

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06944

研究課題名（和文）周辺プラズマ計測による高周波電磁解析におけるプラズマ物理モデル研究

研究課題名（英文）Physical Plasma model research for radio-frequency electromagnetic analysis on plasma peripheral region

研究代表者

笠原 寛史（KASAHARA, Hiroshi）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50435517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：高周波電場印加時の周辺プラズマの物理モデル研究のために、マルチアレイ型静電プローブ・高周波プローブを作成し、プラズマ計測を実施した。プラズマ計測において、計測用プローブはアンテナ励起の電力が強い場合、プローブのフィードスルー部に多数の絶縁破壊が生じ、大電力高周波電場計測の実施には、非接触型の計測手法が必要であり、高耐圧高周波計測用フィードスルー開発の必要性が高まった。アンテナ周辺のプラズマモデルとして、アンテナ周辺部では冷たいプラズマモデルと計算モデルが定性的によく一致することが示されたが、容器内の機器の存在により密度勾配が発生し、それに伴う密度分布モデルを作成する必要があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高周波を用いたプラズマ研究は周辺プラズマから核融合プラズマまで幅広く行われている。特にプラズマ点火や維持のために高周波を用いたプラズマ加熱に焦点が充てられ研究されているが、プラズマ周辺部の低密度域におけるプラズマ壁相互作用や低密度域における非伝搬領域での電磁波の伝搬が観測されていた。今回の研究で電磁波の伝搬としては冷たいプラズマモデルで十分なモデル形成が可能であることが分かったが、その反面、計測機器や電磁波励起用アンテナがもたらす密度分布形成のモデル化の重要性が明らかになった。

研究成果の概要（英文）：In order to make a physical model with high power radio-frequency electric-field on peripheral region of plasma, a multi-array electrostatic probe and high-frequency magnetic probe was designed and plasma measurements were performed. In actual plasma measurement, the measurement probe has strong damaged by the coupled electric field of excited radio-frequency, a large number of dielectric breakdowns had been occurred at the feedthrough part of the probe, and a non-contact measurement method is required to perform high-power radio-frequency electric field measurement. The need to develop feedthroughs for radio frequency measurement with high-voltage has increased. On excited wave patterns around the excitation antenna, cold plasma model and actual measurement agree well, qualitatively. However, the existence of equipment in vacuum vessel cause a density distribution associated with these equipment.

研究分野：高周波プラズマ

キーワード：周辺部のプラズマ物理モデル 高周波電場 波動計算

1. 研究開始当初の背景

定常核融合炉を見据えたプラズマ加熱研究・機器・開発において、GHz帯の電磁波(真空での波長 ~ 2 mm)を用いた電子サイクロトロン加熱(ECH)は、光学的な機器の設計・設置が可能であるため、真空容器内への複雑な構造物を持ち込むことなく電力密度の高い電磁波伝搬を可能とし、工学的に優れていると考えられている [1]。一方、JET, TFTRによるイオンサイクロトロン周波数帯の電磁波を用いたイオンサイクロトロン波加熱(ICH)研究では、重水素(D)とトリチウム(T)を使った実験において実際に電子温度とイオン温度が熱緩和した核融合反応を実証[2]し、ICHによる重水素運転においてNBIに比べて低電力でも高いDD核反応を実証[3]している。第1世代核融合炉がブランケットによりトリチウムを生成しながら行うDT運転を想定しているのに対し、第2世代核融合炉はDD運転が想定されるが、DT核融合炉に比べDD核融合炉はより高温のプラズマを閉じ込める必要が有るため、ICHを用いて高エネルギーイオンの衝突による定常的なDD核融合炉などが必要となり、一刻も早い核融合炉実現のためにDT核融合炉に注力されている。

