

令和元年6月21日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06657

研究課題名(和文) プラズマ周辺部に発生する揺動を活用した新たなELM制御法の開発

研究課題名(英文) Development for new ELM control method using edge plasma fluctuation

研究代表者

神谷 健作 (Kamiya, Kensaku)

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：60360426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、JT-60Uにおける高分解能での周辺径電場計測結果をもとに、イオン及び電子の熱輸送と粒子輸送のそれぞれに対する径電場構造の非一様性効果を理論モデルに基づいて比較検証した。その結果、イオン及び電子の熱輸送と粒子輸送のそれぞれに影響する複数の乱流揺動の存在が示唆された。これらの成果は当該研究領域における新しい知見であり、特にJT-60U装置において固有な時間スケールの長いイオン系の熱輸送の改善が顕著な閉じ込め改善状態について、多スケールの乱流輸送状態に対する径電場のシアー及び曲率の効果の影響を無次元パラメータを用いてスケールできることを示した。

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の標準運転シナリオにも採用されている閉じ込め改善モード(Hモード)では、プラズマ周辺部に輸送障壁が形成されることで高いプラズマ性能が得られる。本補助金による研究において、JT-60Uの高分解能での周辺径電場計測結果をもとに、イオン及び電子の熱輸送と粒子輸送のそれぞれに対する径電場構造の非一様性効果を理論モデルに基づいて比較検証した結果、当該研究領域における新しい知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Multiple turbulent plasma states in the edge transport barriers formation are studied on JT-60U. Following a slow L-H transition, we found a clear and fast changes in the particle transport in association with the change in the E_r towards a strong negative value at the later H-phase. It should be noted that the transition causes significant reduction in the ion thermal transport in the pedestal towards the neoclassical level with a weak negative E_r value. It has also been suggested that there is a clear difference in responses between ion and electron transports due to the change in the inhomogeneity in the E_r . This observation suggests the presence of multiple types of turbulent fluctuations in the H-mode plasma state. The nonlinear dynamics that induces the E_r -bifurcation is also analyzed in terms of the radial current generation. These analyses contribute to understanding of the L-H transition condition.

研究分野：プラズマ実験物理

キーワード：H-mode pedestal ELMs E_r

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 ITER 標準運転シナリオにも採用されている閉じ込め改善モード(Hモード)では、プラズマ周辺部に輸送障壁が形成されることで高いプラズマ性能が得られる。これまでの研究により、プラズマ周辺部に自発的に発生する径電場によって通常モード(Lモード)の輸送特性を支配する乱流揺動が抑制されると考えられてきたが、揺動が抑制される物理機構については完全に解明されて無い部分もあり、物理解明に基づく将来の炉心プラズマの性能予測の向上が期待されている。他方、輸送障壁が形成される物理機構については完全に理解されているわけではない。プラズマ中に生じた電場の構造によって、プラズマの性能を劣化させる乱流が抑制されることがHモード発生に重要な役割を果たすと考えられており、帯状流による揺動抑制効果まで含めて、電場シアが乱流揺動を抑制し密度・温度勾配が急な領域を生み出すという説明がしばしばなされている。しかし、理論的には、電場シアによる乱流抑制効果と電場曲率(2階微分)による乱流抑制効果は別々のものであり、二つのプロセスが区別されて共存すると予測されている。

2. 研究の目的

本研究で特に注目する点は、粒子輸送を増加させつつ熱輸送を低減できる運転モードの開発であり、これにはプラズマ周辺部における径電場構造の変化と乱流揺動特性との相関の物理解明が重要であると考えられる。そこで、JT-60Uにおける高分解能での周辺径電場計測結果をもとに、閉じ込め改善モード(ELMの無いHモード)の発生に重要な径電場構造について、境界輸送障壁形成に対する径電場構造の非一様性効果を理論モデルに基づいて比較検証する。

3. 研究の方法

既存実験装置(JT-60U)において得られているELM無し状態に関して、遅い時間スケールで形成される弱い径電場状態と早い時間スケールで形成される強い径電場状態におけるプラズマ乱流輸送特性の詳細な解析を行う。特に、JT-60Uで得られた径電場の高空間分解能計測結果を踏まえ、電場勾配及び電場曲率がプラズマの性能を劣化させる乱流をどの程度抑制できるのかを検証し、電場勾配の効果と電場曲率の効果の両方を取り入れた理論モデルの妥当性を確認する。

4. 研究成果

JT-60Uにおける高分解能での周辺径電場計測結果をもとに、径電場シア及び曲率の輸送障壁形成に対する効果を取り入れた理論モデルの妥当性を初めて検証した。径電場シア及び曲率は乱流揺動の散逸及びコヒーレントなエネルギー転換における非線形過程に本質的に連関するので、それぞれについて調べたところ、径電場シアは周辺輸送障壁形成と強い相関は無く、径電場の曲率が重要な役割を果たしていることが分かった(図1)。

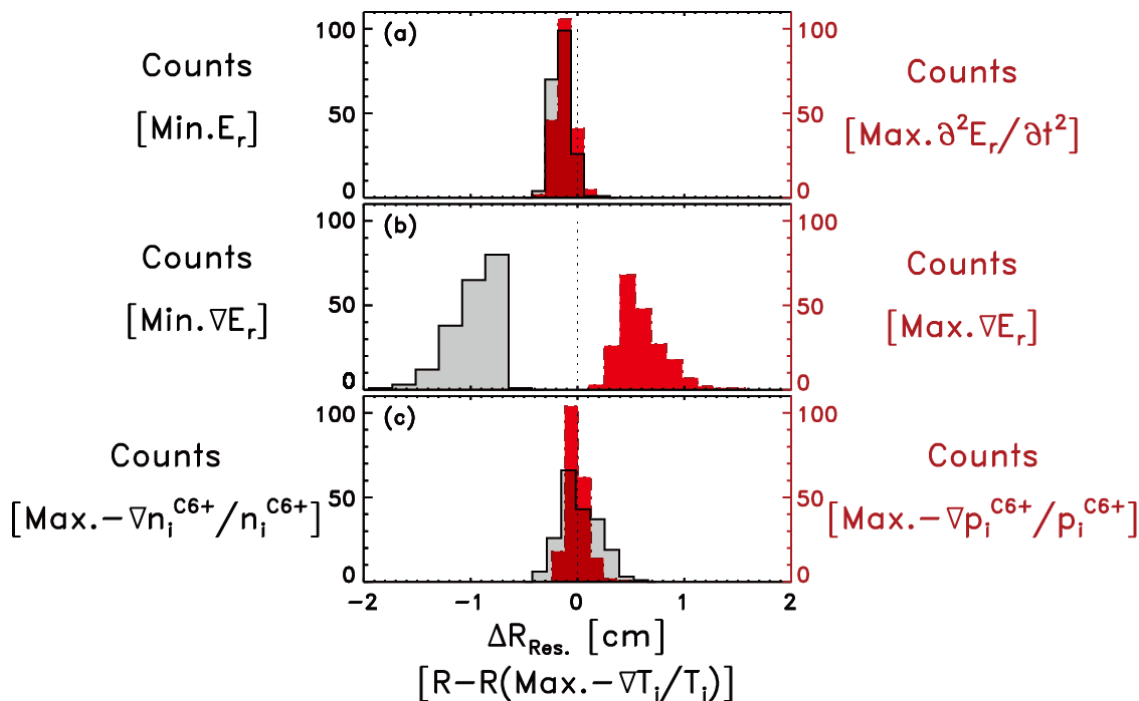


図1 規格化イオン温度勾配の極大値位置に対する(a)径電場及び曲率、(b)径電場シア、及び(c)規格化不純物イオン密度及び圧力勾配の極大値位置。

他方、径電場シアは曲率による不安定化効果を補正し、輸送障壁幅の拡大に寄与していることが示唆された（図2）。

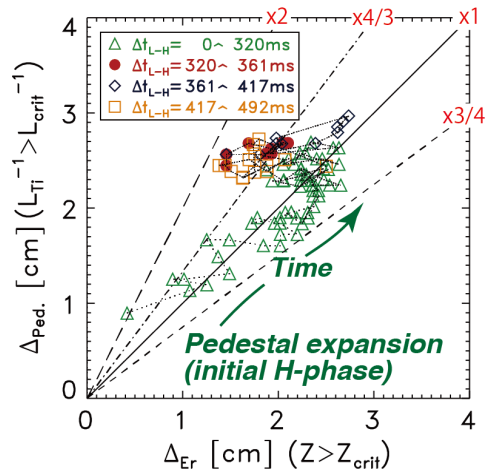


図2 イオン温度ペダスタル幅に対する径電場の実効的な幅

また H モード発生から数 100ms 経過した後（エネルギー閉じ込め時間程度の数倍以上の特定数）イオンの熱伝導係数は新古典輸送が支配的なレベルにまで低減し、L モードにおいて輸送特性を支配している乱流揺動は十分に抑制されていることが輸送解析によって定量的に明らかとなったが、電子系のエネルギー輸送（あるいは粒子輸送）特性は、径電場の非一様性効果によるイオンの熱輸送特性の改善が飽和する領域でも改善していることから、多種類の特性長を有する乱流揺動の存在が本研究によって示唆された（図3）。

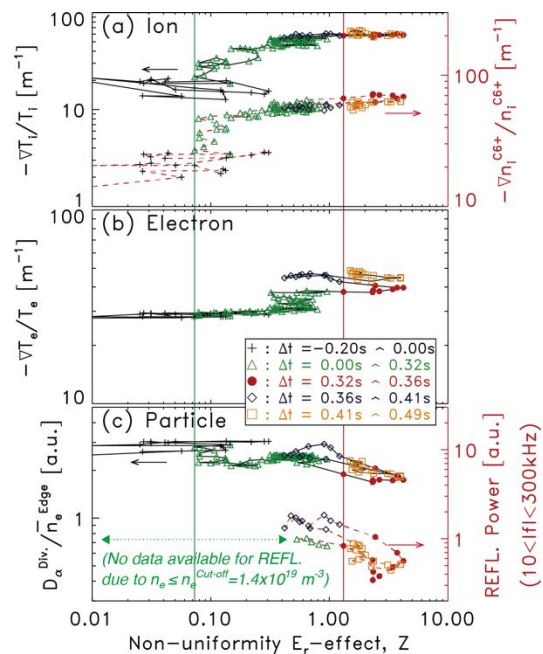


図3 径電場の非一様性効果に対する(a)イオン熱輸送、(b)電子熱輸送、及び(c)粒子輸送と乱流揺動への効果。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

K. Kamiya, Role of electric field curvature in the formation of edge transport barrier, AIP Conference Proceedings 1993, 020004 (2018). 査読あり

<https://doi.org/10.1063/1.5048714>

K. Kamiya, et al., Role of electric field curvature in the formation of edge transport barrier in the JT-60U tokamak, Plasma Phys. Control. Fusion 60, 014023 (2018). 査読あり

<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa8a01>

K. Kamiya, et al., Reduction of ion thermal transport due to non-uniformity effects of the radial electric field at the edge of the JT-60U tokamak, Nucl. Fusion 57, 126003 (2017). 査読あり

<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7f3b>

K. Kamiya, Itoh, and S.-I. Itoh, Experimental validation of nonuniformity effect of the radial electric field on the edge transport barrier formation in JT-60U H-mode plasmas Sci. Rep. 6, 30585 (2016). 査読あり
DOI: 10.1038/srep30585

[学会発表](計6件)

神谷健作、伊藤公孝、伊藤早苗、本多充、JT-60UのL-H遷移における周辺径電流構造の形成、第35回プラズマ・核融合学会年会、2018年12月5日(水)

K. Kamiya, Itoh, S.-I. Itoh, et al., Multiple turbulent plasma states in the H-mode transition on JT-60U, 27th IAEA Fusion Energy Conference, 22-27 October, 2018.

神谷健作、伊藤公孝、伊藤早苗、他3名、Effect of an electric field curvature on the multiple turbulent plasma states in the JT-60U tokamak, Plasma Conference 2017, Nov. 20 - 24, 2017

K. Kamiya, Itoh, and S.-I. Itoh, Role of electric field curvature in the formation of edge transport barrier, 44th EPS-PPD Conference on Plasma Physics, June 26 - 30, 2017 (invited).

神谷健作、伊藤公孝、伊藤早苗、JT-60UのHモードペDESTAL形成における径電場非一様性の効果、プラズマ・核融合学会第33回年会、2016.11.29(火)~12.2(金)。

K. Kamiya, Itoh, and S.-I. Itoh, Experimental validation of non-uniformity effect of the radial electric field on the edge transport barrier formation in JT-60U H-mode plasmas, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, October 31 - November 4, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当無し

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：伊藤公孝

ローマ字氏名：Itoh Kimitaka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。