

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26249141

研究課題名(和文) 原型炉ECHに向けたマルチMWジャイロトロン発振の研究

研究課題名(英文) Development of Multi-MW gyrotron for Demo-Reactor ECH

研究代表者

今井 剛 (IMAI, TSUYOSHI)

筑波大学・数理物質系(名誉教授)・名誉教授

研究者番号：80354637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,100,000円

研究成果の概要(和文)：核融合原型炉の電子サイクロトロン加熱(ECH)システムを革新するマルチメガワットレベルのジャイロトロンの開発研究を行った。周波数28ギガヘルツにおいて、これまでにない高パワーである2MWレベルの発振を目指し、開発の最重要項目である電子銃、モード変換器の開発を行い、電流65 Aで、ほぼ目標に近い1.65メガワットのを達成、この周波数帯での世界記録となる成果である。さらに、電流発振パワー特性が直線的に伸びていることから、電源増力により、さらに高パワーが期待できるデータを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子サイクロトロン加熱は究極のエネルギー源、核融合エネルギーの実現のためのキーテクノロジーの一つであり、その心臓部のミリ波帯マイクロ波管ジャイロトロン開発が、その成否を決める重要な研究である。これまで困難とされていたマルチメガワットのジャイロトロンの開発に関して、本研究で得られた構造が単純な円筒型共振器での1.65MW発振、高効率のモード変換器の開発は、核融合実現を大きく近づけるとともに、ジャイロトロンの応用をさらに拡大する成果である。

研究成果の概要(英文)：Development of Multi-MW gyrotron has been performed for the innovative ECH (Electron Cyclotron Heating) system of fusion Demo-reactor, aiming the target of 2 MW level power. The output power of 1.65 MW with 65 A currents was achieved, which is almost the target level and the world highest in this frequency range. The experimentally obtained linear performance of output power vs electron beam current indicates the higher power is expected with higher currents by the upgrade of the power supply.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：ジャイロトロン 器 電子ビーム ECH 核融合原型炉 ミリ波帯マイクロ波 プラズマ加熱 円筒型共振器 モード変換

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地上の太陽を目指した核融合炉は、人類の究極のエネルギー源とも言われている。その核融合炉を実現するための大きなステップとなる国際協力の実験炉 ITER は現在建設の佳境に入り、最初のプラズマ生成は 2025 年頃と言われ、その ITER の次のステップである原型炉が視野に入ってきた。

#### (1) 原型炉プラズマの特徴と電子サイクロトロン加熱 (ECH) の必要性

原型炉のプラズマは  $10^{20}\text{m}^{-3}$  を大きく超える密度と平均直径 4m 程度のこれまでにない高密度で厚みのあるプラズマである。このような大型・高密度プラズマでは、これまで加熱電流駆動システムとして実績を誇って来た中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱は、静電加速限界と言われている 1 MeV 程度ではプラズマ内部まで到達できず、有効な加熱・電流駆動や分布制御が困難になる。一方、ECH は、電子バーンシュタイン波を用いることにより、密度限界がほぼ解消できることや、通常の ECH に於いても周波数を高くできれば、 $10^{20}\text{m}^{-3}$  を大きく超えるプラズマ加熱・電流駆動も容易である。原型炉において、高密度プラズマに対するアクセスの良さから、主加熱・電流駆動装置としての期待が大きい。工学的にも、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、入射電力密度が高く小さな穴からパワー注入できたためトリチウム増殖ブランケット占有率向上に有利、自在に入射経路を曲げられ中性子遮蔽が比較的容易など、原型炉に極めて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マルチメガワット (MW) ジャイロトロンの必要性

ITER では 70~100 MW の加熱パワーが必要とされ、NBI やイオンサイクロトロン波 (ICRF) 加熱、そしてジャイロトロンを用いた ECH システム (1MW 管 x24 本) の 3 つのシステムが組み合わされて使用される。現在、これらの加熱装置開発が精力的に行われている。研究代表者のグループは、この ITER の ECH システム仕様のジャイロトロン開発を、我々のブレイクスルー技術で世界最初に成功に導き、現在、我々日本が最も先行している。

