

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06940

研究課題名(和文) コルゲート導波管内メガワットミリ波分布の可視化とモード分析に基づく伝送効率の向上

研究課題名(英文) Visualization of millimeter-wave power profiles in a corrugated waveguide and improvement of transmission efficiency basing on the mode-analyses of transmitted waves

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ加熱のため、メガワット級のミリ波を低損失で長距離(100メートル以上)伝送できる真空化されたコルゲート導波管系において、伝送されるミリ波のパワー分布を、ほぼリアルタイムで計測できる装置を開発した。それは、導波管系の90度マイターバンド部の反射板部の大気側に、ペルチェ素子アレイを構成し、それらを直列接続して定電流駆動することにより、マイターバンド反射板を冷却すると同時に、各素子の電圧変化からその温度変化の情報を得るものである。さらにペルチェ素子の電圧信号の変化より分布を構成するモード成分の分析する方法を提案し、人為的に合成された伝搬波を使って、モード分析が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の核融合発電炉において持続的な発電を達成するためには、水素プラズマを1億度以上まで加熱する必要がある。大きなパワーを持つ高周波数の電磁波(ミリ波)を用いるプラズマの加熱方法では、ミリ波発生装置を核融合炉から十分離れた場所に設置できる利点がある。本研究は、大電力のミリ波を核融合炉から十分離れた場所から低損失で伝送できるコルゲート導波管で、パワー減衰の小さいガウス分布の電界分布を保ったまま100メートル以上伝送するために、導波管系を精密に設置、調整でき、真空化された伝送系内を伝搬するミリ波の状態をほぼリアルタイムで計測できるモニターシステムと伝搬モード分析法を構築することにある。

研究成果の概要(英文)：A power profile monitor of propagating millimeter-waves in an evacuated corrugated waveguide was developed. It consists of a miter-bend reflector and two-dimensional Peltier device array which is attached on the atmospheric side of the miter-bend reflector. The information of surface temperature of a miter-bend mirror can be obtained from the voltage change of each Peltier device which is connected in series and operated with constant current. The temperature information can be obtained from a voltage change of each device. The miter-bend mirror can be cooled at the same time. A method of mode analysis is proposed using the voltage change of each Peltier device. Several examples of the mode analyses are given using the artificially synthesized signals of Peltier devices and the possible problems are pointed out.

研究分野：プラズマ理工学、電磁気学、電磁波工学

キーワード：核融合 プラズマ加熱 大電力ミリ波 ジャイロトロン コルゲート導波管 伝搬モード分析 マイターバンド ペルチェ素子

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの点火及び加熱に使用される 100~200GHz 帯のミリ波を用いた電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)は、入射アンテナに対するポート占有面積も小さく、将来の核融合炉でのプラズマ生成・加熱法として、また局所加熱、電流駆動によるプラズマの制御手段として注目されている。現状メガワット級のミリ波は、ジャイロトロンによって発生され、コルゲート導波管により 100メートル程度の伝送が行われ、準光学ミラー系からなる入射アンテナにより入射、集光され、プラズマ加熱や電流駆動に使用されている。

このような大電力ミリ波の低損失での長距離伝送には、主に波長に比べて管径がはるかに大きいオーバーサイズで、管内壁面に細かい溝を掘ったコルゲート導波管による伝送法が用いられている。このような伝送路においては、伝送モードを出来るだけ単一モードかつ低損失で伝送することが必要不可欠である。コルゲート導波管では、通常 HE<sub>11</sub>モード(電磁界分布はガウス分布に近い)でミリ波を伝送するが、このモードは壁面電流がほとんど流れず、長距離伝送でも減衰が少ない利点がある。さらに、導波管内を真空にすることにより、メガワット級の大電力でも伝送路内でのアーキングを防止できる利点がある。他方、オーバーサイズであるために、ミリ波の導波管への結合調整が不十分である場合、他の高次モードへのモード変換が発生し、パワーの大きな減衰、導波管内でのアーキング、伝搬位相の乱れを引き起こす可能性がある。また、コルゲート導波管入口での不正確なミリ波ビームの結合は、伝送損失の増大を招くだけでなく、モード変換により HE<sub>11</sub>モードを想定して設計された各種コンポーネントが、設計通りに機能しなくなる可能性が起こるため、精密なビーム軸の調整が必要不可欠である。

