



国立大学法人 京都大学

エネルギー理工学研究所

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



三極管型熱陰極高周波電子銃用 同軸共振空洞の開発

井門 秀和、三島 健太、K. Torgasin、増田 開、
犬飼 元晴、奥村 健祐、柴田 茉莉江、島橋 享兵、
N. Hani、吉田 恭平、M. Omer、金城 良太、Y. W. Choi、
全 炳俊、紀井 俊輝、大垣 英明

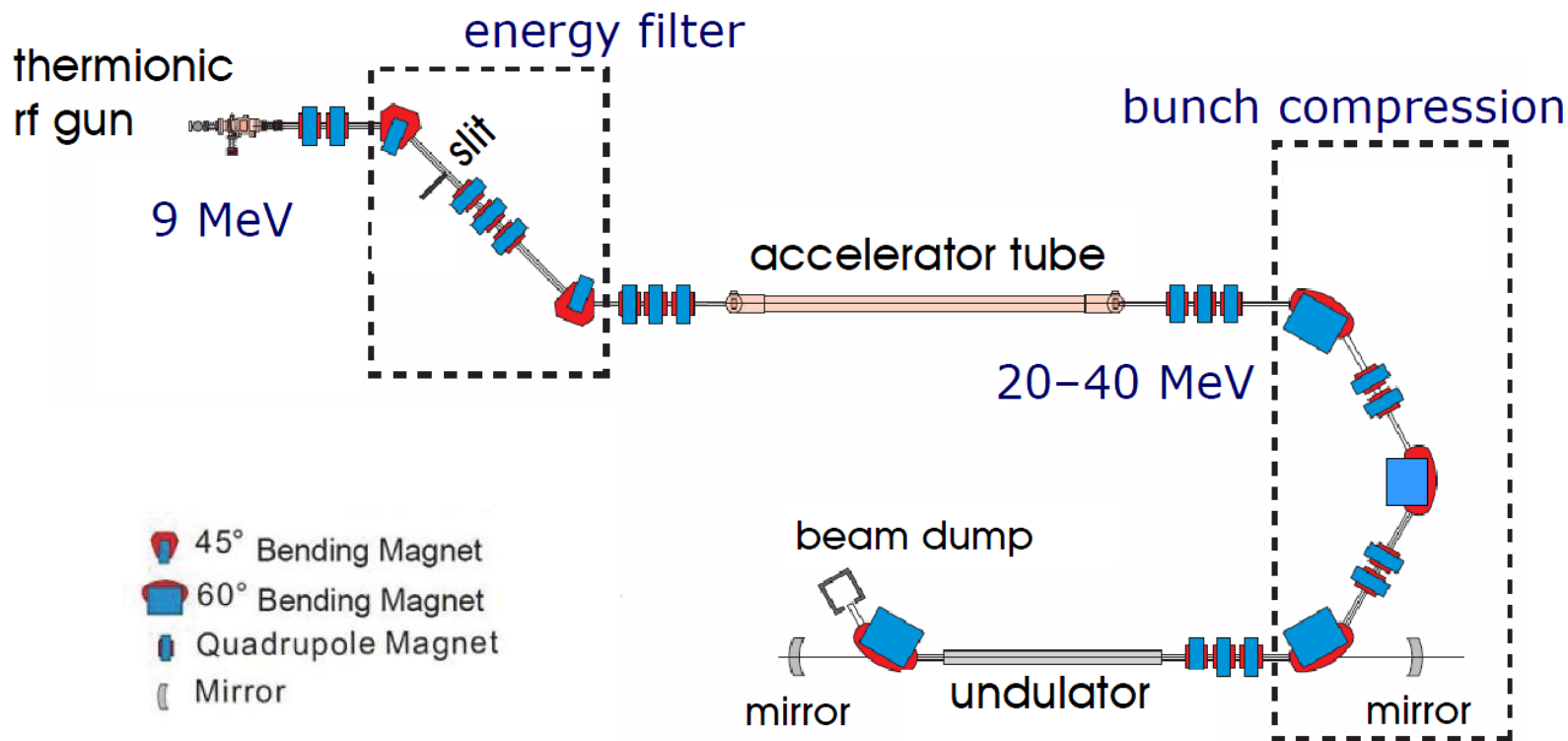


発表内容



- 背景
- 目的
- プロトタイプの実験
- 改良機的设计
- 改良機の実験
- まとめ
- 今後の予定

KU-FEL (Kyoto University FEL) 装置概要



熱陰極高周波電子銃

4.5空胴熱陰極型高周波電子銃

drive rf power < 10 MW

2.856 GHz

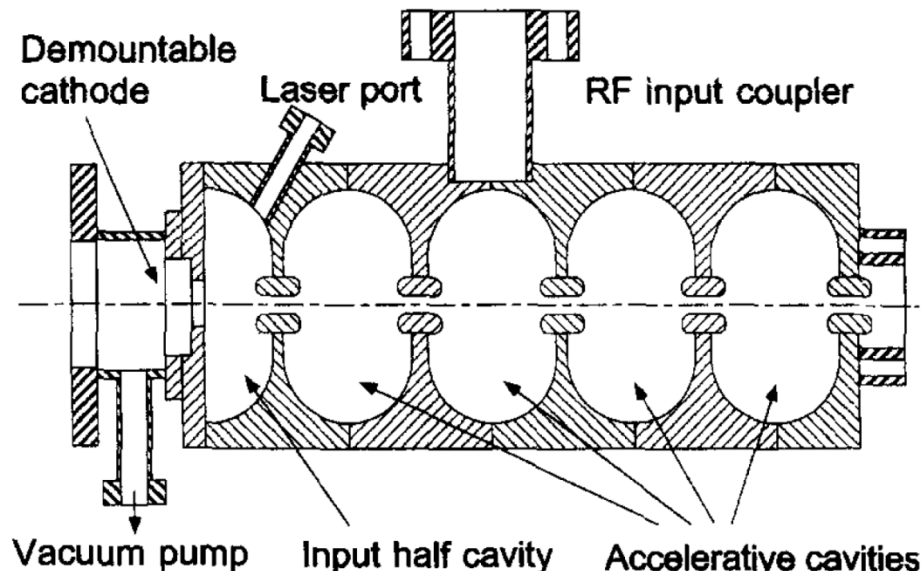
< 10 μ sec

< 10 Hz



thermionic cathode mount

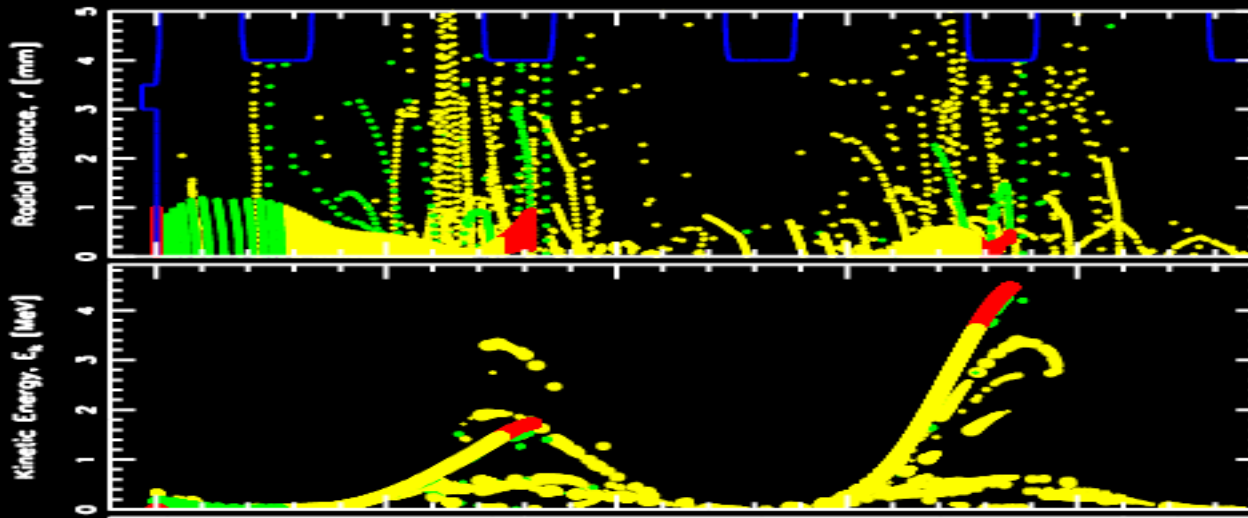
電子銃断面模式図



Resonant frequency [MHz]	2856
Coupling coefficient β	2.79
Q value	12500
R/Q [Ω]	980
Number of cells	4.5
Accelerating mode	π
Cathode radius [mm]	1
Cathode material	LaB ₆
Initial cathode temperature [$^{\circ}$ C]	1545



