

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01880

研究課題名（和文）立体造形アレイアンテナを用いた周波数走査型ミリ波散乱計測によるプラズマ乱流研究

研究課題名（英文）Plasma turbulence study by frequency scanning millimeter-wave scattering measurement using additive manufacturing array antenna

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） 12,800,000 円

研究成果の概要（和文）：核融合発電のための磁場閉じ込めプラズマの性能を向上させるためには高温プラズマ中の乱流の特性を理解して抑制することが重要であり、将来の高負荷環境下に置いても適用可能な、乱流特性を詳細に観測する手法を開発する必要があった。本研究によって、駆動機構が無く金属筐体のみで構築できるフェーズドアレイアンテナを3D金属プリンタで造形する技術が確立し、これを送受信アンテナとして用いるドップラーレーダーシステムを構築することによって、乱流の空間構造や回転速度、エネルギースペクトルを観測する手法を開発することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フェーズドアレイアンテナは社会において通信や防衛など様々な分野で活用されている。本研究で開発を行った漏れ波アレイアンテナは従来からある技術に最新の金属3Dプリンタを用いた造形技術を組み合わせることによって、初めて実現することができた。立体造形ならではの構造物の実現化とそれによる科学的成果の現実化を示した例であると言える。プラズマ物理研究においてもこの新しいアンテナを用いた観測技法によりこれまでに観測することができなかった乱流のエネルギースペクトルの時空間構造変化を調べられることとなり、これから新たな物理的な知見が得られると期待できる。

研究成果の概要（英文）：Understanding and suppressing turbulence in high-temperature plasmas is important to improve the performance of magnetic confinement plasmas for fusion power reactors, and it is necessary to develop a method to observe turbulence characteristics in detail that can be applied in future high-load severe environments.

In this research, we established a technique to fabricate a phased array antenna that can be composed only of a metal housing without a driving mechanism using a 3D metal printer. By constructing a Doppler radar system using this antenna as a transmitter/receiver antenna, we were able to develop a method for observing the spatial structure, rotation velocity, and energy spectrum of turbulent flows.

研究分野：核融合学

キーワード：立体造形 3Dプリンタ アンテナアレイ 散乱計測 ドップラーレーダー プラズマ乱流

1. 研究開始当初の背景

核融合発電炉の実現を目指した高温高密度プラズマ閉じ込め研究において、その閉じ込め性能の向上には乱流の抑制がカギとなる。これまでに、周辺部閉じ込め改善モード(H-mode)や内部輸送障壁(ITB)プラズマのように輸送障壁を持った閉じ込め特性の良いプラズマが自発的に形成されることが発見されているが、これらは径方向電場やフロー速度の変化などにより乱流が抑制されたことが重要な要因と考えられている。ではなぜそのように径電場やフロー速度に変化が生じたのか?という問いに対しては、温度や密度分布のわずかな変化や、乱流そのものから励起されるフロー速度変化など様々な物理モデルが提唱されているが、超高温のプラズマ内部に発生している微小サイズの渦を伴う乱流の詳細な特性を観測することは非常に難しく、まだ完全に解明できる理論モデルは出来上がっていない。一方、将来の核融合炉(ITER, DEMOなど)ではさらに高負荷環境下となるにもかかわらず、閉じ込め性能向上のために乱流の制御を行うことが期待されている。そこで、本研究ではミリ波散乱法、特にドップラーレーダーと呼ぶ微視的乱流の計測法に従来にない高機能を付加して、将来の炉でも適用可能性の高いプラズマ観測法を確立することを目指すこととした。

2. 研究の目的

本研究では、(1)3Dプリンターを用いた立体造形によって複雑な三次元構造のアレイアンテナを精密かつ安価に製作し、機械駆動機構が無く高速かつ堅牢に様々な角度にミリ波ビームをスキャンすることのできる周波数走査型のレーダー散乱計測システムを構築し、(2)高温プラズマ実験装置に適用してプラズマの微視的乱流の計測を行い、新しい乱流物理の知見を得ることを目的とする。

