

令和 6 年 10 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01875

研究課題名（和文）先進ヘリカル配位のベータ効果が対称性と熱・乱流輸送に与える影響の実験的検証

研究課題名（英文）Experimental verification of beta effect on symmetry and heat/turbulent transport in advanced heliotron configuration

研究代表者

小林 進二 (KOBAYASHI, Shinji)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：70346055

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、先進ヘリカル配位におけるベータ効果を実験的に検証する事を目的として、主に下記の成果を得た。(1) 非共鳴マイクロ波を用いた磁場強度に依らないプラズマ着火手法の開発に成功し、NBI着火に必要な条件とその物理を明らかにした。加えて、非共鳴マイクロ波により生成される相対論電子の特徴を明らかにした。(2) NBI加熱のみで中心部の電子温度尖塔化現象が発見され、電子内部輸送障壁の形成と類似した熱輸送の低減が見られた。(3)ヘリオトロンJにおいて平均ベータ値1%を超える高ベータプラズマ生成に成功し、閉じ込め特性を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

先進ヘリカル配位におけるベータ効果の理解は、今後の配位設計に対して重要な指針を与えることが期待される。本研究では高強度ガスパフ法(HIGP)を用いることで、ヘリカル系で初めてNBIプラズマでCERCのような中心部の電子熱輸送係数の低減を見いだした。これは新たな運転シナリオの候補となる。本研究で開発した非共鳴マイクロ波を予備電離に用いたNBIプラズマ着火は他装置にも応用可能であり、熱負荷低減や垂直NBI等、NBI着火要件を大幅に緩和することができる。本研究課題で発見された統計加速現象はレーザー加速と比べて1/100以下の電界強度で実現可能であり、地上での新しい統計加速模擬実験に展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to explore beta effect predicted in advanced Heliotron configuration in experimentally. The main results obtained in this study is as follows: (1) We developed and clarified the physics of NBI plasma start-up regardless of resonant conditions using seed plasma generation by non-resonant microwave. Furthermore, we clarified characteristics of relativistic electrons produced by the non-resonant microwave. (2) We found reduction in electron heat transport coefficient line ITB formation in NBI heated plasmas in conjunction with HIGP fueling method. (3) We studied transport of Heliotron J high beta plasmas with averaged beta more than 1%.

研究分野：プラズマ核融合

キーワード：ヘリカル系磁場配位 熱輸送 ベータ効果

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヘリカル型配位は二次元対称のトカマク配位と異なり、磁場配位の非軸対称性に起因した粒子損失が高温・低衝突になるほど問題になる。加えてこの非軸対称性は粘性(新古典粘性)を増加させフローの減衰力となるため、乱流輸送低減に対しては不利である。そこで磁気座標系における任意の方向(トロイダル・ポロイダル・ヘリカル等)の磁場変動を抑えることで実効的な配位対称性を確保し、新古典輸送・新古典粘性改善、補足粒子損失低減、MHD安定性の共立を目指した先進ヘリカル配位が各国で創案・建設されてきた。局所準等磁場配位を持つヘリオトロンJ(京都大学)においては、理論的には平均ベータ値 $\langle\beta\rangle$ が2%程度の平衡配位において捕捉粒子閉じ込めの改善が期待されており^A、実験的に検証することが喫緊の課題である。

2. 研究の目的

申請者はこれまで、中性粒子ビーム入射(NBI)加熱プラズマにおける熱・粒子輸送を研究してきた^B。特に先進ヘリカル配位をもつヘリオトロンJにおいて能動的ビーム分光(荷電交換再結合分光、ビーム放射分光)の開発に基づいて、イオン温度・フロー速度計測による熱・運動量輸送解析、および密度揺動の時空間構造の解明を進めてきた^{C,D}。加えて、高密度プラズマの生成・制御方法に向けた燃料補給・リサイクリング制御の研究を行ってきた^{E,F}。本研究の目的は、ヘリオトロンJにおいて高性能・高ベータプラズマ生成のシナリオを構築し、その輸送特性を解明することである。

3. 研究の方法

高ベータプラズマ生成に向けたシナリオ開発の手法として、以下3.1、3.2が挙げられる。

3.1. 非共鳴マイクロ波による種プラズマ生成を利用したNBIプラズマ着火とその物理の解明

ヘリカル系のような外部コイルで閉じ込め磁場が形成できる装置では、真空磁場においても良好な粒子閉じ込めが得られる。このような状況下では大型のヘリカル型装置において、負イオン源を持つNBIを入射することで、ECHのような共鳴条件を必要としないプラズマ着火が行われてきた。一方でこの着火法ではNBI対向面の熱負荷やNBIパワー、加速電圧に制限がある。そこで申請者は非共鳴マイクロ波による予備電離を用いてNBIプラズマ着火につなげる手法を開発した。この手法において、予備電離プラズマ生成の理解、および予備電離プラズマの制御手法を開発する。加えて、NBIプラズマ着火に内在する物理を理解することで、より安定的なNBIプラズマ着火手法を開発する。

