

高周波ジャイロトロン開発と応用の現状と見通し

斉藤 輝雄 出原 敏孝 光藤 誠太郎 小川 勇 藤井 裕、

La Agusu 戸田 充 藤田敏之 古屋 岳

福井大学遠赤外領域開発研究センター 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

E-mail: saitot@fir.fukui-u.ac.jp

あらまし 福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、高周波ジャイロトロンの開発とその応用研究を展開している。最近ジャイロトロンの発振周波数として当センターの持つ世界最高記録を更新し、1THz 超の発振に成功した。また、セラミック焼結・核融合プラズマ診断・遠赤外領域超低温物性研究・蛋白質解析、新医療技術開発等への応用のため、数 100 GHz から 1THz に至る CW ジャイロトロンの開発を進めている。本講演では、当センターにおける高周波ジャイロトロン開発と応用に関して、最近の研究成果を発表するとともに、今後の研究の展開を示す。

キーワード 高周波ジャイロトロン、サブミリ波、遠赤外、ジャイロトロン応用

Present Status and Prospects of Development of High Frequency Gyrotrons and Their Applications

Teruo SAITO Toshitaka IDEHARA Seitaro MITSUDO Isamu OGAWA Yutaka FUJII

La AGUSU Toshinori FUJITA Mitsuru TODA Takashi FURUYA

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

3-9-1 Bunkyo, Fukui, 910-8507 Japan

E-mail: saitot@fir.fukui-u.ac.jp

Abstract Research Center for Far-Infrared Region, University of Fukui is aiming to development and application of high frequency gyrotrons. We have recently succeeded in over-1THz oscillation of gyrotron improving our own world record. We are developing cw gyrotrons with frequencies of several hundred GHz to 1 THz for application to ceramic sintering, fusion plasma diagnostics, low temperature condensed matter physics in far-infrared region, protein analysis, new medical processing technology, etc. In this talk, our recent results and future prospects of high frequency gyrotron development and applications in FIR FU are presented.

Keyword High Frequency Gyrotron, Submillimeter Waves, Far-Infrared, Application of Gyrotron

1. はじめに

福井大学遠赤外領域開発研究センター(以後、FIR FU と略称)は、学内的に措置された「工学部附属超伝導磁場応用実験施設」を発展的に解消して、平成 11 年度に新たに学内共同教育研究施設として設立された。

「遠赤外領域」は波長が 1 mm より短く、電波と光の中間に位置する電磁波領域(サブミリ波領域を含む)であり、世界的にも有効な光源がないため、電磁波の中で開発・応用がもっとも遅れている。FIR FU では、独自に開発した世界でも他に例のない高出力遠赤外光源「ジャイロトロン」を応用して、遠赤外領域の未開拓の研究や画期的な新技術の開発を行っている。また、FIR FU は国内外の研究機関との世界的規模の協力の下に研究を推進しており、遠赤外領域開発研究の世界的拠点の一つである。

FIR FU の研究目標は、

(1) 周波数可変・高出力・サブミリ波光源 (Gyrotron FU Series)の開発研究、

(2) 高効率伝送系・高感度受信器等遠赤外領域の基礎技術の開発研究、

(3) ジャイロトロンを光源としたサブミリ波帯 ESR の研究、

(4) ジャイロトロンを光源としたプラズマのサブミリ波散乱計測、

(5) 物性物理、天文学、生物物理、プロセシング技術、大気圏リモートセンシング、新医療技術等、高出力遠赤外技術開発への Gyrotron FU Series の応用、

(6) 高感度遠赤外分光技術の開発と分子科学、宇宙観測への応用等である。

また、遠赤外領域開発研究のための国際共同研究の企画と推進も重要な課題である。

この中で FIR FU の中心課題の一つは高周波ジャイロトロン開発と応用である。これに向けてのセンターの取り組みとして特に重要なジャイロトロンの 1 THz 発振の達成, CW 高周波ジャイロトロンの開発および実際の応用に関する最近の成果を述べる。

