

令和 3 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：2018～2020

課題番号：18K03592

研究課題名(和文) トカマクプラズマの定常化運転に必要なMHD不安定性モード結合の発生条件の解明

研究課題名(英文) Understanding of mode combinations between Magnetohydrodynamic instabilities for steady-state operations in tokamak plasmas

研究代表者

東條 寛 (Tojo, Hiroshi)

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・主幹研究員

研究者番号：80549212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：今まで詳細に明らかにされていなかったプラズマ圧力を高めていく過程での負磁気シア配位のディスラプションについて、新しい安全係数(電流分布)の解析手法を開発しつつ、原因となるMHD不安定性は抵抗性壁モードであることを突き止めた。抵抗性壁モードの抑制には真空容器内部でモードの成長を打ち消す専用のコイルを制御したり、中性粒子入射装置の加熱によりプラズマの回転を制御することが有効と考えられ、それらの制御を加味した運転シナリオの道筋を本研究で明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トカマク型核融合装置を念頭に置いた場合、プラズマを長時間維持するには、高周波加熱装置や中性粒子入射装置による外部駆動の電流や、プラズマの圧力勾配により駆動される自発電流が必須である。本研究では、それらの条件が得やすいプラズマ配位を作る最中において、頻発するプラズマの瞬時崩壊の原因を突き止めた。上記は、核融合装置の運転手法を検討する上で今後不可欠な知見となる。

研究成果の概要(英文)：This study found that a Magnetohydrodynamic instability leading to plasma disruptions during pressure enhancement stages was the resistive wall mode. A new tool providing the safety factor, i.e. plasma current profile, was also developed for the analysis. Dedicated in vessel coils for canceling the mode growth and control of the plasma rotations using neutral beam heating systems can suppress the resistive modes. This study will contribute to building various operation scenarios with avoiding the disruptions.

研究分野：炉心プラズマのディスラプション

キーワード：負磁気シア ディスラプション

### 1. 研究開始当初の背景

核融合発電を念頭に置いた場合、トカマクプラズマを長時間維持するには、高周波加熱装置や中性粒子入射装置による外部駆動の電流や、プラズマの圧力勾配により駆動される自発電流が必要である。自発電流を多く流すと経済性が高い核融合炉になるが、図1のように急な圧力勾配がある領域(内部輸送障壁や周辺ペDESTル)を作るように既存の実験装置は放電開発を進めている。この時プラズマ内の磁場のピッチは、図1(下)のようにプラズマ中心付近から周辺方向に向かって負の傾きを示す。この配位を「負磁気シア配位」と呼ぶ。近年は、この配位で高いプラズマ圧力になった場合に発生する抵抗性壁モードのプラズマ回転制御や外部摂動磁場による安定化を目指した実験が精力的に行われている。各装置では負磁気シア配位でプラズマ圧力を高めていく過程でプラズマの制御が不能になりプラズマ電流が瞬時になくなるディスラプションが発生する。予期できない計画外のディスラプションは、装置へのダメージを発生させるので、避けるのが必須である。加熱パワーや入射時期を微調整するなど運転シナリオを調整することでその発生の回避を図っている。一般にディスラプションの発生は、内部キンクモード、抵抗性壁モード、テアリングモードのようなMHD不安定性モードの発生と成長が要因となる。さらには、複数のMHD不安定性が結合する場合もある。本研究の対象となるプラズマ圧力を高めていく過程で生じるディスラプションがどの起源によるものかは、これまで詳細に解析されていない。それらの解析結果を明らかにし運転シナリオの作成に道筋をつける事が求められている。

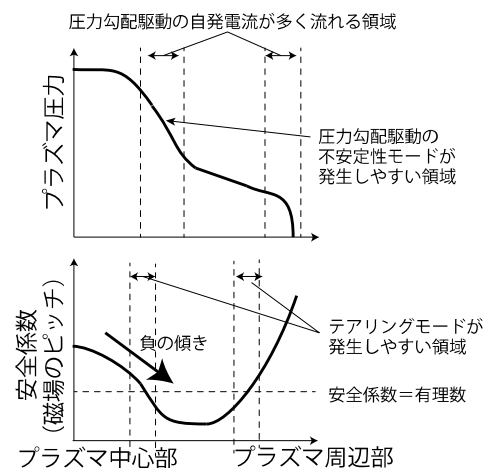


図1 プラズマ圧力と磁場ピッチの分布とMHD不安定性モード発生場所

### 2. 研究の目的

本研究では、負磁気シア配位でプラズマ圧力を高めていく過程でディスラプションが発生する原因を突き止めディスラプションの回避を行うためのシナリオを考案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

