

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560066

研究課題名(和文)ミリ波ビームモニターを用いたコルゲート導波管内伝搬大電力ミリ波のモード分析

研究課題名(英文) Mode-Content Analysis of a High Power Millimeter-Wave Propagating in a Corrugated Waveguide Using Millimeter-Wave Beam Profile and Position Monitors

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高パワーミリ波の長距離伝送時における損失を低減するために、真空化されたコルゲート導波管からなる長距離伝送路中において、実時間でそのパワー分布を測定できる実時間ミリ波パワー分布・位置モニターを開発し、メガワットレベルのパワー伝送時に、そのパワー分布が計測できることを実証した。特に実時間測定のため、遠隔で制御、データ取得が可能なシステムを構築した。実際の154GHzでのメガワット、0.5秒ミリ波伝送を用いて測定された分布の結果は、短パルスで感熱紙で測定されたバーンパターンと良く一致した。またモニター信号の入射パワーに対する線形性も確認できた。これらの情報を用いてモード成分を分析する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the transmission loss of the micro- and millimeter-wave power in the long-distance transmission line, we developed a real-time profile and position monitor of Mega-Watt millimeter-waves in evacuated corrugated waveguides, and demonstrated a possibility of measuring the power profile of Mega-Watt level millimeter-waves for real-time. The system can be controlled and the profile data also can be acquired remotely. The measured profile data using Mega-Watt and sub-second pulse power from a 154GHz gyrotron well agreed with the burn-pattern obtained using thermal-paper in the short pulse (several milli-seconds) gyrotron operation. Additionally, the power linearity of the analyzed monitor signal was also confirmed in the several power levels. The analyzing method of the included mode contents is also proposed.

研究分野：プラズマ工学、核融合学

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

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波やミリ波を用いた加熱は、ヒーターなどを用いた在来加熱法の単なる代替手段ではなく、微視的な強い非平衡下の反応系という物性学上の新しい領域にあることが明らかになってきており、その特性を利用して他分野への応用へと広がりつつある [1]。特に、この学術的研究を基にして、マイクロ波や、ミリ波の高度利用を推進し、重工業では最も省エネルギー効果の大きい製鉄事業、ハイテク分野では金属やガラスの焼結などの機能材料等、21世紀を担う革新的製造技術の開発が進んでいる。そのパワー源となる大電力ミリ波は、核融合加熱技術などで培われたジャイロトロン管によって発生させることができる。この定常大電力ミリ波を工業的に応用するには、高効率なミリ波伝送系が必要不可欠であるが、100mを超える長距離にわたる伝送系の伝送効率は、現状 70-80%であり、十分に高効率化が実現されているとはいえない。このような大電力ミリ波の伝送としては、現在おもにオーバーサイズ(波長に比べて管径がはるかに大きい)のコルゲート導波管を用いた伝送法が用いられている。このような伝送路においては、伝送モードをでき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_{11} モード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。また、オーバーサイズ導波管を用い、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。反面オーバーサイズであるために、導波管のミスアラインメントにより容易に他モードへの変換が発生し、パワーの減衰、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非常に高い。

このような伝送中でのモード変換を定量的に評価するためには、伝送モード成分の分析が必要である。しかるにこのようなメガワット級の電磁波で、さらに真空化された導波管中では、その位相を直接測定することは不可能である。我々は、これまで数箇所における電磁波振幅のみの測定から位相を再構成する方法を研究し、導波管などのアラインメント法の可能性検討、得られた位相情報を用いて導波管内の伝搬モードの分析、さらにコルゲート導波管内の伝搬ミリ波の強度分布の再構成を行うなど [2]、この分野の進展を大きく推し進めてきた。現に、大型核融合装置における大電力ミリ波のコルゲート導波管伝送系における伝搬モード分析の標準的な方法として、日本国内のみならず、海外の諸研究機関でもこの方法が適用されるに至っている。

しかしながら、上述のモード分析法では、伝送路の一部を取り外し、その導波管端からの短パルス(数ミリ秒)でのミリ波放射分布の測定データに基づいて行う必要があり、実

際稼働中のシステムにおいて実時間で、導波管中の伝送ミリ波の強度分布や、モード成分を知ることができなかった。その問題点を解決するために、伝送路中に存在する 90 度マイターバンド部の反射板の外側に、ペルチェ素子アレイを取り付けることにより、ミリ波のオーミック損失による発生熱を除去すると同時に、反射板の温度変化を各々の素子の電圧変化として取り出し、メガワットに及ぶパワー伝送中においても、伝送系に何ら擾乱を与えることなく、伝送ミリ波のパワー分布を測定できる装置を開発した [3-5]。

