

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03792

研究課題名(和文) 電磁場制御による核融合プラズマの内部輸送障壁形成手法の新展開

研究課題名(英文) Frontier Exploration of Internal Transport Barrier Formation for Fusion Plasma by Electromagnetic Field Control

研究代表者

南 貴司 (Minami, Takashi)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：40260046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め核融合炉に必要な高性能プラズマを生成するためにプラズマの熱輸送を改善することが必要である。そのためにプラズマ中に内部輸送障壁を形成し、閉じ込め改善を行うことが研究をおこなった。

磁場構造とは独立に電場生成が可能なヘリカルプラズマの特性をいかして磁場構造変化から電場形成、そして内部輸送障壁形成と繋がっていくプラズマ構造形成のダイナミックな物理機構を解明し新しい発想であるダブルポケルスセル型のマルチパストムソン散乱計測装置(DPMP-TH)を開発することで電子の非等方な速度分布を計測し、電子速度分布がプラズマ輸送や障壁形成に与える影響を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人類共通のエネルギー問題解決、それに伴う持続可能な社会の創造、地球温暖化問題を始めとする地球環境問題の解決のために磁場閉じ込め核融合炉によるエネルギー生成の実現を目指した。そのために必要な高性能プラズマ生成を実現するためにプラズマの熱輸送を改善を目指した。本研究により得られた電子内部輸送障壁形成に対する知見は、この目標達成に資する成果と考えている。

研究成果の概要(英文)：An improvement of plasma confinement is required for realizing fusion reactor in order to generate fusion energy. The knowledge of a dynamics of an internal transport barrier contribute to the fusion plasma performance.

In a helical plasma, which can generate an electric field independently of the magnetic field structure, the dynamic physical mechanism of plasma structure formation, which is linked to the formation of an internal transport barrier, is studied. By developing a double pockels cell-type multi-path Thomson scattering measuring device (DPMP-TH), the non-isotropic velocity distribution of electrons can be measured, and the effect of the electron velocity distribution on plasma transport and barrier formation is investigated.

研究分野：プラズマ核融合学

キーワード：磁場閉じ込め核融合 ヘリカル型装置 Heliotron J装置 トムソン散乱計測 マルチパストムソン散乱計測 電子内部輸送障壁 プラズマ制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉に必要な高性能プラズマを生成するためには異常輸送の原因となるプラズマ乱流を抑制しプラズマの熱輸送を改善することが必要である。そのためにプラズマ中に内部輸送障壁を形成し、閉じ込め改善を行うことが研究されてきた。トカマク型磁場閉じ込め装置においてはプラズマ電流分布を制御しプラズマを閉じ込めている磁場の構造変化させること、すなわち負磁気シア磁場配位を形成することにより輸送障壁を形成する試みが行なわれている。

一方、ヘリカル型磁場閉じ込め装置においては、電子サイクロトロン波(ECH)をプラズマ中に入射してプラズマ中心を加熱し、正の径電場を生成することによりプラズマ内部に輸送障壁を形成するという、全く異なった手法で内部輸送障壁を形成することができる。

本研究課題には二つの問いがある。トカマク型装置における輸送障壁形成の物理機構に関しては、従来から磁場構造変化による電場形成が重要な役割をはたしていることが指摘されており、両内部輸送障壁は電場形成という統一的な物理スキームで理解可能と考えられている。しかし磁場構造が内部輸送障壁形成に与える影響は、まだ多くの問題が残されている。そこで磁場構造変化から電場形成、そして内部輸送障壁形成と繋がっていくプラズマ構造形成のダイナミックな物理機構は何かというのが問いである。

また、ヘリカルプラズマにおいては輸送障壁がECHにより形成されるため、非熱的な高エネルギー電子の速度分布が輸送障壁形成に役割を果たしている可能性が指摘されている。非等方なプラズマの速度分布がプラズマ輸送、とりわけ内部輸送障壁形成に与える影響は、これまでの研究では、ほとんど明らかになっていない。本研究では、プラズマの電子速度分布を直接計測することにより、速度分布が輸送にあたえる影響を明らかにする。すなわちプラズマの非熱的な非等方速度分布が内部輸送障壁形成に与える影響は何かというのが第2の問いである。

