

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01878

研究課題名（和文）3次元磁場効果による安定なダイバータデタッチメントとコアプラズマ性能の両立

研究課題名（英文）Compatibility between stable divertor detachment and core plasma performance with 3D edge magnetic field structure change

研究代表者

小林 政弘（Kobayashi, Masahiro）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：30399307

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：核融合発電を目指した環状プラズマ閉じ込め装置において、周辺部に「磁気島」と呼ばれる磁場構造が形成された場合に、プラズマ中の多荷イオンからの放射冷却が促進され、装置壁への熱負荷軽減につながることで、磁気島構造と閉じ込め領域の境界に輸送障壁が形成され、閉じ込めプラズマ性能の改善が起こることが明らかになった。この現象は燃料として軽水素よりも重水素を用いたプラズマで顕著になることが確認された。また、磁気島が放射冷却分布形成に与える効果について熱的不安定性の観点からの理解が大きく進展した。

さらに、輸送障壁で励起された乱流が伝播することで装置壁の熱負荷が軽減することが新たに発見された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合発電を目指した環状プラズマ閉じ込め装置において、装置壁への過大な熱負荷の軽減と、閉じ込めプラズマ性能の両立は最重要課題の一つである。本研究の成果により、周辺磁場構造を最適化することによって、装置壁への熱負荷を軽減しつつ、高閉じ込め性能を維持できる可能性が見出された。さらに、乱流伝播による装置壁熱負荷軽減の発見は、従来の多荷イオンからの放射に替わる新たな熱負荷軽減手法として期待できる。熱的不安定性の成長における磁場構造・トポロジーの役割に関する理解が進展した。本成果は、同様な不安定性を有する他の物理学分野（星間プラズマなど）の進展にも大きく寄与する。

研究成果の概要（英文）：In a toroidal plasma confinement system for a fusion reactor, it has been found that a magnetic field structure called a "magnetic island" at the periphery enhances radiative cooling with the multi-charged ions in the plasma and reduces the heat load on the device wall, and that a transport barrier is formed at the boundary between the magnetic island and the confinement region, which improves the performance of plasma confinement. This phenomenon is more pronounced in deuterium plasmas than in hydrogen plasmas. In addition, significant progress has been made in the physical understanding of the impact of magnetic islands on the formation of radiating edge plasmas in terms of thermal instability. Furthermore, it was newly discovered that the turbulence excited at the transport barrier spreads and contributes to the reduction of the heat load on the device wall.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：3次元磁場効果 熱的不安定性 プラズマ放射冷却 乱流伝播 輸送障壁

1. 研究開始当初の背景

核融合炉を目指した磁場閉じ込め環状プラズマ装置において、装置壁・ダイバータ板への過大な熱負荷の軽減と、閉じ込めプラズマ性能の両立は、最も重要な研究課題の一つである。壁への熱負荷軽減策の一つとして、不純物多荷イオンからの放射損失によって周辺プラズマを冷却する手法が多く、装置で研究されてきた。しかし、放射損失が増大した場合にはプラズマ放電が不安定になりやすく、また閉じ込めプラズマの性能劣化が多くの実験で観測されていた。

一方、研究代表者らは、核融合科学研究所のLHD装置において、周辺領域の磁場構造を工夫することにより、放射損失を増大させて安定に維持できることを実験的に実証してきた。

このような背景の基、本研究課題は、環状プラズマの壁近傍の磁場構造・トポロジーを変化させることによる放射冷却の促進と安定化の物理機構の理解、および閉じ込め性能との両立を目指して開始した。

2. 研究の目的

環状磁場閉じ込めプラズマの周辺領域の磁場構造を変化させることにより、不純物多荷イオンからの放射損失の促進と安定維持を実現し、そのメカニズムを理解することが目的である。また、周辺放射冷却が進行したときの閉じ込め性能への影響とその物理的な理解、さらには放射冷却と閉じ込め性能の両立の可能性を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

核融合科学研究所の環状磁場閉じ込め装置 大型ヘリカル装置 LHD において、中性粒子入射装置および電子サイクロトロン共鳴加熱を用いて高温のプラズマを生成する。プラズマの密度を上昇して周辺部のプラズマ温度を低減させることにより、ダイバータ板由来の炭素多荷イオンからの放射損失を促進させて、ダイバータ板近傍のプラズマを冷却する。また、外部から希ガスなどの「不純物」を導入し、これら多荷イオンからの放射損失による冷却も試みる。

この他、外部から共鳴擾動磁場 (RMP) を印加することにより、図 1 に示すように周辺領域に「磁気島」とよばれる磁場構造を誘起し、これによる不純物多荷イオンからの放射損失の促進と安定維持を試みる。

放射損失分布計測は本科研費にて整備したイメージング分光器、およびボロメータファンアレイを用いる。閉じ込めプラズマと周辺部放射冷却領域との相互作用については、トムソン散乱計測による電子密度・電子温度分布、磁気プローブによる磁場揺動計測、PCI (phase contrast imaging) による密度揺動などを用いた。新たに本科研費によりガスファイブイメージングを立ち上げ、2 次元空間揺動パターンの計測と解析を行った。

