

協同トムソン散乱計測のための400GHz-100kWパルス
スジャイトロンの開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2011-07-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小笠原, 慎弥, 斉藤, 輝雄, 立松, 芳典, 山田, 尚輝, 池見, 大樹, 池田, 亮介, 小川, 勇, 出原, 敏孝, 久保, 伸, 下妻, 隆, 田中, 謙治, 西浦, 正樹, MANUILOV, V.N., OGA, S., SAITO, T., YAMADA, N., IKEMI, D., IKEDA, R., OGAWA, I., IDEHARA, T., KUBO, S., SIMOZUMA, T., TANAKA, K., NISHIURA, M. メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/3648

協同トムソン散乱計測のための
400 GHz-100 kW パルスジャイロトロンの開発

**Development of a 400 GHz-100 kW Pulse Gyrotron
for Application to Collective Thomson Scattering**

小笠原慎弥¹, 斉藤輝雄¹, 立松芳典¹, 山田尚輝¹, 池見大樹¹,
池田亮介¹, 小川勇¹, 出原敏孝¹,
久保伸², 下妻隆², 田中謙治², 西浦正樹², V. N. Manuilov³

*S. Ogasawara¹, T. Saito¹, Y. Tatematsu¹, N. Yamada¹, D. Ikemi¹,
R. Ikeda¹, I. Ogawa¹, T. Idehara¹,
S. Kubo², T. Shimosuma², K. Tanaka², M. Nishiura², V. N. Manuilov³*

¹福井大学遠赤外領域開発研究センター

¹*FIR FU, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, 910-8507, Japan*

²核融合科学研究所

²*National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, 509-5292, Japan*

³ニジニノブゴロド州立大学

³*Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 603600, Russia*

Abstract

FIR FU center has been developing high frequency gyrotrons for many applications. We are developing a high frequency and high power pulse gyrotron as a power source of Collective Thomson Scattering (CTS) diagnostics on the Large Helical Device (LHD) in National Institute for Fusion Science. For this purpose, a gyrotron in a frequency range of 350-400 GHz with a power level of 100 kW is desired.

We have realized oscillation around 50 kW in this frequency range at second harmonic with a gyrotron of demountable type. Following this gyrotron, a new sealed-off type gyrotron was manufactured, and we confirmed second harmonic oscillation at frequency of 388 GHz with power of 62 kW. In addition, we have studied gyrotron physics on high power second harmonic oscillation.

1. パルスジャイロトロンの開発背景とこれまでの開発状況

福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、核融合プラズマにおける共同トムソン散乱 (CTS) 計測用のプローブビーム源への応用を目指し、高周波・高出力パルスジャイロトロンを開発を行っている。対象実機として、核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置 (LHD) を想定し実用化を目指している。現在、LHD ではプラズマ加熱用 77 GHz ジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱 (CTS) のイオン温度計測が行われている (詳細については参考文献[1][2][3]を参照して頂きたい)。

しかし、加熱用ジャイロトロンを CTS のプローブビームとして用いると、プラズマ中の屈折・吸収や電子サイクロトロン放射 (ECE) に散乱信号が埋もれてしまうなどの問題がある。これらの問題を回避するためには、プローブビームの周波数を十分に高くする必要がある。具体的には ECE の強度が十分に小さくなる 400 GHz 帯が候補として挙げられる。また CTS は入射波に対する散乱波の強度が非常に小さいため、有意の散乱強度を得るためには 100 kW 程度の高出力が必要である。そこで当センターでは、周波数 350~400 GHz, 出力 100 kW を目標にジャイロトロン開発を行っている。

図 1 に開発目標と、現在までの二次高調波動作ジャイロトロンを開発状況を示す。当センターでは、これまでに二次高調波動作を用いて、周波数 350 GHz, 出力 52 kW (TE_{6,5}モード) 及び周波数 390 GHz, 出力 37 kW (TE_{8,5}モード) の発振を達成した[4]。さらに真空度と組み立て精度の向上を目指し、従来の組み立て管ではなく新しく封じ切りのジャイロトロン管を製作し、さらなる高出力発振を目指した。

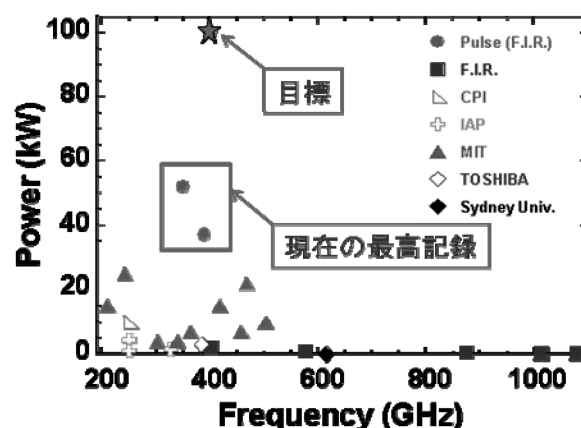


図 1 世界の二次高調波動作ジャイロトロンを開発状況

2. 封じ切りジャイロトロン管の製作

これまでのパルスジャイロトロン管は図 2 (a)のような組み立て管であり、電子銃部、共振器部、コレクタ部はボルトを用いてフランジ結合させていた。またジャイロトロン管内の排気は外付けのターボ分子ポンプで行っていた。しかし、正確な組み立て精度が要求されるジャイロトロンにおいて、フランジ結合でそれを満たすのは容易ではない。またジャイロトロンを運搬を想定したとき、組み立て方式ではジャイロトロン管を一度解体しなければならないが、再組み立てを行ったとき真空度と組み立て精度を再現できなくなる可能性が十分にある。そこで図 2 (b) と図 3 に示すような封じ切り方式のジャイロトロン管を新しく製作した。ジャイロトロン管を封じ切りにすることにより、真空度と組み立て精度の向上が期待され、

解体せずに運搬することが可能である。ジャイロトロン管内の排気は小型のイオンポンプで行う。一方、封じ切りの効果を検証するために、電子銃は組み立て管で使われたものと同じ電子軌道設計[5]である。しかし、電子銃の絶縁セラミック部は大気側沿面放電を抑制するために外形を波状にし、高電圧がかかるアノード～アース電位間をさらに長くした。これによりビーム電流増大時の高電圧運転に耐えられるように改良され、最大カソード電圧 65 kVでの運転が可能となった。