3.2. 高ベータプラズマ生成のための粒子補給制御

粒子補給・水素リサイクリング制御は高性能プラズマ生成のための重要な課題である。一方で中型のヘリカル型装置では一般的にダイバータを備えておらず、本研究課題で研究対象とするヘリオトロンJでも同様である。申請者は高強度単パルスガスパフ(HIGP)法をヘリオトロンJで適用し、高密度プラズマの生成、H-mode遷移の観測を行ってきた。本課題ではHIGP法を用い高ベータプラズマ生成のためのシナリオ構築を目指すとともに、その輸送特性を明らかにする。

4. 研究成果

4.1. 二次元ビーム放射分光装置の構築[1]

高ベータプラズマのMHD・乱流揺動の特性を調べることを目的として、ヘリオトロンJに設置のビーム放射分光装置^Cを改造した。揺動の発生が期待される曲率の悪い磁場構造のプラズマ周辺部に新たに真空容器内にミラーを設置することで、密度揺動の二次元構造を観測するための計測システムを構築した。

4.2. 非共鳴マイクロ波による種プラズマ生成の理解[2-5]

非共鳴マイクロ波を用いた種プラズマ生成と、続くNBIプラズマ着火の特性を明らかにした。その着火シナ

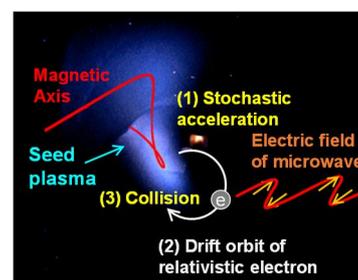


図1. 非共鳴マイクロ波を用いた統計加速による相対論電子生成、および種プラズマ生成のシナリオを表した模式図(主要な成果[2]に説明を追加)。

リオは以下の通りである。磁場強度は 1.5-0.6T の範囲でマイクロ波周波数(2.45GHz)の共鳴層は真空容器内に存在しない。トロイダル電界がほぼゼロの状態種プラズマの生成が開始され、平均密度で 10^{17}m^{-3} オーダーの電子密度が観測された。このときに不純物(CIII, OV)発光強度から電子温度は 10eV 程度と想定される。一方でラジオメータ信号からシンクロトロン放射が予想され、高エネルギー電子の成分も存在することがわかった。図 1 にプラズマ生成のシナリオを説明した模式図を示す。アンテナ近傍のマイクロ波電界により電子が統計加速により加速され、相対論電子の軌道はドリフトが大きいいため、中心部に到達した相対論電子がガスや背景電子と衝突することで電離され種プラズマを作ることが考えられる。図 2(a)にマグネトロンパワーに対するラジオメータ信号強度 I_{rad} の関係を示す。マグネトロンパワーが増えると I_{rad} が増えることがわかった。一方で I_{rad} と電子密度 n_e には相関が見られ(図 2(b)参照)、高速電子生成と種プラズマ生成に関連がある事が考えられる。この状態で追加ガスパフを行うと、最大で $4 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$ を超える電子密度の種プラズマ生成に成功した。

統計加速により生成される相対論電子の特徴について詳しく調べた。非共鳴マイクロ波加熱プラズマにおいてラジオメータで観測される信号は、その光学的厚さからシンクロトロン放射を表す。図 3 にその周波数スペクトルを示す。電子の周回半径をヘリオトロン J の大半径と仮定し、電子エネルギーを推定したところ、周波数帯域 60-75GHz に観測されるラジオメータ信号は 2.5-4MeV の相対論電子の生成を示唆していることがわかった。同様の 2MeV を超える相対論電子は制動放射 X 線のエネルギースペクトル計測からも観測された[3,4]。このような統計加速は独のステラレータ装置(WEGA)でも観測されているが G 制動放射 X 線でスペクトルが観測されたのはヘリオトロン J が初めてである。加えて本課題に関して、ウクライナとの共同研究で紛争下においても共同研究者が論文を出版した[5]。磁場閉じ込めプラズマにおける統計加速はレーザー加速と比べて規格化電界強度が 1/100 以下で実現でき[3]、地上での新しい統計加速模擬を提案できる可能性を持っている。

4.3. NBI 着火のモデリング及び内在する物理の理解[6]

続く NBI 入射に関して、種プラズマが存在する場合のプラズマ着火モデルを新たに構築し、数値解析コードを開発した。これと実験結果とを比較することで、鍵となる物理の解明を目指した。図 4 に NBI 入射直前の種プラズマの密度に対する追加ガスパフ後の密度、および数値解析で得られた NBI 高速イオン密度の関係を示す。数値解析の結果は、着火に成功(Succeeded)した領域だけで無く、失敗した(Failed)領域においても実験結果を再現でき、精度の高いプラズマ着火モデルが構築できた。加えて、着火限界の閾値密度付近はガス調整が難しく細かく実験データが得られなかったが、この領域においても数値解析より推

