

令和 5 年 4 月 11 日現在

機関番号：33910

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14687

研究課題名(和文) 軌道角運動量を持つ電子サイクロトロン波動の伝搬がプラズマ加熱に与える影響の解明

研究課題名(英文) Effects of electron cyclotron wave propagation with orbital angular momentum on plasma heating

研究代表者

辻村 亨 (Tsujiyama, Toru)

中部大学・工学部・准教授

研究者番号：00732744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は電子サイクロトロン(EC)加熱において、光の軌道角運動量が異方性媒質である磁化プラズマ中の伝搬にどのように影響するかを解明することを目的とした。得られた研究成果は次の通りである：(1) Berry曲率は波数がゼロになるときに発散的に増加するため、Xモードの場合には右手カットオフ層で反射する際に、横ずれの効果が現れた。(2) 螺旋波面が波動場に与える効果は、EC波の渦度が大きく、光軸から近いほど顕著であることが分かった。(3) 軌道角運動量を持つEC波を生成する螺旋位相ミラーを開発した。(4) 光渦伝送系を構築し、世界で初めて渦EC波によるプラズマ生成・加熱・維持を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、従来無視されてきた光の軌道角運動量がEC波の偏波と相互作用することで、異方的な誘電媒質である磁化プラズマ中の伝搬に与える影響が明らかにされてきたということである。

社会的意義は、高密度領域に伝搬可能と示唆される渦EC波によるプラズマ加熱の高効率化を理論的・実験的に検証していくことが核融合炉実現に向けて貢献することである。

研究成果の概要(英文)： The purpose of this study was to elucidate how the orbital angular momentum of electromagnetic wave affects its propagation in an anisotropic medium, magnetized plasma, in electron cyclotron (EC) heating. The results obtained are as follows: (1) The Berry curvature increases divergently when the wavenumber goes to zero, so that in the case of the X-mode, the effect of transverse shift appears when the wave is reflected at the right-handed cutoff layer. (2) The effect of the spiral wavefront on the wavefield was found to be more pronounced when the vorticity of the EC waves on the spiral wavefront was larger and closer to the optical axis. (3) A spiral phase mirror was developed to generate EC waves with orbital angular momentum. (4) We constructed an optical vortex transmission system and demonstrated plasma generation, heating, and sustainment by vortex EC waves for the first time in the world.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：電子サイクロトロン波 磁化プラズマ 光渦 軌道角運動量 プラズマ加熱 Berry曲率 スパイラル位相ミラー ミリ波伝送系

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) ミリ波を用いる電子サイクロトロン (EC) 加熱は磁場閉じ込めプラズマにおいて有望なプラズマ加熱法の一つである。これまで我々が明らかにしたことは、入射するミリ波の最適な偏波は、プラズマ周辺領域における電子密度勾配のスケール長と磁気シアの変化のスケール長に依存するということである (図 1 参照)。そこで我々は偏波の実時間制御システムを開発し、時間変化するプラズマに対して高効率加熱を維持することを実証した。

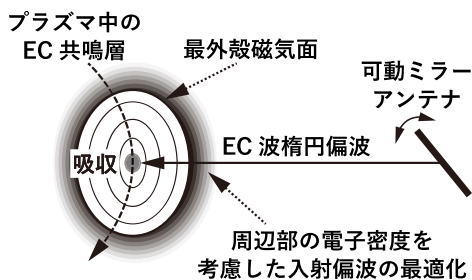


図 1 周辺プラズマを考慮した EC 入射系の最適化

(2) 通常の光は波面が平面的であるのに対して、ヘリカル (螺旋) 状の波面を持つ光を光渦と呼ぶ (図 2 参照)。最近、サイクロトロン放射やコンプトン散乱などのように旋回する電子からの放射光に渦性が存在することが理論的に示された。光渦は通常の偏波を表すスピン角運動量だけでなく、軌道角運動量も運ぶ。

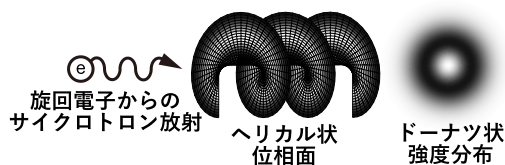


図 2 光渦のヘリカル波面

2. 研究の目的

EC 加熱において、従来無視してきた光の軌道角運動量が、EC 波の偏波 (スピン角運動量) と相互作用することで、異方的な誘電媒質である磁化プラズマ中の伝搬にどのように影響するのかを解明することである。

