

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03514

研究課題名(和文)加熱機構解明のためのサブテラヘルツ波散乱による電子バーンシュタイン波動の直接検出

研究課題名(英文) Direct Measurement of Electron Bernstein Wave using sub-Tera Hertz Scattering for Clarifying Heating Mechanism

研究代表者

久保 伸 (Kubo, Shin)

中部大学・理工学部・教授

研究者番号：80170025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：九州大学のQUEST装置において、電子バーンシュタイン波動を検出するために、サブテラヘルツ波を光源とする散乱計測を行う。このために、散乱源として、395GHzジャイロトロンを用いることにして、移設までに行い、ジャイロトロンからの出力から伝送ミラー、入射、受信ミラー、QUESTのセンターポストに設置するグレーティングミラーの開発を行ったが、借用期間が過ぎたため、実際の散乱計測を実施するに至らず代用としてHCNレーザを導入するとともに、改めて、光学素子、受信系の再検討を行い、電子バーンシュタイン波検出に備えている。この過程で、新たな準光学グレーティング、準光学光線追跡法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合プラズマにおける電子バーンシュタイン波の振る舞いをテラヘルツ波の散乱により明らかにすることにより、電子バーンシュタイン波加熱、電流駆動の効率化、最適化を図ることができ、通常の電子サイクロトロン波では到達できないオーバデンスプラズマでの電子サイクロトロン加熱・電流駆動の特性を活かしながら、適用範囲を広げることができ、ひいては核融合プラズマ装置の選択幅を広げることができる。また、この過程で開発したミリ波からテラヘルツ波領域での素子である準光学グレーティング設計手法は、今後、核融合プラズマのみならず、様々な分野での応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：The Electron Bernstein Wave (EBW) is one of the main heating/current drive methods for the QUEST spherical tokamak of the Kyushu University. Electron Cyclotron Resonance Heating (ECRH) is the most promising heating/current drive method of the fusion plasmas. One important drawback is the electron cyclotron wave cannot propagate inside over-dense plasma. This density limit is critical in the high beta plasma such as spherical tokamak. The EBW can only be excited in the plasma via mode conversion process from electro-magnetic wave injected from outside of the plasma. Due to this indirect excitation process of the wave the direct detection of the EBW inside the plasma and the study of its behavior is required and necessary to optimize the EBW heating. This project is to detect the EBW inside the plasma directly by the electromagnetic wave scattering using sub-Tera Hz wave. Method to design sub-Tera Hz scattering system and estimate EBW quasi-optical wave propagation are developed.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：テラヘルツ 電子バーンシュタイン波動 散乱計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高周波加熱は核融合プラズマの生成、制御において重要な役割を担っている。その中でも、核融合プラズマの電子加熱及び電流駆動法一つとして電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) がある。この ECRH は、通常、ミリ波からマイクロ波領域のサイクロトロン共鳴周波数を用いて行うため、大きく分けて、1. 局所的な加熱が可能、2. 電子を選択的に加熱、3. 入射角の遠隔制御が容易、4. 入射電力密度が他の加熱法に比べて高い等の利点があり、国際熱核融合実験炉 (ITER) においても、主力加熱・電流駆動装置として位置づけられている。将来の DT 反応を想定した核融合炉においても、ITER に比べてさらに厳しい要求となる中性子の遮蔽性能を確保するために加熱装置のために設ける開口部を少なくすること、つまり、相対的に加熱電力密度を大きくすること、また、中性子照射量の大きい炉近傍から遠隔に設置、制御が可能なが、さらに重要な必要要件となってくる。ECRH システムの進展は目覚ましく、これらの要請に応えることのできるシステムの構築が可能となってきている。通常、電子サイクロトロン共鳴条件 $f = nf_{ce}$, $n = 1, 2, \dots$ (ここで、入射周波数を f (GHz)、加熱したい領域の磁場強度 B (T) に比例した電子サイクロトロン周波数を f_{ce} とした) を満たす中でも吸収の良い基本波 ($n=1$) Oモード (O1 モード)、あるいは、二倍高調波 ($n=2$) Xモード (X2 モード) を選択するのが一般的である。しかしながら、従来の ECRH シナリオである電磁波による加熱は、周波数の二乗に比例する伝搬可能な密度限界 n_{cutoff} (O1 モードの場合 $n_{\text{cutoff}} \approx 9.6B^2$ (10^{18}m^{-3}), X2 モードの場合 $n_{\text{cutoff}} \approx 19.2B^2$ (10^{18}m^{-3})) が存在し、いずれの場合にもこの遮断密度が磁場強度の二乗に比例している。つまり、このため、通常の ECRH を適用するためには β 値に上限があることがわかる。ところが、将来の核融合装置に求められる高ベータプラズマ運転においては、この遮断密度が存在するため、上記の ECRH の利点を生かすことが出来なくなる。この突破口として考えられている加熱手法が、入射電磁波をプラズマ中で電子バーンシュタインモード (EBW) にモード変換させることで、遮断密度を越えて加熱を実現するのが EBW 加熱である。この EBW 加熱は、これまでいくつかの核融合実験装置でその有効性が示されてきた [1] が、EBW の直接検出が行われたわけではなく、加熱結果としての状況証拠が示されているのみである。プラズマ中の波動の検出は、静電プローブ、ループアンテナ等のプローブ (探針) を用いのが簡便であり、波動による電場揺動、磁場揺動、密度揺動を直接測定する手段として広く用いられている。核融合プラズマにおいては、これに代わる方法として電磁波の透過 (微小角散乱)、散乱、反射を用いるものがあり、対象とする波動の波数、及び周波数に応じてこれらが使い分けられている。中でも、散乱計測は、プローブ電磁波の選択によって、波動の周波数、波数及び振幅を局所的に計測することができるため、波動の実空間・波数空間での振舞を調べる最適の方法である。実際、マイクロ波から赤外線領域の散乱計測によって、高温高密度プラズマ中のマイクロ不安定性などの電子の非熱的揺動 (波動) に留まらず、イオンの熱的揺動に伴って (協同的に) 生じる電子の密度揺動が引き起こすコヒーレントな散乱によって入射プローブビームの周波数に対して ± 3 GHz の微小電子密度揺動を観測する協同トムソン散乱 (CTS) 計測も可能となってきた [2]。ただし、通常、散乱断面積が非常に小さいため、この散乱計測には、散乱波検出の際の信号雑音比の増大、つまり、プローブビームの大電力化と検出感度の向上が要求されることになる。これまでに行われた加熱波動の高温高密度プラズマのコア部での直接検出例は、

