

Development of fundamental oscillated 400 GHz sealed-off gyrotron with continuous frequency tunability

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2011-07-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 池田, 亮介, 出原, 敏孝, 小川, 勇, 齊藤, 輝雄, 印牧, 知廣, 松木, 陽, 植田, 啓介, 藤原, 敏道, CHANG, T.H., CHEN, N.C., IKEDA, R., IDEHARA, T., OGAWA, I., SAITO, T., KANEMAKI, T., MATSUKI, Y., UEDA, K., FUJIWARA, T. メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/3646

基本波発振による400 GHz帯周波数連続可変Gyrotronの開発
**Development of fundamental oscillated 400 GHz sealed-off gyrotron
with continuous frequency tunability**

池田 亮介, 出原 敏孝, 小川 勇, 斉藤 輝雄, 印牧 知廣,
¹松木陽, ¹植田啓介, ¹藤原敏道, ²T.H. Chang, ²N.C. Chen
R. Ikeda, T. Idehara, I. Ogawa, T. Saito, T. Kanemaki,
¹Y. Matsuki, ¹K. Ueda, ¹T. Toshimichi, ²T.H. Chang and ²N.C. Chen

福井大学遠赤外領域開発研究センター

Research Center for Development of Far Infrared Region, Fukui University, Fukui 910-8507, Japan

¹大阪大学蛋白質研究所

¹Institute for Protein Research, Osaka University, 3-2 Yamadaoka, Suita, 565-0871, Japan

²国立精華大学

²Department of Physics, National Tsing Hua University, Hsinchu, 300 Taiwan

Abstract

We have already developed a frequency tunable gyrotron (Gyrotron FU CW VI) operating at fundamental resonance by using a 15 T superconducting magnet, in order to apply to 600 MHz DNP-NMR spectroscopy. The gyrotron has achieved a frequency tunability of 1.6 GHz and the output power was ranged from 10 to 30 W. On the basis of the success, we have designed a new sealed-off gyrotron. We are intending to improve the output power, the stability and the frequency tunability. In this report the design and the results of operation test are described.

1. はじめに

これまでサブテラヘルツからテラヘルツ帯において高出力光源が存在しなかった為に、応用研究が困難だった分野が多数あった。近年の Gyrotron の高周波化により、1THz 以上の領域にて数 10W の出力を可能とする光源も実現するようになり、物性科学、生命科学、基礎物理、プラズマ計測など多岐に亘る分野での応用が期待されるようになった。とりわけ、蛋白質の構造解析の分野において、高周波 Gyrotron が光源として注目されている。生体高分子構造を研究する手法として核磁気共鳴 (NMR) 分光を用いた解析が主要な方法の一つとなっており、分子量 1 万以上の分子について構成分子の全座標決定が可能となっている。現在、生体分子の働きを原子分解能で知るためには、5 万以上の蛋白質複合体の構造決定を行うことが必要とされているが NMR 感度が低く、S/N 比を高めるために数千回以上の測定を繰り返すため膨大な時間を要する。より複雑な蛋白質複合体の構造決定を行うためには NMR 感度の向上が必要不可欠となる。この為、そこで、試料に数 W 程度の電磁波を照射して核スピンの比べて遥かに大きな電子スピンの分極を核スピンの移動させることで、NMR 感度を向上させる動的核偏極 (DNP) 法が注目されている[1]。電磁波照射により、従来の方法に比べて NMR 感度は 100~300 倍程度の向上が見込まれる。加えて試料を極低温条件下にて測定を行うことで、さらに 10 倍程度の向上が得られる。これにより膨大な測定時間の短縮が可能となる。DNP 法は 1950 年代に実験的検証が行われてきたが、サブテラヘルツ帯では高出力光源が存在しなかったために実現されなかった。

Gyrotron はサイクロトロン共鳴メーザー作用を発振原理とすることから、空洞共振器を単純な構造かつ十分な大きさを取ることが出来るため、テラヘルツ領域でも数 10W 以上の高出力動作を実現する。一方で、効果的に NMR 感度向上を実現するためには、照射する周波数を電子スピン共鳴周波数±NMR 周波数 (600MHz NMR の場合、394.6 GHz ± 0.6 GHz) となる最適周波数に一致させなければならない。Gyrotron の発振周波数は、共振器形状でほぼ決定されるが製作誤差等により周波数を最適周波数に完全に一致させることは難しい。最適周波数での照射を実現するためにも、Gyrotron の発振周波数を連続的に変化させ、試料に対して周波数挿引することが必要である。しかしながら、本来 Gyrotron は磁場強度に対して発振モードを切り替えることで発振周波数を変化させることは可能であるが、発振モードを変えるたびに周波数が段階的に変化するため、連続的な周波数挿引を行うには適さない。その為、最適周波数での勝者が困難で、これまでに行われた NMR 感度向上は、最高でも 20 倍程度であった[2]。

平成 21 年度に、NMR 感度の向上を目指した周波数連続可変 Gyrotron として、Gyrotron FU CW VI の開発を行った[3,4]。本装置では、394.65 GHz ~ 396.27 GHz にて周波数連続可変幅 $\delta f = 1.6$ GHz を実現した。発振出力は最大で約 35 W であった。この研究開発にて確認された課題として、発振出力が 30 W 程度が得られる条件では 10 分間の発振

