

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10日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340168

研究課題名（和文） 協同トムソン散乱計測用テラヘルツ帯高出力パルスジャイロトロンの実証管開発

研究課題名（英文） Proof of principle of a high power terahertz pulse gyrotron for collective Thomson scattering diagnostics

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

磁場閉じ込め核融合プラズマのイオン温度を測定する協同トムソン散乱計測法の開発が求められている。本研究では、この光源に適用できるサブテラヘルツ帯高出力ジャイロトロンの実証研究を行った。超伝導マグネットの技術的制約を避けるため2次高調波発振を採用し、基本波とのモード競合を避ける設計を行った。その結果、周波数 0.389 THz において最高出力 83 kW を実証した。また、実証的内蔵モードコンバータの設計・製作を行った。

研究成果の概要（英文）：

Development of collective Thomson scattering (CTS) diagnostics for measurement of ion temperature of fusion plasmas is needed. A development study of high power sub terahertz gyrotron applicable to CTS has been carried out. Second harmonic oscillation was adopted to avoid technological limitation of a superconducting magnet and the design method of state of the art was applied. As a result, highest power of 83 kW at 0.389 THz was demonstrated. Moreover, a practicable internal mode convertor was designed and fabricated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：光源技術、テラヘルツ、プラズマ・核融合、ジャイロトロン、協同トムソン散乱

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の学術的背景と位置づけ

ジャイロトロンは遠赤外／テラヘルツ帯において kW オーダーの連続出力が期待でき

る唯一の発振管である。福井大学では、高調波動作によるジャイロトロンの高周波化の研究に取り組み、世界最高周波数 889 GHz の記録(T. Idehara et al., IEEE Trans. Plasma Sci.

PS27 (1999) 340)から 1 THz のブレイクスルー実現(T. Idehara et al., Int. J. Infrared and Milli. Waves 27 (2006) 319)に至っている。

テラヘルツ帯でさらに高出力のジャイロトロンが実現すると、広範な応用展開の道が開ける(プラズマ・核融合学会誌小特集 84, No.12(2008))。しかし、この周波数帯で 100 kW 級のジャイロトロンの CW 動作は容易ではない。一方、パルス発振であれば、テラヘルツ帯で 100 kW 級ジャイロトロンを実現することは十分可能であり、プラズマ科学としての意義も大きい。特に、核融合プラズマにおける協同トムソン散乱計測(以後、CTS)用光源としての価値は極めて高い。

(2)これまでの研究成果と本研究の着想に至る経緯

福井大学遠赤外領域開発研究センター(FIR FU)では、テラヘルツ帯ジャイロトロンの応用範囲を拡大するべく、超伝導マグネットなどの既存設備を用いて、第二高調波発振によるテラヘルツ帯パルスジャイロトン開発の計画が立案された。齊藤はこの計画を核融合プラズマのCTS用光源の開発に発展する計画として位置づけた。そこで、福井大学客員教授で電子銃設計の専門家であるロシア、ニジニノブゴロド州立大学のManuilov教授に依頼した電子銃の設計とFIR FUの研究員La Agusuによるシミュレーションから開発が十分可能であると判断し、科学研究費に申請・採択された(平成19-20年度、以後H19科研費という)。研究の方法欄で整理するように、H19科研費は大きな成果を上げた。一方、新たな課題も明らかになった。本研究では、この成果をさらに発展させるとともに、新たな課題解決に挑戦した。

2. 研究の目的

(1)本研究の目的は、サブテラヘルツ帯高出力パルスジャイロトロンを実現し、核融合プラズマにおけるCTS計測への道を開くことである。具体的には、H19科研費の結果を進展させ、CTS計測用光源としての400 GHz帯100 kW級ジャイロトロンの実証管を開発することである。

研究期間における具体的目標を以下のよう

①H19科研費の結果と知見を進展させ、400 GHz帯で100 kW級発振のための最適モードと電子光学系を確定する。

②400 GHz帯で100 kW級パルス発振ジャイロトロンの実証管を開発する。

(2)本研究の学術的特色、独創性

福井大学では、テラヘルツに至る超高周波ジャイロトロンを開発を進めてきた。特に、

高調波高効率動作を目指した研究により、Gyrottron FU Series を独自に開発した。本研究はこの独自の知見を基盤にしている。さらに、H19科研費ではテラヘルツ帯ジャイロトロン用電子銃を設計・製作し、その有効性を実証した。また、多数の発振モードの中から孤立性の高いモードを選択する手法、高周波一電子ビーム系の非線形性を取り入れたコードの開発など、テラヘルツ帯ジャイロトロン