Back Bombardment現象



KUBLAI v1.34
beamplot

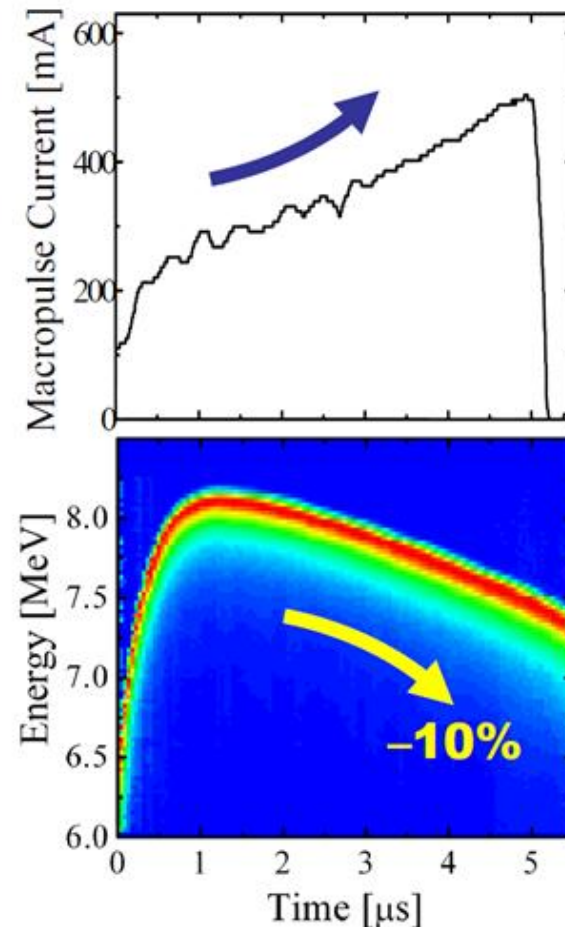
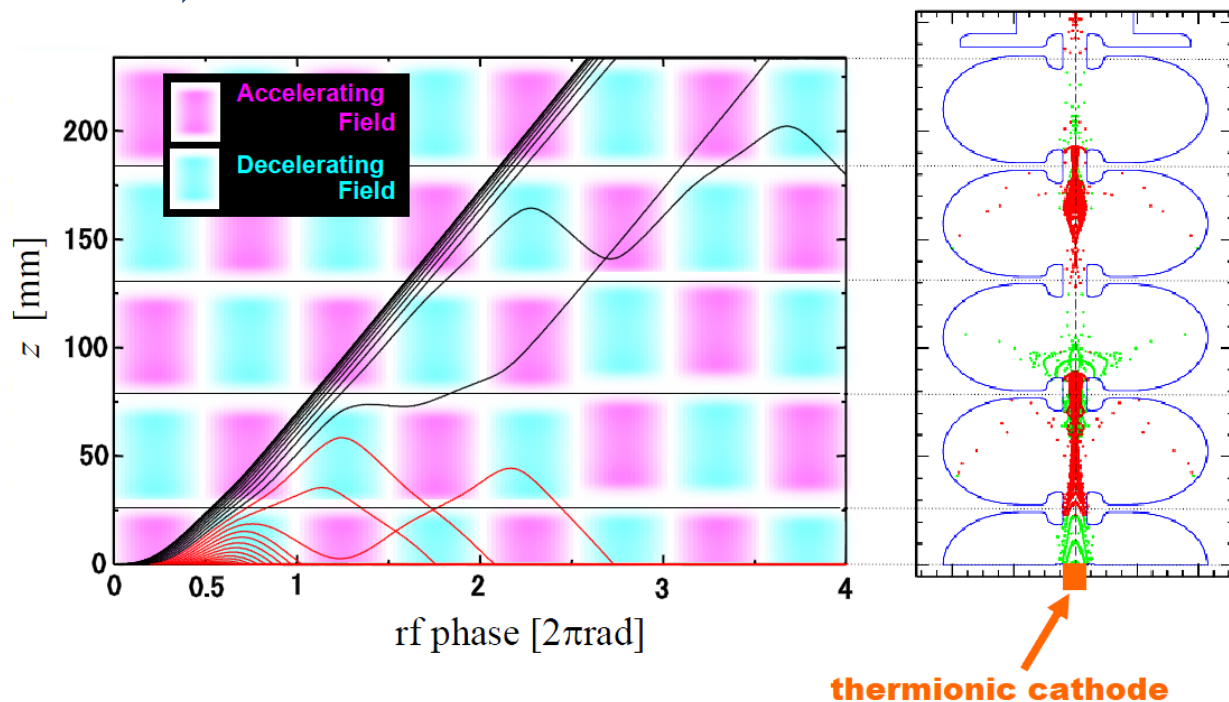
Fri Feb 10 16:50:08 2006
blefileID: 01+++

6th rf cycle
rf phase
1/16 [2π rad]
of particles
total : 24273
electron : 24273
Classification by Color
— Total Field
— Vacuum Field
— Cavity Field
— Beam-Induced Field
— Mesh
Electrodes

Back Bombardment現象

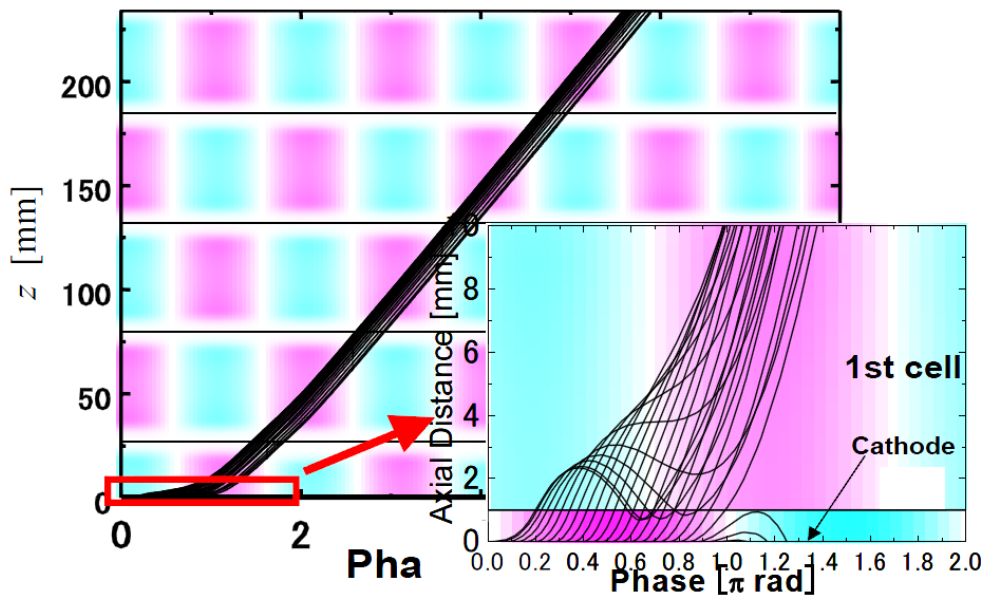
1. 減速位相で逆加速されて戻ってきた電子が陰極に衝突
2. 陰極が加熱され、引き出し電流が増加
3. ビームローディングが増加、ビームのエネルギーが低下

