

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01368

研究課題名（和文）核融合プラズマ中の燃料粒子分布の多様性と循環の理解

研究課題名（英文）Understanding of profile diversity and circulation of fuel particles in fusion plasmas

研究代表者

山田 弘司（Yamada, Hiroshi）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：20200735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は制御熱核融合において水素同位体燃料およびヘリウム灰の混合がもたらす粒子分布を理解すること、これをもとに発電実証を行う核融合原型炉における燃料循環のシナリオを提案することを目的とした。実験において、水素と重水素イオン個別の密度空間分布計測によって議論を進めた。固体水素入射による燃料供給効率が水素同位体の質量が大きくなると劣化すること、水素同位体の混合特性が支配的な微視的不安定性の特徴波長とともに変化することを明らかとした。実験研究と並行して燃料循環のシステムダイナミクス解析手法によって重水素のみによる立ち上げシナリオを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合エネルギーは脱炭素社会に向けたゲームチェンジャーとして期待されている。この実現には燃料水素同位体を、1億度を超える「プラズマ」として保持しなければならない。磁場によって超高温プラズマを閉じ込める研究は核燃焼の実現まで進んでいるものの、燃料水素同位体およびヘリウム灰が炉心プラズマ中で混合し、どのような分布になるかの理解は効率よい燃焼制御に必須であるが進んでいない。本研究によって異なる質量を持つ水素同位体の分布や粒子輸送の特性について得られた重要な知見は、その物理機構の解明および原型炉における燃料循環を構想する裏付けに貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：This project aims at understanding of particle profiles due mixture of hydrogen isotope fuel and helium ash, and proposal of fuel cycle scenarios in a demonstration fusion reactor. In experiments, physical properties were explored based on individual profile measurement of hydrogen and deuterium ions. Consequently, it was identified that fueling efficiency due to solid hydrogen isotope injection is degraded with isotope mass and mixing characteristics of hydrogen isotopes change with typical wave length of predominant micro-instability. In parallel with the experimental study, the reactor operational scenario of start-up with deuterium alone was proposed by the system dynamics study of fuel cycle.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合エネルギー 水素同位体 重水素 粒子輸送 密度分布 原型炉

1. 研究開始当初の背景

磁場によって閉じ込められた核融合プラズマ中に生じる乱流が司る輸送についての理解が進み、ジャイロボームモデルという仮説が確立されつつあった。支配的なイオンが単一種のプラズマの温度や密度、磁場強度等への依存性はこのモデルによる予測と良い一致を示す(例えば、当該研究代表者らによる燃料水素を冷凍固化した小粒(ペレット)による燃料供給に対する応答[1]やスケーリング則[2])。一方、異なる水素同位体(水素/重水素)間の比較ではイオン質量依存性に対して、このモデルへの明確な反証が認められてきた。すなわち、同一の水素同位体に限れば高い予測精度を発揮するモデルが異なる同位体間の比較では明らかに矛盾し、これは核融合プラズマ物理研究の40年来の謎となっていた。さらに、微量の異種イオンがプラズマ全体に劇的な変化をもたらす観測もあり、核融合プラズマの制御は燃料水素同位体のみならずヘリウム灰や異種イオンの協働をもたらす多様性の発現の理解抜きには確立しえない。ここで「多様性」は単に乱雑を意味するものではなく、ある選択のもとに秩序が構成されることを意味する。

燃料水素ペレットの入射技術とこれを活かした物理研究では、当該研究代表者らは着実な実績をあげてきた[3-5]。核融合を見通す性能を持つ大型ヘリカル装置(LHD)において重水素の利用が可能となり、水素と重水素の比較による輸送に関する作業仮説をはじめとした物理モデルを世界最高レベルの緻密な計測と燃料調整によって検証できる実験プラットフォームとして環境が整ってきた。また、閉じ込め磁場配位の違いを比較できる対象として、マックスプランクプラズマ物理研究所(独)のW7-X装置が稼働し始め、これまでの協力関係を基盤に比較・応用実験を進めることが見込まれた。また、国際熱核融合実験炉(ITER)や核融合原型炉においては燃焼率が数%に留まるとされており、燃料循環システムの成立性を担保するためには燃焼率の正確な予測が求められる。燃料粒子および灰の輸送すなわち分布の決定機構の解明が極めて重要であることは、研究代表者らによっても指摘されていた[1,6,7]。