参考文献

- [1] M. Sato et al., "Microscopic Non-equilibrium Heating - A Possible Mechanism of Microwave Effects", Mat Res Innovation 10(2006).
- [2] T. Shimozuma et al, "Alignment Method of ECH Transmission Lines Based on the Moment and Phase Retrieval Method Using IR Images", Journal of Plasma and Fusion Research 81 (2005) 191 - 196.
- [3] T. Shimozuma et al., "Mode-Content Analysis and Field Reconstruction of Propagating Waves in Corrugated Waveguides of an ECH System", Plasma and Fusion Research, 5 (2010) S1029-1 - S1029-5.
- [4] T. Shimozuma et al., "Progress of a Multi-Megawatt Gyrotron System for Electron Cyclotron Heating on the Large Helical Device", Proc. on the 35th International Conference on Infrared, millimeter and THz waves, Tu-P.04 (2010).
- [5] T. Shimozuma et al., "Optimization of High Power and High Efficiency Operation of 77GHz Gyrotrons for ECRH in the Large Helical Device", Proc. on the 36th International Conference on Infrared, millimeter and THz waves, W2A-1 (2011).

2. 研究の目的

ペルチェ素子アレイによるミリ波電力分布・位置モニター装置の測定においては、素子サイズの制約のため、温度測定の空間分解能が十分に上げられない問題点があった。しかしながら、以下に挙げる方法を採用することにより、より少ない点の温度情報でも、伝搬モード分析が可能となる事が分かってきた。本研究の目的は以下のようにまとめられる。

(1) メガワット級大電力ミリ波伝送路における複数のマイターバンド部に、ミリ波ビーム分布・位置モニターを設置し、実時間で伝搬ミリ波の強度分布を同時に複数箇所において取得、解析できるシステムを構築する。

(2) 得られたミリ波パワー分布情報を用いて、実時間で伝搬モードを分析できる手法を開発する。特に、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、最適化フィッティングを実行することにより、測定された強度分布を再現し、構成モードの成分を求める方法を確立する。以上の方法を実際の定常大電力ミリ波の伝送路に適用し、稼働中のシステムにおいて何ら擾乱を与えることなく、実時間で伝搬モードの成分構成の時間変化を検知できるシステムを構築する。さらに、実時間で伝搬モードの変化を知ることにより、モード変換の原因をつきとめ、伝送効率向上のための方法を考察できるようにする。

本研究は、より実際のシステム稼働条件(真空、定常、大電力)においてモード分析を実時間でできる方法を実現し、これにより短パルス運転では分からなかった発振周波数の時間変化によるミリ波パワー分布の時間変化や伝搬モード成分の変化を明らかにすることができることに特色がある。そのためにマイターバンド部に設置されるミリ波ビーム分布・位置モニターの原理実証を行う。

これまで熱的情報によりミリ波ビームの位置、分布を知る方法は、感熱紙によるバーンパタンや、赤外線カメラ計測によるターゲット板の温度分布測定等からすでに行われてきたが、ペルチェ素子を使った方法は、被測定系に擾乱を与えることなく温度情報を得ることができ、独創的なものである。メガワットミリ波の伝送時に、ミリ波ビーム位置、分布の確認、モード成分の分析が可能になり、それらの情報に基づき、伝送路の再アライメントができるシステムを構築でき、伝送効率の画期的な向上と、伝送システム設置の再現性を高めることができる。

大電力の定常的なミリ波の伝送においては、工業利用、医療分野応用、核融合応用などにおいて、その高効率化はトータルコストの低減とシステムの簡略化につながる重要な課題である。本研究はこの視点からも重要な意義があると考えられる。

3. 研究の方法

本研究課題において使用し、伝送路に沿ったミリ波パワー分布の情報を取得するミリ波分布・位置モニターについて、その主要構成要素とともに説明する。図1は、現有設備である電子サイクロトロン共鳴加熱システム中に構成されたシステムを示したものである。高温・高密度プラズマの生成用として定常大電力のミリ波は、ジャイロトロン発振器によって発生されている。そのミリ波はミラー列よりなる準光学結合器を介してコルゲート導波管伝送系に導入される。この伝送系は、コルゲート導波管の他、マイターバンドと呼ばれる90度バンド、パワーモニター、偏波器、導波管スイッチなどのコンポーネントから構成されている。データ取得に使用されるミリ波分布・位置モニターは、図2に示されているように、銅製の反射板、ステンレス製フランジ部とプリント基板上に2次元に