原型炉では、H モードアクセスや、能動駆動電流割合を確保するために 100 MW 以上の加熱パワーを注入する必要がある。現状では ITER に見られるように 1 MW のジャイロトロンが限界であり、ECH システムは 100 本以上のジャイロトロンを用いたものとなる。ジャイロトロンに加え、それに付随する超伝導コイル、導波管、様々なジャイロトロン駆動用の電源などのコストとメンテナンスが大きな課題となる。これに対して、単管 3-5 MW のジャイロトロンが開発できれば、現在の ITER の ECH システムのジャイロトロン台数程度で 100 MW 以上のシステムの構築が可能となり、大幅なコストとメンテナンス費の低減となる。

#### (3) 大電力長パルスジャイロトロン研究の現状

世界的にも、原型炉用ジャイロトロンは 2MW レベルが必要とされており、EU を中心に同軸共振器を用いたジャイロトロンの開発が進められているが、同軸ジャイロトロンの弱点は信頼性である。研究代表者のグループでは、様々な周波数領域の核融合研究用大電力ジャイロトロンの研究開発を長期にわたり、継続的に進めてきた。これまでに、

エネルギー回収ジャイロトロンの開発の成功 (Phys. Review Letters, 73, 3532 (1994)) により、50% 近い発振総合効率を達成、

人工ダイヤモンド出力窓適用による長パルス化実現 (Rev. Sci. Instr., 70, 208 (1999))、などの先駆的研究により、世界を牽引してきた。これらの研究成果は、多くの装置に適用され、JT-60U での電子温度 3 億度、LHD における 2 億度の達成などに貢献している。以上の実績を基に、原型炉では信頼性、安定性が必須であることから円筒型の共振器での原型炉用ジャイロトロンの開発を進める方針とし、本研究では、システムの革新をもたらすマルチ MW のステップとして、2MW レベルの発振を目指した開発を行った。

### 2. 研究の目的

ジャイロトロンは、超伝導コイルにより軸方向に強力な磁場が印加され、電子銃で加速した電子ビームをパワー源としている。この電子ビームが磁場に沿って円筒型の空洞共振器を通過するときに、共振器内で電磁波と相互作用し、電子ビームのエネルギーの一部が共振した電磁波に変換される。これにより強力な発振が生じ、この電磁波をモード変換器で電磁波ビームとして真空窓から取り出す。相互作用を終えた電子ビームはコレクタに吸収される。

マルチ MW の出力の第一の課題は、電子銃から引き出される大電流の電子ビームの低分散化 (高品質化) である。これまでの電子銃では 50-70A 程度が限度であった。ITER ジャイロトロン、JT-60U 用ジャイロトロン、LHD 用ジャイロトロンに於いても、50A を超えたあたりから、出力が飽和し始め、効率が低下し、パワーが制限される。これは、高電流領域での電子ビームの速度分散が大きくなり発振効率が低下するためである。これを抑制する手法を確立し、大電流領域での高効率発振を実現することが第一の目標である。さらに、共振器で発振した導波管モードの電磁波を準光学モード変換するモード変換器の効率の飛躍的向上等により、管内の浮遊 RF を大幅に低減することにより、マルチ MW での定常の出力の取り出しに見通しをつける。ジャイロトロン開発では、我が国が世界をリードしており、本研究の遂行によりさらに世界を牽引し、ジャイロトロンによるミリ波発振研究の発展、魅力的な加熱装置・発振源の提供に貢献する。

### 3. 研究の方法

これまでの 28 GHz 帯の 1MW ジャイロトロンの実績 (23th FEC2010 FTP/P6-12) と既存管での大電流での課題抽出をベースに、より高電流領域で動作できる電子銃を設計、製作を行うとともに、2 MW 以上の発振が可能となる共振器と超高効率のモード変換器の設計を行い、ジャイロトロンを製作した。また、実験には、筑波大学が所有するジャイロトロン用電源設備を使用した。主要仕様は、数ミリ秒での高繰り返しモードでの運転、機動的な運転が可能で、80kV、電流 65A レベルでの運転が可能である。ジャイロトロンの構造を図 1 に示す。Magnetron Injection Gun (MIG) と呼ばれる電子銃部からの電子ビームとの発振相互作用は、空洞共振器 (Cavity) 内で行われ、ここで発生したミリ波は、モード変換器 (Radiator) で準光学ビームに変換され、ミラー (M1~M4) 及び出力窓 (Window) を介して外部に出力される構造である。ジャイロトロン用電子銃は中空円筒状のビームを形成する構造で、超電導コイルによる軸方向に強力な磁場が印加されている。共振器、モード変換器、電子銃の設計の改良と平行して、既存管を用いた実験により、大電流時の課題を中心に抽出し設計に反映し、新電子銃を製作する。

