

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247094

研究課題名(和文)高出力サブテラヘルツ gyrotron の実現 - 新規高効率発振機構の適用 -

研究課題名(英文) Development of high power sub THz gyrotron by using a novel high-efficiency mechanism

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,200,000円

研究成果の概要(和文)：先ず294 GHz プロトタイプ gyrotron を用いて出力246 kWを達成してサブテラヘルツ高出力 gyrotron の設計コンセプトを実証し、303 GHz実機 gyrotron の設計・製作を完了した。この gyrotron において320 kW以上の出力実証と発振効率30%以上を得ることに成功し、最大80マイクロ秒までパルス幅を延伸した。発振パルス幅中の周波数変化は10 MHz以下であることを確認するとともに、発振パルスの立ち上がり・立ち下がり時間帯を含めて、不要モードの発振抑制に成功した。この結果、協同トムソン計測に適用できる gyrotron 開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：Output power of 234 kW was obtained with a 294 GHz prototype gyrotron in fiscal year 2013. Further higher power of 246 kW was demonstrated and the design concept for high power sub THz gyrotron was verified in fiscal year 2014. Then, a 303 GHz practical gyrotron was designed and fabricated.

Oscillation test in fiscal year 2015 resulted in a maximum power higher than 320 kW and an efficiency higher than 30%. In fiscal year 2016, the pulse width was expanded up to 80 microsecond. Frequency variation during the oscillation pulse was measured and the frequency variation less than 10 MHz was confirmed. In addition, no-parasitic mode oscillation including turn-on and turn-off phases was realized. We have successfully developed a sub THz gyrotron applicable to collective Thomson scattering diagnostics.

研究分野：プラズマ工学・テラヘルツ波工学

キーワード：gyrotron テラヘルツ プラズマ計測 協同トムソン散乱 LHD 国際研究者交流

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 電磁波のうち遠赤外/テラヘルツ帯は新技術や新しい物理研究への応用の宝庫であるが、高出力光源の開発が遅れている。この課題を解決するため、種々の発振原理の電子管開発が精力的に進められている(例えば J. H. Booske らの総合報告, "Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources," IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech. **1** (2011) 54)。中でもジャイロトロンは、テラヘルツ帯において kW 以上の出力が可能な唯一の発振管である。福井大学はジャイロトロンの高周波化研究をリードし、世界で初めて 1 THz を超える発振を実証した (T. Idehara et al., Int. J. Infrared and Milli. Waves **27** (2006) 319)。福井大学のグループはこの成果を発展させ、kW 級テラヘルツ帯連続発振 (CW) ジャイロトロンを開発を進めている。さらに、この周波数帯で 100 kW 級のジャイロトロンを実現すれば、プラズマ科学・テラヘルツ波科学分野の研究に大きく貢献することができる。

(2) 核融合研の大型ヘリカル型装置 LHD において、77 GHz ジャイロトロンを用いる協同トムソン散乱 (CTS) 計測が始まっているが、吸収や屈折を避けるため、LHD の特徴である高密度プラズマには適用できない。我々は、核融合研の研究者とともに光源に求められる条件を検討し、0.3 THz 領域の周波数は、(1)LHD の高密度プラズマに対してほぼ理想的、(2)不純物ホール下でのイオン温度計測に適用可能、(3)密度  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、粒子密度 1% 程度の MeV 級高速イオンの分布関数計測が可能など、サブテラヘルツジャイロトロン (STG) を光源にする CTS 計測の発展性を確認しており、早期の高出力光源の開発が待たれていた。

(3) 平成 19-20 年度および平成 21-23 年度採択の科研費基盤 (B) では、8 T マグネットを用いて、発振周波数  $f$  が電子サイクロトロン周波数  $f_{ce}$  の 2 倍になる 2 次高調波発振により、0.4 THz 帯の高出力発振を目指した。その結果、100 kW に迫る世界最高出力を得て、STG の CTS 計測用光源としての開発可能性を示した。さらに、2 次高調波モードと  $f=f_{ce}$  の基本波モードとの、電子のラーマー回転位相の集積過程を介した非線形相互作用により、基本波モードが単独では到達し得ない領域 (硬発振領域) で高効率発振する機構を初めて実証した。これは、準定常の核融合用大電力ジャイロトロンにおいて用いられ、大きな成功を収めた高効率発振手法 (K. Sakamoto et al. Nat. Physics **3**, 411 (2007)) をパルス発振にも適用可能にする成果である。一方、高調波発振に伴う低効率、モード間相互作用が 2 次高調波モードには不安定化に作用すること等が、さらに高出力を得ることを困難にした。そこで、基本波発振による 0.3 THz 帯 STG の開発を計画した。この周波数は以下の利点

