

# CバンドRF電子銃の開発

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門

小型量子ビーム源グループ

平 義隆

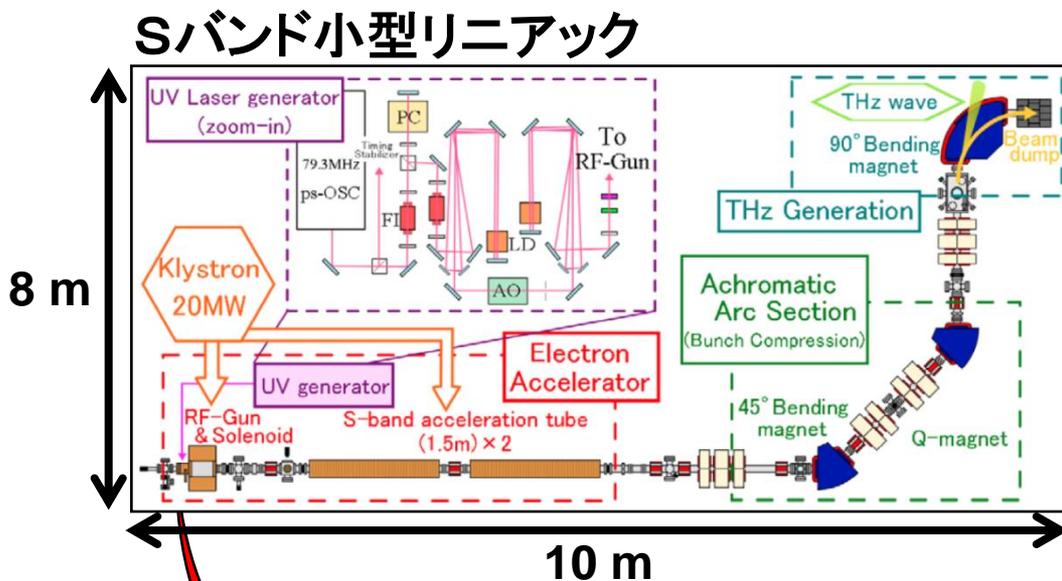
# アウトライン

- CバンドRF電子銃の概要
- マグネトロン用のパルス高電圧電源製作
- CバンドRF電子銃の設計製作
- まとめ

# 電子加速器ベーステラヘルツ波

メリット: 高出力 kW ~ MW

現状のデメリット: 小型ではない。空港などに設置できない。

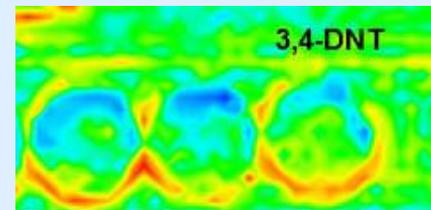


2 m × 2 mの  
大きさまで小型にする