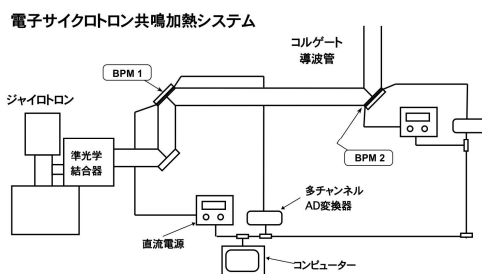


図1: 電子サイクロトロン共鳴加熱システムに構築されたミリ波分布・位置モニター(BPM)システム

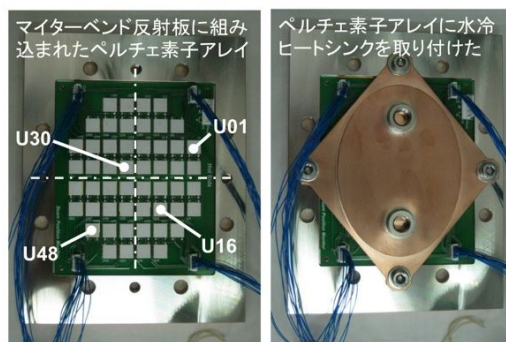


図2: ミリ波分布・位置モニター(BPM)

配置されたペルチェ素子アレイ、水冷可能なヒートシンクから構成されており、マイターバンドの反射板部に構築されている。本伝送系では、およそ1MW級の大電力ミリ波を定常で伝送し、そのためコルゲート導波管内は通常真空に排気されている。さらに発生熱を除去するために十分な冷却が必要である。そのためミリ波分布・位置モニターに要求される性能は、主要伝搬モードである HE_{11} モードのミリ波を低損失で伝送できるとともに、不要モードへのモード変換を起こさず、冷却ができ、さらに真空状態で使用できる構造であることが必要である。それらの機能を満足するために、このモニターは、図2に示したような構造になっている。ペルチェ素子アレイは、直列接続され、定電流モードで駆動される。その場合、放熱側の温度をヒートシンクによって一定に保てば、冷却側の温度変化は、各々のペルチェ素子の電圧変化として読み取ることができる。空間分解能の向上のため 8×8 の矩形(実効的には52素子)のミリ波モニターを製作し、試験を行った。

平成24年度には、大電力ミリ波伝送系に少なくとも2台のミリ波強度分布モニターを、 HE_{11} モードと低次の不要モードとのビート波長以上離れた位置にあるマイターバンド反射鏡部に設置する必要があるために、そのミリ波分布・位置モニターの駆動定電流電源と電圧測定系をTCPネットワーク上で制御できるように、ネットワークから制御が可能な定電流電源と高速多チャンネル電圧A/D変換器を調達、準備した。それらをシーケンスに従って動作、制御するプログラムを作成し、円盤状ヒーターを模擬熱源として用い、反射

鏡の冷却面側の温度変化を電圧変化の信号として測定できることを確認した。

平成 25 年度は、本モニターを、ネットワークから高精度で制御、データ取得できるように、データ収集・解析用ワークステーションとソフトウェア LabView を調達し、ミリ波ビーム分布・位置モニターの駆動とデータ収集のためのソフトウェアの開発を進めた。並行して、得られた各ペルチェ素子電圧から反射面での電力分布を求める方法、及びビームに含まれるモード成分を解析するための方法を考察した。実機クラスのミリ波分布、位置モニターでは、コルゲート導波管内を真空にするため、反射板厚は最低 3mm 程度が必要であり、反射面での発生熱は、面に垂直方向だけでなく、面内方向にも広がり、発熱分布に不確実性が生じることになる。この点については、熱伝導方程式のグリーン関数を用いることによってもともとの発生熱分布を求める方法を検討している。モード成分分析についても、感熱紙データを用いた分析法を変更することにより、モード分析が同様に可能である事が分かってきた。