揺動が 20～30%と非常に不安定である点が挙げられた。本 Gyrotron は、組み立て管である為、実験時の管内圧力は $10^{-6} \sim 10^{-4}$ Pa の範囲で変動する。その為、管内圧力の変動によりビーム電流の不安定性を誘起し、発振出力の揺動の増大を生じたと考えられる。また、DNP 実験へ適用する場合において伝送損失することや、モードコンバータを内蔵した場合にて変換損失が生じることを考慮し、更なる発振出力の向上も望まれる。これらの問題を改善する為に周波数連続可変 Gyrotron として、新たに Gyrotron FU CW VIA の開発を行った。

2. Gyrotron FU CW VIA

Gyrotron FU CW VIA は、全長 1443.35 mm の真空封じ切り管である。良質なベーキングの効果により管内圧力は 10^{-7} Pa と高真空状態を維持する。これにより、実験時での管内圧力上昇も抑えられ、それに起因するビーム電流の不安定性も抑制されるものと期待される。空洞共振器の形状は、図 1 に示すように半径 $R_c = 4.700$ mm、共振器 $L_c = 20$ mm、ダウンテーパとアップテーパの角度は 2.619° と 3.248° となっている。組み込んだ電子銃は、Gyrotron FU CW VI のものと同じである。電子銃エミッティング帯から共振器中心までの距離は、470.9 mm となっている。マグネットは、ヘリウムフリー 15 T 超電導マグネットと内径 150 mm の 2 枚の補助磁場マグネットを用いた。

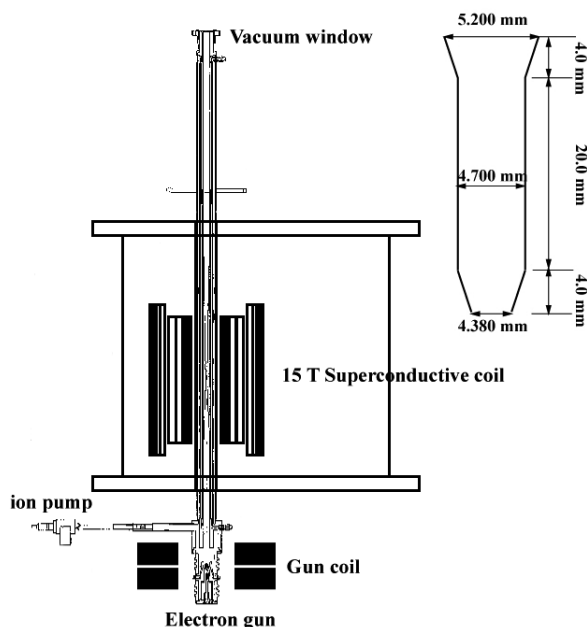


図 1 Gyrotron FU CW VIA と空洞共振器部の設計図

3. Gyrotron FU CW VIA の発振実験

図2に磁場強度 13.0 T から 15.0 T における発振信号および発振開始電流の計算値を示す。発振信号は、焦電型検出器を用いて測定した。発振条件は、カソード電圧 $V_k = 12.0$ kV, アノード電圧 $V_a = 6.0$ kV, ビーム電流 $I_b \sim 300$ mA, 補助磁場電流 $I_g = -100$ A である。補助磁場電流が負の値であるのは超電導マグネットの磁場方向と反転であることを示している。発振は、繰り返し周波数 10 Hz, Duty 比 20 %で行った。発振開始電流は、ピッチファクター $\alpha = 1.2$, ビーム半径 $R_b = 0.65$ mm として計算した。この結果より, $B_c = 14.2 \sim 14.4$ T に TE_{4,5} モード, $14.4 \sim 14.6$ T 辺りで TE_{2,6} から TE_{0,6} モードが励起したと考えられる。また, カソード電圧 $V_k = -8$ kV, -9 kV, -10 kV, -12 kV, -14 kV の場合での磁場強度に対する発振信号を図3に示す。ビーム電流 $I_b \sim 300$ mA, 補助磁場電流 $I_g = -250$ A である。TE_{4,5} が発振していると考えらる $14.1 \sim 14.4$ T の範囲では, $V_k = -10$ kV 以下で顕著な発振を示した。

TE_{4,5} モードの発振について, 補助磁場電流及に対する水負荷による発振出力特性を図4(a)に示す。測定条件は, 磁場強度 $B_c = 14.29$ T, カソード電圧 $V_k = -12$ kV, ビーム電流 $I_b \sim 300$ mA である。アノード電圧は, $V_a = -5.0$ kV, -6.0 kV, -7.0 kV について示している。アノード電圧 $V_a = -5.0$ kV, -6.0 kV の条件では, 補助磁場電流 $I_g = -200$ A \sim 0 A の発振出力は 20 W \sim 30 W であったが, -200 A 辺りから急激に出力が上昇している。約 70 W に達した。電子ビームの共振器入射半径 R_{inj} が,

$$R_{inj} = \sqrt{\frac{B_k}{B_c}} R_k \quad (1)$$

で表わされる。ここで, B_c, B_k は各々共振器中心とエミッティング帯中心の磁場強度, R_k はエミッティング帯の半径である。また, TEm,n モードの最適入射半径 R_b は,