ミリ波を用いたドップラーレーダーは、観測対象物であるプラズマと接触しないで、その内部にアクセスができる。また微小な電力しか必要としないため、対象物であるプラズマを乱すことも無い、という特長を生かして、現在様々なプラズマ実験装置に適用されている。特に、大きな利点として、利用する電磁波の周波数を変化させることで、対象とするプラズマ内部の位置や、対象とする乱流の波数を選択することができる、という点が挙げられる。さらに送受信に用いるアンテナの入射角度を変化させることで乱流のエネルギー分布関数・スペクトル情報を得ることができる。しかし、機械的にアンテナを駆動するのでは時間応答が遅く、また核融合炉内部に故障要因となる機構を持ち込むこともなり、将来性に問題がある。そこで、本研究では、駆動機構の無いアンテナで、電磁波を任意の方向に送受信でき、かつ広帯域で使用できるアンテナを開発することとした。そして、開発したアンテナを用いた磁場閉じ込めプラズマを対象とする計測試験を実施し、高付加価値のある乱流計測システムを構築する。

3. 研究の方法

高温プラズマ中の乱流の特性、特にその空間構造や位相速度、波数などについての情報を得ることのできる、ミリ波帯の電磁波を用いたドップラーレーダーを、新たに開発するフェーズドアレイアンテナと組合せて開発し、これをプラズマ実験に適用して、原理実証を行った。

現在市場で利用されているフェーズドアレイアンテナは、アンテナ間の位相差を時間的に制御して送信・受信方向をスキャンさせる方式のモノが一般的であるが、本研究では、瞬時的な変化を起こすプラズマの動的な応答を調べたいので、同時に多周波数の電磁波を送受信できる必要がある。そのため、アンテナ間の位相差を動的に制御するのではなく、入力周波数の差異によって生じる伝搬速度の違いを利用して、自動的にアンテナ間に位相差が発生するという原理を活用できる周波数走査型フェーズドアレイアンテナを開発することとした。アンテナのデザインとして、近年著しく技術が進展してきた3次元金属プリンターを活用することで、3次元構造を持つアンテナの造形に挑戦した。そして、そのアンテナの特性を放射特性、伝送特性等を調べ、性能評価を行った後、ドップラーレーダーシステムとしてプラズマ実験に適用するという手順を踏んだ。

4. 研究成果

(1)3Dプリンターを用いたアンテナの立体造形

今回、造形を行う導波路を用いたフェーズドアレイアンテナの原理図を図1に示す。放射角 θ は、マイクロ波の波数 k 、導波路中の波数 k_g 、導波路の光学的長さ l 、アンテナ間隔 d を用いると下記のように表される。

$$\theta = \sin^{-1}\left(-\frac{k_g l}{k d}\right)$$

したがって、入射波数 k を変化させれば任意の角度に放射することが可能となる。これは、導波路の一部に開口

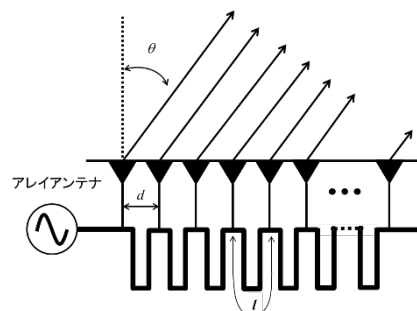


図1: フェーズドアレイアンテナの原理

部を設けた、図 2 のような漏れ波アンテナ(waveguide leaky-wave antenna; WLA)と呼ぶ構造で実現できる。この時、良い放射特性を維持するための grating lobes を避けるための条件は、

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + |\sin\theta^{max}|}$$

と表され、放射角度 $\theta = 20^\circ$ を満たす条件は周波数バンド毎に下記の表ようになる。

バンド	周波数帯 [GHz]	基本導波管[mm]	アレイ間隔 d
Xバンド	8-12	22.86 x 10.16	$d < 18.61 \text{ mm}$
Kuバンド	12-18	15.8 x 7.9	$d < 12.41 \text{ mm}$
Kバンド	18-26	10.7 x 4.3	$d < 8.57 \text{ mm}$
Kaバンド	26-40	7.1 x 3.55	$d < 5.58 \text{ mm}$
Qバンド	33-50	5.7 x 2.85	$d < 4.47 \text{ mm}$

