

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：63902
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2017～2020
 課題番号：17K14899
 研究課題名（和文）第一原理の大域シミュレーションによる核燃焼プラズマの乱流輸送と分布形成の研究

 研究課題名（英文）First-principle-based global simulation studies on turbulent transport and profile formations in burning plasmas

 研究代表者
 仲田 資季（Nakata, Motoki）

 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

 研究者番号：40709440
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、核融合燃焼の定常維持において本質的となる多粒子種プラズマにおける乱流輸送・分布形成特性を解析することを目的とする。一連の研究から、(1)乱流輸送に対するイオン質量が与える影響（同位体効果）、(2)ゾーナルフロー生成に対する磁場構造依存性、(3)LHD実験における同位体混合プラズマに対する微視的不安定性解析、(4)トカマクプラズマに対する高精度縮約乱流輸送モデルの構築、(5)連成シミュレーションの高効率化などの新たな知見を含む成果が得られた。これらは、巨視的輸送方程式系と局所ジャイロ運動論方程式の連成計算モデルから成る連成大域乱流輸送コードの開発・拡張の基盤的な成果を成す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際熱核融合実験炉（ITER）において核燃焼プラズマを達成し、その後の原型炉で持続的な核融合出力を実現するためには、電子や燃料イオン（D:重水素、T:三重水素）の温度分布に加え、各々の燃料イオン密度やHe灰分布、不純物分布等を高い精度で計測しつつ分布/加熱制御を確立することが不可欠となる。本研究によって、これらに対するいくつかの基盤的な知見が創出されている。特に、乱流輸送に関する同位体効果は40年以上にわたる未解決問題であり、その全容解明に資する理論的知見が得られた点や実験による検証が進展している点は、核融合科学・プラズマ物理学の進展に大きく貢献している。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to analyze the characteristics of turbulent transport and profile formation in multi-particle plasmas, which are essential for the steady-state maintenance of fusion burning. From a series of studies, new findings such as (1) influence of ion mass on turbulent transport (isotope effect), (2) magnetic field structure dependence on zonal flow generation, (3) microscopic instability analysis for isotope mixture plasmas in LHD experiments, (4) construction of an accurate reduced turbulent transport model for tokamak plasmas, (5), and (5) improvement of the efficiency of coupled global simulations. These results become fundamentals for the development and extension of the coupled global turbulence transport code, which consists of a system of macroscopic transport code and local gyrokinetic simulations.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：燃焼プラズマ 乱流輸送 ゾーナルフロー 連成大域計算 同位体効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉(ITER)において核燃焼プラズマを達成し、その後の原型炉で持続的な核融合出力を実現するためには、電子や燃料イオン(D:重水素, T:三重水素)の温度分布に加え、各々の燃料イオン密度や He 灰分布、不純物分布等を高い精度で計測しつつ分布/加熱制御を確立する必要がある。しかしながら、個々のイオン種分布の同時計測や、燃焼反応に伴う He 灰の発生・熱化・蓄積/排出の一連のプロセスを既存装置実験において模擬することは困難を極める。従って、多イオン種の混在が本質的となる核燃焼プラズマの実現と制御には、高精度の乱流・新古典輸送シミュレーションによる閉じ込め特性の解明と予測が不可欠となると同時に、燃料イオン供給や He 灰排気、熱出力制御などの運転シナリオ構築に対して重要な役割を担う。

2. 研究の目的

本研究では同位体イオンや不純物イオンで構成される多粒子種プラズマにおける乱流輸送特性を明らかにする。さらに、巨視的輸送方程式系と局所ジャイロ運動論方程式の連成計算モデルから成る大域乱流輸送コードを開発・拡張する。そこで用いられる縮約モデルの構築と併せて、D-T-He で構成される燃焼プラズマにおける輸送過程や分布形成を解析することで、外部加熱や核融合反応と無矛盾な密度・温度分布の予測基盤の構築を推進する。

3. 研究の方法

本研究はジャイロ運動論に基づく大域的乱流輸送シミュレーションを駆使して、炉心プラズマ中の燃料イオン及び He 灰の輸送過程を解析し、定常核燃焼条件を第一原理的に検証するものである。分散配置された複数の局所乱流計算と巨視的分布発展方程式を連結させた連成型大域乱流輸送シミュレーションの構築を目指すにあたって不可欠となる、以下に物理解析も併せて実施する。

