

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01070

研究課題名（和文）ヘリカル実験を活用したトカマク放電強制消滅手法の定量的研究

研究課題名（英文）Exploitation of helical plasma experiments for quantitative study of fast tokamak shutdown scenario

研究代表者

松山 顕之（Matsuyama, Akinobu）

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：90581075

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：磁場閉じ込め核融合実験炉ITERにおいてディスラプション時の装置負荷緩和に用いられる固体ペレットの粉碎入射に関する研究を行った。水素とネオンの混合固体が溶発する際の基本プロセスのモデル化から出発し、LHD装置の実験観測との比較を通じ、高密度プラズモイドの磁場交差方向の輸送が不純物の添加で制御できることを世界で初めて実証した。開発した溶発モデルをディスラプション統合コードINDEXに実装し、トカマク実験との比較から水素単体ペレット入射の粒子供給効率劣化を解明するとともに、ITERの粉碎ペレット入射システムの最適化に資する解析結果のデータベースを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られたペレット溶発および粉碎ペレット入射に関する研究成果は、世界7極で推進中の磁場閉じ込め核融合実験炉計画に対し、ディスラプション緩和システムの最適化に資するデータベースを構築するものでITER計画の課題解決に貢献する成果として評価される。他にも本研究で開発したモデルやコードを用いたJT-60UやJT-60SA、核融合原型炉のディスラプション特性に関する研究が進展しており、本研究計画の実施によって、ITERおよびトカマク型核融合炉にとって最大の難題であるディスラプション対策に関する様々な研究成果が創出された。

研究成果の概要（英文）：Shattered Pellet Injection (SPI) is expected to be used by the magnetically confined fusion reactor ITER to mitigate machine loads caused by major disruptions. The ablation process of cryogenic solid fragments of hydrogen and neon has been studied. The experimental observation in the Large Helical Device demonstrated the control of the cross-field transport of high-density plasmoids by adding a small amount of impurities to the cryogenic solid pellet. The developed ablation model was implemented in the disruption integrated code INDEX and applied to the analysis of tokamak experiments, elucidating the deterioration in the fueling efficiency of pure hydrogen SPI in DIII-D, and constituting the simulation database for optimizing the SPI system in ITER.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：核融合プラズマ ITER ディスラプション ペレット入射 粉碎 MHD 逃走電子

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究背景

トーラス形状のプラズマに内部電流を流すトカマク方式は高い閉じ込め性能が実証され、自己点火を見通すための研究開発が進んでいる。エネルギー増倍率 **10** を満たす **ITER** では、熱と磁場をあわせ、**700MJ** もの蓄積エネルギーを持つ炉心プラズマを扱う。しかし、この実験は未踏の領域であり、一定数の放電は「ディスラプション」と呼ばれる不安定状態に至り、放電が終端すると想定されている。

ディスラプションでは蓄積エネルギーが急速に開放され、熱や電磁力が本体や炉内機器への負荷を生じる。そのため、**ITER** では制御が難しくなった不安定な放電に対し、水素とネオンの混合固体ペレットを入射し、プラズマを低エネルギーの線輻射に変換して強制的に消滅させる「ディスラプション緩和」を行う。緩和のないディスラプションでは熱流束は壁の一部に集中するが、輻射に変換することでエネルギーを壁全体で均等に受けるようにし、熱負荷の影響を抑えることができる。また、ネオンの入射量で内部電流の遮断時間を調整し、電磁力を抑制することもできる。

コミュニティではこのためのシステムを「ディスラプション緩和システム (**DMS: Disruption Mitigation System**)」と呼んでいる。**ITER** では、具体的な技術として、従来、炉心プラズマへの燃料供給に用いられてきた固体ペレット入射法を改良し、大量の物質をプラズマとの相互作用面積を最大化して入射する「ペレット粉碎入射」(以下、**SPI** という。)を採用することを決定している。