3. 研究の方法

(1) 偏光が光の伝搬に影響し、屈折率の変化と垂直な方向に伝搬軌道がずれることが知られている。この光の偏光由来の Hall 効果による光の伝搬軌道の横ずれは、スピンに起因する Berry 曲率によって影響されると理解されている。Berry 曲率は磁場のようなものと解釈でき、波数空間で働くローレンツ力のような力が実空間において横ずれを引き起こす。この効果を磁化プラズマ中に拡張し、全波計算により検証した。

(2) 冷たく一様な磁化プラズマ中において、ヘリカル波面を持つ EC 波の伝搬特性に関する基礎理論を構築した。この理論ではヘリカル波面が波動場に与える効果を記述した。また真空中において近軸近似解で表される光渦であるラゲールガウシアンビームを用いた波動伝搬シミュレーションを COMSOL Multiphysics を用いて行った。

(3) 軌道角運動量を持つ EC 波を生成するために、ミリ波帯光渦伝送系を構築した。そのために、ジャイロトロンからのミリ波を光渦に変換するためのスパイラル位相ミラーを開発した。ミリ波帯で所望の軌道角運動量を持つ光渦を発生させるための軸外しスパイラル位相ミラーのミラー面をモデル化し、機械加工により製作した。この製作したスパイラル位相ミラーに対して、反射特性を調べた。

高パワー耐性のあるスパイラル位相ミラーを大型ヘリカル装置の 77 GHz 伝送系やヘリオトロン J 装置の 70 GHz 伝送系に設置できるように、マイターバンド用フランジに収めた。既存の EC 加熱伝送系に、導波管切替器を用いてバイパス導波管を設け、ミリ波帯光渦伝送系を構成した。光渦を用いた新しい EC 加熱の実験的検証を行うことができるようになった。

4. 研究成果

(1) 研究方法を 3. (1) に示す。磁化プラズマ中の平行伝搬の場合と垂直伝搬の場合のそれぞれの固有モードに対してまず Berry 曲率を求めた。その結果、Berry 曲率は波数がゼロになるときに発散的に増加することが示され、すなわち異常波 (X 波) の場合には、右手カットオフ層で反射する際に、この新しい横ずれの効果が期待できる。

この理論を基に、X 波の場合の 2 次元空間における伝搬を全波計算によって検証した。計算の結果、従来の伝搬軌道からの横ずれが発生し、その向きは屈折率の勾配と磁場に垂直な方向によって決まることが分かった。磁場の向きを正負変えることによって、横ずれの向きも変わり、2 次元平面内で波長程度の大きさの横ずれを観測した (図 3 参照)。また軌道角運動量を有する光

渦により発生する Berry 曲率をもたらす横ずれも、3次元空間における初期的な全波計算によって明らかになった。

(2) 研究方法を 3. (2) に示す。ヘリカル波面が波動場に与える効果はヘリカル波面を持つ EC 波のトポロジカルチャージが大きく、光軸から近いほど顕著であることが分かった (図 4 参照)。この特異な伝搬特性は波動伝搬シミュレーションにおいても確認できた。光渦でない通常の EC 波のプラズマ中での固有モードは、磁場に垂直な伝搬の場合、正常波 (0 波) と異常波 (X 波) に分類される。ヘリカル波面を持つ EC 波の場合、低密度側で励起されるトポロジカルチャージ l の 0 波のラゲールガウシアンビームの一部が、高域混成共鳴層でトポロジカルチャージ $l-1$ の高波数 X 波