- (1)乱流輸送に対する同位体イオンの質量が与える影響(同位体効果)の解析
- (2)ゾーナルフロー生成に対する磁場構造依存性の解明
- (3)LHD 実験における同位体混合プラズマに対する微視的不安定性解析
- (4)トカマクプラズマに対する高精度縮約乱流輸送モデルの構築
- (5)連成大域輸送シミュレーションの効率化

4. 研究成果

(1)乱流輸送に対する同位体イオンの質量が与える影響(同位体効果)の解析

本研究ではジャイロ運動論シミュレーションコード GKV を用いて、LHD 軽水素および重水素プラズマに対する微視的不安定性解析および乱流輸送解析を実施した。これまでの解析によって、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)を用いた高電子温度放電においては捕捉電子モード(TEM)不安定性が支配的に、また、中性粒子入射(NBI)加熱を用いた高イオン温度放電においてはイオン温度勾配(ITG)不安定が支配的になり得ることが予測されている。ここでは、プラズマシミュレータなどの大型計算機を駆使した大規模な TEM 乱流シミュレーションが実現され、そこで得られた乱流輸送データの詳しい解析により、衝突度領域に応じて顕著な同位体質量効果が発現することが明らかとなった[図(a)]。これは、第一原理的な乱流シミュレーションによって従来の Gyro-Bohm 則とは逆の質量依存性の発現を示した初めての例であり、一連の成果をまとめた論文は Physical Review Letters に掲載された。

上記の理論予測に基づき、LHD 重水素実験において分布計測による閉じ込め改善の検証と PCI 揺動計測による TEM 揺動の同定が実施された。ECH によって生成された高電子温度プラズマに対して、軽水素と重水素のケースの比較を行った結果、重水素プラズマで平均 15%程度のエネルギー閉じ込めの改善が確認された。同時に、異なる密度分布特性も観測され、重水素プラズマでは軽水素プラズマに比べてよりホローな密度分布が形成されるということが系統的に示されている[図(b)]。GKV を用いた線形解析によって、正負を伴う密度勾配が ITG および TEM 不安定性成長率に与える影響が同定されており[図(c)]、ホローな密度分布における安定化効果とエネルギー閉じ込めの改善がどのように対応するかを詳しく調べるため、現在、実験データに基づく非線形計算の準備を進めている。さらに、重水素プラズマにおいて TEM 不安定化を示唆する乱流揺動の実験的同定も進展している。重イオンビームプローブ(HIBP)を用いて計測された巨視的なポロイダル流から見て、電子反磁性ドリフト方向に伝搬するイオンジャイロ半径スケールの乱流揺動がコア領域で観測された。他方、GKV による線形解析では、揺動が発現する半径領域に多少の差異はあるものの TEM がコア領域で不安定化する結果が得られ、揺動計測と定性的な一致が示された。このような LHD 重水素実験との連携によって、同位体効果の理論・シミュレーション研究が大きく進展した。

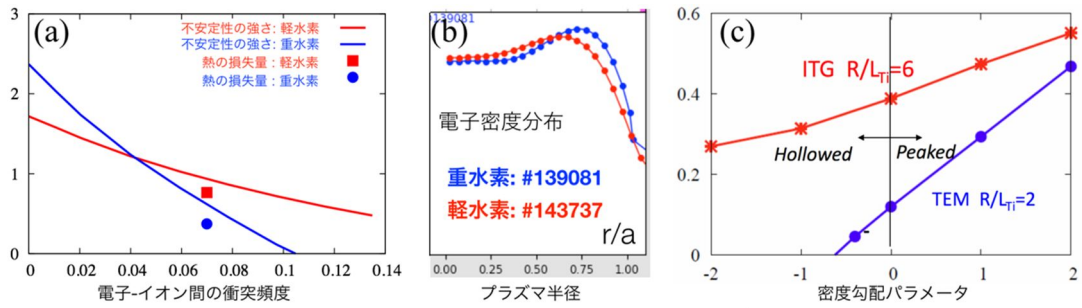


図: (a)熱輸送の同位体および衝突度依存性、(b)LHD高電子温度プラズマにおける密度分布の比較、(c) ITGおよびTEM不安定性成長率に対する密度勾配依存性