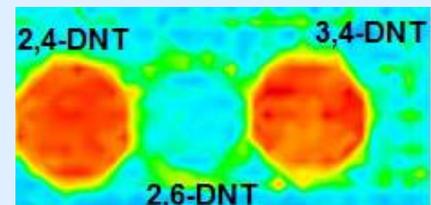
### 関税中央分析所の調査研究



2,4DNT 2,6DNT 3,4DNT

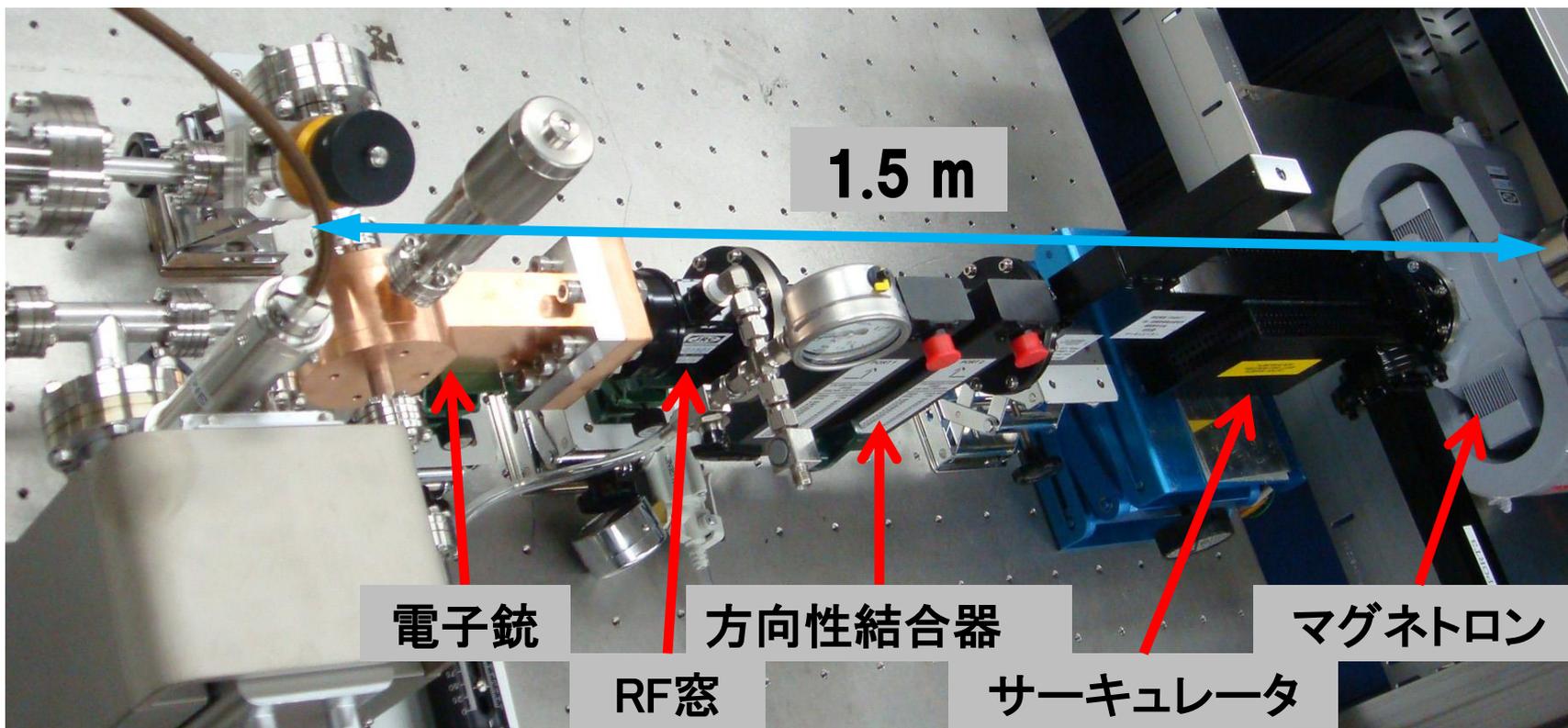


0.1 THz



0.6 THz

# CバンドRF電子銃の外観



# マグネトロン

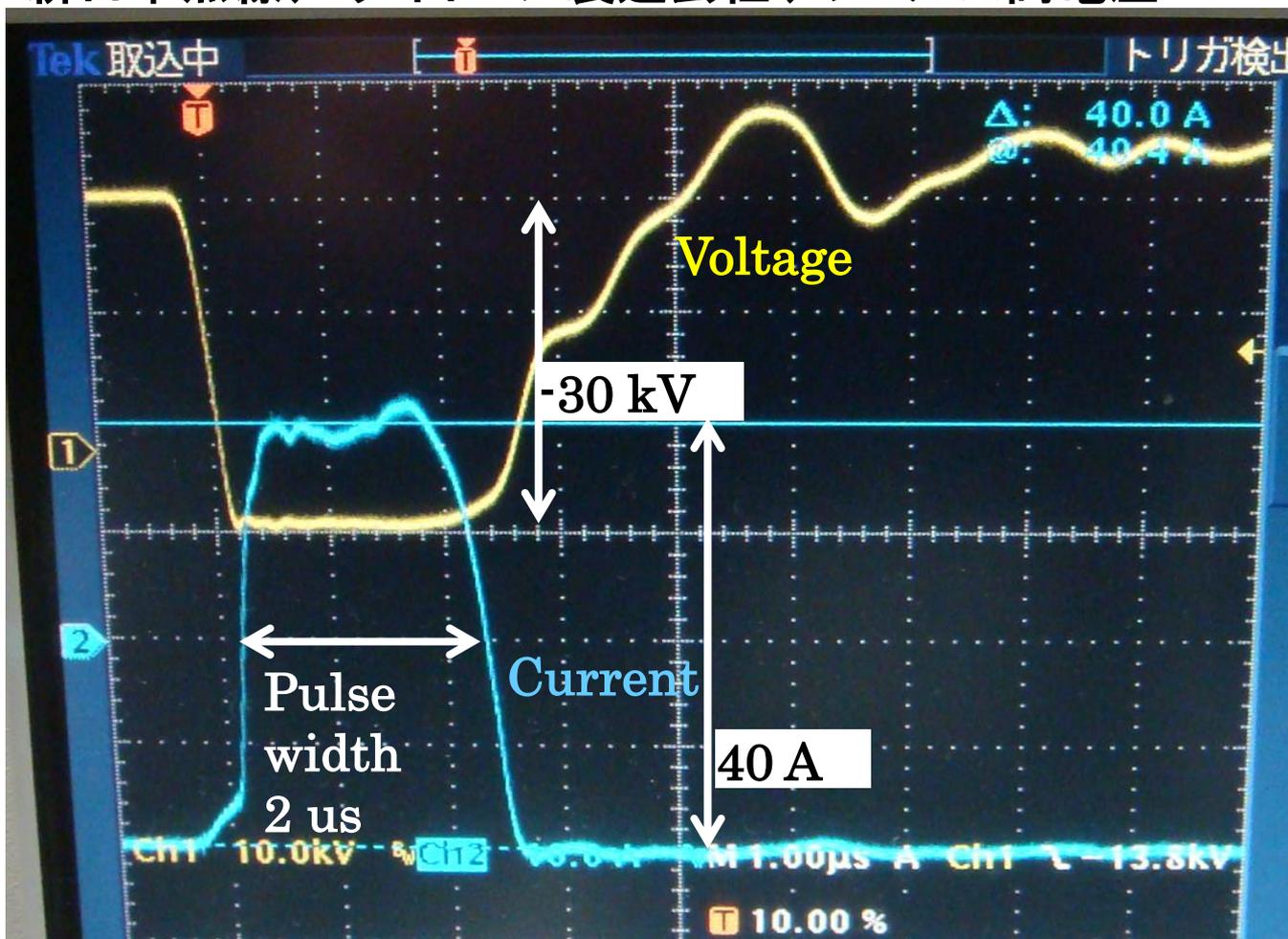
汎用品のレーダー用マグネトロン(新日本無線(株))。



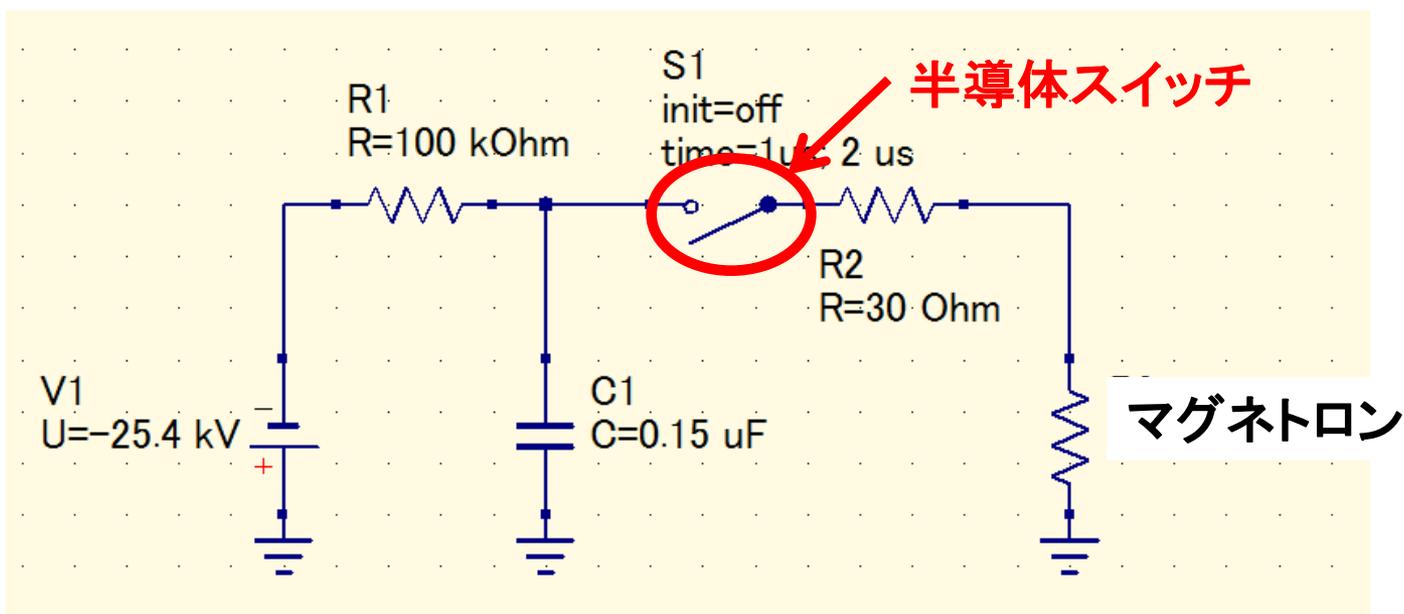
周波数: 5.25 – 5.4 GHz  
ピークパワー: 600 kW  
パルス幅: 2.0 us  
デューティ比: 0.001  
繰り返し: 500 Hz

