

Cバンド RF 電子銃の開発

DEVELOPMENT OF A C-BAND RF GUN

平義隆^{#, A)}, 黒田隆之助^{A)}, 田中真人^{A)}, 加藤英俊^{A)}, 鈴木良一^{A)}, 豊川弘之^{A)},
Yoshitaka Taira^{#, A)}, Ryunosuke Kuroda^{A)}, Masahito Tanaka^{A)}, Hidetoshi Kato^{A)}, Ryoichi Suzuki^{A)}, Hiroyuki
Toyokawa^{A)},

^{A)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba-Central 2, 1-1-1 Umezono,
Tsukuba 305-8568, Japan

Abstract

A C-band RF gun for compact radiation sources such as a high energy x-ray and a terahertz radiation is developed at AIST, which is designed to work at the frequency of 5325 MHz. It consists of a 0.57-cell C-band cavity, a wave guide with a pressurization window, a directional coupler, a four-port circulator, and a 600 kW magnetron. The total length of this equipment is about 1.5 m. An electron beam with the energy of 0.9 MeV can be generated when a peak electric field is 85 MV/m, corresponding to a RF peak power of 600 kW. A coniferous tree type carbon nano structure (CCNS) is used for a field emission cathode. We have fabricated the copper cavity after a cold test of the aluminum cavity. We will present the structure design and fabrication of a C-band copper cavity and the generation of the radiofrequency from the magnetron.

1. はじめに

産総研では、テーブルトップサイズの高エネルギーX線源、テラヘルツ光源開発を目指したCバンドRF電子銃の開発を行っている。Figure 1に高周波源(マグネトロン)からCバンドRF電子銃までの外観を示す。装置の全長は1.5mである。マグネトロンと電子銃の間には、電子銃から反射する高周波を直接マグネトロンに反射させないためのサーキュレータ、導波管内の高周波をモニターするための方向性結合器、加圧する導波管と真空に引く電子銃を仕切るためのセラミック窓が設置されている。

本論文では、CバンドRF電子銃の設計製作及びマグネトロンの高周波発生について報告する。

2. 空洞の設計製作とローパワーRF試験

2.1 空洞共振器の設計

半径 a 、長さ L の円筒空洞内には TM モードと TE モードの 2 種類の電磁波モードが存在する。TM モードは円筒の軸に対して磁場が垂直に立つモードであり、電子の加速に使われるのは TM010 の電場

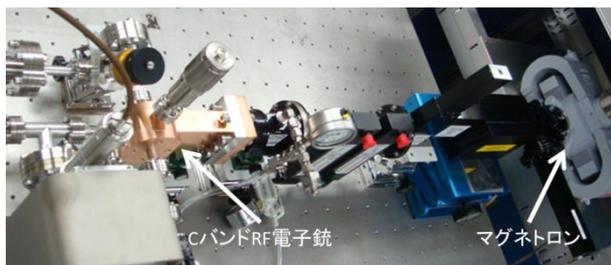


Figure 1: Appearance of the C-band RF gun.

が円筒軸の方向に立ち、磁場がそれを回るように存在するモードである。TM010 モードの共振周波数 f_0 はマクスウェル方程式を解くことによって、

$$f_0 = \frac{cy_{01}}{2\pi a} \quad (1)$$

で与えられる。 c は光速、 y_{01} はベッセル関数 $J_0(y_{01}) = 0$ の第 1 番目の解であり $y_{01} = 2.41$ である。例えば、半径 $a = 21.6$ mm のとき共振周波数は 5327 MHz とする。

実際の空洞共振器は、完全な円筒形ではなくビーム取り出しポートなどが存在する。そのため、円筒空洞にビーム取り出しポートを付加した空洞共振器を模擬し、シミュレーションコード Superfish と Parmela を用いて共振周波数とビームエネルギーの計算を行った。計算した空洞共振器の軸方向に沿った断面図と電気力線の分布を Figure 2 に示す。横軸 (z 軸) が電子の進行方向を表しており、実際の空洞は z 軸に対称な形状をしている。カソード面は $z = 0$ の位置である。空洞の長さ L を変化させながら電子ビームのエネルギーを計算し、エネルギーが最大となるように L を決定した。電子ビームエネルギーの目標値は、放射線障害防止法の規制対象外である 1 MeV 未満とした。 $L = 16$ mm (0.57 cell) のとき、空洞内での消費電力は 434.6 W、最大電界強度は 2.28 MV/m であった。マグネトロンから 600 kW の電力が投入されると最大電界強度は 84.7 MV/m となり、電子ビームエネルギーは 0.9 MeV である。空洞の Q_0 値は 10247、 R/Q_0 は 277 Ω であった。