➡ 長マクロパルス運転ができない

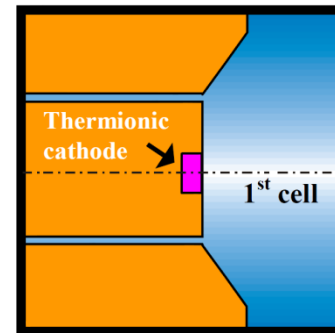


三極管型高周波電子銃

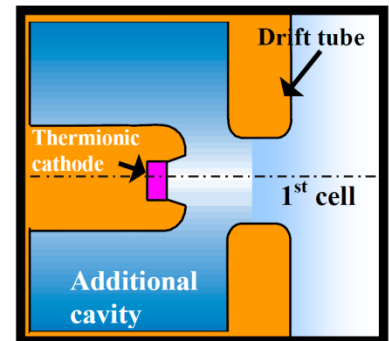
第1空胴の手前に同軸共振空胴を追加し、
電子が加速位相に乗るように第1空胴以降とは独立に位相と振幅を制御する



short-gap
rf cavity



(a) Conventional type

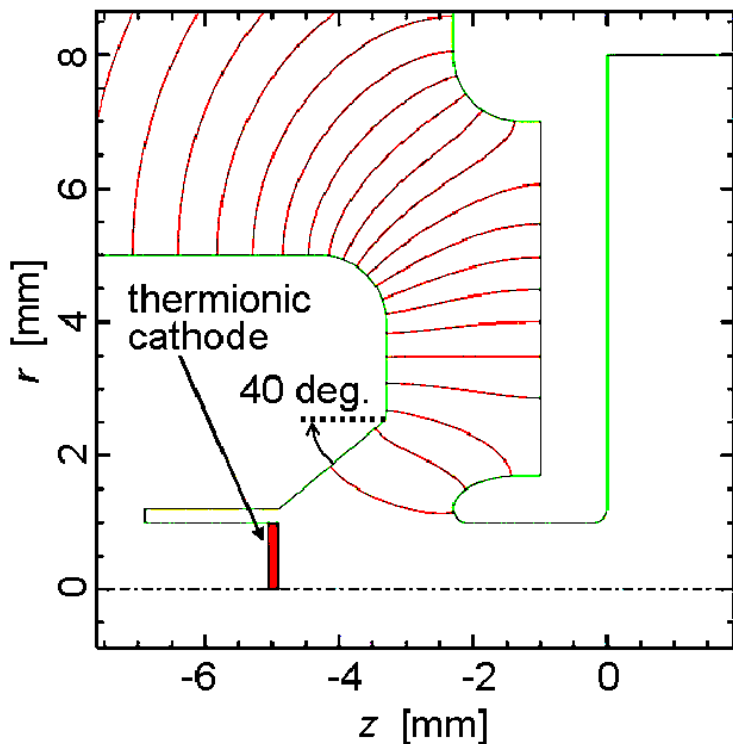


(b) Triode type

シミュレーション

ウェーネルト構造により電子ビームに収束力を与え、横方向エミッタンスの増加を抑制できる。
 新しい同軸共振空洞は陰極付近の電場の密度が高くなるように設計されている。

<シミュレーション結果>



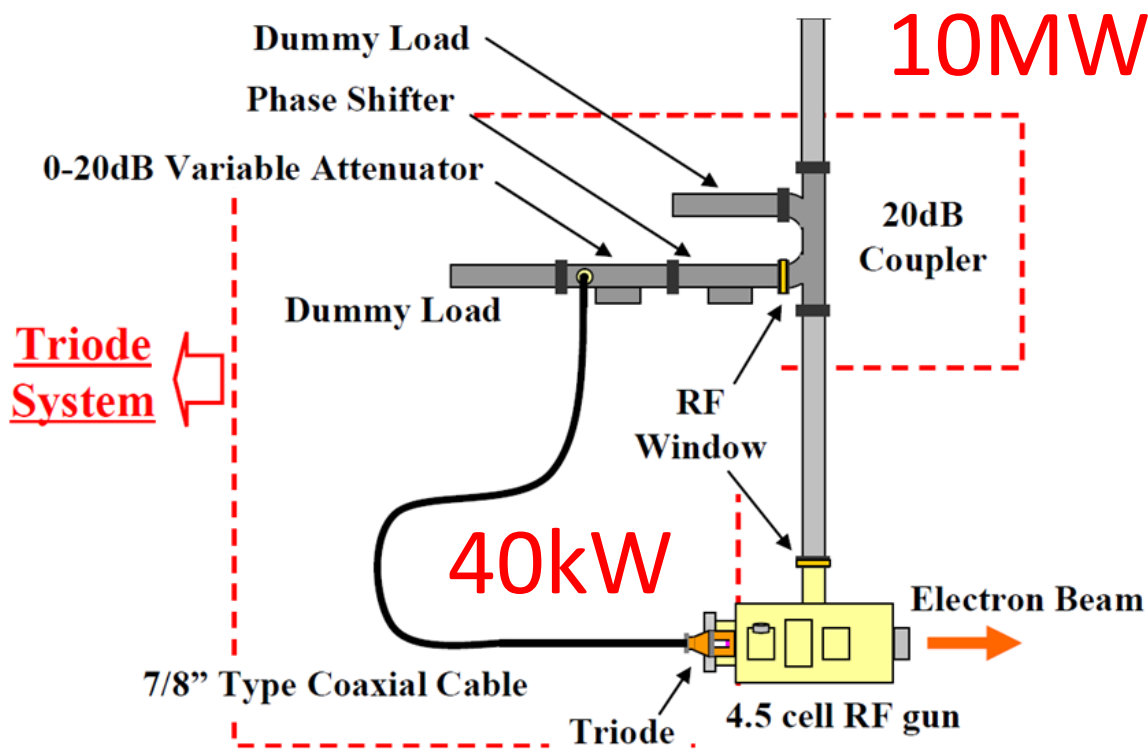
	従来型	三極管型
P_{back} (kW)	36	3.6
Emittance (r)	2.5	2.0
I_{peak} (A)	17	114
Emittance(z)	0.046	0.012



