

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560058

研究課題名（和文）コルゲート導波管内伝搬定常大電力ミリ波の実時間強度分布モニター及び伝搬モード分析

研究課題名（英文）Real-Time Intensity and Profile Monitor of High Power CW Millimeter-Waves Propagating in a Corrugated Waveguide and Its Mode-Content Analysis

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

研究成果の概要（和文）：核融合プラズマの加熱が必要である定常メガワットミリ波の低損失伝送を実現するために、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、実時間でその強度分布を測定できる実時間強度分布モニターを開発した。本モニターは伝送路のマイターバンド反射板上にペルチェ素子の2次元アレイを設置し、温度分布を測定すると同時に反射板の冷却が可能とするものである。その温度情報を用いて伝搬モードの成分を分析する方法を検討した。

研究成果の概要（英文）：A real-time position and profile monitor of a high-power (MW level) millimeter-wave beam was developed. It can be installed in an evacuated transmission line with corrugated waveguides, which is used in the electron cyclotron resonance heating system for nuclear fusion devices. The monitor consists of a Peltier-device array attached on a miter-bend reflector and a heat sink. The output voltage of each Peltier device reflects the temperature of the reflector. The devices can remove generated heat at the same time. The method of a propagating mode analysis was also developed using the obtained temperature information.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎

キーワード：物理計測・制御

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波、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が広がりつつある [1]。特に、この学術的研究を基にして、マイクロ波、ミリ波の高度利用を推進、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、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。この新しい現象を使ったマイクロ波、ミリ波加熱においては、数百キロワット以上の大電力のミリ波を電磁波の電界と磁界の位相を揃えて物質に照射することにより、高効率に非平衡を励起し、通常の加熱では実現できない非平衡化学反応を実現することが出来る。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、このようなシステムはまだ完成されていない。このような大電力ミリ波の伝送としては、現在主にオーバーサイズ(波長に比べて管径がはるかに大きい)のコレクター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で低損失で伝送することが必要不可欠である。コレクター導波管では、 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たり、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、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モード変換が発生し、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。

近年、パワー源から装置までの伝送距離は、装置の大電力化、大型化とともにますます長距離になってきている。また伝送路中には経路を曲げるためのマイターバンドや偏波器、パワーモニター、導波管切替器など様々なコンポーネントが接続されており、不要モードを発生させる可能性のある構成要素が多数存在している。これにより伝送効率は一層低下してしまう可能性がある。これはパワーの有効利用という観点からだけではなく、定常運転時の発生熱の処理など多くの問題を引き起こす原因となる。

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は、その位相を直接測定すること不可能である。我々は、これまで複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、電磁波分布の位相補正ミラーの設計 [2] や、導波管などのアラインメント法の可能性検討 [3]、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、さらにコレクター導波管内の伝搬ミリ波の強度分布の再構成を行うなど [4]、この分野の進展を大きく推し進めてきた。

2. 研究の目的

(1) 目的

上述したモード分析法では、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はできなかった。特に発振源であるジャイロトロン管では、発振部であるキャビティの熱膨張により、時間的に発振周波数がおおよそ数百MHz 低下することが知られており、これによるミリ波ビームの放射角度の変化で、導波管との結合条件が変化する可能性があることが指摘されている。これは伝送効率の低下につながる問題である。

以上のような背景のもと、本研究課題では以下の点を明らかにすることを目的としている。

①伝送中の定常大電力ミリ波の強度分布及びビーム中心位置を実時間で知るために、大電力ミリ波の伝送を乱すことなく計測できるシステムを構築する。この目的のため、導波管を90度曲げるマイターバンド部に作り付けられた強度分布モニターを開発する。本実時間強度モニターを用いて、大電力ミリ波システムにおける長時間運転時のビーム伝搬の変化を確認し、ミリ波の結合条件を最適化する。

②複数のマイターバンド部に設置されたミリ波ビーム分布・位置モニターを用いて、それらの強度分布データより、これまで研究してきた位相再構成法や、モード分析法を用いて、オーバーサイズコレクター導波管内のモード成分分析を行う。これにより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知ることができるようになる。

③以上の情報にも基づいて、定常大電力ミリ波の伝送効率の向上を、より実際の稼働システムの状態で検討する。

(2) 学術的な特色、独創性、予想される結果と意義

これまでの研究により、ミリ波領域で、メガワット級の高パワー出力を用いてその強度分布のみから、そのミリ波の位相情報を再構成し、コレクター導波管中での伝搬モードのモード成分を分析することが可能になった。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動作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強度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。そのためには、マイターバンド部に設置されるミリ波ビーム分布・位置モニターを開発することが