$$R_b = \frac{\chi'_{m\pm s,l}}{\chi_{m,n}} R_c \quad (2)$$

ここで, χ'_{mn} はベッセル関数の解, ハーモニック数 s , 電界ピーク l , 共振器半径 R_c である。式中の \pm は, プラスが Counter-mode, マイナスが Co-mode に対応する。TE_{4,5} の場合, Counter-mode の最適入射半径 $R_{b_ctr} = 0.785$ mm, Co-mode の最適入射半径 $R_{b_co} = 0.514$ mm となる。 $I_g = -250$ A の場合, 共振器入射半径は $R_{inj} \sim 0.57$ mm となることから, Co-mode における最適入射ビーム半径 $R_{b_co} = 0.514$ mm に接近した為と考えられる。同様に, 補助磁場電流を正に増加させることで Counter-mode での発振も期待出来ると考えられる。アノード電圧 $V_a = -7.0$ kV では, 発振出力が 20 W \sim 30 W と平坦な結果となっており, アノード-カソード間電圧が狭まったことで, ピッチファ

クターが減少し発振効率が低かったのではないかと考えられる。次に、ビーム電流に対する発振出力特性を図 4(b)に示す。測定条件は、磁場強度 $B_c = 14.29$ T, カソード電圧 $V_k = -12$ kV, アノード電圧 $V_a = -6$ kV, 補助磁場電流 $I_g = -100$ A である。ビーム電流 $I_b = 200$ mA までは、出力の上昇が見られたが 30 W 辺りで飽和した。補助磁場電流が $I_g = -100$ A でのケースである為に、最適入射半径からずれており発振効率が低い点、ビーム電流の上昇により空間電荷効果によってピッチファクター及びその分散が増大し、ビーム電流の増大に対して発振出力の上昇を妨げられたのではないかと考えられる。これらの結果は、最適入射半径に一致するビーム入射を実現し、高いピッチファクターかつピッチファクター分散が低くなるような条件で実験を行えば、更なる発振出力の向上が望めることを示唆しており、100 W 程度の発振が可能と期待される。

しかしながら、本実験終了後に Gyrotron の真空窓の破損が生じ、電子銃への損傷により実験の続行が不可能となった。そこで、本 Gyrotron の改修を行うこととなった。