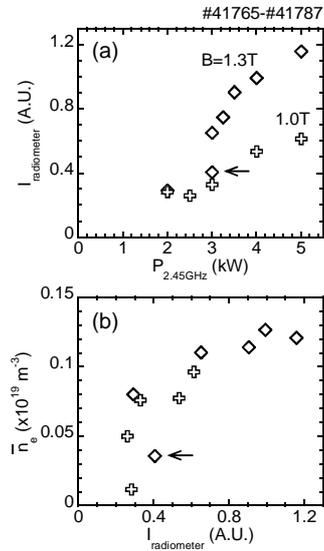


図 2. (a)マイクロ波パワーに対するラジオメータ信号強度、および(b)密度依存性[2]。

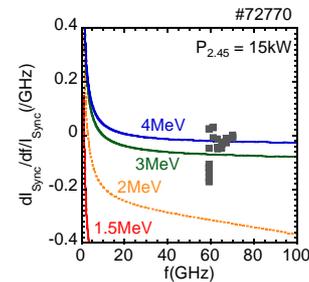


図 3. シンクロトロン放射強度の周波数スペクトル[2]。

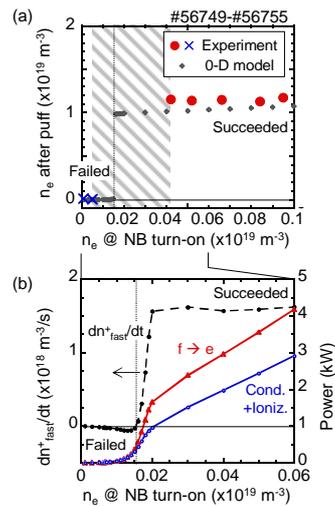


図 4. (a)NBI プラズマ着火のモデリングと実験との比較、及び(b)高速イオン密度とパワー収支[6]。

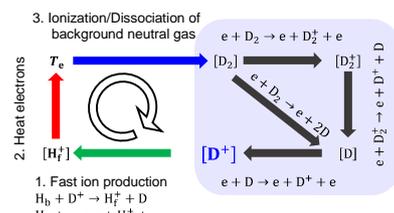


図 5. 種プラズマがある場合の NBI 着火の主要物理プロセス[6]。

論できる様になった。着火におけるエネルギーバランスを詳しく調べると、着火に失敗した領域は NBI 高速イオン密度が時間的に減少しており、NBI 高速イオンから電子への($f \rightarrow e$) パワーが電子の損失 (conduction 損失とイオン化損失の和) と釣り合っており、電子温度増加を阻害する要因となっている (図 4(b)参照)。一方で、閾値密度を超えると高速イオン密度の増加率の改善がみられ、それとともに電子加熱パワーが損失に比べて十分上回る。結果としてこの加熱パワーの余剰分が電子温度増加に寄与する。電子温度が増加すると NBI の電離も促進され、高速イオン密度も増える。これが正のフィードバックになり、最終的に背景プラズマの radiation barrier を超えるまで電子温度が上昇し、着火の成功に至る。この正のフィードバックのシナリオにおいて、NBI 着火における主要なプロセスを表した模式図を図 5 に示す。以上、本研究の活動により、種プラズマのある状況における NBI 着火の物理が明らかになった。これは他のヘリカル系における NBI 着火にも適用でき、加速エネルギーの低い正イオン源の NBI の場合、NBI パワーが小さい場合、および着火に至るまでの時間を短くし NBI 対抗壁の熱負荷を低減したい場合のプラズマ着火のモデリングに役に立つことが期待される。

4.4. 高強度ガスパフ法を用いた NBI プラズマの温度分布制御[7,8]

高密度プラズマ生成のシナリオを構築し、その内在する物理を理解することは、ヘリカル系における高ベータプラズマ生成にとって重要な課題である。ヘリオトロン J では高強度ガスパフ法(HIGP)を用いて $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ に近い高密度プラズマ生成が試みられており、従来より H-mode 遷移が観測されている^E。ヘリオトロン J の磁場配位は、そのフーリエ成分を個別に調整することが可能である。標準配位よりトロイダル磁場成分(ε_t)を下げた low ε_t 配位 ($B=1.3\text{T}$) において HIGP の導入量を調節することで、中程度のプラズマ密度($\sim 2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)において中心部の電子熱輸送が低減し、電子温度の尖塔化が観測された [7,8]。図 6 に通常ガスパフと HIGP 放電との温度・密度分布の比較を示す。電子密度分布は両者でほとんど変わらないが、明らかな中心部電子温度の改善が見られた。一方でイオン温度に関しては、中心部の観測視線がないこともあり、明らかな温度増加に関してははっきりしない。