# マグネトロン用パルス高電圧

新日本無線(マグネトロン製造会社)のパルス高電圧



# マグネトロン用パルス高電圧



## パルス高電圧

電圧: -25.4 kV ~ -27.3 kV

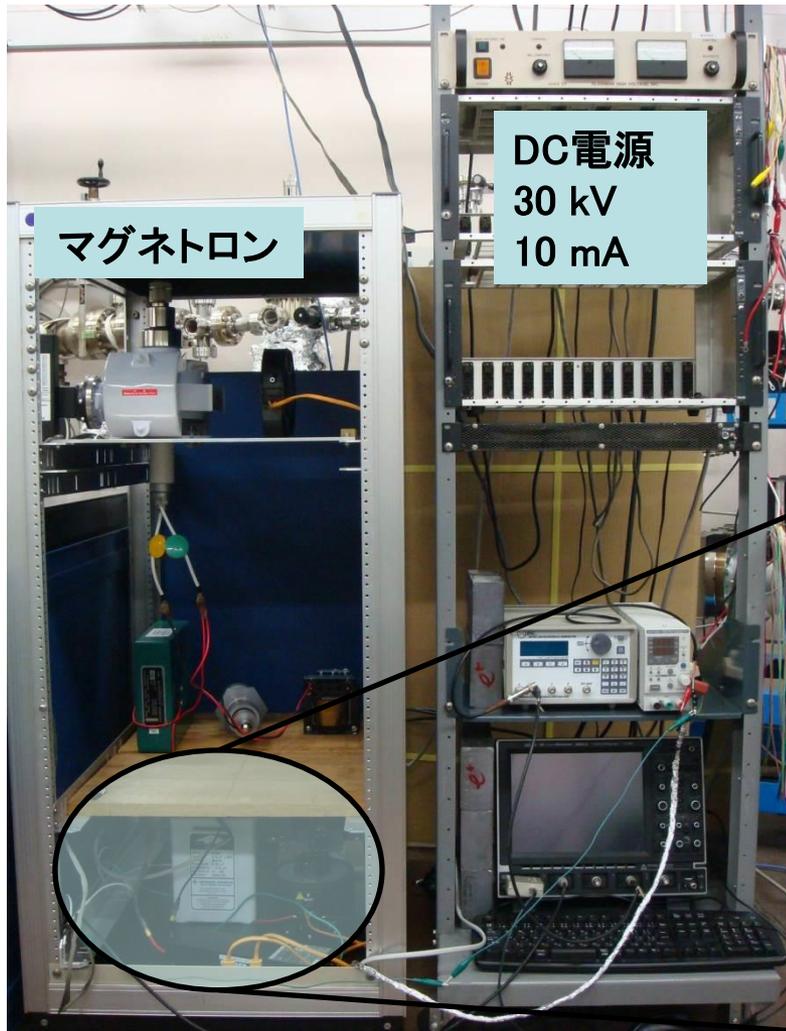
ピーク電流: 10 A ~ 40 A

パルス幅: 2 us

## ヒータ電源

5Vac

# マグネトロン用パルス高電圧

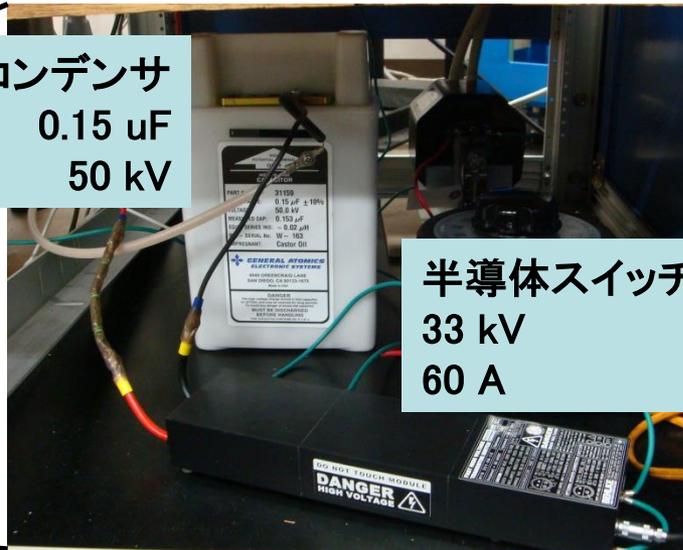


マグネトロン

DC電源  
30 kV  
10 mA

放電時のマグネトロン印加電圧の  
降下を防ぐために大容量  
コンデンサを採用。

コンデンサ  
0.15  $\mu$ F  
50 kV



半導体スイッチ  
33 kV  
60 A

# パルス高電圧印加テスト(繰り返し 1 Hz)

パルス高電圧をマグネトロンに印加し、動作確認。



## 問題点:

1. カレントモニターにスパイクノイズが測定される。電圧を上げられない。
2. スイッチoff 後に電圧が直ちに減衰しない。減衰時間10 us。

# 半導体スイッチの損傷

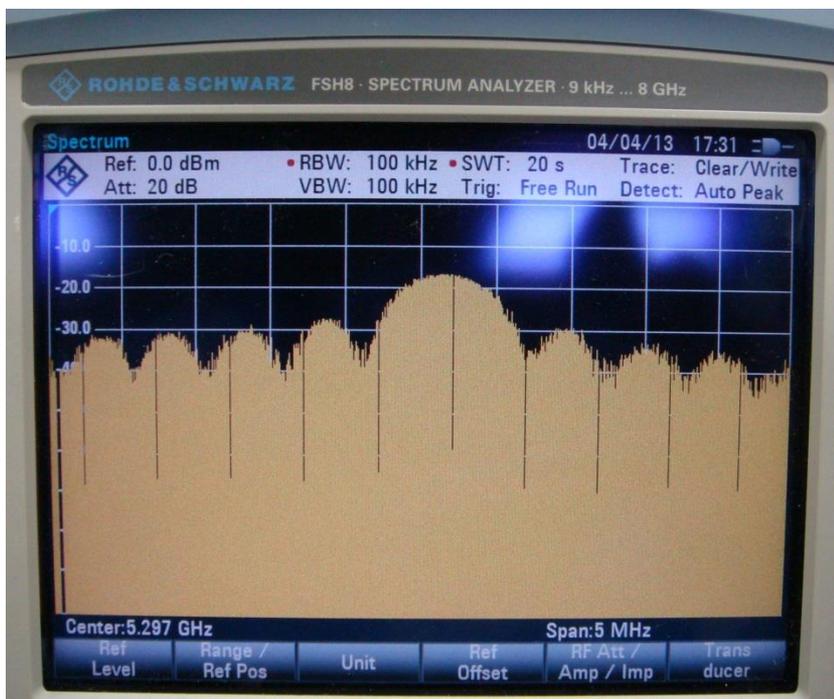
ローパスフィルターを用いてスパイクノイズの除去を試みているときに半導体スイッチが損傷した。2回ほどパチッと音がした。マグネトロンではなく、1 k $\Omega$  の抵抗に接続した場合の動作。