本研究で製作する C バンド RF 電子銃全体の概要を Figure 3 に示す。電子銃の設計は産総研とタイム株式会社(広島県)が共同で行った。実際の空洞には、ビームポート以外に導波管やカソードポート、チューナーポート、真空ポートが付く。空洞と導波管のカップリングポートには、肉厚 3 mm の穴をあけた。空洞内の電場分布が対称になるように z 軸に

[#] yoshitaka-taira@aist.go.jp

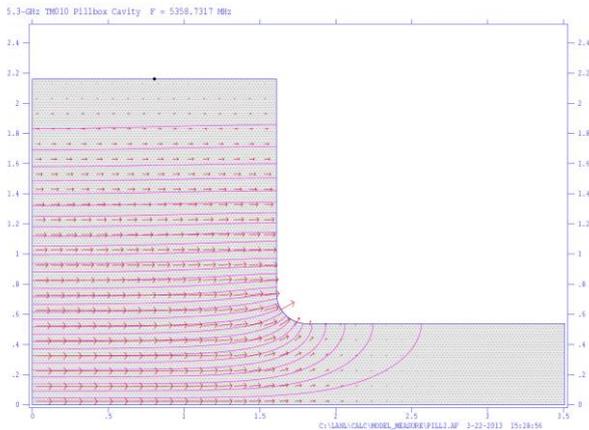


Figure 2: Structure of 0.57 cell cavity.

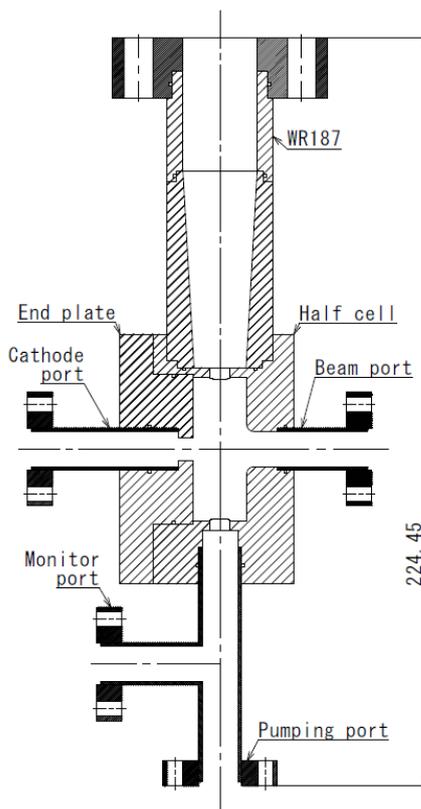


Figure 3: Drawing of C-band RF gun.

対称の位置にも同様の穴をあけ、その穴を真空ポートとして利用した。空洞よりも導波管 WR187 の方が大きいため、導波管の一部をテーパ形状にして空洞に高周波を投入する。空洞共振器を構成するエンドプレートとハーフセル、導波管、各種ポート用単管との接合は金ロウ付けとし、それぞれの接合部に幅 0.9 mm、深さ 0.9 mm のロウ材用の溝を切った。ロウ付けを 1 回で行うために、導波管をハーフセルのみに挿入するようにした。それに伴ってエンドプレートは凸形状となった。ロウ付けの際には、電子銃全体を架台の上に置いて行う。単管の先端には ICF34 フランジを YAG レーザー溶接によって取り