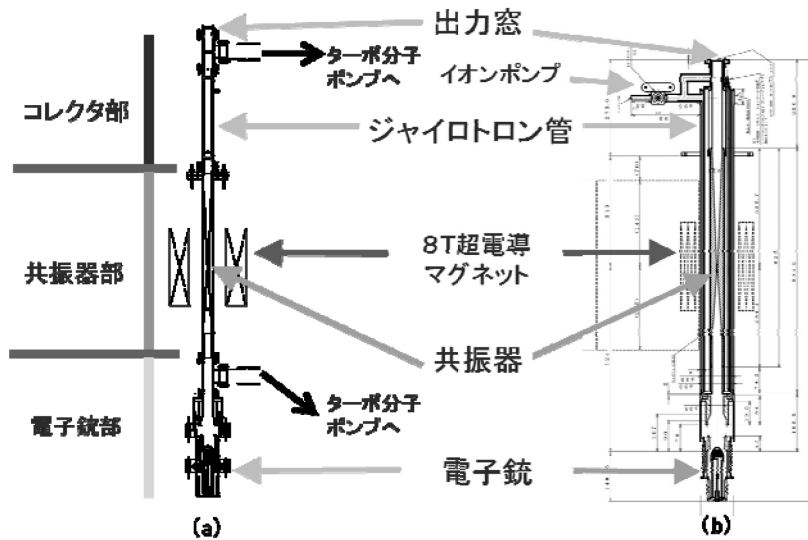


図2 (a)組み立て方式のジャイロトロン管と(b)封じ切り方式のジャイロトロン管

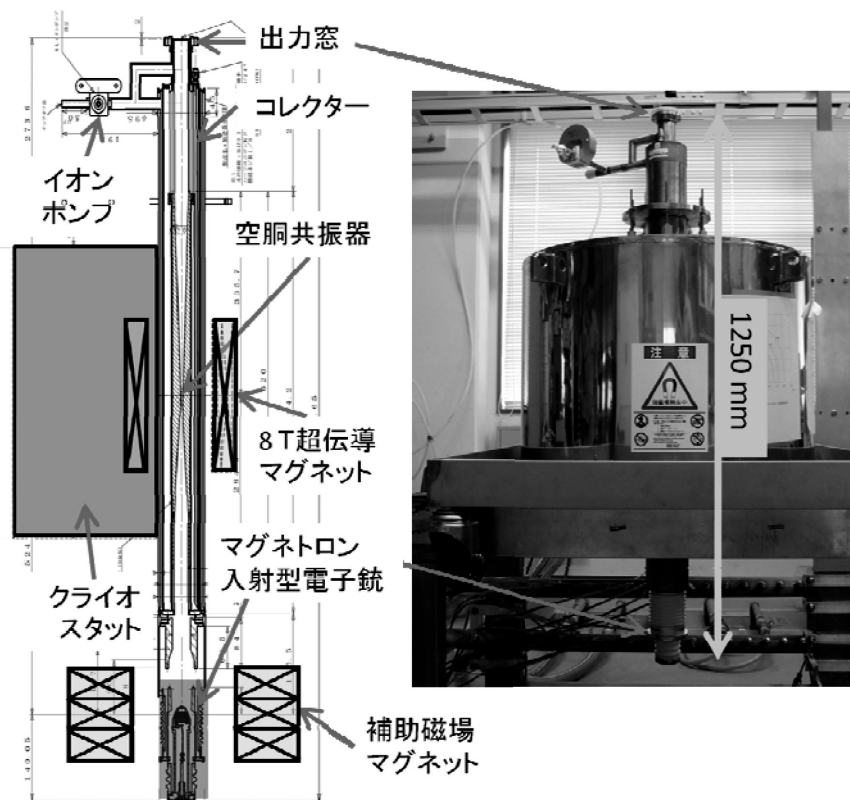


図3 封じ切りパルスジャイロトロン概略図と写真

3. 空洞共振器設計

共振器は封じ切りの効果を検証するために組み立て管と同じ設計値のものを使用した。図4に実際に製作した空洞導体管と空洞共振器の製作図面を示す。材質は無酸素銅で、製作の都合上、各パーツに分割して作成したものを、繋ぎ合わせている。共振器半径は 2.99 mm（製作誤差約±10 μm）、共振器長は 12 mm、入力側テーパは 1.5°、出力側は 3°である。以下、設計思想を述べる。400 GHz・100 kW 級のジャイロトロンを開発するにあたり、基本波で 400 GHz 帯の発振を実現しようとした時、15 T 以上の磁場強度が必要である。しかし封じ切りパルスジャイロトロン製作を開始した 2009 年時点において、我々が 15 T 程度の強磁場を発生可能なマグネットを入手できる見込みはなかった。そこで、手元にある 8 T 超電導マグネットを利用し、二次高調波で 400 GHz 帯の発振を目指した。前段階のパルスジャイロトロン実験では基本波とのモード競合を回避し、約 400 GHz の二次高調波発振を実際に確認している。そこで、二次高調波に最適化した共振器を設計し、高出力発振を目指した。共振器を製作するにあたっての前提条件は、

- ① 発振モードの共振周波数が 350 GHz から 400 GHz までの間にある。
- ② ベッセル関数の固有値 χ'_{mn} が他の固有値から孤立し、他の発振モードとの競合を回避できるモードを選択する。
- ③ 電子銃の制約により、電子ビーム半径が 1.9 mm 近傍で旋回電子が共振器内の電場と強い結合を得ることが可能なモードを選択する。

である。これらを総合的に考慮し共振器形状を決定した。前提条件②③を満たす発振モードが決定できれば、前提条件①により共振周波数を求める近似式

$$f_{c,mnl} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\chi'_{m,n}}{R_c}\right)^2 + \left(\frac{\pi l}{L}\right)^2} \quad (1)$$

において右辺第二項を無視すると、

$$R_c = \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{\chi'_{mn}}{f_{c,mn}} \quad (2)$$

となり、共振器半径 R_c がほぼ決定する。図5に数直線上に χ'_{mn} を示す。青が二次高調波、赤が基本波である。ここで、我々は基本波の χ'_{mn} から孤立した $TE_{6,5}$ モードと $TE_{8,5}$ モード及びそれらの周辺のモードに着目した。これらのモードの共振周波数が 350 GHz から 400 GHz になるようにすれば、(2)式より共振器半径は約 3 mm になることがわかる。さらに、前提条件③を考慮し最終的に共振器半径を 2.99 mm に決定した。図6に共振器半径 2.99 mm における電子ビーム半径に対する $TE_{6,5}$ モードと $TE_{8,5}$ モードの結合係数を示す。図6からわかるように $TE_{6,5}$ の counter-rotating mode と $TE_{8,5}$ counter-rotating mode は電子ビーム半径 1.9 mm 近傍で