必須である。このモニターは、ペルチェ素子アレイから構成されており、ミリ波強度分布をモニターするとともに系の冷却も同時にできるきわめて独創的な発想に基づくものである。

最終的には、実際のシステム稼働状態で、ミリ波ビーム位置、分布の確認、モード成分分析が可能になり、それらの情報に基づき、伝送路の再アラインメントが出来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。

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] M. A. Shapiro, T. S. Chu, D. R. Denison, M. Sato, T. Shimozuma and R. J. Temkin, " Design of Correcting Mirrors for a Gyrotron Used at Large Helical Device" , Fusion Engineering and Design 53 (2001) 537-544.
- [3] 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.
- [4] T. Shimozuma, et al., " Propagating Mode Analysis and Field Reconstruction in the Corrugated Wave-guides of a High Power Electron Cyclotron Heating System" , Proc. on 33rd Int. Conf. on IRMMW & THz 2008, California Pasadena, USA, R5D38.

3. 研究の方法

本課題で研究開発されるミリ波ビーム位置、分布モニターは、マイターバンドの反射板部に構成、設置される。特に電子サイクロトロン共鳴加熱で使用されている長距離伝送路は、1MW 級の大電力を定常で伝送する必要があり、そのため主要伝送路を構成するコルゲート導波管内は通常真空排気されている。さらに発生熱を除去するためには、全系に渡る十分な冷却が必要である。そのため本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し、且つ不要モードへのモード変換起こさず、冷却が可能で、さらに真空封じできる構造であることが必要である。そこで開発すべきミリ波分布モニターについては、マイタ

ーバンド反射板、ペルチェ素子アレイ、ヒートシンクより構成し、上記の性能を満たしつつ、反射板での抵抗損失による発熱を除去すると同時に、発熱分布を測定できるようにする。具体的には、ペルチェ素子を直流定電流電源により定電流動作させ、各素子の電圧値の変化を多チャンネル AD コンバータにより取得し、制御・データ収集用パソコンにより解析することにより、各点での温度情報、すなわちマイターバンド反射板上でのミリ波の強度分布を得ることができるようになる。

まず空間分解能を落とし、少数のペルチェ素子ユニットを用いて温度分布が予想通り取得できること、同時にミリ波による発熱を十分除去できることを確認する。他方、位相再構成に必要な空間分解能を得る場合には、ミリ波伝送をパルス運転とし、反射板の温度分布を直接赤外線カメラによって測定し、温度分布データを取得し比較検討する。他方、得られたデータの解析法の改良として、ミリ波伝搬方向に対して 45° の角度を持った面内での強度分布データを用いて、位相再構成できるように既存の計算コード（ミリ波伝搬方向に対して垂直面内のデータを使用）を改良してゆく。

製作されたビームモニターを用いて、実際の ECH システムの高パワー伝送路において、実際のジャイロトロンからのメガワット級のミリ波を伝送し、製作されたミリ波モニターの試験を継続し、問題点の抽出を行う。

さらに、これらの実験結果に基づき、ミリ波モニターにおいて、主要なコンポーネントであるペルチェ素子アレイの改良を進め、構造、材料の最適化を行う。特に、十分な空間分解能を得るためには、ペルチェ素子アレイの個数の増加、その配列を最適化検討を行う。またデータの取得の多チャンネル化、高速化が必要となるため、さらにデータ収集装置を準備する。

他方、データの解析法としては、モード変換の可能性のある複数有限個のモードを仮定しその振幅、位相を未知数とし、得られた温度分布を再較正する最適化フィッティングを行い、未知数を決定する新しい方法を検討する。

また、マイターバンド位置において再構成された振幅及び位相情報を用いて、直交系をなす導波管モード系による展開係数を求めることにより、原理的には、各モード成分の含有比が求められることになり、最終的には、何ら大電力定常ミリ波の伝送には擾乱を与えることなく実時間で伝送路中の伝搬モード成分を測定できるシステムが完成することになる。

高空間分解能を目指した多素子ビーム位置モニターを用いて、実際の ECH システムの高パワー伝送路において、実際のジャイ

ロトロンからのメガワットのミリ波を伝送し、製作されたビーム位置、分布モニターの試験を継続し、ミリ波パワー分布測定の高精度化、高空間分解能化を図る。またペルチェ素子間の電圧測定のためのプログラム改良を進める。

