

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06947

研究課題名（和文）電子加熱時のイオン及び電子系乱流と輸送特性の相関の実験的検証

研究課題名（英文）Correlation between plasma transport and turbulence with electron heating

研究代表者

吉田 麻衣子（Yoshida, Maiko）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・上席研究員（定常）

研究者番号：20391261

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：ITERや原型炉における燃焼プラズマでの加熱は、核融合反応により生じたアルファ粒子による電子加熱が主体となる。JT-60を含む多くの装置において、電子を加熱する電子サイクロトロン加熱（ECH）を行うと、エネルギー閉じ込めの劣化やプラズマ回転の変化をもたらすことが観測されている。本研究では、DIII-D装置の様々な磁気シアの高性能プラズマ放電を用いてECH入射時の輸送と揺動の変化に関する実験を行い、どのような条件の時に輸送の劣化が抑えられるかを明らかにした。また実験結果と理論モデルによる予測との比較を行うことで、その原因について解釈を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの装置で乱流輸送研究はなされているが、本研究のように高性能プラズマで且つ電子加熱が強い領域での、電子系乱流とイオン系乱流に着目した実験研究はこれまでに例がなく、イオン系及び電子系乱流揺動計測、プラズマ空間分布の時間変化、定常及び非定常輸送解析、局所的及び大域的運動論モデルといった、包括的な研究アプローチをとる本研究を皮切りに、電子加熱時の輸送物理の理解が飛躍的に向上し、乱流シミュレーション・コード開発に貢献すると期待される。検証したモデルにより、より精度の高いプラズマ予測に貢献でき、運転シナリオ開発に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Plasma heating in ITER and DEMO reactors is mainly electron heating by alpha particles generated by fusion reaction. In many devices, including JT-60, electron cyclotron heating (ECH) has been observed to cause degradation of energy confinement and changes in plasma rotation. In this study, we conducted experiments on transport and fluctuations of ECH injection in various magnetic shear discharges of DIII-D device, and clarified under what conditions transport degradation is suppressed. In addition, by comparing the experimental results with the predictions by the theoretical model, an explanation was given as to the cause.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：電子加熱 輸送と閉じ込め 乱流輸送 磁気シア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の実現には、いかにエネルギー閉じ込め劣化やプラズマ内の不安定性の発生を回避し、高性能炉心プラズマを生成・維持できるかが要となる。特に、国際トカマク物理活動でも問題となっているのは、多くのトカマク装置で観測されている「電子サイクロトロン加熱時の粒子とエネルギー閉じ込めの劣化」である。これは、アルファ粒子加熱により電子加熱が支配的になる ITER や原型炉でのプラズマ輸送・閉じ込め特性の予測と運転領域開発の懸念となっているため、最重要課題として、電子加熱時のプラズマ輸送特性の理解と制御手法の開発が強く求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、国際熱核融合実験炉 (ITER) や原型炉で課題となる、電子加熱が支配的な領域でのプラズマ乱流輸送の解明、将来の装置でのプラズマ分布予測と運転シナリオ開発を目指し、プラズマ輸送を決めるイオン系乱流と電子系乱流の特性と相関を、実験的アプローチにより明らかにする。この目的達成に向けて、低周波揺動と高周波揺動を検出できる揺動計測器群、高空間・時間分解能を有する分布計測器群、強力な電子加熱と様々な運転領域 (磁気シアと回転シア) を持つトカマク型実験装置を活用し、電子加熱時のイオン系乱流と電子系乱流の振る舞い、プラズマ輸送・分布の変化を詳細に調べる。得られた実験データと乱流輸送の理論モデルとを比較することで、輸送物理の理解を行うとともに、電子加熱による粒子及びエネルギー閉じ込め劣化を緩和する運転領域を見つけ出す。

3. 研究の方法

(1) ITER や原型炉で課題となる、電子加熱が支配的な領域でのプラズマ乱流輸送の解明と、乱流輸送を緩和できる運転シナリオ開発を目指し、DIII-D の様々な磁気シアの高性能プラズマにおいて、電子サイクロトロン加熱時 (ECH) のプラズマ輸送とイオン系・電子系乱流の振る舞いを調べる。

(2) DIII-D において、複数の揺動計測器と乱流シミュレーションとを用いることで、磁気シアによる輸送の違いの物理機構を明らかにする。

(3) DIII-D の結果と既存の JT-60U での結果を合わせて解析することで、装置に依存せず、電子加熱による粒子及びエネルギー閉じ込め劣化を緩和できる運転領域を見つけ出す。