さらに将来の発電実証を行う原型炉においては、重水素と三重水素の混合燃料とヘリウム灰という3種のイオンが混在する体系となる。このうち、三重水素は原型炉内で生産・増殖する必要があり、核融合燃焼と増殖ブランケットなどのプラント構成機器を合わせたシステム中の、その循環は原型炉運転の鍵である。実験研究と並行し、この三重水素燃料循環のシステムダイナミクス研究を進めることがニーズとシーズの相乗につながると考えられた。

2. 研究の目的

本研究は制御熱核融合エネルギーの実現に向けて、核燃焼条件を満足する炉心プラズマ性能を決定する熱粒子輸送の理解に資することを目指したものである。燃焼温度に達するまでの断熱性能、言い換えれば熱輸送については相当程度に理解が進んでいるものの、燃料となる水素同位体イオン(原子核)の密度分布、粒子輸送については理解が立ち遅れている。これはイオン種別の密度分布計測法が確立していないことと、粒子源の制御および同定が熱源よりも困難なことによる。しかしながら、特に効率的な定常燃焼を考える場合、燃料イオンの分布制御が重要であることは言うまでもない。このため、本研究では燃料となる水素同位体(将来のITERおよび原型炉では実燃料となる重水素と三重水素であるが、現在できる研究としてはこれを水素と重水素に置き換える)、灰であるヘリウムおよび不純物の混合をもたらす粒子分布の多様性の起源を理解することおよび原型炉における燃焼率の最大化を指標として燃料循環の最適化シナリオを提案することを目的とした。

磁場閉じ込めプラズマにおいて水素および重水素イオンの粒子輸送特性の異同を熱輸送特性と合わせて評価し、同定することが必要である。このため、LHDをプラットフォームとして、水素と重水素の固体水素ペレットの同時入射システムをこれまでの開発技術[8]の上に構築すること、荷電交換分光[9]の応用によって、水素・重水素・ヘリウム等の異種イオン毎に個別の粒子密度分布計測を可能とすることを基幹要素開発の目標とした。これらを組み合わせた実験とその解析、さらに理論シミュレーションとの比較[10]を合わせて、目的の達成を目指した。

また、システムダイナミクス研究では、特に三重水素が天然資源として存在せず、原型炉への初期装荷に懸念があることから、重水素のみから原型炉運転立ち上げ[11]に注目して、その可能性と条件を問うことを目標とした。

3. 研究の方法

まず、本研究の基盤となる、固体水素ペレット入射システム、水素同位体密度分布計測、異種イオン密度分布計測、乱流揺動計測の整備を行い、LHDにおいて水素同位体ペレットや不純物入射によって異種イオン混合の異なる条件で形成された分布構造について、上記計測を中心とした緻密なデータベースを集積する。

これまで培った固体水素ペレット入射システムに関する技術に基づき、重水素の物性にも適合したシステムを既存の装置に組み込む。軽水素と重水素のペレット個別生成を確認し、世界で初めてとなる異なる水素同位体ペレットの同時入射可能なシステムを構築する。さらに、不純物原子の添加についての研究開発を進める。

荷電交換分光では炭素の回転速度測定 of 技術を応用し、ドップラー効果がゼロとなる視線で精度よく中心波長を計測することによって水素と重水素を分離測定できる。このゼロドップラー視線光学系を既存のシステムに組み込み、荷電交換分光をヘリウムやそのほかの不純物イオンの密度計測に応用し、水素燃料とヘリウムおよび不純物の密度分布の同時計測を可能とするシステムを構築する。中性原子を含めた周辺プラズマではこの荷電交換分光に既設の 2 次元可視分光システムと合わせて相補的に利用できるものとする。

LHD において、磁場配位、温度、密度、イオン構成などを変化させ、多様で広範な物理データベースを構築し、イオン密度分布と粒子輸送を中心とした解析を行い、その特徴抽出、統計的傾向の同定を進める。得られた知見をモデル化し、理論シミュレーションとの比較および海外の W7-X との比較実験を検討する。