2. 研究の目的

研究目的は、(1)磁場構造とは独立に電場生成が可能なヘリカルプラズマの特性をいかして、多様な磁場構造を生成することができるHeliotron J装置をもちい、磁場構造変化から電場形成、そして内部輸送障壁形成と繋がっていくプラズマ構造形成のダイナミックな物理機構を解明する。(2)電子の非等方な速度分布を計測することで、電子速度分布がプラズマ輸送や障壁形成に与える影響を解明する。そのために後述するレーザービーム光路長問題を解決した、(3)新しい発想であるダブルポケルスセル型のマルチパストムソン散乱計測装置(DPMP-TH)を開発することである。

トカマク型装置においては磁場構造が電場生成や障壁形成に与える影響を調べる必要があるが磁場構造変化が電場形成の手段であるので、電場、磁場それぞれが与える影響を独立に調べることができない。一方、ヘリカルプラズマにおいてはECHを用いて電場を生成し、内部輸送障壁を形成することができるので従来は磁場構造に注目せず電場形成のみに着目して研究が進展してきた。本研究は発想を逆転させ、磁場構造とは独立に電場を直接生成し内部輸送障壁を形成することが可能なヘリカル型装置において、磁場構造を能動的に制御することにより、磁場構造と電場形成、それぞれが内部輸送形成にあたえる影響を明らかにする。このことは従来、実施されてこなかったアイデアに基づく研究手法である

ヘリカルプラズマの内部輸送障壁による閉じ込め改善度はトカマクプラズマと比較して小さい。その原因はヘリカルプラズマにおいて観測されている内部輸送障壁がプラズマ中心に近い場所に形成されるので、その内側である輸送改善領域が狭いためである。我々は、その原因がヘリカル型装置においても磁場構造が電場形成に大きな影響を与えているのが原因と予想している。

プラズマの速度分布が、プラズマ輸送に、どのような影響を与えるのかについて、従来の実験的な研究では不十分である。なぜなら従来の電子の非等方な速度分布を、X線PHA法や電子サイクロトロン法などを用いることが行われてきたが、これらの手法は非等方な速度分布により生成される制動輻射や電子サイクロトロン輻射から間接的に速度分布に関する情報を得ているのにすぎないからである。本研究ではトムソン散乱計測法を用い電子の前方散乱、後方散乱を計測することにより電子の非等方速度分布を直接計測し、電子の非等方速度分布がプラズマ輸送、特に障壁形成にあたる影響を調べるといって従来試みられていない手法を用いる。

トカマクプラズマにおいては磁場構造を制御することによって内部輸送障壁を形成することが、あたりまえである。なぜならトカマクプラズマはプラズマ中にプラズマ電流を駆動することによって閉じ込め磁場を形成しているため、駆動電流量を大きく変化させることによって磁場構造を制御することは容易であるからである。一方、ヘリカルプラズマは、無電流で閉じ込め磁場が形成されるため、そもそも電流を駆動する必要がなく、そのうえ大きなプラズマ電流の駆動も難しい。そのためヘリカルコイルが作る素の磁場構造を変えることが難しく磁場構造制御による内部輸送障壁形成実験は困難である。

本研究で用いるHeliotron J装置は6セットの磁場生成コイル群を有し、それぞれのコイル電流を変えることで多様な磁場配位を形成することが可能である。また共鳴磁場摂動(Resonant Magnetic Perturbation: RMP)コイルを用いて外部から摂動磁場を重畳することにより磁場構造中に磁気島を形成することもできる。このような特性を備えた実験装置は世界的に見ても少なく、このような研究は装置が存在することによって、初めて可能になる独自の研究である。これらの従来行われてこなかった新しい試みにより内部輸送障壁による閉じ込め改善性能を向上させ高性能プラズマを実現する全く新しい手法を創造する。