さらに、同様なビーム位置モニターをさらにもう1組作製し、実際のミリ波伝送路に設置し、2か所での同時計測を行う。これによって、2か所で測定されたミリ波ビームの強度分布の情報から、伝搬モードの分析が可能になる。予想される不要モードを仮定し、それらのモードの混合によって、測定された強度分布を繰り返し計算によって再現し、モード分析を簡易的に、高速で行うことを試みる。当初から計画されていたデータの解析法については、位相再構成プログラムの整備と改良を進める。最終的には、マイターバンド位置において再構成された振幅及び位相情報を用いて、直交系をなす導波管モード系による展開係数を求めることにより、原理的には、各モード成分の含有比が求められることになり、最終的には、何ら大電力定常ミリ波の伝送には擾乱を与えることなく実時間で伝送路中の伝搬モード成分を測定できるシステムが完成することになる。

また、得られた結果をまとめ、国内学会および国際学会において発表を行い、世界のほかのグループとの議論を行うとともに論文としてまとめる。

4. 研究成果

(1) ミリ波ビームの位置及び分布モニター(BPM)の構成

大電力ミリ波の長距離伝送系においては、信頼性向上のため、システム全系の真空化、十分な冷却と精密な伝送系アラインメントが要求される。従って実時間のBPMでは、このような真空化された伝送系中を伝搬するメガワットレベルのミリ波の位置、分布測定が可能である必要がある。これに対処するために、図1に示したように直列に接続されたペルチェ素子の2次元アレイを、伝送路中のマイターバンド反射板の大気側に取り付けた。低損失コルゲート導波管中を伝搬するミリ波はマイターバンド反射板により反射されるが、一部は吸収され熱を発生する。オーム損失によって発生した熱は、熱伝導により反射板の大気側に移動し、ペルチェ素子とヒートシンクにより除去される。このとき、それぞれの素子の電圧は、次の式で表される。

$$V = IR + S(T_H - T_c)$$

ここで、 I 、 R 、 S は、それぞれ素子に流れる電流、素子の抵抗とゼーベック係数である。 T_H と T_c は、それぞれペルチェ素子の高温側と

低温側の温度である。これらの素子を直列に接続し、定電流モード($I=\text{const}$)で駆動すると、それぞれの素子の電圧は、 T_H を一定に保てば、素子の低温側の温度変化に、ほぼ比例することになる。こうして得られたマイターバンド反射板上の2次元の温度情報は、ミリ波ビームの実時間での位置と分布を反映することになる。

(2) プロトタイプ BPM の製作とその高パワーテスト結果

この原理が、実際のミリ波伝送路において正常に機能するかを調べるために、20個のペルチェ素子(20mm×20mm)を用いたプロトタイプのビーム位置・分布モニターを製作した。初めに原理実験を行うために、直径45mmの円形ヒーターを模擬熱源として用い、反射板の局所的な温度上昇が、ペルチェ素子の電圧変化として計測できるかを調べた。13W程度の電気入力で、十分に中心位置を判別でき、おおよその分布も取得できることが確認された。次にこの装置を、電子サイクロトロン共鳴加熱システムの82.7GHzの伝送系のマイターバンド部に設置し、高パワーミリ波を用いた試験を行った(図2参照)。高パワーテストでは、周波数82.7GHzで、約200kWのパワーを、30秒ごとに0.1秒のパルスで伝送した。このとき、反射板に取り付けた白金測温計による温度測定では、約0.5度の温度上昇が観測された。図3a)は、それぞれのペルチェ素子の電圧変化を示したものである。図中の四角は、それぞれの素子の位置を示している。また白い破線で示した楕円は、マイターバンド位置でのコルゲート導波管の断面形状を表している。この場合、電圧変化のピーク位置は、少し中心から外れているのが分かる。この試験の後、BPMの代わりに吸収体を塗布した反射板に取り替え、その温度上昇を赤外線カメラで測定してみた。図3b)は、その熱画像を示したものである。温度分布のピーク位置とそのプロファイルは、図3a)に示したペルチェ素子の電圧変化と良く一致するものであり、この方式でミリ波ビームの位置、プロファイル測定が可能である事が実証された。