一般に、コルゲート導波管系のアライメントは、可視のレーザービームを用いて、管軸の直線性を調整している。重力による導波管系のたるみは、適宜支持構造を入れる等で対処している。また発熱による導波管の熱膨張は、十分な冷却により導波管系の変形を最小限に抑えるように対策されている。

そこで、最終的にモード変換発生 の主な原因は、ジャイロトロン出力窓から、位相補正鏡からなる準光学結合器(MOU)を通じて、コルゲート導波管入口へとミリ波を結合させる部分での調整不足となる。さらにジャイロトロン発振初期での周波数の変化と、それによるビーム出射角度の変化も避けられない要因となる。

図1は、導波管入射位置におけるミリ波入射ビーム軸の傾き及び軸ずれが引き起こすモード変換量について文献[1]に基づいて計算したものである。国際熱核融合実験炉 ITER 等で使用される 170GHz 帯では、0.1度の軸の傾き、または導波管半径に対して 7%程度の軸ずれで約 1%のモード変換損失が発生し、傾きや軸ずれ量に応じて急激に増大することが分かる。

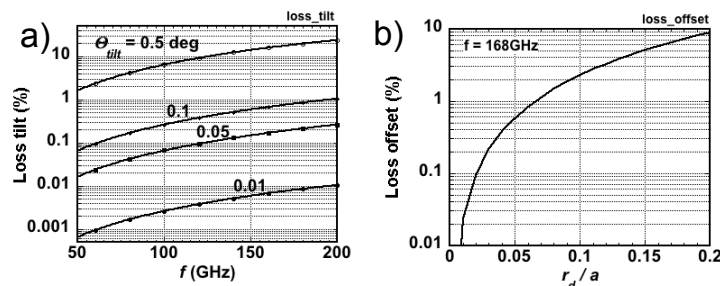


図1: a) 入射ミリ波ビーム軸の傾き角  $\theta$  によるモード変換損失の周波数  $f$  依存性  
b) ビーム軸のずれ  $r_d$  による変換損失。aはコルゲート導波管半径を表す。

### 2. 研究の目的

我々はこれまで、真空排気されたコルゲート導波管内を伝搬するメガワット級のミリ波のパワー分布を、in-situ で測定できるシステムを構築してきた。それは、導波路を 90度曲げる 90度マイターバンドの反射板の大気側に取り付けられ、定電流駆動されたペルチェ素子 2次元アレイの電圧変化から反射板の温度変化情報を取得し、熱除去と同時にミリ波パワー分布を取得できるという画期的なミリ波パワー分布モニターである[2]。

そこで我々は、これまで研究開発してきたミリ波パワー分布モニターを用いて伝搬モード分析を行い、その情報から、ミリ波の導波管導入部でのミスアライメントの原因を推測し、入射ビーム中心軸の位置とその入射角を、自動制御することにより、ECRH システムの運転中に短時間で、伝送効率を最大化する方法を研究開発することを目的とした。本システムの開発、構築により、核融合装置の ECRH システムにおける長距離伝送によるミリ波の損失を最小限に抑え、有効な加熱パワーを最大限に活用でき、さらに正確な加熱モードや入射位置の制御が可能になるものである。

(参考文献)

- [1] K. Ohkubo, *et al.*, “Coupling of Tilting Gaussian Beam with Hybrid Mode in the Corrugated Waveguide”, *Int. J. Infrared and Millim. Waves*, 18 (1997) 23.  
[2] T. Shimosuma, *et al.*, “Development of a Propagating Millimeter-Wave Beam Position and Profile Monitor in the Oversize Corrugated Waveguide Used in an ECRH System”, *J. Infrared Millim. Terahz Waves*, First online: 16 August 2015, DOI 10.1007/s10762-015-0196-y.

