

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18773

研究課題名(和文)メタマテリアルを利用したミリ波ドップラーレーダ用フェーズドアレイアンテナの開発

研究課題名(英文) Developments of meta-material based phased-array antenna for millimeter-wave Doppler radar

研究代表者

徳沢 季彦 (Tokuzawa, Tokihiko)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90311208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：核融合を目指す高温プラズマ中の電子密度揺動や流速を計測することが可能なミリ波帯ドップラーレーダを高性能化して、流速の多次元ベクトル測定ができるようにするため、照射ミリ波ビームを同時に任意の方向へ放射できる革新的なアンテナを開発することを目的として、以下の2つの課題に取り組んだ。(1)走査時間の無いフェーズドアレイシステム：同時に複数の周波数を用いることで、ビームを多方向へ同時に照射できることを実証した。(2)メタマテリアルを用いた広帯域位相器：アンテナ素子毎に正確な位相差を広帯域に付与するためメタマテリアルを反射型メタサーフェース移相器として適用することを検討・評価し、その広帯域性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合発電炉の早期実現による安定した電力供給は社会に良い影響を与えることが期待できるが、性能の良い核融合炉実現のためには高温プラズマの物理を理解し制御する必要がある。特に乱流の特性を理解する上で、本研究によりドップラーレーダの同時多方向照射が広帯域性をもって実現できることを示したこと、これによって多次元ベクトル計測が可能となることは、核融合プラズマ閉じ込め研究において非常に高い意義を持つ。また、新しい領域の研究素材であるメタマテリアルの応用事例の一つとして、核融合プラズマ分野が新たに加わったことはその広い可能性を示したこととして意義がある。

研究成果の概要(英文)：Millimeter-wave Doppler radar can measure the electron density fluctuations and velocities in fusion plasmas. In order to improve the performance of the Doppler radar to enable multi-dimensional vector measurement of the flow velocity, the developments to innovative antennas that can simultaneously emit millimeter-wave beams in any direction. The following two issues were addressed for this aim. (1) Phased-array systems without scanning time: By using multiple frequencies simultaneously, it was demonstrated that the beam is possible to simultaneously irradiate. (2) Metamaterials-based broadband phasers: In order to give accurate phase difference to each antenna element over a wide frequency range, the application as a metasurface reflective phase shifter has been studied and evaluated, and its broadband capability has been confirmed.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：メタマテリアル ドップラーレーダ フェーズドアレイ 周波数コム プラズマ計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの閉じ込め研究において、閉じ込めの劣化の指標であるプラズマの電子密度揺動はプラズマの流れと強い相関があることが知られており、これらの関係性を解析する上で、揺動強度と流速の2つの情報を同時に計測できる手法が重要である。申請者は、これまでにこれらの空間分布情報を得るために、周波数コムを用いたミリ波ドップラーレーダの開発を進め、研究に供してきた[T.Tokuzawa, et al., Phys. Plasmas **21**, 055904 (2014)]。ドップラーレーダとは、プラズマ中にミリ波を入射し、密度揺動によって生じた散乱波を観測するものである。散乱波の強度から密度揺動強度が得られ、また散乱波に現れた周波数のドップラーシフト量を解析することで、背景プラズマ流速を求めることができる。この際、観測する密度揺動の波数成分をプラズマへの入射角で選択できる。このために、従来、機械式の走査アンテナを用いて照射ビームを空間的にスキャンする手法がとられてきたが、走査時間中にプラズマの状態が変わってしまうという問題があった。また将来の核融合装置の真空容器内では、アンテナが利用可能な空間は限定され、またその材質・構造に大きな制約があることから、現実的に機械走査式のアンテナの設置は困難であり、他の手法を検討する必要があった。

