

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 7 月 2 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249135

研究課題名(和文)大電力テラヘルツジャイロトロンの開発と発振ダイナミクスの研究

研究課題名(英文)Study of high power terahertz gyrotron and its oscillation dynamics

研究代表者

坂本 慶司 (Sakamoto, Keishi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉材料研究開発部・部長(定常)

研究者番号：90343904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,900,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉のプラズマ加熱電流駆動が必要と想定される周波数0.2~0.3テラヘルツ帯ジャイロトロンの開発研究を行った。周波数0.3テラヘルツにおいて、これまでに例のないレベルの高次モードである円筒共振器内の発振モードTE<sub>32,18</sub>の安定発振を目標として、その発振特性実験を行い、目標の0.5メガワットを上回る出力0.62メガワットが達成された。さらに空洞共振器の磁場をスキャンすることにより、0.226テラヘルツから0.254テラヘルツまでの0.3メガワットレベルの発振を実証した。

研究成果の概要(英文)：Research and development of a 0.2 - 0.3 terahertz band gyrotron for plasma heating current driving of a nuclear fusion reactor was carried out. At the frequency of 0.3 terahertz, oscillation characteristic experiments were performed with the aim of stable oscillation at the TE<sub>32,18</sub> mode in a cylindrical resonator which is an unprecedented level higher order mode so far, and an output 0.62 megawatt exceeding the target 0.5 megawatt was achieved. Furthermore, by scanning the magnetic field of the cavity resonator, step tunable oscillation of 0.3 megawatt level from 0.226 terahertz to 0.254 terahertz was demonstrated.

研究分野：ジャイロトロンの開発研究

キーワード：ジャイロトロン テラヘルツ波 大電力 核融合 電子サイクロトロン プラズマ加熱電流駆動

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電子サイクロトロン共鳴加熱電流駆動 (EC H&CD) の特長と役割

EC H&CD システムは、ITER でもプラズマ着火、立ち上げ、自己点火までの加熱の他、プラズマ不安定の抑制など、幅広い用途が期待されている。工学的にも、大電力発振源(ジャイロトロン)を核融合炉から遠い位置に設置できる、入射系が簡素で入射電力密度を高くできブランケットへの影響を最小限にできる、中性子遮蔽が比較的容易、ジャイロトロン交換などのメンテナンスが容易、など、原型炉に最も適した加熱電流駆動システムである。

(2) 原型炉に向けた課題と大電力テラヘルツ波ジャイロトロンの必要性

ITER では 1993 年にジャイロトロンの周波数として、当時極めて挑戦的であった周波数 0.17 テラヘルツ(以下、1 テラヘルツを 1000GHz に変換する)が設定され、170GHz の EC H&CD システムの研究開発が世界的に行われてきた。最近の原型炉設計では、原型炉では周波数 200GHz~300GHz のサブテラヘルツ波が必要とされ、さらにトカマク上部ポートから入射することにより、電流駆動効率を中性粒子加熱と同程度に向上させることができるとの研究が報告され、ますますその重要性が増している。

(3) 大電力長パルスジャイロトロン研究の現状

申請者のグループでは、長年大電力ジャイロトロンの研究開発を進めてきた。これまで、(a)エネルギー回収ジャイロトロンを開発し、DC 電力から電磁波電力への変換効率を 30% から 50%に大きく引き上げることに成功 (Physical Review Letters,73,3532(1994))、(b)人工ダイヤを出力窓に適用し、長パルス化への道を開く (Rev.Sci.Inst.,70,208 (1999)) などのブレークスルーにより、世界のジャイロトロンの研究を先導してきた。これらの研究成果は、量子科学技術研究開発機構(旧日本原子力研究開発機構)の JT-60U 用 4MW,110GHz の EC H&CD システム、核融合科学研究の大型ヘリカル装置 (LHD) 用 77GHz, 3MW 電子加熱装置をはじめ多くのプラズマ装置に適用され、JT-60U/LHD における電子温度 3 億度 / 2 億度の達成などに貢献した。さらに、ITER の 20MW, 170GHz の EC H&CD 装置用ジャイロトロンとして適用される予定である。なお、「世界初のエネルギー回収ジャイロトロン」は、2009 年に国立科学博物館より重要科学技術資料(未来技術遺産)として登録されている。

