

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14686

研究課題名（和文）非接触プラズマにおける再結合フロントの動的挙動とその制御に関する研究

研究課題名（英文）Study on dynamic behavior of recombination front and its control in detached plasma

研究代表者

林 祐貴（HAYASHI, Yuki）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00823387

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：核融合炉において炉壁への熱負荷低減手法として有力視されている非接触プラズマと、上流で起こる不安定性に起因する突発的なパルスプラズマとの相互作用に関する研究を、直線型装置 Magnum-PSIを用いた実験および2次元プラズマ流体シミュレーションを用いたモデリングにより進展させた。非接触プラズマへパルスプラズマが侵入すると、ターゲットにおいてパルスの前半部分は観測される一方で、後続のパルスは自身が発生させるリサイクリング粒子束の促進により抑制されると結論づけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱核融合発電の実現に向けて、炉心からの過渡的な熱粒子放出現象に伴う炉壁への熱負荷を低減することが必須である。本研究では、パルスプラズマ自身が発生させるリサイクリング粒子束が後続のパルスを減衰させる現象を見出した。この現象を利用・発展させることで、非接触プラズマを用いた過渡的熱負荷の緩和手法を確立させ、熱核融合発電の早期実現に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The interaction between a detached plasma, which is considered to be a promising method to reduce the heat load into the plasma facing wall in a fusion reactor, and a transient pulsed plasma due to instabilities has been studied through experiments using the linear plasma device Magnum-PSI and the modeling using 2D plasma fluid simulation. It was concluded that last-part of the pulsed plasma was suppressed by the enhancement of the recycled neutral particle flux generated at the target because the first half of the pulse was observed as the target current.

研究分野：核融合学

キーワード：非接触プラズマ 再結合フロント 熱パルス 直線型装置 リサイクリング 流体コード 体積再結合

1. 研究開始当初の背景

熱核融合発電の定常維持のために、プラズマ対向壁となるダイバータ板への熱負荷を低減しなければならない。この課題解決のため最も有力視されているものが非接触ダイバータである。非接触ダイバータはダイバータ領域の中性粒子圧力を増加させることでプラズマ-中性粒子相互作用によってプラズマの温度を低下させ、体積再結合過程によりプラズマを消滅させる手法である。このとき生成されるプラズマを非接触プラズマという。非接触プラズマには再結合フロントと呼ばれる体積再結合が強く発生する場所があり、再結合過程に伴うプラズマからの発光が観測される。

一方、核融合炉では炉心からの間欠的な高熱流プラズマの吐き出しによって、熱パルスが再結合フロントへ飛来する。このとき再結合フロントの構造が破壊されるとダイバータ板の熱負荷が急激に上昇してしまうことが危惧される。

プラズマを中性化する領域である再結合フロントとダイバータ板との距離を大きくすればプラズマによる熱負荷を低減できる。しかし、中性粒子の発生源である再結合フロントがダイバータ板から離れると中性粒子の排気効率が劣化し、粒子制御が困難となる。よって、粒子制御と熱流制御を両立させるために、再結合フロントを適切な位置に制御する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は 2 つの直線型プラズマ装置を用いた実験から、核融合ダイバータプラズマの熱流制御・粒子制御を行う上で決定権を握る再結合フロントの未解明な物理である、①熱パルスに対する再結合フロントの動的応答過程解明と、②再結合フロント位置の磁場配位による制御手法確立およびプラズマ-中性粒子相互作用の磁場配位依存性の解明、である。

3. 研究の方法

①熱パルスに対する再結合フロントの動的応答過程解明

Dutch Institute for Fundamental Energy Research (DIFFER)の直線型プラズマ装置 Magnum-PSI において実験を行う。Magnum-PSI の高パワープラズマ源を用いて高密度非接触プラズマを形成し、コンデンサバンクによる放電パワーの重畳によって熱パルスを生成する。ターゲット板前に再結合フロントを形成し、ターゲット板に流入するイオン飽和電流 I_{target} を計測する。 I_{target} の増加は再結合フロントの崩壊、その後の減少は回復過程を意味する。また、イオン飽和電流 I_{sat} と浮遊電位 V_f をそれぞれ 2 つの電極で計測する多電極静電プローブを用いて、熱パルスの伝搬過程を明らかにする。この実験を中性粒子圧力 P_n を変化させながら行うことで、熱パルス流入による再結合フロントの動的応答過程を系統的に明らかにする。さらに、どのような原子・分子過程が起きているのかを明らかにするために、プラズマ流体コードを用いたモデリングも実施する。