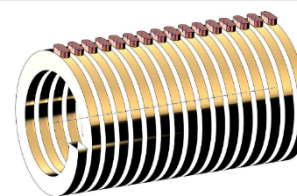


図 2 : 漏れ波アンテナ

今回、金属粉体をレーザーで熔融する Selective Laser Melting (SLM)方式の金属 3D プリントを用いて積層造形を行うこととした。初めに、この積層方式の金属プリンターで導波路構造(導波管)をどのように造形するのがよいか調べるため、造形の方法や角度などを変えて、直線導波管を試作し、伝送損失は通常の引き抜き加工の導波管と比べると、表面粗さの影響で劣化するが、短尺であれば使用できることなどを確かめた。そして、図 2 のような構造の洩れ波アンテナを、Ku バンドと Q バンドでそれぞれ造形した。

Ku バンド(図 3)は、素材として、ミリ波の伝導特性が良い銅を用いた。用いた銅パウダー (C18150) の組成は、Cu(98.71-99.45), Cr(0.50-1.00), Zr(0.05-0.25), O(0.02>), N(0.02>) [wt%]である。層厚 $30 \mu\text{m}$ で造形した結果、目標 $Ra \nabla \nabla = 3.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$ に対し、 $\nabla = 12.5 \sim 25 \mu\text{m}$ であった。なお、これは内部研磨をしていない状態の数値である。

Q バンドは、アルミ粉体 (アルミ合金 : AlSi10Mg) を用いた 6 連のアレイアンテナを製造した後、異なる表面処理を施して、放射特性の違いを調べた。表面処理としては、サンドブラスト、化学研磨、ニッケルメッキの三種類である。ニッケルメッキは表面は滑らかになるもののニッケルの電気特性の影響から最も性能が悪くなった。一方、残りの 2 つはほぼ同等の性能が得られた。図 4 に Q-band の LWA アンテナの例を示す。化学研磨処理を施したアンテナの周波数毎の放射角度特性を図 5 に示す。設計予想通り、周波数を変化させることによりプラズマ実験で必要とする放射角度に十分に制御できることを確認できた。

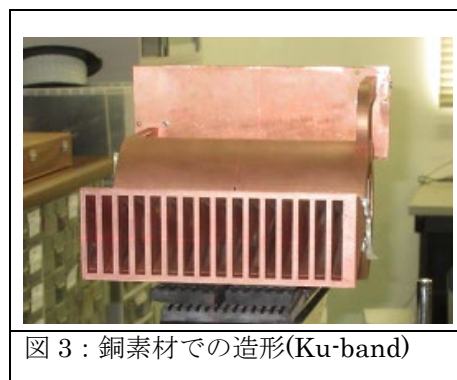


図 3 : 銅素材での造形(Ku-band)

