

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360379

研究課題名(和文)簡易ヘリカルコイルによるトカマクのプラズマ位置安定化の実証

研究課題名(英文) Demonstration of plasma position stability with simple helical coils

研究代表者

飯尾 俊二 (110, Shunji)

東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授

研究者番号：90272723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：展開図では平行四辺形の簡易ヘリカルコイルのプラズマ位置安定化作用を、円形断面小型トカマク装置で確かめた。3次元の自由境界平衡計算で、トロイダル磁場コイルとトーラス片側だけのヘリカルコイルの構成であってもMHD平衡が取れ、コイル電流が一定でプラズマ電流が半減しても水平位置はほとんど変化しないことを見出した。

縦長断面トカマク装置で簡易ヘリカルコイルによる受動的な位置制御を実証するために製作した小型トカマク装置のトロイダル磁場コイルは、導体をエッジ巻きにしてトーラス外側のみの支持構造とした。誘導電動機を用いたフライホイール電源をベクトル制御してトロイダル磁場を1秒以上ほぼ一定に励磁できるようにした。

研究成果の概要(英文)： Plasma position stabilizing effect of simple helical coils were confirmed by experiments on a small tokamak with circular cross-section. Three dimensional free boundary calculation showed that MHD equilibria are possible even with simple helical coils installed on half of torus and toroidal field coils and without axisymmetric vertical fields. The horizontal plasma position does not change much even when the plasma current is doubled.

The toroidal field coils (TFCs) of a newly fabricated small tokamak with elongated cross-section to demonstrate the passive plasma position control with simple helical coils are supported only at the outer side of torus by adoption of edge-wise winding of conductors. Vector control of a flywheel generator with an induction motor enabled nearly constant TFC magnetization longer than a second.

研究分野：磁場閉じ込め核融合

キーワード：トカマク 位置安定性 ヘリカルコイル ディスラプション 垂直移動現象 自由境界MHD平衡 トロイダル磁場コイル フライホイール

1. 研究開始当初の背景

ディスラプションに伴い発生するプラズマの垂直移動現象は、トカマク型核融合炉に深刻な損傷を与えかねない。プラズマが第一壁に接触することによる局所的熱負荷とハロー電流に起因する電磁力が炉壁を破壊しうる。垂直移動現象の緩和を目指して様々な研究が行われているが、損傷リスクのある大型装置での実験は困難であり、展望が開けているとは言いがたい。また、ヘリカル装置でディスラプションが発生しない理由はよく理解されていない。

2. 研究の目的

(1) トカマク型核融合装置のディスラプション発生時に起こるプラズマ垂直位置移動現象(VDE)を、非軸対称の簡易ヘリカル形状コイルを用いた受動的制御により抑制できることを実証することを目的とする。プラズマの第一壁への接触による第一壁の損傷を回避し、計画外の点検・保守を無くしてトカマク型核融合炉の稼働率を高めることを狙う。

(2) トカマク装置に共通の課題であるディスラプションがヘリカル装置で発生しないのは、ヘリカル配位ではプラズマ位置安定性がよいため熱消滅が生じてても放電停止に至らないとする仮説の検証にもなる。

3. 研究の方法

トラス内側を通らない簡易ヘリカル形状コイルによるプラズマ位置制御を行う(図1)。簡易ヘリカルコイルは非軸対称プラズマのトラス平均として

- a) プラズマ断面を縦長にする。
- b) プラズマの垂直・水平移動を抑制する。

トカマクにおいてプラズマの垂直移動現象が起こるのは、軸対称磁場コイルによるプラズマ断面の縦長化が垂直位置不安定性を誘発するためである。閉じ込め向上のために必要な縦長断面プラズマの垂直位置安定化は、通