②再結合フロント位置の磁場配位による制御手法確立およびプラズマ-中性粒子相互作用の磁場配位依存性の解明

名古屋大学の直線型プラズマ装置 NAGDIS-II を用いて実験を行う。連結された複数の磁場コイルのうち、再結合フロント近傍のコイルに関してのみコイル電流を変化させ、軸方向に局所的な発散・収縮した磁場配位を形成する。これは局所的にプラズマ-中性粒子相互作用を制御するためである。このとき、体積再結合過程に伴って発生する高励起準位原子の自然放出による発光を軸方向に多点計測し、再結合フロント位置を同定する。

4. 研究成果

①熱パルスに対する再結合フロントの動的応答過程解明

図 1 に Magnum-PSI における実験概要を示す。カスケードアークプラズマ源から高密度ヘリウムプラズマを生成し、熱パルスを重畳する。非接触ターゲットへ飛来した熱パルスは、静電プローブおよびターゲット板のイオン飽和電流(それぞれ I_{sat} と I_{target})として観測される。分光計測およびトムソン散乱計測はパルスを生成しない定常時に実施した。

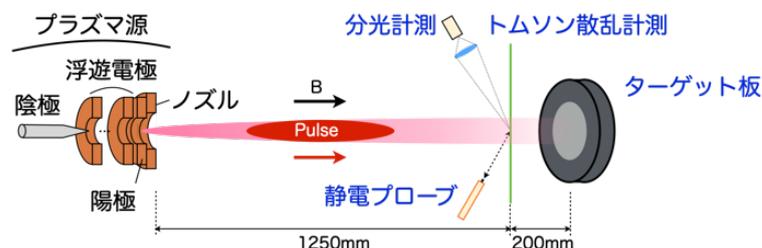


図 1 Magnum-PSI における実験概要.

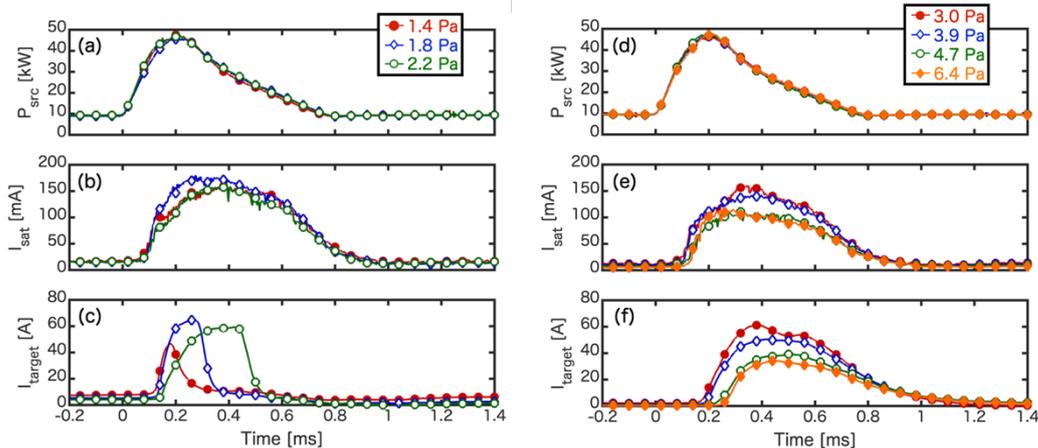


図2 放電電力 P_{src} 、静電プローブによるイオン飽和電流 I_{sat} 、ターゲット板におけるイオン飽和電流 I_{target} の時間発展. 左のグラフが低 P_n 、右のグラフが高 P_n 条件に対応.

図2に結果を示す。図2(a)および(d)が放電電力 P_{src} 、(b)および(e)が I_{sat} 、(c)および(f)が I_{target} である。横軸は時間であり、コンデンサバンクにトリガを与えたタイミングを 0 ms と定義する。図2(a)-(c)は低 P_n 、(d)-(f)は高 P_n の条件である。低圧の場合において、 P_{src} と I_{sat} がほぼ同じ形の波形を示していることから、生成されたパルスプラズマが静電プローブ位置まで輸送されていることがわかる。しかし、 I_{target} は P_{src} や I_{sat} と比べて、パルス部分の時間が短い波形を示している。パルス生成のために与えた電力は P_{src} であるため、パルスの時間幅は P_{src} が示す ~ 0.8 ms であると考えられる。しかし、 I_{target} の時間幅は 0.8 ms よりも短く、これはターゲット近傍においてパルスが部分的に強く抑制されているのだと考えられる。一方で、高圧の場合には I_{target} が示すパルスの時間幅は ~ 0.8 ms であり、 P_{src} や I_{sat} と同様の傾向を示した。よって、パルスの部分的な抑制は低 P_n 条件に限られる現象であると考えられる。

