

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06990

研究課題名(和文) 受動的プラズマ位置安定作用を持つ簡易コイルを用いた主ディスラプション抑制の実証

研究課題名(英文) Demonstration of major disruption suppression by passive stabilization of plasma position with simple helical 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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ位置の安定化作用のある簡易コイルを用いた受動的制御により、トカマク型核融合装置の課題である主ディスラプションの発生を抑制できることを、小型トカマク装置PHiXにて実証することを目的とした。プラズマ断面縦長度は1.2程度にとどまったものの、サドル型コイル通電によりトカマク・プラズマが上下方向に移動するのが抑制されてプラズマ中心が赤道面にほぼ維持できることを小型トカマク装置PHiXにて見出した。プラズマ表面のMHDモードの安定化に適用されるサドル型コイルにプラズマ位置安定化作用があることを実験で明らかにしたのは世界初である。簡易コイルによるディスラプション抑制の実証には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サドル型コイルは、トロイダル磁場コイルとプラズマ電流を誘導する変流器コイルが密集してスペースの確保が困難なトラス内側を通す必要がなく、かつトロイダル方向・大半径方向・鉛直方向のコイル軌道で構成でき、加熱や排気用の大型ポートを避け易く、大型トカマクや既存の装置にも設置可能である。そのような簡易コイルに定電流を流す受動的制御で、フィードバック制御を必要とせずにプラズマ位置安定化作用を見出した意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：We experimentally found that the excitation of saddle-type coils can suppress the vertical shift of tokamak plasmas and can sustain the plasma center nearly on the mid-plane of the PHiX tokamak. It is for the first time in the world that saddle-type coils which are commonly employed to suppress surface MHD modes can also stabilize the vertical plasma position in tokamaks. The original objective of demonstration of major disruption suppression by passive stabilization of plasma position, however, has not been attained with simple coils.

研究分野：核融合学

キーワード：炉心プラズマ トカマク ディスラプション 位置不安定性 VDE サドル型コイル 簡易ヘリカルコイル 核融合炉

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ヘリカル磁場配位では発生しない主ディスラプションがトカマク装置の課題トカマク型核融合装置で突発するディスラプションのうち、特に激しくてプラズマ電流が急減して放電が終了するのは主 (major) ディスラプションと呼ばれる。主ディスラプションの発生は、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（閉じ込めたプラズマをとり囲む開いた磁気面に磁束を保存するように流れる電流）に起因する電磁力が炉壁を破壊しうる。ディスラプション回避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には制約があり、展望が開けている段階にはない。他方、ヘリカル装置では激しい不安定性によりプラズマ圧力が急減する熱消滅 (thermal quench) が起きても主ディスラプションに移行しない物理機構は解明されていない。

### 2. 研究の目的

プラズマ位置の安定作用のある簡易コイルを用いた受動的制御により、トカマク型核融合装置の突発的放電停止に至る主ディスラプションの発生を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。トカマク装置に共通の課題である主ディスラプションがヘリカル装置で発生しないのは、ヘリカル磁場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

トロイダル磁場コイル(TFC)とプラズマ電流を誘導する変流器コイルが密集してスペースの確保が困難なトーラス内側を通す必要がない簡易コイルとして、サドル型コイルとSHC（簡易ヘリカルコイル：図1）の両方を試す。電子密度計測干渉計を整備した小型トカマク装置 PHiXにおける実験で、通常は主ディスラプションが起きる高電子密度放電や低安全係数放電において、提案コイルに定電流を通電することにより主ディスラプションの発生が抑制されることを実証する。

提案する簡易コイルは以下の2つの効果を持つ。

- (1) トロイダル磁場と組み合わせると、プラズマの垂直および水平移動を抑制する。空間平均するとゼロとなる簡易コイルの作るポロイダル磁場は、トロイダル磁場と合成すると平均水平成分は上下で逆向きとなると同時に垂直成分も生じ、受動的位相制御作用がある。
- (2) 垂直磁場と組み合わせると、プラズマ電流がゼロでも閉じた磁気面を形成する。この効果については、3次元MHD 平衡解析コードVMEC による数値解析により確認した。本研究では小型トカマク実験を中心に詳細な検証を行う。

### 4. 研究成果

実験を行ったPHiXトカマクは水平誤差磁場が大きく放電の再現性が悪かったため、まず18本のTFC配置の真円からのずれと真空容器との偏心を1 mm程度以下に低減する再配置作業を行った。その結果、ポロイダル磁場コイル(PFC)に誤差磁場を補正するような電流を流さなくても、着火するようになった。しかしながら、放電の再現性が依然としてよくなく、その原因を探ったところ、鉄心からの漏れ磁場が無視できず、磁化の履歴現象の影響も受けていることが判明した。