このプラズマに対して NBI 吸収パワー分布の計算に基づく熱輸送解析を行った。図 7 に電子及びイオンの熱輸送係数径方向分布を示す。HIGP 放電の場合、 $r/a < 0.5$ の領域において明らかな電子熱輸送係数の低減が見られ、内部輸送障壁の形成に類似したプラズマが見られた。新古典輸送解析による径電場の評価では、中心部の径電場はほとんどゼロであることがわかった。従って、ヘリカル系の ECH プラズマにおいて観測される、正の径電場および電子内部輸送障壁の形成による輸送改善とは異なるメカニズムである事が想像される。

中心部電子温度分布の尖塔化は他の条件でも見られた。図 8 に標準磁場配位で磁場強度を 1.4T~1.1T に変化させた場合の電子温度分布を示す。広い実験条件においても中心部電子温度の尖塔化が観測された。これらの放電ではすべて HIGP により中心部で $5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ を超える高電子密度の状態が得られている。このように今回観測さ

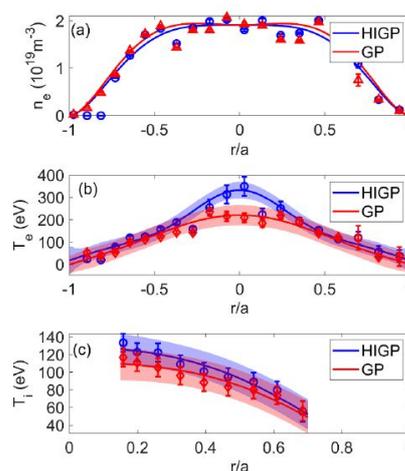


図 6. HIGP と通常ガスパフによる放電の比較。(a)電子密度、(b)電子温度および(c)イオン温度分布[7]。

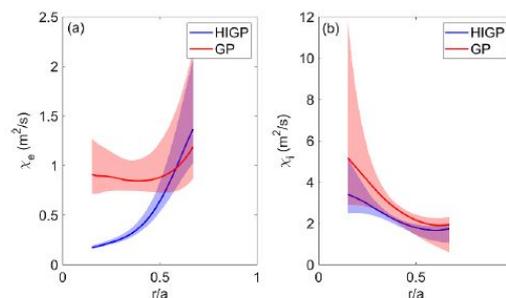


図 7. (a)電子、および(b)イオン熱輸送係数の径方向分布[7]。

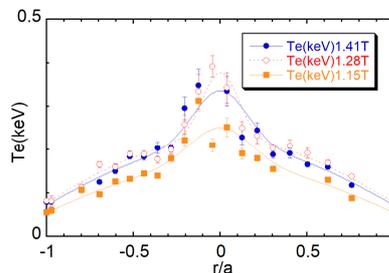


図 8. 標準磁場配位 $B=1.41\sim 1.15\text{T}$ において NBI 加熱プラズマ中に観測された尖塔化した電子温度分布。

れた電子系の内部輸送障壁形成に類似した現象は、ヘリカル系において高密度 NBI 加熱プラズマで観測された初めの例であり、新たな発見といえる。

ヘリオトロン J では HIGP を用いた NBI プラズマで H-mode 遷移が観測されている。H-mode 遷移は直前 $m/n=2/1$ のバーストモードの出現と周辺部の粒子排出現象が見られており、モードが H-mode をトリガする可能性関が考えられる。図 9 に HIGP 前(L-phase)、HIGP 直後および H-mode 遷移後(H-phase)の電子温度、イオン温度の径方向分布を示す。遷移後に周辺部の温度勾配が急峻になったことがわかった。ヘリカル系の H-mode 遷移は一般的に密度勾配の急峻化による輸送障壁の形成が広く観測されており、今回観測された温度勾配の急峻化は新しいヘリカル系の H-mode 遷移を開くことが期待される。HIGP は強いガス供給を行った直後に供給を止めることが鍵である。そのため周辺部の放射損失や中性粒子による粘性の低減が期待される。事実、 H_α 輝線分布計測からは周辺部の中性粒子密度の低下と、CXRS 計測からはポロイダル流のフローシアが観測されており⁷、粘性の低下によるフローシアの形成が輸送改善の要因と考えられる。