国内最大のトカマクである JT-60U 装置での高プラズマ圧力を目指した過去の放電を主としたデータ解析を行う。MHD不安定性モードが原因でディスラプションが起きる直前のパラメータを計測器のデータを利用し評価する。具体的には電子サイクロトロン放射(ECE)による電子温度揺動計測だけでなく、軟X線放射強度分布計測、磁気プローブ(25ヶ所に配置)を駆使し、それぞれの信号の揺動位相差からMHD不安定性モードの波数を決定する。また、線形MHDコードMARG2Dを利用し、MHD不安定性モード成長率や分布を計算することで、理論との整合性や、不安定性の種類を探る。

### 4. 研究成果

#### (1) 負磁気シアを有するプラズマの解析手法の開発

負磁気シアを持つ安全係数分布(プラズマ内部の磁場のピッチ角分布)の推定では、プラズマの平衡を計算し、プラズマ内部や外部両方の計測結果と整合する結果を出力させることが必要である。そのためにはプラズマ内部の磁場の計測結果から、期待される電流分布をプラズマの時刻1点ずつ解析者自らが推定して手動で与える必要がある。このため磁気計測等と比べ尤もらしい平衡を求めるまでに解析に膨大な時間がかかっており、十分なデータ量でプラズマの不安定性解析を行うのはこれまで容易でなかった。本研究では、負磁気シアを持つ安全係数分布の推定を自動で行うアルゴリズムを開発し、開発効率を大幅に向上させた。開発したアルゴリズムにおいては、電流分布をある関数形で与え、その関数のパラメータをグリッドサーチにより探索し、磁気流体力学的平衡として妥当なパラメータを選択する。あるプラズマ実験では、解析対象である0.3s間について毎

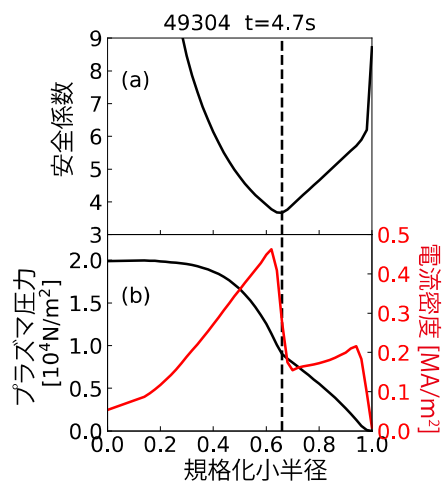


図2 平衡計算によって求めた(a): 安全係数、(b): プラズマ圧力と電流密度の分布

0.01s で安全係数分布を求める場合、1 時間程度で評価できる。

上記のアルゴリズムで評価された平衡による安全係数分布は先行研究で示されたものと一致し、開発したアルゴリズムが妥当であることを複数のデータで確認した。開発したアルゴリズムを用いることで、安全係数分布の詳細な時間発展を短時間で評価できるようになり、安全係数分布とディスラプションの関係を効率よく評価できるようになった。例として図 2 に、求めた安全係数、プラズマ圧力、電流密度分布を示す。規格化小半径が 0.6 付近で安全係数が最小値をとり、プラズマ外側に向かって上昇していくのがわかり、負磁気シア配位であることを示す。

## (2) プラズマ圧力を高めていく過程でディスラプション解析結果

JT-60U 装置での高プラズマ圧力を目指した負磁気シアを持つ複数の放電について、前節で開発した手法を利用しつつ解析を行った。代表的な放電 (図 2 と同じ放電: 49304) について説明する。負磁気シア配位になるようにプラズマ加熱の場所や磁気配位を調節している。t = 4.7s に n = 1 のモード数を伴った MHD 不安定性モードが発生し、ディスラプションを起こしている (n はトロイダル方向の波数である)。この n = 1 の MHD 不安定性モードの成長時定数は約 800 $\mu$ s でキンクモードのような理想的な MHD 不安定性 (数 $\mu$ s) に比べ十分遅い。ここで MHD 不安定性モードによる変位の分布を理論的に調べるため MARG2D コードを用いた。結果を図 3 に示す。イオン温度の勾配が中心に向かって強くなり始める地点で安全係数が最小となっている (縦の点線)。この場所で、m = 4 の構造を持った理論的な変位が大きく出ているのが図 3 (b) でわかる (m はポロイダル方向の波数)。全ての m 成分を合成した変位とトムソン散乱計測で計測した電子温度勾配の積は、電子温度自体の変位の分布とほぼ一致しており同コードが実験結果を再現できているのがわかる (図 3 (c))。このプラズマ圧力を高めていく過程で発生した不安定性モードは抵抗性壁モードであると結論づけた。理由は 2 点ある。MARG2D において、理想的な壁があると仮定した場合、上記の不安定性の発生が抑制できるという点と、典型的な抵抗性壁モードの成長率を示している点が挙げられる。