- 逆流電子のエネルギーを9割削減
- ウェーネルト構造によりエミッタンスを抑えられる

高周波電力供給系統

同軸共振空洞へは電子銃本体空洞へ供給するクライストロンからの高周波電力を20dBカップラを用いて取り出し位相器と減衰器で制御して高周波電力を供給する

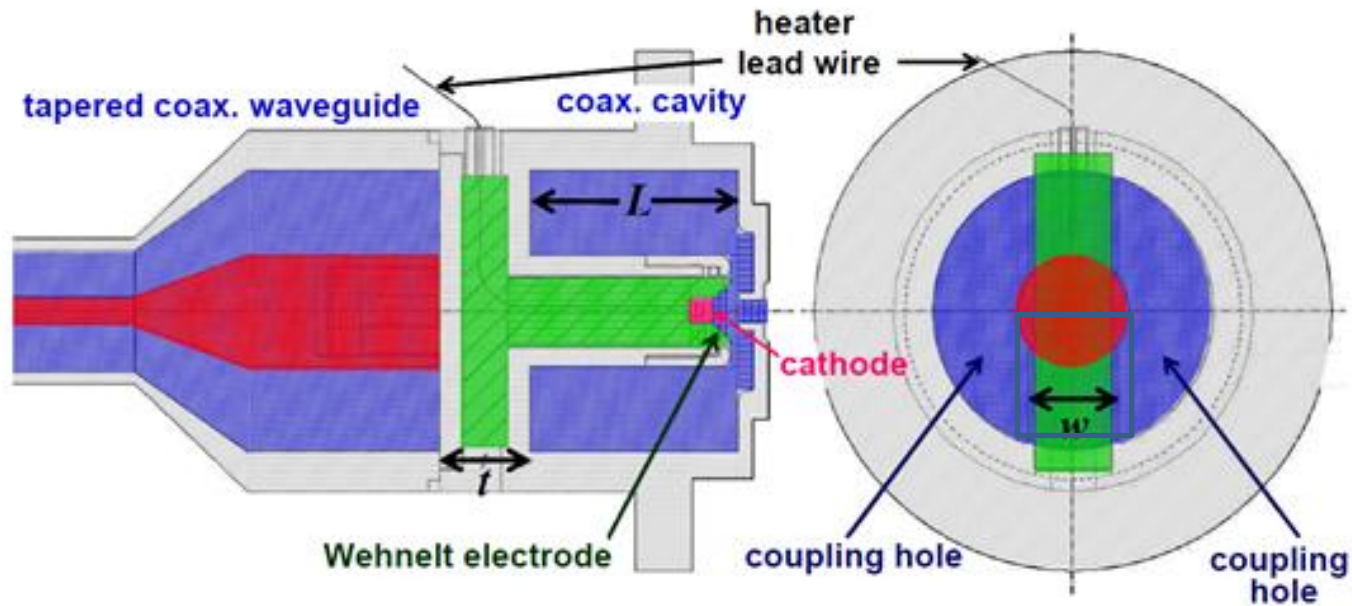




目的

使用している電子銃に設置可能な同軸共振空洞を設計する

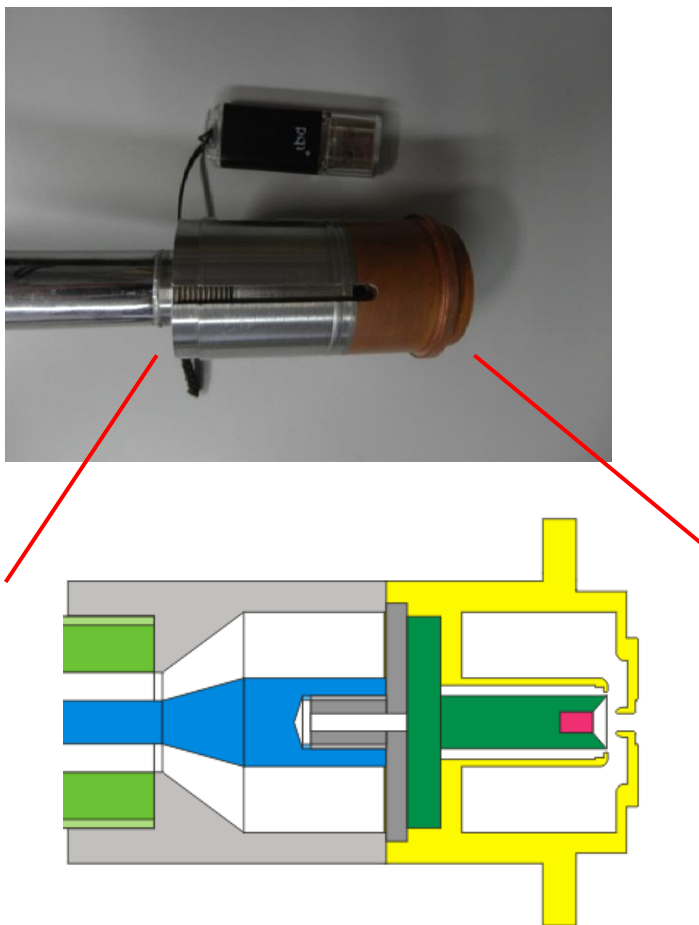
プロトタイプ的设计



Design parameters	prototype
<input type="checkbox"/> L cavity length	$L = 19.62 \rightarrow f_0$
<input type="checkbox"/> t bridge thick. ($t \geq 6$)	$t = 8$
<input type="checkbox"/> w bridge width ($w \geq 8$)	$w = 8$
	} $\rightarrow \beta$
(cavity wall material: oxygen-free Cu)	$\rightarrow Q_0$

プロトタイプ

<キャビティ>

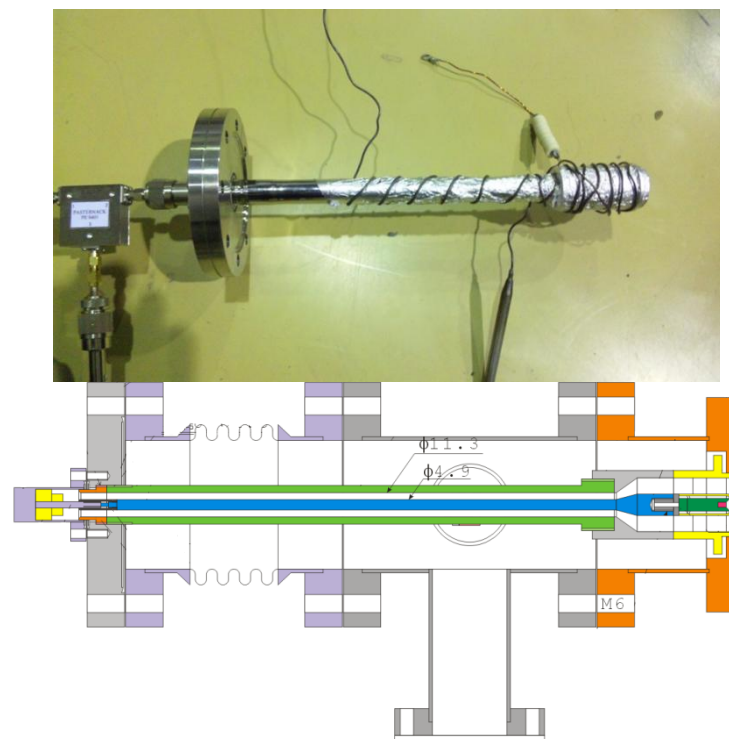
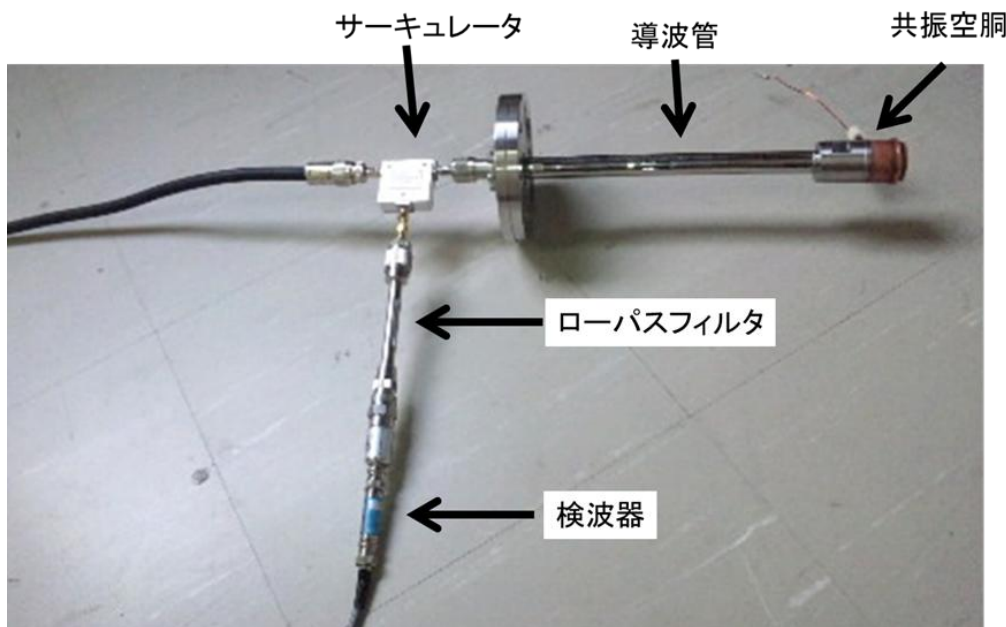


