

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630469

研究課題名(和文) 摂動磁場コイルで形成した閉磁気面によるトカマク・プラズマの立ち上げ改善

研究課題名(英文) Improvement in tokamak plasma ramp up with closed magnetic surfaces formed with perturbation magnetic field coils

研究代表者

飯尾 俊二 (Iio, Shunji)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：90272723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)： 将来の超伝導大型トカマク装置では磁束変化速度が制限されるため、外部磁場コイルで形成した閉磁気面を利用して、プラズマ電流立ち上げに必要な周回電圧の低減することを目的とした。研究室に既存の小型トカマクの真空容器外側に摂動磁場コイルを取り付け、垂直磁場コイルと組み合わせで閉磁気面を形成できるようにした。

水平誤差磁場が予想より強くその補正が不十分であったため、外部コイルによる閉磁気面の有無での周回電圧の変化は明確ではなかったものの、電子サイクロトロン共鳴(ECR)を用いた予備電離がなければトカマク放電が開始しなかったのに対して、閉磁気面の初期配位でECR無しでもプラズマ着火の効果が確認できた。

研究成果の概要(英文)： Since the flux swing speed of future tokamak reactors with superconducting coils is limited, we aimed to reduce the one-turn loop voltage by exploiting the closed magnetic surfaces formed with external magnetic field coils. We mounted perturbation coils on the vacuum chamber of the existing small tokamak in our laboratory so that closed magnetic surfaces can be formed in combination with vertical magnetic field coils.

Although the changes in the one-turn loop voltage were not evident with and without closed magnetic surfaces due to insufficient correction of horizontal error magnetic fields, plasma breakdown without the RF power of electron cyclotron resonance was demonstrated to be possible with closed magnetic surfaces.

研究分野：核融合学

キーワード：トカマク プラズマ着火 MHD平衡 磁気面 摂動磁場コイル ECR 電流分布 位置安定性

1. 研究開始当初の背景

長時間運転をめざす将来の大型トカマクでは、プラズマ着火・電流立ち上げのための中心ソレノイドを超伝導化する。超伝導コイルは交流損失のため、磁束スイングの速度が制限される。そのため真空容器内の強い誘導トロイダル電場をかけて、プラズマを着火・電流を立ち上げることは出来ない。他方、トカマク研究では、抵抗性壁モード(RWM)やELMの制御に向けて、摂動磁場コイルが標準的制御ツールとなりつつある。我々はこれまでの研究で、摂動磁場コイルは単独で閉じた真空磁気面は形成できないが、垂直磁場コイルと組み合わせれば閉磁気面を形成できることを示した。これを初期磁気面として利用し、プラズマの立ち上げを改善する。

2. 研究の目的

外部摂動磁場コイルで形成した閉磁気面を利用して、プラズマ着火・電流立ち上げに必要な周回電圧の低減を目指す。常伝導の小型トカマクを用いて下記3項目を究明する。

- (1) 真空閉磁気面の有・無で周回電圧は変化するか(低減されるか)。
- (2) 着火位置・初期プラズマの大きさは、真空磁気面の位置・大きさに制御できるか。
- (3) 電流分布のプラズマ中心や表面への局在化により、MHD不安定性が誘発されないか。

3. 研究の方法

- (1) 摂動磁場コイルを研究室に既存の小型トカマクPHiXの真空容器外部に取り付ける。

磁力線解析により図1に示すような形状と配置のコイルの設計を行い、巻き枠を製作して設置し、必要な巻き数ケーブルを巻く。コイルには直流電源で1 kA・turns程度給電する。

- (2) 外部コイルによる閉磁気面の有・無で周回電圧は変化するか(低減されるか) ?

周回電圧は近似的に、プラズマ境界に一番近い磁束ループの電圧で検出できる。さらに

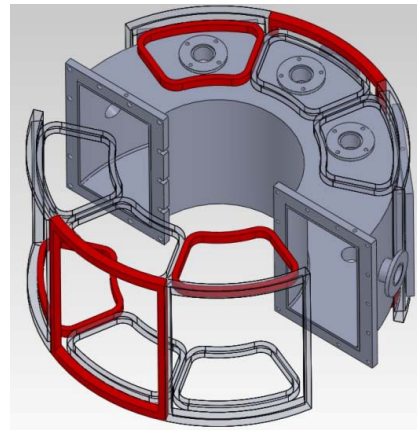


図1 PHiX装置に設置可能な摂動磁場コイルの一種であるサドル型コイル

正確には、MHD平衡解析で再構成されたプラズマ境界のポロイダル磁束変化率から周回電圧を算出する。真空容器内に設置された14本の磁束ループの信号から、軸対称のMHD平衡解析を行う。厳密には摂動磁場コイルの非軸対称な磁場成分が存在するが、3次元平衡の再構成は確立されていない。周回電圧の評価は、プラズマ電流による軸対称磁場と外部コイルによる摂動磁場の大小関係で2段階に分ける。プラズマ着火の直後は磁束ループで周回電圧を直接計測し、電流の立ち上げでプラズマによる軸対称磁場が支配的になれば、MHD平衡計算を優先する。

- (3) 着火位置・初期プラズマの大きさは、真空閉磁気面の位置・大きさに制御できるか?