ICH加熱は第2世代核融合炉を視野に入れた運転が可能で将来性があるが、使用する電磁波の周波数がFM帯であるため、真空の電磁波の波長は ~ 6 m と長く実際の実験装置において導波管アンテナを用いた加熱アンテナの設計が現実的でなかった。そのためループアンテナを用いることで電磁波励起部のサイズを縮小して波動加熱研究が進められている。現在使用されているICHアンテナは粒子衝突保護用のアンテナプロテクター・不要電磁波除去用のファラデーシールド・電磁波励起部のループ部から成り立ち、真空の波長に比べては小さいが構造的に複雑でプラズマに近い箇所に設置することを想定しているため、核融合炉では成立しにくい構造である。また現在核融合炉に設置予定のブランケットと呼ばれるトリチウム増殖部は、トリチウム増殖率に余裕がなく、ブランケットの前に他の構造物設置による中性子フラックスの低減が許容しにくい。特にトリチウム増殖率を少しでも稼ぐためにブランケットとプラズマとの距離を可能な限り狭め、増殖率を上げることに苦慮している。DT核融合炉においてもICHによる支援が現実的であればDD反応による核融合を増加させ、トリチウム生成がプラズマ内部に可能となり、これによりブランケット部でのトリチウム生成量を減らす事が出来る。ブランケットにより生成からプラズマ中央までのトリチウム補給に対する供給率は10-20%以下と予想されるが、DD反応は高温領域で生じているため中央でトリチウムが生成されるため、トリチウムの供給効率が100%であるという観点からも非常に魅力的で、DD反応により定常的なDT運転に必要なブランケットでのトリチウム生成量を緩和することに役立つ。

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. and Des. 87, 5-6(2012) 594.
- [2] D. M. Meade et al., Journal of Fusion Energy, 13(1994) 145.
- [3] D. F. H. Start et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 40(1998) A87.

2. 研究の目的

現在ブランケットサイズは容器内の非常に大部分を占めているが、ICHによる高エネルギーイオン生成によりDD核融合反応を発生させることによりその設計容積を緩和出来るようになる。効果的なICH加熱を行うために、大電力高周波源がある核融合科学研究所にあるLHDにおいて、ICHアンテナを設計・製作し、ICHを用いたプラズマ加熱研究を進めてきた。LHDにおいては定常プラズマ加熱を実現するために、3次元構造を考慮した電磁解析フレームワークの拡充を進め、アンテナ製作前にICHアンテナの電磁波励起およびアンテナ周辺部に励起される高周波電流分布を計算し、アンテナ設計に反映させてきた。この結果、2013年度のLHD実験ではプラズマの線平均電子密度 $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、プラズマ温度 2keV、プラズマ加熱入力 1.2MW によって48分のヘリウムプラズマ放電維持を達成した[4]。この成功には3次元構造を考慮した電磁解析フレームワークにより事前にアンテナに誘起される高周波電流を予想して、波動加熱に必要な高周波電流以外の幾何構造および材料の電気抵抗から生じる不要な高周波電流を発生させないようにするアンテナ設計への反映が重要であった。導波管アンテナ研究に関してもこの電磁解析フレームワークを用いて導波管アンテナを最適化し、モックアップを作成して励起磁場を実際に測定することで、ループアンテナによる励起波動との違いを比較することが出来る。この比較を通して今までループアンテナにより得た波動加熱の知見を導波管アンテナ研究に有効に活用できると考えている。