結合係数が第二ピークであることがわかる。また、他の発振が予想されるモードの結合係数も、電子ビーム半径 1.9 mm 近傍において $TE_{6,5}$ や $TE_{8,5}$ モードと同程度か、それ以上である。また共振器長は $TE_{6,5}$ モードに対して垂直発振効率が最も高くなるように値を決定した。図 7 に共振器半径 2.99 mm, カソード電圧 60 kV, ビーム電流 7 A, ピッチファクター 1.3 における $TE_{6,5}$ モードの共振器長に対する垂直発振効率 η_{\perp} を示す。計算の結果、共振器長は最も高い効率が得られる 12 mm とした。

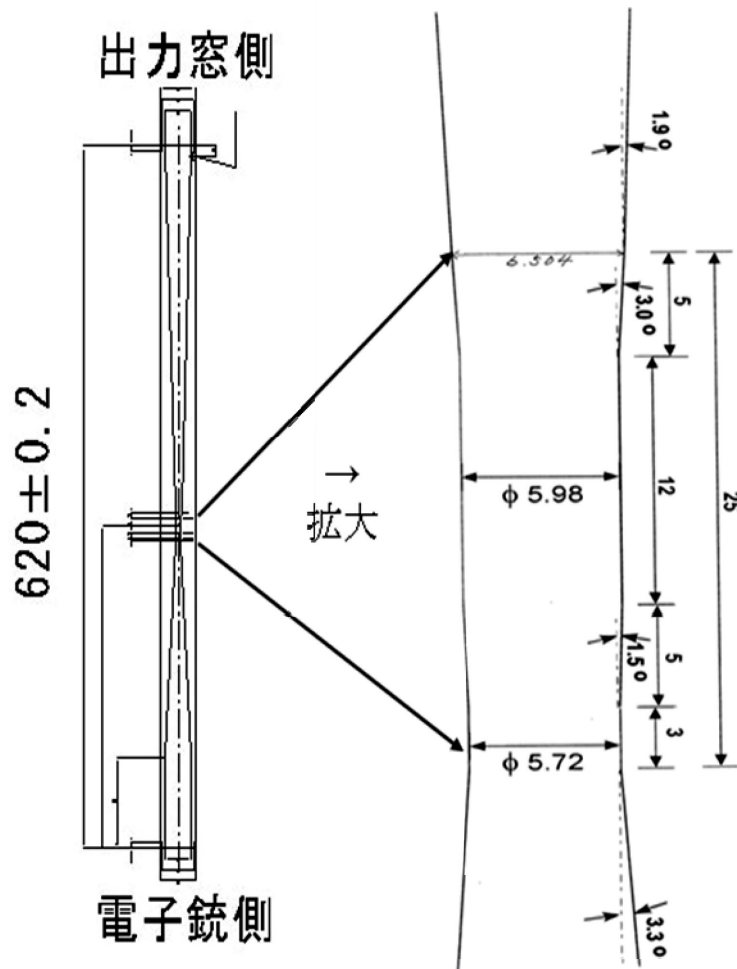


図 4 空洞導体管(左)と空洞共振器(右)の製作図面

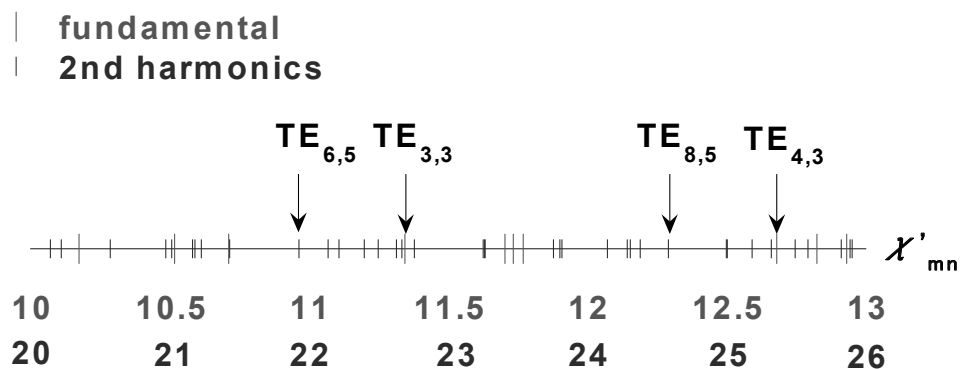


図 5 ベッセル関数の固有値 χ'_{mn}

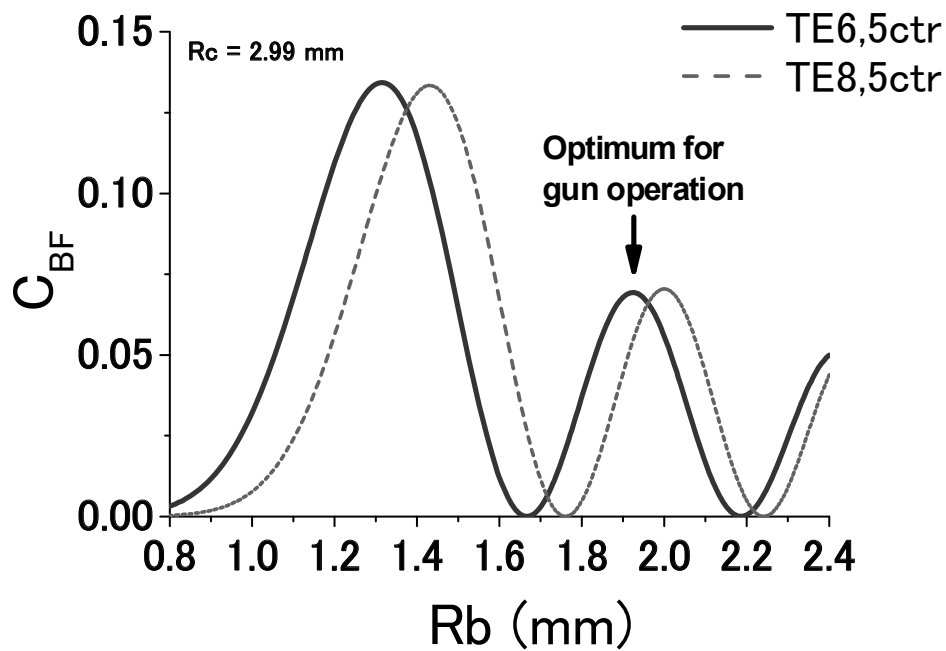


図6 電子ビーム半径に対する結合係数

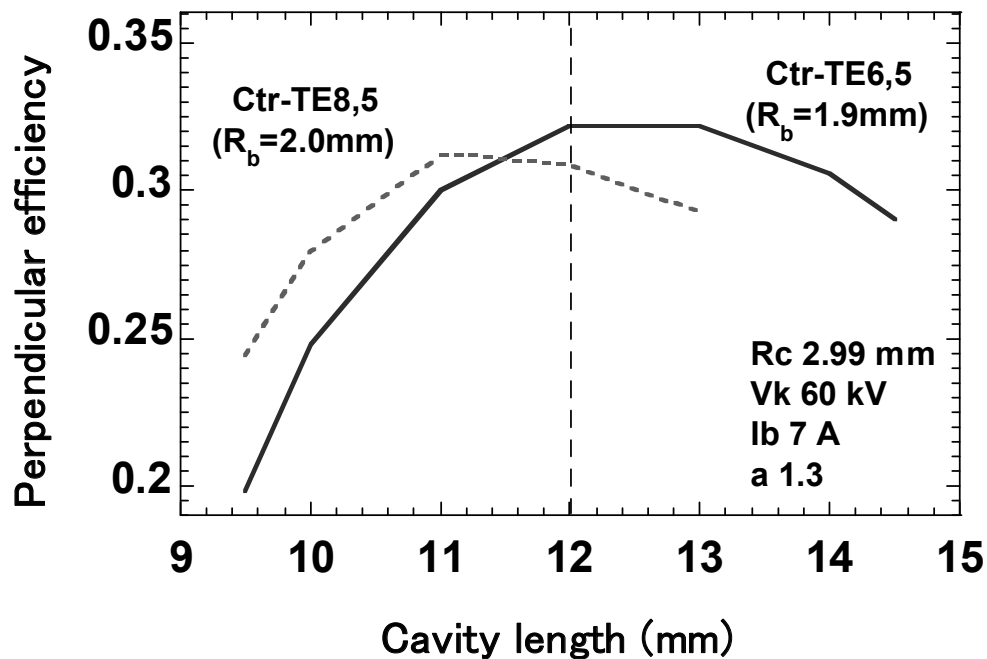


図7 共振器長に対する垂直発振効率

次に主磁場に対する発振開始電流を計算し、発振が予想される二次高調波モードの発振領域を調べた。図8と図9にキャビティ半径 2.99 mm, 共振器長 12 mm, ビーム半径 1.9 mm, カソード電圧 40 kVにおける $TE_{6,5}$ 領域と $TE_{8,5}$ 領域での主磁場に対する発振開始電流の計算結果を示す。