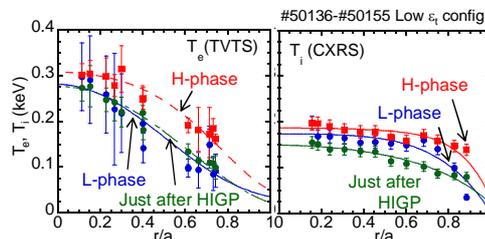


図 9. H-mode 遷移における電子温度・イオン温度分布。周辺部温度勾配の急峻化が観測された。

4.5. 高ベータプラズマの閉じ込め特性

前節までの手法を用いて HIGP を用いた高密度放電を磁場強度スキャン実験に適用し、ベータ依存性を調べた。図 10(a)に反磁性信号から求めた平均ベータ値 β_{DIA} の磁場強度依存性を示す。磁場強度の低下と共にベータ値の増加が観測された。一方で磁場強度を弱めると 4.4 節で述べたような電子温度の尖塔化が見られなくなった。NBI 吸収パワー解析に基づきエネルギー閉じ込め時間を評価し、国際ステラレータスケールで規格化することで、閉じ込め時間の改善度 H_{ISS95} を評価した。平均ベータ値 β_{DIA} に対する改善度は温度分布尖塔化の有無で二つのグループに分けられ、両者とも弱いベータ依存性が見られた。現在、輸送係数の評価を行っており、ベータ依存性についてより詳細な理解を進めている。

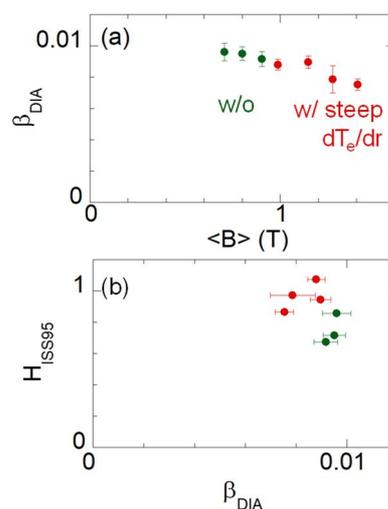


図 10. (a)体積平均ベータ β_{DIA} の磁場強度依存性、および(b) β_{DIA} とエネルギー閉じ込め改善度との関係。

期間中の主要な成果

- [1] S. Kobayashi, et al., Rev. Sci. Instrum. 92, 063503 (2021).
- [2] S. Kobayashi et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **62** (2020) 065009.
- [3] 小林, 他, 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会・総会 (2022) 相模原市立産業会館(招待講演).
- [4] R. Yamato, S. Kobayashi, et al., 25th Topical Conf. High Temp. Plasma Phys (2024) 2.4.44.
- [5] Kovtun Yu.V., Nagasaki K., Kobayashi S. et al., Prob. Atom. Sci. Tech. **143** (2023) 3.
- [6] S. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion **61** (2021) 116009.
- [7] C. Wang, S. Kobayashi, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **66** (2024) 022001.
- [8] S. Kobayashi, et al., 23rd Int. Stellarator Heliotron Workshop (2022) Warsaw Poland (Invited)