3. 研究の方法

トムソン散乱の断面積は小さいのでNd:YAG トムソン散乱計測装置による分布計測において各計測空間点における測定精度を向上させるためには、検出可能な散乱光量を増加させることが何より必要である。マルチパストムソン散乱計測装置は、プラズマ中に入射されたレーザー光をミラーにより複数回往復させ散乱光量を増加させる手法である。今回、開発するDPMP-THのベースとなるのは安原らによって新しく開発された偏光光学系によるマルチパストムソン散乱計測法である。これは従来の手法と比較して、特殊なレーザーを必要としない、マルチパス光路が同軸であるため計測位置の測定精度が高い、光学系の伝達ロスが少なく減衰するまで往復回数の制限がないなどの優れた特徴を有する測定手法である。

マルチパストムソン散乱計測の場合、レーザーからミラーにビームパルスが向かう場合の散乱光が後方散乱、逆の場合が前方散乱になる。この2種類の散乱光を計測することにより電子の速度分布の非等方性を評価する事ができる。しかし前方散乱、後方散乱を完全に分離計測するためには検出器の時間応答より長く両散乱光が検出されるタイミングを引き離す必要があるため

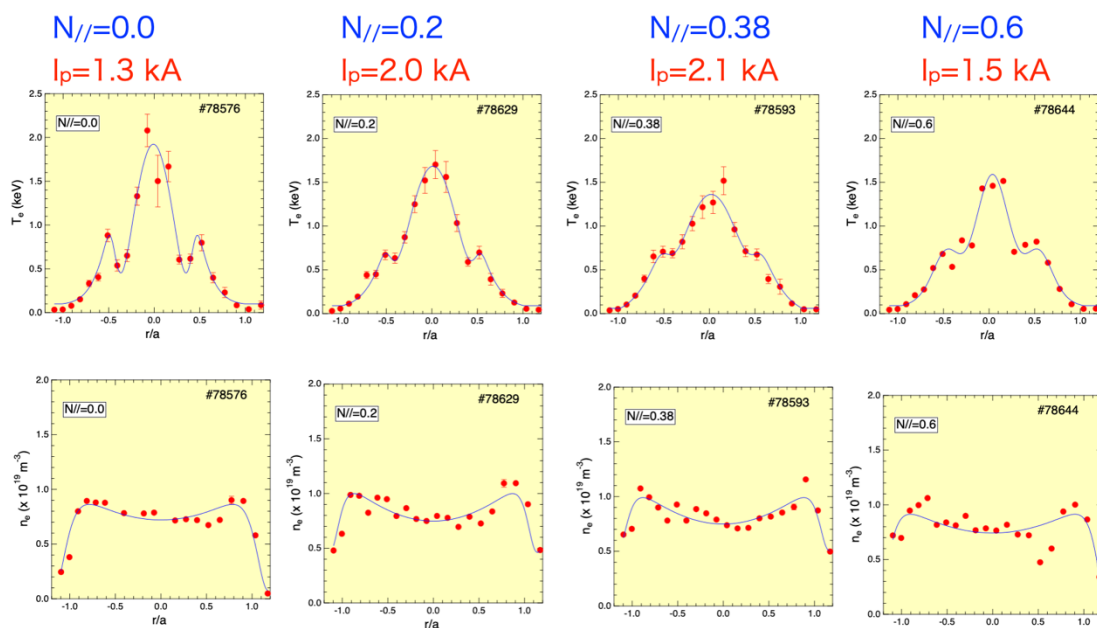


図1 ECCDの重量による電子内部輸送障壁形成時の電子温度分布、密度分布。入射角(N_{\parallel})を0.0から0.6に変更することにより駆動電流量を制御した。