ダイバータ板における熱負荷はラングミュアプローブを用いて計測した。

4. 研究成果

(1) 磁気島形成による放射冷却の促進と閉じ込め性能との両立

図 2 に共鳴擾動磁場により周辺部に磁気島を形成したときの重水素プラズマの放電波形とプラズマ圧力分布の変化を示す。時刻 3 秒で放電開始後、徐々にプラズマ密度を上昇させると、3.95 秒で放射損失が増大して、かつダイバータ板への粒子負荷が低減し、「非接触プラズマ」とよばれる状態に遷移する。この時、プラズマの蓄積エネルギーの増加率は上昇しており、閉じ込め性能は劣化することなく維持されていることが示された。同時に、PCI による密度揺動はすべての周波数領域で減少している。その後、4.5 秒でさらにプラズマ蓄積エネルギーが上昇を始め、密度揺動は継続して減少している。プラズマ圧力分布から、非接触遷移直後 (4.3 秒) に分布の尖塔化がおこり、さらに 4.9 秒ではこれが顕著になることが分かる (図 2 (g))。このことから、4.5 秒でいわゆる閉じ込め改善モードに入ったと考えられる。この時、放射損失は微減しているが、依然として高い状態にあり、プラズマは非接触状態を維持している。しかし、スパイク上の粒子負荷がダイバータ板に到達していることが図 2 から確認できる。

図 3 に非接触プラズマ遷移前後の周辺領域の電子温度、電子密度分布を示す。非接触遷移前には、周辺部に形成された磁気島の影響で、温度分布の急峻化が見られるが、密度分布はほぼ平坦なままである。しかし、非接触遷移後には、密度分布も急峻化しており、これが閉じ込め性能の維持に寄与していると考えられる。非接触遷移に伴い、周辺部に輸送障壁が形成されたことを示している。その理由については不明であり今後の研究課題である。

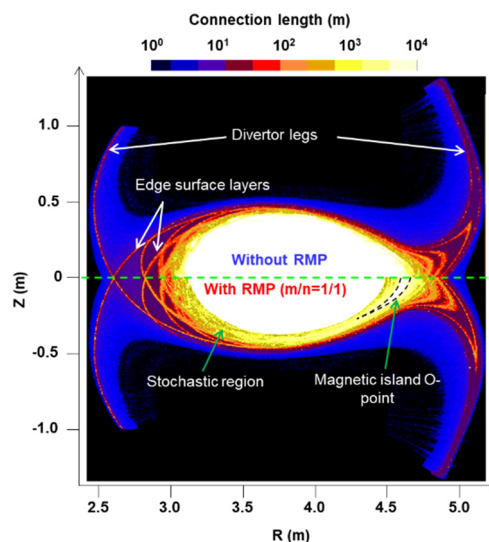


図 1 LHD のポロイダル断面における磁力線接続長分布。上半分、下半分がそれぞれ磁気島無し、有りを示す。

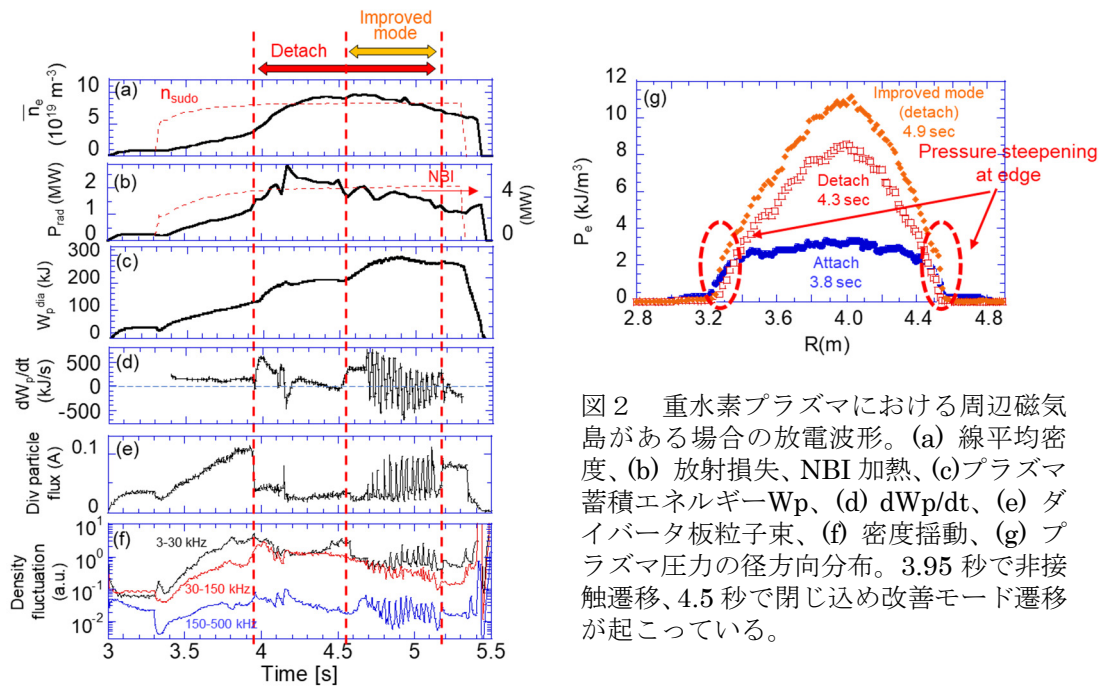


図2 重水素プラズマにおける周辺磁気島がある場合の放電波形。(a) 線平均密度、(b) 放射損失、NBI加熱、(c)プラズマ蓄積エネルギー W_p 、(d) dW_p/dt 、(e) ダイバータ板粒子束、(f) 密度揺動、(g) プラズマ圧力の径方向分布。3.95秒で非接触遷移、4.5秒で閉じ込め改善モード遷移が起こっている。