がある。(1) CTS 断面積は波長の 2 乗に比例するので、散乱信号は  $(4/3)^2=1.8$  倍になる。

(2) 高エネルギーイオンに対する信号比も増大し、バルクイオンに対する密度比が小さい場合でも、検出可能性が高くなる。

### 2. 研究の目的

(1) 0.3 THz 帯、出力 300 kW 級、パルス幅最大 100  $\mu\text{s}$  の STG を開発し、高効率発振を実現する。出力は CTS 光源への適用において尤度を確保するため、300 kW に設定する。モードコンバータを内蔵し、そのまま CTS に適用可能なガウスビーム出力ジャイロトロンを完成する。

(2) 高出力 STG のモード間相互作用・非線形発振の動的発展過程など、本研究でしか得られない学術的知見を集積し、プラズマ科学としてのジャイロトロン物理の発展に寄与する。

(3) これらの結果を普遍化し、高効率・高出力 STG の系統的設計手法を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) 25 年度は先ず、プロトタイプジャイロトロン動作を詳しく調べて最高出力を見極めるとともに、高効率発振の発現を探索する。また、マックスウェル方程式と荷電粒子の運動を直接解くコードを導入し、多方面から、電子-波動およびモード間の相互作用過程を調べる。

(2) 以上の知見に基づき、高効率発振機構を取り入れたジャイロトロンを設計する。

(3) 26 年度早期にこのジャイロトロンを製作・試験し、最適モードの見直しも含めて、設計手法の可否を検証する。後半には長パルス試験を実施し、100  $\mu\text{s}$  発振を示す。27 年度には、この検証に基づき、共振器・電子銃を改良したジャイロトロンを製作・試験する。

(4) 28 年度には 0.3 THz、300 kW を達成し、STG を高出力化する手法を確立する。さらに、非線形モード間相互作用による高効率発振機構を詳細に解明し、学術的成果としてまとめる。

### 4. 研究成果

(1) 平成 25 年度の成果

初めに、製作済みのプロトタイプ管の動作を詳しく調べて、最高出力を見極めるとともに高効率発振条件やモード競合の状況も調べ、LHD に適用する実機ジャイロトロン設計コンセプトの妥当性を検証した。研究経過と達成した成果は以下の通りである。ジャイロトロン本来の特性を得るには、ジャイロトロン管とマグネットとの間の設置精度確保が極めて重要である。先ず、巻き線精度の高い補助磁場コイルを電子銃部に配置して、電子ビームの共振器入射半径の精度を 0.1 mm 以下で確保し、200 kW 以上の出力と高効率発振が可能かどうかを見極める実験を行った。これには、電子銃のアノード電圧の調整による

電子ビームのピッチ因子の最適化も極めて重要である。この結果、ビーム電流の増大とともに出力に飽和傾向が生じて 200 kW を超える出力が得られなかった状況が大きく改善し、最高出力 234 kW・効率 30%以上を達成した。このときモード競合はない。このことは、我々の設計コンセプトの妥当性を実証するものである。さらに、内蔵モードコンバータの動作および十分狭い周波数スペクトルも確認した。パルス幅は 30  $\mu$ s まで延伸した。さらに、ガウスビーム出力および 3 MHz 程度の極めて狭い周波数スペクトルも確認した。この結果を IRMMW-THz 2013 において招待講演により報告した。

プロトタイプ管は目標性能を達成した。CTS 用の実機ジャイロトロンでは、さらに高出力の 300 kW、最長 1 ms 程度のパルス幅で高繰り返し発振を目指す。これには実証した設計コンセプトの下、より高次の動作モードを選定するとともに、電子銃の新規設計が必要になる。すでに候補モードの選定と設計検討も開始し、CTS 計測のための最適周波数を 303 GHz に決定した。