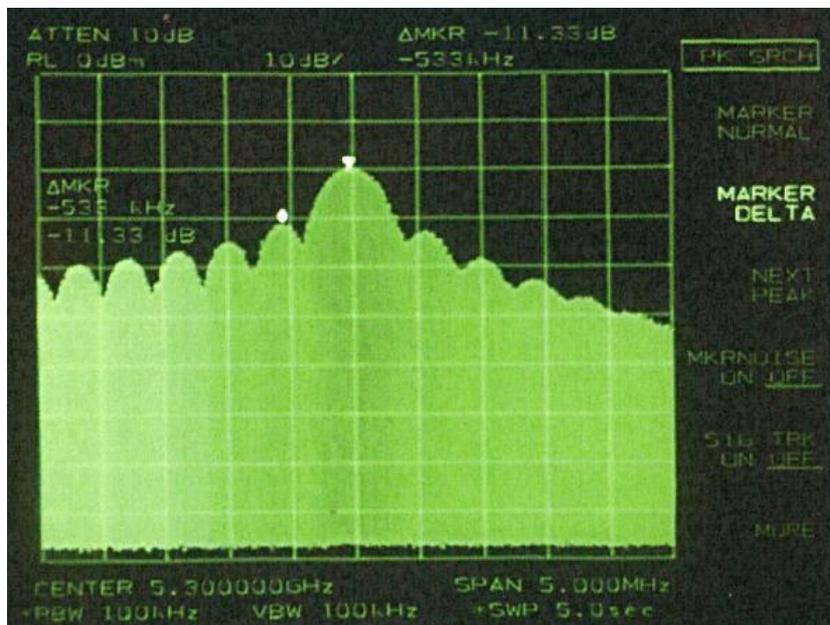
200 ns程度で  
電圧が減衰してしまう。

# マグネトロンが発振周波数スペクトル

半導体スイッチが損傷する前に測定したデータ。

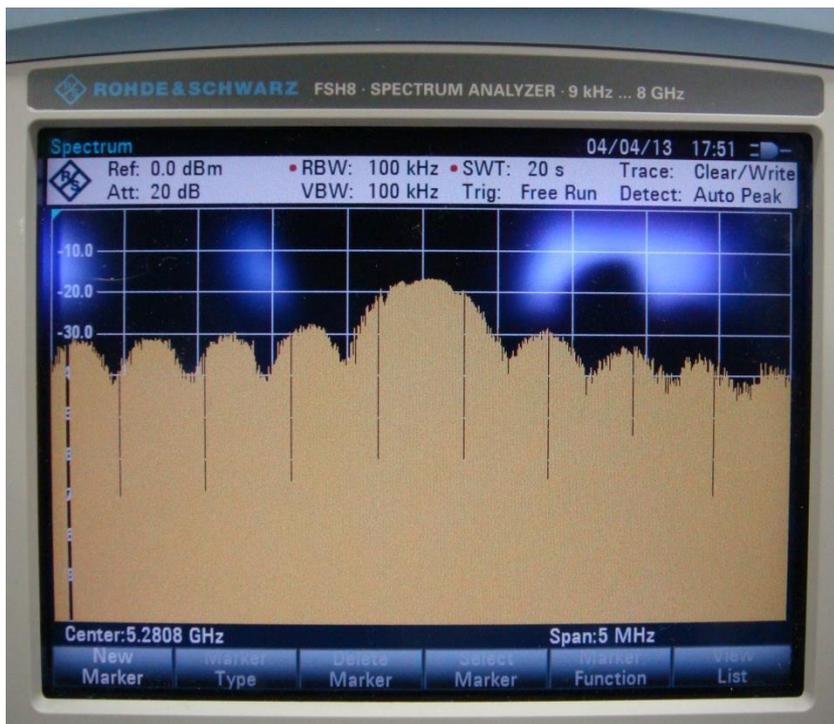


Freq center: 5297 MHz  
Span: 5 MHz  
10dB減衰のバンド幅 0.75 MHz



新日本無線参考資料  
Freq center: 5300 MHz  
Span: 5 MHz

# 周波数の可変テスト



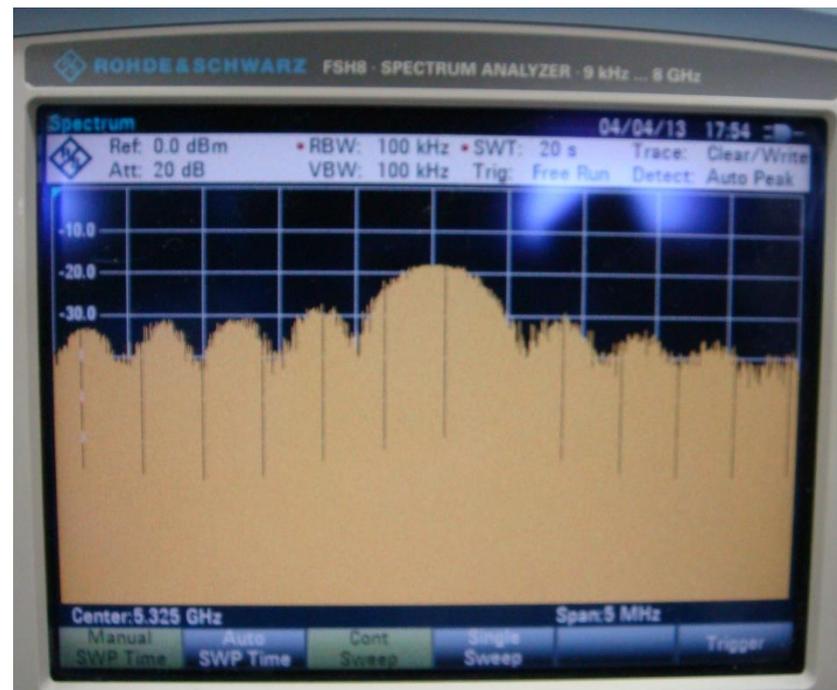
Freq center: **5280 MHz**

Span: 5 MHz

方向性結合器の出力をパワーメータで測定。

平均パワー: 0.89 W

ピークパワー: **44 kW**

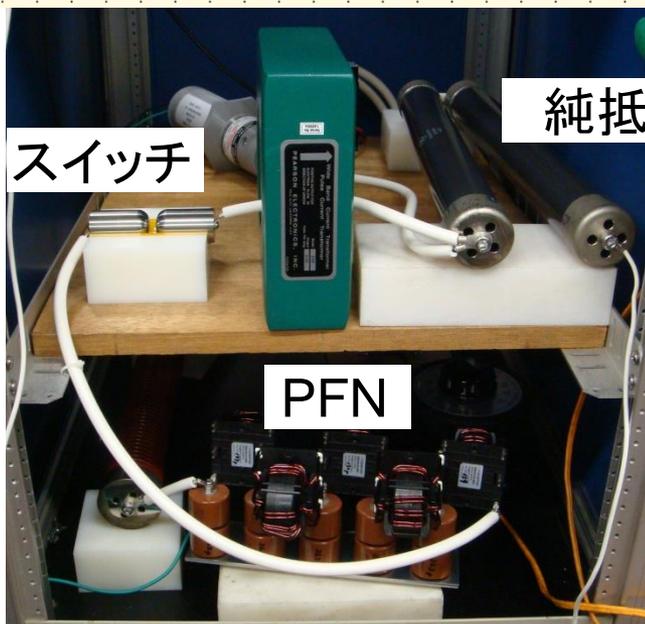
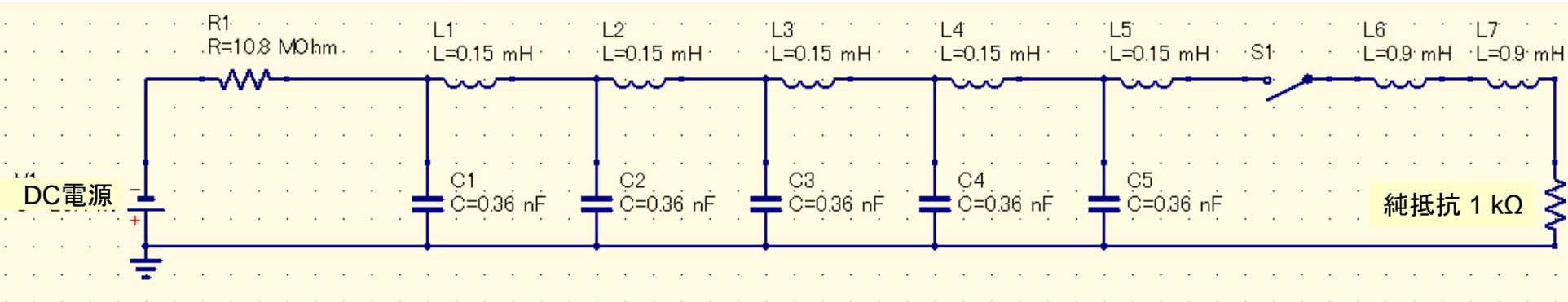