(4) 普遍的な特性を調べるため、欧州の TCV 装置において電子加熱時の輸送およびプラズマ性能特性実験を行い、プラズマ電流分布を調整し最適な磁気シアを得ることで、加熱とともに圧力を示す規格化ベータ値が上昇し、非完全電流駆動の高性能プラズマ放電が得られることが分かった。

4. 研究成果

本論文は、ITER や原型炉で課題となる、電子加熱が支配的な領域でのプラズマ乱流輸送の解明と、乱流輸送を緩和できる運転シナリオ開発を目指し、DIII-D、JT-60、TCV の様々な磁気シアの高ベータ・プラズマにおいて、電子サイクロトロン加熱 (ECH) 時のプラズマ輸送とイオン系・電子系乱流の振る舞いを調べた。DIII-D において、複数の揺動計測器と乱流シミュレーションとを用いることで、磁気シアによる輸送の違いの物理機構を明らかにした。DIII-D の結果と既存の JT-60U での結果を合わせて解析することで、装置に依存せず、電子加熱による粒子及びエネルギー閉じ込め劣化を緩和できる運転領域を見つけ出した。両装置で得られた結果を TCV 装置に応用し、同様に電子サイクロトロン加熱時における非完全電流駆動のプラズマ放電を開発した。具体的には、以下のことを明らかにした。

(1-1) DIII-D の高ベータ負磁気シア放電及び正磁気シア放電の両者において、電子温度対イオン温度 (T_e/T_i) の増加に伴う熱輸送の増加と低波数 ($k\rho_s < 1$) 密度揺動の増加が観測された (k は揺動の波数、 ρ_s はイオンのジャイロ半径を示す)。この時、負磁気シアの方が正磁気シア放電

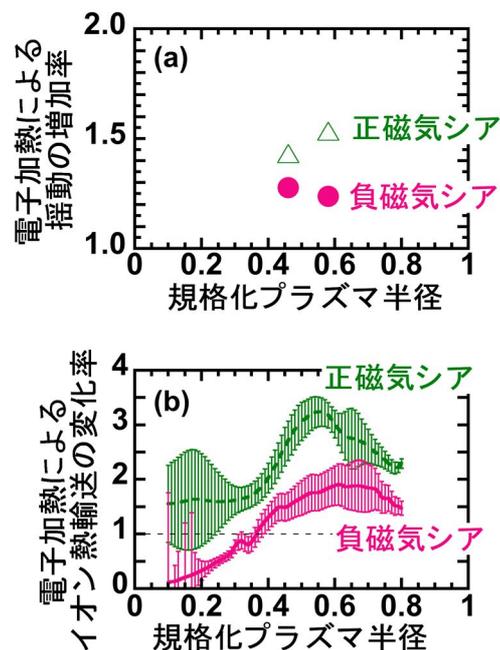


図1 電子サイクロトロン加熱による(a)密度揺動の増加率、(b)イオン熱輸送の変化率。

より、イオン温度勾配不安定性 (ITG モード) や捕捉電子不安定性 (TEM) に特徴付けられる低波数領域のブロードバンドな密度揺動強度の増加が小さいことも分かった (図 1(a))。

(1-2) 正磁気シア放電では、ECH によりプラズマ内側のイオン熱拡散係数が増加し、イオン温度が減少するが、負磁気シア放電では、ECRF による内側のイオン熱拡散係数の増加とイオン温度の減少は起こらない。更に、プラズマ電流を 10% 程度増加させることで、電子温度対イオン温度の比 (T_e/T_i) が 1 を越える場合でもイオン温度の内部熱輸送障壁を形成・維持できることが分かった (図 1(b))。

(2-1) この乱流揺動が小さい観測結果は、熱輸送解析とジャイロ運動論シミュレーションと一貫している。正磁気シア放電に比べ、負磁気シア放電では電子サイクロトロン加熱による乱流の線形成長率の増加が抑えられていることが示された (図 2)。

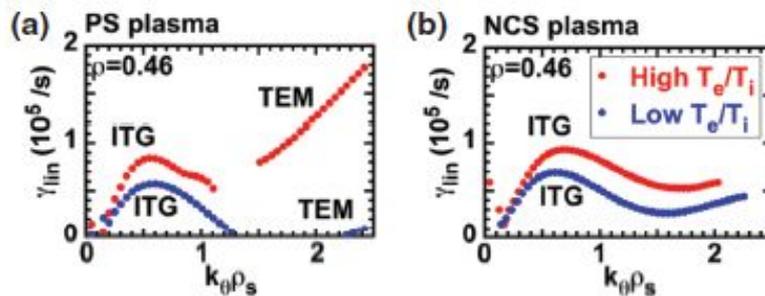


図 2. ジャイロ運動論を用いた (a) 正磁気シア放電と (b) 負磁気シア放電における乱流成長率のシミュレーション結果。青線が ECH 入射前、赤線が入射中を示しており、負磁気シア放電の方が乱流的な振る舞いが抑えられていることを示している。