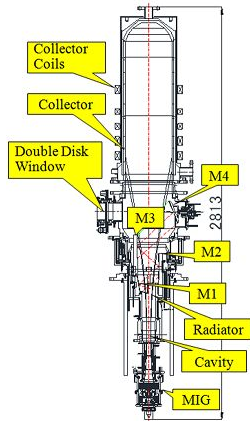


図 1 ジャイロトロン構造図

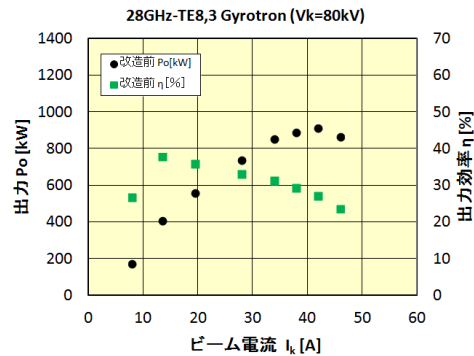


図 2 既存管 1MW ジャイロトロン初期のビーム電流( $I_k$ )-パワー特性

### 4. 研究成果

#### (1) 既存管による実験データと 2 MW 管の設計

28 GHz、1 MW の既存管について、電流領域を拡大して実験したビーム電流( $I_k$ ) - 発振パワー特性の結果を図 2 黒丸に示す。(電子の磁場に垂直速度成分と平行成分の比) の異なる計算値も同時に示している。40 A くらいから飽和し、1 MW レベルで制限されているのがわかる。これは、電子銃から発出される電子ビームの軌道が折り重なり、空間電荷効果が増幅されて電子ビームの分散が大電流領域で大きくなるため、小さい値の運転に制限されると考えられることから、電子銃のカソード面の設計を見直した。カソード面は円錐の途中の円帯状に配置されている。設計では、分散をできるだけ小さくするために、電子銃辺りの磁場分布、カソード面の軸方向に対する角度、アノード電極形状を最適化した。電子銃の軌道のシミュレーションを図 3 に示した。図の楕円で囲んだ領域での折り重なりが大きく、その部分でのビームの重なりを抑制するよう、カソード面やアノード形状の設計改良をした。この改良設計で電子銃を改良した 1MW 管では、分散が抑制でき、50 A 以上でも飽和することなく 1.38 MW のパワーを得ることができた。

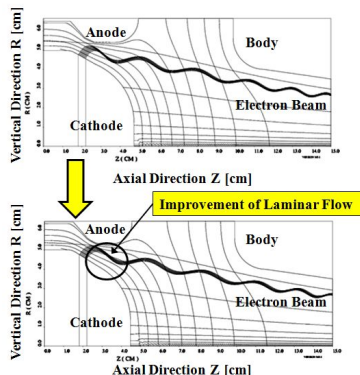


図 3 旧電子銃(上)と改良電子銃(下)の電子ビーム軌道の計算結果

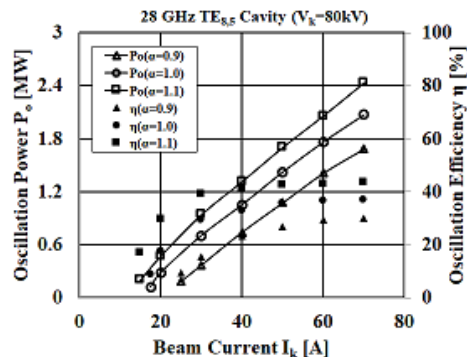


図 4 2 MW ジャイロトロン初期のビーム電流-発振パワー特性の計算結果

新空洞共振器では、動作周波数 28 GHz、2 MW 以上の高パワー領域での動作と効率向上などを考慮し、TE<sub>8,5</sub> モードを選定、空洞の長さを長くし、共振器の Quality factor (Q 値) を大きくした。空洞長や半径、入出力テーパのシミュレーションによる最適化の後に、パラメータを選定した。図 4 は新設計の電子銃と共振器の組み合わせ設計の場合のシミュレーションで得られた電子ビーム電流(I<sub>k</sub>)に対する発振パワーを、 を変化させた時の計算結果を示している。