Freq center: **5325 MHz**

Span: 5 MHz

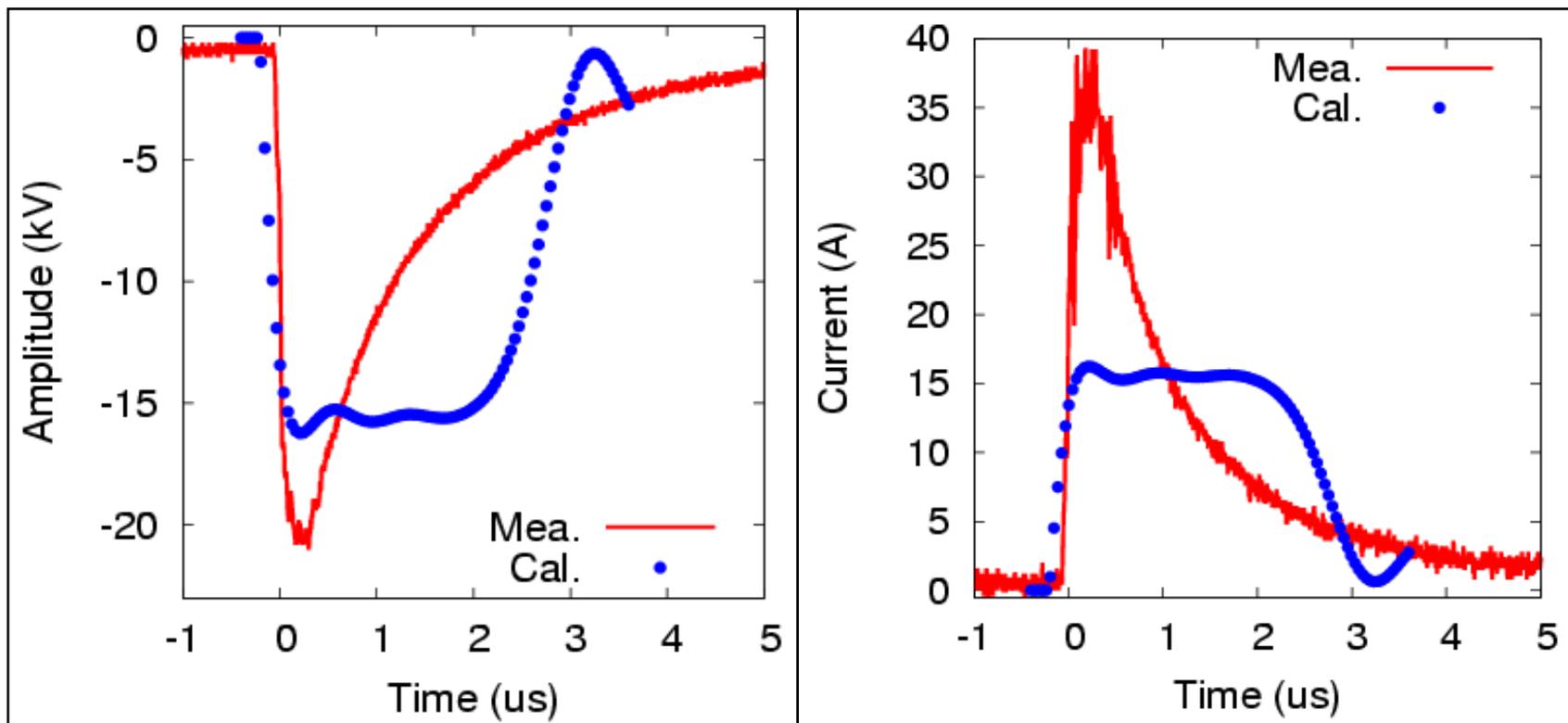
# PFNとギャップスイッチを用いたパルス高電圧

参考文献：“パルスパワー発生回路の設計と実践”，J. Plasma Fusion Res. 87, 3 (2011) 202.