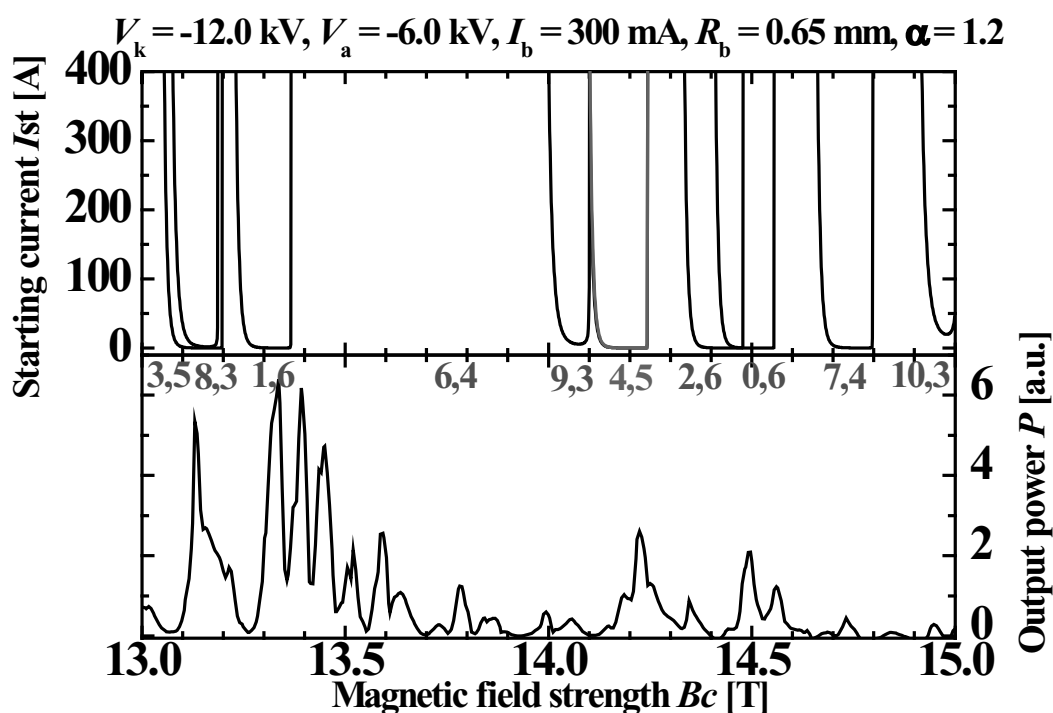


図 2 Gyrotron FU CW VIA の磁場強度に対する発振信号と発振開始電流

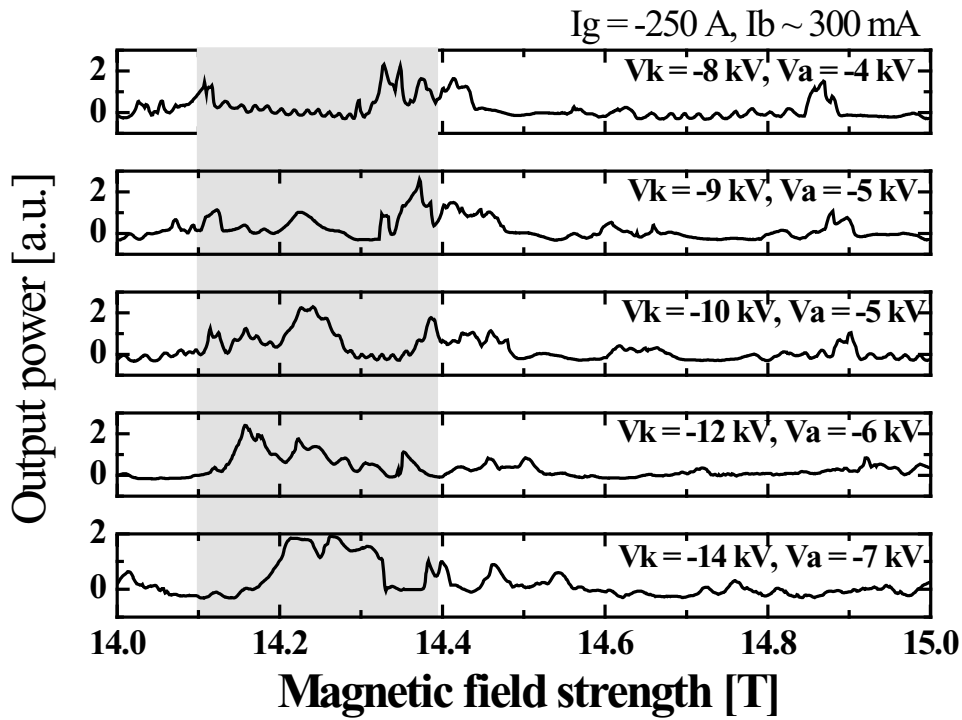


図3 カソード電圧に対する発振出力信号

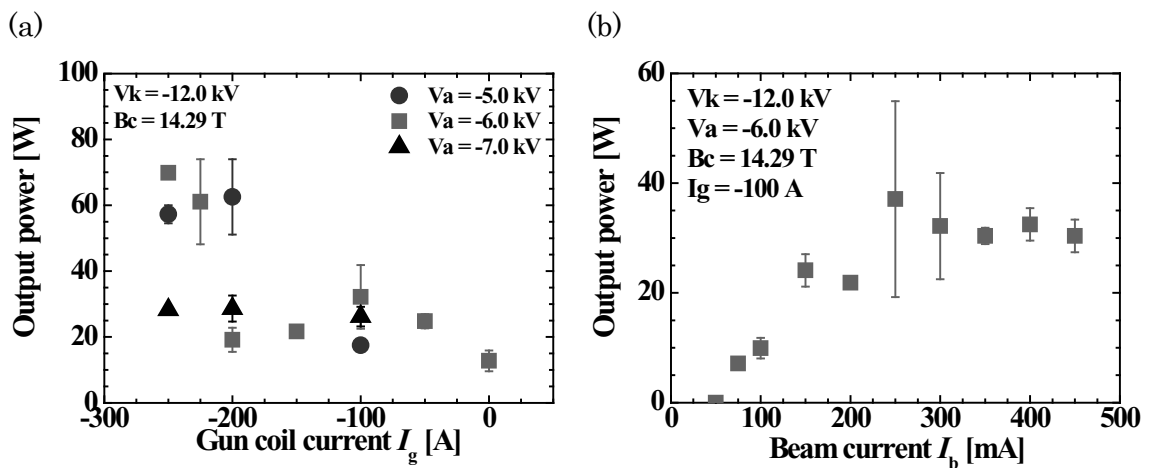


図4 (a)補助磁場電流に対する発振出力 (b)ビーム電流に対する発振出力

3. 周波数連続可変機構の考察

Gyrotronの改修にあたり、周波数連続可変の機構について考察を行った。周波数可変幅を見積もる方法として、以下の方法を用いる。空洞共振器によって決められる発振周

波数は,

$$\omega = c \sqrt{\left(\frac{\chi'_{m,n}}{R_c}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{L_c}\right)^2} = c \sqrt{\left(\frac{\chi'_{m,n}}{R_c}\right)^2 + k_{\square}^2} \quad (3)$$

で見積もられる．ここで， χ'_{mn} はベッセル関数の解， q は縦軸モード数である．空洞共振器内の電界は定在波条件であるので，一般的な Gyrotron では発振周波数 ω は，

$$\omega \geq s\Omega_c = s \frac{eB_0}{\gamma m_e} \quad (4)$$

となる．ここで， Ω_c は電子サイクロトロン周波数， γ は相対論因子で，

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 1 + \frac{V_k [\text{kV}]}{511} \quad (5)$$