平成 26 年度には、実機 1MW のジャイロトロン出力を使い、実際にコルゲート導波管中のパワー分布が測定できるかを試みた。その結果、上記のデータ処理法で取得した信号パターンは、反射板を取り外し、感熱紙を用いて取得したパターンに良く一致し、本研究で開発したビーム分布・位置モニターの有効性を示すことができた。同時に信号の入射パワーに対する線形性も確認できた。また冷却性能としては数百キロワット定常の運転に使用できることが実証された。

4. 研究成果

製作されたミリ波ビーム分布・位置モニターを試験するために、TCP ネットワーク上で、ペルチェ素子を駆動するための定電流電源及び A/D コンバータ系、データ取得のためのソフトウェアを構築した。これらを用いて直径 40mm の円盤状のヒーターを模擬熱源として使用し、ペルチェ素子の駆動タイミング、駆動電流値、データの取得時間分解、取得時間、さらに得られたデータの解析方法を検討した。

以下、実機メガワット級ジャイロトロン出力を用いた測定方法、結果について詳述する。図 3 a) は、プラズマ加熱用に使用される 154GHz ジャイロトロンシステムに、本ミリ波ビーム分布・位置モニター(以下 BPM と略す)を構成した様子を示している。154GHz ジャイロトロンで発生されたメガワット級のミリ波は、準光学結合ユニット(MOU)により、ガウス分布に近いパワー分布に整形され、内径 88.9mm のコルゲート導波管に導入される。BPM は、ミリ波伝送系の 2 番目の 90 度マイターバンド部に設置した(図 3 b))。コルゲート導波管は、試験ではダミーロードで終端されている。BPM は、現場に設置された定電流電

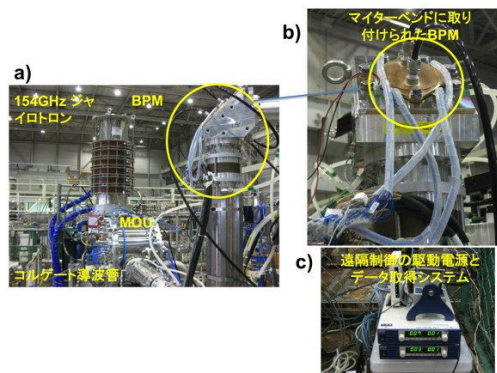


図 3: a) ジャイロトロンシステムに設置された BPM. b) マイターバンドに設置された BPM の様子. c) 現場に設置された定電流電源と A/D コンバータ。

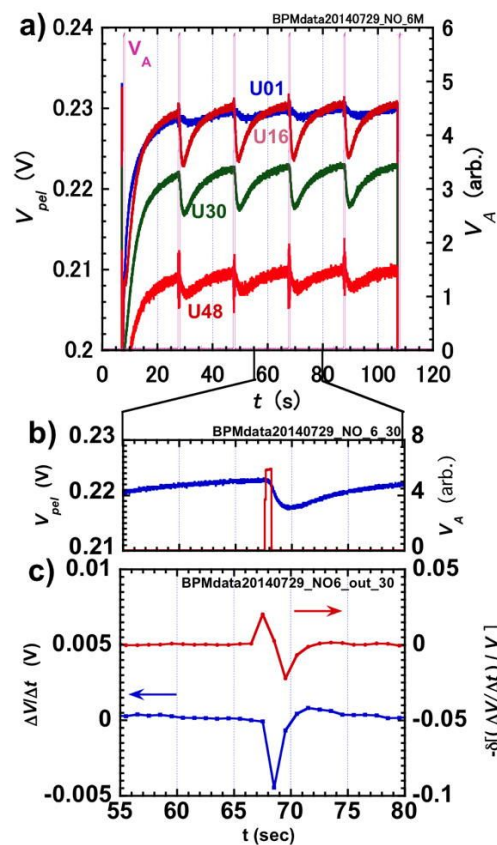


図 4 : a) ジャイロトロンのパルス V_A と代表的なペルチェ素子の電圧変化. b) $t = 55-80$ 秒間の U30 素子の電圧変化とジャイロトロン入射タイミング. c) ペルチェ電圧の時間微分値と、規格化された時間微分値の差分。

源で駆動され、各々のペルチェ素子の電圧は、52 チャンネルの A/D コンバータによって 1ms 毎に取得される(図 3 c))。電源の制御及びデータの取得はインターネット経由で、ジャイロトロン運転制御室にて、PC でコントロールされる。