付ける。

カソードは、直線導入機の先端に取り付け $z = 0$ の位置に設置できるようにした。カソード材料は針葉樹型カーボンナノ構造体(CCNS)^[1]とし、電界放出によって電子を引き出す。電界放出ではヒーターやレーザーを必要とせずに電子を発生することができる。CCNS は水素およびメタンを原料ガスとして直流プラズマ CVD 法で金属(ステンレス)基板に成長させ、針葉樹状のカーボン構造体が多数生えた森のようになっている。樹の先端には径がナノメートルオーダーのチューブ状の針状炭素が突き出ており、底面ほど太い構造をしている。針状炭素に電界が集中することで比較的低電界の 2 MV/m から電界放出が起きる。電界をさらに高くすると針状炭素の先端は、局所的な熱やクーロン力によって一部が破壊される。しかし、CCNS は底面ほど太い構造をしているために全体の構造には影響はない。先端が破壊されると内部の CCNS にも電界がかかるようになり、電界放出を起こす CCNS の数が増える。また、CCNS の先端が太く短くなり 100 mA/cm² の高い電流にも耐えられるようになる。

マグネトロンが発振周波数は 5250 MHz から 5400 MHz の間で連続可変なため、空洞の共振周波数 f_0 はマグネトロンの中心周波数である 5325 MHz に合うように設計した。実際に空洞を製作する際には、粗加工で空洞内径を小さい状態で製作する。超精密旋盤を用いて空洞内径を削りながら共振周波数を測定することを繰り返し、目標とする共振周波数に合うように製作する。銅での実機製作の前に、空洞共振器にビーム取り出しポートをあけたアルミのコールドモデルを製作した。空洞内径の削り量による共振周波数の変化を測定し、実機的设计にフィードバックした。

2.2 空洞製作

銅空洞及び導波管の加工はタイム株式会社で行った。ハーフセルとエンドプレートの空洞内面の切削には、単結晶ダイヤモンドバイトを用いた超精密旋盤を使用し、表面平均粗さ Ra0.2 μm の鏡面加工とした。第一段階の加工では空洞の半径 $a = 21.5$ mm、長さ $L = 16$ mm とし、共振周波数を測定しながら空洞内径を削り、目標となる共振周波数 5325 \pm 1 MHz に合わせこむことを行った。共振周波数は、導波管の先端に同軸導波管変換器を取り付け、ネットワークアナライザーで測定した。共振周波数の変化は直径 20 μm 当たり 2.1 MHz であり、最終的な共振周波数は 5326.34 MHz であった。その後、金ロウ付けを行った。

2.3 ローパワーRF 試験

ロウ付け後の C バンド RF 電子銃の共振周波数及び電場分布の測定を行った。ロウ付け前と同様の方法で共振周波数の測定を行ったところ、 $f_0 = 5320.76$ MHz であった。ロウ付けの前後によって共振周波数が 5.6 MHz ずれたが、この原因は、周波数調整加工時の共振周波数測定の際にロウ材を入れていなかったこと、ロウ材の染み出しによって空洞の形状が変

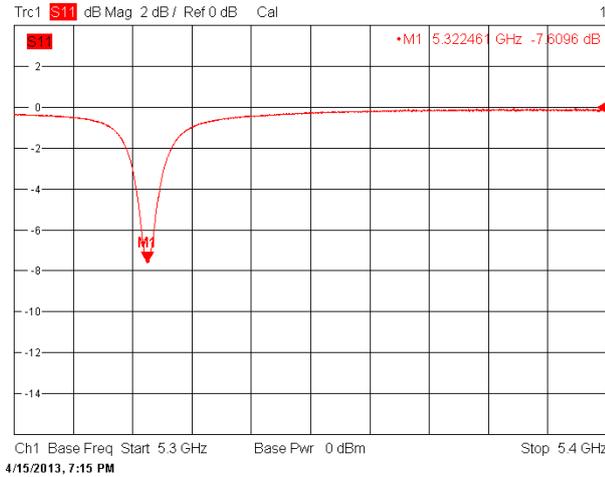


Figure 4: Resonant frequency in vacuum (0.2 Pa) of C-band RF gun.