(2-2) これらの実験及び理論解析の結果により、正磁気シアでは ECH によりイオン温度勾配不安定性と捕捉電子不安定性の両方が不安定になるため熱輸送が大きく増加するのに対して、負磁気シアではそれらの乱流モードの増加が正磁気シアに比べ小さいため、熱輸送の増加も小さいという解釈に至った。一方、中間波数 ($k_{\perp} \rho_s \sim 1-5$) 揺動は、負磁気シア放電及び正磁気シア放電の両者において、 T_e/T_i の増加に伴う中間波数密度揺動の減少が観測された。

(3) 本研究で新たに得られた DIII-D の結果と、今までに研究代表者が取得した JT-60U の結果を比較することで、装置依存しない共通の特性を抽出した。即ち、磁気シアが負でありトロイダル回転シアが負の大きい値をとる条件では、ECH によるイオン熱輸送の上昇が抑えられることが分かった。

(4) 電子サイクロトロン共鳴による電子加熱と中性粒子ビームによるイオン加熱の利用が可能となった欧州の TCV において、完全非誘導電流の定常運転シナリオにおける電子加熱時の輸送特性に関する実験を行った。予めシミュレーションコードを用いて、完全非誘導電流運転に必要な電子サイクロトロン共鳴と中性粒子ビームの入射パターンを評価し、それらの計算結果を基に、TCV にて運転シナリオを開発した。プラズマ位置及び形状、電子密度、電子サイクロトロン加熱の位置やパワー、中性粒子ビーム入射位置を調整し、プラズマ内部に輸送障壁を形成することでプラズマの圧力に比例する規格化ベータ値が上昇し、ほぼ非完全電流駆動のプラズマ放電を得ることが分かった (図 3)。