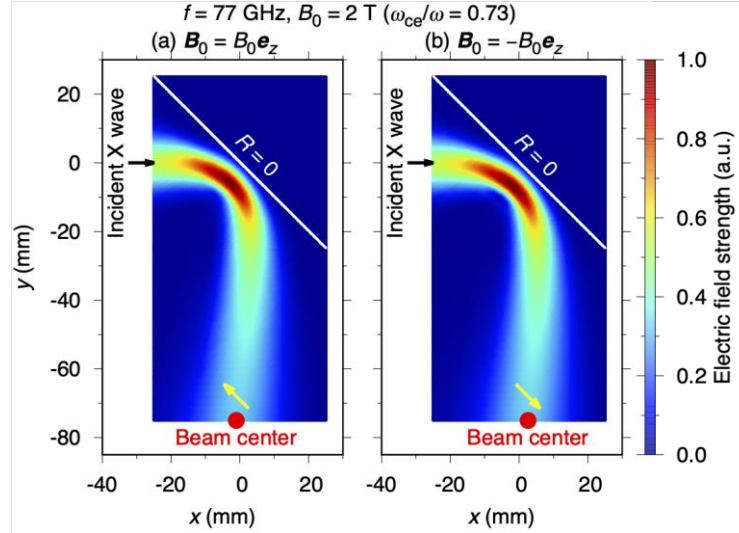


図 3 X 波の電場強度分布 [1]

波のラゲールガウシアンビームに変換されることが分かった (図 5 参照)。本研究結果は旋回する電子からの軌道角運動量を持つ光が EC 放射された後に、磁化プラズマ中をどのように伝搬するかを説明する。また逆に EC 加熱のためにプラズマ外から入射したミリ波帯光渦の伝搬が、従来用いられてきたガウシアンビーム (あるいは平面波) の伝搬とどのように異なるのかを説明する。今後のプラズマ加熱や放射計測に光渦を応用する上で重要な知見が得られたといえる。

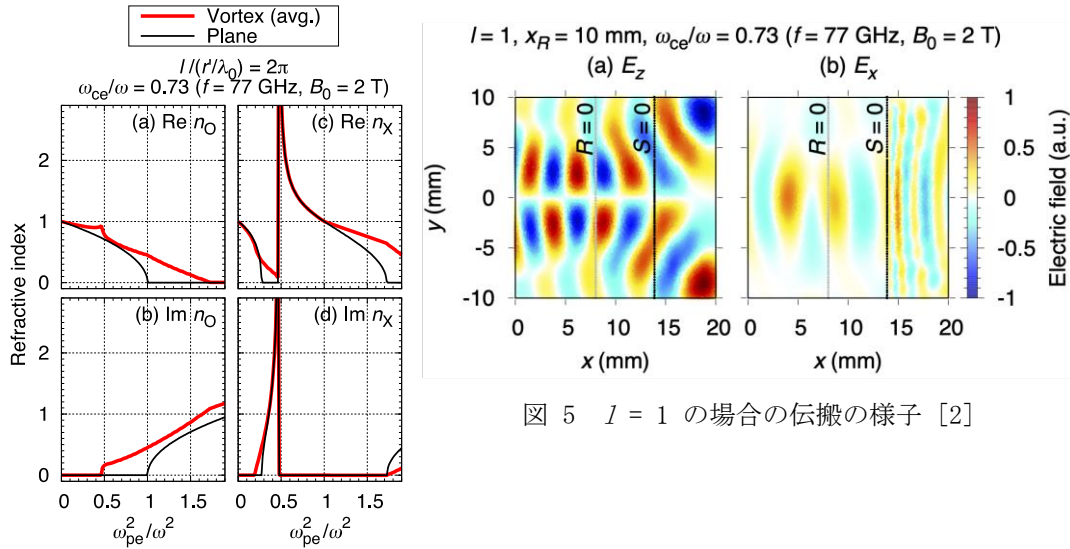


図 5 $l = 1$ の場合の伝搬の様子 [2]

図 5 0 波と X 波における平面波と光渦の屈折率の違い [2]

(3) 研究方法を 3. (3) に示す。低パワー試験により、反射波の軌道角運動量を設計値と比較し、良好な結果を得た (図 6 参照)。軌道角運動量に対応したドーナツ状の強度分布を得た。位相に関しては、干渉法や位相回復法を用いて、反射波の軌道角運動量を評価し、所望の位相特性を得たことを確認した。このようなミラーは、大電力での冷却が可能であるため、ジャイロトロンなどの発振器とアンテナミラーの間にある既存のミリ波伝送系に設置することができ、ヘリカル波面を持つ高周波の磁化プラズマ中での伝搬実験が可能になる。