検出器に到着する時間差を数100ns程度としなければならない。そのためにはプラズマから出た後の最終ミラーまでのビームの光路長を数10mとする必要がある。特に小型の装置では、このような長い光路長を設けることが極めて難しいため従来の手法では前方後方散乱を分離できない。

そこで、今回開発するDPMP-THでは新機軸として最終ミラーの前に第2のポケルスセル偏光光学系を設置することにより、プラズマの外側後方で複数回レーザーを往復させ”レーザーパルス”を閉じ込めておく”ことにより、レーザーパルスがプラズマにもどる時間を遅らせることにより後方散乱光と前方散乱光を完全に分離して計測することを世界で初めて試みる。これにより内部輸送障壁形成時の速度分布の非等方性に対して知見を得る。

このように DPMP-TH は(1)散乱光増大によるプラズマ分布測定精度の大幅な向上、(2)電子非等方速度分布の計測という2つの目的のために開発し計測を行う。装置は既存の Heliotron J 装置に設置されている Nd:YAG トムソン散乱計測装置に、コンポーネントを追加することで開発する。

4. 研究成果

研究成果は大きくわけて2つの項目がある。まず電流制御によってヘリカルプラズマの電子内部輸送障壁形成に関して新たな知見が得られたことである。これまでの研究ではプラズマに生成されるブートストラップ電流を用いて有理面または磁気島を形成させ電子内部輸送障壁に与える影響について調べてきた。有理面または磁気島がプラズマ内部に形成されると電子内部輸送障壁の閉じこめ改善領域を拡大することができまた有理面または磁気島をさらに外側に移動させることにより、改善領域をさらに広げることができることを発見した。

今回科研費を用いて、新たに電子サイクロトロン波電流駆動(ECCD)によりブートストラップ電流に加えてさらに電流を流すことにより電子内部輸送障壁が、どのような影響を受けるか調べた。実験は240kWの電子サイクロトロン波をプラズマに入射し入射角を $N_{\parallel}=0.0$ から0.6まで変化させることによりECCDによる駆動電流によって電子内部輸送障壁が、どのように形成されるかNd:YAGレーザートムソン散乱計測により測定した。

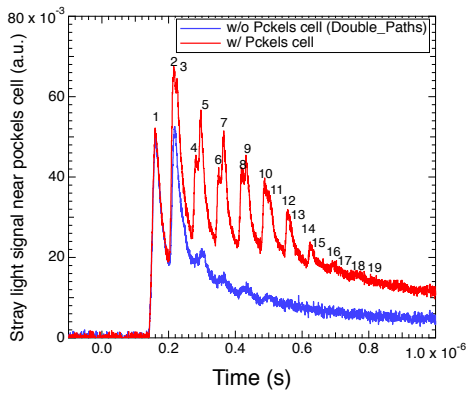


図 2 マルチパストムソン散乱計測装置の性能試験の結果。往復ミラーの近傍で迷光を測定することにより動作を確認。

結果を図 1 に示す。このとき電子密度をすべてのプラズマで同じ値 ($\sim 0.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) になるようにガスパフを調整した。したがって形成のための閾値は、いずれの場合も同じであると言える。TRAVIS コードによる計算では $N_{//}=0.2-0.3$ において駆動電流が最大になり入射角がより大きい 0.6 では駆動電流が 0.0 とほぼ同じレベルまで逆に減少する。一方、実験では駆動電流が大きい $N_{//}=0.2-0.3$ の領域において閉じ込め改善領域が拡大するという結果が得られた。本実験では電子温度勾配がプラズマの外側に向かって平坦または逆に増加する領域が存在することが測定され、電流駆動により磁気島が形成された可能性を示している。

従って磁気島形成により輸送改善領域が拡大したと考えられる。この拡大は電子の蓄積エネルギーを 10% 程度増加させる効果がある。一方中心部で電子温度が減少し閉じ込め改善の効果を弱めているため顕著な増加とはなっていない。