2. 研究の目的

本研究は、核融合を目指す高温プラズマ中の電子密度揺動やその流速を計測するミリ波ドップラーレーダ用の同時に様々な方向へビームを放射できるアンテナを開発することが目的である。このアンテナには、高温プラズマ計測のために、(1)広い周波数領域にわたりプラズマ照射が可能であること、(2)短い時間で照射スキャンが可能であること、(3)真空容器内に設置し運転が可能であること、が求められるため、ミリ波周波数コムを用いた多周波数同時発生技術とメタマテリアルを用いた位相制御技術を融合することにより、革新的なフェーズドアレイアンテナシステムを構築し、その原理実証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で行うプラズマ計測に最適化したフェーズドアレイアンテナシステムの革新的な開発要素は、次の2点である。

(1) 走査時間の無いフェーズドアレイシステム

フェーズドアレイアンテナは一列に並べたアンテナに入力する信号の位相を制御することで、特定の方向へ合成した信号を放射するものであり、通常は単一の周波数で動作するように設計されるが、本研究では、同時に複数の周波数を用いる(くし状の周波数スペクトルを持つ周波数コムを入力信号として用いる)ことで、ビームを多方向へ同時に照射できるアンテナシステムを構築する。これにより走査時間の無いビーム放射が可能となる。

(2) メタマテリアルを用いた広帯域位相器

フェーズドアレイアンテナとして動作させるためには、アンテナ毎に正確な位相差を付与する位相器が必要である。特にプラズマ計測では広い周波数領域に亘るミリ波を用いるため、位相器にも広帯域性が求められる。本研究では、用いる周波数領域で分散特性を持つように設計したメタマテリアル構造を高周波基板上に形成し(メタサーフェース)、これを利用することで、周波数毎かつアンテナ素子毎に異なる位相を与える、メタマテリアル移相器を製作する。これによって、位相器を個々に制御する必要がなくなり、(1)の走査時間を無くすフェーズドアレイシステムにさらに貢献することができる。

上記の課題に対して、まず各個に設計・製作し、性能を評価して、全体のデザインを決定し、プラズマ実験への適用を図る。最終的な試験実証としてのプラズマ実験では、特にこれまでにドップラーレーダで計測された例の無いトーラスプラズマのトロイダル速度計測に挑戦する。

4. 研究成果

(1) 無走査同時ビーム放射は達成できたのか？

フェーズドアレイアンテナから、複数周波数によって、異なる角度でビームが放射できるかどうか調べるため、広帯域性のあるアンテナを用いる必要がある。今回は、基板上に形成できる平面波アンテナを候補として考え、各種アンテナ(テーパードスロットアンテナ(TSA)、ビバルディアンテナ、パッチアンテナ、ダイポールアンテナなど)を製作しその性能を特に周波数帯域の広さから検討し、まず16個のダイポールアンテナからなるフェーズドアレイアンテナを作成し、各アンテナへの位相差を制御して、ビームの放射方向を制御できることを確認した(図1)。次に、このアンテナに、異なる周波数を入射することによって、ビームの放射方向を変化させることができることを確認した(図2)。これにより、周波数を制御することで、無操作同時ビーム放射は可能であることが実証できた。