そこで、3次元有限要素法に基づく解析コード COMSOL Mutiphysics を用いて鉄心を含む磁場計算を行って、鉄心の磁化による誤差磁場を最小化する PFC 電流の組み合わせを同定した。さらに再現性のよいプラズマ着火が可能なポロイダル磁場がほぼゼロの領域をリミターの開口部に生成する（図2）初期通電パターンを究明した。この解析が正しいことは、図3に示すように真空容器の下隅でのプラズマ着火をとらえた高速度カメラ像で確認できる。こうして、実験のターゲット・プラズマの生成法を確立した。

簡易コイルの1つとして、図4に示すように上下はほぼ台形、側面は四角形のサドル型コイル(SDC)について数値解析を行った。トロイダル磁場コイル(TFC)通電に図3中の矢印で示した向きの磁場を生成する SDC 通電により、プラズマ垂直位置を安定化する曲率の平均垂直磁場を生成

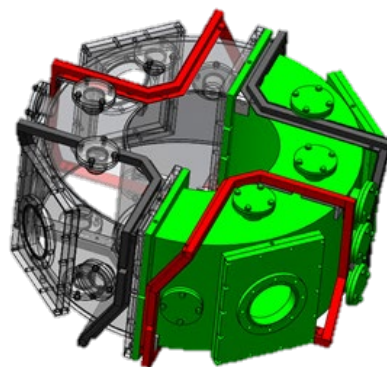


図1 PHiX トカマクの真空容器の外面に設置する SHC 巻き枠の鳥瞰図

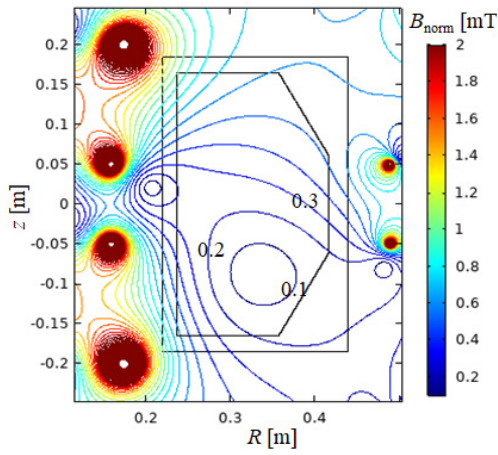


図2 プラズマ着火時の PFC 電流電流を最適化したポロイダル磁場強度の2次元分布の等高線



図3 プラズマ着火時の接線視野高速カメラの映像

できることを、図5に示す示す例のように異なるトロイダル位置でのポロイダル断面で確かめた。

さらに、プラズマ断面の縦長度は1.2程度にとどまっているものの、SDC 通電によりプラズマが上下方向に移動するのが抑制されることを実証した。その波形を SDC 不使用の放電(青線)と比較して示したのが図6である。SDC 電流を流