70 GHz 伝送系において、低パワー試験だけでなく、高パワー試験も行い、光渦の伝搬特性や伝送効率を評価した。また実際にプラズマ入射実験を行い、世界で初めて光渦 EC 波によるプラズマ生成・加熱・維持を実証した。

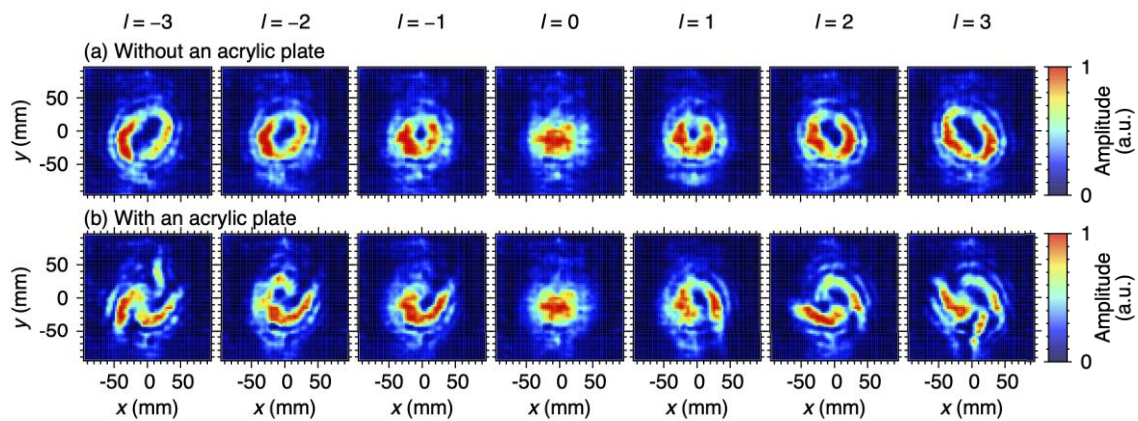


図 6 スパイラル位相ミラーにより生成された各トポロジカルチャージを持つ光渦の強度分布と干渉計測 [3]