<設計時の空洞パラメータ>

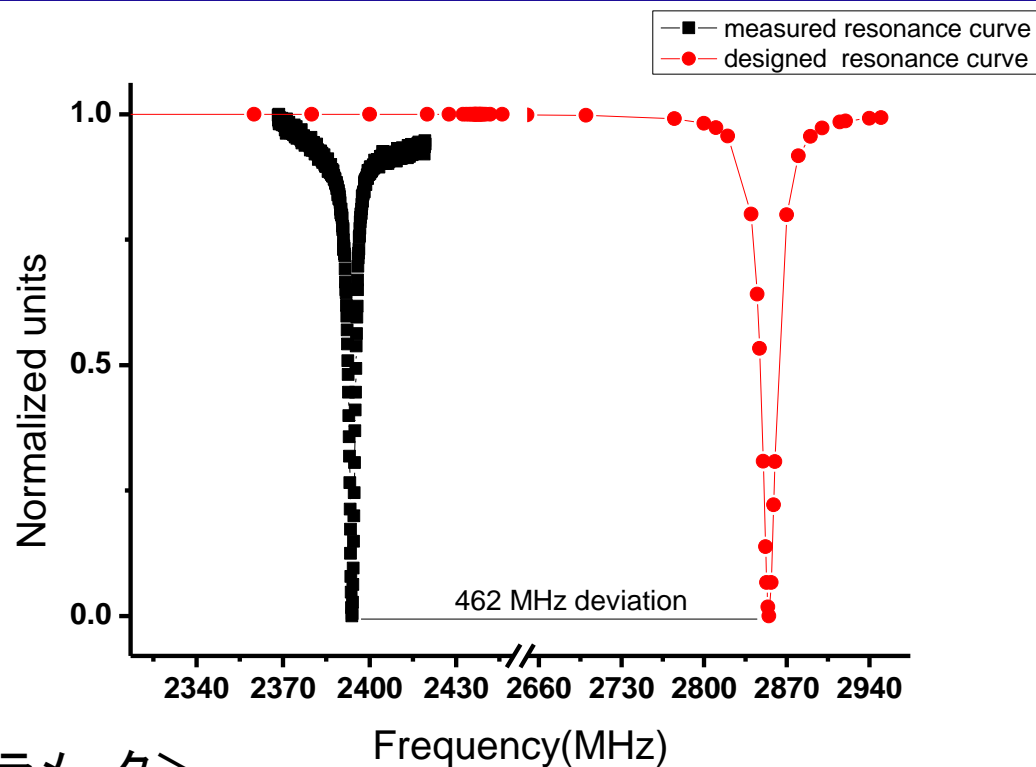
共振周波数 [MHz]	2856
カップリング係数 β	20
Q_0 値	4000
周波数帯域幅 [MHz]	20

コールドテスト

1. 室温で共振空洞の反射率特性を測定
2. 共振空洞をヒータを巻きつけることにより加熱し、同様に測定
3. 真空チャンバー内で陰極を加熱して同様に測定



実験結果 1



<プロトタイプの実験パラメータ>

Resonance frequency [MHz]	2437
Unloaded quality factor (Q_0 value)	2600
Q value	650
Coupling coefficient β	3

- プロトタイプの実験周波数は設計値より462MHz低く設計し直す必要がある



改良機設計にあたって



室温に対して運転温度での周波数変化

- 熱陰極の温度による共振周波数変化
- 電子銃の運転温度 60°C にした場合

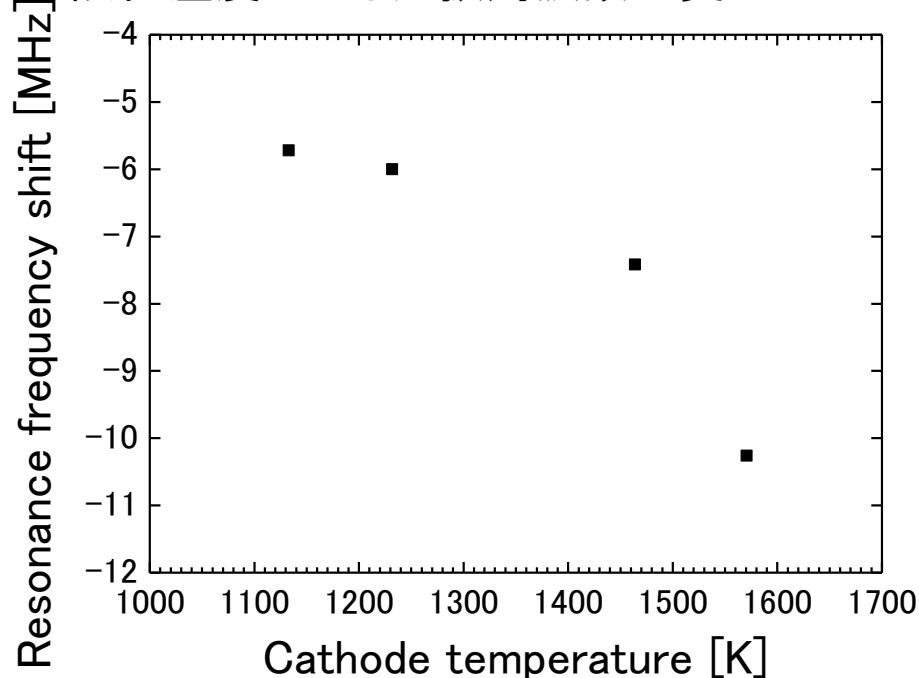
周波数調節機構スタブの導入

RF窓を通して導入可能な電力範囲の確認

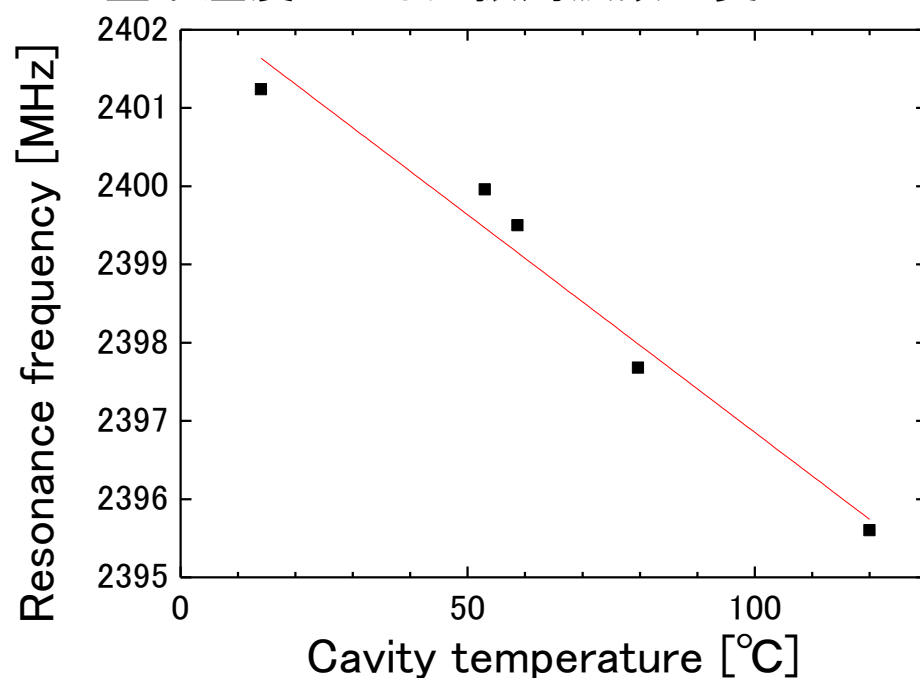
実験結果2

コールドテスト(ローパワー)