### 3. 研究の方法

本研究の方法と進め方は以下の通りである。

- (1) 真空排気されたオーバーサイズ (伝送波の波長に比べて管径が十分大きい) のコルゲート導波管中を伝送される 1MW 級の  $HE_{11}$  モードミリ波 (周波数 50-200GHz 帯) のパワー及びモード純度を低下させることなく、そのパワー分布をほぼリアルタイムで計測できるシステムを構築する。
- (2) その計測システムは、伝送路中の 90° マイターバンド反射板に熱処理能力の高いペルチェ素子をアレイ状に配置したものであり、直列接続で定電流駆動することにより、反射板の冷却と同時に、各素子の電圧変化からマイターバンド反射板の温度分布を計測するものである。500kW 定常ミリ波伝送時でも動作が十分可能である。
- (3) これまで開発してきたミリ波パワー分布モニターによるデータに基づき、コルゲート導波管内を伝搬するミリ波のモード成分を高速で求めるアルゴリズムおよびソフトウェアを開発する。
- (4) 導波管入口での入射ミリ波ビーム軸と導波管軸とのずれ、傾きが、どのような高次モードを発生させるかを、開発したモード分析コードを用いて系統的に調べ、データベース化する。
- (5) 得られたモード成分情報に応じて、MOU 内の位相補正鏡をフィードバック駆動し、アライメントを最適化できるシステムの設計、構築を行う。

### 4. 研究成果

- (1) 高性能ミリ波パワー分布モニターの設計と開発

現実的なメガワット級の ECRH システムでの使用が可能となるように、市場調査を行い、より高出力のミリ波伝送に対応でき、熱処理能力の高い、より小型のペルチェ素子を調査し、調達した。それは 1 素子当たり 10W の熱処理が可能であり、これを使うことによって、パルス運転では 1MW 以上、定常運転で 500kW のミリ波パワーの伝送にも対応可能となるミリ波パワー分布モニターシステムの構築が可能となった。

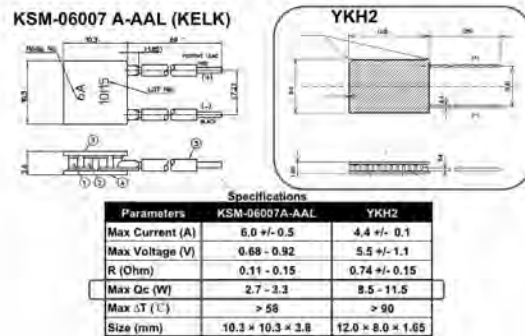
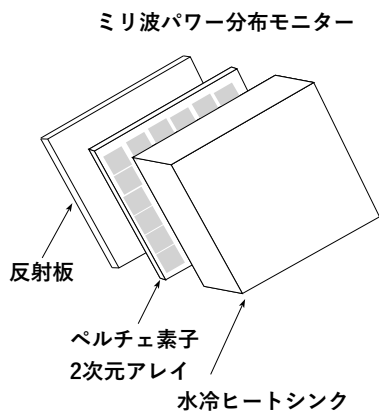


図 2：ミリ波パワー分布モニターの構造図 図 3：ペルチェ素子の性能比較. YKH2 が使用した素子

図 2 は、ミリ波パワー分布モニターの構造の概念図を示している。導波管伝送系における 90° マイターバンドの反射板の部分に、ペルチェ素子アレイを、水冷のヒートシンクによって挟んだ構造になっている。反射板上でミリ波が一部損失し発生した熱は、直列接続で定電流駆動されたペルチェ素子アレイにより冷却されるとともに、反射板側とヒートシンク側の温度差は、電圧の変化として検知される。図 3 は、今回使用したペルチェ素子 YKH2 の形状と性能を示している。これまで使用してきた KSM-06007 に比べて、素子サイズはほとんど同じであるが、吸熱能力がおよそ 3.5 倍に増加している。口径 88.9mm のコルゲート導波管のマイターバンドミラー部に設置した時、従来と同じ 52 素子を配列させることができた。図 4 に、マイターバンドミラー部に構成されたミリ波反射板、プリント基板上に配置されたペルチェ素子アレイ、水冷用ヒートシンクの写真 (左) と、それらを組み上げたミリ波パワー分布モニター (右) の写真を示す。