低 P_n 条件においてパルスの抑制が起きた理由として、パルス自身が発生させるリサイクリング粒子による影響が考えられる。図3に説明のための模式図を示す。ターゲットに流入したパルス前半部分のイオンは中性化し、リサイクリング粒子として後続のパルスイオンと衝突する。この時の平均自由程を λ_{n-i} とする。リサイクリング粒子は背景の中性粒子とも弾性衝突する。そちらの平均自由程は λ_{n-n} とする。低 P_n の場合は、 $\lambda_{n-i} < \lambda_{n-n}$ であるため、リサイクリング粒子が背景の中性粒子に散乱されず、後続パルスに影響を与える。一方で、高 P_n の場合は、 $\lambda_{n-i} > \lambda_{n-n}$ となるため、リサイクリング粒子が背景中性粒子によって散乱されてしまい、パルスの減衰が得られなかったと考えられる。

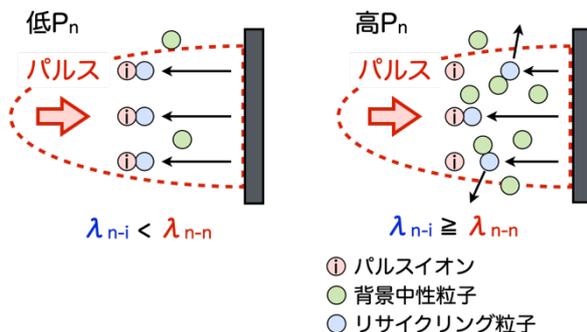


図3 リサイクリング粒子がパルスプラズマと相互作用する模式図.

定量的な考察を行うために、2次元プラズマ流体コード LINDA と中性粒子輸送コードを用いたモデリングを実施した。LINDA コードによって、パルスプラズマがターゲットに到達した直後のプラズマを一様な条件で計算し、そのプラズマを背景として中性粒子輸送コードによってリサイクリング粒子の追跡計算を行った。中性粒子がプラズマに与える運動量損失は、実験から計測したパルスプラズマの圧力(動圧+静圧)より十分に大きいことがわかった。このことから、リサイクリング粒子による逆向きの圧力がパルスプラズマを押し止め、ターゲット電流を抑制させたと考えられる[文献 1]。本研究は现阶段ではパルスプラズマの消滅まで説明するには至っていない。今後は、パルスプラズマがどのように中性粒子との相互作用でエネルギーを失い、体積再結合過程で消滅するのか、あるいは径方向への拡散によって粒子束が失われているか、などについて詳しい解明が必要である。

②再結合フロント位置の磁場配位による制御手法確立およびプラズマ-中性粒子相互作用の磁場配位依存性の解明

図4に NAGDIS-II におけるプラズマ中心の磁場強度分布と磁場コイルの位置を示す。軸方向位置(Axial position)が 1.06 m 付近のコイル2つのみを他のコイルと別電源を用いて制御することで、局所的な発散・収縮磁場配位を形成することができる。

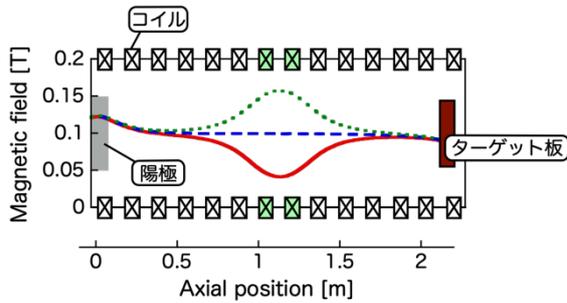


図 4 NAGDIS-II における局所収縮・発散磁場強度分布。

図 5 に実験結果を示す。図 5(a)は磁場強度分布であるが、局所収縮磁場の位置が再結合フロントの上流を制御 1、同位置を制御 2、下流を制御 3 条件と呼ぶ。図 5(b)は直線磁場配位での高励起準位からの遷移に伴う発光強度を示しており、最も発光強度が高い位置(~1.39 m)が再結合フロントである。図 5(c)は局所収縮磁場配位とした場合の発光強度分布の変化である。制御 1 及び 2 条件では、再結合フロントの位置が上流側にシフトした。これは収縮磁場によって電子密度が上昇したことによるものであると考えられる。一方で、制御 3 条件では再結合フロントの位置に変化はない。これらの結果から、再結合フロントと局所収縮磁場との相対位置によって再結合フロントの位置が制御可能であることがわかった。NAGDIS-II を用いた非接触プラズマの実験で、再結合プラズマにおけるダブルプローブ法の妥当性を検証することができたため[文献 2]、今後はダブルプローブを用いた電子温度や密度等のプラズマパラメータの軸方向分布との関係を調査する予定である。

