

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560351

研究課題名（和文） 赤外線カメラを用いたジャイロトロン性能評価法の確立

研究課題名（英文） Establishment of a performance evaluation method for gyrotrons by using an IR camera

研究代表者

立松 芳典 (TATEMATSU YOSHINORI)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・准教授

研究者番号：50261756

研究成果の概要（和文）：

ジャイロトロンからの放射を吸収体に当て、その温度上昇を赤外線カメラで撮影した赤外線画像を用いて、モード変換器内蔵ジャイロトロンにおいて、直接には測定できない共振器での電子入射半径を求める方法、及び共振器での発振電磁波モードの同定方法を提案した。この方法を、Gyrotron FU CW I 及び FU CW GII に対して適用し、この方法が有効であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

We proposed methods to measure electron beam radius at the cavity resonator entrance and to identify electromagnetic wave modes oscillated in the resonator for gyrotrons equipped with a mode convertor, by using infrared ray images. We have applied the methods to Gyrotrons FU CW I and FU CW GII, and demonstrated that the methods were effective.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波、ジャイロトロン、赤外線画像、電磁界モード、モード変換

1. 研究開始当初の背景

波長がミリ波・サブミリ波領域にあるテラヘルツ周波数帯は、工業・医療・バイオ・情報通信など多くの分野における利用が可能であり、今後、実用化が期待されている。福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、このテラヘルツ周波数帯の高電力発振管であるジャイロトロンを開発している。これまでは、ジャイロトロン開発そのものが目的で、

ジャイロトロンとして世界最高周波数の達成をめざし、世界ではじめて1THzを超える発振を達成した(T. Idehara et al., Int. J. Infrared and Millimeter Waves, Vol. 27, No. 3, 319-331 (2006))。最近は、物性実験・シタリング・プラズマ実験等の具体的な応用をめざしたジャイロトロンを開発しており、それぞれの応用に要求される仕様（周波数、パワー）を満たすようなジャイロトロンを開

発を行うようになってきている。そのためには、単に高周波数だけでなく、(1) 発振モードの最適化、(2) 発振の高効率化、(3) 発振したビームの利用しやすいビーム形状への変換が必要である。さらに、(4) 製作されたジャイロトロンが当初の性能に達しない場合、その原因がどこにあるかを調べるツールをもっておく必要がある。

発振モードの最適化を行う一つの方法は、電子エネルギーを電磁波に変換する空洞共振器内で、目的の共振電磁界モード以外は発振しにくいモードを主モードとして選択することである。また高効率化のためには、電子とその空洞電磁界モードの結合係数が大きくなるようにジャイロトロンを設計する。この結合係数を決める物理パラメータの一つは、空洞共振器入口での電子ビームの位置である。さらに、その位置は、電磁波に変換される電子速度のうちの磁場に対して垂直方向成分の割合にも関係する。このように、電子入射位置は発振パワーに大きな影響を及ぼし、ジャイロトロンの性能を決める重要なパラメータであり、この最適化が性能向上に不可欠である。

しかし、実際の電子入射位置は直接測定できないため、これまで、理論予想のみで評価を行ってきた。今回、発振モードの回転方向の反転と組み合わせて、赤外線カメラによる放射ビームの測定から、電子入射位置を決める新たなアイデアを試す。赤外線カメラはこれまでに行った実験でも使用し、発振モードが変わると、真空窓からのビームの放射方向が変わり、ターゲット上の温度上昇位置が変化することなどの新しい情報を得てきた。図1は2つの異なるモードが同時発振しているときの赤外線画像である。

福井大学ではこれまで、ジャイロトロンの発振そのものに研究の中心があったため、ビーム形状は変換せずに発振電磁波を導波管で真空窓まで伝送して、そのまま出射する上出しのジャイロトロンを主に開発してきた。今後、利用しやすいビーム形状の変換のためにも、出力電磁波のモード解析を行う必要がある。

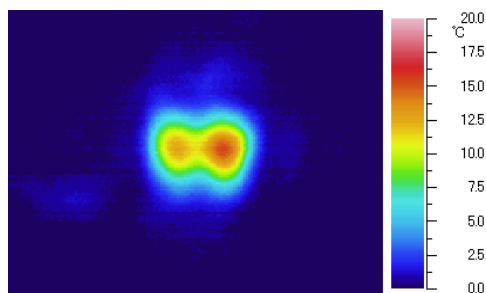


図1 2ビーム同時発振時の赤外線画像

2. 研究の目的

赤外線カメラを用いることにより、ミリ波・サブミリ波帯の高電力発振管であるジャイロトロンの性能評価を行うためのシステムを構築する。赤外線カメラの利用により、開発したジャイロトロンの