が 1 程度でも 70 A で 2 MW レベルの出力が得られ、飽和していないことがわかる。高次の共振器を用いるために共振器内電磁波の干渉により多くの電界ピークが存在するが、電界強度の強い内側の第一ピークに円筒型の電子ビームを打ち込むことにより、目的とする共振モードが選択的に励起される。電子ビームは、MIG 電子銃からの円筒状のビームで形成され、磁場に斜めに電子を射出する構造で、磁場に垂直方向の速度成分が共振器内の電磁波と相互作用して発振することから、 は非常に重要なパラメータである。

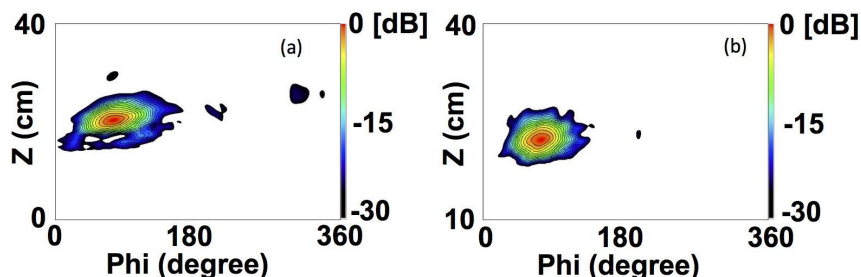


図 5 1 MW と 2 MW ジャイロトロンモード変換器(MC)の放射パターンの比較。  
(a) 1 MW 管 (出力窓までの伝送効率 93.9%)、(b) 2 MW 管 (同 98.5%)

TE<sub>m,n</sub> モードを準光学ビームに変換するためのモード変換器の設計は、定常運転に極めて重要な回折損の低減を中心に最適化を進めた。最適化には、これ迄のジャイロトロン設計で実績のある放射器設計コード LOT/Surf3D を用いた。このコードについては、28GHz から 170GHz での設計経験を生かした最適化を進め、目標を目指した。図 5 は、モード変換器からの放射パターン(軸方向(z)、方位角方向(Phi))を示し、今回の新設計のモード変換器(b)と既存管(a)との設計比較で、放射面での収束が大きく改善されている。既存管では、出力窓までの伝送効率が 93.9%であったものが、これまでの多様なモード変換器の設計経験をベースに改良を進め、出力窓までの伝送効率を 98.5%に向上させることに成功、管内の浮遊 RF を 1/4 に低減した。

新電子銃、新共振器と新モード変換器を装着した 2 MW ジャイロトロンを製作した。その写真を図 6 に示した。表 1 に主要な仕様を示す。長さが 2.8m、重量が約 800kg である。周波数が比較的低いことから、出力窓の材質は人工サファイアである。このジャイロトロンを用いて、発振研究を行った。

表 1 2 MW ジャイロトロン仕様表

Frequency	28 GHz
Output Power	2 MW
Pulse width	3 s
Output efficiency	50% (with CPD)
Beam Voltage	80 A
Beam current	70 A
MIG	Triode
Cavity mode	TE <sub>8,5</sub>
Output mode	Gaussian like
Output window	Sapphire disk



図 6 2MW ジャイロトロン写真

## (2) 初期実験

新電子銃と(1)で述べた新共振器とモード変換器を搭載したジャイロトロン(図6)の試験を行った。100 kV 近い直流電圧の電子銃部を絶縁するオイルタンクの上に約 1 T の超電導コイルを置き、そのボア部にジャイロトロンを挿入した。試験装置の写真を図 7 に示す。出力はサファイアの出力窓からのパワーを直接模擬負荷(吸収材は水冷された SiC)に接続し、冷却水の温度変化から熱的に測定した。

初期の 2MW ジャイロトロンビーム電流 - 発振パワー特性を図 8 の黒丸に示した。1MW レベルまでは線形的にパワーの増大が見られるが、その後、飽和傾向となり、効率が低下し、