いずれも位相コントラスト法を含む散乱計測によるもので、イオンサイクロトロン波動、イオンバーンシュタインモード (数+ MHz)、低域混成波 (<1GHz) など、加熱波動の周波数が 1 GHz に留まっている。したがって、今回計画している九州大学の QUEST 装置における EBW (8.2 GHz) の散乱計測は、プローブビームの周波数から加熱波動の周波数 (数 GHz から数十 GHz) 離れた散乱波を観測することが必要となり、散乱光源の大電力化とともに周波数帯域での受信器の高周波数応答高感度化への開発も必要となる。一方散乱光源に関しては、本研究と並行して行われていた LHD 装置におけるサブテラヘルツジャイロトロンによる CTS 実験用に開発された 395GHz ジャイロトロン [3] が本計画の期間借用できることもあり、この 395GHz ジャイロトロンを流用することとし、これを想定した入射、受信システムの構築を開始した。

2. 研究の目的

QUEST 装置 においては、電子バーンシュタイン波 (EBW) による電流立ち上げと定常維持が計画の基幹となっている。しかしながら、これまで EBW の直接検出が困難であるため波動の励起、伝搬及び電流駆動の物理機構については理論的な予想、解析はあるが、実験的には必ずしも明確にはなっていない。ジャイロトロンを用いた協同散乱計測の成果と近年、飛躍的な進歩をとげた大電力サブテラヘルツジャイロトロンを組み合わせ、散乱計測システムを開発しつつ、高ベータプラズマの加熱・電流駆動手法として有望な電子バーンシュタイン波 (EBW) に伴う密度揺動を散乱計測によって直接検出することにより、EBW の振幅・位相の空間構造を詳細に調べることで伝搬・吸収過程を明らかにし、EBW による高ベータプラズマ加熱・電流駆動の最適化をはかるのが本研究の目的である。また、これらに必要なハードウェアの開発、整備に加え、理論的な側面として、散乱体積中の EBW に伴う密度揺動の評価及び、それによる散乱波の伝搬の評価手法の確立も本研究の目的である。