(c)さらにこれらを発展させ周波数 170GHz において、電子ビームパラメータの能動制御により、非線形発振領域 (hard excitation region) 内の高効率領域発振に成功し、電子ビームの DC パワーから電磁波への総合変換効率として約 60% を得た (Nature Phys.,3,411(2007))。これらの 170GHz ジャイロトロンの開発で得た知見をベースに、次のターゲットである未踏の高次モード発振による 200GHz~300GHz ジャイロトロンの開発を進めた。

## 2. 研究の目的

この研究では、原型炉に必要とされる、周波数領域(200GHz~300GHz)における 1MW 級ジャイロトロンの開発につながるサブテラヘルツ波ジャイロトロンの開発研究を行うことを目的とする。現在の大電力ジャイロトロンは 170GHz が上限であり、200GHz 帯

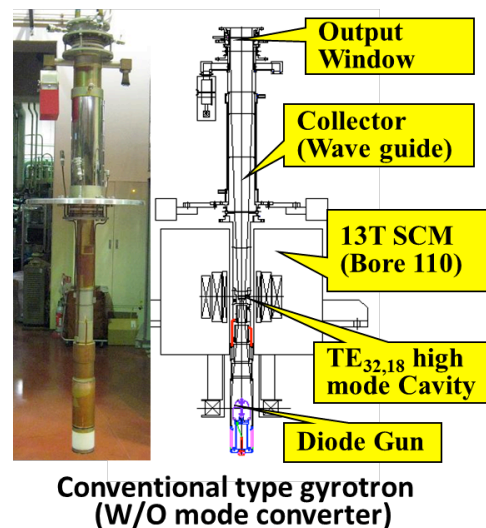


図1 テラヘルツジャイロトロンの写真(左)と断面図。

大電力ジャイロトロンは新たに開発する必要がある。特に、ジャイロトロンでは共振器の熱負荷が周波数の 2.5 乗に比例して増加するため、共振器サイズを大きくして熱負荷を下げる必要がある、そのためこれまでに経験のない高い次数の共振モードによる安定発振を実現させる必要がある。EU やロシアでは、これを安定化させるために同軸共振器の試みがなされ、原理検証はされたが、長パルス発振に向けた研究の進展は見られない。この特に困難が予想される高次モードにおける大電力サブテラヘルツ波の単一モード発振の実証が本研究の中心である。さらにモー

ド変換器や伝送技術の研究開発検討を行い、原型炉の加熱電流駆動装置に技術的見通しを与えることを目的とする。

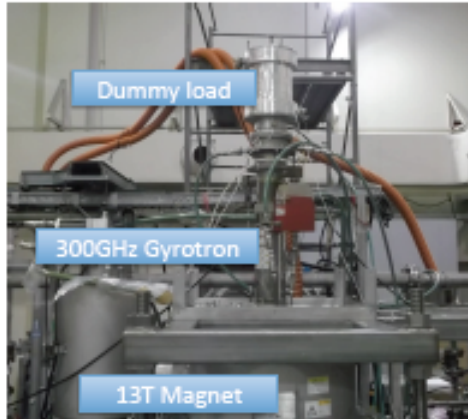


図2 テストスタンドに装着された13T超伝導コイル、テラヘルツジャイロトロン(300GHzジャイロトロン)、出力を吸収するダミーロード。電子銃には、80kVまで印加可能。

### 3. 研究の方法

図1に示すテラヘルツ発振試験ジャイロトロンを用いた発振実験特性実験を行う。ジャイロトロンは、円筒電子ビームを発生する電子銃、電子ビームのエネルギーをサイクロトロン共鳴メーザーの原理でテラヘルツ波のエネルギーに変換するための空洞共振器、発振相互作用を終えた電子ビームを吸収するとともに、発振したテラヘルツ波を伝送させる役割を持つコレクタ、テラヘルツ波を外部に出力するための人工サファイア製の出力窓から構成される。出力窓の厚みは2.79mm全長は1987mmである。室温ボア径が110mmの超伝導ソレノイドコイルに挿入するため、ジャイロトロンの電子銃から空洞共振器ま

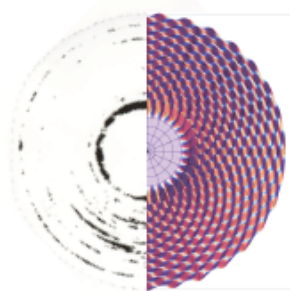


図3右: TE32,18モードの電界分布(計算値)。300GHzで1/32回転する。左: 実験で得られた感熱紙上に現れたバーンパターン。右で示した電界パターンが回転するため、実験では図のように同心円のバーンパターンとして観測される。