(1) 空洞共振器への電子入射位置

(2) 発振モード

(3) 出力ビームの形状（電界の空間分布）についての知見を得、これらから開発したジャイロトロンの性能を評価する。さらに、問題点があればその原因を解明し、ジャイロトロンの改良につなげる。特に(1)の電子入射位置は、ジャイロトロンの性能を左右する重要な要因であるが、直接測定は不可能である。今回の赤外線カメラ測定による電子入射位置の決定は、これまででない新しいアイデアによるものである。

3. 研究の方法

(1) 出射ビームに含まれる電磁界モード解析ルーチンの開発

ジャイロトロンの実用化のためには、共振器で発振した複雑な構造の電磁波を、伝送損が小さく、照射にも便利なビーム形状に変換する必要がある。横出しジャイロトロンは、これをジャイロトロン内で行うのに対して、上出しジャイロトロンでは、ジャイロトロン外においてビーム形状を変換する必要がある。そのためには、ジャイロトロン窓から出射されるビームの電界強度の空間分布（モードの割合）を知る必要がある。赤外線カメラの放射パターンデータを入力して、出射ビームにそれぞれの電磁界モードがどのような割合で含まれているかを解析するプログラムを開発する。

(2) 赤外線カメラによる放射ビーム測定

赤外線カメラを用いて、福井大学で開発中のいくつかのジャイロトロンの放射パターンを測定する。測定対象のジャイロトロンはFU CW I, FU CW VIIA 及び 2010 年度に福井大学で開発予定のモード変換器付ジャイロトロンとする。

(3) ジャイロトロン共振器での電子入射位置の決定

横出しジャイロトロンでは、共振器で発振した電磁波をジャイロトロンの内部でガウスビームにモード変換して出力するが、方位角モード数が小さい発振を除いては、モード変換器の性格上、両方向の回転モードを同時に真空窓を通して出力できるようなにはならず、どちらか一方の回転方向のモードしか出射できない。もしも、発振電磁波モードの回転方向が反対になると、モード変換器

を通してそのモードは真空窓に伝送されなくなるので、出力がなくなるように見える。この性質を利用して、通常測定することができない共振器入口での電子入射位置を知ることができる。ガンコイル電流の値を変化させると、カソード-共振器間の磁場強度比が変化するので、電子の入射位置が変化する。モードによっては、電子入射位置によって発振する回転方向が変わる。これによりある電子入射位置 R を境に発振モードの回転方向が反転すると期待され、事実、モード競合計算コードにおける計算結果でもそうになっている。したがって、ガンコイル電流値を変えて、真空窓からの放射を赤外線カメラで観測すると、ある電流値で放射ビームが急に出力されなくなると期待される。その境界の条件で、電子入射位置が決まるので、通常では測定できない電子入射位置をもとめることができる。パワー測定も同時に行うことで、電子入射位置に対する出力依存も測定でき、理論計算による予想と比べることで、ジャイロトロンが設計通りに製作されているか、電子銃の性能に問題はないか、設置に問題はないか等ジャイロトロンの性能を調べる。ジャイロトロンの発振効率・パワーを計算するコードはすでに開発済みである。

(4) 赤外線カメラによる発振モードの同定

図1の赤外線画像では2つのビームが測定されるが、これは共振器で異なるモードが同時発振していることを意味する。また、発振モードが異なると、窓からのビームの出射位置が異なることを意味する。この性質を用いると、赤外線画像上の温度上昇位置を解析することによって、キャビティでの発振モードの同定を行える可能性がある。この可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) ジャイロトロン共振器での電子入射位置の決定

モード変換器を内部に有するジャイロトロンFU CW Iにおいて、ガンコイル電流値を変えたときの窓からの放射パターンの赤外線画像から、通常では測定できない共振器での電子の入射位置の情報を引き出すことに成功した。この方法は、ジャイロトロン内での物理過程をベースとした新しいアイデアに基づくものである。