の開発など、テラヘルツ帯ジャイロトロン

(3)予想される結果と意義および発展性

第二高調波発振によりテラヘルツ帯の100 kW級ジャイロトロンを実証すること自体で、プラズマ科学として大きい意義をもつ。これが第一の意義である。

核融合プラズマのCTS実験が難しい最大原因は、適切な高出力光源がないことである。短波長のCO₂レーザーでは散乱角が1度以下となり、空間分解能が確保できない。一部のトカマク装置で、電子サイクロトロン周波数 f_{ce} 以下あるいは f_{ce} と $2f_{ce}$ の間の低周波ジャイロトロンにより散乱データが得られているが、電子サイクロトロン放射による雑音や計測可能磁場領域の制限など多くの困難がある(H.Bindslev et al., Phys. Rev. Lett. 49 (2006) 205005)。本研究はこの困難を解決する。実際、我々は本研究の成果をLHDのイオン温度測定に発展させることを想定している。これが第二の意義である。

第三に、本研究はプラズマ・核融合研究のスピンオフとしての意義と発展性をもつ。たとえば、電気炉など従来の加熱手法では困難なマイクロン単位の表面加熱が必要な半導体の表面機能改質への応用が期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、先行するH19科研費の成果の整理に基づき、以下に示す方針で実施した。

H19科研費の結果と成果

(1) Manuilov 教授設計の電子銃の有効性実証と60 kVまでの高電圧運転に成功。

(2) 高加速電圧運転時の第二高調波単独発振のための知見の獲得。

(3) 孤立性の高いモードの選択法、非線形理

論による出力計算コード、出力シミュレーションコードを開発。

(4) 上記のコードを用いて選択した TE65 モード(発振周波数 349 GHz)で 52 kW、TE85 モード(発振周波数 390 GHz)で 37 kW の第二高調波単独発振記録を得た (T. Notake et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 225002 (2009)で報告)。

以上の結果と新たな課題を踏まえ、400 GHz 帯 100 kW 級ジャイロトロンの実証管開発のための方針を以下のように設定した。

- (1) ジャイロトロンを組み立て精度の格段の向上
- (2) 真空度の改善
- (3) 出力におけるモード変換抑制
- (4) 発振モードの最適化と電子光学系の整合的設計 (電子銃の設計変更を含む)
- (5) 実証管段階での内蔵モード変換器の組み込み
- (6) 以上で得られる知見により、電子光学系・共振器系の統合的設計手法を確立する。この技術的・学術的蓄積を今後の高出力テラヘルツジャイロトン開発の基礎とする。

本研究で開発を目指した封じきり管の概略図と研究組織、役割分担を図 1 に示す。

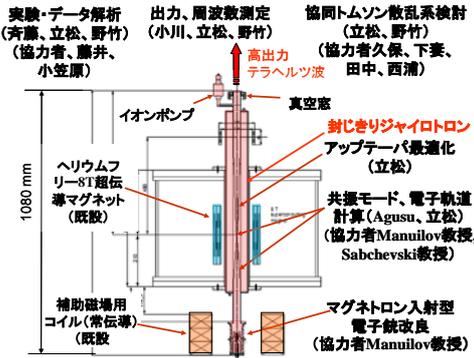


図 1 封じきり管の概略図の研究組織、役割分担

4. 研究成果

(1) 最適発振モードの見極め

発振モードを $TE_{m,n}$ とすると、光速 c 、ベッセル関数の微分 J'_m の n 番目のゼロ点 $\chi_{m,n}$ 、共振器半径 R_c として、発振周波数は $f \sim c\chi_{m,n}/2\pi R_c$ である。このモードと半径 R_b を通る電子ビームの高効率結合には $R_b \sim R_c \chi_{m \pm 2, q} / \chi_{m, n}$ が必要である。 q は結合効率のピーク番号を表す。使用した電子銃では、第二高調波として $f \sim 2f_{ce} \sim 400$ GHz に対する磁場強度 $B_c \sim 8$ T において、 $R_b \sim 1.9$ mm のとき、電子速度の分散が最小になる。さらに、選択モードの近傍に他モード、特に基本波モードがすぐ弱磁場側にならないことが重要