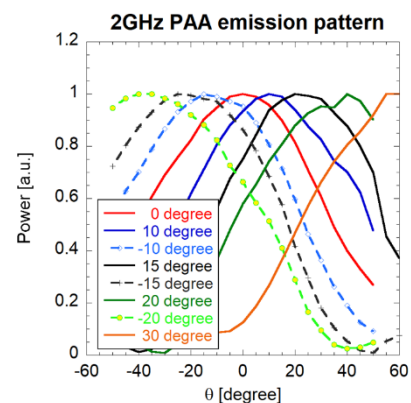


図1 フェーズドアレイアンテナによるビーム放射方向スキャンの例

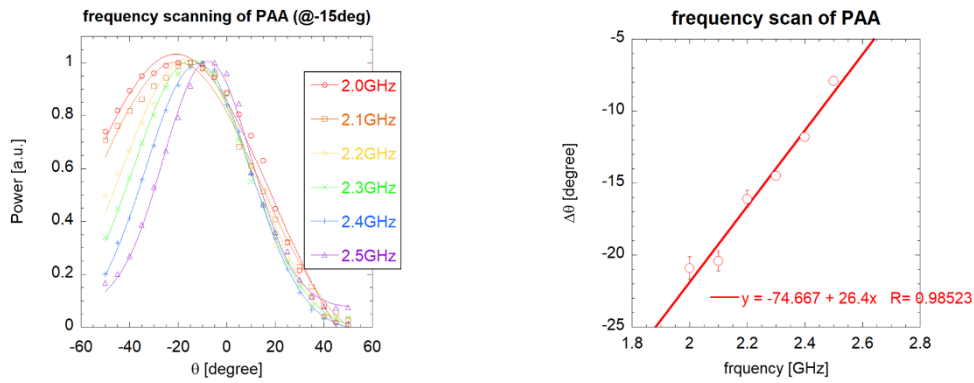


図2 周波数によって、ビーム放射分布（左）と放射方向が線形に制御できる（右）

(2)メタマテリアルは位相器として動作させられるのか？

基板上に周期構造（ループ構造、ループスロット構造等）をプリントしたメタマテリアル素材を作成し、その表面からの反射を利用するメタサーフェスの特性として、周波数による位相変化を図3のような配置で調べた。上部から標準ホーンアンテナを用いてマイクロ波信号を放射し、メタサーフェスからの反射信号をネットワークアナライザで計測した。方形のループ構造を描いたメタサーフェス基板を測定した場合の、位相変化の例を図4に示す。1.6GHzより少し高い周波数で生じる特性周波数を境に、周波数上昇にしたがって位相が約180度変化していることが分かる。ループ構造のデザインなどを変更することでこの周波数と位相との関係性は制御することができ、フェーズドアレイアンテナの各素子に合わせた位相に設計することが可能となった。なお、反射型でなくコンパクトなシステムアレイが可能な透過型の位相器としての性能も調べたが、透過損失が現在の基板では大きく有用では無かった。低損失な材料を使うことで性能向上が可能かどうかは今後の課題である。

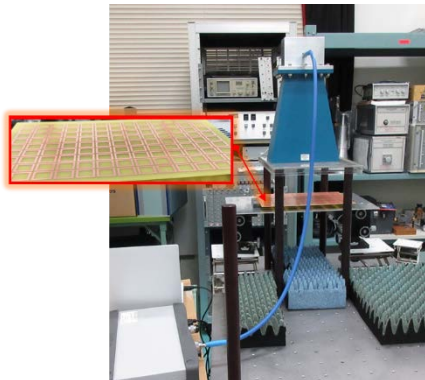


図3 反射型メタマテリアル位相器の特性試験の写真。矢印の部分にメタマテリアル基板を設置した。

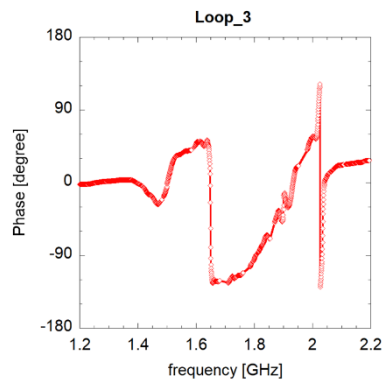


図4 ループ構造のメタマテリアル基板による周波数に対する位相変化の例

(3)プラズマのフローは計測できたか？

ドップラーレーダにより、トロイダルプラズマのトロイダル回転速度を計測することが可能かどうかを、名古屋大学のHYBTOKトカマク装置を用いて、実験を行った。アンテナをトーラス接線方向に向けて、接線方向成分の乱流速度によるドップラーシフトが観測できるかどうか調べた。得られた反射信号の複素周波数スペクトログラムを図5に示す。図より有意なドップラーシフトが観測できることが分かった。ただし、他の計測器との比較による定量的な評価は今後の課題である。