Gyrotron FU CW Iに対し、ガンコイル電流 I_g を変えることで、電子銃付近の磁場強度を変えながら窓からの出力ビームによる温度上昇値を赤外線カメラで測定し、その温度変化の最大値を I_g に対してプロットしたグラフを図2に示す。 $I_g \sim 115$ Aより下げると、窓

からのビームによる吸収体の温度上昇値が急激に落ちることを観測した。この現象は共振器で発振する電磁波モードの回転方向が逆転したことによる。このジャイロトロンに内蔵されたモード変換器は、共振器で発振する回転モードの内、電子と反対方向に回転するモードのみをうまく変換できるようになっている。すなわち、 $I_g > 115$ Aでは電子と逆回転の電磁波モード(counter-rotating mode)が発振しているため、大きなパワーが窓から出射されるのに対し、 $I_g < 115$ Aでは同方向に回転する電磁波モード(co-rotating mode)が発振されるが、変換器でうまく変換されないため、窓から出てくるパワーは急激に小さくなっている。

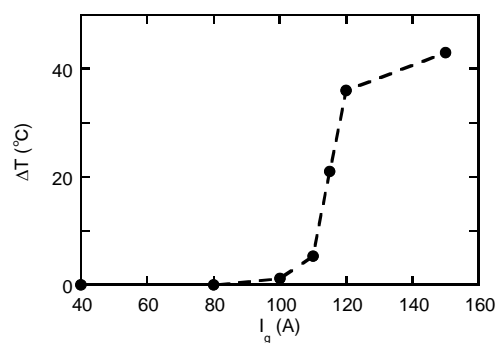


図2 ガンコイル電流を変えた時の赤外線画像の最高温度の変化

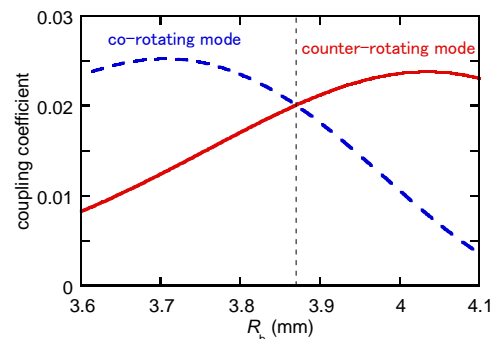


図3 TE22,8 モードの結合係数

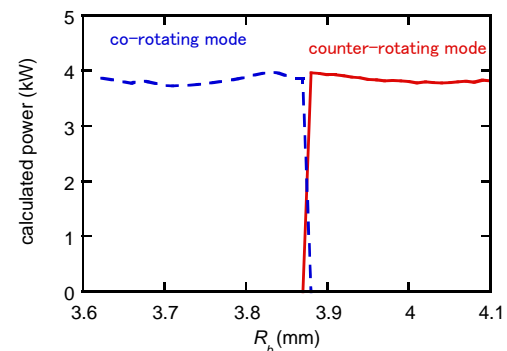


図4 R_b を変えた時のモード競合計算

FU CW IはTE22, 8モードが動作モードである。そこで、このモードの電子と電磁波の結合係数を、横軸に共振器への電子の入射ビーム半径Rbをとりプロットしたグラフを図3に示す。Rb = 3.87 mmを境にco rotating mode と counter-rotating mode の結合係数の大きさが逆転している。図4に、モード競合計算によるTE22, 8モードの各回転モードの発振パワーを示す。ちょうど結合係数の大小関係が逆転するRb = 3.87 mmを境にして、計算でも発振するモードの回転方向が変わることがわかる。

ガンコイル電流を変化させると、共振器までの磁力線構造が変わり、電子の共振器入射半径が変わる。上の結果からI_g = 115 A 時に Rb = 3.87 mmであることが分かる。コイル形状よりI_gの増分に対するRbの増分は 1.27×10^{-3} [mm/A]であるので、I_g[A] とRb[mm] の関係式が

$$Rb = 3.87 + 1.27 \times 10^{-3} (I_g - 115)$$

と求められた、さらに主磁場強度B[T]の依存を入れると

$$Rb = 3.87 + 1.39 \times 10^{-2} (I_g - 115) / B$$

とあらわすことができる。このようにI_gの値をスキャンしながら、赤外線カメラで窓からのビームの温度変化を調べることで、直接には観測できない電子入射位置を決定できた。