である．しかしながら，図 5 に示すような共振器出口からの反射波（後進波）成分が顕著となると電子ビームととの間で相互作用が生じ Gyro-BWO 的動作をする．この場合，一般的な Gyrotron とは，発振条件が異なる．図 6 に示すように，Gyrotron は速波サイクロトロンモードと共振器モードが接する点で発振するが，いわゆる Gyro-BWO は，共振器モードと速波サイクロトロンモードの交点で発振する．この関係を式で表わすと，電子サイクロトロン周波数にドップラーシフトの項 k/v_{\square} が付加され，

$$\omega \approx s\Omega_c + k_{\square}v_{\square} \quad (6)$$

と表わされる．ここで， v_{\square} は，

$$v_{\square} = \sqrt{\frac{v^2}{1 + \alpha^2}} \quad (7),$$

であり， α はピッチファクターである．後進波であることから，縦軸モードは $q = +1, -1, -2, -3 \dots$ という負の値をとっていく．例としてカソード電圧やピッチファクターは同一で，共振器半径 ($R_c = 2.372 \text{ mm}$) も同じであるが，共振器長が異なる場合 ($L_c = 25 \text{ mm}, 20 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$) における縦軸モードの変化を図 7 に示す．磁場強度の増大に伴い，周波数が向上していくことが分かる．これは，式 (6) の関係から，周波数可変領域は電子サイクロトロン共鳴周波数 f_c より低い領域で周波数が変化することを示している．この図より，磁場強度の変化幅はほぼ同じである一方で，共振器長が長いほど縦軸モードが密に励起され，高次まで励起されていることが見て取れる．共振器長 $L_c = 10 \text{ mm}$ のように縦軸モード間の幅が離れていると発振は断続的になったり，高次モードが励起しなくなる可能性がある．一方で，共振器長が長ければ一つの縦軸モードの発振が終わる前に次の縦軸モードが励起されて連続的な発振と，滑らかな周波数連続可変を両立することが出来ると考える．ただし，縦軸モード間でのモード競合があると発振が途切れる