図7 筑波大学ジャイロトロン試験装置

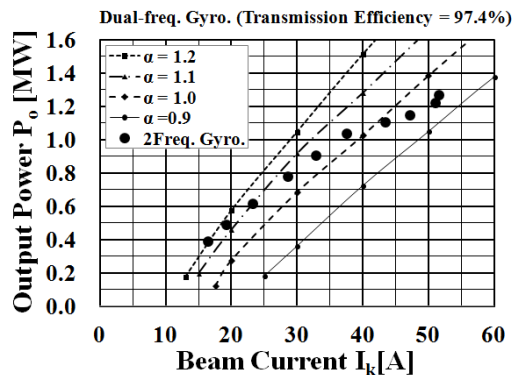


図8 2MW 管のビーム電流—パワー特性の実験と計算結果。

ビーム電流 51.5A で 1.25MW であった。効率の低下傾向が 40A くらいから顕著であることがわかった。電子銃の改善にもかかわらず、パワーの飽和が見られたことから、その原因を明らかにするため、様々なパラメータを変化させて特性を分析した。

カソードパワーに対する MIG のビーム電流の変化を 1MW 管と比較し、2MW 管のカソードは、低いパワーで大きな電流が出ており、これは、カソード面からの電流密度の不均一性を大きくする可能性を示している。また、電子ビームのコレクターに当たる状態を調べるためコレクターの周方向の温度分布を測定し、ビーム軸がずれており、ジャイロトロンの軸対称性もずれていることがわかった。図 8 に、種々の  $\alpha$  の場合のビーム電流-発振パワー特性の計算結果も示し、比較した。高電流領域で、 $\alpha$  が 1 以下の動作になっていることを示している。この特性は、高電流で、予測以上に  $\alpha$  の分散が大きくなっているためと考えられる。改造点が明らかになったことから、これらの点を踏まえて改造を実施することとした。

### (3) 改造後の成果

(1) で述べた問題点を改善するために、電子銃部のアノード形状の見直しによるビーム軌道の改善、カソード面のコンディショニング、ジャイロトン組み立て時の軸対称性の精密な確認などを実施して、改造管を製作した。ジャイロトン試験装置についても大電流領域での運転が可能となるように改造を加え、実験を行った。途中、電源の不具合が生じて、修理を行う期間が必要であったが、初期の特性試験ののちに、図 9 に示したビーム電流-発振パワー特性が得られた。得られた最大発振パワーは、ビーム電流 65 A において 1.65MW (発振周波数 28.04GHz) であり、改造前の 1.25 MW を大きく超えるこの周波数領域での世界最高値を大きく更新した。本研究で使用した電源が 65 A が限界であったことから、1.65 MW にとどまったが、電流に対するパワーの増大は線形的であることから、80 A レベルで 2 MW 以上の出力も期待できる成果が得られた。

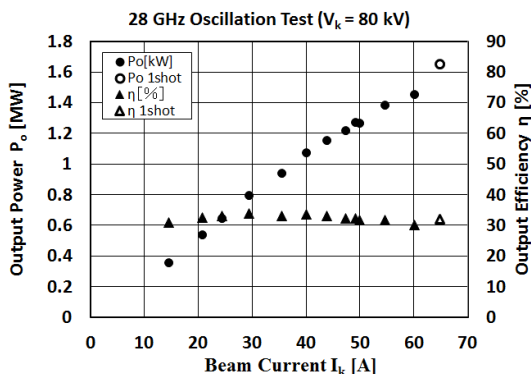


図9 改良・改造後の 2 MW ジャイロトロンのビーム電流 - 発振パワー特性共振器モード  $TE_{8,5}$ ,  $f = 28.04\text{GHz}$