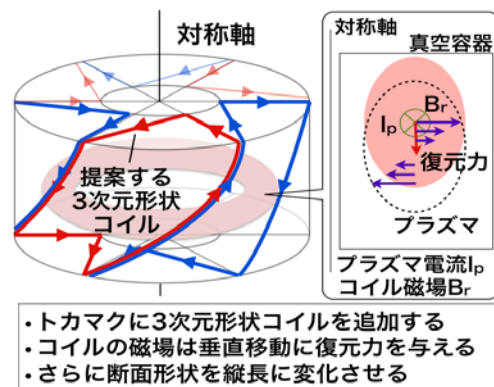


図1 簡易ヘリカルコイルと位置安定効果の模式図。コイルの作る磁場とトロイダル磁場の合成はプラズマ電流とのローレンツ力により垂直移動を抑制する。

常フィードバック制御により行っている。しかし、ディスラプションによる急速なプラズマ変化にフィードバック制御が追従できず、垂直移動現象が起こる。

以上のことを実証するために、研究室に既存の小型トカマク設備を活用しながら縦長断面の真空容器とコイル群を製作して実験し、コイル形状を最適化する。

以下の手順で小型トカマク実験を行う。

- (1) 提案コイルがプラズマ移動を抑制することを実証する。通常はフィードバック制御がなければ維持できない縦長断面プラズマが、MHD 平衡を維持し続けられることを示す。
- (2) ディスラプションに伴い起こる垂直位置現象を抑制することを実証する。通常の放電状態と異なる点は、プラズマ電流の急減に伴い流れる真空容器の渦電流がプラズマに強く作用する点である。このような状況下でも、プラズマ位置制御できることを示す。急峻な電流立ち上げによりキンク不安定性を成長させ、ディスラプションを引き起こす。
- (3) コイルの形状を変え、大型トカマクにも適用できる最適形状を探る。コイルは手巻きで簡単に形状を変えられるようにしておく。

4. 研究成果

(1) 小型トカマクでの原理検証

名古屋大学の小型トカマク HYBTOK-II に簡易ヘリカルコイルを取り付け、平衡位置制御への効果を調べた。図2に放電波形を示す。青線はエラー磁場により上側へシフトした通常のトカマク放電、赤線はヘリカル磁場を印加したときの放電波形を表す。放電中は $t = 13 \text{ ms}$ からヘリカル磁場を印加し、いずれの場合も $t = 15 \text{ ms}$ まで水平位置を垂直磁場コイルでフィードバック制御している。放電途中からヘリカル磁場を印加した場合には、プラズマは鉛直方向に赤道面付近へと押し戻された。通常のトカマク放電では、水平位置のフィードバックが切れるとトーラス外側へと広がっていく。ヘリカル磁場を印加すると、水平位置は大きく内側に押し込まれるものの、移動が落ち着いてからは外側に広がっていくのが抑制された。垂直磁場コイル電流は減らさなかったために、ヘリカル磁場が加わって垂直磁場が強くなり、内側へシフトした配位となった。

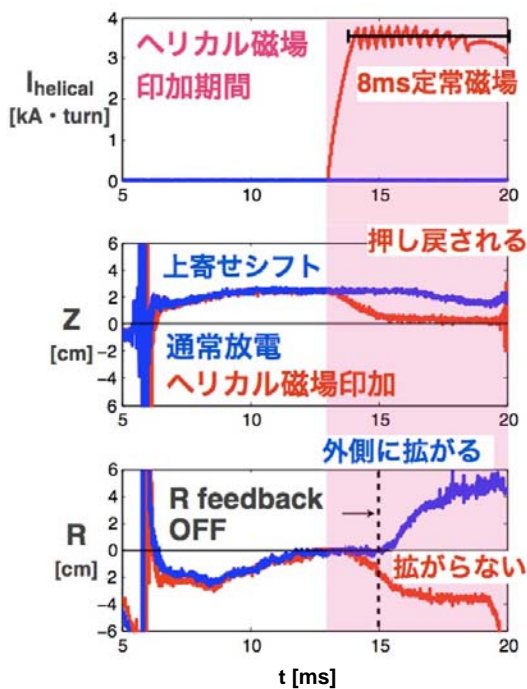


図2 簡易ヘリカルコイルの効果を調べた2放電のプラズマ位置変化の比較

(2) 簡易ヘリカルコイルの作用

簡易ヘリカルコイルが作るポロイダル磁場はトロイダル方向に平均するとゼロとなるが、トロイダル磁場と合成するとプラズマ位置を安定化する向きのポロイダル磁場成分が生じることが、平面近似の解析と数値的磁力線投影法によって明らかになった。