わったことなどが考えられる。

C バンド RF 電子銃を真空に引いた時の共振周波数の測定結果を Figure 4 に示す。真空度 0.2 Pa のときの共振周波数は 5322.46 MHz であった。真空引前後の共振周波数の変化は 0.032 % であった。

大気中の共振周波数 f_0^{atm} と真空中の共振周波数 f_0^{vac} との間には下記の関係が成り立つ。

$$f_0^{\text{vac}}(T_1, 0, 0) = C_v f_0^{\text{atm}}(T_2, P_a, P_w) \quad (2)$$

ここで、 T は温度(°C)、 P_a は大気圧(= 760 Torr)、 C_v は経験則より^[2]

$$C_v = \left\{ 1 + 1.68 \times 10^{-5} (T_2 - T_1) \right\} \times \sqrt{1 + \frac{2.10 \times 10^{-4}}{T_2 + 273.15} P_a + \frac{1.80 \times 10^{-4}}{T_2 + 273.15} P_w \left(1 + \frac{5580}{T_2 + 273.15} \right)} \quad (3)$$

と表せられる。 P_w は蒸気圧(Torr)で

$$P_w = 10^{\frac{8.07131 - 173063}{233426 + T_2}} \frac{H}{100} \quad (4)$$

と表し、 H は湿度(%)である。 f_0^{atm} と f_0^{vac} 測定時の温度が共に $T_1 = T_2 = 22.3$ °C、湿度が $H = 47.8$ % だったので $C_v = 1.000328$ となり、周波数は 0.0328 % 変化する。この値は測定結果と良く一致する。

空洞における共振モードの質を表す Q_0 値を測定した。 Q_0 値は、以下の式で表せられる。

$$Q_0 = \frac{2\pi f_0 W}{P} = (1 + \beta) Q_L \quad (5)$$

ここで W は空洞の蓄積エネルギー、 P は空洞における消費電力、 β は空洞と外部回路(ネットワークアナライザ)の結合定数、 Q_L は外部回路も含めた負荷 Q 値である。Figure 4 の測定結果より、 $Q_L = 749$ 、 $\beta = 2.5$ だったため、式(5)より $Q_0 = 2592$ である。計算値よりも測定値の Q 値が低くなった原因として、計算にはカップリングポートなどが考慮されていないことが考えられる。

空洞の重要なパラメータである R/Q_0 を測定した。シャントインピーダンス R は空洞が単位電力を消費

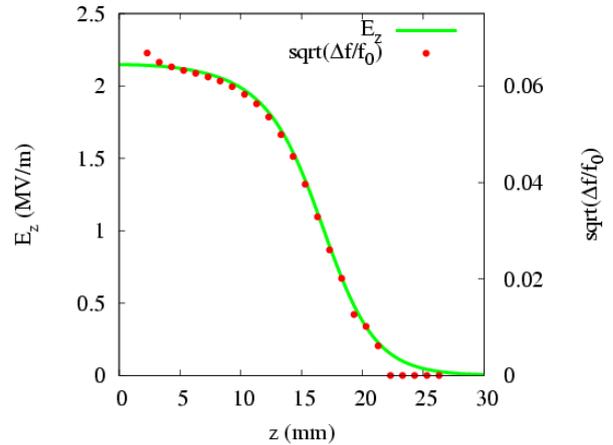


Figure 5: Distribution of electric field.

しているときに加速電場 E がどのくらい生じるかを表す。 R/Q_0 は空洞内に微小導体(ビーズ)を挿入しながら共振周波数の変化を測定するビーズ法を用いて評価した。体積 ΔV のビーズを距離 dz ずつ変化させたときの共振周波数のずれが Δf のとき R/Q_0 は以下の式で表せられる。

$$\frac{R}{Q_0} = \frac{\left| \int E ds \right|^2}{4\pi f_0 W} = \frac{\left| \int \sqrt{\Delta f} |dz| \right|^2}{\pi f_0^2 \epsilon \Delta V} \quad (6)$$

ここで、 ϵ は真空の誘電率 8.85×10^{-12} F/m である。直径 3.175 mm のステンレス球を $dz = 1$ mm で移動させながら共振周波数の変化を測定した。ビーズが入る前の共振周波数は 5320.78 MHz であった。式(6)より R/Q_0 の測定結果は、 338Ω となった。

ビーズ法による共振周波数の変化は電場の二乗に比例する。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\epsilon |E|^2 \Delta V}{4W} \quad (7)$$