0.5-1MW の出力を用いた高パワーテストを行った。手順としては、まず時刻 $t=0$ で、ペルチェ素子に一定電流を流し、その後 0.5 秒

のジャイロトロンパルスを入射した。その際の代表的なペルチェ素子(図2のU01, U16, U30, U48)の電圧変化をジャイロトロンパルス信号とともに図4a)に示す。図4b)は、図2に示した素子U30(ほぼミッターバンド中央部)の電圧変化を示す。図4c)では、平均化されたペルチェ素子電圧の時間微分値、及びその差分値 $D = - [(V/t)/V]$ をプロットしている。

ジャイロトロンパワーが入射されたタイミングから、すべての素子の中で、最も早くこの差分値Dがピーク値を取るタイミングが、反射板表面で発生した熱がペルチェ素子に最短で到達したタイミングと考え、このタイミングで、すべての素子についてこの値を、それぞれの素子位置にマッピングした。図5a)にこの値のマッピングを、b)には、BPMを取り外し、感熱紙を用いて、短パルスパワー入射で、バーンパターンを取得したものを示した。非常に良い一致が見られており、この方法の正当性を示している。ジャイロトロン入射パワーを変化させてデータを取得した結果、入射パワーに対するD値の線形性も示された。

これらの情報を用いたモード分析の方法も並行して検討した。主モードのHE₁₁モードとモード変換の可能性が予想されるいくつかの低次の導波管内伝搬可能なモードを仮

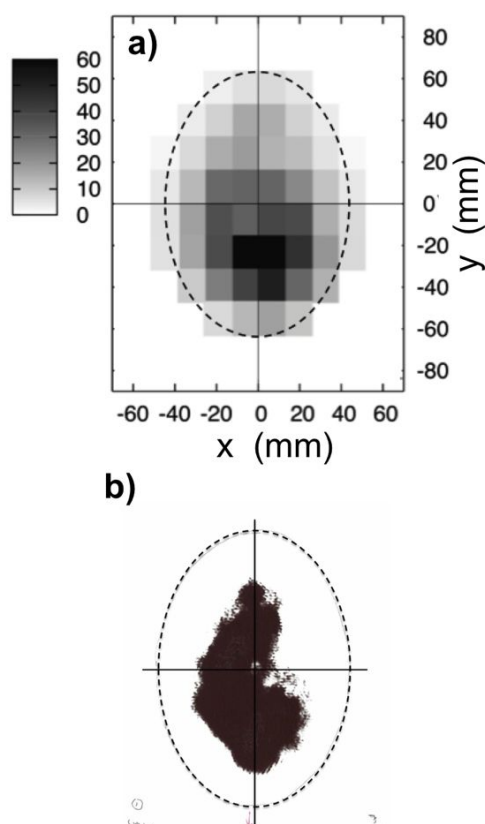


図5: a) ペルチェ素子電圧の差分値 $D = - [(V/t)/V]$ を、各素子の座標にマッピングした。b) 同じ条件で、感熱紙を用いて取得したバーンパターン。

定し、それらの振幅と位相を未知数として、測定強度分布を最適フィッティングすることによって、それらのモード成分を分析する方法の検討を進めた。

以上の結果は、以下に示したいいくつかの国内、国際会議で発表し、さらに論文にまとめている。

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8件)

T. Shimozuma, H. Igami, S. Kubo, et al., (12名, 1番目), "Optimization of the high harmonic ECRH scenario to extend a heating plasma parameter range in LHD", Nucl. Fusion 55 (2015) 063035 (8pp), doi:10.1088/0029-5515/55/6/063035. 査読有。

T. Shimozuma, et al., (12名, 1番目) "Development of a Millimeter-Wave Beam Position and Profile Monitor for Transmission Efficiency Improvement in an ECRH System", EPJ Web of Conferences 87,04011 - p.1 - p.6 (2015) DOI: 10.1051/epjconf/20158704011, 査読無。

T. Shimozuma, H. Igami, S. Kubo, (12名, 1番目), "Optimization of High Harmonic ECRH Scenario to Extend a Heating Plasma Parameter Range in LHD", Proceedings of 25th IAEA Fusion Energy Conference, 2014, EX/P6-34, 査読有。

H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, et al., (24名, 2番目), "Extension of high Te regime with upgraded electron cyclotron resonance heating system in the Large Helical Device, Extension of high T_e regime with upgraded electron cyclotron resonance heating system in the Large Helical Device" Physics of Plasmas, 21, 061506 -1 -8 (2014), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4884365>, 査読有。