この結果は変化させることが可能な電子ビーム半径の範囲で回転モードが逆転するような発振モードで動作する他のモード変換器内蔵ジャイロトロンに対しても適用できるものである。

(2) 赤外線カメラによる発振モードの同定

図1に見られるように赤外線カメラによるビーム形状の測定において、2つの温度上昇ピークが得られる場合がある。これは、共振器で異なる2つ（以上）のモードが同時発振しているためである。モードが違くと異なる位置に温度上昇が現れる理由は、モード変換器の原理による。ジャイロトロン内のモード変換器は円筒導波管の壁を螺旋状に切った放射器を用いているが、この放射器からのビーム方向は発振モードの m/χ' に依存し、水平方向には $\theta = \cos^{-1}(m/\chi')$ の角度をもって放射器からビームが出る。したがって、異なる発振モードに対しては、放射器から出射するビームの方向が異なり、これがジャイロトロン窓からのビームの方向の違いとなつてあらわれる。逆にこの違いを利用して、赤外線カメラによるビームの温度上昇位置から共振器での発振モードを決めることができる。

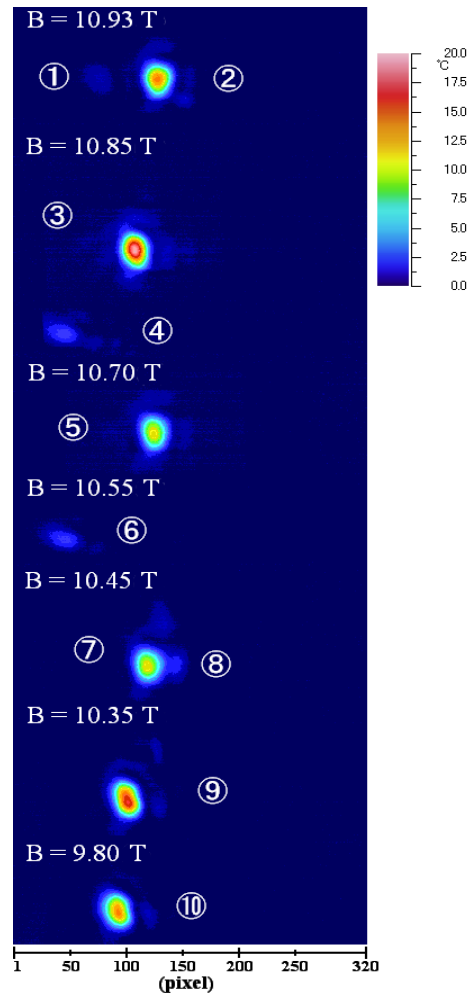


図5 主磁場強度Bを変えた時の温度上昇位置の変化

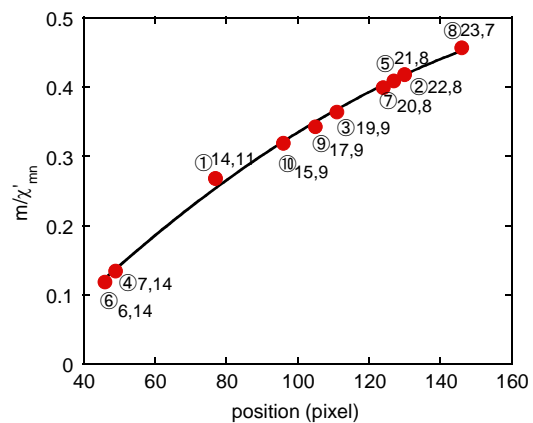


図6 赤外線カメラによるモード同定

そこで、Gyrotron FU CW Iにおいて、主磁場強度を変えて、共振器での発振モードをいろいろと変えた時の、ジャイロトロン窓の前に置いた塩化ビニル板の温度上昇変化を赤外線カメラで調べた。その結果を図5に示す。ここで、図は、いくつかの実験結果を縦に並べたものである。塩ビ板と赤外線カメラの位

置は固定しており、横軸はすべての画像に対して共通である。このように、主磁場強度Bを変えると、横方向（水平方向）にいろいろな位置で温度上昇が起きることがわかる。

(1)に述べた結果から $B = 10.93$ Tでは、主モードのTE_{22,8}が発振することがわかっている。従って図5の②はTE_{22,8}モードである。このモードを基準にして、実験の測定磁場強度範囲で発振する可能性のあるモードの中から m/χ' の値に対して温度上昇位置が単調に並ぶようなモードを探し、同定した。その結果を図6に示す。