共振周波数のずれの平方根と Superfish で計算した電場分布の結果を Figure 5 に示す。電場分布の形状が測定結果と計算結果で良く一致していることが分かる。

3. マグネトロンの高周波発生

3.1 マグネトロン

C バンド帯高周波源には、レーダー用の汎用マグネトロン(新日本無線株式会社製)を用いている。周波数は 5250~5400 MHz の間で連続可変、ピーク出力 600 kW、パルス幅 2 μ s、デューティ比 0.001、最大繰り返し 500 Hz である。

3.2 パルス高電圧

このマグネトロンの駆動するためには、ヒーターに AC5 V を印加し、カソードには電圧-30 kV、ピーク電流 40 A、パルス幅 2 μ s のパルス高電圧を印加する必要がある。

パルス高電圧は、直流高電圧を大電力スイッチでパルス化すれば得られる。当初、コンデンサと半導体スイッチを用いてパルス高電圧を発生しようとし

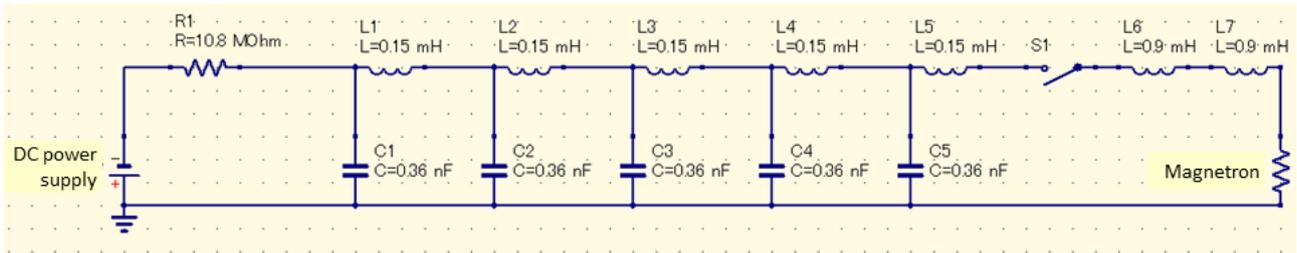


Figure 6: Circuit diagram of pulse high voltage using PFN and spark gap switch.

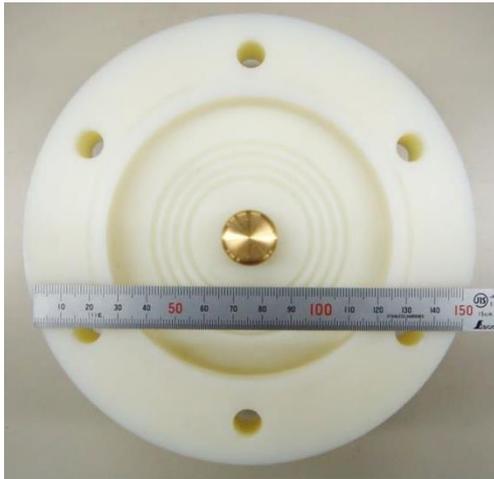


Figure 7: Spark gap switch (PCS(S)-01).

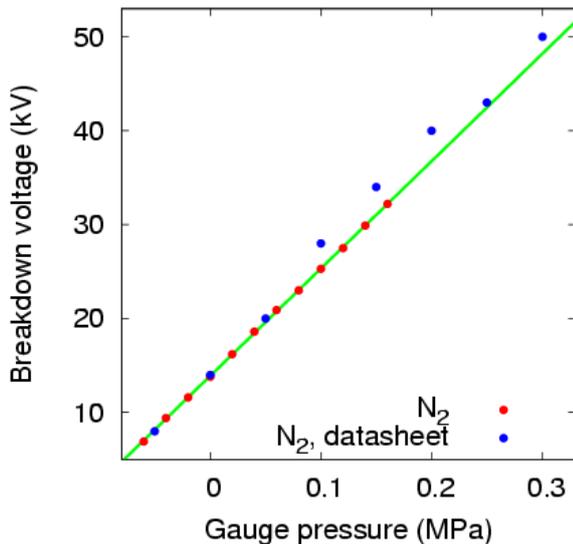


Figure 8: Self-breakdown voltages for PCS(S)-01 insulated by nitrogen. The red points show the measurement data. The blue points show the value of the data sheet supplied from Samtech. The solid line is a least-square fitting line of the measurement data.