# パルス高電圧波形

DC電源の電圧が-26.6 kVのとき。  
 純抵抗をマグネトロンに変更しても測定されるパルス波形の形状は大きく変わらない。

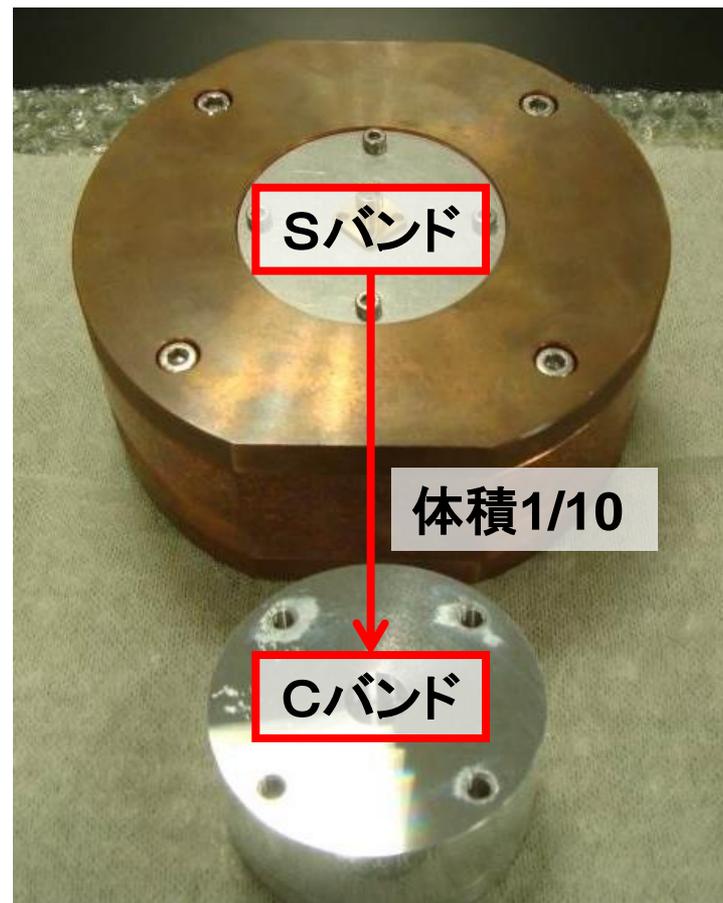


青色の点は、QUCSを用いた計算値。

# マグネトロンが発振周波数スペクトル

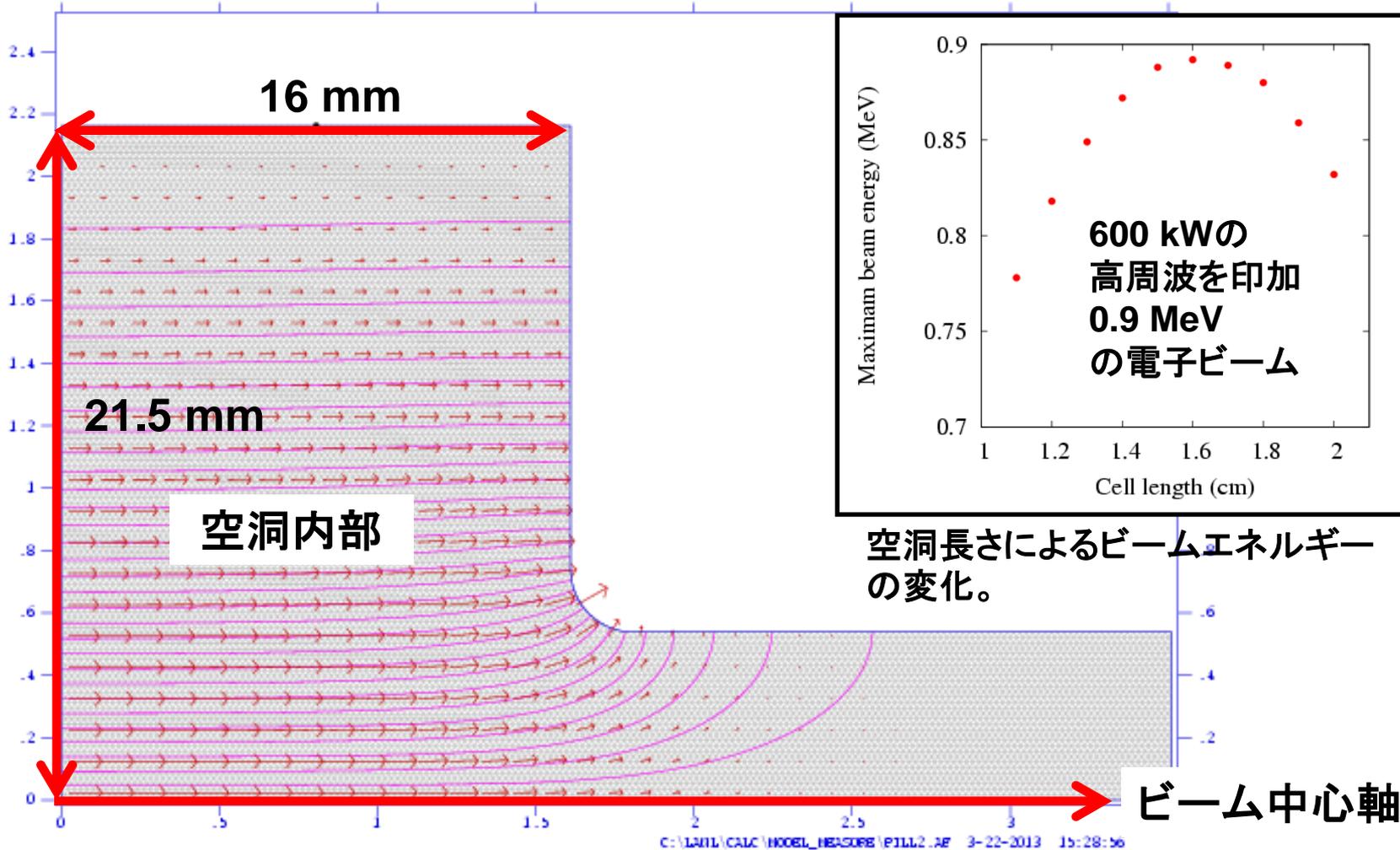


# CバンドRF電子銃

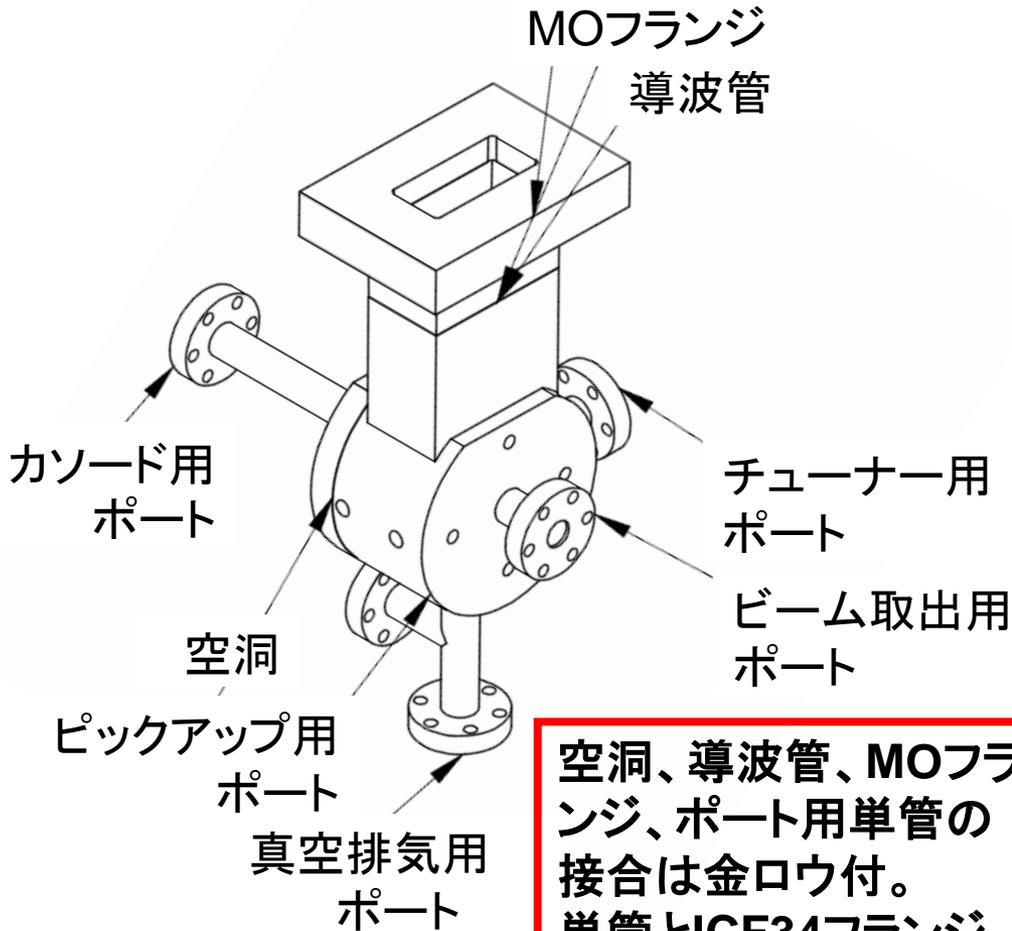


# 設計(Superfish)

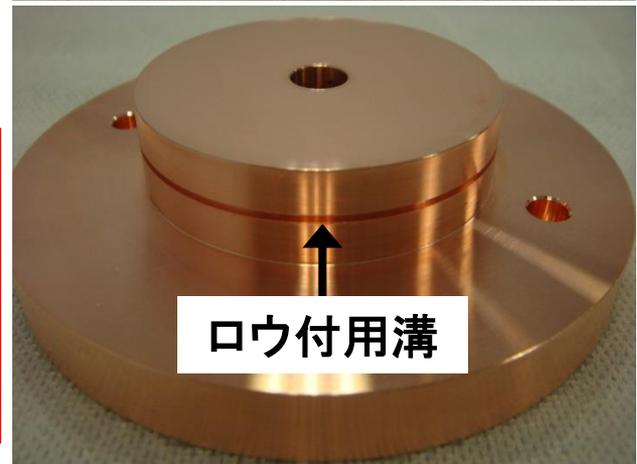
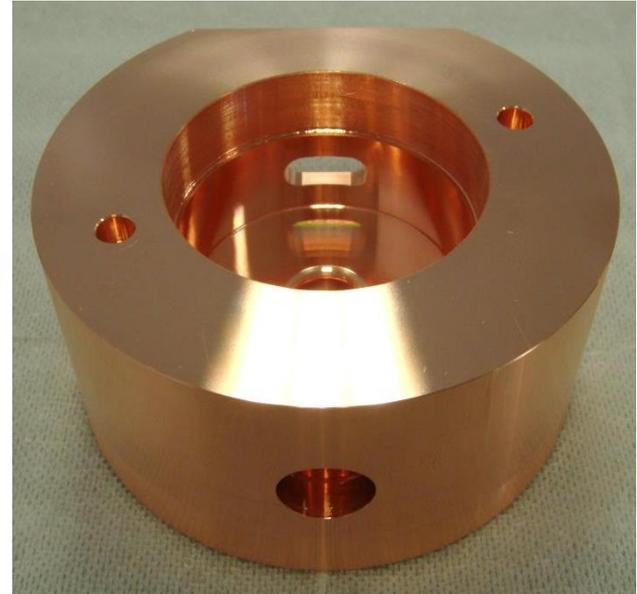
5.3-GHz TM010 Pillbox Cavity F = 5358.7317 MHz