原型炉を想定したパラメータを用いて、核融合燃焼と三重水素の生産と循環を合わせたシステムダイナミクス計算を可能とするモデル化を行う。実験で得られた知見および装置工学的知見を反映させたシミュレーションにより、燃焼率・燃料循環の予測を行い、実験の動機付けへのフィードバックや原型炉設計への貢献を図る。

4. 研究成果

実験の基幹要素であるペレット入射装置および荷電交換分光計測は計画通りに整備することができた。バルク荷電交換分光システムによって大型ヘリカル装置(LHD)にて水素と重水素イオンの密度を個別に空間分布として計測することが可能となり、様々な混合条件において、その特性を調べた。

固化水素ペレット入射による粒子密度変化の過渡応答から、ペレットおよびターゲットプラズマのいずれについても水素同位体の粒子閉じ込め時間は質量が大きくなると短くなることを明らかとした。さらにこの違いは密度勾配による拡散ではなく、外向きの対流速度の違いによることが示唆された。ガスパフによる水素同位体注入からも周辺部分において、同様の傾向が認められた。これらの発見は熱輸送においては質量による差異が認められないことと対照的である。また、水素と重水素の混合による分布の均一化が微視的不安定性の中でも比較的長波長のモード(理論と実験との対比によりイオン温度勾配モードと同定)が不安定になる状況で発生しやすく、比較的短波長のモード(同様に、捕捉電子モード)が不安定になる状況では、水素および重水素の粒子源の違いによって異なった分布形状を持つ混合状態が保持されることが見いだされた。これらの実験結果は複数イオン種からなるプラズマの構成粒子分布を決定する物理機構の因果関係を解明のための問題を提示するものとなっており、将来の ITER および原型炉運転においては、炉心プラズマ中の重水素と三重水素の供給・発生位置が異なることから燃料混合制御に考慮されるべき知見を提供している。

実験研究と並行して、フローとストックの概念からなるシステムダイナミクス解析手法によって、燃料トリチウム循環のシミュレーションを進め、特に重水素のみによる立ち上げシナリオの可能性について、炉心プラズマのみならず、ブランケットや排気などの粒子制御構成機器の性能の影響を含めて評価した。現在想定されている原型炉の仕様パラメータでは 60 日程度で重水素のみから定常的な重水素・三重水素燃焼運転に到達できること、炉内で利用可能な三重水素量を十分に確保するためには、排気された重水素・三重水素の混合ガスを一定割合でヘリウム灰のみを除去して、直接炉内へ再供給するダイレクト・リサイクリング運転が求められることを裏付けた他、ヘリウム灰や炉内機器性能の影響について定量的な評価を示した。

以上の研究成果は、別途、学術論文、国内学会発表、国際学会発表のリストにまとめられている。

概ね、当初の計画の目標を達成することができたと考えられるが、より包括的な理解のための異なる磁場配位との比較という観点から成果を見込んでいた国際協力による W7-X 実験は新型コロナウイルス禍のために予備検討に留まった。しかしながら、今後、LHD を用いた実験で整理された物理的論点および計測・装置技術開発を元に、集中的かつ効率的な比較実験が期待される。

- [1] R. Sakamoto and H. Yamada, "Prospects for self-burning operation in Heliotron-type fusion Reactor", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.44, pp.2915-2922, 2016
- [2] H. Yamada et al., "Characterization of Energy Confinement in Net-Current Free Plasmas Using the Extended International Stellarator Database" Nuclear Fusion Vol.45, pp.1684-1693, 2005.
- [3] 基盤研究 (A)(展開研究) 平成 13-16 年度「核融合プラズマ燃料供給のための固体水素ペレット生成射出装置の高耐久化」研究代表者 山田弘司
- [4] 基盤研究(A)(一般)平成 17-19 年度「高温プラズマの閉じ込め改善と定常性に協働する燃料注入制御法の開発」研究代表者 山田弘司
- [5] 基盤研究(S) 平成 20-24 年度「革新的な核融合炉点火領域を目指した超高密度プラズマの生成と制御」研究代表者 山田弘司
- [6] R.Sakamoto, J.Miyazawa, H.Yamada et al., "Pellet fueling requirements to allow self-burning on a helical-type fusion reactor", Nuclear Fusion, Vol.52, 083006, 2012.
- [7] R.Sakamoto and H.Yamada, "Fueling requirements of super-high-density plasmas towards innovative ignition regime" Fusion Engineering and Design, Vol.89, pp.812-817, 2014.
- [8] R.Sakamoto, G.Motojima et al., "Twenty barrel in-situ pipe gun type solid hydrogen pellet injector for