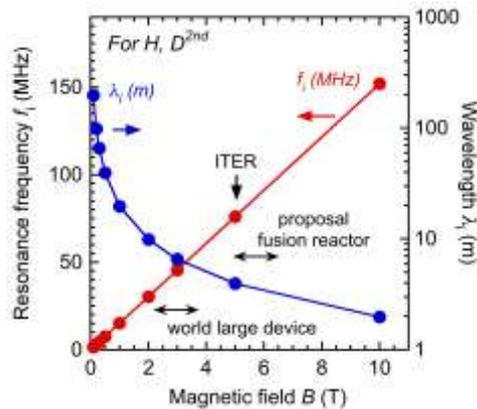


図1. 使用周波数(f_r)と波長サイズ(λ_r)
典型的な巨大核融合実験装置の運転磁場

核融合炉での ICH 運転のシナリオとしては、プラズマの初期点火を考えるのではなく、ECH などの加熱によりある程度 (~5 keV) 温度の上昇したプラズマを加熱することに焦点を変え、2 次高調波加熱を採用することで周波数を高く選択し、導波管口サイズを小さくするべきであると考えた。核融合炉では 4~6T の磁場を想定しており、導波管アンテナの使用する電磁波の波長は図 1 より 3~4m 程度となる。そのため導波管口の幅としては 1.5~2m、高さ 5cm 程度の導波管になる。図 2 に核融合炉で使用するブランケットモジュールに内包させた導波管アンテナの断面図を記載した。ブランケットモジュールは一つのユニット辺り横幅が 2m 以上を想定しているため、先の導波管アンテナを内包する事が出来る。真空容器内への電磁波の伝送・真空遮断・ブランケットへの接続等は、線形の電磁計算を解けば最適化等はできるが、電磁波励起およびプラズマとの結合・第一壁(ブランケット表面)を伝った電磁波伝搬に関してはプラズマの非線形応答等が加わるため実機を用いて実験を行いシミュレーションと比較することで研究を進めなければならない。しかし現状の装置では簡易構造の導波管アンテナは設置できず、計算により研究を進める必要がある。本研究において重要となるのは、導波管モードで励起された ICH 帯の電磁波によるプラズマへの励起・結合・損失の評価手法の確立である。特にループアンテナで培った研究内容をそのまま受け継ぐ事が出来るかどうか、今後の導波管アンテナ研究を迅速に行うことが可能であるかを決定づけ、ループアンテナと導波管アンテナの励起分布の比較を最重要事項と考え研究を進める。プラズマとの結合・損失評価に関しては、本研究では仮想プラズマとして高誘電体であるチタン酸バリウムを用いてモックアップ試験を行い、計算と実測を比較し精度の高い予測が出来るよう研究を進める。

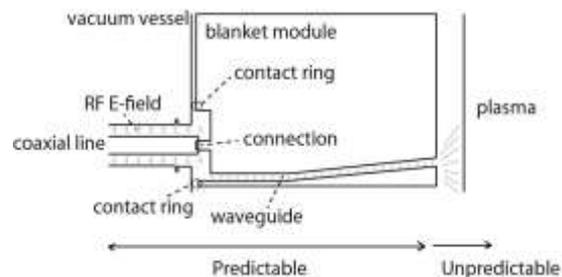


図 2. ブランケット一体型導波管アンテナ
電磁波は左の同軸管から伝送され、ブランケットの接続部で導波管モードに変化され、プラズマへ伝送される。

真空容器内への電磁波の伝送・真空遮断・ブランケットへの接続等は、線形の電磁計算を解けば最適化等はできるが、電磁波励起およびプラズマとの結合・第一壁(ブランケット表面)を伝った電磁波伝搬に関してはプラズマの非線形応答等が加わるため実機を用いて実験を行いシミュレーションと比較することで研究を進めなければならない。しかし現状の装置では簡易構造の導波管アンテナは設置できず、計算により研究を進める必要がある。本研究において重要となるのは、導波管モードで励起された ICH 帯の電磁波によるプラズマへの励起・結合・損失の評価手法の確立である。特にループアンテナで培った研究内容をそのまま受け継ぐ事が出来るかどうか、今後の導波管アンテナ研究を迅速に行うことが可能であるかを決定づけ、ループアンテナと導波管アンテナの励起分布の比較を最重要事項と考え研究を進める。プラズマとの結合・損失評価に関しては、本研究では仮想プラズマとして高誘電体であるチタン酸バリウムを用いてモックアップ試験を行い、計算と実測を比較し精度の高い予測が出来るよう研究を進める。

[4] H. Kasahara, et al., Proc. 25th Int. Conf. Fusion Energy (2014)EX3-4.

3. 研究の方法

アンテナ周辺部の電磁励起分布を効率的に計測するために、アンテナ、真空容器、冷たいプラズマモデルを含んだ電磁解析シミュレーションフレームワークの作成を行う。特に波長の長い電磁波を計算する場合は、レイトレーシングではなく、波動シミュレーションが必要となるが、熱プラズマ計算は非常に計算リソースが必要となるため 1 次元分布において熱プラズマモデルと冷たいプラズマモデルの電磁波の波動伝搬を比較することで、周辺プラズマの物理モデル形成において冷たいプラズマモデルで十分かを検討する。冷たいプラズマでのモデルでも十分な場合は 3 次元モデルへの計算モデルの拡張を行い、3 次元計算モデルの作成を行う。3 次元モデル作成に関しては、商用ソフトであるが COMSOL Multiphysics [5] を元に構築を行う。この商用ソフトの利点は、計算結果の表示及びアンテナ形状を 3 次元 CAD とシームレスに接続することができ、プラズマモデルおよびその他の物理メカニズムに関してはユーザーが計算部をコーディングすることが出来る点にある。計算のためのフレームワークをゼロから作る必要がないため、雑多なシミュレーションのフレームワーク作成に必要な時間や簡易計算のバグを取り除く時間を短縮し、物理モデルのコーディングに時間を集中出来るため、アメリカのマサチューセッツ工科大学のプラズマ計算グループにおいて、COMSOL を用いた LEAF [6] と呼ばれる低域混成周波数帯の電磁波を入れた伝搬計算なども試され、プラズマ実験結果と計算結果が非常に良い一致を示す事が確認されている。計算モデルの構築計画として、①三次元 CAD モデル(ループアンテナ)の構築、②電磁解析メッシュの確定、③冷たいプラズマモデルを用いた計算に関して行う。

[5] www.comsol.com

[6] S. Shiraiwa, et al., Phys. Plasmas 17(2010) 056119.