＜陰極温度による共振周波数の変化＞



＜空洞温度による共振周波数の変化＞

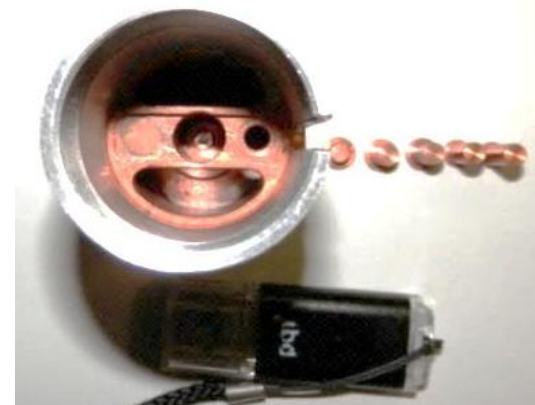
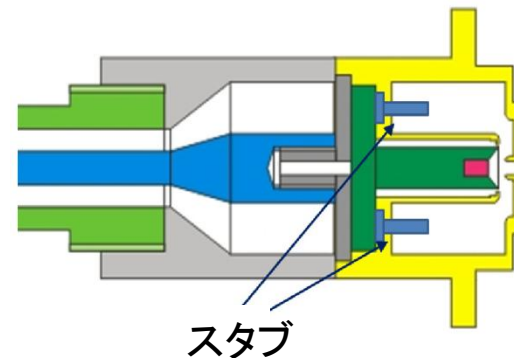
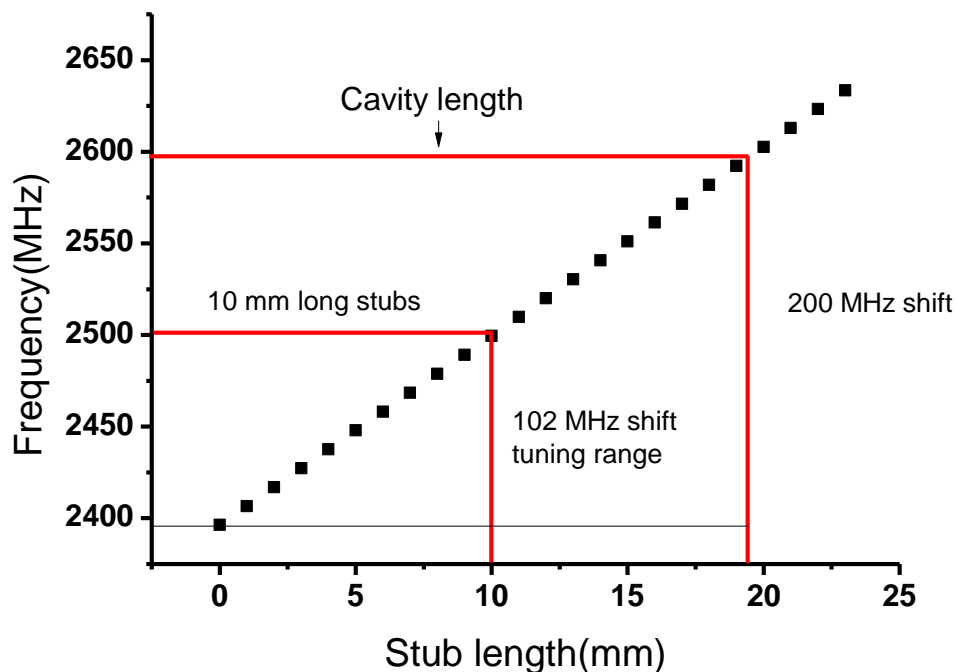


