

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03594

研究課題名（和文）核融合炉における高ベータ化と境界プラズマ自己構造形成に関する研究

研究課題名（英文）Self-organization of edge plasma at high beta in fusion reactor

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・那珂研究所 先進プラズマ研究部・グループリーダー

研究者番号：70391258

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：トカマク実験においては、閉じ込め時間は水素同位体質量に対して正の依存性を持つことが経験的に知られている。そこで、本研究では、軽水素・重水素の高閉じ込めモードでは重水素プラズマの周辺部が高い圧力を持つことに着目し、重水素時に周辺部が安定化する原理を解析した。重水素プラズマでは、コア部の温度勾配に起因する微視的不安定性が抑制されるため、高い圧力が得られる。従って、プラズマコア部の改善による高プラズマ圧力化による磁気軸シフトが発生し、周辺プラズマ部のMHD不安定性が改善したため、高い周辺部圧力が得られることが分かった。本研究により、高ベータ化と境界プラズマ自己構造形成との関係を示す実験的証拠を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、Hモードプラズマの大域的な相互作用のプロセスを明確にした。このフィードバック機構は高楕円度、高三角度化したプラズマ形状において成立するため、その基盤となる放電立ち上げシナリオの作成、及び実時間でのプラズマ位置形状制御手法の開発が重要であり、等磁束制御において優先的にプラズマ位置形状制御を行う適応型電圧配分スキームを開発した本研究の成果は、Hモードプラズマにおける高プラズマ圧力化による磁気軸シフトの発生に伴い、周辺プラズマ部のMHD不安定性を改善させるためにプラズマ形状を適切に維持・制御し、高ベータプラズマの生成と維持へ向けた立ち上げシナリオの確立に向けて貢献する重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：In tokamak, energy confinement time depends positively on the hydrogen isotope mass. In this study, focusing on high edge pedestal pressure on deuterium plasma in H-mode, the stabilization effect on edge plasma was investigated. In deuterium case, the micro-instability induced by the temperature gradient in the plasma core is suppressed and thus high core confinement is obtained. Accordingly, large shift of the magnetic axis due to the high core pressure stabilizes the plasma edge, resulting in the high edge pressure. This result indicates the relationship between high beta plasma and the self-organization of edge plasma.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：Hモード 高ベータ プラズマ位置形状制御 水素同位体 トカマク JT-60

## 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、特に高楕円度、高三角度のプラズマ形状におい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、トカマクではこのプラズマ形状の適切な制御が周辺プラズマ、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、高閉じ込めモードのプラズマ周辺部をより安定化させる高楕円度、高三角度化したプラズマ形状を適切に維持し、高ベータプラズマへ向けた立ち上げシナリオを確立することは非常に重要な課題である。

## 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、プラズマ周辺構造を周辺部の局所的な性質ではなく、磁気軸シフト及びプラズマ形状という炉心プラズマ全体の観点から理解する必要があるという着想に基づき、炉心プラズマの高圧力化に伴って起こる磁気軸シフト及びプラズマ形状がプラズマ周辺構造に与える影響に着目している。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し、高閉じ込めモードのプラズマ周辺部をより安定化させるプラズマ形状を適切に維持し、高ベータプラズマへ向けた立ち上げシナリオを確立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、プラズマ形状を適切に生成・維持し、高性能化（高ベータ化）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重要な研究である。また、本研究で得られるプラズマシナリオ開発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とともに、本効果が有効となるプラズマ形状制御の手法開発を進める。

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着目している。水素同位体はプラズマの熱・粒子輸送をその質

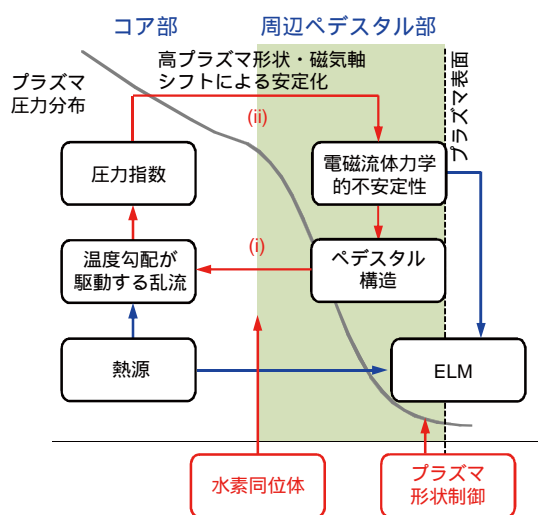


図1. H モードにおけるコア部・周辺ペDESTル部の構造形成のプロセス:(i) 温度分布の硬直性に基づく周辺プラズマの境界条件としての役割、(ii) 高プラズマ形状・磁気軸シフトによる安定化効果。

水素同位体を導入して、これを解明することに着目している。水素同位体はプラズマの熱・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、電磁流体力学的不安定性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し、本効果を最大限に活用するために必要となる適切なプラズマ形状制御手法を確立する。