(2)ゾーナルフロー生成に対する磁場構造依存性の解明

本研究ではジャイロ運動論シミュレーションコード GKV を用いたヘリカルプラズマの乱流輸送およびゾーナルフローのモデリングを実施した。特に、ゾーナルフロー減衰に対する3次元磁場の幾何構造依存性の抽出を行い、LHD や W7-X といった複数の磁場配位に対して、ゾーナルフロー減衰に強く影響を与える測地曲率の指数依存性が評価された。さらに、それらを簡約乱流輸送モデル[Nunami, PoP2013]と統合を行うことで、新たな乱流最適化関数モデルの構築を行った。この最適化モデルは、ヘリカルプラズマ配位の最適化計算において、従来の線形不安定性のみを考慮するモデル[Xanthopoulos PRL2014]に対して非線形効果やゾーナルフロー形成効果を新たに組み入れたものに相当する。次に、乱流最適化関数の動作検証として、磁場配位最適化計算コード STELLOPT を用いたテスト計算が行われた。新古典輸送が抑制された最適プラズマを初期条件として、乱流抑制とゾーナルフローに関する最適化計算が進められることを確認するとともに、得られた配位に対して GKV を用いた詳細解析を行った。その結果、微視的不安定性(ITG モード)成長率の抑制とゾーナルフロー減衰の抑制を与える測地曲率の低減が確認された(Fig.1)。ただし、現段階においては新古典輸送抑制との両立性は考慮しておらず、その他の物理特性との複合的な最適化についても今後の課題として取り組む予定である。

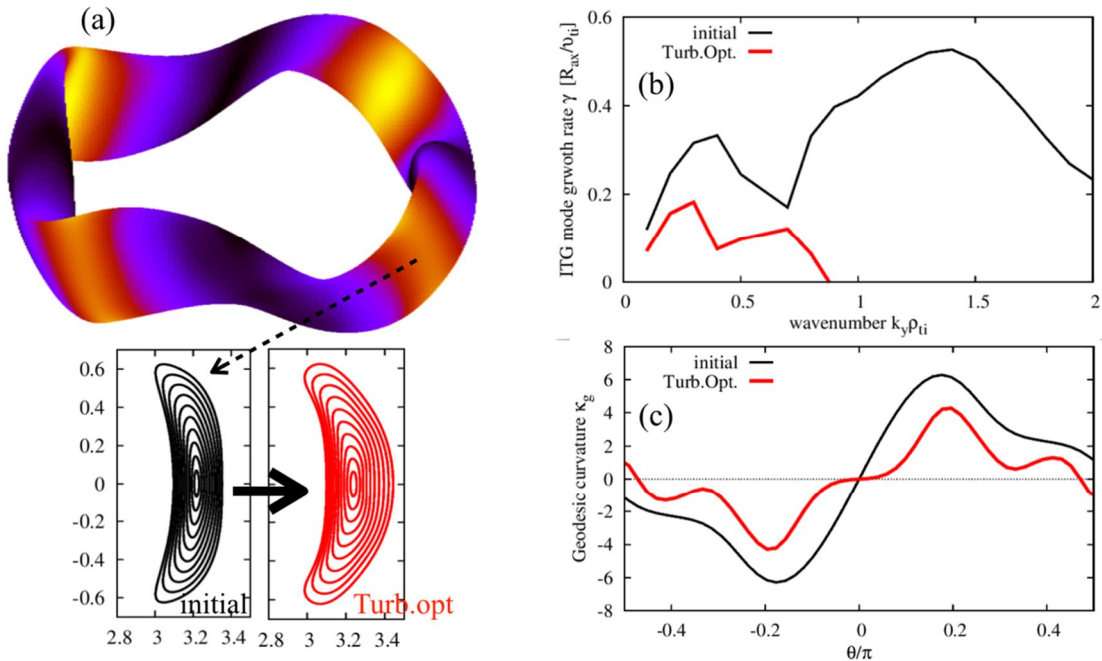


Fig.1: (a)初期条件平衡(左)と新たな乱流最適化モデルで最適化されたプラズマ断面(右)。(b)線形ITG不安定性の成長率の比較。(c)磁力線に沿った測地曲率分布の比較。

(3)LHD 実験における同位体混合プラズマに対する微視的不安定性解析

本研究ではジャイロ運動論シミュレーションコード GKV を用いて、LHD における軽水素・重水素混合プラズマに対する微視的不安定性解析を実施した。バルク荷電交換分光による精密計測の進展によって、プラズマ中の軽水素と重水素のそれぞれの密度分布を同時に得ることが可能となってきた。ペレット入射を用いた LHD 同位体混合プラズマ実験において、電子密度分布形状を保ったまま軽水素と重水素の分布がほぼ同一となる場合と異なる場合が観測された[Fig.1(a)-(d)]。また、軽水素と重水素の密度分布の変化と相関して、乱流揺動特性も遷移することが明らかとなった。GKV による軽水素・重水素・不純物イオンを含んだ微視的不安定性解析から、乱流揺動特性の遷移は支配的なモードが ITG から TEM へ変化することと対応することが同定され、