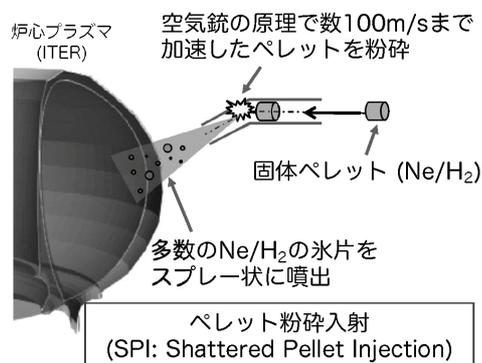


図 1. ディスラプション緩和システム

(2) 研究の着想

SPI の性能評価と改良は **ITER** に向けた最重要の **R&D** 課題の一つとされ、**JET**(欧州)などで模擬実験が行われてきたが、その進展は十分ではない。**ITER** においてプラズマ強制消滅を自在に操るためには、固体ペレットが高温プラズマ中で溶発する特性を理解する必要があり、入射されたペレットの溶発量と空間分布を正確に測定できることが望まれる。しかし、トカマク実験では、ネオンのような輻射の強い物質のペレットを入射すると内部電流分布への擾乱が生じ、電磁流体不安定性が発生する。この不安定性が作る流れにより、装置スケールの粒子混合が起こり、その結果、個々のペレットからの局所的な発光は覆い隠されてしまう。

このように、トカマク装置による模擬実験は **SPI** に関して様々な知見をもたらすものの、ペレットの溶発に関して断片的な情報しか得られず、実験結果を定量的に解釈し、**ITER** の装置設計や性能予測に繋げることが難しい。そこで本研究は問題の核心を「**ITER** のディスラプション緩和に使用される固体ペレットの溶発特性を定量的に評価できる実験」にしばり、粒子混合を生じる電磁流体不安定性の原因そのものを取り除くことのできる実験として、内部電流のないヘリカル方式に基づく大型ヘリカル装置 (**LHD: Large Helical Device**)の活用を考案した。

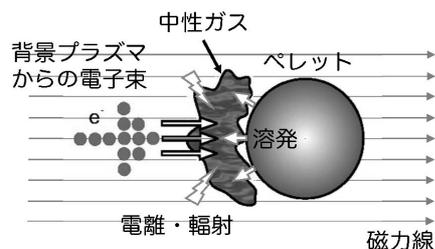


図 2. ペレット溶発の模式図

2. 研究の目的

本研究では核融合科学研究所の **LHD** 装置において、**ITER** のディスラプション緩和に用いられるネオン単体および水素・ネオン混合ペレットを入射する実験を行った。これにより、不安定性のない静かな放電で固体とプラズマの相互作用を観測し、詳細なモデルとの比較を実現することが目的である。実験との比較により溶発に関する基本プロセスのモデルを改良し、トカマク実験データと比較することで水素・ネオン混合ペレット入射による強制消滅のトリガーを物理的に理解し、**ITER** のディスラプション緩和の目標性能を達成するために必要な、固体の組成や破片サイズ、入射速度の最適なパラメータを探索する。本研究ではこのための統合シミュレーションの開発も並行してすすめ、**ITER** およびトカマク型核融合炉の重要課題の解決につながる研究を展開した。

3. 研究の方法

LHD でネオン単体、水素単体、および水素・ネオン混合ペレット入射の実験を **2019** 年、**2021**

年、**2022**年、**2024**年の**4**サイクルにわたって実施した。特に、水素・ネオン混合ペレット入射の詳細観測は世界初の試みであり、**10%**、**5%**、**1%**と異なる混合比のペレットを入射しデータを取得した。**LHD**における溶発計測を補強するため、現象に対して十分な時間分解能を有する高速カメラを購入し、**LHD**で整備するとともに、高時間分解能のトムソン散乱(**TS**)計測や荷電交換再結合分光(**CXRS**)計測などの新しい計測データの取得も行った。実験にあたっては加熱条件(**ECH,NBI**)や背景密度を変えた丁寧なスキャンを行い、溶発特性の理解を深めた。

LHD実験で理解された溶発現象の理解をもとに、水素・ネオン混合固体に関する溶発モデルを構築し、これを**ITER**のディスラプション緩和装置の特性解析および世界各国で行われている模擬実験の解析に適用した。ここで用いられたディスラプション統合コード**INDEX**は若手研究(**B**)「大量不純物入射による逃走電子緩和の統合数値実験」(**17K14904**)で開発されたものである。**INDEX**コードによるシミュレーションにより、現在、**ITER**に向けて検討されているさまざまな**SPI**入射スキームを総合的に比較するとともに、**ITER**後の原型炉におけるディスラプション緩和の必要性や要求仕様に関する分析を行なった。