たが、テスト中に半導体スイッチを破損してしまっ
た。半導体スイッチは納期も掛かるために、代替の
方法としてコンデンサとコイルを多段接続(Pulse
Forming Network: PFN)してギャップスイッチで方形

波を発生する方法を試した^[3]。

回路図を Figure 6 に示す。DC 電源(松定プレシ
ジョン HAR-60N20)は、定格電圧 60 kV、定格電流
20 mA である。PFN は、5 個のコンデンサと 5 個の
コイルを多段接続した。PFN の耐電圧はコンデンサ
の耐電圧で決まるが、定格電圧 60 kV のコンデンサ
を入手できなかったため、定格電圧 30 kV、静電容
量 0.7 nF のセラミックコンデンサを 2 個直列に接続
し、60 kV の高電圧にも耐えられるように設計した。

ギャップスイッチ(Samtech, PCS(S)-01)は 2 極型で
あり、電極間距離と絶縁ガス圧の積で決まる絶縁破
壊電圧よりも DC 電源の電圧が高くなると、気体中
に放電チャンネルが形成して電極間を短絡する。放
電後、PFN の充電電圧が再び絶縁破壊電圧を超え
ると放電し、それを自動的に繰り返す。

負荷に流れる電流の接続時間 T は以下の式で表せ
られる。

$$T = 2n\sqrt{CL} \quad (8)$$

Figure 6 の回路図では、 $C = 0.36 \text{ nF}$ 、 $L = 0.15 \text{ mH}$ 、 $n = 5$ なので、パルス幅は $T = 2.3 \text{ } \mu\text{s}$ となる。また、
PFN の特性インピーダンス Z は

$$Z = \sqrt{L/C} \quad (9)$$

で与えられ、Figure 6 の回路図では、 $Z = 645 \text{ } \Omega$ であ
る。PFN と負荷が整合している場合、負荷にかかる
電圧は DC 電源の電圧を V_0 としたとき $V_0/2$ となる。

ギャップスイッチを Figure 7 に示す。動作電圧は
15~100 kV、ピーク電流は 10 kA である。真鍮製の
電極は、ナイロン体によって密封され、電極間距離
は 5 mm である。電極間距離は固定されているため、
絶縁ガス(窒素)のゲージ圧を変化させることで絶縁
破壊電圧を変えることができる。Figure 8 に窒素
ゲージ圧による絶縁破壊電圧の変化を示す。絶縁破
壊電圧がゲージ圧によって線形変化していることが
分かり、Samtech 社から提供されたデータシートの
値と近い値を示している。

3.3 高周波発生

このパルス高電圧をマグネトロンに印加し、電圧
を高電圧プローブ、電流をカレントモニターで測定
した。また、方向性結合器に RF ディテクタ(Agilent
8473C)を接続して空洞から反射する高周波のパルス
波形と出力を測定した。結果を Figure 9 に示す。図
中の黄色線が高電圧プローブの出力波形、青色線が
カレントモニターの出力波形、紫色線が RF ディテ

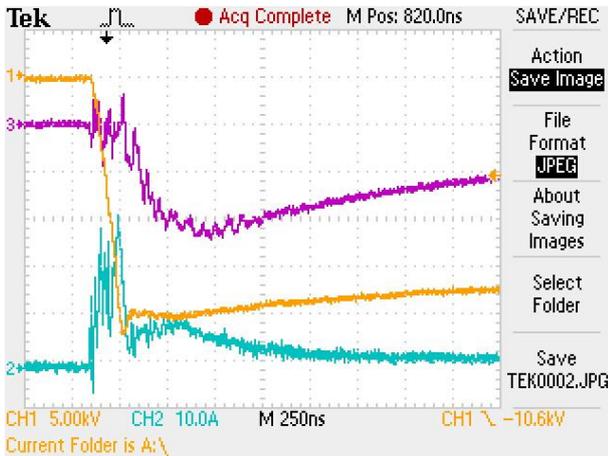


Figure 9: Waveforms of the probe for high voltage (yellow line, 5 kV/div), the current monitor (blue line, 10 A/div), and RF schottky diode detector (purple line, 500 mV/div).