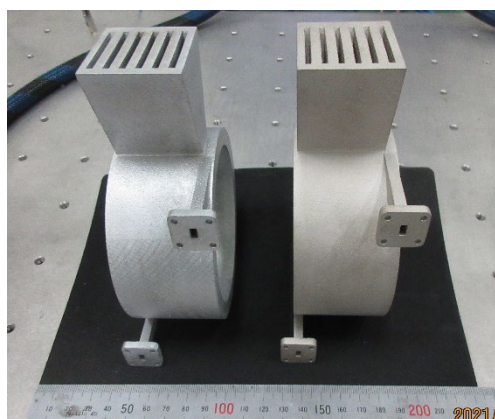


図 4 : 金属 3D プリントで造形した Q-band LWA アンテナ。(左)化学研磨および(右)無電解 Ni メッキによる表面処理を施した。

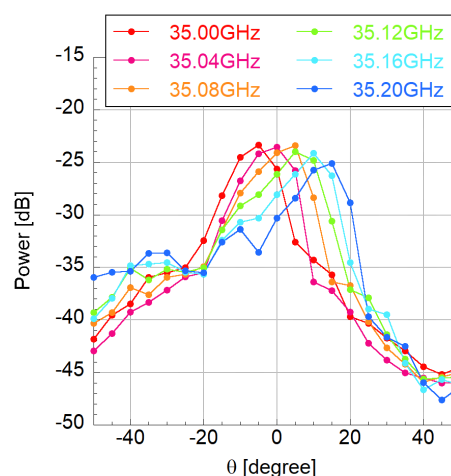


図 5 : LWA アンテナからの放射分布の周波数依存性。この周波数範囲では、約 20 度の範囲で異なる方向にマイクロ波を放射できている。

(2) プラズマ計測への適用

上述のような方法で造形したフェーズドアレイアンテナをドップラーレーダーの送受信アンテナとして用いて、プラズマ乱流計測が可能であることを九州大学の直線型プラズマ実験装置 PANTA(図6)を用いて確かめた。PANTA プラズマの密度に合わせて、Ku-band のアンテナを適用することとし、図7のように設置して約50mWのマイクロ波を入射し後方散乱波のドップラーシフト周波数を観測した(図8)。発振周波数を変え、プラズマへの入射角度 α が変化することにより、観測位置は図9のように変化している。したがって、それぞれの観測位置における入射電磁波の波数 $k_{\perp} = -2 \cdot k_0 \sin(\alpha)$ を変化させていることになり、その結果、ドップラーシフト周波数は、 $2\pi f_D = v \cdot k \approx v_{\perp} k_{\perp}$ と変化すると予想され、この傾向を明瞭に示す観測結果が得られた。プラズマ乱流のフロー速度は、8-12 m/s と見積もることができ、この値は静電プローブで得られた観測結果と矛盾の無い値が得られた。

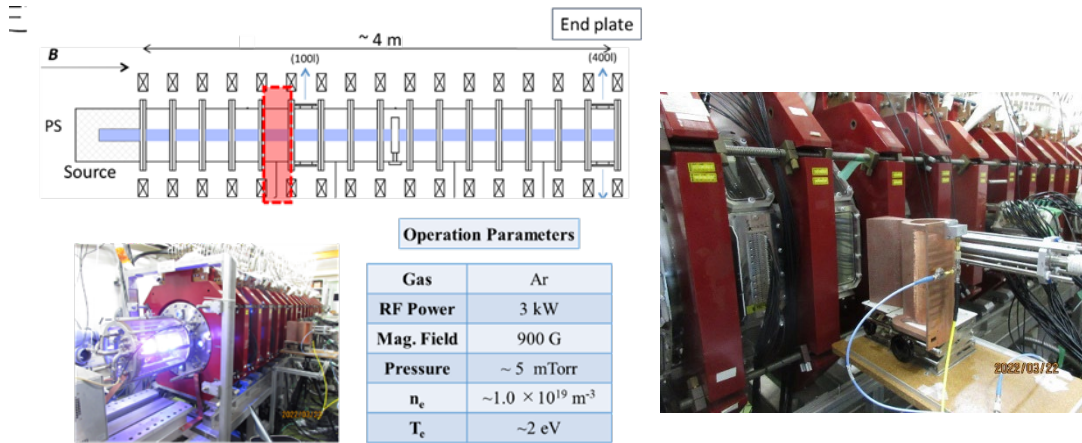


図6：九州大学応用力学研究所の直型プラズマ実験装置 PANTA。赤くハッチした領域にて今回観測。

図7：設置したフェーズドアレイアンテナ

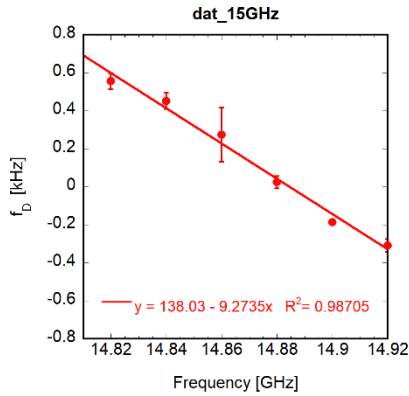


図8：15GHz帯のドップラーシフト周波数 (5mTorr 実験時)