2. ジャイロトロンによる 1THz 発振の達成

高周波ジャイロトロンの応用においては, THz に至る幅広い周波数領域で周波数資源を確保することが必要である。FIR FU ではジャイロトロンの高周波化の研究を推進し, 第二高調波発振において 889 GHz の世界最高記録を達成している[1]。これには 17 T 超伝導マグネットが用いられているが, これ以上の高磁場を超伝導マグネットで発生することが難しいため, この記録の更新が困難であった。最近, 常伝導パルスマグネット技術を利用することにより高磁場発生を可能とし, 1 THz 発振のブレイクスルーを達成した[2]。このジャイロトロンの構成と実験結果の概要を示す。

パルスマグネットの電源には, FIR FU 実験棟 1 階に設置した容量 100 μ F のコンデンサー 60 個からなるコンデンサーバンクを用いる。イグナイトロンをスイッチとして, マグネットにパルス電流を供給する。現在使用しているマグネットのインダクタンスでは, 放電開始後約 6 ms で電流のピークに到達する。実験棟 2 階にはジャイロトロン本体, 高圧電源, 制御系, 計測系が設置されている。

パルスマグネットは高磁場発生時の強いフープ力に耐えるよう, 外形と内径の関係に注意して設計されている。さらにコイル巻き線を厚いステンレス鋼の円筒容器内に装着し, コイルとステンレス鋼容器の間の空間にアルミナパウダーと水の混合剤を充填する。実験時, コイル全体を液体窒素で冷却することにより, アルミナパウダーと水の強固な充填剤が形成され, コイルに働くフープ力を押さえ込む。液体窒素はパルス磁場発生時の発熱を短時間で除去する効果もある。

パルスマグネットの励磁電流のピーク付近でマグ

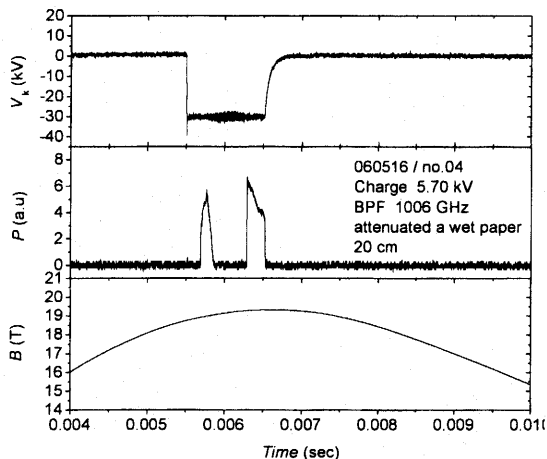


図 2-1 パルス磁場の变化に対し得られた発振

ネトロン入射型電子銃の陰極にパルスの負の高電圧を印加して電子ビームを引き出し, 発振実験を行う。通常, パルス幅は 1 ms, ビーム電圧は -30 kV である。電子ビームは磁場にガイドされつつ磁気ミラー効果により磁力線に垂直方向のエネルギーが増大して, 空洞に入射する。空洞の直径は 3.9 mm である。図 2-1 に, パルス磁場のピーク強度付近でカソード電圧を印加して得られた 2 倍高調波発振波形を示す。磁場強度の時間変化に対応して, 発振モードがスイッチしている。ここでは, ハイパスフィルターを通すことにより, 基本波発振波形が取り除かれている。

各磁場に対して, 発振の得られたピークの周波数をプロットしたものが図 2-2 である。19 T を超える磁場強度において, TE_{4,12} モードが発振し, 周波数 1 THz 以上のジャイロトロン発振が初めて得られた。これにより, FIR-FU が保持していたジャイロトロン発振周波数の世界記録を大きく更新するとともに, ジャイロトロンにより 1 THz の発振が可能であることを実証した。

このジャイロトロンによる実験は現在も継続中であり, 今後さらに高磁場・高周波数での発振を目指している。また, ここで得られる実験データは, 以下で述べる CW ジャイロトロンの設計に貴重な知見を提供している。