- the large helical device*” Review of Scientific Instruments, Vol.84, 083504, 2013.
- [9] M.Yoshinuma, K.Ida et al., “*Charge-exchange spectroscopy with pitch-controlled double-slit fiber bundle on LHD*” Fusion Science and Technology, Vol.58, pp.375-382, 2010.
- [10] M.Nunami, M.Nakata et al., “*Anomalous and Neoclassical Transport of Hydrogen Isotope and Impurity Ions in LHD Plasmas*”, reprint(TH/P2-3) in the 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, 2016.
- [11] R.Kasada et al., “*A system dynamics model for stock and flow of tritium in fusion power plant*”, Fusion Engineering and Design, Vol.98-99, pp.1804-1807, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Ida, R. Sakamoto, M. Yoshinuma, K. Yamazaki, T. Kobayashi, Y. Fujiwara, C. Suzuki, K. Fuji, J. Chen, I. Murakami, M. Emoto, R. Mackenbach, H. Yamada et al.	4. 巻 59
2. 論文標題 The isotope effect on impurities and bulk ion particle transport 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 56029
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ab0e41	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. Yamada, K. Tanaka, R. Seki, C. Suzuki, K. Ida, K. Fujii, M. Goto, S. Murakami, M. Osakabe, T. Tokuzawa, M. Yokoyama, M. Yoshinuma	4. 巻 123
2. 論文標題 Isotope effect on energy confinement time and thermal transport in neutral-beam-heated stellarator-heliotron plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 185001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.123.185001	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 H. YAMADA, K. TANAKA, R. SEKI, C. SUZUKI, K. IDA, K. FUJII, M. GOTO, S. MURAKAMI, M. OSAKABE, T. TOKUZAWA, M. YOKOYAMA, M. YOSHINUMA	4. 巻 IAEA-CN-258
2. 論文標題 CHARACTERIZATION OF ISOTOPE EFFECT ON CONFINEMENT OF DIMENSIONALLY SIMILAR NBI-HEATED PLASMAS IN LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 in 27th IAEA Fusion Energy Conference, Gandhinagar, India	6. 最初と最後の頁 22-27
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 Kotaro YAMASAKI, Katsumi IDA, Mikirou YOSHINUMA, Tatsuya KOBAYASHI	4. 巻 13
2. 論文標題 Observation of the Spatial Profile of Deuterium/Hydrogen Ratio Using Bulk Charge Exchange Emission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.13.1202103	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 T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, M. Emoto, H. Nakanishi, S. Inagaki, K. Ida, H. Yamada, A. Ejiri, K. Y. Watanabe, K. Oguri, T. Akiyama, K. Tanaka, I. Yamada	4. 巻 89
2. 論文標題 Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 10H118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5035118	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 K. Ida, M. Yoshinuma, K. Yamasaki, T. Kobayashi, Y. Fujiwara, J. Chen, I. Murakami, S. Satake, Y. Yamamoto, S. Murakami, M. Kobayashi	4. 巻 90
2. 論文標題 Measurements of radial profile of hydrogen and deuterium density in isotope mixture plasmas using bulk charge exchange spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 93503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5097030	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 Katsumi IDA, Mikiro YOSHINUMA, Tatsuya KOBAYASHI, Yutaka FUJIWARA, Jun CHEN, Izumi MURAKAMI, Masashi KISAKI, Masaki OSAKAB	4. 巻 14
2. 論文標題 Verification of Carbon Density Profile Measurements with Charge Exchange Spectroscopy Using Hydrogen and Deuterium Neutral Beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Reserach	6. 最初と最後の頁 1402079
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1402079	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 K. Ida, M. Nakata, K. Tanaka, M. Yoshinuma, Y. Fujiwara, R. Sakamoto, G. Motojima, S. Masuzaki, T. Kobayashi, K. Yamasaki	4. 巻 124
2. 論文標題 Transition between Isotope-Mixing and Nonmixing States in Hydrogen-Deuterium Mixture Plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 25002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.025002	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 K. Ida, M. Yoshinuma, K. Tanaka, M. Nakata, T. Kobayashi, Y. Fujiwara, R. Sakamoto, G. Motojima, S. Masuzaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Characteristics of plasma parameters and turbulence in the isotope-mixing and the non-mixing states in hydrogen and deuterium mixture plasmas in the large helical device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 16012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/abbf62	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 Kentou Miyamae, H. Yamada, R. Kasada, S. Konishi, R. Sakamoto	4. 巻 160
2. 論文標題 Fuel flow and stock during deuterium-deuterium start-up of fusion reactor with advanced plasma model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2020.111794	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 M. Yoshinuma, K. Ida, K. Yamasaki, J. Chen, I. Murakami	4. 巻 92
2. 論文標題 Measurements of radial profile of isotope density ratio using bulk charge exchange spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 63509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043607	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 T. Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, T. Saito, K. Yamamoto	4. 巻 92
2. 論文標題 W-band millimeter-wave back-scattering system for high wavenumber turbulence measurements in LHD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 43536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043474	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 H. YAMADA, T. KOBAYASHI, K. TANAKA, T. TOKUZAWA, K. IDA, R. SEKI, C. SUZUKI, K. FUJII, M. GOTO, N. IMAGAWA, K. ITOH, S. MURAKAMI, M. OSAKABE, T. TSUJIMURA, R. YANAI, M. YOSHINUMA	4. 巻 IAEA-CN-286-0715
2. 論文標題 INVESTIGATION OF ISOTOPE EFFECT ON ENERGY CONFINEMENT TIME AND THERMAL TRANSPORT IN L-MODE PLASMAS ON LHD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 in the 28th IAEA Fusion Energy Conference, 2021	6. 最初と最後の頁 EX/P6-23
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 -