参考文献

- [A] T. Obiki, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **42** (2000) 1151.
- [B] S. Kobayashi, et al., Contributions to Plasma Physics, **50** (2010) 539-543.
- [C] 小林進二, プラズマ・核融合学会誌, **93** (2017) 2-9.
- [D] H. Lee, S. Kobayashi, et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, **55** (2013) 035012.
- [E] S. Kobayashi, 26th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P8-17, (2016).
- [F] Xiangxun Lu, S. Kobayashi, et al., Plasma and Fusion Research, **13** (2018) 1202077.
- [G] H. Laqua, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **56** (2014) 075022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Kondo Y., Ohshima S., Kuwahara D., Inoshita K., Fukuda T., Minami T., Kado S., Kobayashi S., Konoshima S., Mizuuchi T., Okada H., Tomita T., Nagasaki K.	4. 巻 17
2. 論文標題 Development of dual X-mode Doppler reflectometry system in Heliotron J	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C05023 ~ C05023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/05/C05023	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 Ohshima S., Suzuki T., Matoike R., Motojima G., Kado S., Mori A., Miyashita A., Kobayashi S., Minami T., Iwata A., Qiu D., Wang C., Luo M., Zhang P., Kondo Y., Nishino N., Mizuuchi T., Okada H., Konoshima S., Inagaki S., Nagasaki K.	4. 巻 12
2. 論文標題 Three-dimensional dynamics of fluctuations appearing during pellet ablation process around a pellet in a fusion plasma experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-18239-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 -
1. 著者名 Zhang P., Ohshima S., Zhao H., Deng C., Kobayashi S., Kado S., Minami T., Matoike R., Miyashita A., Iwata A., Kondo Y., Qiu D., Wang C., Luo M., Konoshima S., Inagaki S., Okada H., Mizuuchi T., Nagasaki K.	4. 巻 93
2. 論文標題 Development and initial results of 320 GHz interferometer system in Heliotron J	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113519 ~ 113519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0101808	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 Varela J., Nagasaki K., Kobayashi S., Nagaoka K., Adulsiriswad P., Cappa A., Yamamoto S., Watanabe K.Y., Spong D.A., Garcia L., Ghai Y., Ortiz J.	4. 巻 63
2. 論文標題 Analysis of the ECH effect on EPM/AE stability in Heliotron J plasma using a Landau closure model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 026009 ~ 026009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aca98e	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 Kovtun Yu.V., Nagasaki K., Kobayashi S., Minami T., Kado S., Ohshima S., Nakamura Y., Ishizawa A., Konoshima S., Mizuuchi T., Okada H., Laqua H., Stange T.	4. 巻 143
2. 論文標題 NON-RESONANT MICROWAVE DISCHARGE START-UP IN HELIOTRON J	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Problems of Atomic Science and Technology	6. 最初と最後の頁 3~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.46813/2023-143-003	査読の有無 無
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 NAKATA Motoki, MATSUOKA Seikichi	4. 巻 17
2. 論文標題 Impact of Geodesic Curvature on Zonal Flow Generation in Magnetically Conned Plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1203077 ~ 1203077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1203077	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 Kobayashi S., Kumar S. T. A., Anderson F. S. B., Deng C. B., Likin K. M., Talmadge J. N., Ohshima S., Anderson D. T.	4. 巻 92
2. 論文標題 Development of beam emission spectroscopy in the helically symmetric experiment stellarator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063503 ~ 063503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043596	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 Kobayashi S., Nagasaki K., Hada K., Stange T., Okada H., Minami T., Kado S., Ohshima S., Tokuhara K., Nakamura Y., Ishizawa A., Suzuki Y., Osakabe M., Murase T., Konoshima S., Mizuuchi T.	4. 巻 61
2. 論文標題 Role of pre-ionization in NBI plasma start-up of Heliotron J using non-resonant microwave heating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 116009 ~ 116009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac2105	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 Ohshima S, Okada H, Zang L, Kobayashi S, Minami T, Kado S, Adulsiriswad P, Qiu D, Matoike R, Luo M, Zhang P, Miyashita A, Motoshima M, Nakamura Y, Konoshima S, Mizuuchi T, Nagasaki K	4. 巻 63
2. 論文標題 Isotope effect on zonal flow and its configuration dependence in low-density electron-cyclotron-resonance heated plasmas in Heliotron J	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 104002 ~ 104002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac1837	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 Adulsiriswad P., Todo Y., Kado S., Yamamoto S., Kobayashi S., Ohshima S., Okada H., Minami T., Nakamura Y., Ishizawa A., Konoshima S., Mizuuchi T., Nagasaki K.	4. 巻 61