- 陰極温度により共振周波数が増えるため改良機ではスタブを用いて調節を行う
- 電子銃の運転温度を考慮して改良機的设计を行う必要がある

実験結果3

コールドテスト(ローパワー) 2

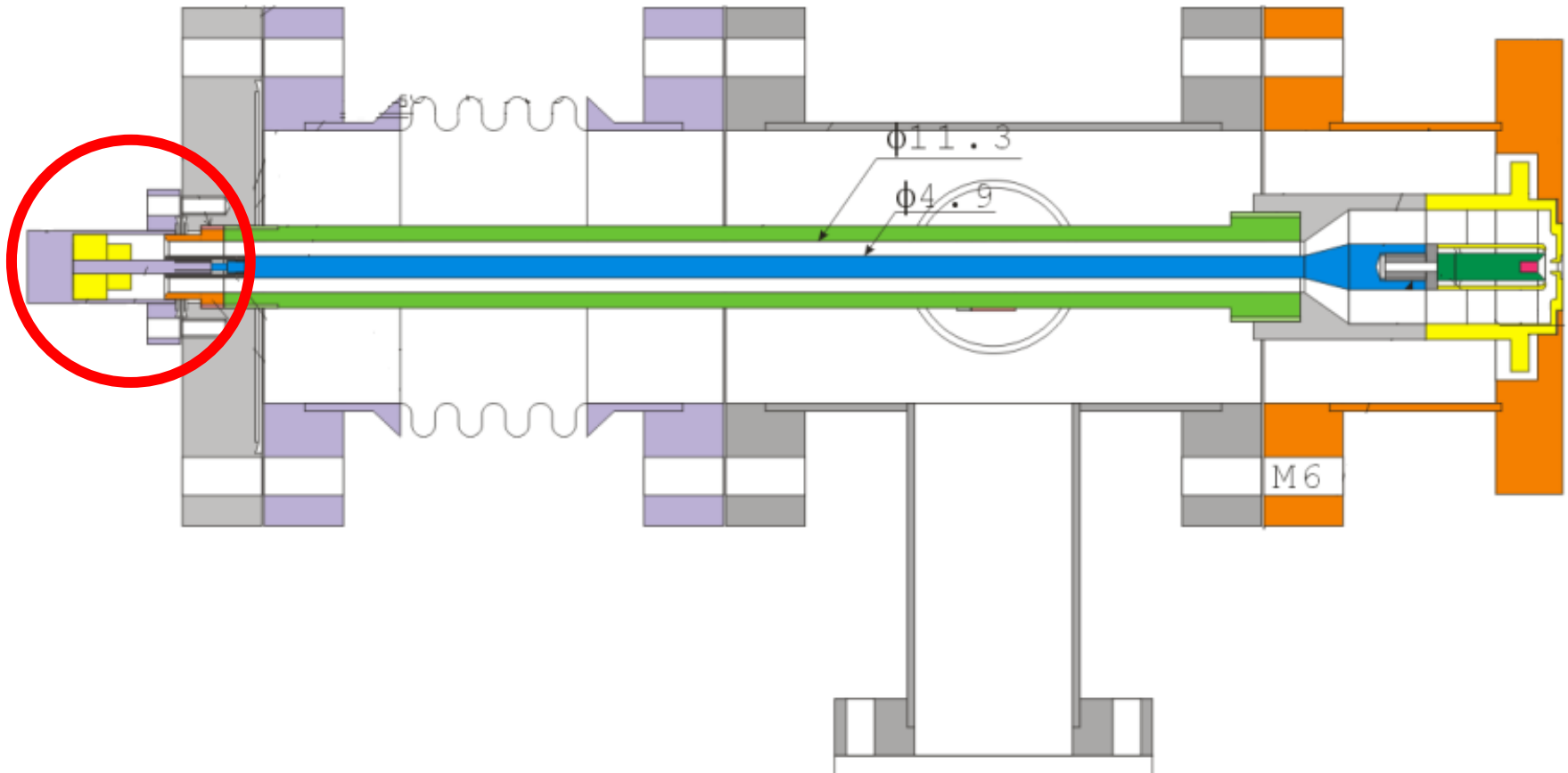
＜スタブによる共振周波数の変化＞

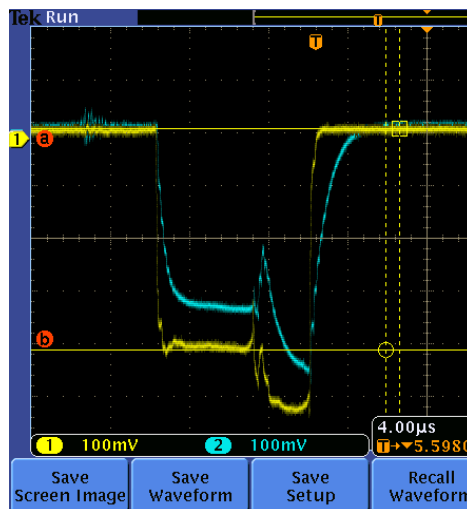
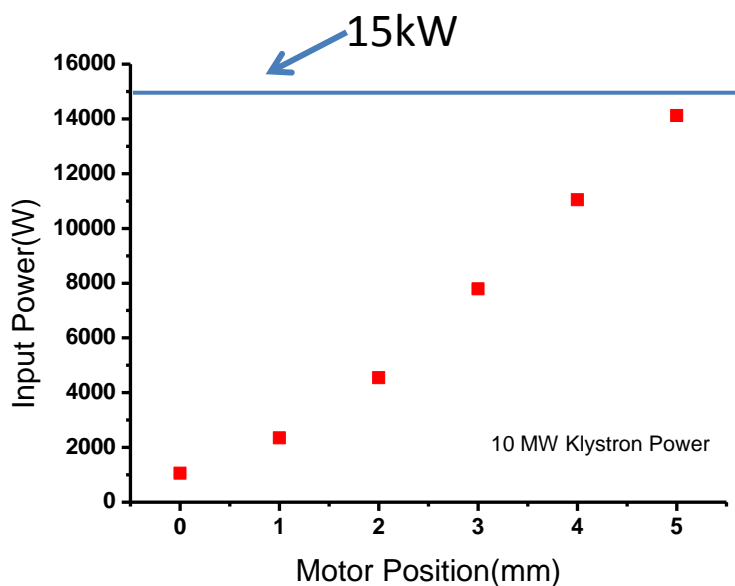


- スタブの長さを1mm長くすると共振周波数は約11MHz高くなる
- 陰極温度により共振周波数が変わるため改良機ではスタブを用いて調節を行う



ハイパワーテスト





放電の跡



- RF窓で放電が発生
- 15kWまで運転可能であり原理実証実験には十分



共振空洞の改良設計



- 運転時の共振周波数変化

	Δf_0 prototype	$\Delta f_0/f_0$ prototype	Δf_0 new
陰極温度	0 ~ -10.2 MHz	0 ~ -0.42 %	0 ~ -12 MHz
空洞温度	-2.7 MHz	-0.11 %	-3 MHz
ビームローディング	+1 MHz		+1 MHz
合計			-2 ~ -15 MHz

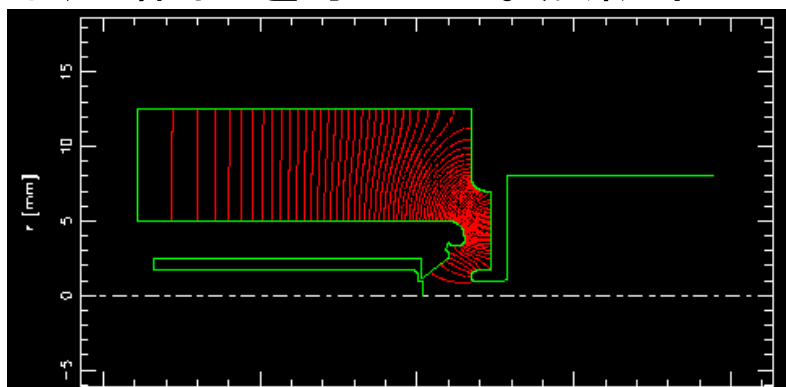
運転時の要求値 $f_0 = 2856$ MHz

室温での設計値 $f_0 = 2848$ MHz

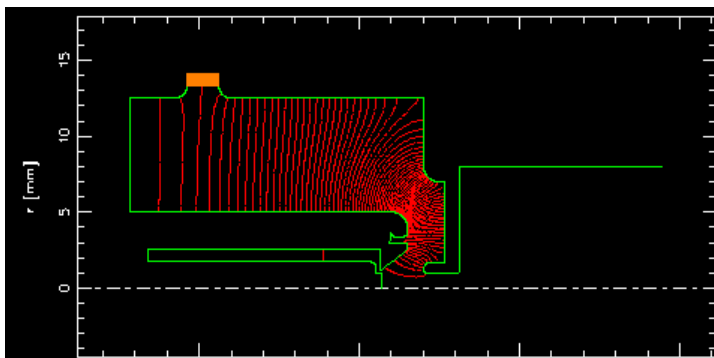
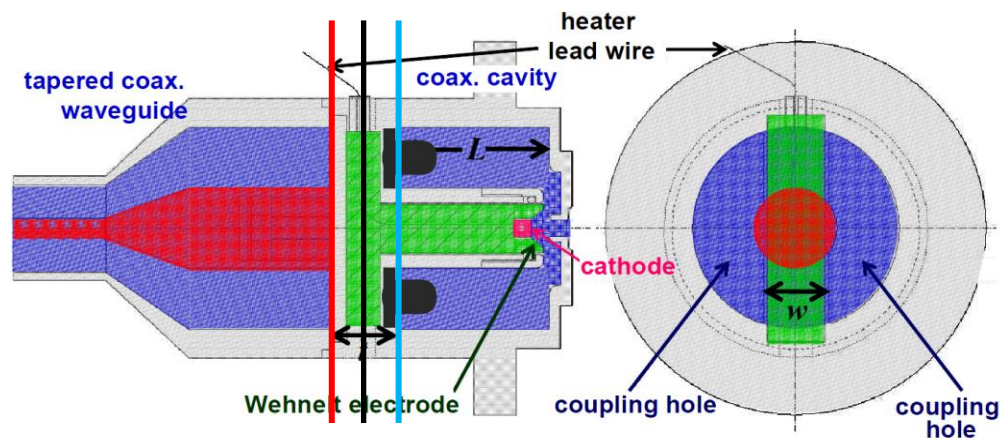
スタブによる調節 0 ~ +70 MHz

