

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：53701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820400

研究課題名(和文)トカマク型核融合発電炉に向けた高精度なハロー電流発生予測モデルの構築

研究課題名(英文) Study for the accurate predictive model of halo current during the disruption in tokamak nuclear fusion reactor

研究代表者

柴田 欣秀 (SHIBATA, Yoshihide)

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・助教

研究者番号：20633209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：トカマク型核融合炉におけるディスラプション現象は装置に多大な負荷を与えるため、正確な予測・回避法の開発が必須となっている。本研究では、ハロー電流発生に関して、実験データ、シミュレーションを組み合わせた解析を行い、(1)ディスラプション時の電子温度の低い放電ではプラズマ全体の面積平均の電子温度で電流減衰が決まる。(2)電子温度が高い状態での電流減衰では電流減衰を決めている電子温度分布の時間変化はディスラプションが発生する直前のMHD不安定性に関係している。(3)プラズマの垂直位置移動にはプラズマが向かう方向にある導体構造物がプラズマを跳ね返す役割が非常に大きいことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Development of accurate predictive model of disruption, especially halo current, is important since disruption leads to a huge damage for nuclear fusion reactor. In this study, we investigated the halo current prediction model by using a combination between experimental data and disruption simulation code, and obtained the following findings: (1) The decay of plasma current with a low electron temperature during the disruption is determined by the area-averaged value of electron temperature. (2) time change of electron temperature profile which is caused to the decay of plasma current is related to MHD instability just before disruption occurs. (3) Conductive structures are very important for a strong returning force to oncoming plasma when a vertical displacement event is occurred.

研究分野：トカマク型核融合装置におけるディスラプション現象の実験・解析・シミュレーション

キーワード：ディスラプション トカマク型核融合装置 ハロー電流 ディスラプションシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉ITERでも採用されているトカマク型核融合装置では突然プラズマの閉じ込めが失われ、プラズマが持つ巨大なエネルギーを数十ミリ秒という短時間に放出するディスラプションという現象が存在する。この現象では核融合プラズマの閉じ込めに必要なプラズマ電流が急激に減少、消滅してしまうため、核融合反応が停止するだけでなく装置に多大な影響を与える恐れがある。そのため、トカマク型核融合炉の実現において、ディスラプションは解決すべき大きな課題の1つとなっている。

本研究ではハロー電流により発生する電磁力の評価を主眼とする。ハロー電流の大きさはプラズマの移動速度、電流消滅速度の他、ハロー領域の抵抗値に依存する。ハロー領域の抵抗値を評価するためには、ハロー領域の電子温度と幅の評価が必要になるが、特にハロー領域の幅を実験的に評価することは非常に難しい。ITERで使用されている2次元軸対称ディスラプションシミュレーションコードDINAではハロー領域の幅の評価のために実験データを用いて半経験的にモデルを構築しているが、直接的にハロー領域の幅の計測値と比較していない。さらに、ハロー領域の電子温度計測を行った例はなく、ハロー電流の評価モデルの精度向上のためにモデルと計測データの比較が必要となっている。

電流消滅速度については研究代表者らのこれまでの研究により、電流クエンチの初期段階においては既存の電流消滅速度評価モデルでは説明できずプラズマインダクタンスの時間変化が決定していること、シミュレーションでは取り扱われていない高温の電子温度分布が存在し、その分布の変化がプラズマインダクタンスの時間変化に関連していることがJT-60Uの実験データより分かっている。しかし、シミュレーションではディスラプション時の電子温度分布を考慮していないなど、実験結果と異なっているモデルを使用している為、実験データを用いた検証が必要となっている。

2. 研究の目的

トカマク型核融合装置ではプラズマが突然消滅し、周囲の構造物に巨大な熱負荷・電磁力が発生するディスラプション現象が存在する。現在フランスに建設中の国際熱核融合実験炉ITERなどの大型トカマク装置では過大な電磁力は装置破壊を引き起こすため、事前に正確な負荷評価を行う必要がある。通常はディスラプションシミュレーションコードを用いて、最悪な状況を想定し、評価した装置負荷を用いて装置設計を行う。しかし、既存のディスラプションシミュレーションコードでは装置負荷の原因となるハロー電流の予測モデルが組み込まれているが、現状では実験的検証がほとんど行われていない。