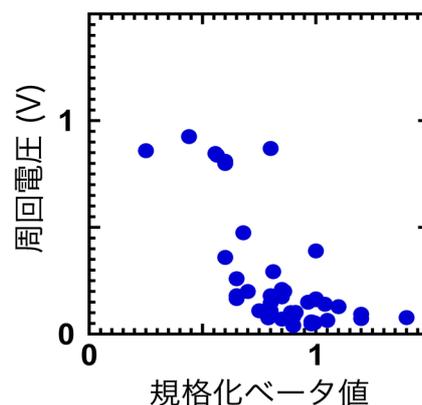


図 3. 規格化ベータ値に対する周回電圧。規格化ベータ値の上昇に伴い、周回電圧が零に近づき、ほぼ完全誘導電流に達している。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, G. Matsunaga, K. Shinohara, N. Aiba, M. Yoshida and S. Ide	4. 巻 58
2. 論文標題 Effects of the applied magnetic fields with various toroidal phase differences on the neoclassical toroidal viscosity in JT-60SA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nucl. Fusion	6. 最初と最後の頁 112012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1741-4326/aabaaa	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 G. Giruzzi, M. Yoshida,他93名	4. 巻 57
2. 論文標題 Physics and operation oriented activities in preparation of the JT-60SA tokamak exploitation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 85001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/aa7962	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. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, K. Shinohara, M. Yoshida, E. Narita, M. Nakata, N. Aiba, J. Shiraishi, N. Hayashi, G. Matsunaga, A. Matsuyama and S. Ide	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
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 E Narita, M Honda, M Yoshida, N Hayashi, H Urano and S Ide	4. 巻 59
2. 論文標題 Effects of toroidal rotation on electron heat transport via changes in inertial force and impurity density	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 44012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6587/aa5e02	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 J. Shiraishi, N. Miyato, G. Matsunaga, M. Toma, M. Honda, T. Suzuki, M. Yoshida, N. Hayashi and S. Ide	4. 巻 57
2. 論文標題 Impact of hot particles on resistive wall mode stability in rotating high-beta plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa85a8	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. Yoshida, G. R. McKee, M. Murakami, B. A. Grierson, M. Nakata, E. M. Davis, A. Marinoni, M. Ono, T. L. Rhodes, C. Sung, L. Schmitz, C. C. Petty, J. R. Ferron, F. Turco, A. M. Garofalo, C. T. Holcomb, C. M. Collins, W. M. Solomon	4. 巻 57
2. 論文標題 Magnetic shear effects on plasma transport and turbulence at high electron to ion temperature ratio in DIII-D and JT-60U plasmas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 56027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa611e	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. Tanaka, S. Coda, M. Yoshida, H. Sasao, Y. Kawano, R. Imazawa, H. Kubo, and Y. Kamada	4. 巻 87
2. 論文標題 Design of tangential viewing phase contrast imaging for turbulence measurements in JT-60SA	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 1.1E+119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4960057	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. Nakata, M. Honda, M. Yoshida, H. Urano, M. Nunami, S. Maeyama, T. Watanabe and H. Sugama	4. 巻 56
2. 論文標題 Validation studies of gyrokinetic ITG and TEM turbulence simulations in a JT-60U tokamak using multiple flux matching	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 86010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0029-5515/56/8/086010	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14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida, N. Hayashi and H. Takenaga
2. 発表標題 Particle transport modeling based on gyrokinetic analyses of JT-60U plasmas
3. 学会等名 16th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. R. Ernst, K.H. Burrell, C. C. Petty, M. Yoshida 他17名
2. 発表標題 VIABILITY OF WIDE PEDESTAL QH-MODE FOR BURNING PLASMA OPERATION
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 C. Piron, J. Garcia, T. Goodman, M. Yoshida 他14名
2. 発表標題 Extension of the operating space of high- β_N fully non-inductive scenarios on TCV using Neutral Beam 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 E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida, N. Hayashi and H. Takenaga
2. 発表標題 Gyrokinetic Modeling of Turbulent Particle Fluxes towards Efficient Predictions of Density Profiles
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 E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida, H. Takenaga and N. Hayashi
2. 発表標題 ジャイロ運動論に基づく乱流粒子輸送モデルの構築
3. 学会等名 第23回NEXT(数値トカマク)研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makoto Ono, Naoyuki Oyama, Maiko Yoshida, Takahiro Suzuki, Go Matsunaga
2. 発表標題 Coherent core fluctuations in negative magnetic shear discharges on JT-60U
3. 学会等名 Plasma conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida, H. Takenaga and N. Hayashi
2. 発表標題 Development of the particle transport model based on gyrokinetic analysis of JT-60U tokamak plasmas
3. 学会等名 US-Japan JIFT workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, G. Matsunaga, K. Shinohara, M. Yoshida and S. Ide
2. 発表標題 Effects of the applied magnetic field phasing on the neoclassical toroidal viscosity and toroidal rotation in JT-60SA
3. 学会等名 16th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida, H. Takenaga and N. Hayashi
2. 発表標題 ジャイロ運動論に基づく準線形粒子輸送モデルを用いた密度分布制御
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Yoshida, G. R. McKee, M. Murakami, C. M. Collins, E. M. Davis, J. R. Ferron, A. M. Garofalo, B. A. Grierson, C. T. Holcomb, A. Marinoni, M. Nakata, M. Ono, C. C. Petty, T. L. Rhodes, L. Schmitz, W. M. Solomon, C. Sung, F. Turco
2. 発表標題 Magnetic shear effects on plasma transport and turbulence at high electron to ion temperature ratio in DIII-D and JT-60U plasmas
3. 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Honda, M. Yoshida, S. Satake, Y. Suzuki, N. Hayashi, K. Shinohara, A. Matsuyama, K. Kamiya, G. Matsunaga, S. Ide, H. Urano and M. Nakata
2. 発表標題 Physics and modeling of toroidal rotation and torque sources in JT-60U
3. 学会等名 18th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Romanelli, P. Aresta-Belo, G. Corrigan, L. Garzotti, D. Harting, F. Koechl, S. Saarelma, S. Wiesen, M. Wischmeier, T. Bolzonella, L. Pigatto, J. Garcia, P. Maget, E. de la Luna, N. Hayashi, T. Nakano, S. Ide, M. Yoshida, H. Urano
2. 発表標題 Investigation of Sustainable Reduced-Power non-inductive Scenarios on JT-60SA
3. 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 G. Giruzzi, M. Yoshida, et al
2. 発表標題 Physics and operation oriented activities in preparation of the JT-60SA tokamak exploitation
3. 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 J. Shiraishi, N. Miyato, G. Matsunaga, M. Toma, M. Honda, T. Suzuki, M. Yoshida, N. Hayashi and S. Ide
2. 発表標題 Impact of Kinetic Effects of Energetic Particles on Resistive Wall Mode Stability in Rotating High-beta Plasmas
3. 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2016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