である。図 2 は候補モードである $TE_{1,8}$ モード近傍の $\chi_{m,n}$ 分布を示す。 $TE_{1,8}$ モードは弱磁場側の基本波モードから遠く、強磁場側の $TE_{4,3}$ モードからも十分離れている。 $R_b \sim 1.9$ mm 近傍では、電子ビームの特性が十分よい 1.8 mm で結合係数が極大になる。ただし、 $q \gg 1$ であるため、 $q = 1$ の場合に対して結合係数は小さい。このことが、以下に述べる発振モードの再検討につながる。

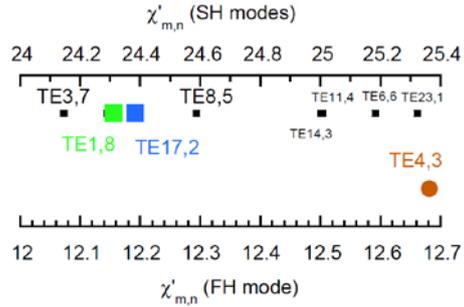


図 2 モード分布

(2) 封じきり管の製作

ステップ 1 で決定した発振モードの封じきり管を製作した。共振器は直線部半径 2.99 mm、長さ 12 mm である。共振周波数は約 388 GHz である。電子銃側はカットオフするためのダウンテーパとし、反対側はアップテーパにより円形出力導波管に接続されている。出力導波管端部には真空窓がある。出力導波管は電子ビームのコレクターとしても働く。真空窓には、厚さ約 2.5 mm のサファイア基板の周囲をメタライズ処理して SUS フランジにロー付けしたものを用いた。結晶軸を基板面に直交するように指定し (c 軸カット)、電磁波が真空窓を透過する間のモード変換が起きないようにした。

封じきり一体製作により、電子銃から共振器までの設置誤差を最小化することができた。400°C 高温ベーキングを経ることにより、管内真空度が飛躍的に改善し、高電圧動作時の管内アーキングを抑制した。さらに、電子銃部に用いる絶縁セラミックの大気側形状を波形として、沿面放電を抑制した。

(3) 特性計測

この封じきり管を 8 T 液体ヘリウムフリー超伝導マグネットに挿入し、発振周波数計測、発振モード同定、高出力化試験等を行った。図 3 はモード同定に用いたデータであり、発振強度の共振器部磁場 B_c 依存性を示す。この計測では焦電型検出器前面に遮断周波数 303 GHz の高域濾波器を挿入しているため、2 次高調波モードの発振が計測されている。

ヘテロダイン受信器による精密周波数計測から、番号を付したピークは 1 から順に、 $TE_{3,7}$ 、 $TE_{1,8}$ 、 $TE_{17,2}$ および $TE_{8,5}$ モードと同定

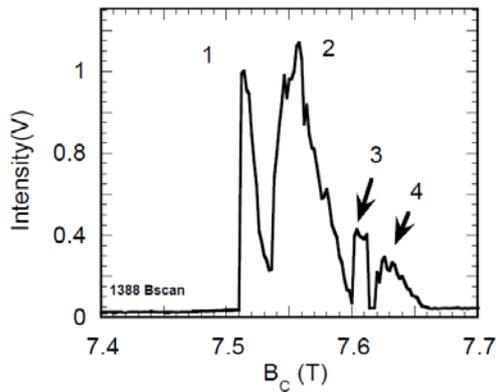


図3 発振信号の磁場依存性、 $V_k = 50$ kV、 $I_b = 4$ A。ハイパスフィルタ有り。

された。図2に示すモードの並びによく対応している。設計モードの $TE_{1,8}$ モードの強度が一番大きい。さらに、各モードとも $TE_{4,3}$ モードと競合することなく、単独発振することも確認された。

この封じきり管を用いて、高出力化試験を実施した。 $V_k = 60$ kV 設定においてビーム電流 I_b を順次増大させたところ、 $I_b = 9$ A において 57 kW を記録し、組み立て管で記録した 349 GHz、52 kW を更新した。さらに、 $V_k = 65$ kV、 $I_b = 11$ A において 62 kW を達成した。

(3) 発振モードの変更

しかし、 I_b をさらに上げると逆に出力が低下した。この原因として、有限電荷効果による電子ビーム特性の劣化が推定された。また、 $TE_{1,8}$ モードは $q \gg 1$ で電子ビームに結合する。よって、 $q=1$ 結合のモードを探索し、図2に示す $TE_{17,2}$ モードを選定した。しかし、このモードの $q=1$ 最適結合条件 $R_b \approx 2.1$ mm を満たすためには、電子銃の運転条件を大幅に変更するか、電子銃の設計変更が必要となった。本研究では、Manuilov 教授の協力を得て設計変更した電子銃を用いることとした。電子銃の設計変更は本研究の計画段階で、研究の方向性の一つとして見込んでいたことである。この新設計電子銃を製作し、ジャイロトロンに電子銃を換装した。