(3) BPM の高空間分解能化

離散的な温度情報を用いて、伝搬モードの成分解析を行うためには、マイターバンド反射板上で8×8箇所以上の離散的な温度情報を取得する必要があることが、モード分析の方法から分かってきた。そこで、より高空間分解能で温度情報を取得できるようにするために、大きさ10mm×10mmのペルチェ素子を8×8=64個相当で、導波管断面を十分に覆う52個のペルチェ素子アレイ配置を設計し、製作した。各素子を直列接続し、さらに各素子

の端子電圧が独立に測定できるように、両面

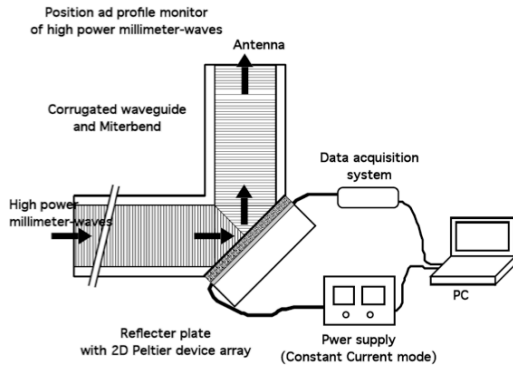
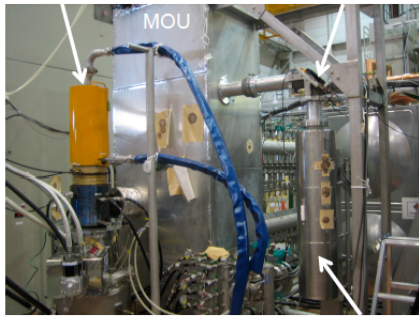


図1 ミリ波ビーム位置・分布モニター(BPM)の概念図.

82.7GHz GYCOM ジヤイロトロン マイターバンドに設置された 試作ビーム位置モニター



ダミーロード

図2 製作されたプロトタイプ BPM を 82.7GHz ジヤイロトロン伝送系中のマイターバンドに設置した様子を示す.

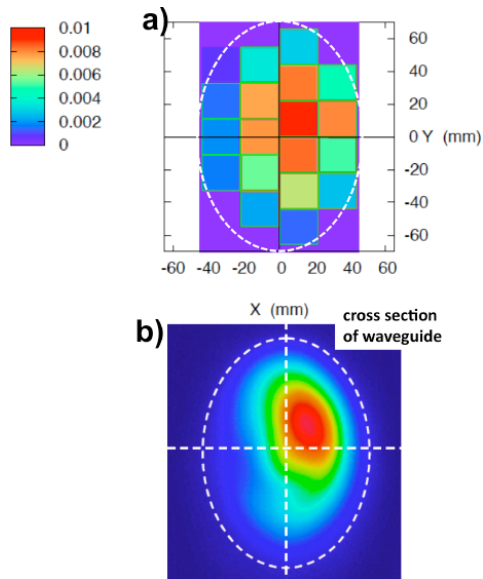


図3 a) BPM によって測定された電圧変化分布、b) 吸収体塗布反射板の赤外線カメラによる熱画像像.

プリント基板を用いて配線を可能にした。

図4は、製作したペルチェ素子アレイを反射板に取り付けた様子を示している。マイターバンド反射板は、銅とステンレスの合わせ材を用いており、真空中に耐えられる強度と、熱伝導性能の向上を同時に実現している。写真には示されていないが、この基板上部には水冷可能なヒートシンクが取り付けられるようになっている。これによりメガワット定常のミリ波伝搬時に発生する熱でも除去できるようになっている。この空間分解能化 BPM の模擬熱源を用いた試験、及び高電力ミリ波を用いた試験を継続して行ってゆく。

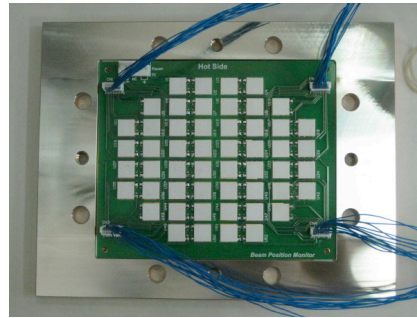


図4 高空間分解能化 BPM. マイターバンド反射板状に取り付けられた 52 ペルチェ素子のアレイ.

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7件)

① T. Shimozuma, H. Takahashi, S. Ito, et al., (他 15 名, 1 番目), "Optimization of High Power and High Efficiency Operation of 77GHz Gyrotrons for ECRH in the Large Helical Device", Proceedings on International conference of IRMMW-THz 2011, 2011, W2A-1, DOI:10.1109/irmmw-THz.2011.6105140, 査読無.