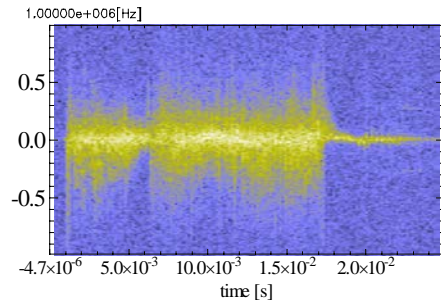


図5 ドップラーレーダによりHYBTOKプラズマのトロイダル速度を計測した時の、複素周波数スペクトログラムの例

また、当初は、フェーズドアレイアンテナシステムを完成させてから、九州大学の新しいトカマクプラズマPLATO装置実験に適用させることを計画していたが、COVID-19の影響で装置の完成が遅れたこともあり、まだ適用はできていない。この点も今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanaka K., Ohtani Y., Nakata M., Warner F., Tsujimura T., Takemura Y., Kinoshita T., Takahashi H., Yokoyama M., Seki R., Igami H., Yoshimura Y., Kubo S., Shimozuma T., Tokuzawa T.	4. 巻 59
2. 論文標題 Isotope effects on energy, particle transport and turbulence in electron cyclotron resonant heating plasma of the Large Helical Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126040 ~ 126040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab4237	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 Yamada H., Tanaka K., Seki R., Suzuki C., Ida K., Fujii K., Goto M., Murakami S., Osakabe M., Tokuzawa T., Yokoyama M., Yoshinuma M., Group LHD Experiment	4. 巻 123
2. 論文標題 Isotope Effect on Energy Confinement Time and Thermal Transport in Neutral-Beam-Heated Stellarator-Heliotron Plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 185001-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.185001	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 Kobayashi M., Seki R., Masuzaki S., Morita S., Zhang H.M., Narushima Y., Tanaka H., Tanaka K., Tokuzawa T., Yokoyama M., Ido T., Yamada I., the LHD Experimental Group	4. 巻 59
2. 論文標題 Erratum: Impact of a resonant magnetic perturbation field on impurity radiation, divertor footprint, and core plasma transport in attached and detached plasmas in the Large Helical Device (2019 Nucl. Fusion 59 096009)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 109601 ~ 109601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab3a13	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 Moon C., Kobayashi T., Ida K., Tokuzawa T., Hidalgo C., Yoshinuma M., Ogawa K., Itoh K., Fujisawa A., LHD Experiment Group	4. 巻 26
2. 論文標題 Spatial structure of low-frequency fluctuations throughout the transition of poloidal flow velocity in edge plasmas of LHD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 092302 ~ 092302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5098954	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 Mase Atsushi, Kogi Yuichiro, Maruyama Toru, Tokuzawa Tokihiko, Kunugita Masaki, Koike Tatsuya, Hasegawa Hiroyasu	4. 巻 90
2. 論文標題 NON-CONTACT AND NON-INVASIVE DRIVER'S MONITOR USING MICROWAVE REFLECTOMETER	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress In Electromagnetics Research M	6. 最初と最後の頁 81 ~ 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2528/PIERM20010103	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 Mase A., Kogi Y., Maruyama T., Tokuzawa T., Sakai F., Kunugita M., Koike T., Hasegawa H.	4. 巻 91
2. 論文標題 Non-contact and real-time measurement of heart rate and heart rate variability using microwave reflectometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 014704 ~ 014704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5128959	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 Tokuzawa T., Tsuchiya H., Tsujimura T., Emoto M., Nakanishi H., Inagaki S., Ida K., Yamada H., Ejiri A., Watanabe K. Y., Oguri K., Akiyama T., Tanaka K., Yamada I., LHD Experiment Group	4. 巻 89
2. 論文標題 Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 10H118 ~ 10H118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5035118	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. Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group	4. 巻 1
2. 論文標題 Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 Th-P2-R2-1
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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 T. Tokuzawa, S. Inagaki, A. Ejiri, H. Idei, R. Imazawa, N. Oyama, M. Yoshida, K. Tanaka ¹ , H. Tsuchiya, K. Ida, K. Y. Watanabe, and H. Yamada
2. 発表標題 Dual-Comb Microwave Doppler Reflectometer System in LHD and Feasibility Study for a JT-60SA Doppler Reflectometer
3. 学会等名 14th International Reflectometry Workshop (IRW14) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, S. Inagaki, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, N. Oyama, M. Yoshida, H. Tsuchiya, and K. Tanaka