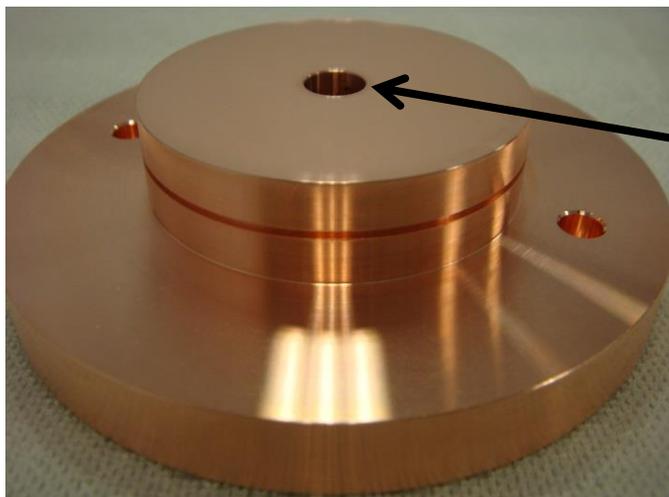
# CバンドRF電子銃



空洞、導波管、MOフランジ、ポート用単管の接合は金ロウ付。単管とICF34フランジの接合は溶接。



# カソードホルダー



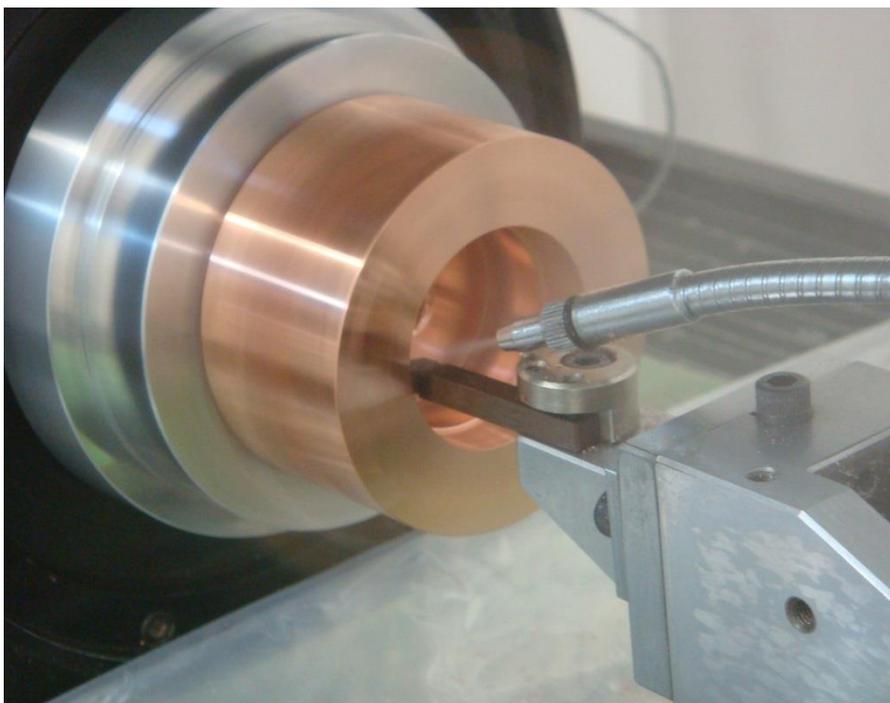
カソード用  
ポート



カソード  
(針葉樹型カーボンナノ構造体)

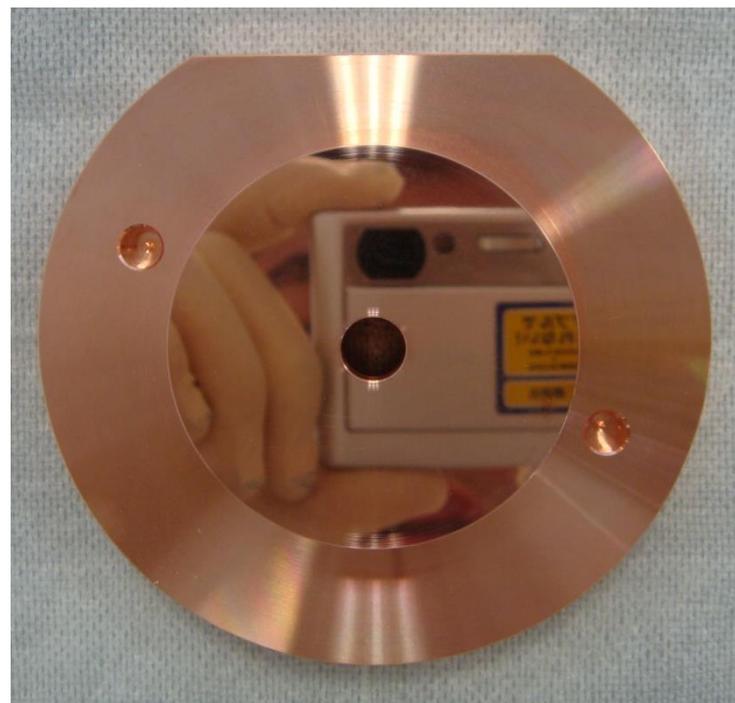
カソードホルダー  
(直線導入機に固定)