アンテナ周辺部の励起電磁場分布測定のために波動計測用プローブアレイを製作する。このプローブの 1 ユニットのループ方向が異なる 2 つのループコイルからなり、静電波の受信指向性を高めるための取り外し可能なファラデーシールドを有する。円形板に等間隔に 5 つ設置することで、一度に各方向に対する空間依存性を取得出来るようにした。円形板を回転させる事で、紙面方向に対する角度依存性(ループ方向を変える)を変更でき、90 度回転させるとループコイルの角度が 0 度と比べ直角になり、電磁波の指向性についても計測可能となる。ループ方向を逆にしたことにより、コイル間の位相差を調べることで、受信した信号が静電的な波(同相)か、電磁波的(逆相)な波かを区別できる。このプローブアレイによりループアンテナ、導波管アンテナ

前面の空間に関する励起電場分布の計測を行う。また実験を通してプローブの改良を行い、プローブの感度および高周波特性の改善に務める。

先に作成したプラズマモデルとプローブ計測を基に適した密度分布モデルを考慮した高周波電磁波伝搬計算を行う。計算リソースとして、核融合科学研究所が所有している計算リソースである大規模計算用ワークステーションを用いて行う。フルモデル化には非常に巨大な計算容量が要求されるが、COMSOL において並列スパース直接解放の一つである MUMPS solver を使用することで、複雑な 3 次元形状でも比較的少ない計算リソースでかつ高速に波動伝搬計算を行う。核融合科学研究所では既に LHD における ICRF アンテナモデルを利用して、冷たいプラズマモデルを用いた初期的な電磁波伝搬計算を行っており、計算リソースとして十分な実績がある。ただしプラズマ周辺部の物理モデルとしては非常に単純なモデルを用いていたため、実験結果により導き出される周辺プラズマの物理モデルの構築が依然として重要な意味を持つ。

4. 研究成果

核融合プラズマにおいて、閉じ込め磁場領域内のプラズマの密度は真空に比べ十分に高く、プラズマの温度も数十 eV 以上と高いことが知られている。一方プラズマの閉じ込め磁気面から外れた領域では急激に密度が減少し温度も低く、真空と大差無いレベルになることが予想されていた。実験室プラズマにおいて閉じ込め磁気面の外側にも無視できないプラズマの密度や温度が存在することが実験的に観測されるため、図 3 のような一次元モデルを用いて伝搬特性を比較した。図 3 の左図にあるように、通常ではプラズマ閉じ込め領域である $R=3.0\sim 4.3\text{m}$ の外側には密度が存在しない前提で計算するが、今回の計算では、 $10^{17}\sim 10^{18}\text{ m}^{-3}$ 電子密度のプラズマが存在するとして計算している。図 3 の右図から速波の伝搬領域は冷たいプラズマ (Cold)、熱いプラズマ (Hot) のいずれにおいても電子密度が 10^{18} m^{-3} 程度の領域では垂直伝搬の屈折率が無視できることが分かる。このプラズマは水素 10% となるヘリウムプラズマであり、周波数 38.5MHz の電磁波を $R\sim 4.5\text{m}$ から励起した時の計算である。40MHz の電磁波真空中では 1 波長 7.5m と装置・プラズマサイズに比べ十分長く、そのため電磁波励起にはプラズマ中の電磁波の伝搬特性も知る必要があるが、図 3 の結果から、速波に関して冷たいプラズマモデルと熱プラズマモデルにおいて大差無いことが分かった。アンテナ側から Stix 表記の R, S, L が順番に現れるが、電磁波の吸収の強い S, L 近辺を除いて良い一致を示すことから、アンテナ周辺部 ($R\sim 4.5\text{m}$) の電磁波モデル作成に関して冷たいプラズマモデルでも十分であることが明確になった。熱プラズマの計算に関しては、熱プラズマ計算でよく行われる低次のベッセル関数近似や低次のハーモニクス (2 以下) の計算ではなく、ベッセル関数に関しては次数変化による誤差を無視できるまでの項数を自動計算し、ハーモニクスに関しては 10 次までの計算を行っているため、高次の次数による誤差を無視できるように考慮している。ハーモニクスの次数を 10 次にしたのは、事前の次数に関する熱プラズマテンソルの値の変化を調べたところ、ハーモニクスの次数が 5 次程度まで考慮すれば誘電率テンソルの変化が無くなることを数値シミュレーション的に得ていたため、安全性を考慮して 10 次まで考慮することにした。