以上のような蓄積エネルギー、揺動、プラズマ圧力分布の変化に見られる閉じ込めモードの遷移現象は、軽水素プラズマでも観測されたが、重水素でより顕著に現れることが確認された。

プラズマ閉じ込め性能と放射損失量の関係を、軽水素、重水素のそれぞれについて周辺磁気島有り無しの場合について図4に示す。全体の傾向として、放射損失量が增大するにつれて閉じ込め性能の劣化が起こるが、周辺磁気島がある場合、特に非接触遷移後（中抜き赤丸）にはより高い閉じ込め性能を維持していることが分かる。また、重水素プラズマでは軽水素に比べてより大きい放射損失でより高い閉じ込め性能を維持できていることが明らかになった。このような水素同位体効果は、重水素と三重水素による運転を想定している将来の核融合炉に向けてより好ましい外挿性を示している。図4(b)に示す緑四角はこれまでのベストショットにおける時系列変化を示しているが、閉じ込め遷移は放射損失を徐々に低減させながら起こることが分かる。

以上の成果は環状閉じ込め装置の周辺磁場構造を3次元的に変化させることでプラズマの放射冷却による装置壁熱負荷低減と閉じ込め性能の両立の可能性を示す初めての実験結果である[①]。他の環状閉じ込め装置における同様の実験を通してその物理機構の解明と一般化が今後の課題である。

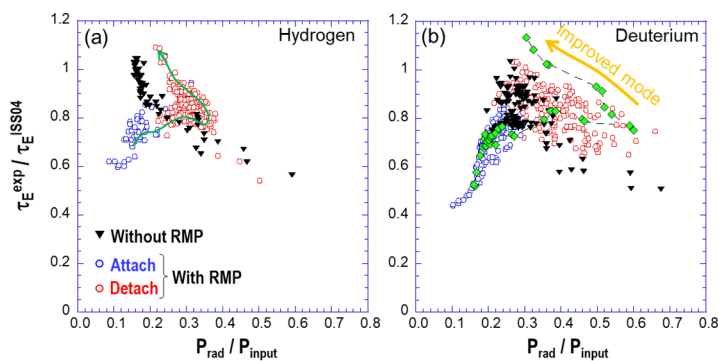


図4 閉じ込め性能 ($\tau_E^{exp}/\tau_E^{ISS04}$) の放射損失量 (P_{rad}/P_{input}) 依存性。(a) 軽水素プラズマ、(b) 重水素プラズマ。▼: 周辺磁気島無し、○: 周辺磁気島有りの非接触遷移前、○: 周辺磁気島有りの非接触遷移後。緑の線・シンボルはベストショットにおける時間変化。

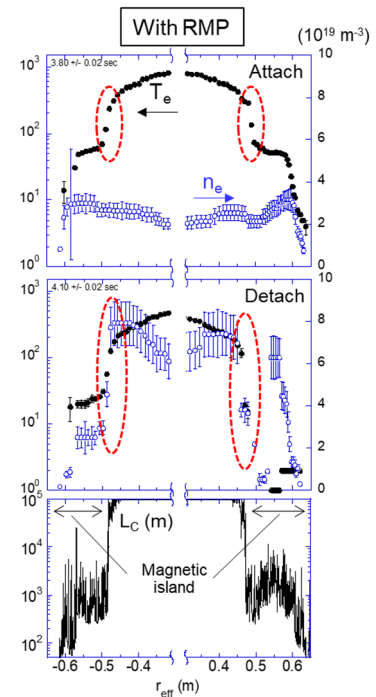


図3 周辺磁気島がある場合の重水素プラズマにおける周辺部の (a, b) 電子温度、電子密度分布、(c) 磁力線接続長分布。(a), (b)はそれぞれ非接触遷移前(3.80秒)と後(4.10秒)。

(2) 周辺磁気島が放射損失分布形成に与える影響

プラズマのエネルギー輸送と磁場構造の考察から以下のことが明確になった。エネルギー輸送方程式を線形化することで、下記の熱的不安定性の成長率が導かれる。

$$\gamma \sim \frac{2}{3n_e} \left\{ \left(\frac{2n_e n_{imp} L}{T_e} - n_e n_{imp} \frac{\partial L}{\partial T_e} \right) - k_{\parallel}^2 \kappa_{\parallel} - k_{\perp}^2 \kappa_{\perp} \right\} \quad (1)$$

ここで、 n_e, n_{imp}, L は電子密度、不純物多荷イオン密度、その冷却関数（温度依存性）を表している。また、 $k_{\parallel}, k_{\perp}, \kappa_{\parallel}, \kappa_{\perp}$ はそれぞれ磁力線に平行方向と垂直方向の波数と熱伝導係数を表している。放射損失が増大する低温では $\frac{\partial L}{\partial T_e} < 0$ となるため、式(1)の第1, 2項は常に正であり、不安定化項である。一方、第3, 4項は磁力線に平行方向と垂直方向のエネルギー輸送による安定化項である。図5に示すように、磁気島が無い場合の磁気面の形状は主にトーラス効果によるシャフラノフシフトに起因する変調であり、 $k_{\parallel} \sim 1/Rq$ (R, q はそれぞれ大半径、安全係数) 程度の有限の値となると同時に、flux expansion のためにトーラス内側では $k_{\perp}^2 \kappa_{\perp}$ の寄与が減少する。一方、磁気島がある場合には、そのX点は磁力線軌道における双曲型平衡点となり、 $k_{\parallel} \sim 0$ となると同時に、X点近傍での flux expansion のために $k_{\perp}^2 \kappa_{\perp}$ の寄与が減少する。このことから、磁気島がある場合には、X点付近で第3, 4項の安定化項が顕著に小さくなり、通常のトーラス効果に比べて熱的不安定性の成長が誘起されやすくなるのがわかる。