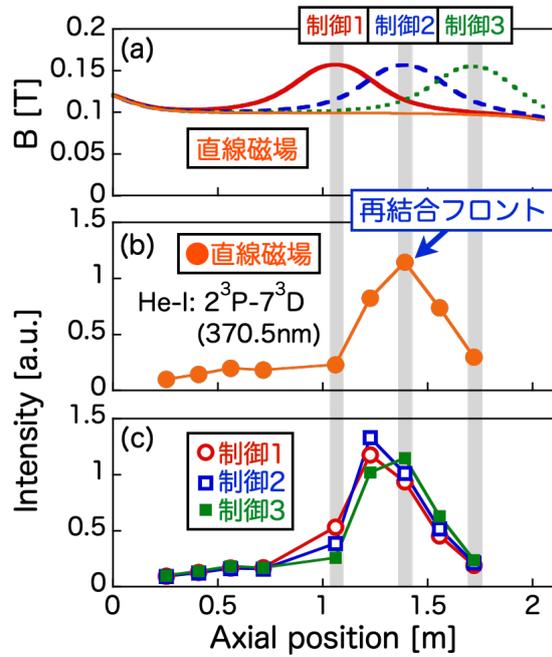


図 5 (a)磁場強度分布、(b)(c)高励起準位からの遷移に伴う発光強度分布

引用文献

1. Yuki Hayashi, Hirohiko Tanaka, Noriyasu Ohno, Shin Kajita, Thomas Morgan, Hennie van der Meiden, John Scholten, Jordy Vernimmen, Hiroki Natsume, Keiji Sawada, Shota Masuda, "Reduction of pulsed particle load with dynamic pressure induced by transient recycled neutral flux", Plasma Phys. Control. Fusion **64** (2022) 105013.
2. Yuki Hayashi, Hayato Nishikata, Noriyasu Ohno, Shin Kajita, Hirohiko Tanaka, Hiroshi Ohshima, and Masamichi Seki, "Double-probe measurement in recombining plasma using NAGDIS-II", Contrib. Plasma Phys. **59** (2019) e201800088.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 4件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kajita Shin, Morgan Thomas, Tanaka Hirohiko, Hayashi Yuki, Yoshida Naoaki, Nagata Daisuke, Vernimmen Jordy, Feng Shuangyuan, Zhang Rongshi, Ohno Noriyasu | 4. 巻 548 |
| 2. 論文標題 Accelerated/reduced growth of tungsten fuzz by deposition of metals | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 152844 ~ 152844 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2021.152844 | 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 Romano F, Rindt P, Scholten J, Hayashi Y, Morgan T W | 4. 巻 96 |
| 2. 論文標題 Effect of lithium vapour shielding on hydrogen plasma parameters | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physica Scripta | 6. 最初と最後の頁 125626 ~ 125626 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1402-4896/ac2bde | 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 Yuki Hayashi, Masahiro Kobayashi, Kiyofumi Mukai, Suguru Masuzaki, Takanori Murase, and the LHD Experiment Group | 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 |
| 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 Yuki Hayashi, Hayato Nishikata, Noriyasu Ohno, Shin Kajita, Hirohiko Tanaka, Hiroshi Ohshima, and Masamichi Seki | 4. 巻 59 |
| 2. 論文標題 Double-probe measurement in recombining plasma using NAGDIS-II | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics | 6. 最初と最後の頁 e201800088 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ctpp.201800088 | 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 Hayashi, Noriyasu Ohno, Hennie van der Meiden, John Scholten, Shin Kajita, Jonathan van den Berg, Renato Perillo, Jordy Vernimmen, and Thomas Morgan | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Application of Ion Sensitive Probe to High Density Plasmas in Magnum-PSI | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research | 6. 最初と最後の頁 1202135 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1202135 | 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 Yuki Hayashi, Hirohiko Tanaka, Noriyasu Ohno, Shin Kajita, Thomas Morgan, Hennie van der Meiden, John Scholten, Jordy Vernimmen, Hiroki Natsume, Keiji Sawada, Shota Masuda | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Reduction of pulsed particle load with dynamic pressure induced by transient recycled neutral flux | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion | 6. 最初と最後の頁 105013 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac8acb | 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. Tanaka, Y. Hayashi, S. Kajita, H.J. van der Meiden, M. Yoshikawa, J.W.M. Vernimmen, J. Scholten, I. Classen, T.W. Morgan and N. Ohno | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Cross-field transport in detached helium plasmas in Magnum-PSI | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion | 6. 