での外形は110mm以下となっている。そのため、電子銃は2極電子銃を採用しており、電子ビームを発生するエミッターは直径73mm、幅3.6mmで、磁場と引き出し電界に角度を付けることにより、回転電子ビームを生成する。

空洞共振器は円筒型のオープン空洞型である。共振モードTE32,18を励起することにより300GHz帯の発振が得られる設計としている(共振器のQ値は、2500)。このモードを採用することにより、共振器としての内径が31.6mmまで広がるため、300GHz/0.5MW発振において、空洞共振器への熱負荷を連続出力に耐えうるレベルまで抑制する事ができる(抵抗損失による空洞共振器内壁の最大熱負荷は20MW/m<sup>2</sup>)。

電子エミッターと空洞共振器の距離は520mmであり、磁場のミラー効果を利用し、共振器部で回転速度/進行速度=1.2程度の回転電子ビームを得る設計となっている。電子ビームのエネルギーは60keV~80keVを想定している。

図2は、テストスタンドに設置された13テラ超伝導磁石とジャイロトロンである。

発振電力測定は、ジャイロトロン出力窓外部に取り付けた、炭化ケイ素(SiC)をRF吸収体としたダミーロードの冷却水温度上昇から同定した。計測用アンテナでサンプリングされた出力信号は、ヘテロダイン検波方式でDC-2.5GHzの範囲のIF信号に変換され、周波数分析するとともに各モードの時間発展を計測される。

### 4. 研究成果

#### 4.1 発振実験I

実験では、短パルスの大電力電源(電圧80kV、電流40A、パルス幅2ミリ秒程度)を用い、まずビームコンディショニング、ジャイロトン中心軸と磁場の軸の間の精密な軸合わせを行いテラヘルツ波の発振を確認した。図3の左側は、出力窓上に置かれた感熱紙で検出されたテラヘルツ波のいわゆるバーンパターンである。図3の右側は、TE32,18モード電界強度(絶対値)の等高線を示しており、この電界分布が回転しているため、実験的には左図のように、同心円状の強度分布となって検出される。検出された周波数とこの出力パターン及び回転方向より、発振モードTE32,18が同定できた。(ここで、共振器においては、内側の第一ピークの位置に円筒電子ビームを打ち込む事により、TE32,18モードが選択的に励起される)。

次に、空洞磁場、電子銃磁場をパラメータとして発振領域の詳細なスキャンを行なっ

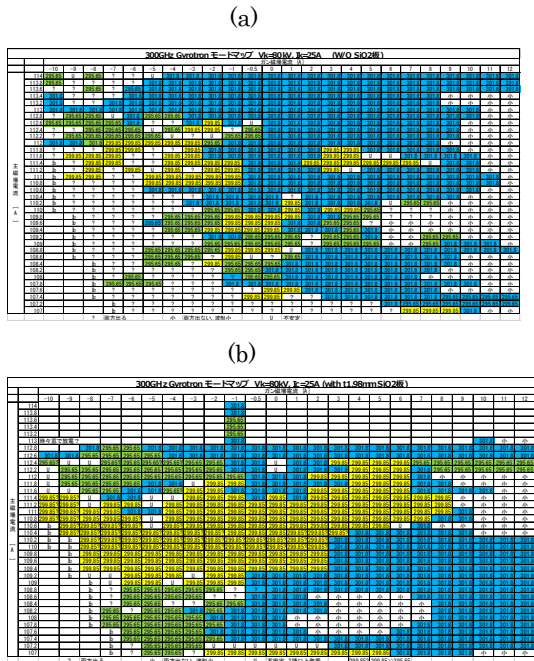


図4 テラヘルツジャイロトロンが発振領域。主モード(黄色): TE<sub>31,18</sub>モード(299.85GHz)、競合モード(青): TE<sub>30,19</sub>モード(301.8GHz)  
(a) 出力窓に SiO<sub>2</sub> ディスク(1.98mm)を載せない時  
(b) 出力窓に SiO<sub>2</sub> ディスク(1.98mm)を載せた時