さらに、準線形近似でのイオン・電子粒子輸送係数比(D_i/D_e)には顕著な差が現れることが明らかとなった[Fig.1(e)]. 今後は非線形計算による評価に加え、分布形状の特徴を決める機構を同定するための大域的な解析を進める予定である。

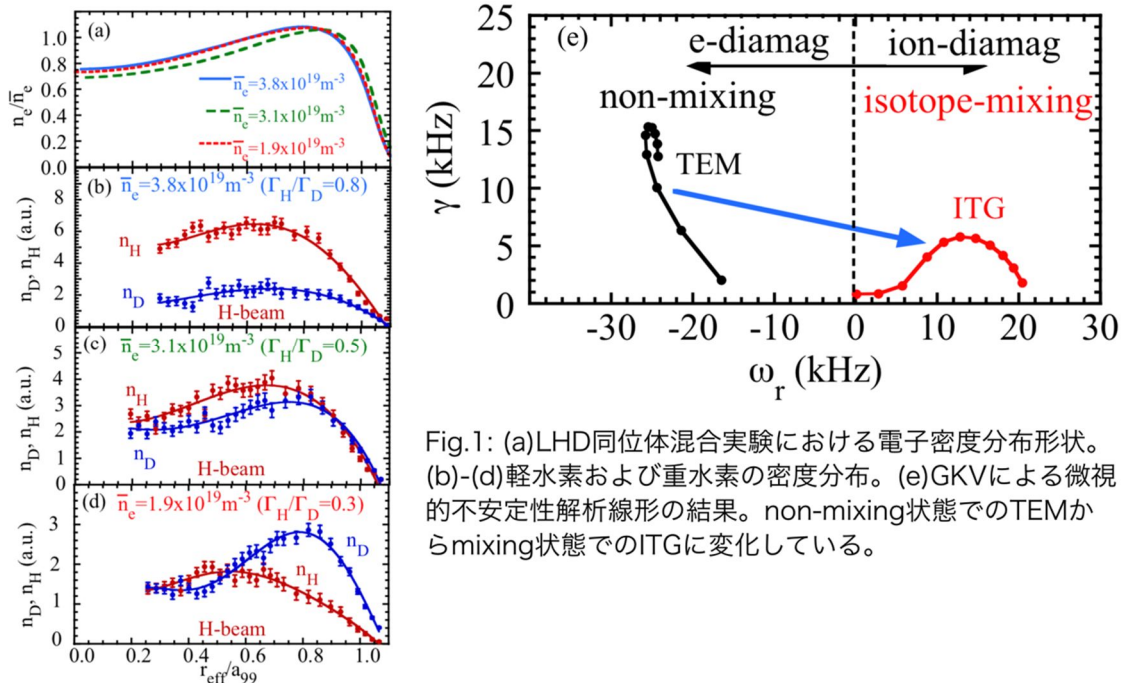


Fig.1: (a)LHD同位体混合実験における電子密度分布形状。(b)-(d)軽水素および重水素の密度分布。(e)GKVによる微視的不安定性解析線形の結果。non-mixing状態でのTEMからmixing状態でのITGに変化している。

(4) トカマクプラズマに対する高精度縮約乱流輸送モデルの構築

本研究では GKV を活用した多数の局所フラックスチューブ計算による磁気面ごとの輸送フラックス評価と、外部加熱ソースやシンクを含む 1 次元輸送計算による背景温度・密度分布の時間発展を結合させた連成大域輸送計算コード TRESS+GKV を構成する上で不可欠となる縮約乱流輸送モデルの構築と精度検証を実施した。特に、トカマク磁場配位において、乱流の非線形効果が組み込まれた縮約乱流輸送モデルの構築を目指す。縮約乱流輸送モデルの構築手法は、LHD に対して成された先行研究(M.Nunami et al., PoP2013)での手法を踏襲しつつ、パラメータ数やモデルの関数形に関するより幅広い検討を行った。初めにジャイロ運動論シミュレーションコード GKV を用いた非線形計算により乱流輸送解析を行い、輸送フラックス、乱流振幅 (T)、ゾーナルフロー振幅 (Z) を取得した後、 T と Z に関する非線形関数フィッティングによって、縮約乱流輸送モデルにおける最適なフィッティング係数を決定する。ここでは、乱流振幅、ゾーナルフロー振幅について 2 種類の定義、そして 2 種類の関数形について比較を行い、GKV での乱流輸送係数に対する再現精度を検証した。フィッティング係数は 2 乗残差 σ^2 を最小化する最適化問題として決定した。上述の比較により、残差 $\sigma = 0.0187$ の良好な再現精度を示す係数が同定された(図 1)。今後は、このモデルをトカマク系とヘリカル系の両方に適合させる拡張を進めるとともに、連成大域輸送シミュレーションコード TRESS+GKV への実装を行う。また、現在のモデリングはイオン熱輸送に留まっているため、今後は電子熱輸送にも拡張を行い、TRESS+GKV によるシミュレーションへと繋げていく。