3. 高周波ジャイロトロンの応用

3.1. 物性研究

核磁気共鳴 (NMR), 電子スピン共鳴 (ESR) 等の磁気共鳴法は物性物理, 材料開発, 化学, 生物学, 医学等あらゆる分野で有用な測定法として利用されている。また, より高分解能, 高感度を得るために様々な工夫がなされている。高分解能, 高感度をともに進める方法として強磁場下での高周波数磁気共鳴法がある。この利点はゼーマン分裂の増大による, 吸収線の間隔の増大 (分解能の向上) とスピン偏極の増大 (信号強度の増大) である。しかしながら, この方向は, 磁場の発生にかかるコストの増大と超伝導の臨界磁場による制限や, 高周波化にともなう電磁波出力の低下等の困難が発生

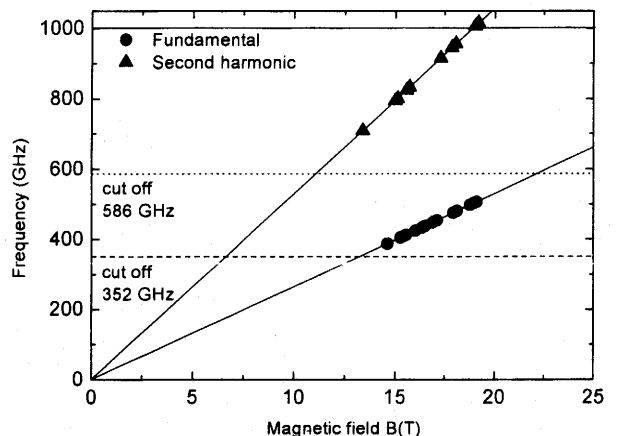


図 2-2 磁場強度と発振周波数の関係

する。

超伝導マグネットを用いないで強磁場を発生する方法として、パルス強磁場を利用した磁気共鳴に対するアプローチがある。FIR FU ではジャイロトロンを光源とした ESR 測定装置の開発を行い物性研究に利用している[3-5]。図 3-1 にジャイロトロンを光源とした ESR 測定装置の概略図を示す。Gyrottron FU IVA からの電磁波は銅のパイプによるオーバーサイズ円形導波管と準光学的バンドにより ESR 測定用のクライオスタットに導かれる。その後、クライオスタットの上部にあるホーンアンテナにより内径 2.7 mm のステンレスパイプを通して、パルスマグネットの中心におかれたサンプルに照射される。サンプルを透過した電磁波は、InSb ホットエレクトロン検出器により透過強度を測定する。パルスマグネットは、最高 40 T、パルス幅 2.5 ms の強磁場が発生可能である。

一方、ESR に比べてスピン緩和時間の長い NMR にパルス強磁場を利用する強磁場化は難しく、超伝導磁場を用いることが一般的である。そこで近年、高感度測定が可能な動的核偏極 NMR (DNP-NMR) 法が注目されている[6, 7]。特に、NMR の重要な応用分野であるタンパク質構造解析等の固体 NMR に於いて、プロトン (^1H) のみならず炭素 (^{13}C)、窒素 (^{15}N)、リン (^{31}P) は重要な核種であるが、その NMR 信号はプロトン信号の数 100~数 1000 分の 1 と小さく、長時間の NMR 測定が必要である。DNP-NMR による信号強度の増大はこの分野の測定時間を飛躍的に短縮することが期待されている。DNP-NMR 法とは、強磁場中で ESR と NMR を同時に行うことにより、核スピンの比べて大きなスピン磁気モーメントを持つ電子スピンの大きなゼーマン分裂によるスピン偏極を、核スピンの偏極に移すことにより、核スピン偏極を増大し、NMR 信号を数 100 倍に増加して観測することができる方法である。しかし、この効果を得るためには ESR 吸収線の双極子幅が NMR のゼーマン分裂幅 (NMR 共鳴周波数数 100MHz) と一致する必要がある。