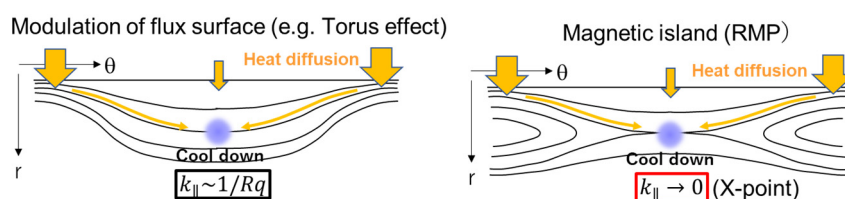


図5 左：トーラス効果（シャフラノフシフト）による磁気面の変調。図の中央と両端がそれぞれトーラス内側と外側に対応している。右：磁気島による磁気面の変調。

周辺部の磁気島構造が不純物多荷イオンによる放射損失分布形状に与える影響を調べるため、非定常プラズマ輸送シミュレーションコードを独自に開発して解析を行った。図6にその計算結果を示す。非接触遷移後 12ms において、磁気島の X 点付近で顕著な発光の増加が観測される（図6 (a3)）。これは上述した式(1)による X 点での熱的不安定性の成長によるものであるが、数値シミュレーションによって以下の輸送過程の詳細が明らかになった。X 点での温度低下は同時に X 点での密度上昇を引き起こすと同時に、磁気島の 0 点から X 点に向けてプラズマのフローを駆動する。このフローによって不純物多荷イオンのフローが X 点に向けて形成され、X 点での不純物多荷イオン密度が増加する。結果として、X 点での放射損失が増大し、ますます X 点の温度が低下し、X 点への不純物多荷イオンフローを促進することになる。このように、磁気島構造によって粒子とエネルギー輸送における正帰還が駆動されて X 点での放射冷却が進行することが明らかになった[2]。

イメージング分光およびボロメータファンアレイによる分布計測からも、非接触遷移の直前

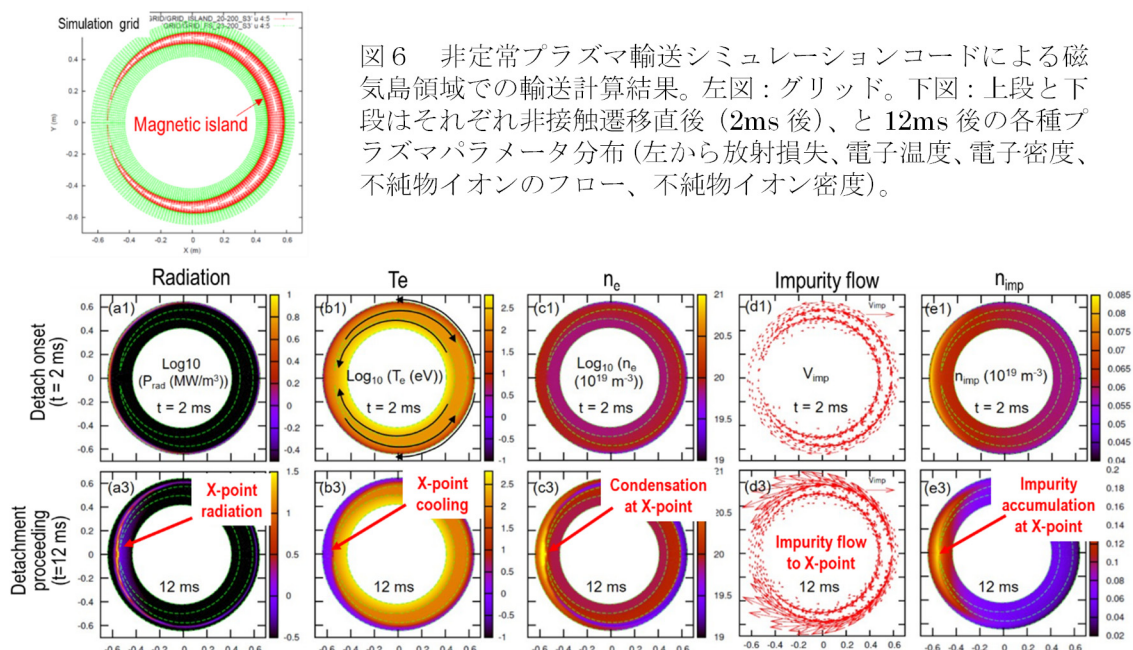


図6 非定常プラズマ輸送シミュレーションコードによる磁気島領域での輸送計算結果。左図：グリッド。下図：上段と下段はそれぞれ非接触遷移直後（2ms 後）、と 12ms 後の各種プラズマパラメータ分布（左から放射損失、電子温度、電子密度、不純物イオンのフロー、不純物イオン密度）。