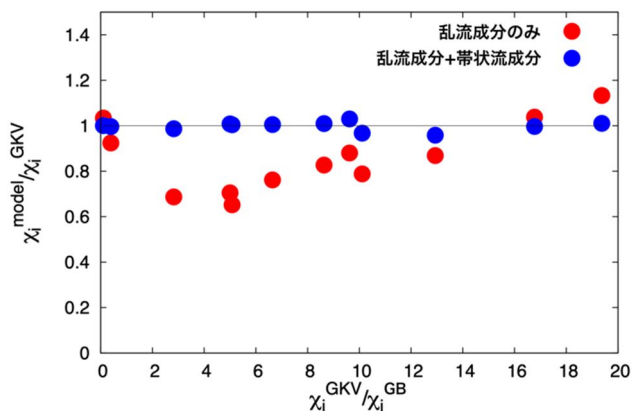
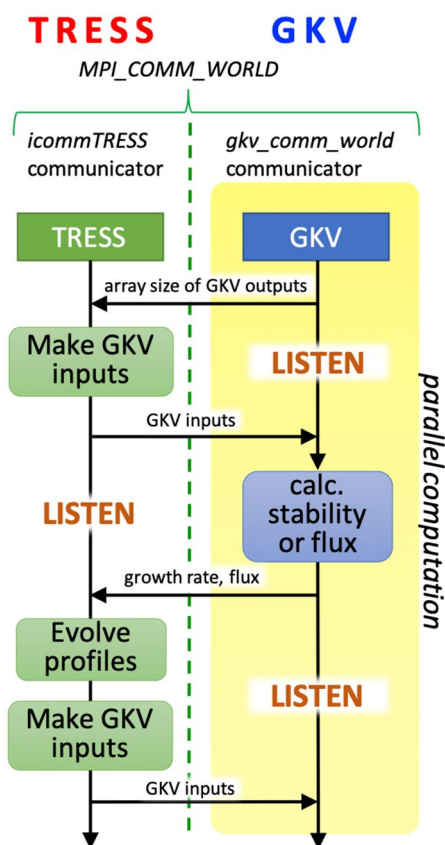


図 1: トカマク磁場配位における縮約熱輸送モデルと GKV 非線形計算によって得られた規格化イオン熱輸送係数の比較。乱流のみを考慮する場合に対して、ゾーナルフロー(帯状流)による輸送抑制効果を組み入れたモデルでは再現精度が向上している。

(5) 連成大域輸送シミュレーションの効率化

本研究では、連成大域乱流輸送コード TRESS+GKV の並列化の高効率化を実施した。従来は複数のコードが一体化された形、すなわち SPMD(Single Program, Multiple Data)方式での並列化が採用されていたが、新たな物理効果導入の際の拡張性に欠ける方式であったため、MPMD(Multiple Program, Multiple Data)方式への拡張を実施した(図)。MPMD の枠組みにおいては、TRESS と GKV は同時に起動され、MPI_COMM_SPLIT によって MPI_COMM_WORLD コミュニケータが分割される。TRESS はシングルコアで動作するためコミュニケータは不要であるが便宜上作られる。GKV では動作に応じたコミュニケータが生成され、GKV 全体の通信を行う gkv_comm_world が作られる。GKV に対する入力一式を TRESS が作成し、MPI_Bcast によって全 GKV ランクに配される。GKV は通常通り線形成長率、もしくは輸送フラックスを計算し、計算が終了すると、GKV の代表ランクから MPI_Send によって TRESS に輸送に関連する情報が送信される。TRESS と GKV 間は MPI_COMM_WORLD で通信される。TRESS 側はブロッキング通信である MPI_Recv で待っているため、GKV からのデータ受信が終わるまでは listen の状態となっている。各径方向位置に対して同様の作業を繰り返した後、分布の時間発展を行い、再び GKV の入力を作成する。この作業を計算終了まで繰り返す。通信によるオーバーヘッドは無視できる程度であり、かつての強結合版と MPMD 版で計算時間を比較したところ、ほぼ完全に同一であった。MPMD 版の TRESS+GKV では GKV 単体実行も出来るなど、高い柔軟性を有している。これらにより、複数のシミュレーションコードを容易に結合させたうえで、高速に相互データ通信を行うことが可能となった。