このように、DNP-NMR を行うためには長時間安定に

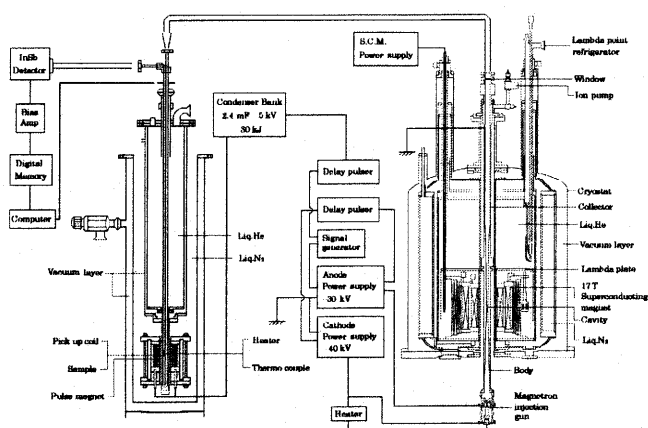


図 3-1 最高周波数 889GHz の Gyrottron FU IV A と 40 T パルス強磁場を用いた高周波 ESR 装置の概略図

動作する数 100 GHz、数 10 W の ESR 用光源が必要である。このような光源は、DNP-NMR 以外の分光実験においても有用である。そこで Gyrottron FU IV を用いて、周波数の安定化を試みた。このジャイロトロンは完全な連続発振が行えるので、ハーモニックミキサーと高精度のシンセサイザー発振器 (20GHz 程度) を用いて中間周波数信号を測定することで、発振周波数を正確に測定することができる。フリーランでのジャイロトロン出力は、電源の安定度にも依存するが、陰極電圧の変動率を 10^{-5} 程度に抑え、周波数の変動は 10^{-7} 程度まで抑えられる。この状態でフェーズロック制御を行ったところ周波数変動は 10^{-10} 程度まで安定化された[8]。これは対応する NMR 周波数が 400 MHz 程度であることから、DNP-NMR への利用にとって十分な周波数安定度が達成されている。

3.2. 核融合プラズマ診断

FIR FU とプリンストン大学プラズマ物理研究所との共同研究として、NSTX トカマク装置において、電子温度勾配によって発生する高波数の密度揺動を計測するため、福井大学で開発してきた Gyrottron FU II[9] をプラズマ散乱計測に応用することになっている。この計測手法は、プラズマ中に電磁波をプローブ・ビームとして入射し、密度揺動によって生じる散乱波から密度揺動の情報を得るものである。一般に、散乱波強度は微弱であり、計測の S/N 比を向上できないという問題がある。そこで、ジャイロトロンが他の光源に比べ格段に高出力であるという特長を生かし、ジャイロトロン出力を強力なプローブ・ビームとしてプラズマに入射し、散乱波強度を増強することにより、計測の S/N 比を向上することを目指している。

ジャイロトロンを光源として計測に応用するためには、ジャイロトロン出力 (周波数 354GHz, TE_{16} モード) の振幅と周波数を安定化することと、円形導波管モードとして得られる出力をプローブ・ビーム伝送系に高効率で結合することが重要である。

計測の実施においては、長パルス動作による発振出力[10]を利用するので、このときカソード電源の出力電圧には、パルス間における電圧降下 (数 100V) と数 kHz のスイッチングリップル (約 40V) が現れる。これらの電圧変動を軽減するために、高電圧電源とジャイ