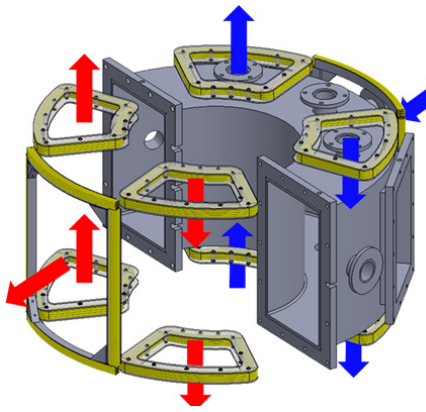


図4 PHiX トカマクに設置したサドル型コイルとその通電で発生す磁場の向き

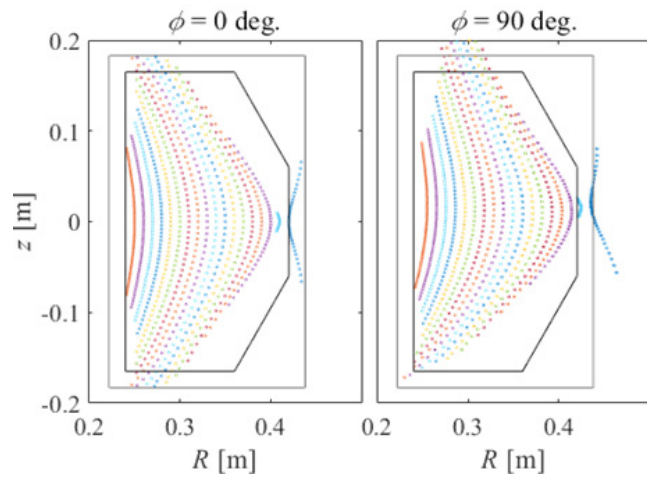


図5 SDC + TFC 通電による合成磁力線のポロイダル断面上のポアンカレ図例

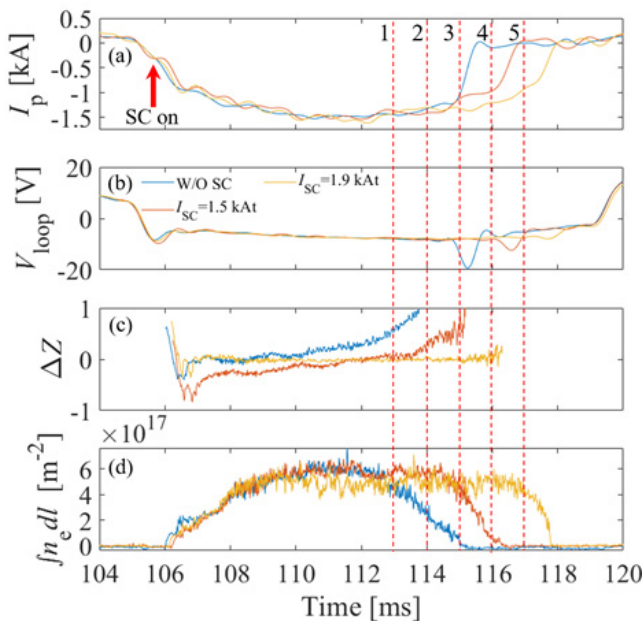


図6 SDC 通電によるプラズマ垂直位置の安定化作用を調べた放電波形比較

すと放電時間が伸び、ポロイダル磁束ループ計測で評価したプラズマ垂

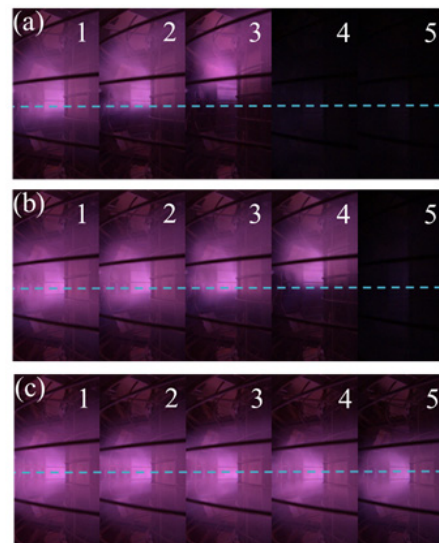


図7 接線視野の高速カメラ像も放電(c)のプラズマが赤道面付近に留まることを示す。

直位置のシフト( $\Delta Z$ )の波形から分かるように、SDC 電流がゼロの放電では約 110 ms の時刻から上へシフトし続けたのに対して、SDC 電流を上昇させると 116 ms の時刻までシフトせずに留まった。プラズマ中心の位置がほぼ赤道面に維持できることは、4 段目に表示している赤道面上で計測した電子密度波形と、縦の破線で示した 1 ms 毎の高速度カメラ像 (図 7) で確かめられる。

抵抗性壁モード等のプラズマ表面に局在する MHD モードの安定化に適用されるサドル型コイルに、プラズマ位置安定化作用があることを実験で明らかにしたのは世界で初めてである。

プラズマ位置安定化作用がサドル型コイルよりも強いと数値計算では期待できる簡易ヘリカルコイル(SHC: 図 1) を PHiX トカマクの真空容器に設置した。大きな観測ポートや 2 分割の真空容器接合部の大きなフランジを避けるコイル軌道とせざるを得なかったものの、SHC の設置誤差を考慮しても、TFC 通電との合成でプラズマ垂直位置を安定化する曲率の垂直磁場を生成できること (図 8 左) と、さらに PFC 通電による垂直磁場を加えるとリミター開口部に閉磁気面を形成できること (図 8 右) を数値的磁力線追跡法で確かめた。しかし、理想的コイル軌道ではなかったため、サドル型コイル以上のプラズマ位置安定化作用は観測できなかった。