に X 点近傍で不純物の発光が増大することが確認された [③]。

以上の理論的考察と数値シミュレーション、実験観測から、周辺磁気島構造が放射損失分布形成における役割についての理解が大きく進展した。今後は、実験における不純物フローの存在の検証、放射領域の安定化のメカニズムの解明が課題である [④]。また、トカマク型装置で近年観測されている X 点放射放電との比較を通じた更なる研究の発展が期待される。

(3) 乱流伝播の観測とダイバータ熱負荷軽減効果

共鳴摂動磁場の印加によって周辺部に形成された輸送障壁（急峻な圧力勾配）で励起された乱流が、磁場揺動の発生とともに閉じ込め領域の外側へと伝播し、結果としてダイバータ板での熱負荷分布を広域化して熱負荷を低減させることが実験的に初めて明らかとなった [⑤]。図 7 (c) に示すように、時刻 4.15 秒以前では PCI によって計測された密度揺動は急峻な圧力勾配の位置 ($r_{\text{eff}} \sim 0.47\text{m}$) に留まっている。一方、コヒーレントな磁場揺動 (図 7 (a), $\sim 4\text{kHz}$, モード数 $m/n=3/3$) が発生する 4.15 秒以降では、密度揺動が半径外側の領域 (閉じ込め領域の外側, $r_{\text{eff}} > 0.47\text{m}$) へと伝播指定浮く様子が観測された。この時、図 7 (f) に示すように、閉じ込め領域の外側へと伝播した乱流揺動が増加するに従ってダイバータ熱負荷分布 (半値幅 FWHM) が広域化し、最大熱負荷が減少することが示された (図 7 (d), (e))。このような乱流伝播によるダイバータ熱負荷軽減は、当初予期していなかった結果であり、また従来の不純物多荷イオンからの放射を用いた手法に替わる新しい方法となり得る。近年、ITER のペデスタルで励起された乱流が SOL へと伝播する可能性が議論されており、本実験結果はそのような可能性を始めて実験的に示した結果として注目されている。本研究課題で新たに立ち上げたガスファイブリング計測により、ダイバータ領域の揺動の空間パターン・伝播方向を詳細に解析できるようになった [⑥]。今後は本計測等を用いて乱流の伝播速度や空間スケールとプラズマパラメータ・磁場構造との関係を同定し、将来の装置への予測を進めることが課題である。

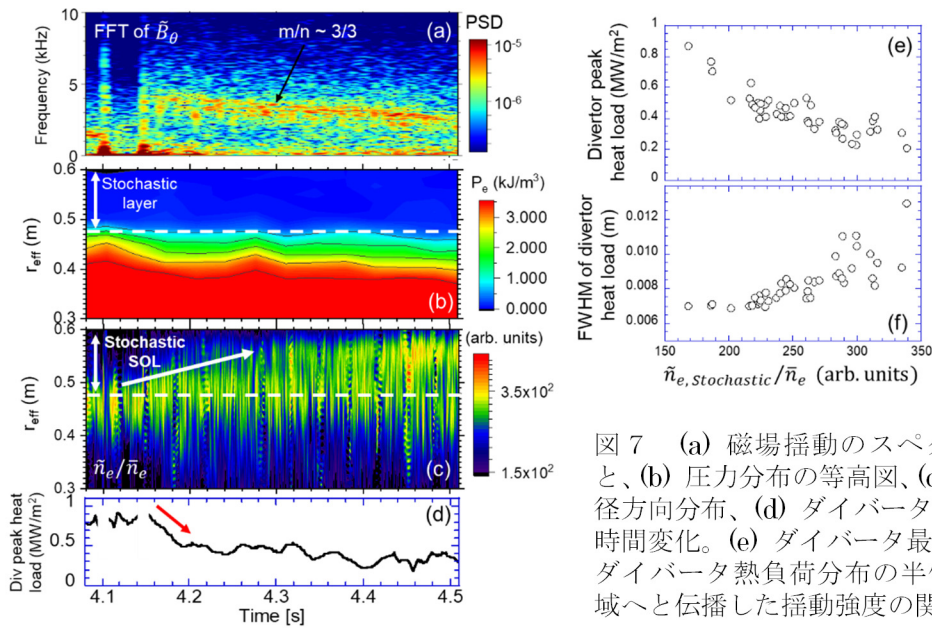


図 7 (a) 磁場揺動のスペクトログラムと、(b) 圧力分布の等高図、(c) 密度揺動の径方向分布、(d) ダイバータ最大熱負荷の時間変化。(e) ダイバータ最大熱負荷、(f) ダイバータ熱負荷分布の半値幅と周辺領域へと伝播した揺動強度の関係。