2. 論文標題 Numerical investigation into the peripheral energetic-particle-driven MHD modes in Heliotron J with free boundary hybrid simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 116065 ~ 116065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac2779	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 Ohshima S., Zhang P., Kume H., Deng C., Miyashita A., Kobayashi S., Okada H., Minami T., Kado S., Adulsiriswad P., Qiu D., Luo M., Matoike R., Suzuki T., Konoshima S., Mizuuchi T., Nagasaki K.	4. 巻 92
2. 論文標題 Development of a multi-channel 320 GHz interferometer for high density plasma measurement in Heliotron J	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 053519 ~ 053519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043581	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 Matoike R, Kawamura G, Ohshima S, Suzuki Y, Kobayashi M, Masuzaki S, Kobayashi S, Kado S, Minami T, Okada H, Mizuuchi T, Konoshima S, Feng Y, Frerichs H, Nagasaki K	4. 巻 63
2. 論文標題 Numerical analysis of heat load distribution in Heliotron J with magnetic field tracing and plasma transport modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 115002 ~ 115002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac2069	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 Kobayashi S., Nagasaki K., Stange T., Mizuuchi T., Okada H., Minami T., Kado S., Yamamoto S., Ohshima S., Hada K., Weir G., Konoshima S., Nakamura Y., Kenmochi N., Otani Y., Lu X X., Panith A., Toi K., Suzuki Y	4. 巻 62
2. 論文標題 Study of seed plasma generation for NBI plasma start-up using non-resonant microwave launch in Heliotron J	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 065009 ~ 065009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab877e	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 Yamamoto S., Nagasaki K., Nagaoka K., Varela J., Cappa A., Ascasibar E., Castejon F., Fontdecaba J.M., Garcia-Regana J.M., Gonzalez-Jerez A., Ida K., Ishizawa A., Isobe M., Kado S., Kobayashi S. et al.,	4. 巻 60
2. 論文標題 Effect of ECH/ECCD on energetic-particle-driven MHD modes in helical plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066018 ~ 066018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab7f13	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 LUO Maoyuan, NAGASAKI Kazunobu, WEIR Gavin, OKADA Hiroyuki, MINAMI Takashi, KADO Shinichiro, KOBAYASHI Shinji, YAMAMOTO Satoshi, OHSHIMA Shinsuke, MIZUUCHI Tohru, KONOSHIMA Shigeru, NAKAMURA Yuji, ISHIZAWA Akihiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Measurement of Electron Temperature Profile and Fluctuation with ECE Radiometer 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 2402038 ~ 2402038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2402038	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 Adulsiriswad P., Todo Y., Yamamoto S., Kado S., Kobayashi S., Ohshima S., Okada H., Minami T., Nakamura Y., Ishizawa A., Konoshima S., Mizuuchi T., Nagasaki K.	4. 巻 60
2. 論文標題 Magnetohydrodynamic hybrid simulation of Alfvén eigenmodes in Heliotron J, a low shear helical axis stellarator/heliotron	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096005 ~ 096005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab9c4b	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 長崎百伸, 水内亨, 岡田浩之, 南貴司, 門信一郎, 小林進二, 大島慎介, 岸本泰明, 中村祐司, 石澤明宏, 四竈泰一, 木島滋, 的池遼太, 横山雅之, 本島巖, 小林達哉, 西野信博, 山本聡, Gavin M. Weir, Ling Zang	4. 巻 96
2. 論文標題 Heliotron J実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 475-518
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 無
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 Suzuki Y., Watanabe K. Y., Sakakibara S.	4. 巻 27
2. 論文標題 Theoretical studies of equilibrium beta limit in LHD plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102502 ~ 102502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0015106	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 G. Motojima, H. Okada, H. Okazaki, S. Kobayashi, et al.	4. 巻 61
2. 論文標題 High-density experiments with hydrogen ice pellet injection and analysis of pellet penetration depth in Heliotron J	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 075014 ~ 075014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab1d40	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 MATOIKE Ryota, KAWAMURA Gakushi, OHSHIMA Shinsuke, KOBAYASHI Masahiro, SUZUKI Yasuhiro, NAGASAKI Kazunobu, MASUZAKI Suguru, KOBAYASHI Shinji, et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 First Application of 3D Peripheral Plasma Transport Code EMC3-EIRENE to Heliotron J	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3403127 ~ 3403127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3403127	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 Wang C, Kobayashi S, Nagasaki K, Qiu D, Luo M, Zhang P, Watanabe K Y, Seki R, Miyashita A, Kondo Y, Inagaki S, Kin F, Minami T, Kado S, Ohshima S, Konoshima S, Mizuuchi T, Okada H	4. 巻 66
2. 論文標題 Improvement of core heat transport in NBI plasmas of heliotron J using high-intensity gas puffing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 022001 ~ 022001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ad1ae6	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 -