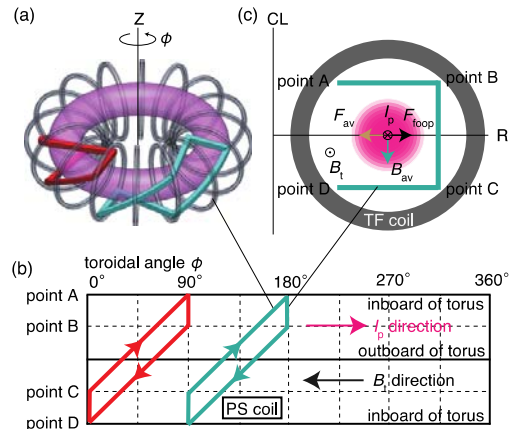


図3 簡易ヘリカルコイルの模式図。赤と青の coils には互いに逆向きの電流を流す。

次に簡易ヘリカルコイルの位置安定効果を考察するために、VMEC コードによる3次元の自由境界平衡計算を行い、外部ヘリカル磁場に対するトカマク平衡の応答を調べた。計算で使ったコイル配位を図3に示す。トロイダル磁場コイルとヘリカルコイル(図3(b)に示すように展開図で平行四辺形)のみで構成され、軸対称ポロイダル磁場コイルは設置していない。これらのコイルを組み合わせることができる磁場は、トロイダル方向に進みながら垂直方向にドリフトし、あたかも軸対称トカマクでポロイダル磁場を印加したように振舞う。トカマク平衡ではプラズマ電流によるフープ力を支えるために垂直磁場が必要であるが、平衡計算で合成磁場の垂直成分が実効的に垂直磁場として働くことを確かめた。図4にプラズマ断面形状を示す。まずプラズマ電流 $I_p = 5.0 \text{ kA}$ (図4(a))に注目する。特筆すべきは、コイルの設置されたトロイダル角 $0 \text{ 度} \sim 180 \text{ 度}$ の範囲だけでなく、設置さ

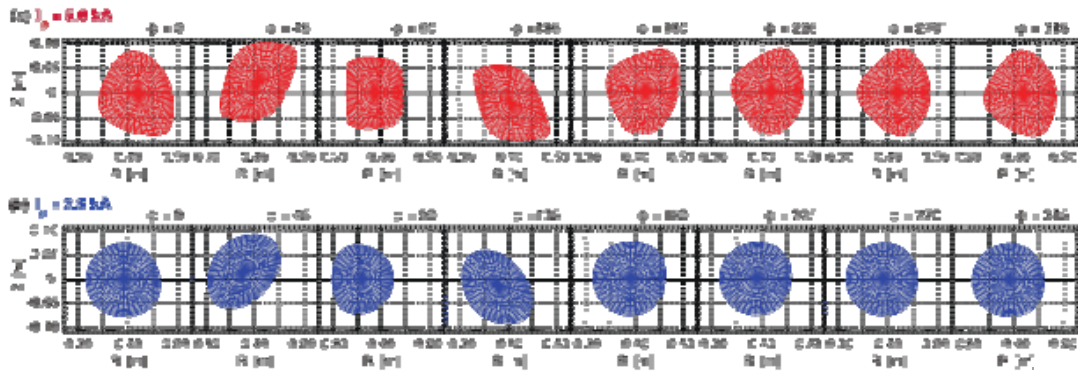


図4 VMECで求めたトロイダル方向45度毎のプラズマ断面。 $I_p = 5.0$ kA (a), 2.5 kA (b)