ペレット粉碎入射は技術上、粉碎された固体の一部はガスとなって、加速ガスと混合し、プラズマに到達することから、**JT-60U**ネオンガスパフ実験および**JT-60SA**で準備されている大量ガス入射実験と共通項を有する。このことから両装置の解析に**INDEX**のシミュレーションを適用し、電流減衰特性を中心とする物理特性の解析も行なった。また、ペレット溶発雲の理解には分光学的知見が重要であるため、東北大学の直線型装置**DT-ALPHA**で行われている分子活性化再結合実験を参考に、ガス入射時の水素分子・原子の輻射衝突モデルの検討も進めた。

4. 研究成果

(1) 水素・ネオン混合ペレット溶発モデル構築と**LHD**におけるペレット入射実験

まず、研究の出発点として、水素・ネオン混合ペレット溶発に関する中性ガス・プラズマ遮蔽(**NGPS:Neutral Gas and Plasma Shielding**)モデルを構築した[1]。**2019**年に取得されたネオン単体ペレット入射の実験データとの比較を進め、ネオンペレット溶発雲の磁力線方向の膨張速度が水素ペレット溶発雲に比べて有意に遅く、**NGPS**モデルから予測される傾向に一致すること、及び溶発率に関して、**LHD**の**NBI**放電では高エネルギーイオンの影響が無視できないことを確認した[2]。そこで以降の実験においては**ECH**プラズマを活用し、高速イオンの影響を切り分けて溶発モデルとの比較を進めることを研究の方針とした。

2021年と**2022**年の実験キャンペーンにおいて水素・ネオン混合固体の入射実験を行い、ネオン混合比を**10%**、**5%**、**1%**と系統的に変化させたデータを取得した。その結果、**5%**程度のネオンを混合した場合に、水素単体の入射に比べて磁場交差方向の**ExB**ドリフト輸送の指標である溶発発光分布からの密度上昇分布のシフトが大幅に低減することを発見した。**2022**年に実施した実験の解析では、**1%**の濃度の混合ペレット入射では**5%**に比べ、シフトが増加することも明らかになっており、ネオン混合によってプラズモイドの温度と圧力が低下し、**ExB**ドリフトが減少することを示しており、本研究で構築した**NGPS**モデルの傾向と一致する。以上の実験解析および理論解釈の研究成果は、プラズモイド輸送がペレットへの微量の不純物の添加で制御できることを世界で初めて解明したものとして評価され、主要な結果は**Physical Review Letters**誌に掲載された[3]。

他にも**LHD**をペレット溶発研究のプラットフォームとして活用し、高温**ECH**プラズマでの特異な溶発発光、磁気プローブ信号のペレット侵入長に対する非単調な依存性、外部共鳴摂動磁場を用いた磁気島中の溶発発光の観測など、新しい観測データも取得された。これらの萌芽的な結果は、ペレット溶発雲の磁力線方向密度分布を考慮したモデルの構築や水素とネオンが分離した多流体効果を取り込んだモデルなどの理論モデル研究を展開する契機になるものと期待される。

(2) **ITER** ディスラプション緩和装置の最適化に関する研究

ITERシミュレーションに関しては欧州の**3**次元**MHD**シミュレーションコードの**JOEUK**との比較によってコード間のモデルを定量的に検証した[4]。また、**DIID-D**、**KSTAR**、**ASDEX-U**など世界各国の実験データとの比較により、物理モデルの妥当性検証も行なった。特に**DIID-D**装置の解析では水素単体の粉碎ペレット入射に対し、**ExB**ドリフト損失により粒子供給効率