最初と最後の頁 115021 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/abb88f | 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 M. Yoshikawa, H. Tanaka, Y. Hayashi, S. Kajita, H.J. van der Meiden, J.W.M. Vernimmen, T.W. Morgan, J. Kohagura, Y. Shima, N. Ezumi, Y. Nakashima, and M. Sakamoto | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 Effects from the target plate geometry on fluctuations of helium plasma in the linear divertor simulator Magnum-PSI | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research | 6. 最初と最後の頁 1402100 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1402100 | 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 |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuki Hayashi, Yukinori Hamaji, Suguru Masuzaki, Naomichi Ezumi, Noriyasu Ohno, Shinichi Namba and Makoto Takagi |
| 2. 発表標題 Development and optimization of cascaded arc plasma source in TPD-II |
| 3. 学会等名 ISPlasma 2022 / IC-PIANTS 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 林祐貴, 田中宏彦, 大野哲靖, 梶田信, T.W. Morgan, H.J. van der Meiden, J. Scholten, J.W.M. Vernimmen, 澤田圭司, 増田翔太, 夏目祥揮 |
| 2. 発表標題 Magnum-PSI 非接触プラズマにおけるリサイクリング粒子が熱パルス緩和に与える影響 |
| 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 Yuki Hayashi, Masahiro Kobayashi, Kiyofumi Mukai, Suguru Masuzaki, Takanori Murase, and the LHD Experiment Group |
| 2. 発表標題 Divertor Heat Flux Distribution Measurements in Radiative Divertor Operation in LHD |
| 3. 学会等名 24th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuki Hayashi, Hirohiko Tanaka, Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Thomas Morgan, Hennie Meiden, John Scholten, and Jordy Vernimmen |
| 2. 発表標題 Study on heat pulse transport in detached recombining plasma in linear plasma device Magnum-PSI |
| 3. 学会等名 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 林 祐貴, 小林政弘, 向井清史, 増崎貴, LHD実験グループ |
| 2. 発表標題 LHDヘリカルダイバータにおける赤外線サーモグラフィを用いたダイバータ熱流束計測 |
| 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 Yuki Hayashi, Masahiro Kobayashi, Kiyofumi Mukai, Suguru Masuzaki, Takanori 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 Yuki Hayashi, Yukinori Hamaji, Suguru Masuzaki, Masayuki Tokitani, Masahiro Kobayashi, Kiyofumi Mukai, Takanori Murase, and the LHD Experiment Group |
| 2. 発表標題 Heat flux measurement on actively-cooled tungsten divertor in the Large Helical Device |
| 3. 学会等名 32nd Symposium on Fusion Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2022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 第28回日本赤外線学会研究発表会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 林 祐貴, 小林政弘, 向井清史, 増崎貴, LHD実験グループ |
| 2. 発表標題 LHDにおける放射冷却ダイバータでのプラズマ熱流束計測 |
| 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 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 林 祐貴, 小林政弘, 増崎貴, 向井清史, 村瀬尊則 |
| 2. 発表標題 多点接続フラックスチューブを有する LHD ダイバータにおける不純物ガス入射時の熱流減少過程 |
| 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 林 祐貴, 浜地志憲, 時谷政行, 増崎貴, 小林政弘, 向井清史, 村瀬尊則 |
| 2. 発表標題 LHDタングステンダイバータにおける赤外線サーモグラフィを用いた熱流束計測 |
| 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 H. Tanaka, Y. Hayashi, S. Kajita, H.J. van der Meiden, M. Yoshikawa, J.W.M. Vernimmen, J. Scholten, I. Classen, T.W. Morgan, N. Ohno |
| 2. 発表標題 Cross-field transport in detached helium plasmas in Magnum-PSI |
| 3. 学会等名 24th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (国際学会) |
| 4. 発表年 2021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 | | | |
|---------|---------|--|--|--|
| オランダ | DIFFER | | | |