3. 研究の方法

QUEST における 8.2GHz の EBW 加熱波動を散乱法により検出するために、最適な散乱光源の周波数の選択とその帯域における検出器の感度、そこから逆算される光源に要求される電力とパルス幅散乱計測に最適な配位の詳細検討を行って、波動検出用散乱計測装置を構築する。この散乱計測装置を QUEST に導入し、励起波動の伝搬・吸収過程の詳細構造を明らかにするために、加熱波動の振幅の検出、引き続き、入射加熱波と散乱波の位相を検出する。QUEST の加熱電流駆動、電子加熱の最適化の指針とするとともに、さらには、LHD 等でおこなわれているより高周波での EBW 加熱、電磁波としての波動伝搬であるへの適用も検討する。

研究開始当初の背景にも書いたように、当初、福井大学で開発された 395GHz、50kW、最大パルス幅 $150\mu\text{s}$ のジャイロトロンを光源とする計画で、検討を進めジャイロトロン本体を九州大学に持ち込んだところで、コロナ禍のため、ジャイロトロン立ち上げがストップし、そのまま、借用期限が過ぎたため、福井大学に返送することになった、このため、急遽、光源として 0.1W 程度の出力を持つ HCN レーザ (895GHz) を使用を検討した結果、光源の電力、受信器の感度において厳しい条件となるが、散乱計測範囲としては望ましい方向であり、ジャイロトロンの duty 1/1000 に対して、HCN レーザーは CW であることを活かせば、散乱光の受信は可能であると判断し、HCN レーザーを導入、それに合わせて受信システムの変更を行うことにした。

4. 研究成果

(a) 電子バーシュタイン波による散乱の簡易評価と発展

密度揺動 \tilde{n} が存在する場合のプローブビームと散乱波の散乱効率を簡易的に評価すると P_s/P_i は、有効散乱体積 V 中に一様に密度揺動 $\tilde{n}(\mathbf{k}, \omega)$ が存在する場合、 r_0 を古典電子半径、散乱体積中心から観測点までの距離を R とすると

$$P_s/P_i = 4\pi \frac{r_0^2}{R^2} [\tilde{n}(\mathbf{k}, \omega)]^2 V^2 \quad (1)$$

と表せる。したがって、プローブビームの周波数の選択は、直接散乱効率には影響せず、空間分解能を決定するビームサイズや散乱角によって決まる散乱体積 V を介して依存することになる。加熱波動の伝搬電力 P_H と振動電場の関係は $P_H = \omega \epsilon_0 \frac{E_H^2}{2}$ と表され、密度の揺動成分 \tilde{n} と加熱波動の振動電場の関係は、電荷の保存則 $\frac{\partial(\epsilon \tilde{n})}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ から決められるため、EBW の場合、最終的に散乱効率は、

$$P_s/P_i = 8\pi \frac{r_0^2}{R^2} V^2 \left(\frac{e^2 n_c^2}{\epsilon_0 \omega k^2 T^2} \right) \left\{ 1 - \Lambda_0(\beta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega} \left[1 - W \left(\frac{\omega - n\Omega}{|k_{\parallel}|(T/m)^{1/2}} \right) \right] \Lambda_n(\beta) \right\}^2 P_H \quad (2)$$

と表される。ここで、 k_D はデバイ波数、 W や Λ_n, β は、参考文献 [4] の表式を用いた。ただし、この簡易評価では、散乱体積中に加熱電力 P_H で一様に EBW が存在することを仮定しており、出射らが開発しているレイトレースコード [5] を用いて励起波動の実空間、波数空間でのゼロ次的な検討になる。この検討から、散乱計測の散乱角、散乱位置の光源の周波数に対する依存性は示し、最適な光源や散乱計測系の配置を示すことができる。これらの検討から、EBW の吸収される領域では波数が大きくなるため、400 GHz では、180° 散乱配位 (後方散乱) でかろうじての観測が可能 895GHz では、余裕を持って計測可能となることが示される。具体的な散乱光の強度や広がり进行评估するためには、加熱波動である EBW の電力束の評価には (c) で述べる準光学コードの導入が必要となる。

(b) 準光学グレーティング法の開発

当初の 400GHz システムでは、ポートの制限を考慮し、センターポストにグレーティングミラーを設置し、赤道面外側に設置する 2つの可動鏡の角度と位置を変えることで波数空間、実空間で広範囲な散乱計測が可能であることを示した。このグレーティングミラーの設計方法は、ECRH のアンテナを設計する際に準光学ビームにおいて開発したミラー設計法を拡張したものであり、これを用いれば ECRH の伝送コンポーネントの設計手法に新たな自由度を与えるもので、ECRH のシステムの最適化やその応用の場面に有効である。これまで開発してきた、コルゲート導波管やパワーモニター、ミラーシステムを更に高度化、高性能化するために利用できる可能性を示した。特に、本課題でも必要なジャイロトンモードから伝送モードへの変換器 (モード変換器) の設計にもグレーティングの発想を応用すれば、変換効率の向上やモード変換器の簡易化にも役立つことを示した [6]。システムが 895GHz に変更になってもこの設計手法は有効であり、精密加工が必要になるが、有効な散乱計測系を構成できる見通しである。