図：MPMD で動作する TRESS+GKV の計算の流れを示したフローチャート

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Nagaoka K., Takahashi H., Nakata M., Satake S., Tanaka K., Mukai K., Yokoyama M., Nakano H., Murakami S., Ida K., Yoshinuma M., Ohdachi S., Bando T., Nunami M., Seki R., Yamaguchi H., Osakabe M., Morisaki T., the LHD Experiment Group	4. 巻 59
2. 論文標題 Transport characteristics of deuterium and hydrogen plasmas with ion internal transport barrier 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 106002 ~ 106002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab2d02	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 Tanaka K, Nakata M, Ohtani Y, Tokuzawa T, Yamada H, Warmer F, Nunami M, Satake S, Tala T, Tsujimura T, Takemura Y, Kinoshita T, Takahashi H, Yokoyama M, Seki R, Igami H, Yoshimura Y, Kubo S, Shimozuma T, Akiyama T, Yamada I, Yasuhara R, Funaba H, Yoshinuma et al	4. 巻 62
2. 論文標題 Extended investigations of isotope effects on ECRH plasma in LHD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 024006 ~ 024006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab5bae	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 T., Takahashi H., Nagaoka K., Sasaki M., Nakata M., Yokoyama M., Seki R., Yoshinuma M., Ida K.	4. 巻 9
2. 論文標題 Isotope effects in self-organization of internal transport barrier and concomitant edge confinement degradation in steady-state LHD plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-019-52271-w	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 Tanaka K., Ohtani Y., Nakata M., Warmer F., Tsujimura T., Takemura Y., Kinoshita T., Takahashi H., Yokoyama M., Seki R., Igami H., Yoshimura Y., Kubo S., Shimozuma T., Tokuzawa T., Akiyama T., Yamada I., Yasuhara R., Funaba H. et al.	4. 巻 59
2. 論文標題 Isotope effects on energy, particle transport and turbulence in electron cyclotron resonant heating plasma of the Large Helical Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126040 ~ 126040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab4237	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 SHIMIZU Akihiro, LIU Haifeng, KINOSHITA Shigeyoshi, ISOBE Mitsutaka, OKAMURA Shoichi, OGAWA Kunihiro, NAKATA Motoki, SATAKE Shinsuke, SUZUKI Chihiro, XIONG Guozhen, XU Yuhong, LIU Hai, ZHANG Xin, HUANG Jie, WANG Xianqu, TANG Changjian, YIN Dapeng, WAN Yi, CFQS Team	4. 巻 14
2. 論文標題 Consideration of the Influence of Coil Misalignment on the Chinese First Quasi-Axisymmetric Stellarator Magnetic Configuration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3403151 ~ 3403151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3403151	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 Narita E., Honda M., Nakata M., Yoshida M., Hayashi N., Takenaga H.	4. 巻 59
2. 論文標題 Neural-network-based semi-empirical turbulent particle transport modelling founded on gyrokinetic analyses of JT-60U plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106018 ~ 106018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab2f43	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 Ida K., Nakata M., Tanaka K., Yoshinuma M., Fujiwara Y., Sakamoto R., Motojima G., Masuzaki S., Kobayashi T., Yamasaki K.	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 052002-052002
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 Nakata Motoki, Nagaoka Kenichi, Tanaka Kenji, Takahashi Hiromi, Nunami Masanori, Satake Shinsuke, Yokoyama Masayuki, Warmer Felix, the LHD Experiment Group	4. 巻 61
2. 論文標題 Gyrokinetic microinstability analysis of high-T _i and high-T _e isotope plasmas in Large Helical Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 014016 ~ 014016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/aadd6a	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 Takahashi H., Nagaoka K., Mukai K., Yokoyama M., Murakami S., Ohdachi S., Bando T., Narushima Y., Nakano H., Osakabe M., Ida K., Yoshinuma M., Seki R., Yamaguchi H., Tanaka K., Nakata M., Warmer F., et al.	4. 巻 58
2. 論文標題 Realization of high T i plasmas and confinement characteristics of ITB plasmas in the LHD deuterium experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106028 ~ 106028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aad87e	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 Nunami Masanori, Nakata Motoki, Toda Shinichiro, Ishizawa Akihiro, Kanno Ryutaro, Sugama Hideo	4. 巻 25
2. 論文標題 Simulation studies on temperature profile stiffness in ITG turbulent transport of helical plasmas for flux-matching technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 082504 ~ 082504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5036564	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 Warmer Felix, Takahashi H., Tanaka K., Yoshimura Y., Beidler C.D., Peterson B., Igami H., Ido T., Seki R., Nakata M., Yokoyama M., et al.	4. 巻 58