図中の実線は co-rotating mode, 破線が counter-rotating mode である。図8では二次高調波 $TE_{6,5}$ モード, $TE_{15,2}$ モード及び基本波 $TE_{3,3}$ モードの発振領域はほぼ重なることなく, 分離していることがわかる。また, 図9では $TE_{3,7}$ モード, $TE_{1,8}$ モード, $TE_{17,2}$ モードと $TE_{8,5}$ モードの発振領域は互いに接近しているが, 基本波 $TE_{4,3}$ モードからは離れており, 基本波とのモード競合を回避できることが期待できる。以上の計算結果から, 共振器半径を 2.99 mm, 共振器長が 12 mm と決定された。

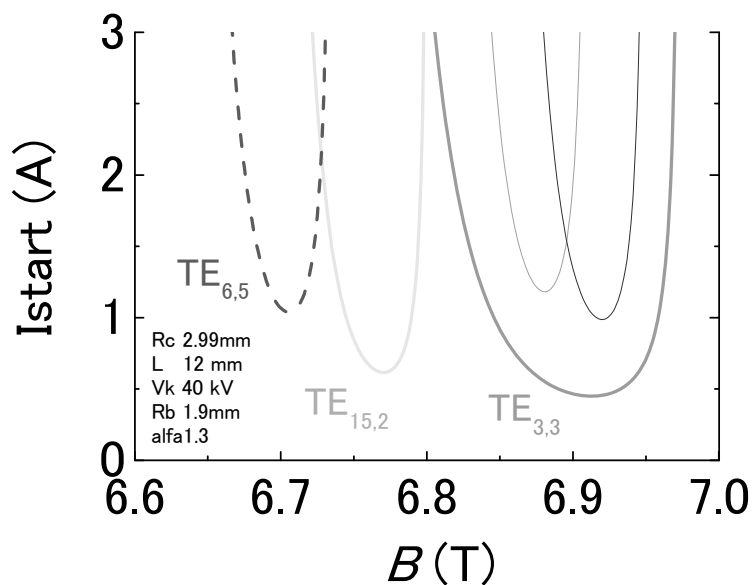


図8 $TE_{6,5}$ モードとその周辺領域での主磁場に対する発振開始電流の計算

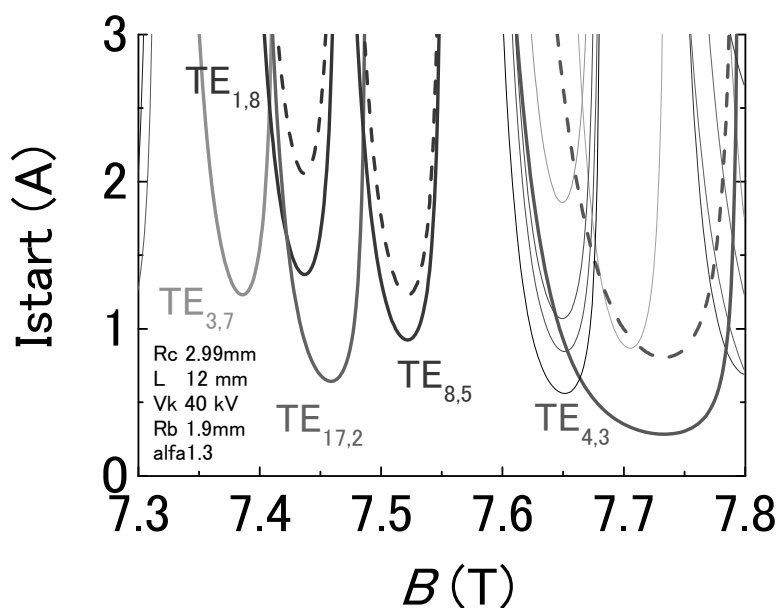


図9 $TE_{8,5}$ モードとその周辺領域での主磁場に対する発振開始電流の計算

表 1 に発振が予想されるモードの固有値と共振周波数の表を示す。ここで補足をする、TE_{3,7}モードと TE_{1,8}モードの間には TE_{22,1}モードがあるが、TE_{22,1}モードは共振器の管壁付近で電場のモードが立つため、電子ビーム半径 1.9 mm 近傍における結合係数は 0 である。発振開始電流の計算でも TE_{22,1}モードが発振するという結果は得られていない。よって、TE_{22,1}発振する可能性は低く表 1 には加えていない。