れない180度～360度の範囲においても実効的な垂直磁場の効果により平衡が保持されている。トーラス片側だけの外部磁場が、トーラス全体の巨視的平衡にまで影響を及ぼすという驚くべき結果が得られた。このトカマク・ヘリカル混成配位は、プラズマ電流の増減によるフープ力の変化に対して、非常にロバストな応答を示す。図4(b)では、コイル電流値を固定したままプラズマ電流を半減させているが、磁気軸のR半径は1割程度しか変化していない。これは、コイルに近づく急激に磁場強度が高まるためである。

(3) 検証用小型トカマク装置の製作

検証用小型トカマク装置($R = 0.33$ m, $a = 0.09$ m, $\kappa = 1.8$, $B_t = 0.3$ T)の真空容器の設計では、 $\kappa = 1.8$ のプラズマ生成と所有鉄芯の使用を前提として、真空容器が最も大きくなるようにトロイダル磁場コイル形状・配置の最適化を行った。最適化の指標はトロイダル磁場リップルである。一般に磁場リップルはプラズマの閉じ込めを劣化させる。真空容器を過剰に大きくすると、プラズマ生成領域がコイルに近づいてリップルの影響が現れる。最適なプラズマ生成領域(真空容器横幅)を見つけるために、有限要素法を用いた磁場解析を行った。電流駆動のために鉄芯を使用するので、磁性体の影響も考慮している。プラズマ断面を大きくすることを優先して2%以下の領域をプラズマ生成領域とした。リップル率から真空容器の横幅が決まると想定した楕円度から縦幅も決まり、図5に示すよう

なポートを配置した真空容器の仕様を決定した。

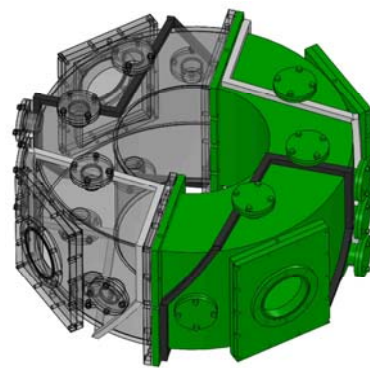


図5 真空容器と設置する簡易ヘリカルコイルの鳥瞰図

真空容器外側の四隅に配置したポロイダル磁場コイル(図6)で $\kappa = 1.8$ のMHD平衡を実現できることを確認した。プラズマ電流が5 kAの時に各コイルに流す電流(アンペア・ターン)を記入している。このポロイダル磁場コイル群で、垂直磁場のnインデックスが0～1.5の領域を真空容器内に広く確保できることを確かめており、プラズマ着火が容易となるように設計した。プラズマの垂直位置を高速に制御するために、図6に水色で示す1対の制御用水平磁場コイル、14本のポロイダル磁束ループ(緑色)と12個(ポロイダル方向)+7個(トーラス外側の赤道面上で異なるトロイダル位置)の磁気プローブ(赤色四角)を真空容器内に設置する。

小型トカマクの製作にあたって工学的課題になるのが、トロイダル磁場コイルへの電磁

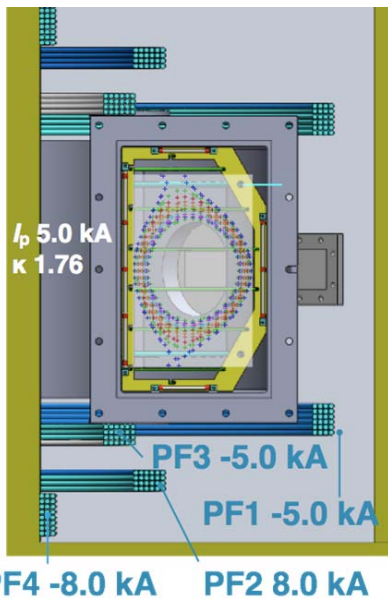


図6 MHD 平衡例のポロイダル断面図

力である。コイルに働く力は、フープ力に由来する正味で向心力、垂直磁場による転倒力に分けられる。特に向心力は、製作した装置であっても、コイル1本につき 500 kgf 程度と非常に大きい。支持構造の設計のため、有限要素法解析による応力解析を行った。設計では、小型装置特有のパルスのな通電による撃力に耐えるため、安全率を8程度とした。矩形断面導体をエッジ巻きにすると導体自体がフープ力を支えることができ、トーラス外側だけの支持構造とした。巻線・支持構造一式を試作して、強度試験を行った。試験では電磁力を模擬するために、想定される電磁力の2倍である 1000 kgf のおもりをコイルに吊り下げ、静荷重においては十分な安全性が確認された。同時にひずみゲージによる応力測定も行い、変形は安全な弾性領域にあると確認できた。