<引用文献>

- [1] T. I. Tsujimura *et al.*, Plasma Fusion Res. **16**, 2401009 (2021)
- [2] T. I. Tsujimura and S. Kubo, Phys. Plasmas **28**, 012502 (2021)
- [3] T. I. Tsujimura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93**, 043507 (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsuji-mura Toru Ii, Goto Yuki, Okada Koji, Kobayashi Sakuji, Kubo Shin	4. 巻 93
2. 論文標題 Development of off-axis spiral phase mirrors for generating optical vortices in a range of millimeter waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 043507 ~ 043507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077893	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 Tsuji-mura T. I., Kobayashi T., Tanaka K., Ida K., Nagaoka K., Yoshinuma M., Yamada I., Funaba H., Seki R., Satake S., Kinoshita T., Tokuzawa T., Kenmochi N., Igami H., Mukai K., Goto M., Kawamoto Y.	4. 巻 29
2. 論文標題 Direct observation of the non-locality of non-diffusive counter-gradient electron thermal transport during the formation of hollow electron-temperature profiles in the Large Helical Device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 032504 ~ 032504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0074351	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 TSUJIMURA Toru I., YANAGIHARA Kota, GOTO Yuki, KUBO Shin	4. 巻 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 Tsuji-mura Toru Ii, Kubo Shin	4. 巻 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 Tsujimura T.I., Yanai R., Mizuno Y., Tanaka K., Yoshimura Y., Tokuzawa T., Nishiura M., Sakamoto R., Motojima G., Kubo S., Shimozuma T., Igami H., Takahashi H., Yoshinuma M., Ohshima S., The LHD Experiment Group	4. 巻 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 2020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 Ii Tsujimura T., Mizuno Y., Yanai R., Tokuzawa T., Ito Y., Nishiura M., Kubo S., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi H., Tanaka K., Yoshinuma M., Ohshima S.	4. 巻 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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 T. I. Tsujimura
2. 発表標題 Direct Observation of Non-locality of Non-diffusive Counter-gradient Electron Heat Transport
3. 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. I. Tsujimura and S. Kubo
2. 発表標題 Propagation properties of electron cyclotron wave with helical wavefront in magnetized plasma
3. 学会等名 21st Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻村亨、久保伸、長崎百伸、後藤勇樹、鈿持尚輝、小田靖久、辻政裕、竹内俊貴、小林策治、坂本欣三、岡田光司、清水貴史、伊藤哲、吉村泰夫、西浦正樹、水野嘉識、矢内亮馬、高橋裕己、伊神弘恵
2. 発表標題 LHDとHeliotron Jにおける光渦を用いた新しい電子サイクロトロン加熱実験に向けた伝送系の開発
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻村亨、後藤勇樹、岡田光司、小林策治、久保伸
2. 発表標題 光渦を用いた新しい電子サイクロトロン加熱実験に向けたスパイラル位相ミラーの開発
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. I. Tsujimura
2. 発表標題 Direct Observation of Non-locality of Non-diffusive Counter-gradient Electron Heat Transport
3. 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. I. Tsujimura and S. Kubo
2. 発表標題 Propagation properties of electron cyclotron wave with helical wavefront in magnetized plasma
3. 学会等名 21st Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻村亨、久保伸、長崎百伸、後藤勇樹、釘持尚輝、小田靖久、辻政裕、竹内俊貴、小林策治、坂本欣三、岡田光司、清水貴史、伊藤哲、吉村泰夫、西浦正樹、水野嘉識、矢内亮馬、高橋裕己、伊神弘恵
2. 発表標題 LHDとHeliotron Jにおける光渦を用いた新しい電子サイクロトロン加熱実験に向けた伝送系の開発
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻村亨、後藤勇樹、岡田光司、小林策治、久保伸
2. 発表標題 光渦を用いた新しい電子サイクロトロン加熱実験に向けたスパイラル位相ミラーの開発
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tsujimura
2. 発表標題 Propagation properties of optical vortex in magnetized plasma
3. 学会等名 40th JSST (Japan Society for Simulation Technology) Annual International Conference on Simulation Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. I. Tsujimura, T. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, K. Nagaoka, M. Yoshinuma, I. Yamada, H. Funaba, T. Kinoshita, T. Tokuzawa, N. Kenmochi, H. Igami, and K. Mukai
2. 発表標題 Electron heat transport study during off-axis electron cyclotron heating
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Toru I. Tsujimura and Shin Kubo
2 . 発表標題 Propagation properties of an optical vortex in an electron cyclotron range of frequencies in magnetized plasmas
3 . 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Toru I. Tsujimura and Shin Kubo
2 . 発表標題 Propagation properties of electron cyclotron waves with helical wavefronts in magnetized plasmas
3 . 学会等名 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Tsujimura, T. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, K. Nagaoka, M. Yoshinuma, I. Yamada, H. Funaba, T. Kinoshita, T. Tokuzawa, N. Kenmochi, H. Igami, K. Mukai
2 . 発表標題 Direct observation of the non-locality of non-diffusive counter-gradient electron thermal transport during the formation of hollow electron-temperature profiles in LHD
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 T. Tsujimura, R. Yanai, K. Tanaka, Y. Yoshimura, T. Tokuzawa, M. Nishiura, R. Sakamoto, G. Motojima, S. Kubo, T. Shimoizuma, H. Igami, H. Takahashi, M. Yoshinuma, S. Ohshima, LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Improved Performance of ECRH by Real-Time Deposition Location Control and Perpendicular Injection in LHD
3 . 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 辻村 亨、小林 達哉、田中 謙治、居田 克巳、永岡 賢一、吉沼 幹朗、山田 一博、舟場 久芳、木下 稔基、徳澤 季彦、釘持 尚輝、伊神 弘恵、向井 清史
2. 発表標題 LHDプラズマにおけるホロー電子温度分布形成時の非拡散的・非局所的な電子熱輸送の直接観測
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 Toru I. TSUJIMURA, Kota YANAGIHARA, Yuki GOTO, Shin KUBO
2. 発表標題 Trajectory Shift in Propagation of Electron Cyclotron Waves due to Berry Curvature in Magnetized Plasma
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
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 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 Toru Tsujimura
2. 発表標題 Real-time control of ECH operation in LHD
3. 学会等名 22nd International Tokamak Physics Activity Integrated Operations Scenarios Technical Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Tsujimura, S. Kubo, T. Shimosuma, 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 23rd Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻村亨、柳原洸太、後藤勇樹、久保伸
2. 発表標題 Berry曲率が磁化プラズマ中の電子サイクロトロン波の伝播軌道に与えるズレ
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
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
---------------------------	-----------------------	----

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