(c) 準光学光線追跡コードの開発

散乱効率を評価するためには、散乱断面内での密度揺動のレベルを知る必要がある。この密度揺

動のレベルは散乱断面積内を通過する EBW 波動の電力密度によって決まる。しかし、通常の幾何光学近似ではビームの回折効果が無視されており、特に O-mode のプラズマ遮断層を通過するための条件が狭いためこの変換窓を通過した後の X-mode の回折効果を正確に取り入れ、さらに EBW に変換した後の電力束の広がり方を妥当に評価法する必要がある。一つの可能性として、この回折効果とモード変換も扱える準光学ビームトレースコード PARADE[7, 8, 9, 10] を適用することを検討し、EBW の分散関係をこのコードに組み込む検討をおこなっているが、このコードは、プラズマの非一様性のスケール長 L_n 、波長 λ 、ビームの幅のスケール長 L_B の間に $L_n > L_B \gg \lambda$ の関係が成り立つ場合に有効であり、固有モード間結合を扱えるもので QUEST の 8.2GHz での EBW の回折効果も含めて扱うことが可能な範囲であると考えられるが、O-mode から X-mode へ変換する過程でのモード結合を妥当に扱うために実空間でのカットオフでの反射と透過を妥当に評価できるかどうかの検討を行うと同時に、別の可能性として、適用範囲が広がる可能性のある、近軸近似のみを用いて準光学方程式を数値的に解く新たな拡張準光学ビームの開発を進めており、少なくとも PARADE で扱える領域での実用性を示すことができている [11]。

(d) テラヘルツ領域高感度受信機の開発

構築中の受信システムの構成は 395GHz を用いる場合に準備した 原振 20GHz までの 10 通倍ハーモニクジェネレータを局部発信器とし、400GHz 帯の 2 通倍ハーモニクミキサーを、5 通倍として用い、HCN レーザー ($f_0 = 890\text{GHz}$) の信号と、散乱信号 ($f_0 \pm f_H$) をハーモニクミキサーでダウンコンバートし、源振を $(f_0 \pm f_{IF})/50 = 17.80 \pm f_{IF}/50 \text{ GHz}$ と $(f_0 \pm f_H \pm f_{IF})/50 = (890 \pm 8.5 \pm f_{IF})/50 = 17.800 \pm 0.170 \pm f_{IF}/50 \text{ GHz}$ と 4 段周波数変調をかけながら、中間周波数 ($f_{IF} \sim 0.1 \text{ GHz}$) を狭帯域 ($\Delta f_{IF} \sim 0.01 \text{ GHz}$) でダブルサイドバンド受信するものである。これまでの文献から HCN レーザーの数分間の周波数安定度 Δf_0 は 1 MHz 以内、加熱波動の周波数安定度 $\Delta f_H/f_H$ は 10^{-6} 程度であることから中間周波数 ($f_{IF} \sim 0.1 \text{ GHz}$) を狭帯域 ($\Delta f_{IF} \sim 0.01 \text{ GHz}$) は妥当であると考えられる。ハーモニクミキサーの変換効率が下がるため、IF 帯域での狭帯域フィルタや低ノイズアンプの増強が必要となる。今後ミキサーの性能評価を行い、CW の特性を生かした S/N 向上の手法を開発する必要がある。

- [1] H. Laqua et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, **49** R01 (2007).
- [2] M. Nishiura et al. Nucl. Fusion **54**, 023006 (2014).
- [3] T.Saito et al. Physics of Plasmas, **19** 063106 (2012).
- [4] S. Ichimaru, "Basic Principles of Plasma Physics" Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1980.
- [5] E. Kalinnikova, et al., IEEJ Trans. Fundamentals and Materials, Vol.**132**, 505-510 (2012).
- [6] Y.Goto et al., Plasma and Fusion Research, **13** 3405089 (2018).
- [7] I.Y.Dodin et al. Physics of Plasmas,**26**, 07210 (2019).
- [8] K.Yanagihara et al. Physics of Plasmas,**26**, 07211 and 07212 (2019).
- [9] K.Yanagihara et al., Phys. Plasmas **28**, 122102 (2021).
- [10] K. Yanagihara et al., Nucl. Fusion 61, 106012 (2021).
- [11] 浅井史也, 2022 年度修士論文「拡張準光学光線追跡コードの開発」名古屋大学