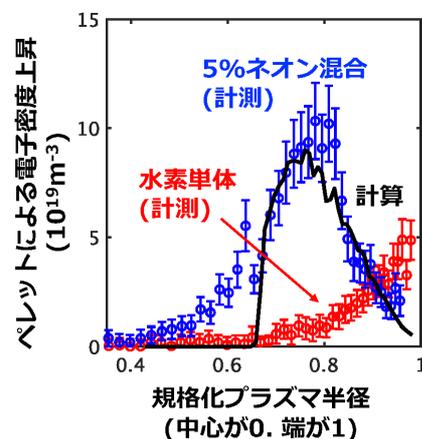


図3. 水素・ネオン混合ペレット(青)と水素単体ペレット(赤)で溶発直後の密度分布の比較に成功し、モデル(黒線)を検証[3]。

が10%程度にとどまることを初めて示した[5]。

ITERでは水素ペレットとネオン混合ペレットを2段階で入射する段違い(staggered)入射とネオン混合ペレット1発のみを入射する1段入射の比較が検討されてきた。本研究は、これに対し、1段入射では水素ペレット溶発時のプラズモイドドリフトが粒子供給効率の大幅な劣化をもたらすことを明らかにするとともにわずかなネオンの添加がこれを抑えるという物理的な知見も解明した。水素単体ペレット入射は放射崩壊を起こさず、逃走電子発生を抑制するための密度最大化を達成する点で効果的であるのに対し、ネオンはプラズモイドのドリフトを抑制するものの早い放射崩壊を引き起こす。したがって、ITERのディスラプション緩和は両者のトレードオフを考慮した最適なペレットサイズと混合比を準備する必要がある。そのことからITERのディスラプション緩和システムに対して、入射速度、破片サイズなどに対するディスラプション緩和特性の依存性をINDEXコードによって調べ、最適な入射条件を検討した。その結果、これまで準備されてきた直径28.5mmの標準サイズペレットに加え、1/2もしくは1/4の小サイズペレットの準備の有効性を明らかにした。これらの研究結果は2024年3月に行われたディスラプション緩和装置の最終設計レビューにおいても引用されるなどITER計画に対する重要な貢献をなす成果として高く評価された。

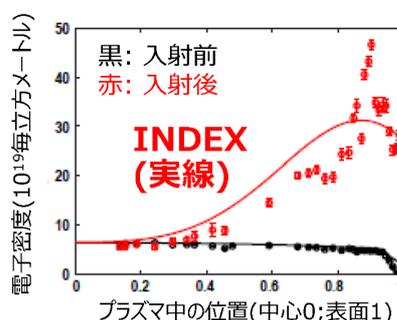


図4. 水素単体ペレットの粉碎入射実験に対する入射直後の電子密度分布をINDEXコードで再現することに成功。

(3) JT-60U および JT-60SA のディスラプション緩和実験に関する研究

JT-60SA に関しては実験チームの協力により、統合コミッショニングおよび装置増強後のデータをINDEXコードに実装し、応用を進めた。

統合コミッショニングに関しては、実験初期に有用な解析としてINDEXコードのために整備された物理モジュールをプラズマ着火および立ち上げ時のパワーバランス解析用に再構成した統合コードINDEX-Sを適用した。INDEX-Sコードを用いてプレフィルガスの圧力や不純物濃度、印加電圧に対する放電立ち上げ特性を詳細に調査し、正常な立ち上げを阻害する逃走電子の発生条件を明らかにするなど[6]、ファーストプラズマ実験を支援した。また、装置増強後の実験に向けては安定化板の効果を検討したプラズマ電流減衰モデルを構築するとともに、ディスラプション緩和のために入射する不純物種と量に対する電流減衰時間の依存性を予測する解析を行った[7]。

JT-60U に関してはネオンガスパフ実験、高ベータ実験や高ブートストラップ割合実験など2000年以降の複数の実験シリーズに対するディスラプションの実験データ解析を行い、INDEXコードによるシミュレーションとの比較から不純物入射分布に応じてプラズマが中心領域まで熱的に不安定になるか否かによって、電流減衰の特性、特に内部インダクタンスの時間変化が顕著な影響を受けることを明らかにした。

(4) 核融合原型炉に関するシミュレーション研究

核融合原型炉に関して、INDEXコードに日本(JA DEMO)及び欧州(EU DEMO)の原型炉データを実装するとともに、欧州設計チームが行なったディスラプション時の垂直移動現象(VDE: Vertical Displacement Event)に関し、INDEXコードとの比較を行い、コードおよびモデルの妥当性を検証した。この比較では欧州原型炉の真空容器構造(メンテナンスや計測のためのポート)の構造を反映した3次元渦電流解析のデータをINDEXコードに取り込む技術的な開発も行なった。JA DEMO に対してはディスラプション緩和の鍵となるMeVオーダーの逃走電子の特性に関し、ガンマ線のコンプトン散乱で生じる種電子が近接衝突効果によって増幅する結果、総電流の1/2にもおよぶ大電流の逃走電子ビームが生じるシナリオをはじめINDEXコードでシミュレーションした[8]。この研究では、JA DEMO や EU DEMO で設計が進んでいる保護リミターの3次元形状を取り込み、高エネルギー電子の衝突を評価するためのコード開発も行っている。