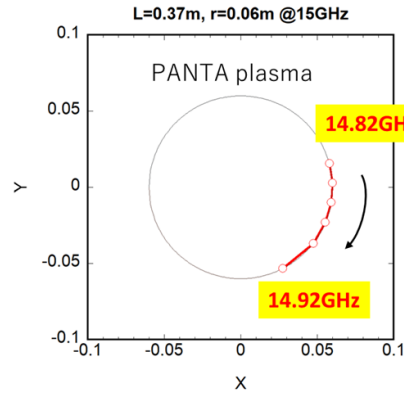


図9：放射角度を変化させたことによる、周波数毎の観測位置。

以上の事から、本研究で開発を行ったフェーズドアレイを用いて任意の角度にミリ波を放射することができること、この機能によって、入射電磁波の周波数を制御することでプラズマ乱流の特性を調べることが可能であることの実証に成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Tokuzawa T., Nasu T., Inagaki S., Moon C., Ido T., Idei H., Ejiri A., Imazawa R., Yoshida M., Oyama N., Tanaka K., Ida K.	4. 巻 93
2. 論文標題 3D metal powder additive manufacturing phased array antenna for multichannel Doppler reflectometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113535 ~ 113535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0101723	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tokuzawa Tokihiko, Inagaki Shigeru, Inomoto Michiaki, Ejiri Akira, Nasu Tatsuhiro, Tsujimura Toru Ii, Ida Katsumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Application of Dual Frequency Comb Method as an Approach to Improve the Performance of Multi-Frequency Simultaneous Radiation Doppler Radar for High Temperature Plasma Diagnostics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 4744 ~ 4744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12094744	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nasu T., Tokuzawa T., Tsujimura T. I., Ida K., Yoshinuma M., Kobayashi T., Tanaka K., Emoto M., Inagaki S., Ejiri A., Kohagura J.	4. 巻 93
2. 論文標題 Receiver circuit improvement of dual frequency-comb ka-band Doppler backscattering system in the large helical device (LHD)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113518 ~ 113518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0101588	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 Kenmochi N., Ida K., Tokuzawa T., Yasuhara R., Funaba H., Uehara H., Den Hartog D. J., Yamada I., Yoshinuma M., Takemura Y., Igami H.	4. 巻 12
2. 論文標題 Preceding propagation of turbulence pulses at avalanche events in a magnetically confined plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-10499-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tokuzawa T., Tanaka K., Tsujimura T., Kubo S., Emoto M., Inagaki S., Ida K., Yoshinuma M., Watanabe K. Y., Tsuchiya H., Ejiri A., Saito T., Yamamoto K., LHD Experiment Group	4. 巻 92
2. 論文標題 W-band millimeter-wave back-scattering system for high wavenumber turbulence measurements in LHD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 043536 ~ 043536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043474	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 HU Wenqing, KOBAYASHI Tatsuya, SUZUKI Yasuhiro, YOSHINUMA Mikiro, TOKUZAWA Tokihiko, IDA Katsumi	4. 巻 16
2. 論文標題 Correlation Analysis between Density and Magnetic Field Low Frequency Fluctuations in Improved Confinement Mode on LHD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402031 ~ 2402031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2402031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Goto Y., Tokuzawa T., Kuwahara D., Ichinose K., Tsuchiya H., Nishiura M., Shimizu T., Kubo S., Yamada I.	4. 巻 17
2. 論文標題 Development of the Q-band ECE imaging system in the large helical device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01016 ~ C01016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/01/c01016	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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 Tanaka K., Nakata M., Ohtani Y., Tokuzawa T., et al.	4. 巻 62
2. 論文標題 Extended investigations of isotope effects on ECRH plasma in LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 024006 ~ 024006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab5bae	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kobayashi T., Ida K., Tanaka K., Yoshinuma M., Tsujimura T.I., Inagaki S., Tokuzawa T., Tsuchiya H., Tamura N., Igami H., Yoshimura Y., Itoh S.-I., Itoh K., Experiment Group LHD	4. 巻 60
2. 論文標題 Isotope effect in transient electron thermal transport property and its impact on the electron internal transport barrier formation in LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 076015 ~ 076015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab9005	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 K. Tanaka, Y. Ohtani, M. Nakata, F. Warmer, T. Tsujimura, Y. Takemura, T. Kinoshita, H. Takahashi, M. Yokoyama, R. Seki, H. Igami, Y. Yoshimura, S. Kubo, T. Shimosuma, T. Tokuzawa, T. Akiyama, I. Yamada, et al.	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 126040-1-13
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 該当する