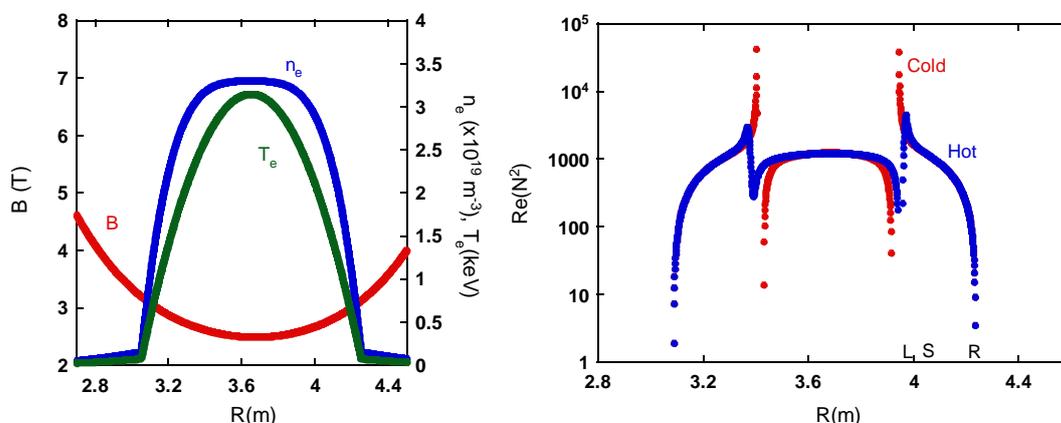


図 3. 一次元電磁波伝搬計算モデル (左図：電子温度・密度・磁場分布)、(右図：冷たいプラズマモデル・熱プラズマモデルによる速波の垂直方向屈折率

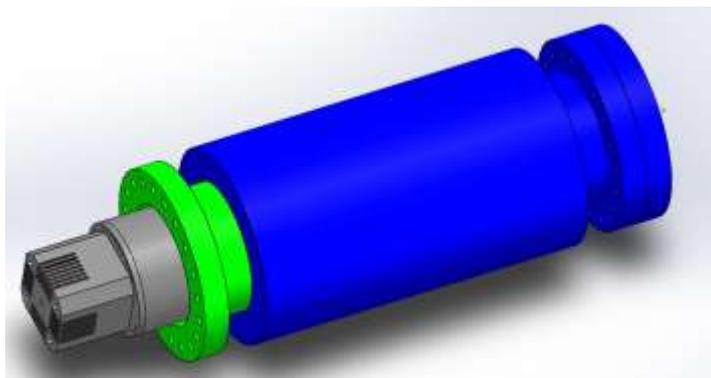


図 4. マルチ静電プローブ・磁気プローブアレイ

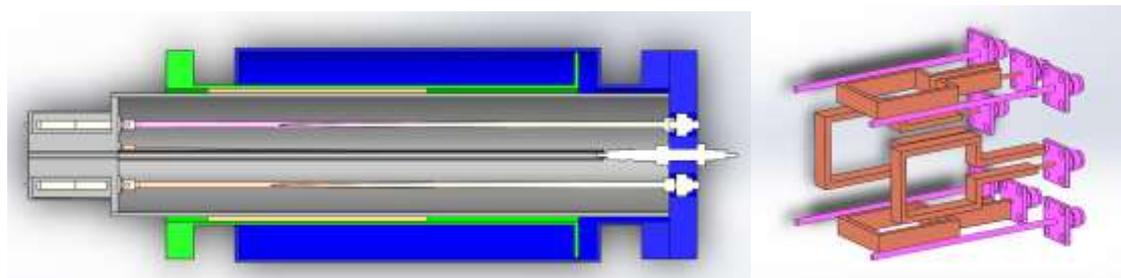


図 5. マルチプローブ装置の断面図とプローブヘッド部のプローブ部

図 4, 5 に今回設計したマルチ静電プローブ・磁気プローブアレイの図面を示す。全体の素材は SUS304 からなり、磁性・不純物等に対して考慮した設計になっている。プローブ周辺部には一部タングステン材で保護を試みたが、最終的には材料の入手が困難になり初期実験として SUS のままの設計とした。図 5 の断面図からも分かる通り、真空部は右のフィードスルーで封じ、中央部の単管部のベローズを利用して前後に稼働できるようにしてある。これにより磁場に垂直方向にプローブの位置を変更して計測を可能にしている。プローブヘッド部のループコイルはステンレスの削りだしに銅のコーティング、静電プローブは薄いプラズマではあるが接触する可能性があるためタングステンのピンとしている。ヘッド部からはセミリジッドケーブルでフィードスルーまで伝達させているため高周波の不整合点としてはプローブヘッドからこのケーブルの接続点と非常に短く、不整合伝送の少ない高周波計測が可能となった。

初期実験としてプローブヘッドを実プラズマに挿入するテストを実施し、電磁波の電力強度が図 3 の計算から予想される電力強度変化と定性的に一致する結果を得たが、複数回の計測試行後にプローブの反応がおかしくなったため、実験終了後プローブを確認したところ、フィードスルー部にアーク痕を発見し、絶縁破壊が生じていることが分かった。フィードスルーに使用した部品の耐電圧は 2kV と計測としては十分高く、現在のところ原因はまだ判明していない。大電力アンテナ周辺部の電磁波計測においてこのような絶縁破壊が報告されるケースがあるが、今回の実験ではループの削除および絶縁部の保護等を実施していたため、今後は非接触手法による電磁波計測を進め、原因を探求する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Klinger T., Andreeva T., Bozhenkov S., Brandt C., Burhenn R., Fuchert G., Geiger B., Grulke O., Laqua H.P., Pablant N., Rabbarnia K., Stange T., von Stechow A., Tamura N., Thomsen H., Turkin Y., Wegner T., Abramovic I., Alcuson J., Aleynikov P., Alonso A., Kasahara H., Kazakov Y.O. et al.	4. 巻 59
2. 論文標題 Overview of first Wendelstein 7-X high-performance operation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 112004 ~ 112004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab03a7	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 Dinklage A., McCarthy K.J., Suzuki C., Tamura N., Wegner Th., Yamada H., Baldzuhn J., Brunner K.J., Buttenschon B., Damm H., Drewelow P., Fuchert G., Hirsch M., Hoefel U., Kasahara H., Sakamoto R., Wolf R.C., Zhang D., the W7-X Team, the LHD Experiment Group, the TJ-II Team	4. 巻 59