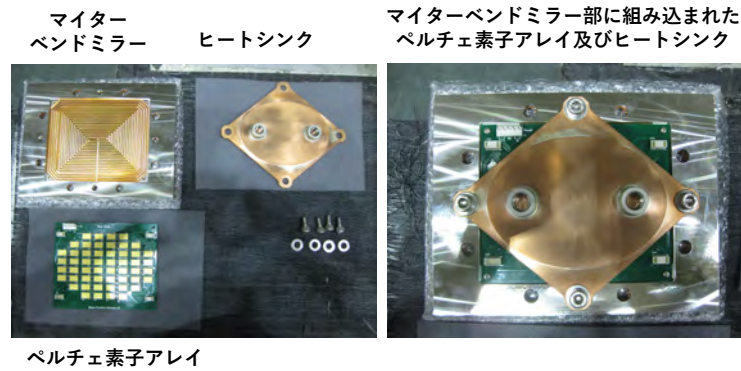


図4：ミリ波パワー分布モニターの構成部品（左）と組立後（右）

### (2) フィードバック制御用ミラー系とフィードバックアルゴリズム

ジャイロトロンからの大出力ミリ波を、伝送のためのコルゲート導波管に結合するミラー系について、フィードバック制御で駆動するため、モーターとエンコーダを用いた機構を試作し、駆動試験を行った。それぞれのミラーについて2軸(水平、垂直)方向にフィードバック制御で駆動できるシステムである。これにより、導波管入口でのミリ波ビームの入射角を、ミリ波パワー分布モニターの信号解析結果に基づいて制御することができる。結合ミラー系のフィードバック制御については、ミラー角度を2軸で自動調整するために、2軸ゴニオステージとその駆動のための2台のモーター系を2組試作し、駆動試験を行った。これらのミラー系は、真空排気された光学的整合ユニット(MOU)内に設置することを前提として、真空対応とした(図5)。

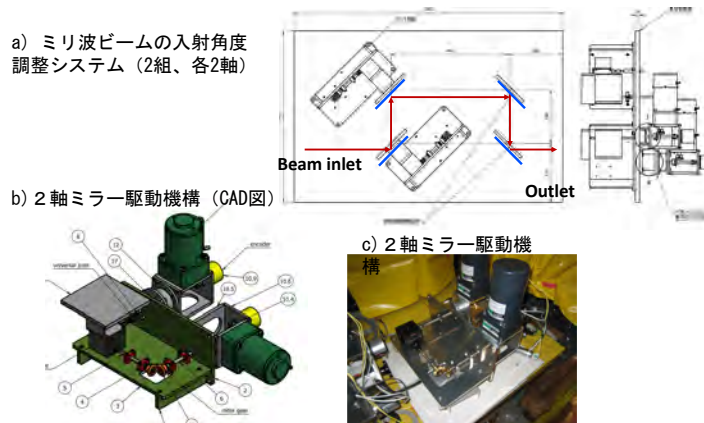


図5：コルゲート導波管へのミリ波ビーム結合調整用ミラー駆動システム

### (3) ミリ波パワー分布モニター信号を用いたモード成分の分析法と分析例

これまで開発してきた、2次元ペルチェ素子アレイより構成されるミリ波パワー分布モニターの信号解析法について、得られた信号よりコルゲート導波管内伝搬のモード成分を分析するためのソフトウェアの開発を行った。それぞれのペルチェ素子の電圧変化より、伝搬モードの強度分布を取得し、それらのデータからモード成分を分析する方法を提案した。モード分析のためのアルゴリズムを図6に示す。