# 空洞加工



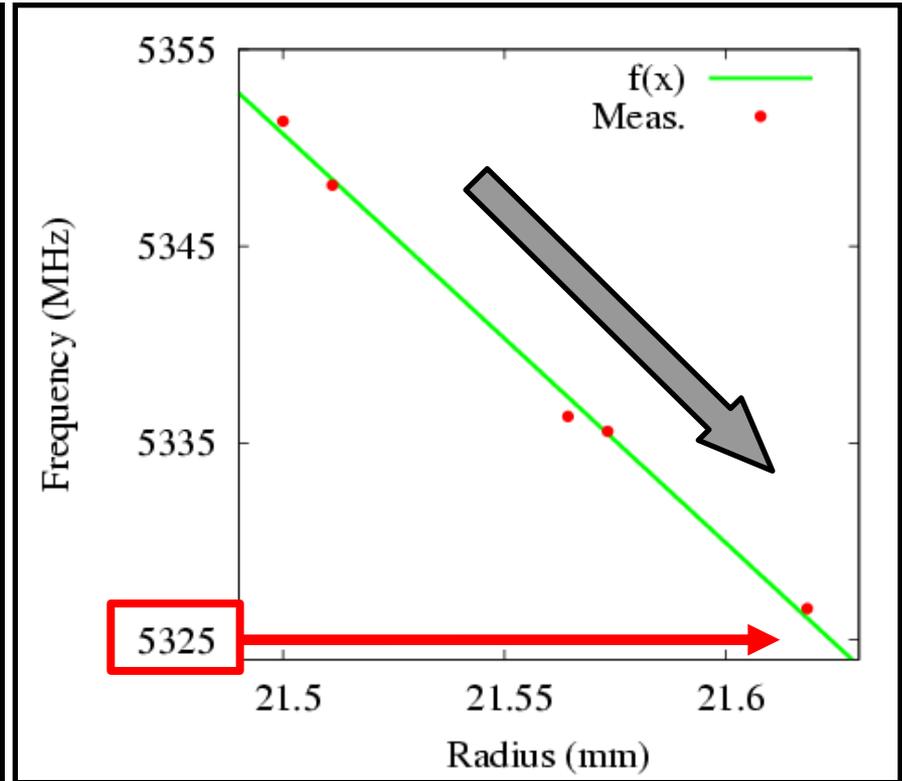
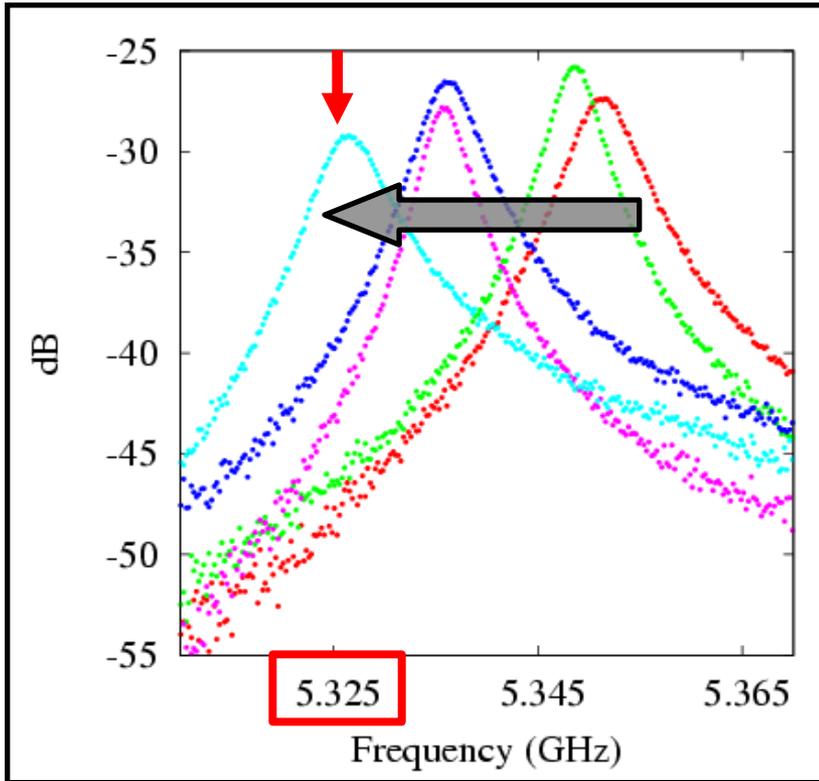
**超精密旋盤** Nanoform 200 ultra, Precitech inc.  
タイム株式会社@広島県三原市

台座:みかげ石  
エアベアリングを用いることで  
移動誤差 < 15 nm  
単結晶ダイヤモンドチップ



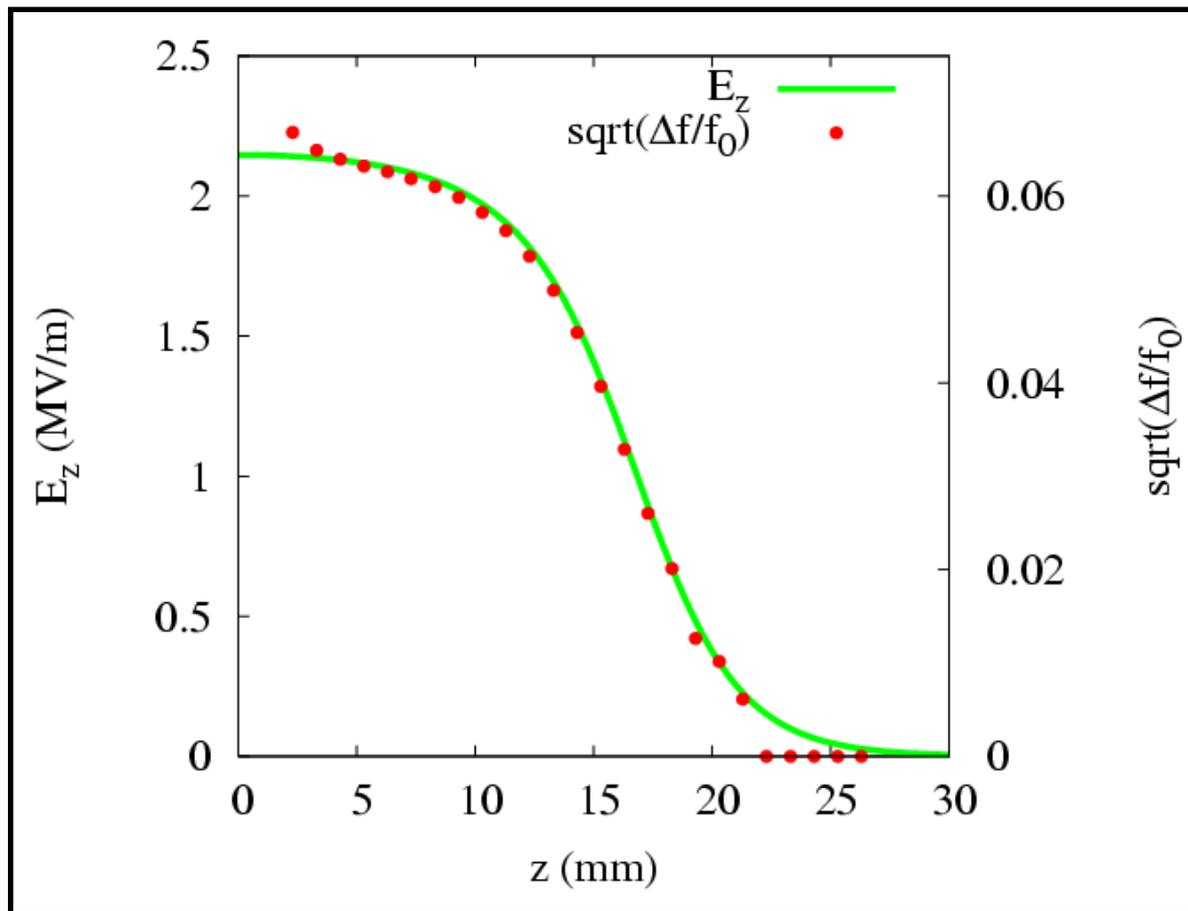
中心線平均粗さ Ra 0.2  $\mu\text{m}$ 以下の  
**鏡面加工**

# 周波数調整 (銅空洞)



目標の共振周波数 ⇒ **5.325 GHz** (マグネトロン発振周波数の中心値)

# 電場分布測定(ビード法)



$Q_0 = 2600$   
 $R/Q_0 = 338 \Omega$

# まとめ

□ 高エネルギーX線、高出力テラヘルツ波発生のためのCバンドRF電子銃の開発を行った。

□ **マグネトロン用のパルス高電圧の製作**

半導体スイッチ方式、PFNとギャップスイッチ方式を用いたパルス高電圧を製作した。

最大でピークパワー44 kWのRFが発生していることを確認した。

□ **CバンドRF電子銃の製作**

最大エネルギー0.9 MeVの電子ビームの発生が可能。

超精密旋盤を用いて空洞内面を鏡面加工した。空洞内径を削りながら共振周波数を測定し、目標の周波数に合わせることができた。

カソードには針葉樹型カーボンナノ構造体を利用し、電界放出によって電子を発生する。

ご静聴ありがとうございました