組み立て管ジャイロトロンの実験では高電圧・高ビーム電流運転時に TE_{6,5}モード及び、TE_{8,5}モードは基本波と競合してしまうという結果が得られた。そこで封じ切りパルスジャイロトロンでは、主磁場、補助磁場、アノード電圧を微調整することにより、TE_{3,7}モード、TE_{1,8}モード、TE_{17,2}モードに対して運転パラメータを微調整し高出力発振を目指した。

表 1 発振が予想されるモードの固有値と共振周波数

発振モード	固有値 χ'_{mn}	共振器半径 (mm)	共振器長 (mm)	共振周波数 (GHz)
TE _{3,7}	24.1449	2.99	12	385.50
TE _{1,8}	24.3113			388.15
TE _{17,2}	24.3819			389.28
TE _{8,5}	24.5872			392.55
TE _{4,3}	12.6819			202.76
TE _{6,5}	21.9317			350.20
TE _{3,3}	11.3459			181.48
TE _{15,2}	22.1422			353.56

4. 封じ切りパルスジャイロトロンの実験結果 1～高出力発振の探索

封じ切りパルスジャイロトロンは、カソード電圧 65 kV、電子ビーム電流 9 A 以上で運転することができるように、装置を設計した。実際の実験では装置の安全と発振の様子を確認するために、カソード電圧 40 kV、電子ビーム電流 2 A 程度から実験を開始し、徐々に投入電力を増加させた。

図 10 に、カソード電圧 40 kV における発振開始電流の理論計算値と実験結果を比較したものを示す。図 10 (a)は、カソード電圧 40 kV、共振器半径 2.99 mm、共振器長 12 mm、電子ビーム半径 1.90 mm、ピッチファクター 1.3 とした時の基本波と二次高調波の主磁場に対する発振開始電流の理論計算である。図 10 (b)はカソード電圧 40 kV、電子ビーム電流 2 A、補助磁場電流 160 A における発振強度の主磁場依存性である。図 10 (b)の信号の検出にはパイロエレクトリックディテクターを用いた。また、実線の波形はパイロエレクトリックディテクターに直接ジャイロトン出力を入射した状態、破線の波形はパイロエレクトリックディテクターの前に HPF を挿入した状態で計測したものである。図 10 (b) から、HPF を挿入したことにより基

本波の発振信号はカットされていることがわかる。また、6.7 T付近に1つ、7.4 Tから7.6 Tにかけて3つの二次高調波の信号が検出されていることがわかる。さらに、二次高調波の発振磁場領域信号は基本波の領域からも分離されているので二次高調波単独発振が期待できる。次に図10(a)と(b)を比較すると、図10(b)の6.7 T付近にある発振信号の強いピークは、図10(a)の二次高調波 $TE_{6,5}$ モードの発振領域とよく一致している。また図10(b)の7.4 Tから7.6 Tの間にも3箇所のピークが見られる。図10(a)と比較すると、3箇所のピークの内、左のピークは $TE_{3,7}$ に、中央のピークは $TE_{1,8}$ または $TE_{17,2}$ に、右のピークは $TE_{8,5}$ モードの発振領域にそれぞれ一致している。さらに二次高調波と思われるピーク磁場においてファブリ・ペロー (FP) 干渉計による周波数計測を行ったところ、6.7 T付近では350 GHz($TE_{6,5}$ モード)を、7.4 Tから7.6 Tの磁場領域においては低磁場側から385 GHz($TE_{3,7}$ モード), 388 GHz($TE_{1,8}$ または $TE_{17,2}$ モード), 392 GHz($TE_{8,5}$ モード), をそれぞれ確認した。以上のことから封じ切りジャイロトロンの二次高調波の発振領域は理論計算とよく一致していることが分かる。