(3) 研究成果の公開と活用

本研究で開発されたペレット溶発やディスラプションに関連するコードは、マニュアルやドキュメントを整備し、研究機関、大学や高専の共同研究者に公開し、**ITER** や **JT-60SA** をはじめ、世界各国のディスラプション緩和装置の設計や実験解析への応用を進めた。成果の公開としてはディスラプションに関する解説記事[9]を執筆するとともに、**Physical Review Letters** 誌への掲載[3]については社会への成果普及のための活動として、**ITER** における効果的なディスラプション緩和を行う鍵となるメカニズムを発見した成果として核融合科学研究所と量子科学技術研究開発機構の共同プレスリリースを行った。

<引用文献>

- [1] A. Matsuyama, **Phys. Plasmas** **29**, 042501 (2022).
- [2] A. Matsuyama, **Plasma Fusion Res.** **17**, 2402017 (2022).
- [3] A. Matsuyama, et al., **Phys. Rev. Lett.** **129**, 255001 (2022).
- [4] A. Matsuyama, et al., **Plasma Phys. Control. Fusion** **64**, 105018 (2022).
- [5] A. Lvovskiy, A. Matsuyama, et al., **Nucl. Fusion** **64**, 016002 (2024).
- [6] A. Matsuyama, et al., **Nucl. Fusion** **63**, 026001 (2023).
- [7] T. Yokoyama, A. Matsuyama, et al., **Nucl. Fusion** **63**, 126049 (2023).
- [8] Y. Yamamoto, A. Matsuyama, et al., **Plasma Fusion Res.** **18**, 1203064 (2023).
- [9] 松山顕之「『地上の太陽』を制御する – 突発現象(ディスラプション)のシミュレーション」
日本シミュレーション学会誌 **41**, 205 (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Takahashi H., Seino T., Nishimura R., Yoshimura K., Kanno A., Hara T., Takahashi Y., Kagaya S., Matsuyama A., Hayashi Y., Tobita K.	4. 巻 30
2. 論文標題 Impact of selective ion transmission on measurement by retarding field analyzer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 53506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0144798	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 YAMAMOTO Yasuhiro, MATSUYAMA Akinobu, SOMEYA Youji, CHEN Weixi, MIYAMOTO Seiji, SHIBATA Yoshihide	4. 巻 18
2. 論文標題 Integrated Modeling of Runaway Electron Beam Formation in JA DEMO Post-Disruption Plasmas	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1203064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.1203064	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 Yokoyama T., Matsuyama A., Yamamoto Y., Miyamoto S., Shibata Y., Inoue S., Kojima S., Nakamura S., Wakatsuki T., Yoshida M.	4. 巻 63
2. 論文標題 Characterization of early current quench time during massive impurity injection in JT-60SA	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ad0507	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 Lvovskiy A., Matsuyama A., O'Gorman T., Shiraki D., Herfindal J.L., Hollmann E.M., Marini C., Boivin R., Eidietis N.W., Lehnen M.	4. 巻 64
2. 論文標題 Density and temperature profiles after low-Z and high-Z shattered pellet injections on DIII-D	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 16002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ad0905	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 Nishimura Ryota, Seino Tomohiro, Yoshimura Keigo, Takahashi Hiroyuki, Matsuyama Akinobu, Hoshino Kazuo, Oishi Tetsutarou, Tobita Kenji	4. 巻 7
2. 論文標題 Spatial Distribution Analyses of Axially Long Plasmas under a Multi-Cusp Magnetic Field Using a Kinetic Particle Simulation Code KEIO-MARC	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma	6. 最初と最後の頁 64 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/plasma7010005	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 Goto Motoshi, Motojima Gen, Sakamoto Ryuichi, Pegourie Bernard, Matsuyama Akinobu, Oishi Tetsutarou, Kawate Tomoko, Kawamoto Yasuko	4. 巻 12
2. 論文標題 Better Understanding of Hydrogen Pellet Ablation Cloud Spectra through the Occupation Probability Formalism in LHD	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms12010001	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 Pegourie B., Geulin E., Goto M., Matsuyama A., Motojima G., Sakamoto R.	4. 巻 64
2. 論文標題 Structure of pellet cloud emission and relation with the local ablation rate	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 56026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ad326c	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 Panadero N., Koechl F., Polevoi A.R., Baldzuhn J., Beidler C.D., Lang P.T., Loarte A., Matsuyama A., McCarthy K.J., Pegourie B., Turkin Y.	4. 巻 63
2. 論文標題 A comparison of the influence of plasmoid-drift mechanisms on plasma fuelling by cryogenic pellets in ITER and Wendelstein 7-X	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 046022(1 ~ 26)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/acbc34	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 Matsuyama A., Wakatsuki T., Inoue S., Yamamoto Y., Yoshida M., Urano H.	4. 巻 63
2. 論文標題 Modelling of ohmic startup and runaway electron formation in support of JT-60SA initial operation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 026001(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/aca77a	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 Matsuyama A., Sakamoto R., Yasuhara R., Funaba H., Uehara H., Yamada I., Kawate T., Goto M.	4. 巻 129
2. 論文標題 Enhanced Material Assimilation in a Toroidal Plasma Using Mixed H2+Ne Pellet Injection and Implications to ITER	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 255001(1~6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.129.255001	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 Matsuyama A, Hu D, Lehnen M, Nardon E, Artola J	4. 巻 64
2. 論文標題 Transport simulations of pre-thermal quench shattered pellet injection in ITER: code verification and assessment of key trends	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 105018(1~13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac89b2	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 YOSHIMURA Keigo, TAKAHASHI Hiroyuki, SEINO Tomohiro, KUSABIRAKI Kaoru, SAKATA Yuki, NISHIMURA Ryota, MATSUYAMA Akinobu, TOBITA Kenji	4. 巻 17
2. 論文標題 Observation of Electron Density Rollover in Hydrogen Plasma Produced with DT-ALPHA Device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201082(1~3)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1201082	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 松山顕之	4. 巻 41
2. 論文標題 「地上の太陽」を制御する - 突発現象(ディスラプション)のシミュレーション	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会誌	6. 最初と最後の頁 205-211
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 Akinobu Matsuyama	4. 巻 29
2. 論文標題 Neutral gas and plasma shielding (NGPS) model and cross-field motion of ablated material for hydrogen-neon mixed pellet injection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 042501 ~ 042501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0084586	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 Akinobu Matsuyama, Ryuichi Sakamoto	4. 巻 17
2. 論文標題 Results of ITER DMS Pellet Material (Neon) Injection into Large Helical Device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402017:1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.2402017	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 E. Nardon, A. Matsuyama, D. Hu, F. Wieschollek	4. 巻 62
2. 論文標題 Post-thermal-quench shattered pellet injection for runaway electron seed depletion in ITER	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 026003:1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac3ac6	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