〔学会発表〕 計45件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 30件)

1. 発表者名 H. Yamada
2. 発表標題 Characterization of Isotope Effect on Confinement of NBI-Heated Plasmas on LHD
3. 学会等名 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田弘司
2. 発表標題 LHDにおけるNBI加熱プラズマのエネルギー閉じ込め時間 および熱輸送に見られる同位体効果について
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 宮前健人
2. 発表標題 核融合炉起動時の燃焼と水素同位体燃料循環に関する研究
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 K.Miyamae
2. 発表標題 Fuel Flow and Stock during Deuterium-Deuterium Start-up of Fusion Reactor
3. 学会等名 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Miyamae
2. 発表標題 Fuel Flow and Stock during Deuterium-Deuterium Start-up of Fusion Reactor
3. 学会等名 28th International Toki Confernce (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Imagawa
2. 発表標題 Particle transport analysis by pellet injection for characterization of isotope effect in LHD
3. 学会等名 28th International Toki Confernce (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今川直人
2. 発表標題 LHDにおける水素同位体プラズマの粒子輸送解析
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

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Observation of isotope separating and mixing states in isotope mixture plasmas in LHD
3. 学会等名 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa
2. 発表標題 Dual-Comb Microwave Doppler Reflectometer System in LHD and Feasibility Study for a JT-60SA Doppler Reflectometer
3. 学会等名 14th International Reflectometry Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa
2. 発表標題 Observation of turbulence response from attached to detached phases in LHD
3. 学会等名 27th ITPA meeting of TG SOL and divertor physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tokuzawa
2. 発表標題 Study of isotope effects from the viewpoint of turbulence observation in LHD
3. 学会等名 22nd International Stellarator & Heliotron Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳沢季彦
2. 発表標題 プラズマ乱流計測から見た水素同位体効果検証実験
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Tokuzawa
2. 発表標題 Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD
3. 学会等名 22nd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H.Yamada
2. 発表標題 Stellarator-Helotron Control
3. 学会等名 5th IAEA DEMO Program Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Tokuzawa
2. 発表標題 Turbulence rapid reduction in the stable detached LHD plasma with magnetic perturbation application
3. 学会等名 8th Asia-Pacific Transport Working Group (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田弘司
2. 発表標題 LHDにおける閉じ込めへの同位体効果についての無次元量からの考察
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yamada
2. 発表標題 Characterization of Isotope Effect on Confinement of NBI-Heated Plasmas on LHD
3. 学会等名 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tokuzawa
2. 発表標題 Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田弘司
2. 発表標題 LHDにおける輸送特性の次元相似性からの考察
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yamada
2. 発表標題 Characterization of Isotope Effect on Confinement of Dimensionally Similar NBI-Heated Plasmas in LHD
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tokuzawa
2. 発表標題 Rapid Radial Propagation of Momentum Change and Flow Oscillation Associated with the Pellet Injection
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Isotope effect on impurity and bulk ion particle transport in the Large Helical Device
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yamada
2. 発表標題 Exploration of Isotope Effects on Thermal and Particle Transport in Large Helical Device
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Tokuzawa
2. 発表標題 Observation of damped oscillating flow and momentum change associated with a pellet injection