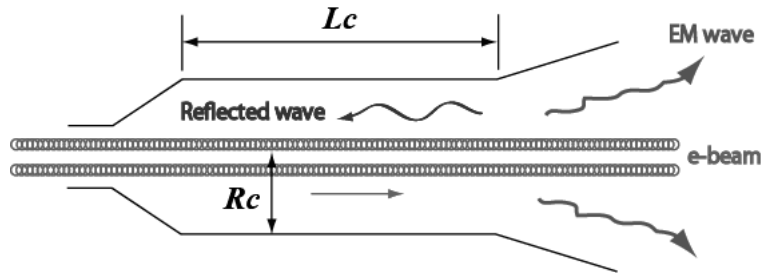


図5 Gyro-BWOの模式図

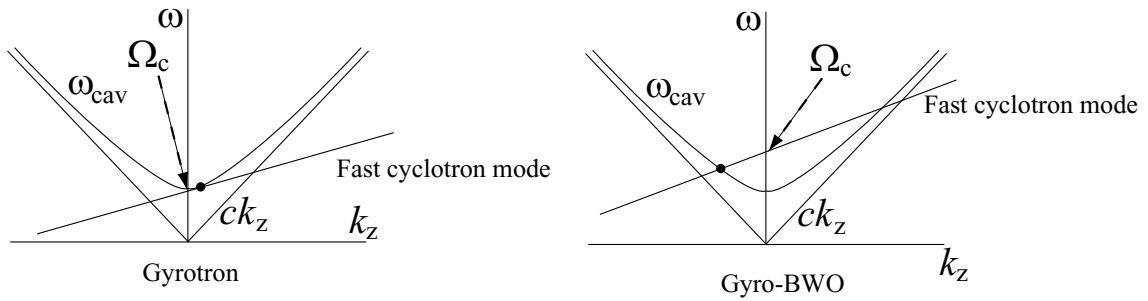


図6 GyrotronとGyro-BWOの分散関係

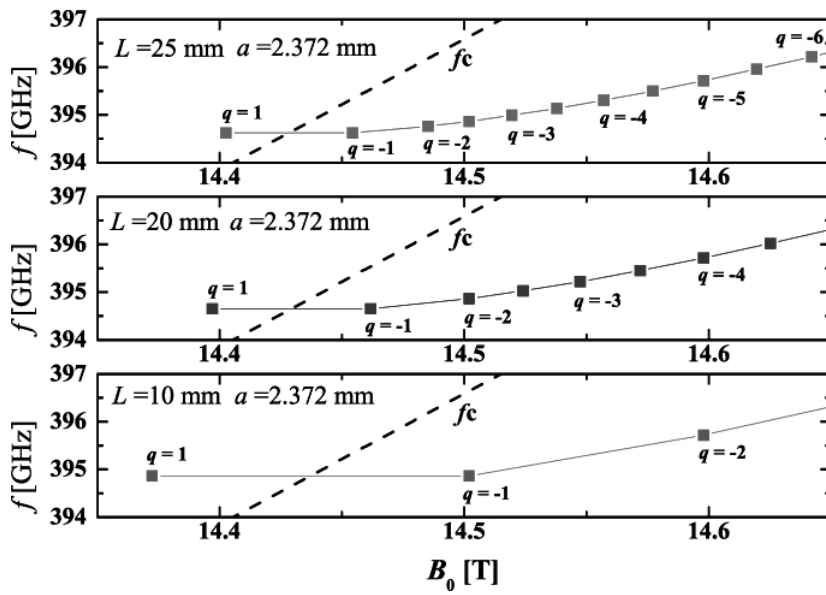


図7 共振器長に対する縦軸モードの励起

可能性があり、共振器長の上限を理解するには後進波作用を考慮したモード競合計算を行う必要があるだろう。

この評価法を用いて、過去に開発を行った Gyrotron FU CW VI の周波数可変幅が一致するのか比較を行った。磁場強度 13.9 T ~ 14.8 T における各モードの周波数と計算結果を図 8 に示した。図中の直線は、数値計算の磁場強度で評価した電子サイクロトロン周波数である。条件は、カソード電圧 $V_k = 12$ kV, 共振器半径 $R_c = 2.3735$ mm, 共振器長 $L_c = 25.0$ mm, ピッチファクター $\alpha = 1.5$ とした。設計共振器直径は、2.372 mm であるが、周波数測定から +1.5 μ m 大きいと評価しているのでこれを考慮した。図から、周波数上昇の仕方が、特に TE_{4,5} と TE_{0,6} では計算結果とほぼ一致しており、電子ビームと後進波との相互作用の効果による周波数可変であったことを示している。周波数変化が可能な磁場強度の幅は、隣の TEm,n モードの励起で制限されていることが分かる。TE_{2,6} モードで周波数可変が得られないのは、発振磁場強度の幅が狭く、縦軸モード $q = 1$ から $q = -1$ で発振が終了している為である。さらに詳しく TE_{0,6} モードについて考察する。磁場強度に対する周波数の実験結果を赤抜プロットとピッチファクター $\alpha = 1.0, 1.5, 2.0$ における数値計算結果を図 9 に示した。この周波数可変では、縦軸モードは $q = -6$ まで励起したと考えられる。実験結果において、磁場強度に対する周波数の勾配が、14.3 T ~ 14.4 T と 14.4 T ~ 14.5 T で異なっている。これは、磁場強度の変化によってピッチファクターが変化することによって生じている可能性が考えられる。その為、実験時のピッチファクターは、 $\alpha = 1.5 \sim 2.0$ で変動があったのではないかと考えている。以上の結果から、より幅広い周波数可変を実現する為には、単独発振する磁場強度が幅広い TEm,n モードを選択し、 $\alpha = 2.0$ のような高いピッチファクターを実現すれば良いことが分かった。