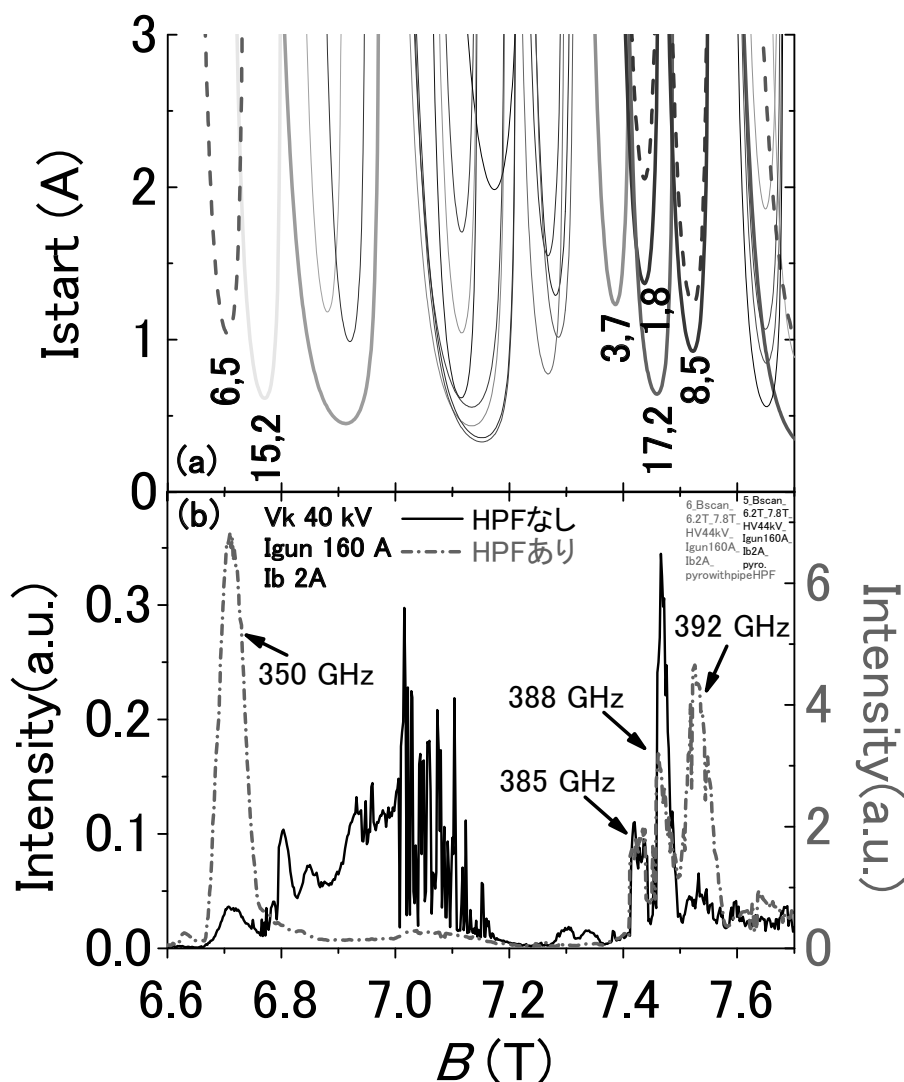


図10 カソード電圧 40 kV における発振開始電流の理論計算値(a)と実験結果(b)

次にカソード電圧及びビーム電流を増大させて高出力の二次高調波発振を試みた。投入電力を増大させると組み立て管と同じく $TE_{6,5}$ モード及び、 $TE_{8,5}$ モードは基本波と競合してしまうという結果が得られた。一方で $TE_{3,7}$, $TE_{1,8}$ または $TE_{17,2}$ モードは高カソード電圧・高ビーム電流運転時においても、基本波と競合することなく発振可能であることがわかった。図 11 に $TE_{1,8}$ または $TE_{17,2}$ モードの二次高調波単独発振を確認したカソード電圧と電子ビーム電流の組み合わせをプロットしたものを示す。ただし、図中のプロットされた箇所のみで単独発振するわけではなく、他の領域でも単独発振をしている可能性は十分にある。図 11 に示すようにパルスジャイロトロンが低カソード電圧・低ビーム電流はもとより、高カソード電圧・高ビーム電流においても二次高調波単独発振が可能であることがわかる。次に、二次高調波単独発振を確認したパラメータの中で高出力の発振が期待されるカソード電圧 60 kV 及び 65 kV において水負荷装置を用いた出力計測を行った。

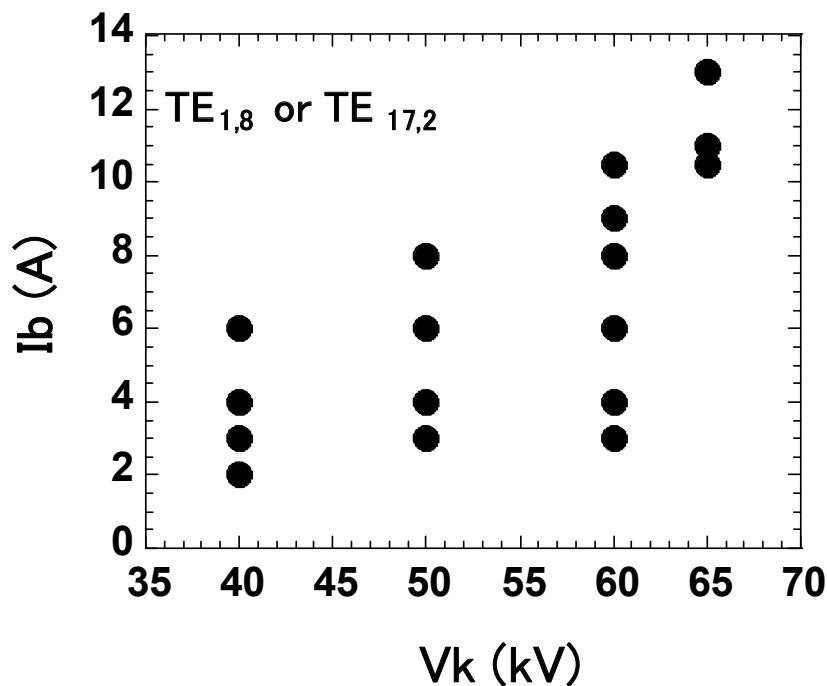


図 11 $TE_{1,8}$ または $TE_{17,2}$ モードの二次高調波単独発振を確認したカソード電圧と電子ビーム電流の組み合わせをプロットしたものの。

図 12 に発振出力の最高値と発振効率の電子ビーム電流依存性を示す。図 12 は $TE_{1,8}$ または $TE_{17,2}$ モードの単独発振が得られた運転パラメータで出力計測を行い、その中で最も高出力が得られた値を電子ビーム電流ごとにプロットしたものである。丸記号のプロットはカソード電圧 60 kV、また四角記号のプロットはカソード電圧 65 kV での計測結果を示す。また得られた出力をカソード電圧と電子ビーム電流の積で割ったものを発振効率とし、発振出力同様にビーム電流ごとに白抜きの記号でプロットしている。以下に式を示す。

$$\text{発振効率} = \frac{\text{Power}}{V_k \cdot I_b} \quad (3)$$

図 12 中のカソード電圧 60 kV では、電子ビーム電流が増加につれて発振出力は増加していることがわかる。しかし発振効率は電子ビーム電流が増加するにつれて低下していることがわかる。さらに電子ビーム電流 9 A で出力は飽和し、10.5 A で出力は低下している。

これは電子ビーム電流が増大したことにより電子ビームの品質が劣化している可能性が考えられる。そこで、カソード電圧を 65 kV まで増大させて出力計測を行ったところ、ビーム電流 11 A において 62 kW を達成し、これまでの出力記録を更新した。カソード電圧を増大させたことにより、電子ビームの質の劣化が抑えられたものと考えられる。しかし、電子ビーム電流が 13 A になると発振出力は再び下降するという結果が得られた。なお TE_{3,7} モードについても出力計測を行ったが、出力は数 kW 程度であった。