(4) 実証管としての性能評価

このモードの共振周波数は約 389 GHz であり、図3に示す測定で確定している。ファブリ・ペロー干渉計及びヘテロダイン受信器による周波数測定から、 $TE_{17,2}$ モードの発振を確認した。さらに、 $TE_{4,3}$ モードと競合せず単独発振する条件も見いだした。次に、高出力試験を実施した。図4は I_b と出力の関係を示す。図中の赤丸が実験結果である。 I_b とともに出力が上昇し、 $I_b = 10$ A において、最高出力 83 kW を記録し、 $TE_{1,8}$ モードで得た 62 kW を大きく超えた。

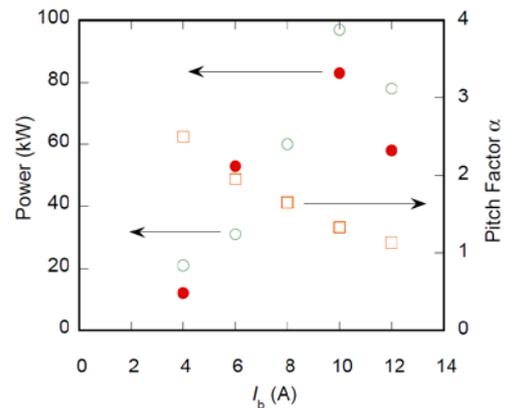


図4 封じきり管2本目の出力のビーム電流依存性。 $V_k = 60$ kV。

しかし、 $I_b > 10$ A では出力が減少した。 $TE_{1,8}$ モードの場合と同様、電子ビーム特性の劣化が原因と考えられる。実際、電子銃設計コードで評価される電子ビームのピッチ因子は、図4に四角記号で示すように、 I_b とともに減少する。この値を用いて行った出力計算の結果を中抜き丸印で示す。 $I_b > 10$ A で出力は減少し、実験結果を再現する。

(5) 結果の評価

図5に本研究で達成した出力記録を示す。 $H19$ 科研費による研究により、これまでの室力記録を大きく更新し、さらに本研究において飛躍的な結果を得た。当初掲げた 100 kW に完全には到達していないが、ほぼ目標を達成し、400 GHz 帯 100 kW 級管の実証に成功した。これらの結果をプラズマ科学分野で国際的に評価の高い Physics of Plasmas 誌に投稿し掲載可通知を得ている。これは、 $H19$ 科研費の結果の検討を踏まえ、理論面を含めて周到に準備したことによる。今後、結果をさらに整理し、より深いレベルで設計コードに反映してゆく。

また、本報告では述べる余裕がないが、2

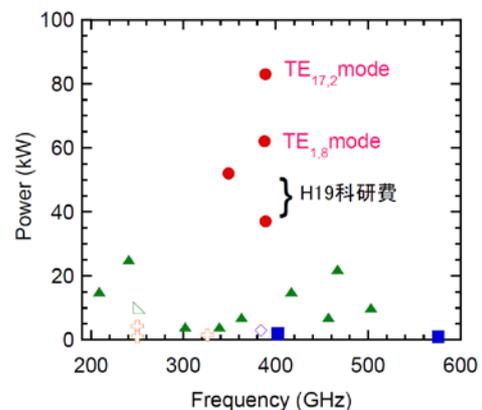


図5 本研究で達成した出力記録。赤丸が $H19$ 科研費を含む一連の研究結果。20 kW 程度以下のデータは、過去の報告より引用。

次高調波同志のモード競合、基本波モードとの非線形モード競合など、物理的に重要な現象も発見した。現在、別論文に投稿するための準備中である。

(6) 内蔵モードコンバータの設計・製作

ジャイロトロンをCTS計測用光源に応用するには、モードコンバータを内蔵してガウシアンビーム出力を得る必要がある。本研究でも最終年度に内蔵モードコンバータを開発する計画としていた。一方、300 GHz帯基本波ジャイロトロンが別途開発中であることから、内容をより実証的にするため、このジャイロトロン用内蔵モードコンバータを設計・製作することとした。ヘリカルカットブラソフ型放射器と波形整形及び放射方向調整用の4枚ミラーからなるモードコンバータを完成させた。