模擬データを用いたモード分析では、今回製作した8×8のペルチェ素子信号でも、HE<sub>11</sub>主モードに加えて、いくつかの低次不要モードを加えた伝搬波について、少なくとも1対のモード分布モニターの信号を使用すれば、ある条件下で正しくモード分析できることが明らかになった。

モード分析法については、モード変換の可能性がある低次の有限個のモードを仮定し、それらの振幅と位相を未知数として、測定されたミリ波強度分布を最適化フィッティングすることにより強度分布を再現し、構成モードの成分を求める方法の高精度化を進めた。その結果、コルゲート導波管入口で仮定した複数のモードとその成分比を、1台～3台までのミリ波パワー分布モニター位置での信号として模擬し、それらの情報から入射モード成分が、正しく分析できるように計算アルゴリズムを改良し、逆にモード成分を決定する試験を行った。その結果、モニターの設置位置として、各モード間のビート波長の1/4の倍数程度を選択することにより、仮定したモードとその成分比が、ほぼ再現できることが分かった。これにより、伝送路におけるミリ波パワー分布モニターの設置位置に対する指針が得られるようになった。解析結果の一例を図7に示す。

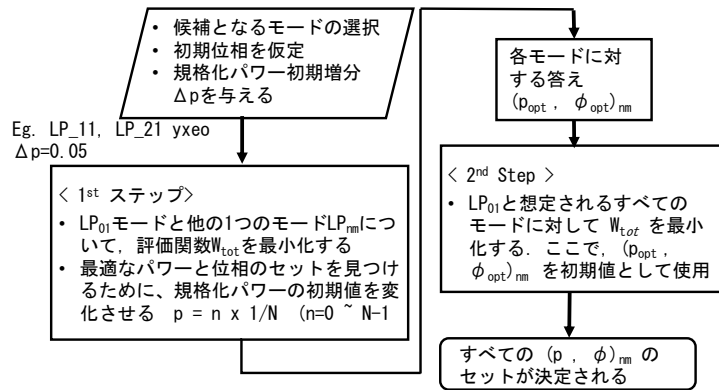
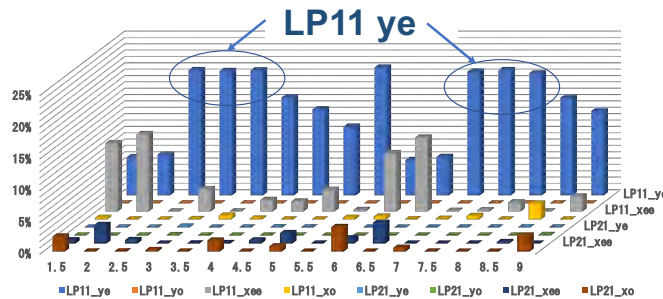


図 6：モード分析コードのアルゴリズム

図 7 の例では、LP01y, LP11ye のモードについて(パワー、初期位相)の値を(80%, 0), (20%, 20°)と仮定し、マイターバンドミラーNo. 1(距離 1m に固定)と、No. 2(距離を 1.5m から 9m まで 0.5 m ずつで変化)での強度分布を合成して作成し、図 6 で示したコードを用いて、正確にモード分析できるかを調べた。図 7 に示したように、ある特定の距離において、ほぼ正確な成分比と位相値を再現した(丸で囲んだ領域)。



2台のミリ波パワー分布モニターの信号を使ったモード分析の結果

1st BPM は L=1m に固定し、2nd BPM の設置位置は L=1.5m から 9m の間で、0.5m ずつ移動させた。  
 仮定されたモードとその成分比は、LP01y モードが 80%、及び LP11ye モードが 20% である。

図 7：モード分析結果の例

この例は一例であるが、おおよそ 2 つのモードのビート波長の 1/4 または 3/4 程度の距離だけ離れた位置にモニターを設置するのが適当と思われる。今後さらなる解析が必要である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

① T. Shimozuma, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Ito, K. Okada, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, Y. Mizuno, S. Kubo,

“Analysis Technique of Millimeter-Wave Propagating Modes in an Oversized Corrugated Waveguide Using Developed Beam Profile Monitors”

Plasma and Fusion Research, 2018, 3405036-1-4

10.1585/pfr.13.3405036 査読有, オープンアクセス.