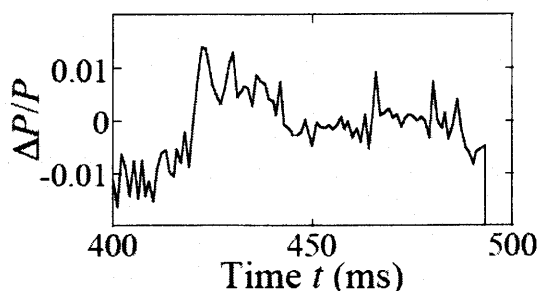


図 3-2 ジャイロトロンの発振出力の時間的変動

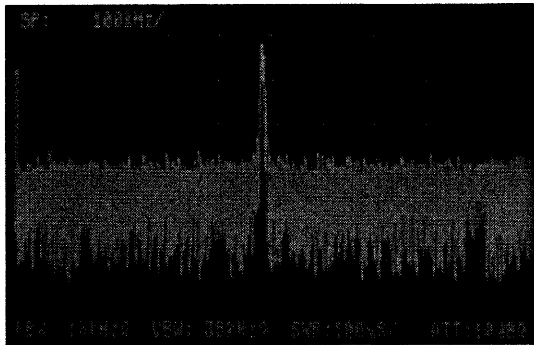


図 3-3 ジャイロトロン発振周波数のスペクトル

ロトロンのカソード電極の間に、コイル、コンデンサー、抵抗よりなる平滑回路と高電圧スイッチを挿入した。スイッチングリップルに対して、平滑回路は低インピーダンスとなるため、リップルはほぼ完全に取除かれる。パルス間における電圧降下もパルス開始から 0.5 s 程度経過後には小さくなり、スイッチングリップルを含む電圧変動分は、0.6 V 程度に軽減される。これに伴って、図 3-2 に示すように、発振出力の変動は、10% から 2% 程度にまで減少した。また、数 100 kHz あった発振周波数の変動は、数 10 kHz 程度に軽減できた (図 3-3)。

ジャイロトロン出力をプラズマに結合するための準備として、プローブ・ビーム伝送系として用いられるコルゲート導波管への結合実験を行った。まず、準光学アンテナ [11] と収束ミラーにより構成される準光学システムにより、ジャイロトロン出力をガウスビームに変換し、そのウェスト部でコルゲート導波管に入射した。コルゲート導波管を伝搬し、他端から放射された電磁波ビームの放射パターンを図 3-4 に示す。予備的な結果のため、結合効率は 15% 程度と低いものの、比較的良好な放射パターンが得られている。

3.3. セラミック焼結

高出力ミリ波・マイクロ波を用いたセラミック焼結法は、ジャイロトロン光源を用いた新技術の一つであり、従来法より短時間で高密度・高強度・緻密な構造をもつセラミックを焼結することができる画期的な方法として注目されている [12, 13]。この焼結法は、従来の抵抗炉のように外部加熱による焼結法と比較し、自己発熱を特徴とする。電磁波加熱の主な利点として、1) 急速・内部加熱が可能、2) 選択加熱が可能、3) 低温で、かつ短時間で緻密な焼結が可能であるという点が挙げられる。3) については「非熱的効果」と呼ばれ、むしろ電磁波の周波数および出力に依存する効果であり、現在でもそのメカニズムの解明のための研究がおこなわれている [14]。

FIR FU ではミリ波領域の総合的開発研究の一環として、24GHz ジャイロトロンを用いた難焼結性の B_4C の焼結に取り組んでいる [15-16]。炭化ホウ素はダイア

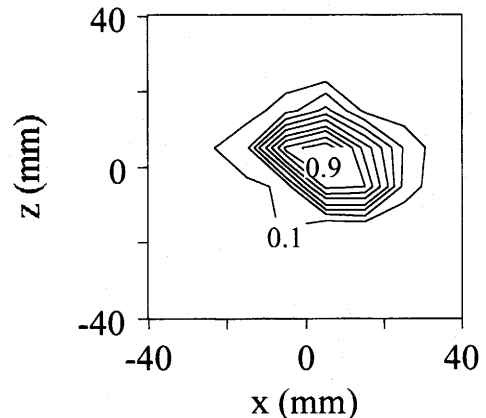


図 3-4 コルゲート導波管からの放射パターン

モンドや窒化ホウ素結晶について硬い物質であり、また中性子の吸収断面積が大きく、核反応の制御棒として使用されている。従来使用されているホットプレス焼結法では実現できない傾斜材料を成形し、制御棒材の長寿命化が目的である。

まず簡易一軸プレス成形された試料の焼結を行い、2200 °C で相対密度 83 % が得られた。試料の SEM 観察から、ミリ波焼結法では、焼結前の試料の気孔サイズが緻密化に対して大きく影響し、微小な気孔は焼結時に消滅するが、粗大な気孔が焼結後にも残るため、緻密化の妨げになっていることが確認された。そのため、気孔分布が均一になりやすい、泥しよう鑄込み成形を

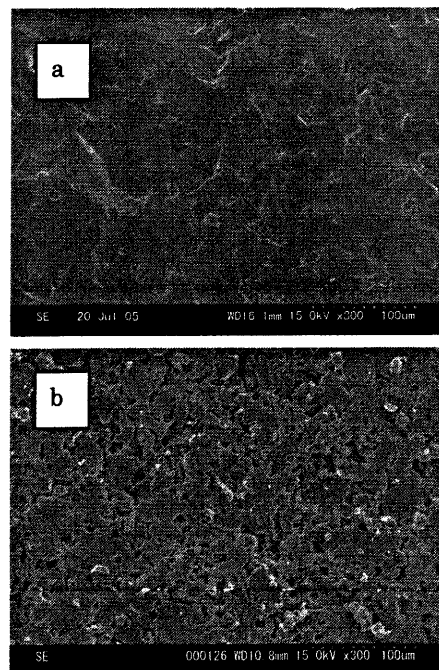


図 3-5 2100°C で焼結した試料の SEM による破断面の観察 (300 倍) a: 鑄込み成形試料 b: プレス成形試料

行い、更なる高密度焼結を試みた。図 3-5 に成形法の異なる試料の焼結温度 2100 °C の SEM 写真を示す。図から鑄込み成形法は緻密化を促進することが確認できる。これまでに相対密度 90% 以上の結果を得ている。無加圧の焼結によって緻密な焼結体が得られたことは、ミリ波の非熱的効果が効果的に作用した結果であると考えられる。

FIR FU では、「非熱的効果」等の電磁波加熱特有のプロセッシングについて、さらに高周波域への展開を図るため、300 GHz サブミリ波材料プロセッシング装置の開発を行っている。試作したプロセッシング装置の構成を図 3-6 に示す。本装置の要素は、電磁波による加熱を行うアプリーター部、ジャイロトロン (Gyrotoron FU CW I, 後述) およびアプリーターとジャイロトロンを接続するコルゲート導波管部である。

アプリーターはミリ波 (24 GHz) のアプリーターと同様に電磁波のマルチモードを利用した体積加熱による材料処理が行える。同時に、1 mm という短波長に対応して、集光時のスポットも 1 mm 程度と小さなものが得られる。この特徴は微小域のスポット加熱といった表面処理に威力を発揮するとともに、強電界中で顕著に現れる、非熱的効果の利用及び研究にも効果的であると期待される。内部にミラーを設置し、小スポットの表面処理が行える構造になっている。

ジャイロトロンからアプリーターに電磁波を伝送する導波管は、300 GHz の利用に最適化するため 0.254 mm のピッチと深さを持つコルゲート構造を導波管内壁に加工した。実際の微細加工は切削加工に優れた黄銅を用い、福井県の地元企業が機械加工で製作した。また黄銅は切削性には優れているが、電気伝導性が低く伝送損が大きい。この特性を改善するため、福井県の微細部分の洗浄及びメッキ技術を用い、導波管内面にニッケルと金を二重にメッキし、導電性と耐久性を両立した超低損失コルゲート導波管としている。

4. CW ジャイロトロンの開発

4.1. 300 GHz/CW ジャイロトロン FU CW1 の開発

高周波ジャイロトロンの応用研究の展開のため、連続発振するジャイロトロンの開発が求められる。このため福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、FU

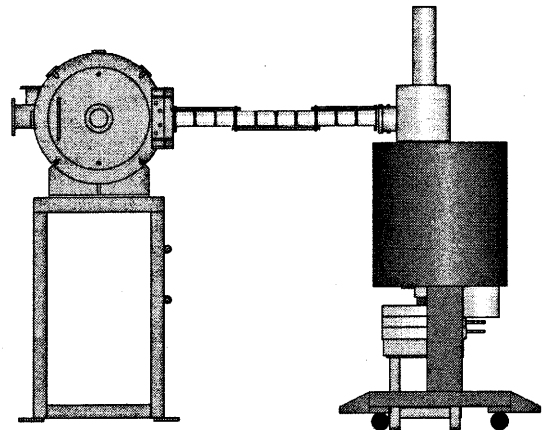


図 3-6 サブミリ波材料プロセッシング装置。

CW series ジャイロトロンの開発を開始した。

その 1 号機が FU CW I である。FU CW I は前節に示したサブミリ波材料プロセッシング装置の光源として用いられている。このジャイロトロンの仕様を表 4-1 に示す。周波数 300 GHz で連続発振出力定格 3 kW 以上である。12 T 液体ヘリウムフリー超伝導マグネットに装着されている。空洞での発振モードは基本波 TE_{22,8} であり、内蔵のモードコンバータと波形整形ミラーの組み合わせにより、水平方向に準ガウスビーム出力が得られる。

現在、FU CW I の動作特性を測定中である。ビーム電圧 15 kV の時、ビーム電流に対して出力はほぼ直線的に増大し、定格電流 1 A までは、出力の飽和や減少は見られない。これに対して、ビーム電流一定の条件下でビーム電圧に対する出力の変化をプロットしたものが図 4-1 である。ビーム電圧が約 8 kV で発振を開始し、電圧とともに出力が増大する。しかし、ビーム電圧が約 12 kV で出力が飽和し、以後、電圧とともに出力が若干減少する傾向も見られる。また、図に示すように、ビーム電圧を低いところから上げる方向で変化させる場合と、高いところから下げる方向で変化させ

表 4-1 FU CW1 の仕様

発振周波数	300 ± 2 GHz
発振出力	3.5 kW (nominal)
ビーム電圧	16 ± 1 kV
ビーム電流	1.1 ± 0.1 A
出力窓半径	80 mm
出力窓材	BN
発振モード	TE _{22,8}
出力モード	ガウスビーム

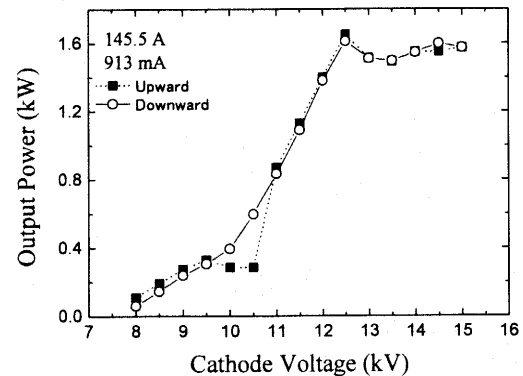


図 4-1 ビーム電圧に対する出力の変化, 出力は水負荷で測定

る場合で、若干出力が異なるヒステリシスが見られる。この出力飽和減少のため、現時点において、設計計算による定格出力 3 kW 以上に到達していない。現在の最高出力は 15 kV, 1 A において、1.75 kW である。

赤外線カメラを用いて、出力ビームの品質を調べた。真空窓直後では空間的な高次モードによると思われるビーム形状のゆがみが見られるが、数 10 cm 以遠では、ほぼ基本ガウスモードで伝播していることが確認された。

発振モードを同定し、出力飽和の原因を調べるため、ビーム電圧に対する発振周波数の変化を測定した。ジャイロトロンからの出力の一部を導波管で伝送し、ハーモニックミキサに結合する。ハーモニックミキサには高安定の発振器出力を印加して、その通培周波数との差周波出力 (IF 出力) の周波数をスペクトラムアナライザで測定する。これから、ジャイロトロンの発振周波数が高精度で測定できる。この測定で得られた周波数から、ビーム電圧 12 kV 付近では確かに設計モードの $TE_{22,8}$ で発振していることがわかった。しかし、ビーム電圧 12 kV 以上の領域ではスプリアスモード $TE_{19,9}$ が出ていることがわかった。現在、このモードを抑えてさらに高出力を得るべく調整中である。