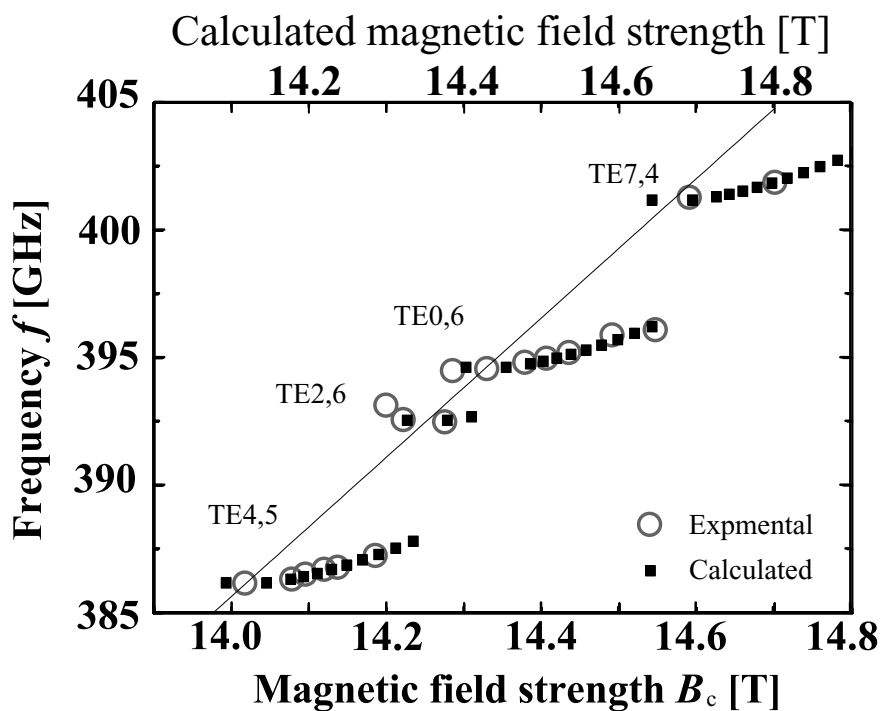


図 8 Gyrotron FU CW VI での周波数可変幅の実験結果と計算結果

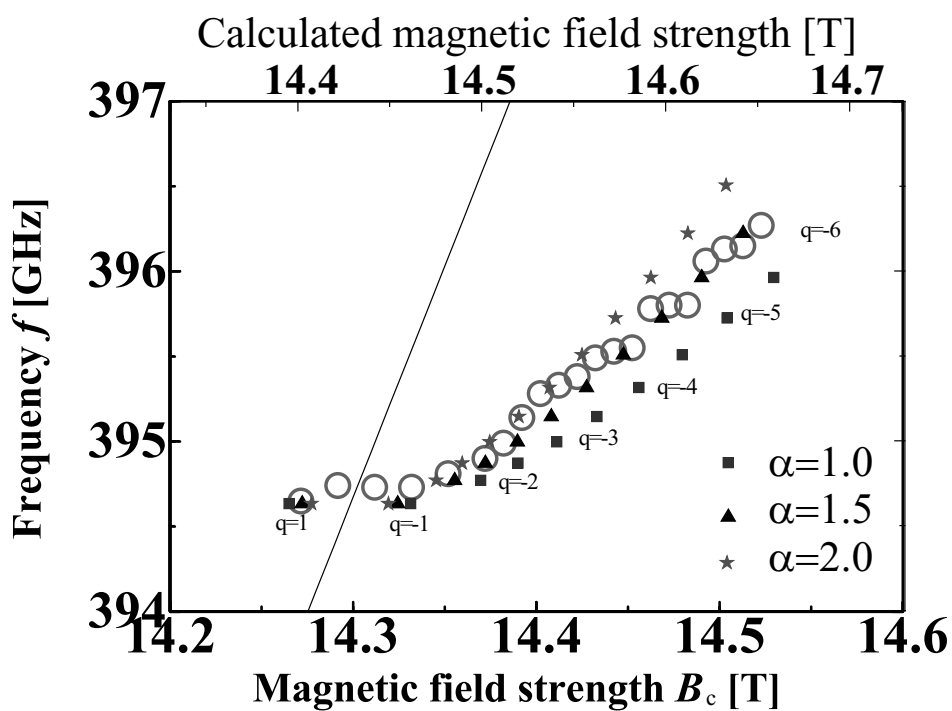


図 9 Gyrotron FU CW VI の TE0,6 モードでの周波数可変幅の実験結果と計算結果

4. Gyrotron FU CW VIA の共振器の検討

ここまで述べた周波数可変機構の考察から、周波数測定を行うことが出来なかった Gyrotron FU CW VIA の周波数可変領域を見積もる。カソード電圧 $V_k = 12$ kV, ピッチパラメータ $\alpha = 1.5$ と仮定する。Gyrotron FU CW VIA は空胴共振器半径 $R_c = 4.700$ mm, 共振器 $L_c = 20$ mm である。その結果を図 10 に示した。TE_{4,5} モードの周波数可変幅は、約 1.5 GHz と予想された。ここで、問題となるのは本 Gyrotron は、600 MHz DNP-NMR 分光への応用を目的として開発を行っているため、394.0 GHz ~ 395.2 GHz の領域での周波数連続可変が必須である。その為、空胴共振器の再設計が必要となった。

空胴共振器設計を行うにあたり最低限満たすべき点として、電子ビームの回収点が水冷層領域に収まる磁場配位で、ビーム半径が最適入射半径を実現するモードを選択することである。水冷層領域に収めるためには、図 11 に示すように補助磁場電流は $I_g = -200$ A ~ 300 A でなければならない。しかし、Gyrotron FU CW VIA では、補助磁場マグネットと超電導コイル間距離が近いため、 $I_g = -150$ A ~ 150 A が望ましい。続いて、補助磁場電流に対するビーム半径を図 12 に示す。この図より、入射ビーム半径は $R_{inj} = 0.65$ mm ~ 0.85 mm となる。周波数連続可変の実績のある TE_{0,6} モードの場合は、Gyrotron FU CW VI と同じ共振器形状とした場合において、式(2)の電界ピーク $l=2$ の場合に最適入射半径は $R_{b_ctr} \sim 0.65$ mm となる。この結果より、Gyrotron FU CW VIA の磁場範囲においても、Gyrotron FU CW VI と同じ共振器設計にて周波数連続可変が望むことが出来る。更に別の発振モードについても今後検討を続ける。