二つめの成果項目は DPMP-TH の開発である。最初に従来通りのポケルスセルを一台用いたマルチパストムソン散乱計測装置の開発を行った。Heliotron J 装置における長距離ビーム伝送を実現するためにガウシアンビームモデルを用いて検討を行った。マルチパストムソン散乱計測装置の動作を試験した結果を図 2 に示す。これは

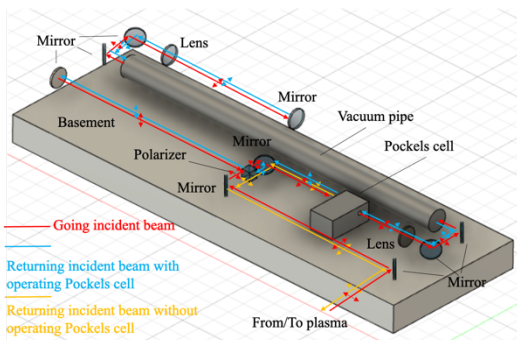


図 3 開発を行った DPMP-TH の概念図。2 セット目のイメージリレーシステムを用いている。

これは往復ミラーの近くで測定したミラーからの迷光を測定した結果である。この結果から往復の度にビームパワーが減衰しているが 8 往復程度ビーム伝送され 16 パルス程度のマルチパストムソン散乱計測のためのビーム伝送が実現できていることを示している。この成果を基にダブルポケルスセルのマルチパストムソン散乱計測装置 (DPMP-TH) の開発を行った。設計は同じくガウシアンビームモデルを用いて行い、イメージリレーシステムを 1 系統から 2 系統に増加させることで、目標とするビーム伝送ができることを確認した。さらにデータ取得のためのポリクロメータの設計も行い (これは科研費で要求した計画の範囲がであるが) 十分な計測精度が得られる設計が可能であることを示した。設計、開発を行った DPMP-TH を図 3 に及、また製作した装置の写真を写真 1 に示す。本装置により計画通りビームパルスを遅延させることに成功した。COVID-19 の影響で諸コンポーネントの入荷が大幅に遅れたために製作が遅延したが研究期間内にプラズマ実験を行って非等方速度分布の初期データを計測した。データの解析を行っている段階であり、解析が終了次第結果を報告したい。

イメージリレーシステムを 1 系統から 2 系統に増加させることで、目標とするビーム伝送ができることを確認した。さらにデータ取得のためのポリクロメータの設計も行い (これは科研費で要求した計画の範囲がであるが) 十分な計測精度が得られる設計が可能であることを示した。設計、開発を行った DPMP-TH を図 3 に及、また製作した装置の写真を写真 1 に示す。本装置により計画通りビームパルスを遅延させることに成功した。COVID-19 の影響で諸コンポーネントの入荷が大幅に遅れたために製作が遅延したが研究期間内にプラズマ実験を行って非等方速度分布の初期データを計測した。データの解析を行っている段階であり、解析が終了次第結果を報告したい。