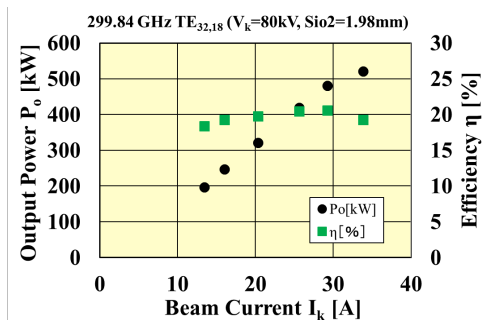


図5 TE<sub>31,18</sub>モード出力のビーム電流依存性。ビーム電圧 80kV, 測定周波数 299.84GHz.

た。図4はその結果である。空洞共振器の磁場をスキャンすることにより発振モードを制御するとともに、電子銃磁場を制御し、電子ビーム位置とピッチファクタを最適化する。出力窓は 300GHz で反射率が 0% となるよう設計されている。実験の結果、図4(a)のように、目的の TE<sub>32,18</sub>モード(299.84GHz)は観測されたものの、より広い範囲で競合の TE<sub>30,19</sub>モードが観測された。これは、TE<sub>30,19</sub>モードは窓で 23% の RF 電力が反射されるため、共振器と窓の間で RF が閉じ込められた結果、共振器における Q 値が上昇し、より強い電子ビームと TE<sub>30,19</sub>モード

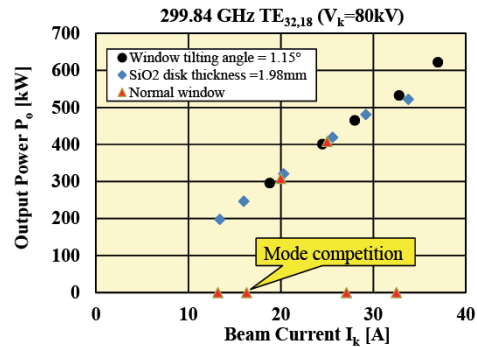


図6 TE<sub>31,18</sub>モード出力のビーム電流依存性。ビーム電圧 80kV, 測定周波数 299.84GHz.

菱形(青): SiO<sub>2</sub> ディスクありで、窓傾けなし。  
丸(黒): SiO<sub>2</sub> ディスクなし。窓 1.15 度傾け。  
三角(赤) SiO<sub>2</sub> ディスクなし。窓傾けなし。

ドの相互作用が生じ、TE<sub>32,12</sub>モードの発振が抑制されたものと考えられる。そこで、出力窓上に SiO<sub>2</sub> 製のディスクを乗せた。これにより、逆に競合モード TE<sub>30,19</sub>の反射が 2% に抑えられ、目的モードの反射が 23% となる。この結果、図4(b)のように目的モードの発振領域が大きく拡大した。これまでに得られた各モードの最大電力は、299.84GHz (TE<sub>32,18</sub>) で 522kW、295.65GHz (TE<sub>31,18</sub>) で 542kW、301.8GHz (TE<sub>30,19</sub>) で 528kW であり、20% を超える発振効率が得られた。図5に、TE<sub>32,18</sub>モードにおける電流と出力の依存性を示す。電流とともに出力が伸びていることがわかる。なお、TE<sub>32,18</sub>レベルの高次モードで 300GHz の 500kW レベルの発振を達成した例は、世界的にもこれが初であった。

#### 4.2 発振実験 II

これまで出力窓はジャイロトロン軸に対して垂直に設置されており、出力電磁波が出力窓で反射される場合、同じモードで反射される。その結果、共振器と窓との間で多重反射が生じ、空洞共振器の Q 値の上昇が起こったものと考えられる。これを防ぐため、ジャイロトロン出力窓の傾きを調整できる改造を行った。出力窓からの反射波を多くのモードの合成波とすることで、Q 値の上昇を防ぐ効果が期待できる。そこで、その改造ジャイロトロンを用いて窓の傾きを新しいパラメータとして発振特性実験を行った。ジャイロトロン電子ビーム電圧とビーム電流を固定し、発振部の磁場(サイクロトロン周波数に対応)とビーム位置を調整することでその発振依存性を調べた。出力窓の傾きを 1.15