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Akinobu Matsuyama
2. 発表標題 Mixed hydrogen-neon pellet injection in toroidal plasmas - theory and observation
3. 学会等名 7th Annual Conference of AAPPs-DPP (AAPPs-DPP2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松山顕之
2. 発表標題 固体水素ペレットと環状磁化プラズマの相互作用の物理
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松山顕之、横山達也
2. 発表標題 トカマクディスラプションに伴う電流減衰中のエネルギーバランスの数値解析
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松山顕之
2. 発表標題 ITER ディスラプション緩和装置開発に向けたプラズマ物理研究の進展
3. 学会等名 第 39 回プラズマ・核融合学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akinobu Matsuyama
2. 発表標題 Cryogenic Pellet Ablation Physics and Integrated Modelling of Shattered Pellet Injection
3. 学会等名 2nd IAEA Technical Meeting on Plasma Disruptions and their Mitigation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akinobu Matsuyama
2. 発表標題 Ablation and assimilation of massively injected cryogenic pellets in tokamak plasmas
3. 学会等名 AAPPs-DPP2021 (5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>世界最大の核融合実験炉に必要とされるプラズマ冷却技術の研究が進展(QSTプレスリリース) https://www.qst.go.jp/site/press/20221223.html 世界最大の核融合実験炉に必要とされるプラズマ冷却技術の研究が進展(NIFSプレスリリース) https://www.nifs.ac.jp/news/collobo/221223.html</p>
--

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	坂本 隆一 (Sakamoto Ryuichi) (10290917)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	

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
研究分担者	柴田 欣秀 (Shibata Yoshihide) (20633209)	岐阜工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (53701)	
研究分担者	高橋 宏幸 (Hiroyuki Takahashi) (30768982)	東北大学・工学研究科・講師 (11301)	

	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	横山 達也 (Yokoyama Tatsuya)		
研究協力者	山本 泰弘 (Yamamoto Yasuhiro)		

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			
フランス	ITER機構	CEA		
米国	General Atomics			
ドイツ	マックスプランクプラズマ物理 研究所			