この調整終了後、アプリケーションを設定し、セラミックの焼結実験に入る予定である。

4.2. 今後の CW ジャイロトロン開発計画

FIR FU では、4.1 節で示した 300 GHz/CW ジャイロトロン FU CWI に引き続いて、種々の応用のための高周波 CW ジャイロトロン開発を進めている。一つは、物性研究にジャイロトロンを用いる延長上に、動的核偏極法 (Dynamic Nuclear Polarization, DNP) を用いた蛋白質解析のための FU CWII, 400 GHz / CW ジャイロトロンの開発である。これは、8 T の液体ヘリウムフリー超伝導マグネットを用いて、2 倍高調波により、kW レベルの出力を目標としている。現在、ジャイロトロン本体の製作が最終段階になり、まもなく発振試験に入る予定である。

さらに、パルスコイルを用いたテラヘルツ発振の実現を基礎として、1 THz / CW ジャイロトロン FU CWIII を開発する。20 T 超伝導マグネットを用いて、パルスジャイロトロンで実証された 2 倍高調波発振により、100 W レベルの連続出力を目指す。20 T 超伝導マグネットはすでに調達段階にある。

現在の開発計画を表 4-2 に示す。

表 4-2 FU CW Series の開発予定

FU CWI	300 GHz, 3.5kW	セラミック焼結, 医療応用
FU CWII	400 GHz, 2 kW	DNP NMR
FU CWIII	1 THz, 0.1 kW	高出力テラヘルツ技術開発

5. まとめと今後の展望

福井大学遠赤外領域開発研究センター FIR FU では、ミリ波サブミリ波領域高周波ジャイロトロンの開発とその種々の分野への応用研究を展開している。ここでは、パルスマグネットにより、高周波ジャイロトロン開発としてきわめて重要な意味を持つ 1 THz 発振のブレークスルーを達成したことおよび物性・プラズマ診断・セラミック焼結等の応用研究を紹介した。FIR FU では今後、各種の応用に対して最適な高周波 CW ジャイロトロン開発を進めてゆく予定である。その中ですでに設置されている 300 GHz / CW ジャイロトロン FU CWI の動作特性を示した。このジャイロトロンは、300 GHz で kW 級の完全連続出力のものである。FIR FU では表 4-2 に示す CW ジャイロトロンの開発を進めている。CW ジャイロトロンを用いることにより、遠赤外領域の電磁波を利用する研究が格段に進むと期待される。

文 献

- [1] T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **27** (1999) 340.
- [2] T. Idehara, H. Tsuchiya, O. Watanabe, et al., Int. J. Infrared and Millimeter Waves, in press.
- [3] S. Mitsudo, Aripin, T. Shirai, et al., Int. J. Infrared and Millimeter Waves **21** (2000) 661.
- [4] S. Mitsudo et al., J. Phys. Soc. Jap. **72** (2003) Suppl. B 172-1763
- [5] Aripin et al., Int. J. Infrared and Millimeter Waves **20** (1999) 1875.
- [6] A. Abragam, M. Goldman, Nuclear Magnetism : Order and Disorder, Vlarendo, Oxford, 1982
- [7] C. P. Slichter, Principles of Magnetic Resonance 3rd Ed. Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [8] T. Idehara et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **32** (2004) 910.
- [9] T. Idehara, T. Tatsukawa, I. Ogawa, H. Tanabe, et al., Phys. Fluids **B4** (1992) 267.
- [10] I. Ogawa, K. Yoshisue, H. Ibe, et al., Rev. Sci. Instrum. **65** (1994) 1788.
- [11] S. N. Vlasov, and I. M. Orlova, Radiofizika **17** (1974) 115.
- [12] W. H. Sutton, Am. Ceram. Soc. Bull. **68** (1989) 376.
- [13] M. A. Janny and H. D. Kimery, Mater. Res. Soc. Proc. **189** (1990) 215.
- [14] Yu V Bykov, K I Rybakov and V E Semenov, J. Phys. D: Appl. Phys. **34** (2001) R55.
- [15] S. Mitsudo, et al., Proc. Int. Symp. on Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources (2004) 155.
- [16] H. Hoshizuki, S. Mitsudo, T. Saji, et al., Int. J. Infrared and Millimeter Waves **26** (2005) 1531.