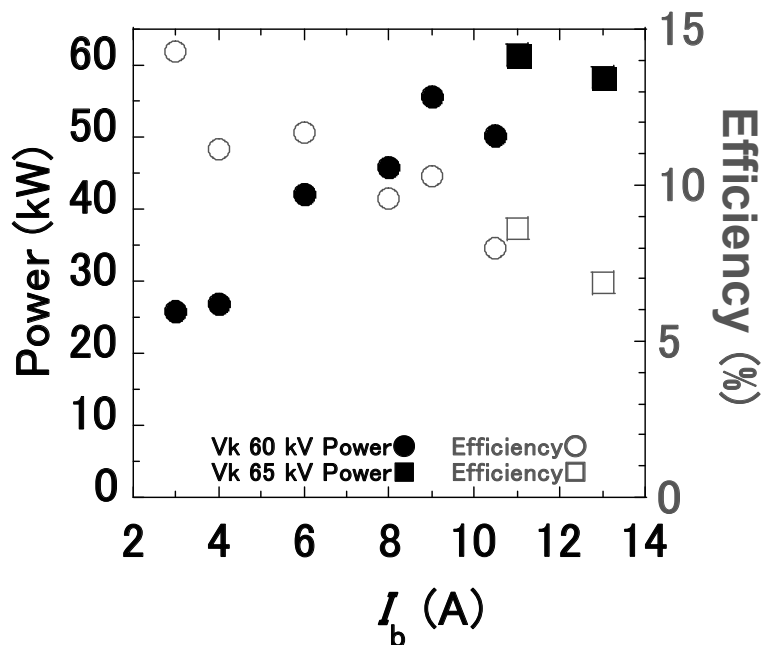


図 12 発振出力と発振効率の電子ビーム電流依存性

5. 封じ切りパルスジャイロトロンの実験結果 2～高精度周波数計測

封じきりパルスジャイロトロン周波数計測及び出力計測を行った結果、周波数約 388 GHz で最高出力 62 kW を確認した。FP 周波数計測の結果から、TE_{1,8} または TE_{17,2} モードの発振が想定されるが、FP 周波数計測の精度ではどちらのモードが発振しているかの判別は困難であった。そこで FP 周波数計測より高精度の計測が可能なヘテロダイン方式による周波数計測によって TE_{1,8} と TE_{17,2} モードの判別を試みた。ヘテロダイン方式による周波数計測の精度は数 MHz 程度であり、TE_{1,8} と TE_{17,2} モードの共振周波数差 1 GHz の違いを判別することが十分に可能である。図 13(a) にカソード電圧 50 kV、ビーム半径 1.95 mm における主磁場に対する発振開始電

流の計算結果と、(b)カソード電圧 50 kV, ビーム電流 4 A, 補助磁場電流 190 A における発振強度の主磁場依存性を示す。(b)は HPF を使用し、基本波の信号をカットしている。また補助磁場電流 190 A はビーム半径の設定値に換算して約 1.95 mm である。図 13(a)の主磁場に対する発振開始電流の計算では 7.5 T から 7.7 T にかけて、低磁場側から順に $TE_{3,7}$, $TE_{1,8}$, $TE_{17,2}$ モード及び $TE_{8,5}$ の 4 つのモードの発振が予想される。図 13(b)と比較すると、7.5 T から 7.7 T にかけて 4 つのピークがあることがわかる。そこで図 13(b)でピークを示した磁場 7.515 T, 7.551 T, 7.607 T, 7.627 T においてヘテロダイン方式により周波数計測を行い、発振モードの同定を試みた。その結果を表 2 に示す。ヘテロダイン方式により計測された周波数は、共振器の設計値から計算される各モードの共振周波数より約 0.4 GHz 低い値を得た。計測で得られた周波数を(1)式に代入し、共振器半径を計算すると 2.99 mm より約 $2.5 \mu\text{m}$ 大きい値となる。よって共振器の製作誤差は十分に小さい値であることがわかった。以上の述べた結果から、 $TE_{3,7}$ モード $TE_{8,5}$ モードと共に、 $TE_{1,8}$ モードと $TE_{17,2}$ モードの判別に成功した。

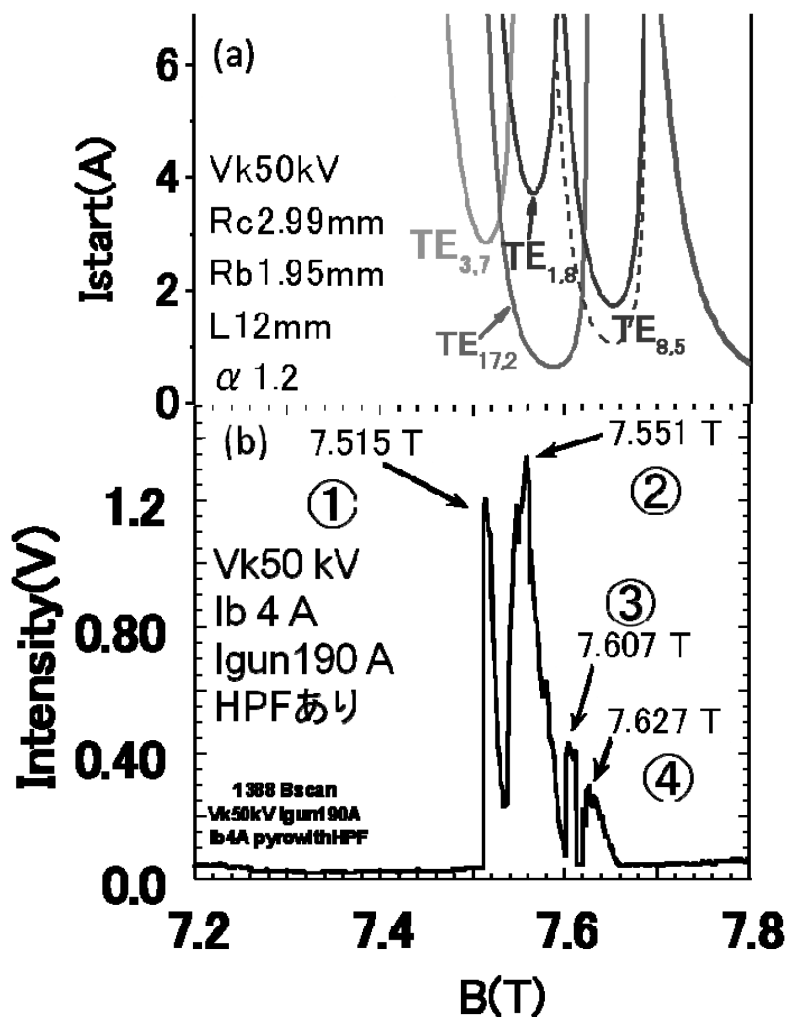


図 13 (a) カソード電圧 50kV, ビーム半径 1.95 mm における主磁場に対する発振開始電流の計算結果。(b)カソード電圧 50 kV, ビーム電流 4 A, 補助磁場電流 190 A における発振強度の主磁場依存性。(b)は HPF を使用し、基本波の信号をカットしている。