② T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, et al., (他 12 名, 1 番目), "Progress of a Multi-Megawatt Gyrotron System for Electron Cyclotron Heating on the Large Helical Device", Proceedings on International conference of IRMMW-THz 2010, 2010, Tu-P04, 査読無.

③ T. Shimozuma, H. Takahashi, S. Kubo, et al., (他 15 名, 1 番目) "ECRH-Related Technologies for High-Power and Steady-State Operation in LHD", Fusion Science and Technology, Vol. 58, 530- 539, 2010, 査読有.

④ T. Shimozuma, M. Yokoyama, K. Ida, et

al., (他 33 名, 1 番目) "Improvement of Plasma Core Confinement Via Electron-Root Realization by Strongly Focused ECRH in LHD: Core Electron-Root Confinement", Fusion Science and Technology, Vol. 58, 38-45, 2010, 査読有.

⑤ T. Shimozuma, H. Idei, et al., (他 11 名, 1 番目) "Mode-Content Analysis and Field Reconstruction of Propagating Waves in Corrugated Waveguides of an ECH System", Plasma and Fusion Research, Vol. 5, S1029-1-5, 2010, DOI:http://dx.doi.org/10.1585/pfr.5.S1029, 査読有.

⑥ T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, et al., (他 18 名, 1 番目) "Activities on Realization of High-Power and Steady-State ECRH System and Achievement of High Performance Plasmas in LHD", Proceedings of the 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (AIP Conference Proceedings), 1187, pp479-486, 2009, 査読無.

⑦ T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, et al., (他 17 名, 1 番目) "Handling Technology of Mega-Watt Millimeter-Waves For Optimized Heating of Fusion Plasmas", Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, Vol. 43, pp60-70, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 11 件)

① T. Shimozuma, et al., "Development of a High Power Gyrotron System for Plasma Experiments in the Large Helical Device", 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRT2012), March 7-9, 2012, Fukui, Japan.

② T. Shimozuma, et al., "Development of a Millimeter-Wave Beam Profile Monitor in Mega-Watt CW ECH Transmission Line", Plasma Conference 2011, Nov. 22-25, 2011, Kanazawa, Japan. Ishikawa, Japan

③ T. Shimozuma, et al., "High Power and High Efficiency 77GHz Gyrotron System for ECRH in LHD", US-EU-JA RF Technology Workshop 2011, Oct. 10-12, 2011, Austin, TX, USA.

④ T. Shimozuma, et al., "Optimization of High Power and High Efficiency Operation of 77GHz Gyrotrons for ECRH in the Large Helical Device", International Conference on Infrared, Millimeter and Tera-Hertz Waves 2011, Oct. 2-7, 2011, Houston, TX, USA.

⑤ 下妻 隆, 他,

「LHD におけるマルチメガワットジャイロトロンスステムの構築と高電子温度領域の拡大」, 第 27 回プラズマ・核融合学会年会, 2010 年 12 月 3 日, 北海道大学学術交流会館 (札幌市、日本) .

⑥ T. Shimozuma, et al., "Progress of a Multi-Megawatt Gyrotron System for Electron Cyclotron Heating on the Large Helical Device", International Conference on Infrared, Millimeter and Tera-Hertz Waves 2010, Sept. 5-10, 2010, Rome (Italy).

⑦ 下妻 隆, 他,

「LHD における ECH システムの大電力化と高効率化」第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 2010 年 6 月 11 日, 高山市民文化会館 (高山市、日本) .

⑧ T. Shimozuma, et al., "Recent Upgrade of the LHD ECH System and the Application to High Te Experiments", Korea-Japan RF Heating Physics Workshop, Mar. 8, 2010, Daejeon (Korea).

⑨ 下妻 隆, 他,

「LHD における大電力 ECH システムの総合効率の向上」, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会, 2009 年 12 月 3 日, 京都 (日本) .

⑩ T. Shimozuma, et al., "Recent Studies on Improving Overall Efficiency in LHD ECH System", The 3rd Japan-Korea Workshop on Plasma Heating and Current Drive Systems, Aug. 6, 2009, Toki (Japan).

⑪ T. Shimozuma, et al., "Activities on Realization of High-Power and Steady-State ECRH System and Achievement of High Performance Plasmas in LHD", The 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, June 24, 2009, Gent (Belgium).

[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]

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