#### 4. 研究成果

トカマク実験においては、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。そこで、本研究では、軽水素・重水素の高閉じ込めモードでは重水素プラズマの周辺部が高い圧力を持つことに着目し、重水素時に周辺部が安定化する原理を解析した。重水素プラズマでは、コア部の温度勾配に起因する微視的不安定性が抑制されるため、高い圧力が得られる。従って、プラズマコア部の改善による高プラズマ圧力化による磁気軸シフトが発生し、周辺プラズマ部のMHD不安定性が改善したため、高い周辺部圧力が得られることが分かった。本研究により、高ベータ化と境界プラズマ自己構造形成との関係を示す実験的証拠を得た。

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のダイアグラムに示すように、コア部における温度勾配が駆動する乱流の性質が水素同位体によって異なる(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)ことから、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)は重水素の方が大きくなる。そして、この圧力指数の大きさは、高楕円度、高三角度化したプラズマ形状において、磁気軸シフトにより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。従って、この効果により重水素の方が高い周辺ペデスタル圧力を有する結果となることを示した。

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、ほぼ同一の吸収パワーに対し、重水素の方が軽水素より高い周辺イオン温度を示した。また、このときのプラズマ境界近傍での電磁流体力学的不安定性解析結果を図2(b)に示す。圧力指数を持つ重水素の方が、軽水素に比べて安定領域が拡大され、より高い周辺プラズマ圧力が得られることを示した。これらの研究成果から、重い水素同位体種では、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正のフィードバックがもたらされることを示すと同時に、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のプロセスを明確にした。

また、このフィードバック機構は高楕円度、高三角度化したプラズマ形状において成立するため、その基盤となる放電立ち上げシナリオの作成、及び実時間でのプラズマ位置形状制御手法の開発をJT-60SA装置において行った。JT-60SA装置では、ポロイダルコイルを用いて、プラズマ電流値とプラズマ位置形状を磁束分布から等価に評価し、制御する等磁束制御を採用している。しかし、超伝導コイルではインダクタンスが大きいので、特にプラズマ電流やプラズマ形状を同時に変化させる必要がある。プラズマ立ち上げ中等には指令電圧がコイル電源の定格電圧を超えてしまうことが多いことが課題となっている。そこでコイル電源電圧の仕様状況をリアルタイムにモニタしながら、等磁束制御におけるプラズマ電流制御のゲインを下げ、優先的にプラズマ位置形状制御を行う適応型電圧配分スキームを開発し、コイル電源電圧の最適化を行うシステムを導入した。これによって、Hモードプラズマにおける高プラズマ圧力化による磁気軸シフトの発生に伴い、周辺プラズマ部のMHD不安定性を改善させるために重要なプラズマ形状(高楕円度、高三角度)を適切に維持・制御し、高ベータプラズマの生成と維持へ向けた立ち上げシナリオの確立に向けて貢献する重要な成果である。

今後、プラズマ境界近傍の電流分布などのプラズマ周辺領域でのパラメータによるプラズマ

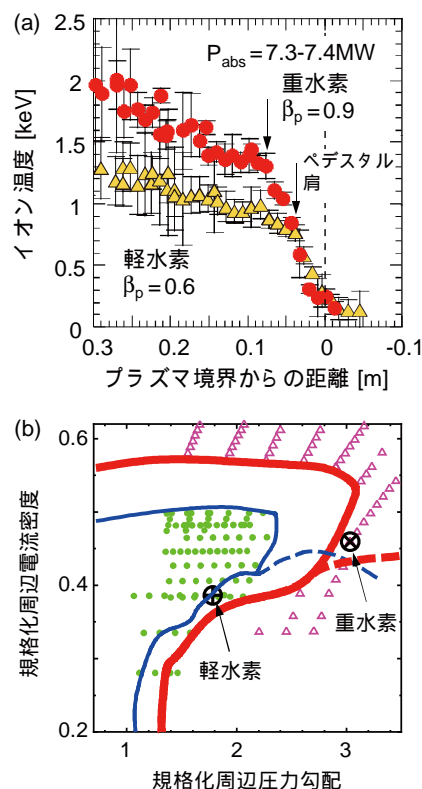


図2. (a) 軽水素・重水素Hモードにおける周辺イオン温度分布、(b) 軽水素・重水素Hモードにおけるプラズマ周辺部の安定性解析結果。

位置形状制御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

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Urano H, Narita E	4. 巻 63
2. 論文標題 Review of hydrogen isotope effects on H-mode confinement in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 084003 ~ 084003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac048c	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 Urano H., JT-60SA Team	4. 巻 6
2. 論文標題 Development of plasma control schemes and plan of plasma physics studies in JT-60SA	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41614-022-00089-x	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4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 浦野 創
2. 発表標題 Development of plasma control schemes and plan of plasma physics studies in JT-60SA
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浦野 創
2. 発表標題 JT-60SAにおけるプラズマ着火解析
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 浦野創
2. 発表標題 JT-60SAにおけるプラズマ着火解析
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 浦野創
2. 発表標題 The Focus of Plasma Research in JT-60SA for ITER and DEMO
3. 学会等名 20th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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