T. Shimozuma, H. Takahashi, S. Kubo, et al., (11名, 1番目), "High Harmonic ECH Experiment for Extension of Heating Parameter Regime in LHD" Plasma and Fusion Research, Vol. 8(2013)p.2402073-1 -5. DOI: 10.1585/pfr.8.2402073, 査読有。

T. Shimozuma, et al., (16名, 1番目), "Installation of a 154 GHz Mega-Watt Gyrotron and Its Contribution to the Extension of Plasma Parameter Regime in LHD", Proceeding in the 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2013, Mo1-3, 査読無。

Y. Yoshimura, H. Igami, S. Kubo, T.

Shimozuma, et al., (17名, 4番目), "Electron Bernstein wave heating by electron cyclotron wave injection from the high-field side in LHD", Nuclear Fusion, Vol. 53 (2013) p.063004-1 -4. doi:10.1088/0029-5515/53/6/063004, 査読有.

K. Ohkubo, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Kobayashi, "Mode Content Analysis for ECH Transmission Lines by Burn Pattern and Nonlinear Optimization", Fusion Science and Technology, Vol. 62(2012)p.389-402. http://www.ans.org/pubs/journals/fst/a_15338, 査読有.

〔学会発表〕(計 10 件)

T. Shimozuma, H. Igami, S. Kubo, et al., (11名, 1番目), "Optimization of High Harmonic ECRH Scenario to Extend a Heating Plasma Parameter Range in LHD", 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, Russia (Park Inn Pribaltiyskaya), 13-18 October 2014, EX/P6-34.

T. Shimozuma, S. Kubo, et al., (16名, 1番目), "Recent Progress of the ECRH System and Experiment in the Large Helical Device", 2014 US-EU-JPN Workshop on RF Heating Technology, September 22 - September 24, 2014, Sedona Rouge Hotel & Spa, Sedona, AZ, USA.

T. Shimozuma, et al., (12名, 1番目), "Development of a Millimeter-Wave Beam Position and Profile Monitor for Transmission Efficiency Improvement in an ECRH System", 18th Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating 2014 EC18, April 22 - 25, Nara Japan.

T. Shimozuma, et al., (12名, 1番目), "High Power Test of a Real-Time High-Resolution Millimeter-Wave Beam Profile Monitor in a Mega-Watt CW ECH Transmission Line", 18PB-016, Plasma Conference 2014, 18-21 Nov. 2014, Niigata, Japan.

下妻 隆, 久保 伸, (16名, 1番目) 「LHDにおけるECHシステムの高性能化と大電力アップグレード計画」, 03aD15P (ポスター), プラズマ・核融合学会 第30回年会, 平成25年12月3日-6日, 東京工業大学(東京都).

T. Shimozuma, H. Takahashi, S. Kubo, et al., (13名, 1番目), "Experimental and Ray-Tracing Study of the Third Harmonic Electron Cyclotron Resonance Heating in LHD", P2-21 (Poster), 23rd International Toki Conference, Toki, Gifu, Japan, Nov. 18-21.

T. Shimozuma, et al., (16名, 1番目), "Installation of a 154 GHz Mega-Watt Gyrotron and Its Contribution to the Extension of Plasma Parameter Regime in LHD", Mo1-3 (Oral) The 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2013, Sept. 1-6, 2013, Mainz, Germany.

T. Shimozuma, H. Takahashi, S. Kubo, (16名, 1番目), "Upgrade of Mega-Watt ECRH System and Its Contribution to Performance Improvement of LHD Plasmas", T02 (Oral), US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop "Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2013": September 9 (Mon) -11 (Wed), 2013, Speyer, Germany.

下妻 隆, 高橋 裕己, 久保 伸, (16名, 1番目), 「LHDにおけるECHシステムのアップグレードとプラズマ加熱領域の拡大」 プラズマ核融合学会 第29回年会, 2012年11月27日-2012年11月30日, クローバープラザ(福岡県春日市).

T. Shimozuma, H. Takahashi, S. Kubo, et al., (12名, 1番目), "High Harmonic ECH Experiment for Extension of Heating Parameter Regime in LHD", The 22nd International Toki Conference, 2012 Nov. 19-22, Toki-City, Gifu, Japan.

〔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

<http://www.nifs.ac.jp/rd/phprd/index.html>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

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

(4) 研究協力者

大久保 邦三 (OHKUBO KUNIZO)

研究者番号: 00023739