2. 論文標題 Energy confinement of hydrogen and deuterium electron-root plasmas in the Large Helical Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106025 ~ 106025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aad611	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 Toda S., Nakata M., Nunami M., Ishizawa A., Watanabe T.-H., Sugama H.	4. 巻 26
2. 論文標題 Modeling of turbulent particle and heat transport in helical plasmas based on gyrokinetic analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012510 ~ 012510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5058720	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 Maeyama S., Watanabe T.-H., Idomura Y., Nakata M., Nunami M.	4. 巻 235
2. 論文標題 Implementation of a gyrokinetic collision operator with an implicit time integration scheme and its computational performance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 9 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2018.07.015	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 Ogawa Kunihiro, Isobe Mitsutaka, Nishitani Takeo, Seki Ryosuke, Nuga Hideo, Murakami Sadayoshi, Nakata Motoki, Pu Neng, Osakabe Masaki, Jo Jungmin, Cheon MunSeong, Kim Junghee, Zhong Guoqiang, Xiao Min, Hu Liqun, LHD Experiment Group1	4. 巻 60
2. 論文標題 Time dependent neutron emission rate analysis for neutral-beam-heated deuterium plasmas in a helical system and tokamaks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 095010 ~ 095010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/aad4b7	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 Nakata M., Nunami M., Sugama H., Watanabe T. -H.	4. 巻 118
2. 論文標題 Isotope Effects on Trapped-Electron-Mode Driven Turbulence and Zonal Flows in Helical and Tokamak Plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 165002-165002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.118.165002	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 Maeyama S., Watanabe T.-H., Idomura Y., Nakata M., Ishizawa A., Nunami M.	4. 巻 57
2. 論文標題 Cross-scale interactions between turbulence driven by electron and ion temperature gradients via sub-ion-scale structures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066036 ~ 066036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa687c	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 Dinklage A., Sakamoto R., Yokoyama M., Ida K., Baldzuhn J., Beidler C.D., Cats S., Mc Carthy K.J., Geiger J., Kobayashi M., Maassberg H., Morita S., Motojima G., Nakata M., Nunami M., et al	4. 巻 57
2. 論文標題 The effect of transient density profile shaping on transport in large stellarators and heliotrons	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066016 ~ 066016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa6775	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 Takahashi H., Nagaoka K., Murakami S., Osakabe M., Nakano H., Ida K., Tsujimura T. I., Kubo S., Kobayashi T., Tanaka K., Seki R., Takeiri Y., Yokoyama M., Maeta S., Nakata M. et al	4. 巻 57
2. 論文標題 Extension of operational regime in high-temperature plasmas and effect of ECRH on ion thermal transport in the LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086029 ~ 086029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa754b	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 Honda M., Satake S., Suzuki Y., Shinohara K., Yoshida M., Narita E., Nakata M., Aiba N., Shiraishi J., Hayashi N., Matsunaga G., Matsuyama A., Ide S.	4. 巻 57
2. 論文標題 Predictions of toroidal rotation and torque sources arising in non-axisymmetric perturbed magnetic fields in tokamaks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 116050 ~ 116050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa7e90	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 Toda S., Nakata M., Nunami M., Ishizawa A., Sugama H., Yokoyama M., Yamaguchi H.	4. 巻 12
2. 論文標題 Impacts of External Momentum Torque on Impurity Particle Transport in LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1203039-1203039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.12.1303035	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 Narita E., Honda M., Nakata M., Yoshida M., Takenaga H., Hayashi N.	4. 巻 60
2. 論文標題 Gyrokinetic modelling of the quasilinear particle flux for plasmas with neutral-beam fuelling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 025027 ~ 025027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/aaa02d	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 Ogawa K., Isobe M., Nishitani T., Murakami S., Seki R., Nakata M., Takada E., Kawase H., Pu N., LHD Experiment Group	4. 巻 58
2. 論文標題 Time-resolved triton burnup measurement using the scintillating fiber detector in the Large Helical Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 034002 ~ 034002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aaa585	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 Beeke O., Barnes M., Romanelli M., Nakata M., Yoshida M.	4. 巻 61