ポロイダル磁場がゼロとなる箇所を利用した通常のプラズマ立ち上げでは、初期プラズマが小さいために、電流分布が中心尖塔化して垂直位置不安定性の誘発や縦長断面へ上下に引き延ばす形状制御が妨げられる。大きな真空磁気面を利用して大きな初期プラズマが生成できれば、プラズマ電流の中心尖塔化を回避できると考えられる。まずは閉磁気面の位置や大きさにより、初期プラズマの生成位置と大きさが変化する事を確認する。初期プラズマ生成の様子は、接線方向の高速度カメラにより可視光領域で観測する。

- (4) 電流分布のプラズマ中心や表面への局在

化により、MHD不安定性が誘発されないか？

前述の磁気計測によるMHD平衡解析から、内部インダクタンスを評価する。精度のよくMHD平衡解析を行い、シャフラノフ・ラムダからポロイダルベータを分離すれば、内部インダクタンスを評価できる。また並行して磁気プローブアレイを製作する。プラズマ内部に挿入してポロイダル磁場の分布を計測すれば、電流分布を直接計測できる。

4. 研究成果

磁力線を追跡する計算コードを用いて図1に示したサドル型コイル、垂直磁場コイルとトロイダル磁場コイルの同時通電で閉じた磁気面が形成できるかどうか調べた。摂動磁場コイルとしてサドル型コイルを用いた場合、完全に閉じた磁気面は確認できなかった。そこで装置製作当初に計画した展開図では平行四辺形のコイル(図2)であれば、図3に示す例のように閉じた磁気面が形成できることを確かめた。この配位で実験を行ったところ、トロイダル磁場コイルの設置誤差に起因する水平誤差磁場が予想より強く、その補正が不十分であったため、外部コイルによる閉磁気面の有無での周回電圧の変化は明確ではなかった。しかしながら、電子サイクロトロン共鳴(ECR)を用いた予備電離がなければトカマク放電が開始しなかったのに対して、閉磁気面が真空容器内に存在する初期配位で ECR 予備電離無しでもプラズマが着火する効果が確認できた。

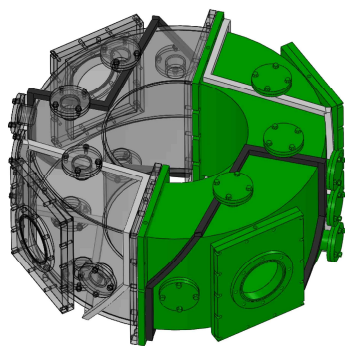


図2 閉じた磁気面を形成する摂動磁場コイル。濃淡は通電の向きが逆であることを示す。

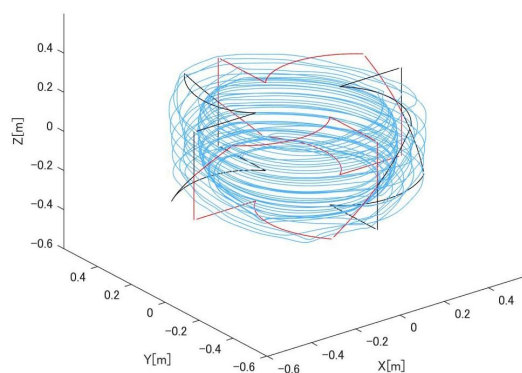


図3 磁気面が閉じる例の磁力線の3次元表示。赤と黒の線は真空容器外側に設置したコイル軌道を示す。

摂動磁場コイルは非軸対称な磁場を生成するが、プラズマ電流の立ち上げでプラズマによる軸対称成分が支配的になった時刻で、真空容器内に設置した14本の磁束ループ測定に基づくMHD解析からプラズマ電流分布の中心尖塔化の指標である内部インダクタンスの評価を試みたが、プラズマ電流誘導に用いている鉄芯の磁性体効果をうまく取り込めていないため、精度よく評価できなかった。また、プラズマ内部に挿入する磁気プローブ列を用いたポロイダル磁場分布計測からのプラズマ電流分布の評価も、今後の課題として残った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

"Flywheel Induction Motor-Generator for Magnet Power Supply in Small Fusion Device", S. Hatakeyama, F. Yoshino, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, *Rev. Sci. Instrum.* 査読有 **87**, 043509 (2016).

"Edgewise Bending Strain in Helical Coils with Geodesic Windings Based on Virial Theorem", H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, S. Nomura, T. Yagai, T. Nakamura, H. Chikaraishi, N. Yanagi, S. Imagawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 査読有 **26** [4] 4901704 (2016).

"Nonlinear Entropy Transfer in ETG-TEM Turbulence via TEM Driven Zonal Flows", Y. Asahi, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Sugama, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, *Plasma and*

Fusion Research 査読有 **10** 1403047 (2015).