そのため、ハロー電流の基礎的な物理現象を調査し、それに基づいた予測モデルを構築することが必要となっている。本研究ではディスラプション時のハロー電流発生モデルの検証・最適化を大型トカマク装置JT-60Uや他の装置のデータを用いて実施することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究ではハロー電流の発生に関わる(1)電流消滅速度、(2)プラズマの移動速度、(3)ハロー領域の抵抗値について研究を行う。具体的には下記の通りである。

(1) 電流消滅速度については、JT-60Uの研究において電流減衰初期における解析のみである。しかし、ハロー電流の発生には電流クエンチ全体が影響するため、電流減衰初期以降の電流減衰機構の調査を実験データ、ディスラプションシミュレーションコードを用いて行うこと、また、電流減衰初期においては電流減衰に大きく関わっている電子温度の時間変化がどのような機構で決定しているのかをディスラプションを発生させているMHD不安定性に着目し、安定性計算と実験データを用いた解析を実施する。

(2) プラズマの移動速度については、真空容器、制御コイルがプラズマの移動に影響が大きいこと、また、プラズマ形状も影響を与えることが予想されるため、大型トカマク装置JT-60Uと現在設計が進められている核融合実証炉DEMOにおいてディスラプションシミュレーション計算を実施し、真空容器、制御コイル、プラズマ形状を変更した場合のプラズマの移動速度に与える影響を調査する。

(3) ハロー領域の抵抗値の抵抗値については、過去に行われたJT-60Uの実験データを調査し、ハロー領域の幅、電子温度、ハロー電流の発生量などとディスラプションシミュレーションコードとの比較を行う。

4. 研究成果

(1) ディスラプションシミュレーションコードはプラズマ平衡、真空容器、外部コイルなどとのカップリングなど実際の放電時の状態に近い計算を行うことが可能である。電流消滅速度に関して先行研究を実施しているJT-60Uのディスラプションにおいて、電流減衰時間の決定機構が調査されていない電流クエンチ初期以降の時間帯において、ディスラプションシミュレーションコードと実験データを組み合わせた解析を実施した。電子サイクロトロン放射(ECE)計測において、電流クエンチ初期以降では、電子温度は計測限界の100eV以下の電子温度であることは実験的にわかっている。そのため、ECEでは計測できない3種類の電子温度を仮定し、ディスラプションシミュレーションコードに代入して計算した。その結果を図1に示す。シミュレーションの結果、電流クエンチ初期以降では電流クエンチ初期とは違い、プラズマ

インダクタンスの時間変化でプラズマ電流が減衰しているのではなく、プラズマ抵抗により減衰していることが判明した。さらに、様々な形の電子温度を仮定したが、プラズマ電流の減衰は大きく違わなかった。それは、仮定した電子温度の分布の形状は異なるが、面積平均の電子温度にはさほど差異はなく、実験の電流減衰とシミュレーションの結果に良い一致が見られることから、電流クエンチ初期以降のように電子温度が十分に低い状態ではプラズマ全体（面積平均値）の電子温度によりプラズマ電流の減衰が決定していることが判明した。

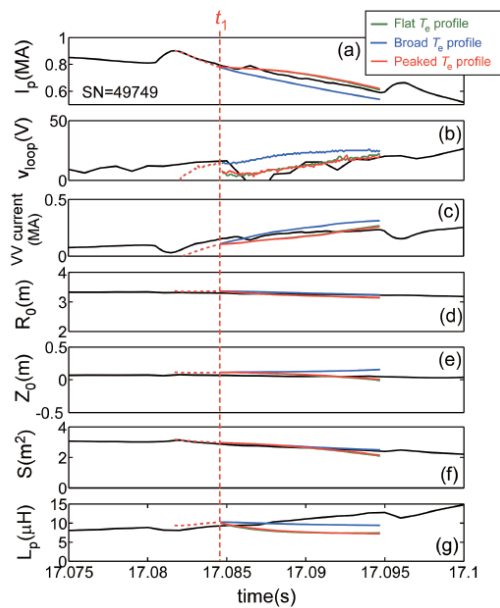


図 1：3 種類の電子温度を仮定した場合のディスラプションシミュレーションコードでの計算結果。(a) プラズマ電流、(b) 周回電圧、(c) うず電流、(d) プラズマ中心、(e) プラズマ垂直位置、(f) プラズマ断面積、(g) プラズマインダクタンスの時間発展。