他の負磁気シア配位のディスラプションを伴う放電について、抵抗性壁モードの発生を示すために、複数の放電についてイオン圧力勾配 (最大値) とプラズマ外側の安全係数を比較した。結果を図 4 に示す。ここでは、イオン密度は、線積分電子密度計測結果から準中性条件を加味して推定した平均密度である。イオン温度は、荷電交換再結合分光から求めた炭素のイオン温度である。プラズマ電流はプラズマの外側付近で大きく流れていると考えられる。この電流が一定と考えた場合、抵抗性壁モードは安全係数が低いほど不安定になりやすい。図 4 (a) は、安全係数が高くないと急峻な圧力勾配を持っていないことを示しており、複数の類似条件の放電について抵抗性壁モードが不安定になりディスラプションを発生させていることを示す。

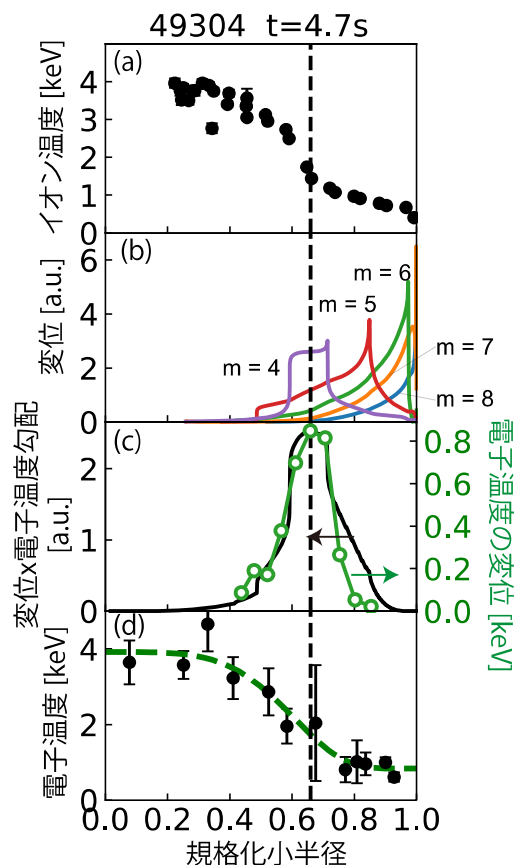


図 3 ディスラプション発生直前 (E49304) での (a): イオン温度分布、(b): MARG2D による不安定性による変位分布、(c): (b) で示した変位と電子温度勾配 (計測値) の積と電子温度の変位量の分布、(d): 電子温度分布

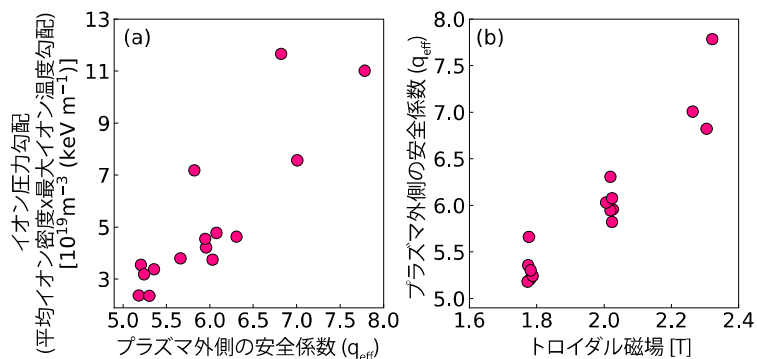


図 4 ディスラプション直前での (a): イオン圧力勾配 (最大値) と安全係数の関係 (b): 安全係数とトロイダル磁場の関係

### (3) まとめと今後の展望

今まで詳細に明らかにされていなかったプラズマ圧力を高めていく過程での負磁気シア配位でのディスラプションについて、新しい安全係数(電流分布)の解析手法を開発しつつ、原因となる MHD 不安定性は抵抗性壁モードであることを突き止めた。抵抗性壁モードの抑制には真空容器内部で、モードの成長を打ち消す専用のコイルを制御したり、中性粒子入射装置の加熱によりプラズマの回転を制御することが有効と考えられている。具体的な運転シナリオの作成にまでは到達しなかったものの、それらの制御を加味した運転シナリオの道筋を本研究で明らかにすることができた。運転領域の拡大に貢献できる。今後は、JT-60SA または原型炉のような高圧力かつ負磁気シア配位を有するプラズマに対し具体的な運転シナリオの作成と実証を行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Takahiro BANDO, Hiroshi TOJO, Manabu TAKECHI, Nobuyuki AIBA, Takuma WAKATSUKI, Maiko YOSHIDA, Shizuo INOUE, and Go MATSUNAGA	4. 巻 -
2. 論文標題 On collapses in strong reversed shear plasmas during or just after plasma current ramp-up in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	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） なし	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0件

〔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
研究協力者	坂東 隆宏  (Bando Takahiro)		
研究協力者	相羽 信行  (Nobuyuki Aiba)		

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