(4) フライホイール誘導発電機によるTF励磁

これまで実験室レベルのプラズマ実験装置では、励磁電源にオイルコンデンサや電解コンデンサで構成されるコンデンサバンクが利用されてきた。ところが、これらは蓄積エネルギー密度が小さいために、低磁場であっても放電時間が長くととも 100 ms 程度に制限されていた。本装置では、蓄積エネルギー

の大きなフライホイールとかご型誘導電動機を組み合わせたパルス励磁電源を採用した。かご型誘導機の制御では、AC モーターの制御手法であるベクトル制御でトルクの瞬時制御を行い、優れた発電出力応答が実現した。トロイダル磁場コイル励磁中における発電機の状態とコイル電流の時間変化を図7に示す。コンデンサバンクでは、コイル電流の供給とともに電圧が大きく低下してしまうので制御性に難がある。他方、誘導発電機では、ベクトル制御により電源電圧をほぼ一定に保つことができるので、正確なコイル電流の制御が実現できている。フライホイールの機械回転数とともに電圧が落ちていくが、DC チョッパーのスイッチングは電圧変動を加味して補償するように PWM 制御している。模擬試験では発電機電圧が半減しても、指令した方形波電流を約 1.5 秒維持できた。CS・PF コイル系についても、同様のシステムを組み込む予定で、正確な電流制御により再現性の良いプラズマ生成と維持を実現する。

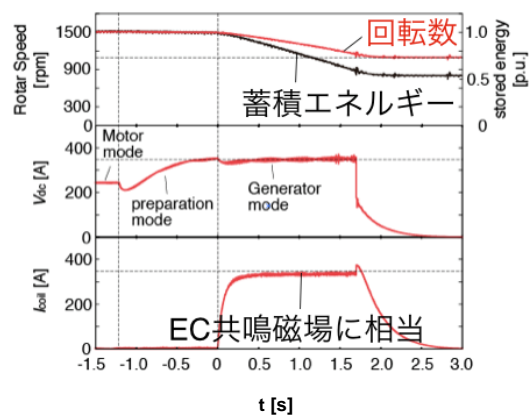


図7 放電中の発電機回転数、平滑コンデンサ電圧、TF コイル電流の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① Y. Asahi, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Tsutsui, and S. Tsuji-Iio, Regulation of electron temperature gradient turbulence by zonal flows driven by trapped electron modes; Phys. Plasma 査読有, 21, 2014, 052306-1-10
DOI: 10.1063/1.4875740