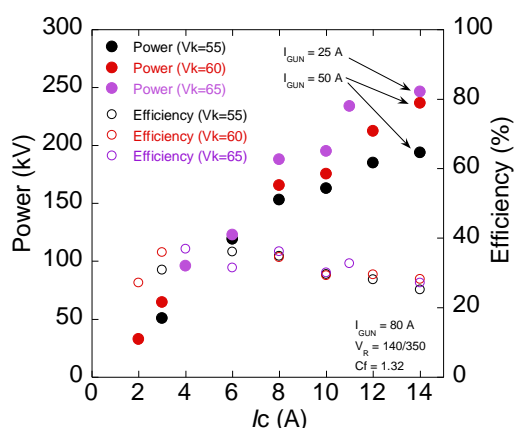


図1 プロトタイプ管出力と効率

### (2) 平成 26 年度の成果

平成 26 年度は、プロトタイプ管の設計コンセプト、さらなる最適化により達成した最高出力 246 kW の達成 (図 1) と動作特性の解析結果を国際会議で招待講演し、Nuclear Fusion 誌に論文発表した。実機ジャイロトロンは高次動作モードに最適化した新規電子銃を含めて出力 300 kW 以上の最終設計を完了して製作を開始し、平成 26 年度中に完成させた。図 2 に断面図、図 3 に写真を示す。周波数は LHD の標準運転磁場に対して、電子サイクロトロン放射強度の谷間になる 303.3 GHz に設定した。発振モードは TE<sub>22,2</sub> mode を採用している。これは、プロトタイプ管と同じく Whispering Gallery Mode であるが、高出力化のために高次のモードを採用した。Vlasov type 放射器と 4 枚のミラー群からなるモードコンバータを内蔵している。真空窓材は、c 軸カット単結晶サファイアである。厚さは 303.3 GHz に最適化している。CTS 計測用と

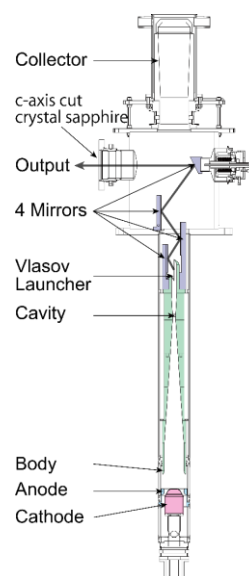


図2 実機断面



図3 実機写真

して、CW 仕様とはせず、最大デューティ比 10% の設計である。

### (3) 平成 27 年度の成果

平成 27 年度早々から実機ジャイロトロンの動作試験を開始した。まず周波数計測を行い、設計通りの周波数で、TE<sub>22,2</sub> mode が発振することを確認した。さらに、ファブリ・ペロー干渉計を用いて複数モード発振の有無を調べて、TE<sub>22,2</sub> mode の単独発振を確認した。続いて、真空窓から放射される電磁波ビームの形状を計測した。図 4 に 1 例を示す。中心軸上にピークがある強度分布で放射されている。図上の点線で示す水平方向及び垂直方向の強度分布を調べると、ほぼガウス分布である。これにより、内蔵モードコンバータの動作確認ができた。