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 29件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 T. Tsujimura, K. Yanagihara, Y. Goto, S. Kubo	4. 巻 Vol.16
2. 論文標題 Trajectory Shift in Propagation of Electron Cyclotron Waves due to Berry Curvature in Magnetized Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.16.2401009	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 T. Tsujimura, R. Yanai, Y. Mizuno, K. Tanaka, Y. Yoshimura et al.	4. 巻 Vol.61
2. 論文標題 Improved performance of electron cyclotron resonance heating by perpendicular injection in the Large Helical Device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 26012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/abc977	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. Tsujimura, S. Kubo	4. 巻 Vol.28
2. 論文標題 Propagation properties of electron cyclotron waves with helical wavefronts in magnetized plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 12502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0015109	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 R. Seki, S. Kamio, H. Kasahara, K. Saito, T. Seki et al.	4. 巻 Vol.15
2. 論文標題 Initial result of neutron emission rate analysis for ion cyclotron range of frequency heated deuterium plasmas in LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202088
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.1202088	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 T. Tsujimura, Y. Mizuno, R. Yanai, T. Tokuzawa, Y. Ito et al.	4. 巻 Vol.153
2. 論文標題 Real-time control of the deposition location of ECRH in the LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2020.111480	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 I. Y. Dodin, D. E. Ruiz, K. Yanagihara, Y. Zhou, and S. Kubo	4. 巻 26
2. 論文標題 Quasioptical modeling of wave beams with and without mode conversion. I. Basic theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 072110 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5095076	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 K. Yanagihara, I. Y. Dodin, and S. Kubo	4. 巻 26
2. 論文標題 Quasioptical modeling of wave beams with and without mode conversion. II. Numerical simulations of single-mode beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 072111 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5095173	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 K. Yanagihara, I. Y. Dodin, and S. Kubo	4. 巻 26
2. 論文標題 Quasioptical modeling of wave beams with and without mode conversion. III. Numerical simulations of mode-converting beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 072112 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5095174	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. Idei, T. Onchi, K. Mishra, H. Zushi, T. Kariya, T. Imai, O. Watanabe, R. Ikezoe, K. Hanada, M. Ono, A. Ejiri, J. Qian, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Matsuoka, A. Fukuyama, S. Kubo, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, S. Kawasaki, A. Higashijima, S. Ide, Y. Takase and S. Murakami	4. 巻 60
2. 論文標題 Electron heating of over-dense plasma with dual-frequency electron cyclotron waves in fully non-inductive plasma ramp-up on the QUEST spherical tokamak	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016030 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/ab4c12	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 T. Kariya, R. Minami, T. Imai, M. Okada, F. Motoyoshi, T. Numakura, Y. Nakashima, H. Idei, T. Onchi, K. Hanada, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Kubo, Y. Oda, R. Ikeda, K. Sakamoto, M. Ono, K. Nagasaki, T. Eguchi and Y. Mitsunaka	4. 巻 59
2. 論文標題 Development of high power gyrotrons for advanced fusion devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066009 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab0e2c	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, , , , S. Kubo, 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 Yuki Goto, Toru I. Tsujimura, Shin Kubo	4. 巻 40
2. 論文標題 Diffraction Patterns of the Millimeter Wave with a Helical Wavefront by a Triangular Aperture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Infrared and Millimeter Waves	6. 最初と最後の頁 943-951
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-019-00614-z	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 Yuki Goto, Shin Kubo, Hiroe Igami, Masaki Nishiura, Takashi Shimozuma, Yasuo Yoshimura, Hiromi Takahashi, and Toru Ii Tsujimura	4. 巻 50