2. 発表標題 Feasibility study of Doppler Reflectometry
3. 学会等名 8th JT-60SA Research Coordination Meeting (RCM-8) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, K. Tanaka, H. Yamada, S. Inagaki, K. Ida, M. Nakata, T. Tsujimura, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 Study of isotope effects from the viewpoint of turbulence observation in LHD
3. 学会等名 22nd International Stellarator & Heliotron Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, M. Kobayashi, S. Masuzaki, S. Inagaki, K. Ida, H. Tsuchiya, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 Observation of turbulence response in detach transition and similarity to H-mode transition in LHD
3. 学会等名 17th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, K. Tanaka, H. Yamada, S. Inagaki, K. Ida, M. Nakata, T. Tsujimura, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 プラズマ乱流計測から見た水素同位体効果検証実験
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, K. Tanaka, H. Yamada, S. Inagaki, K. Ida, M. Nakata, T. Tsujimura, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 ミリ波後方散乱計測によるLHDプラズマ微視的乱流揺動計測
3. 学会等名 閉じ込め輸送研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳沢季彦
2. 発表標題 流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシング技術の開発
3. 学会等名 応用力学研究所研究集会 “ 波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング ”
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, M. Emoto, H. Nakanishi, S. Inagaki, K. Ida, H. Yamada, A. Ejiri, K. Y. Watanabe, K. Oguri, T. Akiyama, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD
3. 学会等名 22nd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (HTPD2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, M. Kobayashi, S. Masuzaki, S. Inagaki, K. Ida, H. Tsuchiya, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Oguri, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Turbulence rapid reduction in the stable detached LHD plasma with magnetic perturbation application
3 . 学会等名 8th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements
3 . 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, T. Tsujimura, M. Emoto, C. Suzuki, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Oguri, K. Tanaka, G. Motijima, I. Yamada, and LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Rapid Radial Propagation of Momentum Change and Flow Oscillation Associated with the Pellet Injection
3 . 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, T. Tsujimura, M. Emoto, C. Suzuki, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Oguri, K. Tanaka, G. Motojima, I. Yamada, and the LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Observation of damped oscillating flow and momentum change associated with a pellet injection
3 . 学会等名 Observation of damped oscillating flow and momentum change associated with a pellet injection (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, A. Tanabe, T. Tsujimura, S. Kubo, H. Tsuchiya, K. Yamamoto, T. Saito, M. Tani, and H. Kitahara
2 . 発表標題 Developments of sub-THz wave camera and application for plasma diagnostics
3 . 学会等名 The 7th International Workshop on Far-Infrared Technologies (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamadaa,c, K.Y. Watanabe, T. Akiyama, K. Tanaka, H. Nakanishi and I. Yamada
2 . 発表標題 Microwave comb reflectometry for micro turbulence measurements
3 . 学会等名 18th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K.Y. Watanabe, K. Tanaka, T. Akiyama, and I. Yamada
2 . 発表標題 Fast Radial Propagation of Momentum Associated with the TESPEL Injection
3 . 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, A. Ejiri, H. Yamada, K. Y. Watanabe, I. Yamada , and LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Rapid momentum propagation associated with the TESPEL injection
3 . 学会等名 Plasma Conference 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

卵が先かニワトリが先か - 乱流発生・抑制の因果律を調べる -
http://www.nifs.ac.jp/lhdreport/mailinfo_303.html
千々に乱れる流れの構造を櫛を使って測定する - 周波数コムを用いた計測器の開発 -
http://www.nifs.ac.jp/lhdreport/mailinfo_296.html

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
--	---------------------------	-----------------------	----