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 嶋山昭一, 村山真道, 渡辺正樹, 小林孝行, 筒井広明, 飯尾俊二, フライホイール付誘導発電機によるプラズマ制御コイルのパルス励磁電源, 1BC-C1, 平成27年 電気学会全国大会, 東京都市大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区), 2015年3月26日.
- ② 嶋山昭一, 渡辺正樹, 小林孝行, 村山真道, 筒井広明, 飯尾俊二, 外部ヘリカル磁場による縦長断面と垂直位置安定性を両立した小型トカマク装置の開発, 23pCM-6, 物理学会第70回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス(東京都新宿区), 2015年3月23日.
- ③ 嶋山昭一, 朝比祐一, 馬場達也, 姚志鵬, 小林孝行, 渡辺正樹, 村山真道, 筒井広明, 飯尾俊二, 非円形断面小型トカマクの製作と初期実験, 20pD2-8, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市), 2014年11月20日.
- ④ 渡辺正樹, 嶋山昭一, 鈴木康浩, 筒井広明, 飯尾俊二, 三次元平衡計算コードVMECを用いた垂直位置安定化のための摂動コイルの設計, 19PA-042, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市), 2014年11月19日.
- ⑤ 馬場達也, 嶋山昭一, 飯尾俊二, 筒井広明, インバータ駆動フライホイール付発電機の小型トカマク装置適用, 19PA-008, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市), 2014年11月19日.
- ⑥ S. Hatakeyama, T. Baba, M. Watanabe, T. Kobayashi, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, 他3名, Design and Construction of a Non-circular VDE Free Tokamak, 41st EPS Conference on Plasma Physics, June 23-26, 2014, Berlin, Germany, P4.012.
- ⑦ 嶋山昭一, 三浦弘雅, 桃志鵬, 筒井広明, 飯尾俊二, 柴田欣秀, 他3名, 非円形断面小型トカマクの製作と調整運転, 04aE31P, プラズマ・核融合学会 第30回年会, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区), 2013年12月.
- ⑧ 三浦弘雅, 嶋山昭一, 磯部高範, 姚志鵬, 筒井広明, 飯尾俊二, 嶋田隆一, フライホイール付誘導発電機の過負荷領域利用—小型トカマクのポロイダル磁場電源, 03aD26P, プラズマ・核融合学会 第30回年会, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区), 2013年12月3日.
- ⑨ 嶋山昭一, 三浦弘雅, 桃志鵬, 飯尾俊二, 柴田欣秀, 大野哲靖, 他2名, 縦長断面と垂直位置不安定性を両立する小型トカマク装置の製作, 28pKB-1, 日本物理学会 2013 秋大会, 徳島大学(徳島県徳島市), 2013年 9月28日.
- ⑩ S. Hatakeyama, D. Shiojima, M. Miura, Z. Yao,

H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, R. Shimada, “Flywheel Generator System for Magnets of Small Tokamak Devices”, Inter. Conf. Magnet Technology (MT-23), July 14-19, 2013, Boston, US, 1PoCL-07.

- ⑪ 嶋山昭一, 筒井広明, 飯尾俊二, 嶋田隆一, VDE-Free 小型トカマク装置の設計・製作, 講27D33P, プラズマ・核融合学会 第29回年会, クローバープラザ(福岡県春日市), 2012年11月27日.
- ⑫ S. Hatakeyama, Y. Shibata, S. Kawakami, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, R. Shimada, 他4名, Preliminary Experiments on the Vertical Stability with Helical Coils in a Small Tokamak, HYBTOK-II, 39th EPS Conference on Plasma Physics, July 2-6, 2012, Stockholm, Sweden, P1.046.
- ⑬ 嶋山昭一, 征矢正治, 柴田浩平, 宮浦崇, 筒井広明, 飯尾俊二, 嶋田隆一, 金沢由樹, 他4名, 簡易ヘリカルコイルによる自律的VDE制御, 26pYG-1, 日本物理学会 2012 春大会, 関西学院大学(兵庫県西宮市), 2012年 3月26日.
- ⑭ S. Hatakeyama, M. Soya, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, R. Shimada, Y. Kanazawa, 他6名, Autonomous Plasma Position Controls for Tokamak Disruption with 3D Shaped Coils, Plasma Conference 2011, Nov. 22-25, 2011, 石川県立音楽堂(石川県金沢市), 23P084-P.
- ⑮ S. Hatakeyama, M. Soya, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, R. Shimada, T. Akiyama, K. Y. Watanabe, Helical coils for the positional stability and elongation of tokamak plasma, 38th EPS Conference on Plasma Physics, June 27 - July 1, 2011, Strasbourg, France, P4.044.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯尾 俊二 (HIO, Shunji)

東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授
研究者番号：90272723

(2) 研究分担者

筒井 広明 (TSUTSUI, Hiroaki)

東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授
研究者番号：20227440

嶋田 隆一 (SHIMADA, Ryuichi)

東京工業大学・原子炉工学研究所・教授
研究者番号：40206181

(3) 研究協力者

嶋山 昭一 (HATAKEYAMA, Shoichi)

東京工業大学大学院・創造エネルギー専攻・博士課程学生