2. 論文標題 Development of the calibration method for a fast steering antenna for investigating the mode conversion window used in EBW heating in the LHD plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106001 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3e58	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 Teruo SAITO, Shunsuke TANAKA, Ryuji SHINBAYASHI, Yoshinori TATEMATSU, Yuusuke YAMAGUCHI, Masafumi FUKUNARI, Shin KUBO, Takashi SHIMOZUMA, Kenji TANAKA, Masaki NISHIURA	4. 巻 14
2. 論文標題 Oscillation Characteristics of a High Power 300 GHz Band Pulsed Gyrotron for Use in Collective Thomson Scattering Diagnostics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1406104 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1406104	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 Kota YANAGIHARA, Shin KUBO, Toru I. TSUJIMURA and Ilya Y. DODIN	4. 巻 14
2. 論文標題 Mode Purity of Electron Cyclotron Waves after Their Passage through the Peripheral Plasma in the Large Helical Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1406104 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3403103	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 YOSHIMURA Yasuo, EJIRI Akira, SEKI Ryosuke, SAKAMOTO Ryuichi, NAGAOKA Kenichi, SHIMOZUMA Takashi, IGAMI Hiroe, TAKAHASHI Hiromi, TSUJIMURA Toru I., WARMER Felix, YANAGIHARA Kota, GOTO Yuki, IDA Katsumi, YOSHINUMA Mikiro, KOBAYASHI Tatsuya, KUBO Shin, OSAKABE Masaki, MORISAKI Tomohiro, the LHD Experiment Group	4. 巻 13
2. 論文標題 Effect of Electron Cyclotron Current Drive on the Ion Temperature in the Plasma Core Region of the Large Helical Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402124 ~ 1402124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.1402124	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 Takahashi H., Nagaoka K., Mukai K., Yokoyama M., Murakami S., et al.	4. 巻 58
2. 論文標題 Realization of high T i plasmas and confinement characteristics of ITB plasmas in the LHD deuterium experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106028 ~ 106028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aad87e	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 van Berkel M., Kobayashi T., Vandersteen G., Zwart H.J., Igami H., Kubo S., Tamura N., Tsuchiya H., de Baar M.R., The LHD Experiment Group	4. 巻 58
2. 論文標題 Heat flux reconstruction and effective diffusion estimation from perturbative experiments using advanced filtering and confidence analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096036 ~ 096036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aad13e	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 GOTO Yuki, KUBO Shin, TSUJIMURA Toru Ii	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of the Grating Mirror for the High Power Transmission System and Its General Theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3405089 ~ 3405089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3405089	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 Ii Tsujimura T., Mizuno Y., Tokuzawa T., Ito Y., Kubo S., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi H., Ejiri A.	4. 巻 131
2. 論文標題 Real-time control of electron cyclotron wave polarization in the LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 130 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2018.04.062	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 SHIMOZUMA Takashi, KOBAYASHI Sakuji, ITO Satoshi, OKADA Kohta, ITO Yasuhiko, YOSHIMURA Yasuo, IGAMI Hiroe, TAKAHASHI Hiromi, TSUJIMURA Toru, MIZUNO Yoshinori, KUBO Shin	4. 巻 13
2. 論文標題 Analysis Technique of Millimeter-Wave Propagating Modes in an Oversized Corrugated Waveguide Using Developed Beam Profile Monitors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3405036 ~ 3405036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3405036	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 Tanaka K., Nishiura M., Kubo S., Shimozuma T., Saito T., Moseev D., Abramovic I.	4. 巻 13
2. 論文標題 154 GHz collective Thomson scattering in LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01010 ~ C01010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/13/01/C01010	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 Ii Tsujimura T., Mizuno Y., Tokuzawa T., Ito Y, Kubo S, ,Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi H., Ejiri A.	4. 巻 131
2. 論文標題 Real-time control of electron cyclotron wave polarization in the LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 130 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2018.04.062	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 Y Yoshimura, H Kasahara, M Tokitani, R Sakamoto, Y Ueda, N B Marushchenko, R Seki, S Kubo, T Shimozuma, H Igami, H Takahashi, T I Tsujimura, R Makino, S Kobayashi, S Ito, Y Mizuno, K Okada, T Akiyama, K Tanaka, T Tokuzawa, I Yamada, H Yamada, T Mutoh, Y Takeiri and the LHD Experiment Group,	4. 巻 60