<引用文献>

- ① M. Kobayashi, R. Seki, Y. Hayashi, T. Oishi, K. Tanaka, Y. Takemura, K. Ida, T. Kinoshita, K. Mukai, S. Morita and S. Masuzaki, Nuclear Fusion, vol.62 (2022) pp.056006.
- ② M. Kobayashi, M.Z. Tokar, Contributions to Plasma Physics, vol.60 (2020) pp.e201900138.
- ③ M. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, R. Seki, T. Oishi, Y. Hayashi, Y. Takemura, M.Z. Tokar, S. Morita, M. Osakabe, K. Mukai, S. Masuzaki, Y. Narushima, and the LHD Experiment Group “Compatibility of core plasma performance and radiating edge plasma with 3D edge magnetic field structure change induced by RMP application in LHD” 47th European Conference on Plasma Physics (EPS 2021), Internet, June, 21-25, 2021.
- ④ M.Z. Tokar, M. Kobayashi, Plasma Physics and Controlled Fusion, vol.62 (2020) pp. 085011.
- ⑤ M. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, Y. Hayashi, Y. Takemura, and T. Kinoshita, Physical Review Letters, vol.128 (2022) pp. 125001.
- ⑥ M. Kobayashi, S. Ohdachi, Y. Xu, W. Li, A. Shimizu, J. Cheng, Review of Scientific Instruments, vol.93 (2022) pp. 093513.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 M. Z. Tokar M. Kobayashi N. Ohno	4. 巻 29
2. 論文標題 An approach to implement a heat flux limit in a model for fusion relevant plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 032502-1, 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0079524	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. Oishi, M. Kobayashi, H. Takahashi, Y. Hayashi, K. Mukai, S. Morita, M. Goto, Y. Kawamoto, T. Kawate, S. Masuzaki, C. Suzuki, G. Kawamura, G. Motojima, R. Seki	4. 巻 17
2. 論文標題 Spatial Profiles of NeVI-NeX Emission in ECR-Heated Discharges of the Large Helical Device with Divertor Detachment Induced by RMP Application and Ne Impurity Seeding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402022-2402022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.17.2402022	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 M. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, Y. Hayashi, Y. Takemura, T. Kinoshita	4. 巻 128
2. 論文標題 Turbulence Spreading into an Edge Stochastic Magnetic Layer Induced by Magnetic Fluctuation and Its Impact on Divertor Heat Load	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 125001-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.128.125001	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 M. Kobayashi, R. Seki, Y. Hayashi, T. Oishi, K. Tanaka, Y. Takemura, K. Ida, T. Kinoshita, K. Mukai, S. Morita, S. Masuzaki	4. 巻 62
2. 論文標題 Confinement improvement during detached phase with RMP application in deuterium plasmas of LHD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 056006-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac42f3	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 M. Kobayashi, S. Ohdachi, Y. Xu, W. Li, A. Shimizu, J. Cheng	4. 巻 93
2. 論文標題 Gas puff imaging system for edge plasma fluctuation measurements in large helical device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 093513-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0100301	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 Tetsutarou OISHI, Shigeru MORITA, Masahiro KOBAYASHI, Kiyofumi MUKAI, Gakushi KAWAMURA, Suguru MASUZAKI, Yuki HAYASHI, Chihiro SUZUKI, Yasuko KAWAMOTO, Motoshi GOTO and the LHD Experiment Group	4. 巻 16
2. 論文標題 EUV and VUV Spectra of NeIII-NeX Line Emissions Observed in the Impurity Gas-Puffing Experiments of the Large Helical Device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402006-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2402006	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 Masaki Osakabe, Hiromi Takahashi, Hiroshi Yamada, Kenji Tanaka, Tatsuya Kobayashi, Katsumi Ida, Satoshi Ohdachi, Jacobo Varela, Kunihiro Ogawa, Masahiro Kobayashi et al.	4. 巻 62
2. 論文標題 Recent results from deuterium experiments on the Large Helical Device and their contribution to fusion reactor development	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 042019-1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac3cda	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 Hiroki Ishihara, Arseniy Kuzmin, Masahiro Kobayashi, Taiichi Shikama, Keiji Sawada, Seiki Saito, Hiroaki Nakamura, Keisuke Fujii, Masahiro Hasuo	4. 巻 267
2. 論文標題 Ro-vibrational population distribution in the ground state of hydrogen isotopologues in LHD peripheral plasmas deduced from emission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer	6. 最初と最後の頁 107592-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jqsrt.2021.107592	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. Hayashi, M. Kobayashi, K. Mukai, S. Masuzaki, T. Murase	4. 巻 165
2. 論文標題 Divertor heat load distribution measurements with infrared thermography in the LHD helical divertor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112235-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2021.112235	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 Daisuke TAKADA, Taku ITOH, Masahiro KOBAYASHI and Hiroaki NAKAMURA	4. 巻 16
2. 論文標題 A Mesh-Generation Scheme for the Large Helical Device Based on the Structure of Magnetic-Field Lines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401086-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2401086	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 M. Kobayashi, M.Z. Tokar	4. 巻 60
2. 論文標題 Time-dependent plasma transport simulation for the study of edge impurity radiation dynamics with magnetic island in large helical device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 e201900138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ctpp.201900138	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 M.Z. Tokar, M. Kobayashi	4. 巻 62
2. 論文標題 Modeling of the resonant magnetic perturbation effect on detachment in the Large Helical Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 85011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab9c49	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 M.Z. Tokar, M. Osakabe, M. Kobayashi, K. Mukai, K. Nagaoka, H. Takahashi, K. Tanaka, T. Morisaki	4. 巻 62
2. 論文標題 A mechanism of ion temperature peaking by impurity pellet injection in a heliotron plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 75008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab8ca2	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 M., Seki R., Masuzaki S., Morita S., Zhang H.M., Narushima Y., Tanaka H., Tanaka K., Tokuzawa T., Yokoyama M., Ido T., Yamada I., the LHD Experimental Group	4. 巻 59
2. 論文標題 Impact of a resonant magnetic perturbation field on impurity radiation, divertor footprint, and core plasma transport in attached and detached plasmas in the Large Helical Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096009 ~ 096009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab26e6	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34件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 29件)