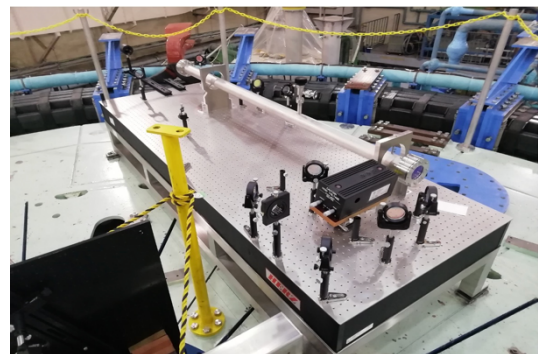


写真 1 開発を行った DPMP-TH

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 T.Minamia, D.Qiub, T.Nishideb, M.Miyoshib, Y.Yamanakab, N.Kenmochic, R.Yasuharad, C.Takahashia, S.Kobayashia, H.Okadaa, S.Kadoa, S.Ohshimaa, T.Mizuuchia and K.Nagasaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Current status and plan of development of Nd:YAG laser Thomson scattering system in Heliotron J	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C02011
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/15/02/C02011	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 D.QIU, T.Minami, T.Nishide, M.Miyoshi, Y.Yamanaka, S.Kado, S.Ohshima, K.Nagasaki, H.Okada, S.Kobayashi, T.Mizuuchi, S.Konoshima, R.Yasuhara	4. 巻 15
2. 論文標題 Design of Compact Multi-Path Thomson Scattering Diagnostic with Signal Delay System in Heliotron J	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401044
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.2401044	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13件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 D.Qiu, T.Minami, Y.Yamanaka, M.Miyoshi, R.Shinotsuka, M.Luo, S.Kado, N.Kenmochi, S.Ohshima, S.Kobayashi, H.Okada, S.Konoshima, T.Mizuuchi, K.Nagasaki
2. 発表標題 Development of Double Pockels Cells Multi-path Thomson Scattering System in Heliotron J based on Gauss Beam Analysis
3. 学会等名 AAPPs-DPP20202020 as e-conference 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Minami, Dechan Qiu, Masahiro Miyoshi, Yuta Yamanaka, Naoki Kenmochi, Ryo Yasuhara, Chihiro Takahashi, Shinji Kobayashi, Hiroyuki Okada1, Shnichiro Kado, Shinsuke Ohshima, Tohru Mizuuchi, and Kazunobu Nagasaki
2. 発表標題 Development of Multi-path Nd:YAG Laser Thomson Scattering System in Heliotron J
3. 学会等名 Higt-Temperature Plasma Diagnostics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D,Qiu, T,Minami, M,Miyoshi, Y,Yamanaka, S,Kado, N,Kenmochi, C,Takahashi, H,Okada, S,Ohshima, S,Kobayashi, S,Konoshima, T,Mizuuchi, M,Luo, K,Nagasaki
2. 発表標題 Development of Double Pockels Cells Multi-path Thomson Scattering System in Heliotron J based on Gauss Beam Analysis
3. 学会等名 日本物理学会 2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山中雄太、南貴司、大島慎介、Dechuan Qiu、三好正博、篠塚凌我、南雲竜也、鈞持尚輝、門信一郎、岡田浩之、小林進二、木島滋、水内亨、長崎百伸
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおける異なる磁場配位でのECHプラズマの実効電子熱拡散係数の比較
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 三好正博、南貴司、鈞持尚輝、Dechuan Qiu、山中雄太、篠塚凌我、南雲竜也、高橋千尋、岡田浩之、門信一郎、大島慎介、小林進二、木島滋、水内亨、長崎百伸
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおけるNd:YAGレーザトムソン散乱計測のためのイベントトリガシステムの開発
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 西出拓也
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおける計測精度向上のための Nd: YAGレーザーマルチパストムソン散乱計測装置の開発
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会 30Ca10 (招待講演)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 三好正博
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおけるNd:YAGレーザートムソン散乱計測を用いた電子蓄積エネルギーの磁場配位依存性の評価
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会 30Ca11 (招待講演)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 山中雄太
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおける異なる磁場配位でのECHプラズマの実効電子熱拡散係数の比較
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会 02P52
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 南貴司
2. 発表標題 Current Status and Plan of Development of Nd:YAG Laser Thomson Scattering System in Heliotron J
3. 学会等名 19th Laser aided plasma diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 邱徳川
2. 発表標題 Design of compact multi-path Thomson scattering diagnostics with signal delay system in Heliotron J
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference P1-12 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 南貴司
2. 発表標題 Effect of magnetic field structure on electron internal transport barrier formation in Heliotron J
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 篠塚凌我
2. 発表標題 ヘリオトロン J における Nd:YAG レーザマルチバستمソン 散乱計測装置の性能向上
3. 学会等名 第38回プラズマ核融合学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 南貴司
2. 発表標題 Heliotron J における電子内部輸送障壁形成への電子サイクロ トロン波電流駆動の影響
3. 学会等名 第38回プラズマ核融合学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年～2022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
---------	---------