Figure 10: Frequency spectrum generated from the magnetron.

クタの出力波形である。

DC電源の電圧が $V_0 = -30$ kV のとき、マグネトロンには -25 kV 印加している。前述したように PFN とマグネトロンのインピーダンスが整合しているときはマグネトロンにかかる電圧は $V_0/2$ となるが、マグネトロンは低電圧時には電流があまり流れない。そのため、Figure 9 の測定時には PFN とマグネトロンのインピーダンスは整合していない。

計算ではパルス高電圧のパルス幅は $2.3 \mu\text{s}$ となるはずであったが、実際には高電圧が印加してから $0.5 \mu\text{s}$ 後に減衰が始まり、 $2.3 \mu\text{s}$ のパルス幅が得られなかった。長い時定数を持った電圧の降下は、マグネトロンのカソードにチャージされた電荷がマグネトロンの抵抗とキャパシタンスの積で決まる時定数によって減衰していると考えられるが、パルス幅が $0.5 \mu\text{s}$ となった原因については現在調査中である。

マグネトロンを正常に発振させるためには、高電圧の立下りを $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$ とする必要があり、 $0.3 \mu\text{s}$ の立下り時間で 30 kV を印加しなければならない。現

状の立下り時間は $0.13 \mu\text{s}$ であり、約 2 倍緩くする必要があるのである。また、カレントモニターでコンデンサに流れ込む 30 A 程度の突入電流が測定されている。パルス高電圧の立下り時間が速いと電流値が大きくなるため、立下り時間を緩くする必要があるのである。

マグネトロンからの進行波を RF ディテクタで測定すると約 1 V の出力が得られた。この RF ディテクタの感度は $0.5 \text{ mV}/\mu\text{W}$ であり、方向性結合器の減衰率が 56 dB 、方向性結合器と RF ディテクタの間に 10 dB の減衰器を入れているために、マグネトロンから 8.0 kW のピーク出力もつ高周波が発生していることが分かった。電圧を上げ、パルス幅を長くすることで、さらに高出力の高周波が発生できると考えられる。

方向性結合器の出力をスペクトルアナライザで測定した結果を Figure 10 に示す。空洞共振器の共振周波数と一致する 5322 MHz の高周波を発生することができた。

電子銃は、ターボ分子ポンプで粗排気し、イオンポンプで $1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ の真空度まで到達している。

4. まとめ

C バンド RF 電子銃の設計製作を行い、マグネトロンからの高周波発生を確認した。1 回のロウ付けでも真空リークのない空洞を製作することができた。

空洞共振器の共振周波数は 5322 MHz 、 Q_0 値は 2592 、 R/Q_0 は 338Ω であった。PFN とギャップスイッチを用いてパルス高電圧を自作した。パルス高電圧を発生することができたが、パルス幅が短いため高周波のピーク出力が 8 kW と低く、バンド幅は広がった。マグネトロンが正常に発振した場合、 10 dB 減衰のバンド幅は約 1 MHz である。現状ではそれよりも遥かに大きいバンド幅で発振している。パルス高電圧を改良し、正常発振するように改善する。

今後、高周波を空洞共振器に投入する試験を行い、空洞の特性を調査した後、針葉樹型カーボンナノ構造体から発生する電子ビームの観測及び特性評価を行う。

謝辞

空洞の設計製作ではタイム株式会社 (<http://www.time-merit.co.jp/index-j.html>) の山内氏、松本氏に、マグネトロンの動作に関しては新日本無線株式会社の梅原氏、中山氏に多大なご協力を頂きました。本研究は、笹川科学研究助成の助成を受けて実施されました。

参考文献

- [1] 鈴木良一 et al., “針葉樹型カーボンナノ構造体を用いた冷陰極 X 線源”, X 線分析の進歩 **41**, (2010) 201-206.
- [2] Carol G. Montgomery, “Technique of Microwave Measurement” McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Inc., 1947.
- [3] 高木浩一, et al., “パルスパワー発生回路の設計と実践”, J. Plasma Fusion Res. **87**, 3 (2011) 202-215.