## 220 - 240 GHz Oscillation by 300 GHz Gyrotron

Magnetic Field at Cavity [T]	Beam Radius [mm]	Estimated Oscillation Mode	Estimated Frequency [GHz]
10.11	5.57	TE <sub>28,15</sub> <sup>(c)</sup>	253.99
9.80	5.58	TE <sub>27,15</sub> <sup>(c)</sup>	250.04
9.60	5.59	TE <sub>28,14</sub> <sup>(c)</sup>	243.9
9.54	5.59	TE <sub>25,15</sub> <sup>(+)</sup>	242.1
9.43	5.6	?	?
9.07	5.61	TE <sub>24,14</sub> <sup>(+)</sup>	228.13
8.90	5.62	TE <sub>26,13</sub> <sup>(c)</sup>	225.96

表1 テラヘルツジャイロトロン空洞共振器磁場をスキャンした時に得られた低周波数側モードの出力。

度傾けたところ、これまでTE<sub>32,18</sub>モードの発振が得られなかった領域でTE<sub>32,18</sub>モードが得られるようになり、その発振出力の電子ビーム電流依存性は、SiO<sub>2</sub>ディスクを乗せた時と同様の値を示した。図6に、出力の電流依存性を示す。発振効率率は約21%で、目標の500kWを上回る最大620kWの出力が得られた。これらの結果は、反射波の存在により空洞共振器のQ値に影響を与えるが、ある一定の出力値で発振が落ち着くよう自己組織化されている可能性を示唆している。ジャイロトロンの発振を、外部出力回路から制御できる可能性も考えられる興味深い結果である。

### 4.3 発振実験 III

さらに超電導コイルの主磁場とガン磁場を調整することにより共振器における磁場を低周波数側にスキャンし、低周波数での発振とステップ周波数可変を試みた。実験の結果、共振器磁場を8.9T~10.11Tの範囲でスキャンすることにより、発振周波数として226GHz~254GHzの300kWレベルの発振(効率約20%)が確認された。同定された周波数と出力を表1にまとめる。

原型炉設計においては、より低いトロイダル磁場設計が採用される可能性があり、これに対応し、200GHz帯電子サイクロトロン共鳴加熱電流駆動(ECH&CD)装置が要求される可能性があるとともに、ステップ周波数可変ジャイロトロンの発振実証となる結果である。これらの結果は、広い周波数範囲のECH&CDの設計が可能であることを示す結果である。

### 4.4 モード変換器の設計

ジャイロロン出力を長距離伝送する為には、高次モードの出力を伝送に適したガウス型モードに変換する必要があり、そのためモード変換器の設計を行った。共振器の下流の円筒型伝送部の表面に摂動を入れ、あえて多数の別モードを発生させて、多モード間の干渉でガウスビームのプロファイルが形

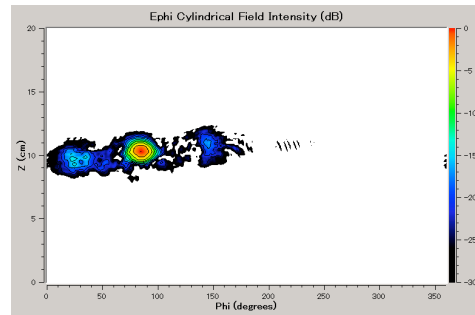


図7 ジャイロトロンに内蔵可能なモード変換器による出力の放射パターン(設計値、円筒座標、logスケール。85度、z=10.5cmにガウスビームが形成され、88.7%のパワーが最初のミラーに集光可能である。)

成されるよう設計するものである。そのガウス型ビームは外部に放射され、準光学的に伝送することができる。図7は発振モードTE<sub>32,18</sub>から得られた放射パターンである(logスケール)。円筒座標で85度、z=10.5cmの位置にガウス型放射光が得られ、88.7%の出力が集光ミラーまで伝送できる。一方、25度、150度付近のサードローブがあり、これを消すことにより伝送効率の向上を図る。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

① T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Idei, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, M. Okada, Y. Nakashima, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Ito, K. Hanada, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka

“Development of over-MW gyrotrons for fusion at 14 GHz to sub-THz frequencies”

Nuclear Fusion 57 April (2017) 066001 (9pp)

<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6875>

② T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, Y. Endo, R. Ikezoe, Y. Nakashima, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, T. Kobayashi, S. Moriyama, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Takahashi, H. Igami, S. Ito, K. Okada, S. Kobayashi, T. Mutoh, H. Idei, K. Hanada, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka

“Development of Over MW Gyrotrons for Fusion at Frequencies from 14 GHz to Sub-terahertz” Proceedings of the 26th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2016) (Kyoto, Japan, 17–22 October, 2016) FIP/1-6Rc

③ T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, T. Eguchi, T. Kato, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K.