2. 論文標題 Impact of shaping on microstability in high-performance tokamak plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066020 ~ 066020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/abf660	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 Ida K., Yoshinuma M., Tanaka K., Nakata M., Kobayashi T., Fujiwara Y., Sakamoto R., Motojima G., Masuzaki S., the LHD Experiment Group	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?deuterium mixture plasmas in the large helical device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016012 ~ 016012
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 Yoshida M., McKee G.R., Petty C.C., Grierson B.A., Nakata M., Rost C., Rhodes T.L., Ernst D.R., Garofalo A.M.	4. 巻 61
2. 論文標題 Magnetic shear effect on plasma transport at $T_e/T_i \approx 1$ through electron cyclotron heating in DIII-D plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016013 ~ 016013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/abbfe7	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 Fujita Keiji, Satake S., Kanno R., Nunami M., Nakata M., Garcia-Rega J. M., Velasco J. L., Calvo I.	4. 巻 86
2. 論文標題 Global calculation of neoclassical impurity transport including the variation of electrostatic potential	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 905860319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0022377820000598	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 Nunami M., Nakata M., Toda S., Sugama H.	4. 巻 27
2. 論文標題 Gyrokinetic simulations for turbulent transport of multi-ion-species plasmas in helical systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 052501 ~ 052501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5142405	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17件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Extended proxy modeling for stellarator optimization with nonlinear turbulence interactions and zonal flows
3. 学会等名 Joint Institute for Fusion Theory Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Extended proxy modeling for turbulence optimization
3. 学会等名 22nd International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲田資季
2. 発表標題 先進3次元磁場配位最適化に向けた乱流モデリング
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 M. Nakata
2. 発表標題 Isotope effects on turbulent transport and confinement in helical and tokamak plasmas: theory and experiment
3. 学会等名 EPS 45th Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Turbulence simulation studies for 3D helical plasmas and future prospects in advanced optimization
3. 学会等名 Max-Planck Princeton Center Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲田資季
2. 発表標題 燃焼プラズマを見据えた大規模乱流輸送シミュレーション研究
3. 学会等名 第22回若手科学者によるプラズマ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Turbulent transport and Zonal flow generation in Quasi-Axisymmetric Stellarator
3. 学会等名 ITC27 & APPTC2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仲田資季
2. 発表標題 LHDにおける高イオン温度および高電子温度同位体プラズマの乱流輸送シミュレーション
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 M. Nakata
2. 発表標題 Gyrokinetic simulations on turbulent transport of D-T ions and He-ash in ITER plasmas
3. 学会等名 8th IAEA Technical Meeting: Theory of Plasma Instabilities (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Gyrokinetic Vlasov simulations of ITG/TEM turbulence in tokamak and helical plasmas with isotope and impurity ions
3. 学会等名 ICNSP2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Isotope effects on TEM and ITG driven turbulence and zonal flows in tokamak and stellarators
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Flux-driven global transport simulations based on joint approach with gyrokinetic and transport solvers
3. 学会等名 7th Asia Pacific Transport Working Group Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Multi-scale coupled simulations of global turbulent transport towards burning plasmas
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakata
2. 発表標題 Exploration of next generation three-dimensional magnetic configuration with enhanced zonal flows
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲田資季
2. 発表標題 燃焼プラズマにおけるゾーナルフローの活性化と乱流抑制 - 数理・情報・物理の融合研究による新展開 -
3. 学会等名 第26回NEXT研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲田資季
2. 発表標題 乱流抑制配位創成に向けた乱流モデリングおよび数理計画探索
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 仲田資季
2. 発表標題 乱流最適化配位創成に向けた乱流輸送モデリング
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

朝日新聞「先端人」において研究が記事として取り上げられた
<http://www.asahi.com/area/aichi/articles/MTW20200706241370001.html>
科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞
https://www.nifs.ac.jp/press/200417_04.html
第14回（2020年）日本物理学会若手奨励賞を受賞
<https://www.jps.or.jp/activities/awards/jusyosya/wakate2020.php#r2>
プレスリリース：混ざり合うプラズマを世界で初めて観測
<https://www.nifs.ac.jp/press/200120.html>
第7回 自然科学研究機構若手研究者賞 授賞式及び記念講演を開催
<https://www.nins.jp/site/connection/1543.html>
プレスリリース：イオン質量による乱流抑制のメカニズムを解明
<http://www.nifs.ac.jp/press/170410.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
--	---------------------------	-----------------------	----

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