本研究では、原型炉の ECH システムを革新するマルチ MW のジャイロトロンの開発のステップとして、28 GHz で 2 MW レベルのジャイロトロンの発振研究を実施した。原型炉にとって必須の信頼性と安定性を重視して、円筒形の共振器を採用、連続運転に必要な高効率のモード変換器開発とともに、高パワー化を目指した。マルチ MW 化の要である電子ビームの質の向上とモード変換器の高効率化の重要な知見とともに、1.65 MW の発振を達成、マルチ MW での定常動作に貢献する成果が得られた。原型炉では、定常動作に加え、数年レベルでの安定した運転が不可欠であり、本研究での円筒共振器による 2 MW レベルのジャイロトン発振の達成は原型炉に向けて大きく貢献するものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Kariya, R. Minami, T. Imai, M. Okada, F. Motoyoshi, T. Numakura, Y. Nakashima, H. Idei, T. Onchi, K. Hanada, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Kubo, Y. Oda, R. Ikeda, K. Sakamoto, M. Ono, K. Nagasaki, T. Eguchi, Y. Mitsunaka	4. 巻 59
2. 論文標題 Development of High Power Gyrotrons for Advanced Fusion Devices and DEMO	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066009-066018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab0e2c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Idei, T. Onchi, T. Kariya, T. Tsujimura, S. Kubo, S. Kobayashi, M. Sakaguchi, T. Imai, M. Hasegawa, etc.	4. 巻 156A
2. 論文標題 28-GHz ECHCD system with beam focusing launcher on the QUEST spherical tokamak	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 1149-1152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.02.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kariya T., Imai T., Minami R., Sakamoto K., Oda Y., Ikeda R., Shimozuma T., Kubo S., Idei H., Numakura T., Tsumura K., Ebashi Y., Okada M., Nakashima Y., Yoshimura Y., Takahashi H., Ito S., Hanada K., Nagasaki K., Ono M., Eguchi T., Mitsunaka Y.	4. 巻 57
2. 論文標題 Development of over-MW gyrotrons for fusion at 14 GHz to sub-THz frequencies	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066001 ~ 066001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6875">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6875</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 假家強, 今井剛, 南龍太郎, 津村康平, 江橋優斗, 岡田麻希, 中嶋洋輔, 出射浩, 花田和明, 下妻隆, 久保伸, 小田靖久, 池田亮介, 坂本慶司, 小野雅之	4. 巻 93
2. 論文標題 核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 146 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Kariya, T.Imai, R.Minami, K.Tsumura, Y.Ebashi, H.Idei, K.Hanada, M.Ono, K.Komurasaki, T.Numakura, Y.Endo, Y.Nakashima	4. 巻 1771
2. 論文標題 Development of 28/35GHz dual-frequency gyrotron for ECH study	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 30020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: <a href="http://dx.doi.org/10.1063/1.4964176">http://dx.doi.org/10.1063/1.4964176</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Numakura, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, K. Tsumura, Y. Ebashi and S. Kajino	4. 巻 1771
2. 論文標題 Code development for the calculations of time-dependent multimode oscillations in the cavity of the future high-power gyrotrons	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 30023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://dx.doi.org/10.1063/1.4964179">http://dx.doi.org/10.1063/1.4964179</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 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	4. 巻 55
2. 論文標題 Development of gyrotrons for fusion with power exceeding 1 MW over at wide frequency range	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 93009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0029-5515/55/9/093009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Kariya, R. Minami, T. Imai, T. Kato, H. Idei, K. Hanada, H. Zushi, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura	4. 巻 68
2. 論文標題 Development of 28 GHz gyrotron for cooperative ECH study	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Fusion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 147-151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.13182/FST14-848	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, T. Kato, M. Uehara, R. Goto, K. Tsumura, Y. Endo and M. Ichimura	4. 巻 68
2. 論文標題 Design of Mirror Antenna and MW Gyrotron for Control of High Intermittent Heat Flux in GAMMA 10 Tandem Mirror	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Fusion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 142-146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.13182/FST14-869	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計36件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 T. KARIYA, R. MINAMI, T. IMAI, T. NUMAKURA, M. OKADA, Y. ENDO, Y. NAKASHIMA, H. IDEI, T. ONCHI, K. HANADA, T. SHIMOZUMA, Y. YOSHIMURA, H. TAKAHASHI, H. IGAMI, T. TSUJIMURA, S. ITO, S. KOBAYASHI, S. KUBO, K. SAKAMOTO, Y. ODA, R. IKEDA, K. KAJIWARA, K. TAKAHASHI, T. KOBAYASHI, S. MORIYAMA, M. ONO, K. NAGASAKI, etc.