1. 発表者名 M. Kobayashi, S. Ohdachi, Y. Xu, W. Li, J. Cheng, A. Shimizu
2. 発表標題 Gas puff imaging system for edge plasma fluctuation measurements in Large Helical Device
3. 学会等名 High-temperature plasma diagnostics conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kobayashi, T. Oishi, Y. Hayashi, K. Mukai, H. Takahashi, K. Tanaka, T. Kinoshita, M.Z. Tokar, B.J. Peterson, S. Masuzaki
2. 発表標題 High radiation fraction detachment with Ne seeding and edge magnetic island in new magnetic configuration in LHD
3. 学会等名 25th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kobayashi, Y. Mizuno, K. Nagahara, T. Tsujimura, K. Mukai, Y. Yoshimura, Y. Hayashi, T. Oishi, C. Suzuki, N. Kenmochi, S. Masuzaki, B.J. Peterson
2. 発表標題 Detachment control with feedback impurity seeding and ECRH injection in LHD
3. 学会等名 48th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Kobayashi
2. 発表標題 Edge MHD and Turbulent Transport and their Impact on Pedestal, SOL and Divertor Heat Flux
3. 学会等名 H-mode workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kobayashi, K. Ida, K. Tanaka, Y. Hayashi, Y. Takemura, T. Kinoshita, T. Tokuzawa
2. 発表標題 Turbulence spreading into edge stochastic magnetic layer induced by MHD activity in toroidal confinement plasma
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 M. Kobayashi, T. Oishi, Y. Hayashi, K. Mukai, H. Takahashi, K. Tanaka, T. Kinoshita, M.Z. Tokar, B.J. Peterson, S. Masuzaki, H. Nakamura
2. 発表標題 High radiation fraction detachment with Ne seeding and an edge magnetic island in a new magnetic configuration in LHD
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 Y Hayashi, M Kobayashi, K Mukai, S Masuzaki, T Murase, and the LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Characteristics of heat flux mitigation in radiative divertor with multi magnetic footprint in the Large Helical Device
3 . 学会等名 25th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Kobayashi, R. Seki, Y. Takemura, Y. Hayashi, T. Oishi, K. Tanaka, K. Mukai, S. Morita, K. Ida, S. Masuzaki
2 . 発表標題 RMP induced H-mode transition during divertor detachment with enhanced edge radiation in deuterium plasmas 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 M. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, R. Seki, T. Oishi, Y. Hayashi, Y. Takemura, M.Z. Tokar, S. Morita, M. Osakabe, K. Mukai, S. Masuzaki, Y. Narushima
2 . 発表標題 Compatibility of core plasma performance and radiating edge plasma with 3D edge magnetic field structure change induced by RMP application in LHD
3 . 学会等名 47th European Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, Y. Hayashi, Y. Takemura, T. Kinoshita, T. Tokuzawa
2 . 発表標題 Interaction between turbulence spreading and MHD activity at edge stochastic magnetic layer in LHD
3 . 学会等名 the Joint APTWG-TTF meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, R. Seki, T. Oishi, Y. Hayashi, Y. Takemura, M.Z. Tokar, S. Morita, M. Osakabe, K. Mukai, S. Masuzaki, Y. Narushima
2 . 発表標題 Divertor detachment and core plasma transport with RMP application in LHD
3 . 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Kobayashi, K. Tanaka, K. Ida, Y. Hayashi, Y. Takemura, T. Kinoshita, T. Tokuzawa
2 . 発表標題 Observation of turbulence spreading into edge stochastic magnetic layer caused by MHD mode excitation in LHD
3 . 学会等名 the 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Masahiro Kobayashi
2 . 発表標題 Plasma transport in magnetic island and stochastic magnetic field in non-axisymmetric toroidal confinement system
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 M. Kobayashi, R. Seki, Y. Hayashi, T. Oishi, K. Tanaka, Y. Takemura, M.Z. Tokar, K. Ida, T. Kinoshita, K. Mukai, S. Morita, S. Masuzaki
2 . 発表標題 Impact of 3D edge magnetic field structure/topology on thermal instability and core plasma confinement in toroidal magnetic confinement system
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 K. Mukai, S. Masuzaki, Y. Hayashi, T. Oishi, C. Suzuki, M. Kobayashi, T. Tokuzawa, H. Tanaka, B. J. Peterson
2 . 発表標題 STEADY-STATE SUSTAINMENT OF DIVERTOR DETACHMENT WITH MULTI-SPECIES IMPURITY SEEDING 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 M. Kobayashi, M. Jakubowski, the LHD experiment group, W7-X team
2 . 発表標題 Ne & N seeding experiments in LHD and W7-X
3 . 学会等名 28th ITPA meeting of TG SOL and divertor physics (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 M.Z. Tokar, M. Osakabe, M. Kobayashi, K. Mukai, K. Nagaoka, H. Takahashi, K. Tanaka, T. Morisaki
2 . 発表標題 Mechanisms for Reduction of Ion Anomalous Transport in LHD, by Impurity Injection
3 . 学会等名 International Toki Conference 29 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Arseniy KUZMIN, Hiroki ISHIHARA, Masahiro KOBAYASHI1, Taiichi SHIKAMA, Keiji SAWADA, Seiki,SAITO, Hiroaki NAKAMURA, Keisuke FUJII, Masahiro HASUO, and the LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Ro-vibrational Population Distribution in the Ground State of Hydrogen Molecule Isotope in LHD Peripheral Plasmas Deduced from Emission Spectroscopy
3 . 学会等名 International Toki Conference 29 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke TAKADA, Taku ITOH, Masahiro KOBAYASHI, Hiroaki NAKAMURA
2. 発表標題 Study on Mesh Generation Scheme Based on Structure of Magnetic Field Lines for Large Helical Device
3. 学会等名 International Toki Conference 29 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsutarou OISHI, Shigeru MORITA, Masahiro KOBAYASHI, Kiyofumi MUKAI, Gakushi KAWAMURA, Suguru MASUZAKI, Yuki HAYASHI, Chihiro SUZUKI, Yasuko KAWAMOTO, Motoshi GOTO and the LHD Experiment Group
2. 発表標題 EUV and VUV Spectra of NeIII-NeX Line Emissions Observed in the Impurity Gas-puffing Experiments of the Large Helical Device
3. 学会等名 International Toki Conference 29 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林政弘、田中謙治、高橋裕己、林 祐貴、向井清史、大石鉄太郎、武村勇輝、木下稔基、M.Z. Tokar, 關 良輔、増崎貴、ピーターソン パイロン、森田繁、LHD実験グループ
2. 発表標題 共鳴摂動磁場を用いたダイバータ熱負荷軽減とコアプラズマ性能の両立
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Koenig, S. Masuzaki, M. Kobayashi, K. Mukai, G. Motojima, T. Oishi, Y. Hayashi, G. Kawamura, T. Morisaki, S. Brezinsek, F. Effenberg, Y. Feng, M. Jakubowski, T. Kremeyer, M. Krychowiak, V. Perseo, F. Reimold, M. Otte, O. Schmitz, T. Sunn Pedersen, T. Wauters, U. Wenzel, V. Winters and the W7-X and LHD teams
2. 発表標題 Divertor operation scenarios in helical devices
3. 学会等名 International Conference on Plasma Surface Interaction (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Kobayashi, S. Morita, T. Oishi, Y. Takemura, Y. Hayashi, I. Yamada, S. Masuzaki, Y. Narushima, K. Mukai, R. Seki, T. Tokuzawa, K. Tanaka, and the LHD experimental group
2 . 発表標題 FUEL SPECIES EFFECTS ON IMPURITY RADIATION AND ENERGY CONFINEMENT TIME IN DETACHMENT DISCHARGES WITH RMP APPLICATION IN LHD
3 . 学会等名 22nd International Stellarator and Heliotron workshop (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Kobayashi, T. Goto, Y. Hayashi, G. Kawamura, G. Motojima, S. Morita, K. Mukai, S. Masuzaki, T. Oishi, C. Suzuki, T. Morisaki, and the LHD experimental group
2 . 発表標題 Advantage and disadvantage of LHD heliotron divertor
3 . 学会等名 Third Technical Meeting on Divertor Concepts (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Kobayashi , M.Z. Tokar
2 . 発表標題 Influence of a magnetic island on the edge impurity radiation in a heliotron
3 . 学会等名 17th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kiyofumi Mukai, Suguru Masuzaki, Yuki Hayashi, Chihiro Suzuki, Tetsutaro Oishi, Masahiro Kobayashi, Hirohiko Tanaka, Byron J. Peterson, and the LHD Experiment Group
2 . 発表標題 Radiative divertor experiments with Ne, N, and Kr seeding in LHD
3 . 学会等名 Third Technical Meeting on Divertor Concepts (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 向井清史、増崎貴1、林祐貴、小林政弘、鈴木千尋、大石鉄太郎、田中宏彦、 Byron Peterson、LHD実験グループ
2. 発表標題 LHDにおける不純物ガス入射によるダイバータ熱負荷軽減
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林祐貴、向井清史、小林政弘、B.J. Peterson、LHD実験グループ
2. 発表標題 大型ヘリカル装置(LHD)における 赤外線計測
3. 学会等名 日本赤外線学会 第28回研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Masahiro Kobayashi and Mikhail Tokar	4. 発行年 2019年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 126
3. 書名 Fusion Energy: Experimental Studies of and Theoretical Models for Detachment in Helical Fusion Devices	