また、新たに高性能電子銃の設計コードの整備にも取り組み、有限電荷効果を抑制した高品質電子ビームを発生できる電子銃の設計にも成功した。この電子銃は300 GHz帯基本波ジャイロトロンに用いられる。

以上のように、当初設定した課題を達成し、本研究を完了した。

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 16 件)

- ① Generation of High Power Sub-THz Radiation from a Gyrotron with Second Harmonic Oscillation, Teruo Saito, Naoki Yamada, Shinya Ogasawara, Yoshinori Tatematsu, Ryosuke Ikeda, Isamu Ogawa, Toshitaka Idehara, 他8名 Phys. Plasmas, to be published in **19**, No.6. 査読有
- ② Development of a kW Level-200 GHz Gyrotron FU CW GI with an Internal Quasi-optical Mode Converter, Yoshinori Tatematsu, Yuusuke, Yamaguchi, Toshitaka Idehara, Takanori Ozeki, Ryosuke Ikeda, Tomohiro, Kanemaki, Isamu Ogawa, and Teruo Saito, J. Infrared Milli. Terahertz Waves **33** (2012) pp.292-305. DOI:10.1007/s10762-012-9881-2 査読有
- ③ New Power Records of Sub-Terahertz Gyrotron with Second-Harmonic Oscillation, Teruo SAITO, Shinya OGASAWARA, Naoki YAMADA, Shinji IKEUCHI, Yoshinori TATEMATSU, Ryosuke IKEDA, Isamu OGAWA and Vladimir N. MANUILOV2, Plasma and Fusion Research **7** (2012) 1206003. DOI: 10.1585/pfr.7.1206003 査読有
- ④ Formation of Laminar Electron Flow for a

High-Power Sub-THz Gyrotron, Yuusuke YAMAGUCHI, Yoshinori TATEMATSU, Teruo SAITO, Ryosuke IKEDA, Jagadish C. MUDIGANTI, Isamu OGAWA and Toshitaka IDEHARA, Plasma and Fusion Research **7** (2012) 1205004. DOI: 10.1585/pfr.7.1205004 査読有

- ⑤ Collective Thomson scattering of high power ECRH beam in LHD, S. Kubo, M. Nishiura, K. Tanaka, T. Shimozuma, Y. Tatematsu, T. Saito, 他 11 名, Rev. Sci. Instrum. **81** (2010) 10D535 (6 pages). DOI:10.1063/1.3481165 査読有
 - ⑥ Electron Optical System of the Sub-terahertz Coaxial Gyrotron with Continuous Frequency Tuning, V. Manuilov, T. Saito, 他2, J. Infrared Milli. Terahz Waves, **31** No.8 (2010) pp.912-918. DOI: 10.1007/s10762-010-9657-5 査読有
 - ⑦ Development of terahertz gyrotrons and their application to LHD CTS, T. Saito, T. Notake, Y. Tatematsu, A. Fujii, S. Ogasawara, La Agusu, T. Idehara, 他 6 名, Journal of Physics: Conference Series **227** 012013 (4 pages), published online: 21 June 2010. DOI:10.1088/1742-6596/227/1/012013 査読有
 - ⑧ Collective Thomson Scattering Study using Gyrotron in LHD, Shin KUBO, Yoshinori TATEMATSU, Takashi NOTAKE, Teruo SAITO, 他 7 名, Plasma Fusion Res. **5** (2010) pp.S1038-1 - S1028-5. DOI: 10.1585/pfr.5.S1038 査読有
 - ⑨ Development of a Novel High Power Sub-THz Second Harmonic Gyrotron, T. Notake, T. Saito, Y. Tatematsu, A. Fujii, S. Ogasawara, La Agusu, I. Ogawa, T. Idehara, V. N. Manuilov, Phys. Rev. Letters **103**, 225002 (4 pages) (2009) . DOI: 10.1103/Phys. Rev. Lett.103.225002 査読有
 - ⑩ STUDIES OF CONTINUOUS-WAVE SUBMILLIMETER-WAVE GYROTRONS FOR SPECTROSCOPY AND DIAGNOSTICS OF VARIOUS MEDIA, M.Yu.Glyavin, T. Idehara, T. Saito, 他1名, Radiophys. Quantum Electronics, **52**, No. 7 (2009) pp.500-510. DOI: 10.1007/s11141-009-9153-8 査読有
- [学会発表] (計 32 件)
- ① 山口裕資、マグネトロン入射型電子銃によるラミナー電子流の形成、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学(神戸市)
 - ② T. Saito, Research Activities on Far Infrared Technologies of FIR FU (招待講演), The 4th International Workshop on Far Infrared Technologies, 2012年3月7日、福井大学(福井市)
 - ③ Y. Yamaguchi, Formation of laminar electron flow for 300 GHz high-power pulsed gyrotron (招待講演), The 4th International Workshop on