共振空洞の改良設計

改良機の設計では実験結果と共振周波数計算の比較から実効的な短絡面を求めた。熱陰極温度等に起因する変化も考慮した。



プロトタイプ



改良機

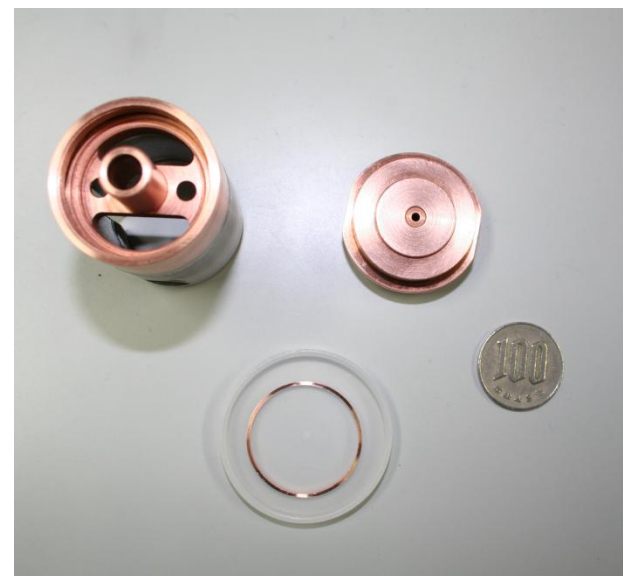
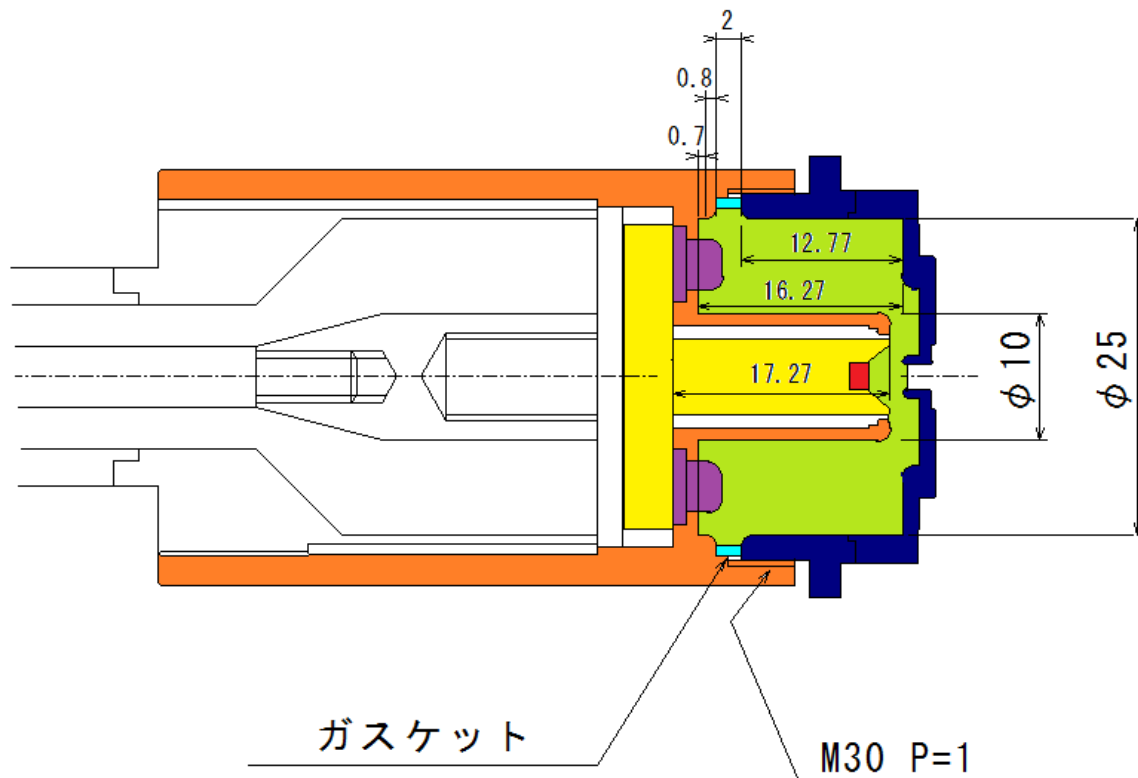
実効的な短絡面の位置による改良機の共振周波数と調節に必要なガスケットの厚み

	短絡面の位置	共振周波数	厚み
calc.	Left (8 mm)	2314MHz	
	Center (4 mm)	2645MHz	2.86mm
	2.02 mm	2848MHz	0mm
	Right (0 mm)	3093MHz	1.30mm

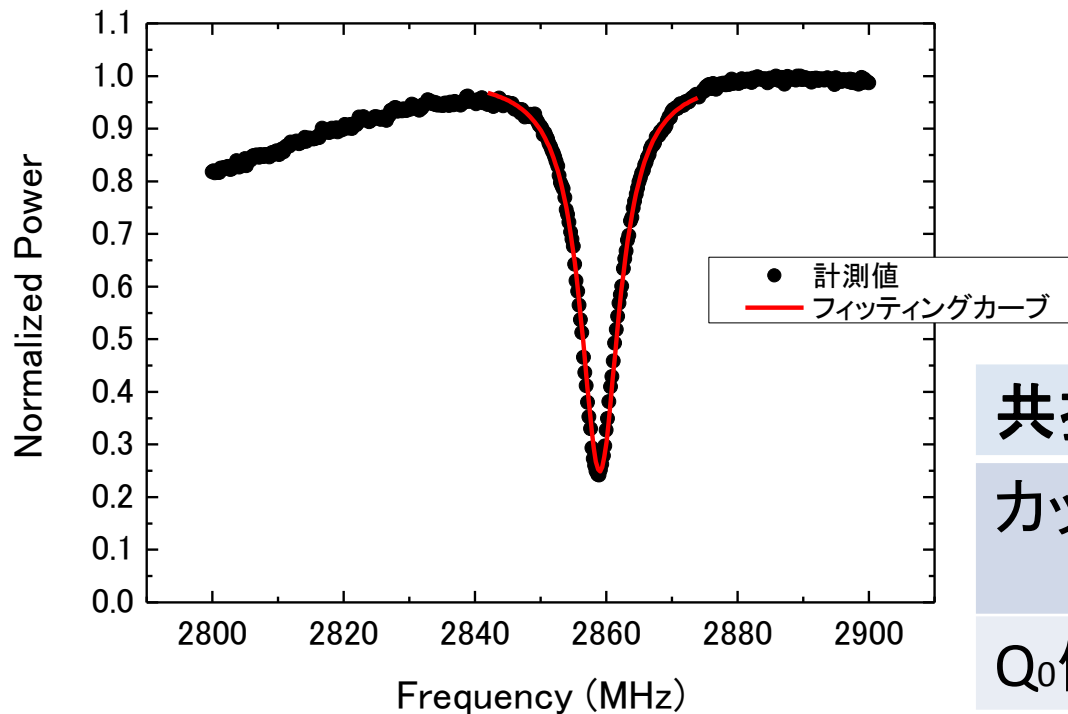
共振空洞改良機

改良機では2つの部分に分けて共振空洞部分を開けられるようにし、カソードの位置をアライメントできるようにした。

スタブによる共振周波数調節機構を導入した。



改良機での実験



共振周波数 f_0	2859MHz
-------------	---------

カップリング係数 β	2.99
------------------	------

Q_0 値	1584
---------	------

- 共振周波数は運転時に要求値の 2856MHz にスタブを用いて調節可能な範囲内である



まとめ

- 三極管型熱陰極高周波電子銃の原理実証にむけて電子銃の開発を行っている
- RF窓には現状で 15kW まで導入でき、原理実証を行うには十分である
- 共振空洞の共振の節の位置と温度による共振周波数の変化を考慮し同軸共振空洞を再設計した
- 改良機では空洞部を開けられる構造とし、カソード位置をアライメントできるようにした
- 改良機の共振周波数はスタブを用いて要求値に調節可能な範囲内である



今後の予定

- 改良機でスタブの長さとガasketの厚みを
変えてコールドテストを行う
- ビーム負荷実験を行い評価する

ご清聴ありがとうございました