② Y. Yoshimura, A. Ejiri, R. Seki, R. Sakamoto, K. Nagaoka, T. Shimozuma, H. Igami, H. Takahashi, T. I. Tsujimura, F. Warmer, K. Yanagihara, Y. Goto, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, S. Kubo, M. Osakabe, T. Morisaki and the LHD Experiment Group

“Effect of Electron Cyclotron Current Drive on the Ion Temperature in the Plasma Core Region of the Large Helical Device” ,

Plasma and Fusion Research, 2018, 140212-1-4

10.1585/pfr.13.1402124, 査読有, オープンアクセス.

③ T. Ii Tsujimura, Y. Mizuno, T. Tokuzawa, Y. Ito, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, A. Ejiri

“Real-time control of electron cyclotron wave polarization in the LHD”

Fusion Engineering and Design, 2018, 130-134

10.1016/j.fusengdes.2018.04.062, 査読有.

- ④ T. Saito, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, M. Fukunari, T. Hirobe, S. Tanaka, R. Shinbayashi, T. Shimozuma, S. Kubo, K. Tanaka, M. Nishiura, “Development of 300 GHz Band Gyrotron for Collective Thomson Scattering Diagnostics in the Large Helical Device” Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, 12(2017) 1206013-1-2 10.1585/pfr.12.1206013 査読有, オープンアクセス.
- ⑤ 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(2017)066001-1 -9 査読有、<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6875>.
- ⑥ H. Igami, A. Fukuyama, H. Idei, K. Nagasaki, Y. Goto, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Makino, “Comparison between Full Wave and Ray-Tracing Calculations to Examine Scenarios for Electron Bernstein Wave Heating in LHD” Plasma and Fusion Research, 11(2016)2403098-1~4, DOI 10.1585/pfr.11.2403098

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① T. Shimozuma, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Ito, Y. Mizuno, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, S. Kubo 「ECRH ミリ波伝送系の伝送効率改善に向けたミリ波ビーム分布モニターの高性能化」 35th プラズマ・核融合学会 年会, 2018.
- ② T. Shimozuma, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Ito, K. Okada, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, Y. Mizuno, S. Kubo, “Improvement of Millimeter-Wave Transmission Efficiency Using Beam Profile Monitors in an ECRH Transmission Line” , 26th International Toki Conference(国際学会), 2017 年.
- ③ T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Makino, R. Sakamoto, M. Osakabe, “Heating Characteristics of the 3rd Harmonic ECRH Using 154 GHz Gyrotron Power” , Plasma Conference 2017(国際学会), 2017 年.
- ④ T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Makino, S. Ito, Y. Mizuno, H. Takubo, S. Kobayashi, R. Minami, T. Kariya , T. Imai, “Current Status of the LHD ECRH System and Development of Dual-Frequency Gyrotrons” , 2017 US-EU-JPN Workshop on RF Heating Technology & 2017 US-JPN Workshop on RF Physics(国際学会), 2017 年.
- ⑤ 下妻 隆, 小林 策治, 伊藤 哲, 岡田 宏太, 伊藤 康彦, 吉村 泰夫, 伊神 弘恵, 高橋 裕己, 辻村 亨, 牧野 良平, 水野 嘉識, 久保 伸, 「メガワット定常 ECH 伝送系における伝搬モード分析と それに基づく伝送効率の改善法の開発」, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 2016 年.
- ⑥ T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Makino, S. Ito, Y. Mizuno, K. Okada, S. Kobayashi, R. Minami, T. Kariya and T. Imai, “Present Status of the ECRH System in LHD and Development of a New Gyrotron and the Related Components” , Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2016 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop(国際学会), 2016 年, Leinsweiler, Germany.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし