

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420897

研究課題名(和文)核融合炉心プラズマ構造形成に対する水素同位体効果に関する研究

研究課題名(英文)Study on the effect of hydrogen isotope on the formation of fusion plasma structure

研究代表者

浦野 創 (URANO, HAJIME)

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：70391258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：トカマクのプラズマ周辺部に輸送障壁を形成するHモードにおいて、水素同位体が閉じ込め性能に及ぼす影響を評価し、プラズマを内部と周辺部に分離し、両者を繋ぐ大域的な相互作用を定量的に理解した。水素同位体質量の増加とともに閉じ込めが改善するのは、磁気軸シフトによって周辺部が安定化するためであることが分かった。プラズマ形状が異なる英国カラム核融合研究センターJET及び量子科学技術研究開発機構JT-60において、磁気軸シフトが周辺部に及ぼす影響とプラズマ形状の関係を解明した。高三角度・低楕円度では、高圧力化による不安定性で圧力勾配が低下するが、輸送障壁幅が広がり、周辺圧力を高く維持できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In the H-mode plasmas where the confinement is improved by the edge transport barrier in tokamak devices, the influence of hydrogen isotope mass on the plasma confinement has been investigated. The large-scale correlation between the edge and core plasmas has also been quantified. The increase of hydrogen isotope mass leads to the confinement improvement because the increase of the Shafranov shift due to the larger core pressure at heavier isotope stabilizes the edge plasmas. Then, the effects of Shafranov shift and plasma shape on the edge plasma structure have been assessed using JET and JT-60U. In particular, the increase of core pressure at high triangularity and low elongation resulted in the reduction of edge pressure gradient due to the destabilization of the pressure-driven mode whereas the wider pedestal was formed so that the edge pressure was kept high enough.

研究分野：工学

キーワード：炉心プラズマ Hモード 水素同位体 シャフラノフシフト

1. 研究開始当初の背景

次世代の核融合研究開発の世界的な中枢を担う国際熱核融合実験炉 ITER では、炉心プラズマの周辺部に形成される輸送障壁（周辺ペDESTル）によって閉じ込めが改善される H モードを標準運転方式としている。特に、この H モードはプラズマ境界近傍に局在した不安定性(ELM)を伴い、プラズマ周辺部の構造を決定している。H モードプラズマは微視的乱流が構造を支配しているプラズマコア部と電磁流体力学的不安定性が構造を支配しているプラズマ周辺部で明確に性質が異なる。一方で、近年 H モードの閉じ込め性能は局所的なパラメータの効果だけでなく、局所量と系全体との相互作用によって決まる可能性が指摘されている。従って、H モードプラズマのコア部及び周辺部の大域的な相互作用を理解し、適切に制御することは、H モードの閉じ込め性能を向上させるために極めて重要である。

従来、周辺部の温度が境界条件となってコア部の温度分布を決定する、分布硬直性は観測されていた。一方で、コア部が周辺部に及ぼす影響として、コア部のプラズマ圧力の増大に伴う磁気軸シフトにより、周辺部の電磁流体力学的不安定性が安定化することが理論的に指摘されていた。近年では、トカマクではこの磁気軸シフト（シャフラノフシフト）が周辺プラズマ、そしてプラズマ閉じ込め全体に重要な役割を果たすと考えられている。従って、H モードプラズマのコア部及び周辺部の大域的な相互作用を明らかにし、適切に制御することは、プラズマ周辺空間分布構造及びプラズマ境界近傍に局在する電磁流体力学的不安定性を相互に決定するプラズマ境界構造形成の物理を解明することにもなり、本研究は現在の国際的活動における最重要課題として位置付けられている。

2. 研究の目的

本研究ではトカマク式核融合炉においてプラズマ周辺部に形成される輸送障壁によって閉じ込めが改善される高閉じ込めモード(H モード)を対象として、水素同位体質量が炉心プラズマ閉じ込め性能に及ぼす影響を評価し、プラズマを乱流的輸送が支配する炉心内部プラズマ及び電磁流体力学的不安定性が構造を決定する周辺プラズマを分離し、両者を繋ぐ大域的な相互作用を定量的に理解することを目的とする。

本研究はトカマクにおける H モードプラズマのコア部及び周辺部の大域的な相互作用を明らかにした上で、高性能化へ向けた適切な指針を得るという核融合炉実現に向け

た革新的な研究である。また、本研究で得られる炉心プラズマの境界構造特性の総合的な理解は更なるプラズマの総合性能向上への指針を与え、能動的プラズマ制御の研究開発へと発展するという将来性がある。

3. 研究の方法

本研究では、核融合炉心プラズマという磁場で閉じ込められた電磁流体を異なる拡散過程が支配すると考えられる要素（粒子的要素及び空間的要素）に分離し、要素間の相関と結合の結果として系全体の燃焼プラズマ特性を評価する。これまで様々なトカマク装置で発見されている各種の高性能閉じ込めモードの輸送特性に対して、系統的な理解が進められてきたが、これらの多くはプラズマ電流等の巨視的なパラメータに対する零次元の取り扱いに依った議論である。本研究では、これらの議論を拡大し、局所的なパラメータの効果、及び局所量と系全体との相関を取り扱う。すなわち、密度、温度、圧力及び電流等の各種パラメータの空間的な分布効果（空間的要素）に重点を置き、装置固有の特性を取り入れて解析する。従って、これらの着目点に基づき、電子系及びイオン系プラズマ（粒子的要素）の精度の高い分布データを用いて局所量と全体量の相関を扱った研究を遂行する。

本研究では、H モードプラズマのコア部及び周辺部の大域的な相互作用を定量化するが、コア部から周辺部への影響と周辺部からコア部への影響を分離するのは困難であるため、水素同位体を導入して、これを解明することに注目している。水素同位体はプラズ

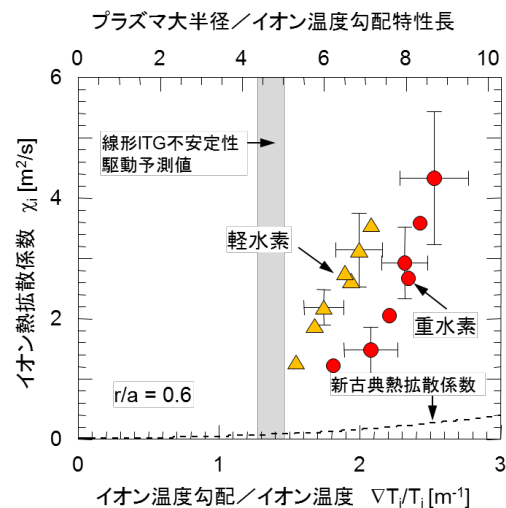


図1. 軽水素・重水素プラズマにおけるイオン温度勾配特性長とイオン温度熱拡散係数の関係。グレー領域は線形ITG不安定性が駆動される予測値を示す。

マの熱・粒子輸送をその質量比に基づいて変え得るが、電磁流体力学的不安定性は基本的に粒子種に依存しない。十分な核融合出力を満たす高閉じ込め炉心を実現するために必要な境界プラズマの圧力を高く維持しつつ、電磁流体力学的なプラズマ崩壊のリスクを低減するために、Hモードプラズマのコア部及び周辺部の大域的な相互作用を正確に理解する。

4. 研究成果

核融合炉心プラズマのイオン温度勾配特性長が水素同位体質量の増加とともに縮小することをJT-60における実験によって世界で初めて発見した。エネルギー閉じ込め時間は水素同位体質量に対して正の依存性を有することが経験的に知られているが、本研究はその物理的な理解を急速に進展させた成果である。

プラズマ熱輸送に対する水素同位体効果の知見を得ることは、現在世界的に軽水素や重水素実験を中心に実施されているのに対して、将来的に重水素・三重水素実験を計画しているITERを初めとする次世代核融合炉にとって極めて重要な課題である。本研究では、JT-60装置において、中性粒子加熱ビームを用いて熱流束を変化させ、プラズマコア部のイオン温度勾配特性長とイオン熱拡散係数の関係を軽水素及び重水素プラズマでそれぞれ調べたところ、図1に示すように、ある一定のイオン温度勾配特性長（=イオン温度/イオン温度勾配）におけるイオン熱拡散係数は、質量の小さい軽水素の方が約2倍程度増加し、一方で、ある一定のイオン熱拡散係数におけるイオン温度勾配特性長は、質量の大きな重水素の方が短いことを世界で初めて示した。通常、熱流束を増加させていくと、温度勾配特性長は次第に増加していくが、ある閾値を超えると、微視的不安定性によって熱拡散係数が急激に増加し、温度勾配特性長の変化が小さくなることが知られている。本研究は、このイオン温度勾配特性長が水素同位体によって異なることを定量的に示したものである。

次に、プラズマ全体の圧力指数（プラズマ圧力と閉じ込め磁場による圧力の比）の大きさは、プラズマ周辺部の電磁流体力学的不安定性を安定化させる効果があると指摘されている。そこで、Hモードにおける水素同位体の振る舞いに着目し、このような2つの異なる空間構造間の相互作用を定量的に評価し、Hモードの閉じ込めを決定するプロセスを明らかにした。軽・重水素でプラズマ全体の圧力指数を変化させる実験を実施し、図2(a)に示すように、同一の圧力指数を持つ場合、プラズマ周辺部の圧力分布は両者でほぼ一

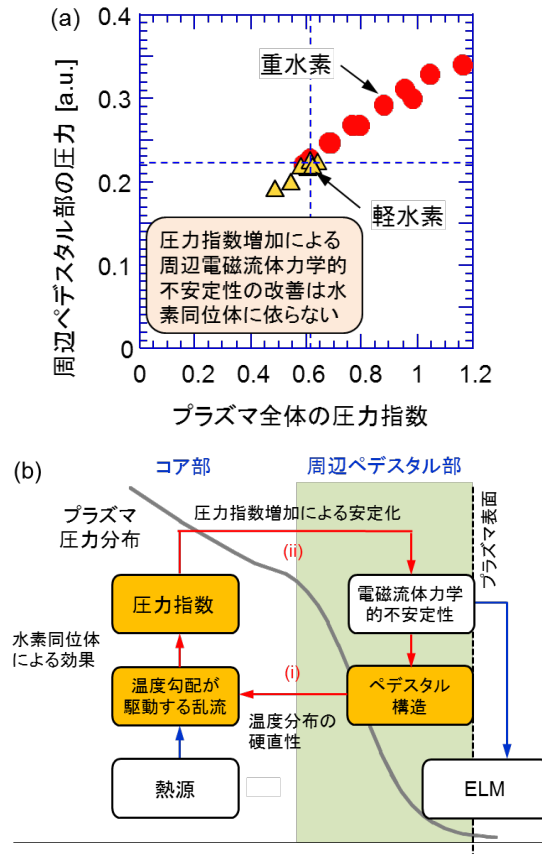


図2. (a) 軽・重水素プラズマにおける圧力指数の増加による周辺ペデスタル部の圧力の上昇。(b) Hモードにおけるコア部・周辺ペデスタル部の構造形成のプロセス:(i) 温度分布の硬直性に基づく周辺プラズマの境界条件としての役割、(ii) 圧力指数増加による安定化効果。

致した。これにより、周辺プラズマ構造に対する直接的な水素同位体効果は存在しないこと、及び圧力指数増加による周辺部不安定性の改善は水素同位体種に依らず決定されることを発見した。従って、これらの研究成果から、図2(b)に示すように、重い水素同位体種によるエネルギー閉じ込め時間の増加は、プラズマコア部に存在する乱れのスケールの縮小による熱拡散の低減に起因するプラズマ全体の圧力指数の増加、及びそれに伴う周辺部の電磁流体力学的不安定性の改善によってもたらされることを世界で初めて示すと同時に、Hモードのコア部・周辺部の連関と形成のプロセスを明確にした。

また、Hモードではプラズマ周辺部の電磁流体力学的不安定性で発生するELMと呼ばれる熱パルスの制御が課題となっており、この不安定性を抑制し、できるだけ高い周辺プラズマ圧力を形成することが十分な核融合出力を得るために重要である。近年、プラズマコア部を高圧力化させ、かつプラズマ断面

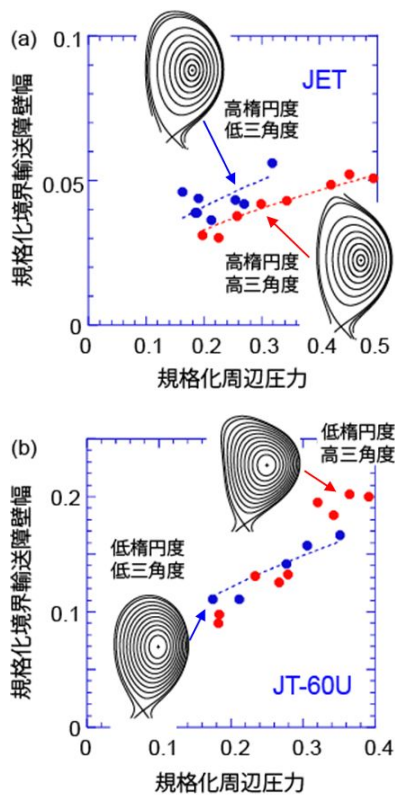


図3 . (a)JET 装置及び(b)JT-60U 装置における規格化境界輸送障壁幅と規格化周辺圧力値との関係。点線は規格化周辺圧力値の平方根による回帰分析結果を示す。

形状を高三角度化させるとプラズマ周辺部の電磁流体力学的不安定性が安定化することが観測されている。しかし、その場合に周辺プラズマ構造がどのように変化するかについては、未だによく分かっていなかった。そこで本研究では、プラズマ形状の異なる英国カラム核融合研究センターの JET 装置及び日本の JT-60U 装置でプラズマ形状（楕円度・三角度）を広範囲に変化させた実験により、高圧力化による周辺構造の変化がプラズマ断面形状によって異なることを明らかにした。

高い周辺プラズマ圧力を得るためには、Hモードによる境界輸送障壁の幅を広く保つ必要がある。従来、境界輸送障壁の幅と規格化周辺圧力の平方根は比例することが多くの装置で観測されている。この度、JET 装置と JT-60U 装置の両装置での高プラズマ圧力化の実験により、その関係はプラズマ断面形状によって異なることを明らかにした。図3 (a)に示すように、高楕円度の JET 装置では、プラズマ断面形状を高三角度化すると、規格化境界輸送障壁幅と規格化周辺圧力の平方根の比例関係における比例係数が次第に低下した。一方で、JT-60U 装置は、プラズマ断面形状を高三角度化すると、ポロイダルコイル電源の制約により、低楕円度化する。図3 (b)に示すように、高三角度・低楕円度の場

合には境界輸送障壁の幅は規格化周辺圧力の平方根より強い指数で増大することが分かった。周辺プラズマ構造の予測において、これまで考慮されていなかった高圧力化とプラズマ形状の影響を明らかにした本研究は、ITER での H モードの予測精度の向上に貢献する重要な成果である。

今後、プラズマ衝突周波数などのプラズマ周辺領域で将来の装置で外挿可能な無次元パラメータによる周辺プラズマ構造への影響をさらに詳しく調べていく予定である。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

浦野創 , 相羽信行 , 神谷健作 , 鎌田裕 , JT-60 チーム , Dependence of pedestal structure on collisionality at fixed beta in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, 56 巻, 2016, 016005

DOI: 10.1088/0029-5515/56/1/016005

浦野創 , 藤田隆明 , 井手俊介 , 宮田良明 , 松永剛 , 松川誠 , Development of operation scenarios for plasma breakdown and current ramp-up phases in JT-60SA tokamak, Fusion Engineering and Design, 査読有, 100 巻, 2015, 345

DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.138

浦野創 , 仲田資季 , 相羽信行 , 久保博孝 , 本多充 , 林伸彦 , 吉田麻衣子 , 鎌田裕 , JT-60 チーム , Roles of argon seeding in energy confinement and pedestal structure in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, 55 巻, 2015, 0033010

DOI: 10.1088/0029-5515/55/3/033010

浦野創 , Pedestal structure in H-mode plasmas, Nuclear Fusion, 査読有, 54 巻, 2013, 116001

DOI: 10.1088/0029-5515/54/11/116001

浦野創 , 滝塚知典 , 相羽信行 , 菊池満 , 仲野友英 , 藤田隆明 , 大山直幸 , 鎌田裕 , 林伸彦 , JT-60 チーム , Hydrogen isotope effects on ITG scale length, pedestal and confinement in JT-60 H-mode plasmas, Nuclear Fusion, 査読有, 53 巻, 2013, 083003

DOI: 10.1088/0029-5515/53/8/083003

[学会発表] (計 6 件)

浦野創 , Global stabilization effect of Shafranov shift on the edge pedestal plasmas in JET and JT-60U, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 国立

京都国際会館（京都府・京都市），2016年10月17-22日

浦野創，Extended pedestal width in JET H-mode plasmas with a metallic Be/W wall, 15th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barrier, ガルヒング・独国, 2015年10月19-21日

浦野創，Dependence of pedestal structure on collisionality in JT-60U, 42nd Eur. Conf. on Plasma Physics, リスボン・ポルトガル, 2015年6月22-26日

浦野創，Hydrogen isotope effect on H-mode in JT-60U, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ（新潟県・新潟市），2014年11月18-21日

浦野創，Role of seed impurity for H-mode plasmas in JT-60U, 41st Eur. Conf. on Plasma Physics, ベルリン・独国, 2014年6月23-27日

浦野創，金属壁・ダイバータにおける周辺プラズマ特性, 第30回プラズマ・核融合学会年会, 東京工業大学（東京都・目黒区），2013年12月6日

6．研究組織

(1)研究代表者

浦野 創（URANO HAJIME）
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
研究者番号：70391258