2. 論文標題 Stable sustainment of plasmas with electron internal transport barrier by ECH in the LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 25012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/aa9950	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, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Saito, D. Moseev, I. Abramovic	4. 巻 13
2. 論文標題 154 GHz Collective Thomson Scattering in LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.3481165	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. van Berkel, T. Kobayashi, H. Igami, G. Vandersteen, G. M. D. Hogeweij, K. Tanaka, N. Tamura, H. J. Zwart, S. Kubo, S. Ito, H. Tsuchiya, M. R. de Baar and The LHD Experiment Group	4. 巻 57
2. 論文標題 New evidence and impact of electron transport non-linearities based on new perturbative inter-modulation analysis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa827a	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 H. Takahashi, K. Nagaoka, S. Murakami, M. Osakabe, H. Nakano, K. Ida, T. I. Tsujimura, S. Kubo, et al.	4. 巻 57
2. 論文標題 Extension of Operational Regime in High-Temperature Plasmas and Effect of ECRH on Ion Thermal Transport in the LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 86029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa754b	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 Toru Ii Tsujimura, Hiroshi Idei, Shin Kubo, Sakuji Kobayashi	4. 巻 114
2. 論文標題 Optimized design of polarizers with low ohmic loss and any polarization state for the 28 GHz QUEST ECH/ECCD system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 97-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2016.11.019	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 久保 伸, 吉村 信次, 荒巻 光利, 加藤 政博, PETROSKY Tomio,	4. 巻 94
2. 論文標題 小特集 実は遍在する光渦--光渦の原理・発生・応用展開-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 119-140
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 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28件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 西浦正樹, 久保 伸, 吉村泰夫, 矢内亮馬, 伊藤 哲, 伊神弘恵, 辻村 亨, 下妻 隆, 高橋裕己, 鈿持尚輝
2. 発表標題 LHD における遮断密度近傍の電子サイクロトロン加熱の高加熱効率化
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊神弘恵, 久保 伸, 下妻 隆, 吉村泰夫, 辻村 亨, 矢内亮馬, 鈿持尚輝, 田中謙治
2. 発表標題 強磁場側からの基本X モード入射による高密度プラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 出射 浩, 恩地拓己, 福山雅治, 加藤凌哉, 工藤倫大, 池添竜也, 江尻 晶, 大澤佑規, Y. Peng, 井戸 毅, 花田和明, 小島信一郎, 長谷川 真, 黒田賢剛, 中村一男, 小野雅之, 福山 淳, 假家 強, 辻村 亨, 久保 伸, 高瀬雄一, 村上定義
2. 発表標題 QUEST おける電子サイクロトロン波電流立ち上げ時の共鳴速度領域制御
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻村 亨, 久保 伸
2. 発表標題 磁化プラズマにおけるヘリカル波面を持つ電子サイクロトロン波の分散特性
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保 伸, 出射 浩, 斉藤輝雄, 立松芳典
2. 発表標題 400GHz ジャイロトロンを用いた QUEST の8.5GHz 電子パーシュタイン波による散乱計測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立 迅, 西浦正樹, 田中謙治, 久保 伸, 釘持尚輝, 下妻 隆, 矢内亮馬, 斉藤輝雄, LHD 実験グループ
2. 発表標題 LHD における協同トムソン散乱のための受信機感度較正
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳原洸太, 久保 伸, Ilya DODIN, LHD 実験グループ
2. 発表標題 直接計測された電子サイクロトロン波ビーム伝搬の準光学シミュレーション
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 假家 強, 伊藤 哲, 下妻 隆, 吉村泰夫, 南 龍太郎, 沼倉友晴, 今井 剛, 坂本瑞樹, 久保 伸
2. 発表標題 LHD における ECH 用154GHz/116GHz2周波数ジャイロトロン初期性能試験
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tsujimura, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, R. Yanai, K. Yanagihara
2. 発表標題 Real-time injection control of electron cyclotron resonance heating power in LHD
3. 学会等名 Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yanagihara, I. Dodin, S. Kubo, T. Tsujimura
2. 発表標題 Quasioptical simulations of electron cyclotron waves with and without mode conversion
3. 学会等名 23rd Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kubo, H. Idei, T. Saito, Y. Tatematsu
2. 発表標題 Electron Bernstein wave detection using 400 GHz wave scattering in the QUEST
3. 学会等名 23rd Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保 伸、後藤勇樹、辻村亨
2. 発表標題 電子サイクロトロン放射の渦性とその観測
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西浦正樹, 鋤持尚輝, 奴賀秀男, 關良輔, 久保伸, 田中謙治, 足立迅C, 下妻隆, 斉藤輝雄, Moseev Dmitry, Salewski Mirko, LHD実験グループ
2. 発表標題 同トムソン散乱計測により得られた散乱スペクトルの速度空間再構成
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shin Kubo, Hiroshi Idei, Teruo Saito, and Yoshinori Tatematsu
2. 発表標題 Study of sub-Tera-Hz gyrotron scattering for a direct detection of EBW in QUEST
3. 学会等名 20th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC-20) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. GOTO S. KUBO, and T. II.TSUJIMURA