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Miyamae
2. 発表標題 Remarks on DD start-up of a fusion reactor
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田弘司
2. 発表標題 LHDにおける閉じ込め・輸送特性の次元相似性からの考察
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳沢季彦
2. 発表標題 ミリ波後方散乱法によるLHDプラズマ微視的乱流揺動計測
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮前健人
2. 発表標題 Remarks on DD start-up of a fusion reactor
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H.Yamada
2. 発表標題 Isotope Effect in Energy Confinement Time Scaling and Thermal Transport on LHD
3. 学会等名 19th Coordinated Working Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Tokuzawa
2. 発表標題 Microwave comb reflectometry for micro turbulence measurements
3. 学会等名 18th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H.Yamada
2. 発表標題 Energy confinement and thermal transport properties of dimensionally similar NBI-heated plasmas with hydrogen and deuterium on LHD
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Tokuzawa
2. 発表標題 Fast radial propagation of momentum associated with the TESPEL injection
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H.Yamada
2. 発表標題 Remarks from Non-Dimensional Parameters on Energy Confinement and Thermal Transport in NBI-Heated Plasmas on LHD
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Tokuzawa
2. 発表標題 Rapid momentum propagation associated with the TESPEL injection
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H.Yamada
2. 発表標題 Confinement study of dimensionally similar NBI-heated plasmas on LHD
3. 学会等名 Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 弘司
2. 発表標題 LHDにおけるNBI加熱プラズマの閉じ込め・輸送特性の次元相似性からの考察
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳沢 季彦
2. 発表標題 LHDプラズマへのTESPEL入射時の速い運動量輸送現象の観測
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今川直人
2. 発表標題 LHDにおける密度分布および粒子閉じ込めへの同位体効果についての研究
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 N. Imagawa
2. 発表標題 Statistical Analysis on Particle Confinement of Hydrogenic Ions in Large Helical Device
3. 学会等名 62nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Imagawa
2. 発表標題 Investigation of isotope effect on particle confinement in Large Helical Device
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 T. Tokuzawa
2. 発表標題 Developments of Millimeter and Sub-Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Diagnostics
3. 学会等名 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tokuzawa
2. 発表標題 W-band millimeter-wave back-scattering system for high wave number turbulence measurements in LHD
3. 学会等名 23rd High-Temperature Plasma Diagnostics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Yamada
2. 発表標題 Multi-ion physics and isotope effects in helical devices
3. 学会等名 Virtual Mini-CWGM on Prospects for Stellarator Reactor (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamada
2. 発表標題 INVESTIGATION OF ISOTOPE EFFECT ON ENERGY CONFINEMENT TIME AND THERMAL TRANSPORT IN L MODE PLASMAS ON 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 山田弘司
2. 発表標題 核融合プラズマを取り巻く非平衡系の科学の展開
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
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
研究協力者	居田 克巳 (Ida Katsumi) (00184599)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	
研究協力者	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)	
連携研究者	徳沢 季彦 (Tokuzawa Tokihiko) (90311208)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (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
連携研究者	吉沼 幹朗 (Yoshinuma Mikiro) (20323058)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (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