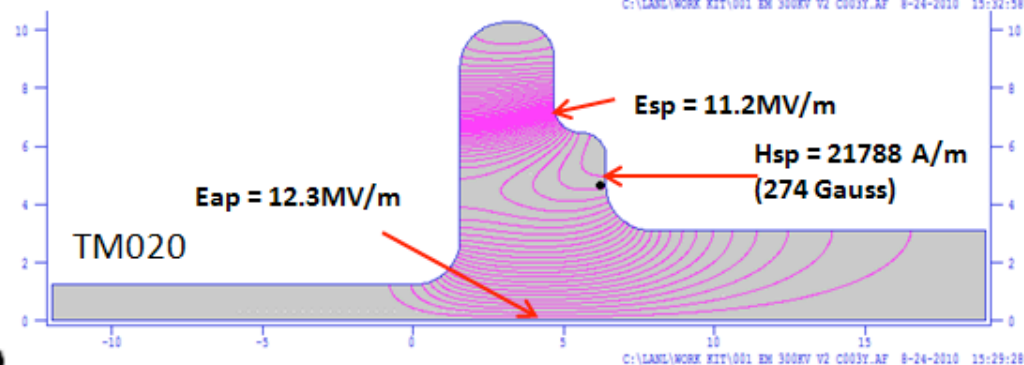
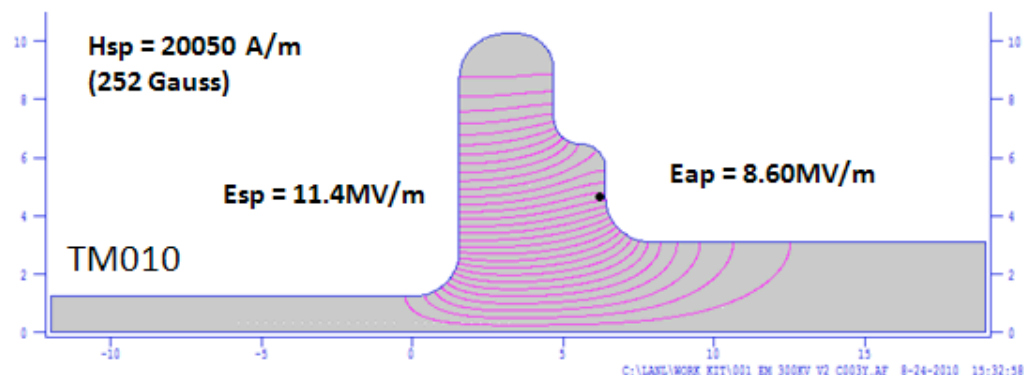
設計のポイント

- ・高調波が基本波のちょうど2倍になる形状
- ・製作誤差とその周波数への寄与
- ・製作誤差を補正するための周波数調整の場所
基本波(1.3GHz)よりは高調波(2.6GHz)に合わせることを優先させる
- ・少なくとも電子エネルギー300keVは到達可とする

5. 空洞field分布

(1) 60 keV → 300keV加速のために

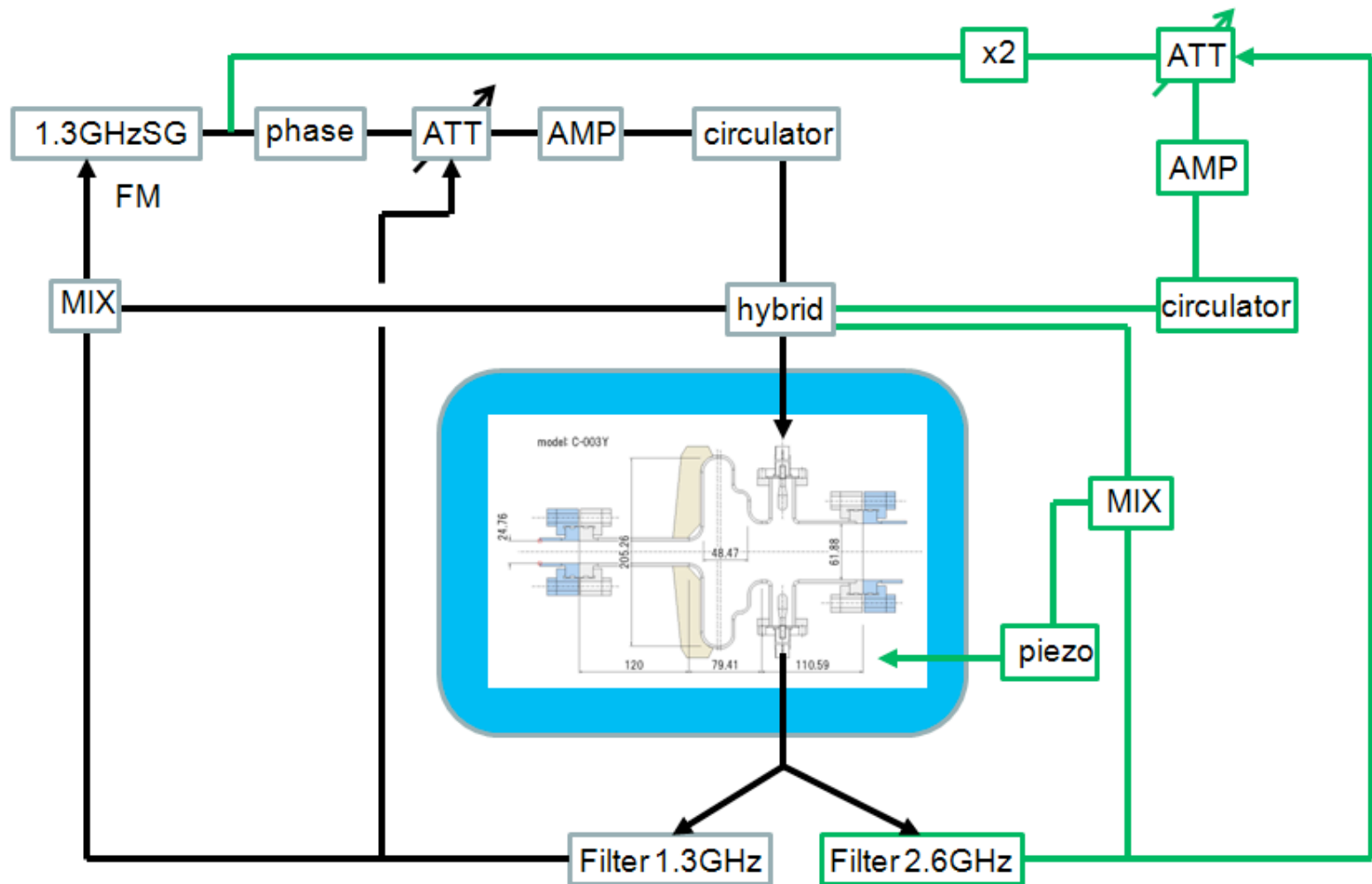
電場分布



このときの空洞損失

TM010	2K	4.4K
Q0	7.9E+9	1.9E+08
QL		
Pcav	0.205 W	8.71 W
TM020	2K	4.4K
Q0	4.7E+9	1.1E+08
QL		
Pcav	0.620 W	27.4 W
合計	0.825W	36.1W

周波数のチューニングと制御(一つの案)



○ J-PARC、ILC、ERL等で開発された高精度のlow level RF制御技術を用いて、電子のエネルギー幅を極小にする。