図 5 に出力計測の結果を示す。ビーム電圧を

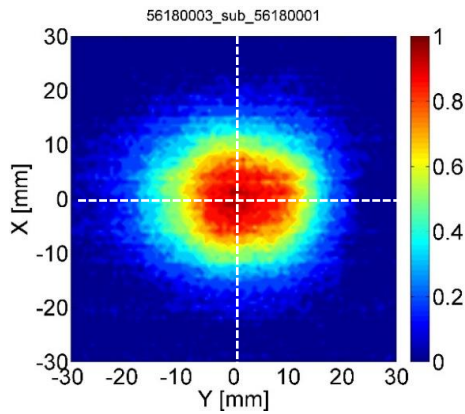


図4 放射パターンの例

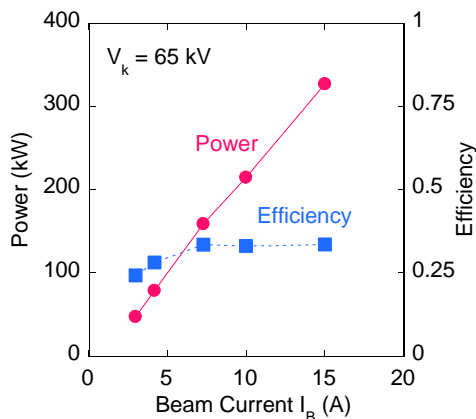


図5 出力のビーム電流依存性と効率

設計値の 65 kV とし、ビーム電流を変えて水負荷を用いて出力を計測した。ジャイロトロンでは、ビーム電流により磁場強度等の最適パラメーターが変わるため、データ点毎に運転パラメーターを最適化している。出力はビーム電流とともに増大し、最高 320 kW に達した。効率も 30% 以上である。ただし、短パルス発振である。これは、福井大学の電源容量の問題と電子銃を絶縁油槽中に置いているためである。ビーム電圧を 60 kV に下げて沿面放電の危険性を避けつつパルス幅を伸ばしたところ、200 kW 以上の運転パラメーターで 50  $\mu$ s を超えるパルス幅まで確認できた。

以上、実機ジャイロトロンは当初目標通りの性能で完成させることができた。

#### (4) 平成 28 年度の成果

CTS 計測への適用のために、パルス幅を伸ばしてパルス中の周波数変化の有無を調べた。図 6 はパルス幅伸張の結果を示す。最長パルス幅 80  $\mu$ s まで試験し、安定な発振を確認した。積分モードで動作しているパイロ検出器信号が直線的に上昇していることは、パルス幅中出力が一定であることを示している。CTS 計測への適用では、このパルス幅で問題ないと考えられる。ヘテロダイン受信系を用いてパルス幅中の周波数変化を計測した。その結果、発振周波数は一定で周波数スペクト

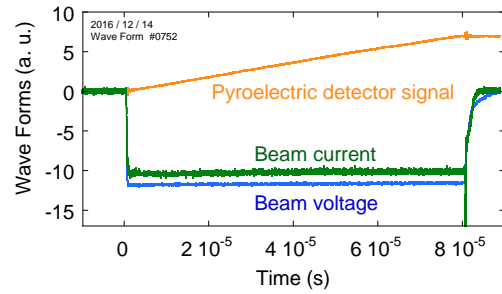


図6 80  $\mu$ s 幅の発振波形。ビーム電圧、電流はそれぞれ 60 kV、10 A である。

ルは十分狭いことが確認された。さらに、発振パルスの開始および終了時にも不要モードの発振がないことも確かめられた。

#### (5) 当初目的に対する達成度

(1) 0.3 THz 帯、出力 300 kW 級、パルス幅最大 80  $\mu$ s の STG を開発し、高効率発振を実現した。内蔵モードコンバータの動作を確認し、そのまま CTS に適用可能なガウスビーム出力ジャイロトロンとして完成させた。

(2) 高出力 STG の動的発展過程に関する学術的知見

高出力ジャイロトロンでしばしば観測される発振パルスの立ち上がりフェーズでの寄生モードの発振は、電子ビームの加速電圧の立ち上がりを十分早くできないため、電子サイクロトロン周波数が時間的に変化し、初めに高周波側のモードが発振しやすくなるからである。一方、製作したジャイロトロンは発振パルスの立ち上がり、立ち下がりフェーズを含めて全パルス幅中で寄生モードの発振がない。本課題で製作したジャイロトロンの電源には、極めて立ち上がり時間の早い半導体スイッチを用いている。このことが寄生モードのない発振に効果があるかどうかを、国際共同研究により理論的に調べた。ジャイロトロン動作の解析コードに電子ビームの加速電圧の時間変化を取り入れ、実際の動作パラメーターを用いてジャイロトロン発振の時間発展を詳細に分析したところ、非常に速い電圧立ち上がりが寄生モードの抑制に効果的であることがわかった。

(3) 結果を普遍化し、高効率・高出力 STG の系統的設計手法の確立

本課題を通して、Whispering Gallery Mode の利点を明らかにし、プロトタイプ管と合わせて複数のモードに対して電子銃から共振器、さらにモード変換器に至るジャイロトロンの全体設計コンセプトと設計手法を確立することができた。