2. 論文標題 Plasma termination by excess pellet fueling and impurity injection in TJ-II, the Large Helical Device and Wendelstein 7-X	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 076010 ~ 076010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab17fd	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 Zhang J.H., Zhang X.J., Cheng Y., Qin C.M., Zhao Y.P., Mao Y.Z., Yuan S., Wang L., Ju S.Q., Chen G., Wan B.N., Gong X.Z., Qian J.P., Zhang T., Li J.G., Song Y.T., Yang Y.Q., Chen Z., Wang J.H., Lin Y., Taylor G., Wukitch S., Noterdaeme J.M., Hosea J.C., Kumazawa R., Seki T., Saito K., Kasahara H.	4. 巻 57
2. 論文標題 Experimental analysis of the ICRF waves coupling in EAST	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066030 ~ 066030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa69ca	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 Takeiri Y., Morisaki T., Osakabe M., Yokoyama M., Sakakibara S., Takahashi H., Motojima G., Isobe M., Kubo S., Nagaoka K., Sakamoto M., Sakamoto R., Shimozuma T., Watanabe K.Y., Akiyama T., Goto M., Ida K., Ido T., Igami H., Ikeda K., Kasahara H., The LHD Experiment Group	4. 巻 57
2. 論文標題 Extension of the operational regime of the LHD towards a deuterium experiment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 102023 ~ 102023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa7fc2	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 Kamio S., Seki R., Seki T., Saito K., Kasahara H., Sakakibara S., Nomura G., Mutoh T., The LHD Experiment Group	4. 巻 58
2. 論文標題 Third harmonic ICRF heating in LHD hydrogen experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126004 ~ 126004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aadbb4	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 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 笠原寛史
2. 発表標題 Large Helical Device reveals long time-scale plasma physics
3. 学会等名 International Symposium on the Physics of Ionized Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Kasahara
2. 発表標題 Status of research and development in ICRF heating toward DEMO
3. 学会等名 4th IAEA DEMO Programme Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----