〔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
研究協力者	關 良輔 (Seki Ryosuke) (80581066)	核融合科学研究所	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	林 祐貴 (Hayashi Yuki) (00823387)	核融合科学研究所	
研究協力者	トカー ミハヤエル (Tokar Mikhail)	デュッセルドルフ大学	
研究協力者	向井 清史 (Mukai Kiyohumi) (90632266)	核融合科学研究所	
研究協力者	大石 鉄太郎 (Oishi Tetsutarou) (80442523)	東北大学	
研究協力者	田中 謙治 (Tanaka Kenji) (50260047)	核融合科学研究所	
研究協力者	居田 克巳 (Ida Katsumi)	核融合科学研究所	
研究協力者	武村 勇輝 (Takemura Yuki) (60705606)	核融合科学研究所	
研究協力者	森田 繁 (Morita Shigeru) (80174423)	核融合科学研究所	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	木下 稔基 (Kinoshita Toshiki) (40983408)	九州大学	
研究協力者	ピーターソン バイロン (Peterson Byron) (00280595)	核融合科学研究所	
研究協力者	増崎 貴 (Masuzaki Suguru) (80280593)	核融合科学研究所	
研究協力者	中村 浩章 (Nakamura Hiroaki) (30311210)	核融合科学研究所	
研究協力者	クズミン アルセニイ (Kuzmin Arseniy)	京都大学	

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