Sakamoto, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki, F. Sano, M. Ono, Y. Mitsunaka, "Development of gyrotrons for fusion with power exceeding 1 MW over at wide frequency range" Nucl. Fusion Vol.55, No.9 September (2015) 093009.

[学会発表] (計 14 件)

① Keishi Sakamoto, et al., "Development of Sub-Terahertz Gyrotron for DEMO" The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017) and The 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST 2017) 7-9 March (2017) (University of Fukui, Fukui, Japan)

② Keishi Sakamoto, et al., "Study of High Power and High Frequency Gyrotron for Fusion Reactor" 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017) Aug. 27-Sep. 1 (2017) (Cancun, Mexico) DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2017.8066987 招待

③ T. Kariya, et al., "Status of Collaborative Research of Gyrotron Developments at University of Tsukuba" Plasma Conference 2017 Nov.20-24 (2017) (姫路商工会議所) 23P-40.

④ 假家 強、他、"核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発" J. Plasma Fusion Res. Vol.93, No.3 (2017) 146-14.

⑤ T. Kariya, et al., "Development of Over MW Gyrotrons for Fusion at Frequencies from 14 GHz to Sub-terahertz" The 26th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2016) (Kyoto, Japan, 17-22 October, 2016) FIP/1-6RC ORAL and Poster.

⑥ 假家 強、他 "核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発研究", 第33回プラズマ・核融合学会年会(2016年11月29日～12月2日、東北大学青葉山キャンパス) 招待講演

⑦ Keishi Sakamoto, et al., "Preliminary result of 300 GHz short pulse high order mode gyrotron", 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) Tuscon, USA, 14-19 Sept. 2014, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956500.

⑧ Keishi Sakamoto, et al., "Study of Sub-Terahertz high power gyrotron for ECH&CD system of DEMO", 2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS), Antalya, Turkey, DOI: 10.1109/PLASMA.2015.7179922.

⑨ Yasuhisa Oda, et al., "Progress of 300 GHz high order mode gyrotron development", 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015) (Hong Kong, 23 - 28 August 2015) TS-68

⑩ R. Minami, et al., "Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons in University of Tsukuba", Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 JA-EU-US RF Heating Technology Workshop: August 31 (Mon) -September 2(Wed), 2015

⑪ 假家強、他、"DEMO炉用300GHzジャイロトロンの開発"第32回プラズマ・核融合学会 年会(2015年11月24日～27日、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂)

⑫ R. Minami, et al., "Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons for Present ST and Fusion Experiments in University of Tsukuba", 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW-2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas (Princeton University, USA - November 3-6, 2015)

⑬ R. Minami, et al., "Development of Over 1 MW Gyrotrons and ECH Systems in University of Tsukuba", Japan-Korea Workshop on "Physics and Technology of Heating and Current Drive", (22-23 December 2015, JAPAN).

⑭ 坂本慶司、他、"原型炉用電子サイクロトロン加熱電流駆動システムに向けた大電力サブテラヘルツジャイロトロンの研究", Plasma conference 2014 (PLASMA2014)、11月21日、新潟、21aE-6.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂本 慶司 (SAKAMOTO KEISHI)

国立研究開発法人・量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所・核融合炉材料研究開発部・部長  
: 90343904

### (2) 研究分担者

小林 貴之 (KOBAYASHI TAKAYUKI)

国立研究開発法人・量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・ITER プロジェクト部・研究員:10465974

假家 強 (KARIYA TSUYOSHI)

筑波大学・数理物質系・准教授:30451678

小田 靖久 (ODA YASUHISA)

国立研究開発法人・量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・ITER プロジェクト部・研究員:60512209

高橋 幸司 (TAKAHASHI KOJI)

国立研究開発法人・量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・ITER プロジェクト部・上席研究員: 70354644

南 龍太郎 (MINAMI RYUTARO)

筑波大学数理物質系・准教授: 70370476

今井 剛 (IMAI TSUYOSHI)

筑波大学数理物質系・名誉教授:80354637

### (3) 連携研究者

なし。