[学会発表] 計19件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 S. Kobayashi, et al.
2. 発表標題 Effect of 3D magnetic field on confinement and transport in Heliotron J
3. 学会等名 23rd International Stellarator-Heliotron Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 小林進二, 永岡賢一, 長崎百伸, 伊藤龍志, 大垣英明, 紀井俊輝, 全炳俊, 稲垣滋, 岡田浩之, 大島慎介, 門信一郎, 南貴司, 木島滋, 水内亨
2. 発表標題 ヘリオトロン型磁場配位で非共鳴波動加熱において観測されたべき関数型スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 小林進二, 永岡賢一, 長崎百伸, 稲垣滋, 伊藤龍志, 大垣英明, 紀井俊輝, 全炳俊, 藤田智大, 山戸瞭雅, 岡田浩之, 大島慎介, 門信一郎, 南貴司, 木島滋, 水内亨
2. 発表標題 磁場閉じ込め実験装置ヘリオトロンJで観測された統計加速の特徴
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 ~ 2023年

1. 発表者名 小林進二、永岡賢一、長崎百伸、稲垣滋、伊藤龍志、大垣英明、紀井俊輝、全炳俊、岡田浩之、大島慎介、門信一郎、南貴司、木島滋、水内亨
2. 発表標題 磁場閉じ込めプラズマを利用した 統計加速の実験室模擬
3. 学会等名 第152回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会（招待講演）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 小林進二、永岡賢一、稲垣滋、長崎百伸、伊藤龍志、藤田智大、山戸瞭雅、大垣英明、紀井俊輝、全炳俊、岡田浩之、大島慎介、門信一郎、南貴司、木島滋、水内亨
2. 発表標題 ヘリオトロン型磁場配位で観測される 統計加速現象におけるエネルギー拡散過程
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 S. Kobayashi, K. Nagasaki, K. Hada, T. Stange, K. Tokuhara, S. Ohshima, H. Okada, T. Minami, S. Kado, H. Ohgaki, T. Kii, H. Zen, Y. Nakamura, A. Ishizawa, Y. Suzuki, M. Osakabe, T. Murase, Y. Kishimoto, S. Konoshima, T. Mizuuchi
2. 発表標題 Study of NBI plasma start-up assisted by seed-plasma generation using non-resonant microwave heating in Heliotron J
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 小林進二、永岡賢一、長崎百伸、徳原圭一、大垣英明、紀井俊輝、全炳俊、岡田浩之、福嶋亮人、大島慎介、門信一郎、南貴司、木島滋、水内亨
2. 発表標題 ヘリオトロン型磁場配位における非共鳴波動加熱を利用した統計加速
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林進二, 永岡賢一, 長崎百伸, 徳原圭一, 大垣英明, 紀井俊輝, 全炳俊, 岡田浩之, 伊藤龍志, 福島亮人, 大島慎介, 門信一郎, 南貴司, 木島滋, 水内亨
2. 発表標題 閉じ込め磁場配位における非共鳴マイクロ波を用いた統計加速と実験室シミュレーションへの展開
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林進二, 永岡賢一, 長崎百伸, 伊藤龍志, 大垣英明, 紀井俊輝, 全炳俊, 岡田浩之, 福島亮人, Wang Chenyu, 大島慎介, 門信一郎, 南貴司, 木島滋, 水内亨
2. 発表標題 ヘリオトロン型磁場配位において非共鳴波動加熱中に観測される高エネルギーX線スペクトルの特徴
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 小林進二, 永岡賢一, 長崎百伸, 徳原圭一, 大垣英明, 紀井俊輝, 全炳俊, 岡田浩之, 村田駿介, 大島慎介, 門信一郎, 南貴司, 木島滋, 水内亨
2. 発表標題 ヘリオトロン型磁場配位における非共鳴マイクロ波を利用した確率的静電加速
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Kobayashi ¹ , S. T. A. Kumar ² , T. Dobbins ² , F. S. B. Anderson ² , C. B. Deng ³ , K. M. Likin ² , J. N. Talmadge ² , S. Ohshima ¹ , D. T. Anderson ²
2. 発表標題 Development of beam emission spectroscopy in the HSX stellarator
3. 学会等名 23rd Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳原圭一, 小林進二, 大垣英明, 紀井俊輝, 全炳俊, 永岡賢一, 岡田浩之, 南貴司, 門信一郎, 大島慎介, 水内亨, 木島滋, 長崎百伸
2. 発表標題 ヘリオトロンJ における非共鳴マイクロ波加熱プラズマ中の高エネルギーX 線スペクトル計測
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 村田駿介, 小林進二, 門信一郎, 大島慎介, 小林達哉, 南貴司, 岡田浩之, 吉川正志, 中村祐司, 石澤明宏, 水内亨, 木島滋, 長崎百伸
2. 発表標題 ヘリオトロン J におけるビーム放射分光法を用いた密度揺動計測
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 岡佑旗, 長崎百伸, 小林進二, 大島慎介, 笠原寛史, 岡田浩之, 門信一郎, 南貴司, 中村祐司, 石澤明宏, 木島滋, 水内亨, 加藤悠
2. 発表標題 磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるミリ波帯域電磁波モード変換シミュレーション
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 S. Kobayashi, K. Nagasaki, H. Okada, A. Ishizawa, K. Nishioka, S. Ohshima, T. Minami, S. Kado, S. Yamamoto, Y. Nakamura, T. Kobayashi, K. Ida, K. Watanabe, Y. Narushima, Y. Suzuki, M. Nakata, S. Satae, S. Nishimura, M. Yoshikawa, S. Konoshima, T. Mizuuchi
2. 発表標題 Effect of Magnetic Configuration on Energy Confinement, Energetic Particle and Momentum Transport in NBI Plasmas of Heliotron J
3. 学会等名 22nd International Stellarator and Heliotron Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kobayashi
2. 発表標題 Recent progress of optimization study in Heliotron J
3. 学会等名 2nd US/Japan Workshop on "Progress on Advanced Concept Optimization and Modeling in Stellarator-Heliotrons" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長慎一郎, 小林進二, 小林達哉, 居田克己, 他
2. 発表標題 乱流揺動計測のためのヘリオトロンJビーム放射分光装置の改良
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下裕登, 小林進二, 萬家幹人, 他
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおける高密度NBIプラズマ中のイオン温度の磁場強度依存性
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 萬家幹人, 小林進二, 門信一郎, 居田克己, 他
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおけるポロイダルフロー計測に基づく径方向電場の解析
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

非共鳴マイクロ波を用いたプラズマ生成 ウクライナ・ハルキウ物理技術研を共同研究で支援
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/new-iae/NewsRelease/JP/2023/02/23-110000.html>
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/news/index.html>
磁場強度によらないプラズマ着火方法の開発により高性能プラズマ運転領域の拡大に成功
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/new-iae/NewsRelease/JP/2020/05/07-140400.html>

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	大島 慎介 (Ohshima Shinsuke) (00469610)	京都大学・エネルギー理工学研究所・助教 (14301)	
研究分担者	鈴木 康浩 (Suzuki Yasuhiro) (20397558)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授 (15401)	
研究分担者	仲田 資季 (Nakata Motoki) (40709440)	核融合科学研究所・研究部・准教授 (63902)	

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