表 2 各磁場での周波数計測の結果

B (T)	F_{mes} (GHz)	F_{cal} (GHz)	Mode	ΔF (GHz)
7.515	385.11	385.50	TE _{3,7}	-0.39
7.551	387.77	388.15	TE _{1,8}	-0.38
7.607	388.89	389.29	TE _{17,2}	-0.40
7.627	392.15	392.55	TE _{8,5}	-0.40

次に TE_{1,8} と TE_{17,2} モードの主磁場に対する IF 信号強度を調べた。高出力発振を確認した磁場領域で TE_{1,8} と TE_{17,2} モードのそれぞれの IF 信号の強度を計測し比較を行った。図 14 にカソード電圧 60 kV, ビーム電流 5 A, 補助磁場電流 130 A での TE_{1,8} モードと TE_{17,2} モードの IF 信号強度の主磁場依存性を示す。図 14 は TE_{1,8} モードと TE_{17,2} モードについて、主磁場を 7.5 T から 7.7 T にかけて 0.01 T ずつ変化させながらオシロスコープに表示される IF 信号強度を 5 回ずつ計測し、それらの値の平均をプロットしたものである。図 14 からわかるように TE_{1,8} モードは 7.5 T から 7.7 T の範囲で IF 信号を確認し、特に 7.55 T から 7.65 T の間で約 -55 dBm の強い IF 信号を確認した。一方、TE_{17,2} モードの信号強度は TE_{1,8} モードに比べて大変弱く、7.59 T より低い磁場では IF 信号のスペクトルはノイズの中に埋まってしまい確認できなかった。また IF 信号を確認することができた 7.60 T から 7.70 T でも IF 信号強度は約 -70 dBm 程度であった。対数表示の TE_{1,8} と TE_{17,2} モードの IF 信号強度の差をとると約 15 dBm, 電力比に換算して約 40 倍であり、TE_{1,8} モードは TE_{17,2} モードに比べ非常に強い発振であると考えられる。ただし、IF 信号の強度は両モードの放射分布やミキサの感度特性にも依存するため、この計測結果のみで両者の出力の比を断定することはできない。

ヘテロダイン方式による周波数計測を行い、FP 周波数計測では困難だった共振周波数差が 1 GHz 程度の近接したモードの同定に成功した。また、TE_{1,8} と TE_{17,2} の IF 信号の強度を比較し、TE_{1,8} モードの強い発振を確認した。先に述べたモードの放射分布やミキサの感度特性の問題もあるが、これらの問題を解決すれば、ヘテロダイン方式により周波数と出力を同時かつリアルタイムで計測できる可能性もゼロではない。また、今回の計測では高圧電源の制限により 388 GHz, 62 kW の最高記録を達成したパラメータよりも低いカソード電圧, 電子ビーム電流で計測を行ったが、今後は最高記録を達成したパラメータでヘテロダイン方式による周波数計測が行われることが望まれる。

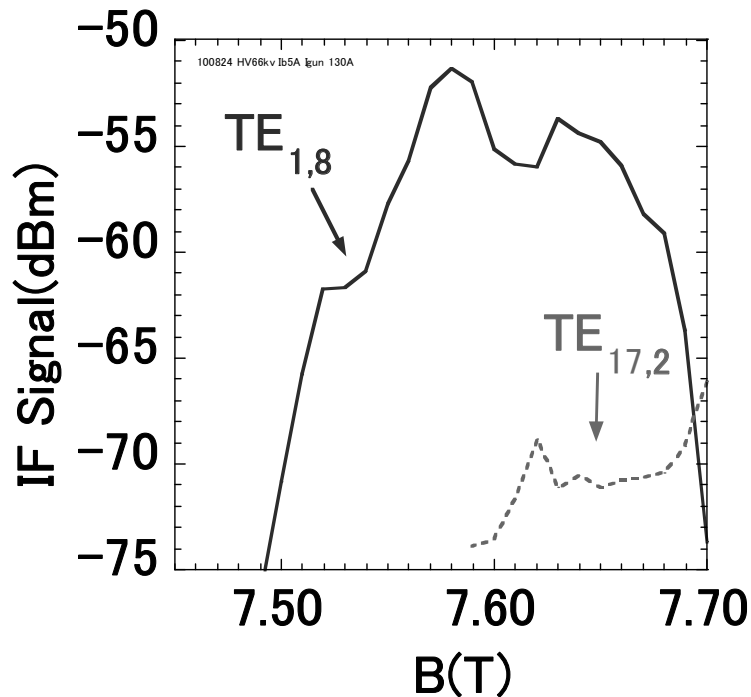


図 14 カソード電圧 60 kV, ビーム電流 5 A, 補助磁場電流 130 A における $TE_{1,8}$ モードと $TE_{17,2}$ モードの主磁場に対する IF 信号強度の主磁場依存性。

6. まとめ

さらなる高出力発振を目指して封じ切りのジャイロトロン管を製作し、発振実験を行った。その結果、これまでの最高記録を更新する発振周波数 388 GHz, 発振出力 62 kW を達成した。またファブリ・ペロー干渉計では判別困難だった $TE_{1,8}$ モードと $TE_{17,2}$ モードを、ヘテロダイン方式による周波数計測により判別することに成功した。

今後は、カソード半径の変更、動作モードの再検討、アノード電圧の調整、真空窓の厚みの最適化などを行い、さらなる高出力発振を目指す。また、二次高調波ジャイロトロンと共に 12 T 超電導マグネットを用いた 300 GHz 基本波ジャイロトロンを製作し、実験を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Nishiura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E731 (2008)
- [2] S. Kubo *et al.*, Plasma Fusion Res. Vol. **84**, No.12 (2008)
- [3] S. Kubo *et al.*, Rev. Sci. Instrum **81**, 10D535 (2010)
- [4] T. Notake *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 225002 (2009).
- [5] V. N. Manuilov *et al.*, Int. J. Infrared and Milli. Waves **27**, 1103 (2008).