2. 発表標題 Research of the Electron Cyclotron Emission with Vortex Property from Multi Electrons
3. 学会等名 20th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC-20) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kota Yanagihara, Shin Kubo, Toru Ii Tsujimura and Hiroaki Nakamura
2 . 発表標題 Extension of a ray tracing for polarized diffracting wave beams description in inhomogeneous magnetized plasmas
3 . 学会等名 20th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC-20) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Igami, S. Kubo, T. Shimosuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, T. I. Tsujimura, S. Kobayashi, Y. Mizuno H. Takubo, K. Tanaka, M. Yokoyama, R. Seki, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Tsuchiya, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, S. Ohdachi, M. Osakabe, T. Morisaki and LHD experiment group
2 . 発表標題 Recent progress of the applications of ECRH/ECCD and the supportive technologies in the LHD
3 . 学会等名 20th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC-20) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shin Kubo, Hiroshi Idei, Yoshinori Taematsu, Teruo Saito, Moe Iizawa
2 . 発表標題 Electron Bernstein Wave Detection By Sub-Tera-Hz Scattering In The QUEST
3 . 学会等名 43rd International Conference on InfraRed -MilliMeterWave and Telahertz Waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Teruo Saito, Shunsuke Tanaka, Ryuji Shinbayashi, Takumi Hirobe, Yuusuke Yamaguchi, Masafumi Fukunari, Yoshinori Tatematsu, Kunizo Ohkubo, Shin Kubo, Takashi Shimosuma, Kenji Tanaka, Masaki Nishiura
2 . 発表標題 Developments Of Equipment For Sub-THz Collective Thomson Scattering In LHD
3 . 学会等名 43rd International Conference on InfraRed -MilliMeterWave and Telahertz Waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Tokihiko Tokuzawa, Kazuki Oguri, Shin Kubo, Kenji Tanaka, Hiroshi Yamada, Kiyomasa Watanabe, Akira Ejiri, Shigeru Inagaki, Teruo Saito, Junko Kohagura
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 -MilliMeterWave and TeraHertz Waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin KUBO, Hiroshi IDEI, Teruo SAITO, Yoshinori TATEMATSU
2. 発表標題 Electron Bernstein wave detection by far-infrared wave scattering in QUEST
3. 学会等名 27th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kota YANAGIHARA, Shin KUBO, Toru I. TSUJIMURA, and Ilya Y. DODIN
2. 発表標題 Mode purity of electron cyclotron waves after their passage through the peripheral plasma in the Large Helical Device
3. 学会等名 27th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin Kubo, Hiroshi Idei, Teruo Saito, Yoshinori Tatematsu
2. 発表標題 Study on a direct detection of EBW by sub-Tera-Hz gyrotron scattering
3. 学会等名 26th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuki GOTO, Shin KUBO and Toru Ii TSUJIMURA
2. 発表標題 Development of the Grating Mirror for the High Power Transmission System and its General Theory
3. 学会等名 26th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohta YANAGIHARA, Shin KUBO, Ilya DODIN, Hiroaki NAKAMURA, Toru Tsujimura
2. 発表標題 Extension of ray tracing for a description of electron cyclotron wave beams in inhomogeneous magnetized plasma
3. 学会等名 26th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Shimosuma, Sakuji Kobayashi, Satoshi Ito, Yasuhiko Ito, Kohta Okada, Yasuo Yoshimura, Hiroe Igami, Hiromi Takahashi, Toru Tsujimura, Yoshinori Mizuno, Shin Kubo,
2. 発表標題 Improvement of Millimeter-Wave Transmission Efficiency Using Beam Profile Monitors in an ECRH Transmission Line
3. 学会等名 26th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Yoshimura, T. Shimosuma, H. Igami, H. Takahashi, T. I. Tsujimura, R. Makino, K. Yanagihara, Y. Goto, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, K. Nagaoka, R. Sakamoto, S. Kubo, M. Osakabe, T. Morisaki
2. 発表標題 Effect of ECCD on the ion temperature at the plasma core region
3. 学会等名 International Stellarator/Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Tsujimura, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, and R. Makino,
2. 発表標題 Study of optimum injection of ECH for high electron temperature plasmas in the Large Helical Device
3. 学会等名 Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2017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
研究分担者	立松 芳典 (Tatematsu Yoshinori) (50261756)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授 (13401)	
研究分担者	出射 浩 (Idei Hiroshi) (70260049)	九州大学・応用力学研究所・教授 (17102)	
研究分担者	斉藤 輝雄 (Saito Teruo) (80143163)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特命教授 (13401)	

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