このように、赤外線画像上の温度上昇ピーク位置に対して、 m/χ' が単調増加する1つの線にのるようなモードを見つけることができた。すなわち、ガウスビームに変換され、出力形状だけでは、共振器での発振モードの同定が直接には難しいモード変換器内蔵ジャイロトロンに対して、赤外線画像からジャイロトロン共振器での発振モードの同定を行うことができることを実証した。

(3) FU CW VIIAの性能評価

ESRエコー装置の光源として開発されたジャイロトロンFU CW VIIAの性能評価を、この研究課題で確立した方法を用いて行った。このジャイロトロンは上出しタイプで、内にモード変換器を含まないタイプのジャイロトロンである。ジャイロトロンFU CW VIIAからの放射ビームを赤外線カメラを用いて測定した結果、真空窓では発振モードであるTE_{0,2}成分が支配的で、軸対称な画像が得られたが、真空窓に導波管をつけて、導波管出口からの放射パターンを測定すると、非軸対称なパターンがまじっていた。そこで、開発した出射ビームに含まれる電磁界モード解析ルーチンにより解析したところ、導波管出口ではTE_{2,2}成分が支配的であることがわかった。

この理由として、窓に用いた材質のサファイアの結晶軸が、ジャイロトロン軸と平行でなく傾いていることが考えられた。そこで、ジャイロトロン窓を結晶軸がジャイロトロン軸と平行なものに交換した。その結果、窓に取り付けた導波管からの放射分布も、TE_{0,2}モードから期待される軸対称分布となった。

TE_{0,2}モードの放射を、ジャイロトロン外でガウスビームに変換し、ESRエコー実験装置まで伝送する光学システムを設計・製作した。そのシステムの性能評価も、赤外線カメラを用いて行った。

(4) Gyrotron FU CW GIIの性能評価

2010年度に福井大学で開発したモード変換

器内蔵ジャイロトロンFU CW GIIに対して(1), (2)の研究成果の内容を適用した。その結果、FU CW Iのように I_g をだんだん小さくし、 R_b を小さくすると、ある I_g の値で赤外線画像の温度上昇が急激に低くなるわけではなく、いったん温度上昇は小さくなったのち、また回復していった。この結果を赤外線画像の温度の代わりに焦電型検出器で受信した信号強度を横軸にまとめたものが図7である。さらに、このジャイロトロンの設計モードであるTE_{8,3}と近い磁場強度で発振が期待されるTE_{3,5}モードの結合係数もプロットした。このように、このジャイロトロンでは、 R_b が変わると、同じ共振器モードで、回転方向が逆のモードへの遷移が起きるわけではなく、他のモードが発振するということがわかる。他モードへの遷移が起きる R_b は、同じモードの回転の遷移によるほど明確には決められないが、実験と理論とは大きく矛盾しない。

次に、(2)と同様に主磁場強度Bをいろいろ変えて、異なる共振器モードで発振させたときの赤外線画像の温度上昇位置を比較したところ、発振モードの同定を行うことができた。このように、FU CW GIIに於いても(2)の手法でモード同定できることを実証し、その有効性を確かめた。