Far Infrared Technologies, 2012年3月9日、福井大学(福井市)

④ 齊藤輝雄、LHDにおける共同トムソン散乱への適用を目指したサブテラヘルツ帯ジャイロトロンによる高出力発振の実証(招待講演)、Plasma Conference 2011、2011年11月24日、石川県立音楽堂(金沢市)

⑤ 山口裕資、300 GHz 高出力パルスジャイロトロンの実現に向けた電子銃開発、Plasma Conference 2011、2011年11月22日、石川県立音楽堂(金沢市)

⑥ T. Saito、Development of high power sub terahertz power source with a gyrotron for application to CTS measurement (招待講演), 15th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2011年10月11日、Jeju, Korea.

⑦ Y. Yamaguchi、High Power Sub-THz Radiation from a Gyrotron with Second Harmonic Oscillation, 36th Int. Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2011年10月5日、Houston, USA.

⑧ T. Saito、Development of high power gyrotrons in the sub terahertz region for application to CTS measurement (招待講演), 8th Int. Workshop on Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications, 2011年7月14日、Nizhny Novgorod, Russia.

⑨ 山口裕資、400 GHz-100 kW ジャイロトロンの実現に向けた電子銃設計、日本物理学会第66回年次大会、2011年3月28日、新潟大学(新潟県)

⑩ 小笠原慎弥、協同トムソン散乱計測用高周波パルスジャイロトロンの開発、第27回プラズマ・核融合学会年会、2010年12月1日、北海道大学(札幌市)

⑪ 小笠原慎弥、協同トムソン散乱計測のためのサブミリ波帯高出力パルスジャイロトロンの開発、第20回日本赤外線学会研究発表会、2010年11月4日、立命館大学(滋賀県)

⑫ 山田尚輝、二次高調波発振を用いた高周波パルスジャイロトロンの開発 VIII、日本物理学会2010年秋季大会、2010年9月24日、大阪府立大学(大阪府)

⑬ T. Saito、Development of high power sub terahertz gyrotrons for application to CTS measurement, 35th Int. Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010年9月9日、Rome, Italy.

⑭ Y. Tatematsu、Development of Collective Thomson Scattering System Using the Gyrotrons of sub-Tera Hz Region, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010年10月14日、Daejeon, Korea.

⑮ 山田尚輝、基本波発振による400 GHz-200 kW 級パルスジャイロトロンの設計、日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学(岡山

市)

⑯ 齊藤輝雄、テラヘルツ帯ジャイロトロン開発の現状と展望(シンポジウム講演)、プラズマ・核融合学会、2009年12月3日、京都市国際交流会館(京都市)

⑰ 齊藤輝雄、協同散乱計測のための2次高調波400 GHz 帯パルスジャイロトロン開発、プラズマ・核融合学会、2009年12月3日、京都市国際交流会館(京都市)

⑱ 藤井彰仁、二次高調波発振を用いた高周波パルスジャイロトロンの開発IV、日本物理学会、2009年9月26日、熊本大学(熊本市)

⑲ T. Saito、Development of a High Power Sub Terahertz Pulse Gyrotron for Application to Collective Thomson Scattering (Invited), 3rd Int. Workshop on Far Infrared Technologies, 2010年3月15日、福井大学(福井市)

⑳ T. Saito、Development of terahertz gyrotrons and their application to LHD CTS (Invited), 14th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2009年9月22日、Castelbrando, Treviso, ITALY.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 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

(2) 研究分担者

小川 勇 (OGAWA ISAMU)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授

研究者番号：90214014

(H22→H23：連携研究者)

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

(3) 連携研究者

出原 敏孝 (IDEHARA TOSHITAKA) (H20年度)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特任教授

研究者番号：80020197

ラ アグス (LA AGUSU) (H20年度)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・研究員

研究者番号：60447703

野竹 孝志 (NOTAKE TAKASHI)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・研究員

研究者番号：70413995