(2) 電流クエンチ初期の電流減衰では先行研究により、多量ネオンガスバフを用いて発生したディスラプションでは電子温度はプラズマ中心で 400eV 以上あり、分布を持ち、かつ、その電子温度分布の時間変化がプラズマインダクタンスを変化させ、プラズマ電流を減衰させていることが判明している。そこで、ディスラプション発生前の MHD 不安定性に着目し、ディスラプションシミュレーションコードと MHD 安定性計算 (MINERVA) を連携計算させて解析を実施した。図 2 に DINA コードで計算したディスラプション発生直前の電流密度分布の比較結果を示す。解析した放電ではディスラプション直前のプラズマ表面の安全係数が大きくなるほど、電流減衰時間が大きくなることが実験的にわかっており、シミュレーションによりディスラプション直前の電流密度分布も図 2 のように安全係数が大きいほど、電流密度分布のピークが内側にくることがわかった。そこで、この電流

密度分布を用いて MHD 安定性計算を実施したところ、発生する MHD 不安定性のモードのピークや広がりには違いがあることがわかった。このようにディスラプション発生前の MHD 不安定性が発生後の電流減衰に影響を与えていることが一連の計算により示唆された。

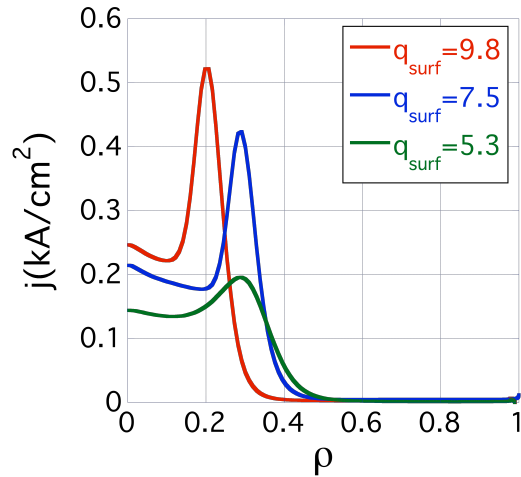


図 2：プラズマ表面の安全係数が違う放電での DINA コードで計算したディスラプション発生前の電流密度分布の比較

(3) ハロー電流発生において、プラズマの垂直方向の動き（垂直位置移動現象）はハロー電流発生量を決める非常に重要なパラメータとなる。そこで、本研究では形状、大きさが違う 2 つのトカマク型核融合装置でディスラプションシミュレーションを実施し、垂直位置移動現象の物理機構について検討を行った。JT-60U での検討においては、ディスラプション時の電子温度が低い放電ほど電流減衰率が大きくなり、真空容器等のプラズマ周囲にある導体構造物に発生するうず電流が増大し、プラズマ平衡に大きな影響を与えるため垂直位置の動きが大きくなることがわかった。しかし、真空容器等の導体構造物の抵抗値を変化させて、うず電流の発生量を変化させたところ、うず電流が多く発生する状況でもプラズマの動きは遅くなることもあり、単純にうず電流の総量ではなく、詳細なうず電流の発生分布を考慮して解析する必要があることがわかった。

核融合実証炉 DEMO は JT-60U に比べてかなり大きく、制御コイル、真空容器等の導体構造物は必然的に JT-60U に比べてプラズマから遠い位置に設置される。そのため、DEMO における垂直位置移動現象のシミュレーションにおいて、垂直位置の移動は JT-60U に比べてかなり早くなることがわかった。また、プラズマが動く方向に導体構造物がある場合、その構造物にうず電流が発生し、プラズマを押し返し、垂直位置の動きが遅くなることがわかった。その結果を図 3 に示す。この計算ではディスラプション時にプラズマは装置下方に動いているが、プラズマの向かう方向に導体構造物が少ない場合（青線）の

方が、導体構造物が多い場合（赤線）に比べて、プラズマの垂直方向の動きは早くなり、ハロー電流の発生量は多くなることがわかった。これらの計算により、DEMOのようにプラズマ周辺の導体構造物がプラズマから遠い状況では、特にプラズマが向かう方向にある導体構造物が重要であり、その構造に多くのうず電流が発生するため、装置負荷も大きくなることがわかった。