また、TE_{8,3}とTE_{3,5}モードは放射パターン形状が異なる(図8)ため、放射パターンの形状の違いだけでも、モード同定できる例を新たにみつけた。

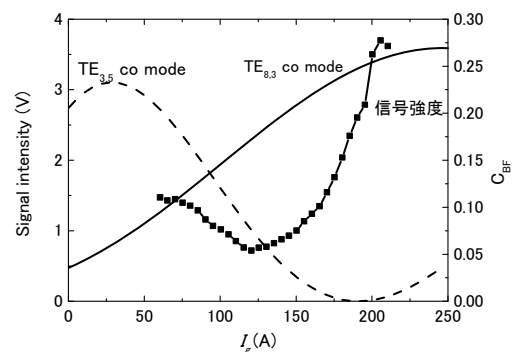


図7 I_g を変えた時の窓からの出力の信号強度とTE_{8,3}, TE_{3,5}の結合係数

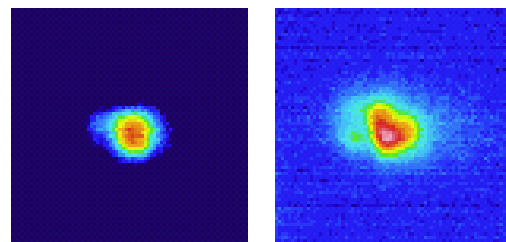


図8 FU CW GII からの放射パターン (左) TE_{8,3} モード (右) TE_{3,5} モード

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Y.Tatematsu, Y.Yamaguchi, T.Idehara, et al., “Development of a kW Level-200 GHz Gyrotron FU CW GI with an Internal Quasi-optical Mode Converter”, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves **33**, 292-305, 査読有, 2012. DOI:10.1007/s10762-012-9881-2
- ② T.Saito, S.Ogasawara, N. Yamada, S.Ikeuchi, Y.Tatematsu, et al., “New Power Records of Sub-Terahertz Gyrotron with Second-Harmonic Oscillation”, Plasma and Fusion Research **7**, 1206003, 査読有, 2012. DOI: 10.1585/pfr.7.1206003
- ③ Y.Yamaguchi, Y.Tatematsu, T.Saito, et al., “Formation of Laminar Electron Flow for a High-Power Sub-THz Gyrotron”, Plasma and Fusion Research **7**, 1205004, 査読有, 2012. DOI: 10.1585/pfr.7.1205004
- ④ T.Saito, T.Notake, Y.Tatematsu et al, “Development of terahertz gyrotrons and their application to LHD CTS”, Journal of Physics: Conference Series, 227, 012013, 査読無, 2011
- ⑤ Y.Tatematsu, S. Kubo et al., “Development of collective Thomson scattering system using the gyrotrons of sub-tera Hz region”, 23rd IAEA Fusion Energy Conference FTP/P6-31 審査有, 2011. http://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/cn180_papers.asp
- ⑥ 立松芳典、斉藤輝雄、出原敏孝他、“福井大におけるCWジャイロトロンの開発”, 信学技法 **109**, 47-52, 査読無, 2009.
- ⑦ T.Notake, T.Saito, Y.Tatematsu et al., “Development of a Novel High Power Sub-THz Second Harmonic Gyrotron” Phys. Rev. Letters **103** 225005-1- 225005-4, 査読有, 2009.

[学会発表] (計 39 件)

- ① Y.Tatematsu et al., “Development of gyrotrons with an internal mode converter, Gyrotron FU CW G-series (招待講演)”, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 福井大学, 2012.3.7.
- ② 立松芳典他, “モード変換器内蔵高周波数ジャイロトロンの開発”, Plasma Conference 2011, 金沢市, 2011.11.22.
- ③ Y.Tatematsu et al., “Development of Gaussian beam output gyrotrons FU CW GI and FU CW GII”, 36th

International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Houston, USA, 2011.10.2.

- ④ 立松芳典他, “200 GHz CW ガウスビーム出力ジャイロトロンの開発”, 第 27 回プラズマ・核融合学会年会, 北海道大学, 2010.11.30.
- ⑤ Y.Tatematsu, et al., “Mode identification of a gyrotron oscillation by utilizing an IR camera”, 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Rome, Italy, 2010.9.8
- ⑥ Y.Tatematsu et al., “Study of Gyrotron FU CW I operation (invited)”, The 3rd International Workshop on Far Infrared technologies, 福井大学, 2010.3.15.
- ⑦ 立松芳典他, “赤外線カメラを用いたジャイロトロン性能テスト”, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会, 京都市国際交流会館, 2009.12.4.

[その他]

ホームページ等

<http://fir.u-fukui.ac.jp>

(福井大学遠赤外領域開発研究センター)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

立松 芳典 (TATEMATSU YOSHINORI)
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・
准教授
研究者番号: 50261756

(2) 連携研究者

斉藤 輝雄 (SAITO TERUO)
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・
教授
研究者番号: 80143163

(3) 研究協力者

橋本 秀一 (HASHIMOTO SYUICHI)
福井大学大学院工学研究科・物理工学専攻・大学院生 (2009~2010 年度)

尾関 隆則 (OZEKI TAKANORI)
福井大学大学院工学研究科・物理工学専攻・大学院生 (2010~2011 年度)

山口 裕資 (YAMAGUCHI YUUSUKE)
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・
機関研究員 (2010~2011 年度)
研究者番号: 10466675