2. 発表標題 Development of High Power Gyrotrons for Advanced Fusion Devices and DEMO
3. 学会等名 The 27th IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryutaro MINAMI, Tsuyoshi KARIYA, Tsuyoshi IMAI, Tomoharu NUMAKURA, Maki OKADA, Toshitaka HOJO, Fumiya MOTOYOSHI, Takuya YABUSA, Nao HIMENO, Yoichi ENDO and Yousuke NAKASHIMA
2. 発表標題 Generation and Measurement of High Intermittent Heat Flux in GAMMA 10/PDX
3. 学会等名 The 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 假家 強
2. 発表標題 EC加熱電流駆動用ジャイロトロンの開発
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 假家 強
2. 発表標題 ミリ波ジャイロトロン開発と応用
3. 学会等名 第35回プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kariya, R. Minami, T. Imai, T. Numakura, Y. Ebashi, T. Shimosuma, S. Kubo, K. Sakamoto, H. Idei, K. Hanada, T. Eguchi, Y. Mitsunaka, Y. Nakashima
2. 発表標題 Status of Collaborative Research of Gyrotron Developments at University of Tsukuba
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.Kariya, T.Imai, R.Minami, K.Tsumura, Y.Ebashi, H.Idei, K.Hanada, M.Ono, K.Komurasaki, T.Numakura, Y.Endo, Y.Nakashima
2. 発表標題 Development of 28/35 GHz dual-frequency gyrotron for ECH study
3. 学会等名 11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement. Budker Institute of Nuclear Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 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. Shimosuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Takahashi, H. Igami, T. Mutoh, H. Idei, K. Hanada, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitunaka, et.,al.
2. 発表標題 Development of Over MW Gyrotrons for Fusion at Frequencies from 14 GHz to Sub-terahertz
3. 学会等名 IAEA-FEC2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 假家 強
2. 発表標題 核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発研究
3. 学会等名 第33回 プラズマ・核融合学会 年会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今井 剛
2. 発表標題 核融合プラズマ加熱用ジャイロトロン開発研究の進展 -筑波大学に於ける研究を中心に-
3. 学会等名 「GHz~THz帯における高電力発振源の開発と応用」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimosuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki, F. Sano, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka
2. 発表標題 Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons in University of Tsukuba
3. 学会等名 Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, Y. Nakashima, T. Shimosuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi and Y. Mitsunaka
2. 発表標題 Development of Over 1 MW Gyrotrons and ECH Systems in University of Tsukuba
3. 学会等名 Japan-Korea Workshop on "Physics and Technology of Heating and Current Drive" (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 T. Imai, T. Kariya, R. Minami, T. Numakura, T. Eguchi, T. Kato, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimozuma, S. Kubo1, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki, F. Sano, M. Ono, Y. Mitsunaka
2. 発表標題 Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons for Fusion
3. 学会等名 25th IAEA Fusion Energy Conference
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 Tsuyoshi Kariya, Tsuyoshi Imai, Ryutaro Minami, Takaki Kato, Keishi Sakamoto, Hiroshi Idei, Hideki Zushi, Kazuaki Hanada, Masayuki Ono, Taku Eguchi, Yoshika Mitsunaka, Tomoharu Numakura, Makoto Ichimura
2. 発表標題 Status of Collaborative Gyrotron developments in University of Tsukuba
3. 学会等名 Plasma 2014 (プラズマ・核融合学会第31回年会)
4. 発表年 2014年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学プラズマ研究センター <a href="http://www.prc.tsukuba.ac.jp/wp/">http://www.prc.tsukuba.ac.jp/wp/</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	假家 強  (Kariya Tsuyoshi)  (30451678)	筑波大学・数理物質系・准教授    (12102)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	南 龍太郎 (Minami Ryutaro) (70370476)	筑波大学・数理物質系・准教授  (12102)	
研究分担者	下妻 隆 (Shimozuma Takashi) (80270487)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  (63902)	
研究分担者	坂本 慶司 (Sakamoto Keishi) (90343904)	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）  (82502)	
研究分担者	森山 伸一 (Moriyama Shinichi) (90354654)	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・部長（定常）  (82502)	