#### 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 10 件)

- ① Teruo SAITO, Yuusuke YAMAGUCHI, Yoshinori TATEMATSU, Masafumi FUKUNARI, Takumi HIROBE, Shunsuke TANAKA, Ryuji SHINBAYASHI, Takashi SHIMOZUMA, Shin KUBO, Kenji TANAKA and Masaki NISHIURA, Development of 300 GHz Band Gyrotron for Collective Thomson Scattering Diagnostics in the Large Helical Device, Plasma and Fusion Research, Vol.12, 206013(2pages), 2017. 査読有  
10.1585/pfr.12.1206013
- ② O. Dumbrajs, T. Saito, Y. Tatematsu, and Y. Yamaguchi, Influence of the electron velocity spread and the beam width on the efficiency and mode competition in the high-power pulsed gyrotron for 300 GHz band collective Thomson scattering diagnostics in the large helical device, Physics of Plasmas, Vol.23, 093109(8pages), 2016. 査読有  
10.1063/1.4962575
- ③ O. Dumbrajs, T. Saito, and Y. Tatematsu, Start-up scenario of a high-power pulsed gyrotron for 300 GHz band collective Thomson scattering diagnostics in the large helical device, Vol.23, 023106(9pages), 2016. 査読有  
10.1063/1.4941703
- ④ Y. Yamaguchi, J. Kasa, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Kotera, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka and M. Nishiura, High power 303 GHz gyrotron for CTS in LHD, Journal of Instrumentation, Vol.10, C10002(10pages), 2015. 査読有  
10.1088/1748-0221/10/10/C10002
- ⑤ Yuusuke Yamaguchi, Teruo Saito, Yoshinori Tatematsu, Shinji Ikeuchi, Vladimir N Manuilov, Jun Kasa, Masaki Kotera, Toshitaka Idehara, Shin Kubo, Takashi Shimozuma, Kenji Tanaka, Masaki Nishiura, High-power pulsed gyrotron for 300-GHz-band collective Thomson scattering diagnostics in the Large Helical Device, Nuclear Fusion, Vol.55, 13002(10pages), 2015. 査読有  
10.1088/0029-5515/55/1/013002
- ⑥ Yuusuke YAMAGUCHI, Teruo SAITO, Yoshinori TATEMATSU, Shinji IKEUCHI, Jun KASA, Masaki KOTERA, Isamu OGAWA, Toshitaka IDEHARA, Shin KUBO, Takashi SHIMOZUMA, Masaki NISHIURA, Kenji TANAKA, Experiment for Over 200 kW Oscillation of a 295 GHz Pulse Gyrotron, Plasma and Fusion Research, Vol.8, 201312(3pages), 2013. 査読有  
10.1585/pfr.8.1205165

[学会発表] (計32件)

- ① 斉藤輝雄, 山口裕資, 立松芳典, 福成雅史、廣部匠、田中俊輔、新林竜志、下妻隆、久保伸、田中謙治、西浦正樹、O. Dumbrajs、LHDにおける協同トムソン散乱への適用を目指した300GHz帯高出力ジャイロトロンの開発、第33回プラズマ・核融合学会年会、2016年12月1日、仙台市、招待講演
- ② Y. Yamaguchi, J. Kasa, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Kotera, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka and M. Nishiura, High power 303 GHz gyrotron for CTS in LHD, 17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2015年10月、札幌市
- ③ T. Saito, J. Kasa, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, M. Kotera, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka and M. Nishiura, Development of a High Power 300 GHz Band Gyrotron for Practical Use in Collective Thomson Scattering Diagnostics in LHD, 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015年8月、Hong Kong (China)
- ④ T. Saito, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, J. Kasa, M. Kotera, T. Idehara, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka, M. Nishiura, Development of a High Power 300 GHz Band Gyrotron for Collective Thomson Scattering Diagnostics in LHD, 9th International Workshop on Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications、2014年7月、N. Novgorod (Russia) 招待講演
- ⑤ 池内真司, 山口裕資, 笠純、小寺正輝, 齊藤輝雄, 立松芳典, 小川勇, 出原敏孝、300GHz帯の高出力パルスジャイロトロンの開発、第30回プラズマ・核融合学会年会、2013年12月、東京都
6. 研究組織
- (1) 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
- (2) 研究分担者  
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) 研究分担者  
山口裕資 (YAMAGUCHI, Yuusuke)  
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・

特命助教

研究者番号：10466675

(4)研究分担者

久保 伸 (KUBO, Shin)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：80170025

(5)研究分担者

田中 謙治 (KUBO, Shin)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：50260047

(6)連携研究者

下妻 隆 (SHIMOZUMA, Takashi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：80270487

(6)連携研究者

西浦 正樹 (NISHIURA, Masaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・

准教授

研究者番号：60360616