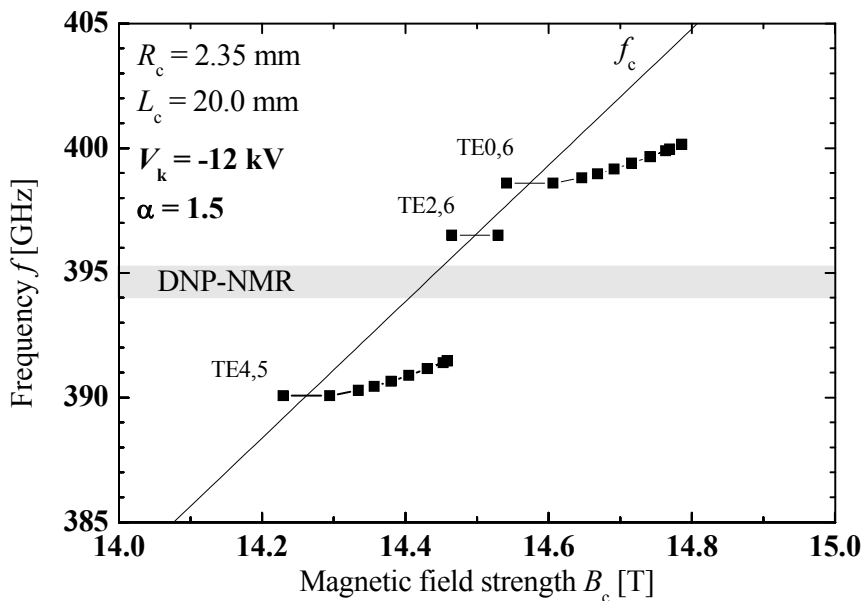


図 10 予想される Gyrotron FU CW VIA の周波数可変領域

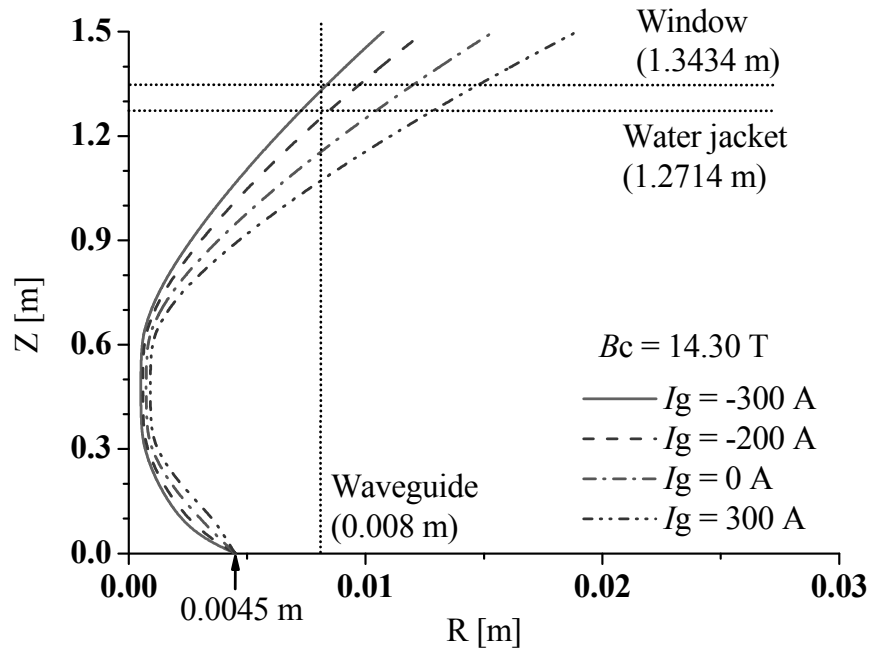


図 11 エミッティング帯を通る磁力線の軌道

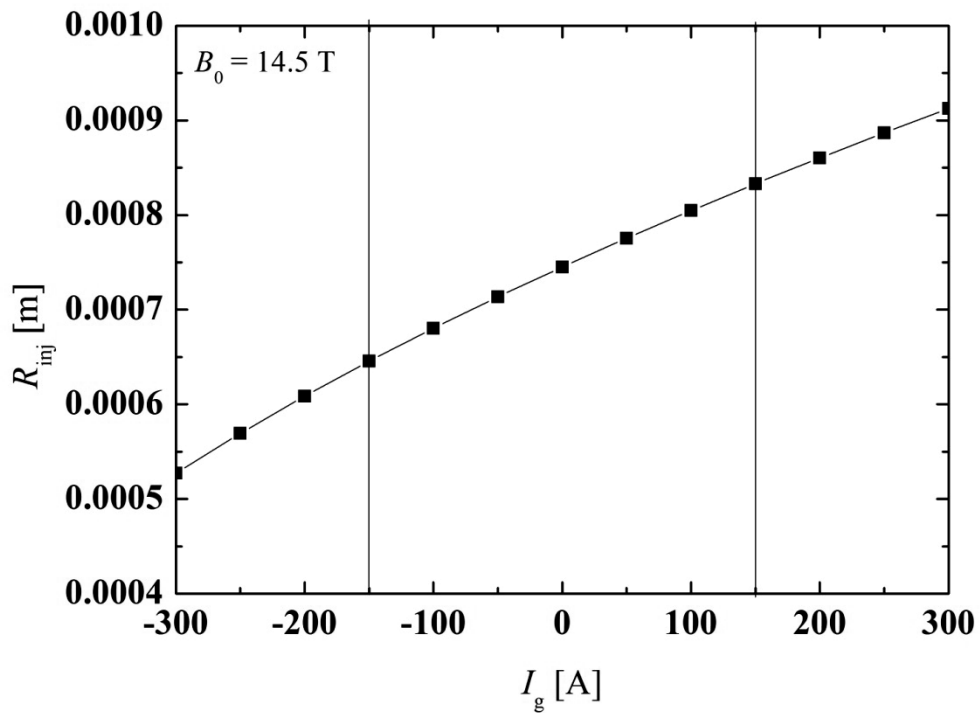


図 12 補助磁場電流に対する共振器入口への入射ビーム半径

5. まとめ

600 MHz DNP-NMR 分光測定のために、新たに真空封じ切り管 Gyrotron FU CW VIA の開発を行った。発振出力において最大 70 W を実現した。しかしながら、Gyrotron FU CW VIA の故障により周波数を測定することが出来なかった。計算により予測された発振周波数は、目標とする 394.0 ± 0.6 GHz の領域からずれている問題があった。Gyrotron の改修に伴い空洞共振器の再設計を行い、次期装置にて 100 W 級かつ周波数可変幅 1.5 GHz 以上の周波数連続可変 Gyrotron の実現を目指す。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構（JST）の先端計測分析技術・機器開発事業の一環として行われた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] A. Abragam and M. Goldman, “Nuclear Magnetism”, Clarendon Press, Oxford (1982).
- [2] Y. Matsuki, *et.al.*, Phys. Chem. Chem. Phys., 12, 5799–5803 (2010).
- [3] T. Idehara, *et.al.*, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Vol.31, pp.775~790 (2010).
- [4] 池田亮介 他, 電子情報通信学会 信学技報 Vol. 110 No. 249, ED2010-141, pp.67-72 (2010).