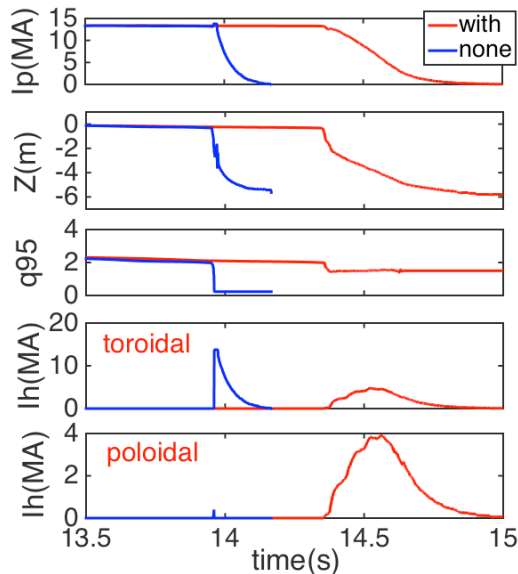


図 3：核融合実証炉 DEMO におけるディスラプション時のシミュレーション結果（プラズマ電流 I_p 、垂直位置 Z 、プラズマ表面の安全係数 q_{95} 、トロイダル、ポロイダル方向のハロー電流 I_h ）の比較結果（青線が導体構造物が少ない場合、赤が多い場合の計算結果を示す）

(4)ハロー領域発生予測モデルについては、実験装置との比較が必要であるため、JT-60U に過去に実施されているハロー電流計測実験のデータ解析を実施したところ、かなり昔に実施した実験であったため、現状では解析を行うには実験データが不十分であることが判明した。そのため、精力的にハロー電流の実験・解析を行っている大型トカマク装置 DIII-D での評価法を調査し、JT-60U にその評価法の適応を行った。研究期間内では評価法の適応のみとなってしまったため、今後は実験データを評価し、様々な条件下での実験データとディスラプションコードのハロー領域発生との比較を実施し、評価モデルの予測精度の検証を実施する予定である。

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 2 件）

①Y. Shibata, A. Isayama, G. Matsunaga, Y. Kawano, S. Miyamoto, *et. al.*, “Role of the electron temperature in the current decay during disruption in JT-60U”, *Plasma and Fusion Research* **9** (2014) 3402084. (査読有)

②Y. Shibata, A. Isayama, S. Miyamoto, S. Kawakami, K.Y. Watanabe, *et. al.*, “The effect of the electron temperature and current density profiles on the plasma current decay in JT-60U disruptions”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **56** (2014) 045008. (査読有)

〔学会発表〕（計 7 件）

①柴田欣秀, 清水星汰, 松山顕之, 朝倉伸幸, 大野哲靖, 坂本宜照, 「原型炉におけるディスラプションプラズマの検討」, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学, ポスター番号: 30aP83(2016 年 11 月)

②柴田欣秀, 白石淳也, 松永剛, 榊原悟, 諫山明彦, 他 2 名, 「JT-60U 多量ネオンガスパフディスラプション時の電子温度分布に対する MHD 不安定性の役割」, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 名古屋大学, ポスター番号:25aE08P (2015 年 11 月)

③大野拓弥, 林裕貴, 鈴木陽介, 大野哲靖, 松永剛, 柴田欣秀, 他 4 名, 「小型トカマク装置におけるトロイダル磁場変調の周辺磁場構造への影響」, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 名古屋大学, ポスター番号:25aE15P (2015 年 11 月)

④岡本征晃, 林祐貴, 鈴木陽介, 大野拓弥, 大野哲靖, 柴田欣秀, 他 4 名, 「HYBTOK-II トカマクにおける共鳴摂動磁場と MHD 不安定性との相互作用に関する研究」, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 名古屋大学, ポスター番号:24pE03P (2015 年 11 月)

⑤鈴木陽介, 林裕貴, 大野拓弥, 大野哲靖, 松永剛, 菊池祐介, 柴田欣秀, 他 4 名, 「小型トカマク装置を用いたトロイダル磁場変調によるプラズマ制御に関する検討」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 (2015 年 9 月, 口頭発表)

⑥Y. Shibata, G. Matsunaga, S. Sakakibara, Y. Kawano, A. Isayama, *et. al.*, ”Influence of MHD instability just before disruption on the electron temperature profile after the thermal quench in JT-60U”, *Plasma Conference 2014, Niigata, Japan 18-21 November 2014.* (ポスター発表)

⑦ K.Y. Watanabe, Y. Hara, **Y. Shibata**, Y. Shimada, Y. Nakamura, *et. al.*, "Effect of interaction between current outside plasma and the MHD equilibrium on the current decay time during the current quench phase in tokamak disruption discharges", Plasma Conference 2014, Niigata, Japan 18-21 November 2014. (ポスター発表)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 欣秀 (SHIBATA, Yoshihide)

岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科・
助教

研究者番号：20633209