“Regulation of electron temperature gradient turbulence by zonal flows driven by trapped electron modes”, Y. Asahi, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Tsutsui, and S. Tsuji-Iio, *Phys. Plasma* 査読有 **21**, 05230 (2014).

[学会発表](計19件)

小林孝行、筒井広明、飯尾俊二、「トカマク型装置におけるブランケット位置に配置した磁性材の磁気計測への影響を補正するモデル解析」、プラズマ・核融合学会 第33回年会 01aP28、東北大学、2016年11月。

杉野弘幸、村山真道、坂本惇、筒井広明、飯尾俊二、「FPGAを用いた縦長断面トカマクプラズマの位置制御」、プラズマ・核融合学会 第33回年会 01aP40、東北大学、2016年11月。

梅澤和夫、飯尾俊二、筒井広明、「磁性体を考慮した三次元多層磁気面法によるトカマク・プラズマの平衡解析」、プラズマ・核融合学会 第33回年会 29aP33、東北大学、2016年11月。

村山真道、杉野弘幸、小林孝行、筒井広明、飯尾俊二、「マルチレベル変換器を用いた小型トカマク装置 PHiX のプラズマ位置形状制御の改善」、プラズマ・核融合学会 第33回年会 29aP72、東北大学、2016年11月。

山下要、小林孝行、梅澤和夫、杉野弘幸、村山真道、筒井広明、飯尾俊二、「小型トカマク装置の光ダイオード列によるプラズマ位置検出」、プラズマ・核融合学会 第33回年会 01aP27、東北大学、2016年11月。

畠山昭一、渡辺正樹、小林孝行、梅澤和夫、杉野弘幸、村山正道、筒井広明、飯尾俊二、「小型トカマク装置における縦長断面プラズマの実時間位置制御」 21aAD-1、日本物理学会 第71回年次大会、東北学院大学、2016年3月。

筒井広明、畠山昭一、飯尾俊二、「非軸対称磁場を伴うトカマクプラズマの平衡と位置安定性」、プラズマ・核融合学会 第32回年会 25aE01P、名古屋大学、2015年11月。

畠山昭一、渡辺雅樹、小林孝行、村山正

道、梅澤和夫、杉野弘幸、山下要、筒井広明、飯尾俊二、「非円形断面トカマクのプラズマ位置制御」、プラズマ・核融合学会 第32回年会 25aE02P、名古屋大学、2015年11月。

T. Kobayashi, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui, “Model Analysis on Magnetometry for Tokamak Devices with Magnetic Materials Effect Correction”, 5th Intern. Symp. Innovative Nuclear Energy Systems, Tokyo Tech., June 2016.

畠山昭一、渡辺正樹、小林孝行、村山正道、梅澤和夫、杉野弘幸、山下要、筒井広明、飯尾俊二、「簡易ヘリカルコイルによる非円形断面トカマクの垂直位置不安化 II: 初期実験」、日本物理学会 2015年秋季大会 18aCP13、関西大学2015年9月。

飯尾俊二、畠山昭一、渡辺正樹、小林孝行、村山正道、梅澤和夫、杉野弘幸、山下要、筒井広明、「簡易ヘリカルコイルによる非円形断面トカマクの垂直位置不安化I: 装置概要」、8aCP12、日本物理学会 2015年秋季大会、関西大学、2015年9月。

T. Kobayashi, S. Hatakeyama, M. Watanabe, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, “Commissioning of a Non-circular VDE-Free Tokamak with Saddle Coils”, 42nd EPS Conference on Plasma Physics, June 22-26, 2015, Lisbon, P4.188 (2015).

畠山昭一、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」、平成27年電気学会全国大会 1BC-C1、東京都市大学、2015年3月。

畠山昭一、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」、物理学会第70回年次大会 23pCM-6、早稲田大学、2015年3月。

小林孝行、飯尾俊二、筒井広明、宇藤裕康、高瀬治彦、森一雄、工藤辰哉、「磁性体を考慮したトカマク炉内部構造物の渦電流解析」、Plasma Conference 2014, 20PB-100, 朱鷺メッセ, 2014年11月。

畠山昭一、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」、Plasma Conference 2014, 20pD2-8, 朱鷺メッセ, 2014年11月.

渡辺正樹, 畠山昭一, 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, Plasma Conference 2014, 19PA-042, 朱鷺メッセ, 2014年11月.

馬場達也, 畠山昭一, 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」, Plasma Conference 2014, 19PA-008, 朱鷺メッセ, 2014年11月.

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, P4.012, Berlin, Germany, June, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯尾 俊二 (HIO, Shunji)
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授
研究者番号：9 0 2 7 2 7 2 3

(2) 研究分担者

筒井 広明 (TSUTSUI, Hiroaki)
東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授
研究者番号：2 0 2 2 7 4 4 0

(3) 研究協力者

畠山 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 (H26年、H27年)