1. 著者名 H. Yamada, K. Tanaka, R. Seki, C. Suzuki, K. Ida, K. Fujii, M. Goto, S. Murakami, M. Osakabe, T. Tokuzawa, M. Yokoyama, M. Yoshinuma	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 M. Kobayashi, R. Seki, S. Masuzaki, S. Morita, H.M. Zhang, Y. Narushima, H. Tanaka, K. Tanaka, T. Tokuzawa, M. Yokoyama, T. Ido, I. Yamada, and the LHD Experimental group	4. 巻 59
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096009-1-11
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 C. Moon, T. Kobayashi, K. Ida, T. Tokuzawa, C. Hidalgo, M. Yoshinuma, K. Ogawa, K. Itoh, A. Fujisawa, and 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 092302-1-6
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

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Tokihiko Tokuzawa, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, M. Nishiura, N. Kenmochi, R. Yanai, T. I. Tsujimura, I. Yamada, and N. Tamura
2. 発表標題 Development plan and status of phase-space diagnostics in high temperature plasma
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, K. Tanaka, and K. Ida
2 . 発表標題 3D Metal Powder Additive Manufacturing Phased Array Antenna for Multichannel Doppler Reflectometer
3 . 学会等名 High-Temperature Plasma Diagnostics 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Tokihiko Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, N. Oyama, K. Tanaka, and K. Ida
2 . 発表標題 Characteristics of 3D metal powder additive manufacturing waveguides and antenna for microwave Doppler reflectometry and trial experiments at PANTA
3 . 学会等名 15th International Reflectometry Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Tokihiko Tokuzawa, T. Tsujimura, M. Nishiura, H. Igami, S. Inagaki, T. Nasu, K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, K. Tanaka, Y. Takemura, I. Yamada, and LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Edge turbulence excitation experiments in LHD
3 . 学会等名 18th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Tokihiko Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, and LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Electron scale turbulence responses in deuterium and hydrogen plasmas in LHD
3 . 学会等名 47th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Tokuzawa, S. Inagaki, K. Ida, T. Tsujimura, K. Tanaka, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, M. Nishiura, H. Igami, Y. Goto, Y. Takemura, A. Ejiri, I. Yamada, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 Turbulence spreading controlled by edge ECH heat deposition ?
3. 学会等名 Asia-Pacific Transport Working Group Meeting, US-EU Transport Task Force Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Tokuzawa
2. 発表標題 Introduction to LHD diagnostics
3. 学会等名 International Conference on DIAGNOSTICS FOR FUSION REACTORS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Tokuzawa, T. Tsujimura, M. Nishiura, H. Igami, S. Inagaki, K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, K. Tanaka, Y. Goto, Y. Takemura, A. Ejiri, I. Yamada, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 Controlled turbulence excitation in LHD plasma edge region
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Remote e-conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳沢 季彦
2. 発表標題 シンポジウム「高周波技術と核融合」 マイクロ波計測Microwave Diagnostics for fusion plasma
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, K. Tanaka, K. Y. Watanabe, S. Kubo, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, K. Yamamoto, T. Saito, H. Idei, R. Imazawa, N. Oyama, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 Developments of Millimeter and Sub-Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Diagnostics
3. 学会等名 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves IRMMW-THz 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, T. Saito, K. Yamamoto, and LHD Experiment Group
2. 発表標題 W-band millimeter-wave back-scattering system for high wave number turbulence measurements in LHD
3. 学会等名 23rd High-Temperature Plasma Diagnostics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳沢 季彦, 江尻 晶, 稲垣 滋, 出射 浩, 田中 謙治, 吉田 麻衣子, 今澤 良太, 大山 直幸
2. 発表標題 JT-60SAへのマイクロ波ドップラー反射計適用に向けた詳細設計研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳沢季彦, 永岡賢一, 仲田資季, 井戸毅, 小林達也, 西本守, 藤原大, 沼波政倫, 田中謙治, 大館暁, 林祐貴, 坂本隆一, 村瀬尊則
2. 発表標題 乱流抑制配位創成に向けたミリ波帯計測器群の検討
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2020年

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, 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 from attached to detached phases in LHD
3 . 学会等名 27th ITPA meeting of TG SOL and divertor physics (招待講演) (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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	一ノ瀬 薫 (Ichinose Kaoru)		
研究協力者	後藤 勇樹 (Goto Yuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------