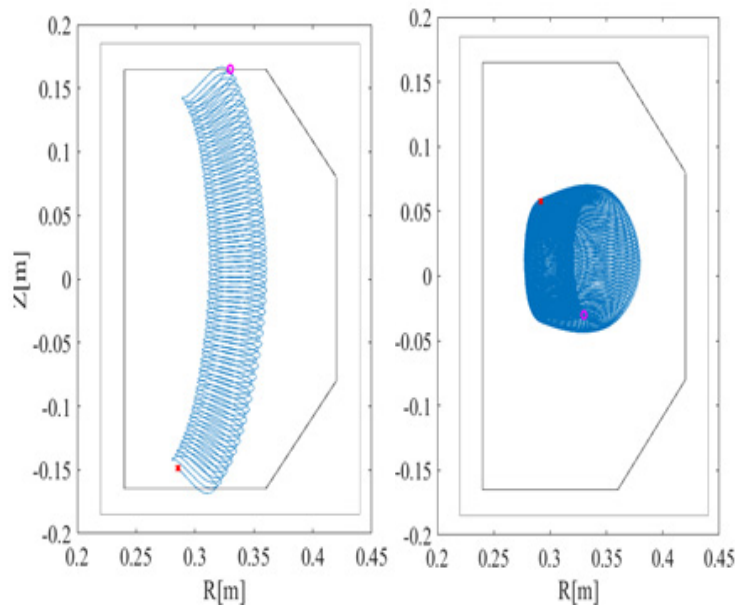


図 8 SHC + TFC 通電 (左) と SHC + TFC + PFC 通電 (右) 時の磁力線のポロイダル段目への投影図

プラズマ位置制御の最適化を含めてプラズマ放電調整が十分進まなかったこともあり、再現性良くディスラプションを発生させることができなかったため、簡易コイルによるディスラプション抑制の実証には至らなかった。

しかしながら、サドル型コイルはトロイダル方向、大半径方向と鉛直方向のコイル軌道で構成でき、加熱や排気用の大型ポートを避け易く、大型トカマクや既存の装置にも設置可能である。そのため、そのようなコイルのプラズマ位置安定化作用を見出した意義は大きい。

なお、PHiX トカマクで生成可能なトロイダル磁場+垂直磁場との合成で、真空容器内に閉磁気面を形成するサドル型コイルの配置は案出できていない。閉磁気面の存在は、プラズマ着火を容易にし、その後の幅広いプラズマ電流分布形成に役立つだけでなく、ディスラプション後のプラズマ電流再立ち上げも容易とする。

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 Masamichi Murayama , Shuhei Kato , Hiroaki Tsutsui, Shunji Tsuji-Iio, and Ryuichi Shimada	4. 巻 28
2. 論文標題 Combination of Flywheel Energy Storage System and Boosting Modular Multilevel Cascade Converter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 5700704
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2018.2806914	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 M. Murayama, S. Kato, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio	4. 巻 148
2. 論文標題 Magnet coil power supply by a self-excited induction generator with a flywheel for a small tokamak, PHIX	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Eng. Des.	6. 最初と最後の頁 111270
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2019.111270.	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宗近洸洋、筒井広明、飯尾俊二
2. 発表標題 多段反射光モデルを考慮したトカマクプラズマの可視光トモグラフィ
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内藤晋、小林孝行、飯尾俊二、筒井広明
2. 発表標題 小型トカマク装置PHIXにおける鉄心の影響を考慮した着火特性改善
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島谷 太一、坂本 惇、村山 真道、小林 孝行、筒井 広明、飯尾 俊二
2. 発表標題 小型トカマク装置における光ダイオードによるプラズマ位置検出
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林 孝行、飯尾 俊二、筒井 広明
2. 発表標題 トカマク装置内の磁性材による磁気計測への影響を補正する磁化電流の面電流近似
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂本 惇、小林 孝行、村山 真道、若林 優也、島谷 太一、筒井 広明、飯尾 俊二
2. 発表標題 小型トカマク装置でのプラズマの位置及び縦長断面制御
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 若林 優也、飯尾 俊二、筒井 広明、村山 真道、坂本 惇
2. 発表標題 簡易ヘリカルコイルによる真空閉磁気面生成
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内藤 晋、飯尾 俊二、筒井 広明、坂本 惇、若林 優也
2. 発表標題 小型トカマク装置PHIXにおける誤差磁場主要原因と対策
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮 翔真、村山 真道、飯尾 俊二、筒井 広明
2. 発表標題 小型トカマク装置PHIXにおけるプラズマ位置形状制
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安東 良祐、内藤 晋、筒井 広明、飯尾 俊二
2. 発表標題 簡易ヘリカルコイルを用いたトカマク・プラズマの垂直位置制御
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内藤 晋、安東 良祐、飯尾 俊二、筒井 広明
2. 発表標題 サドルコイルを用いたトカマク・プラズマの垂直位置安定化
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎 琢也、高木 美沙、筒井 広明、飯尾 俊二
2. 発表標題 小型トカマク装置プラズマ制御のための磁気センサーの再設置
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019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
研究 分 担 者	筒井 広明  (TSUTSUI Hiroaki)  (20227440)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授    (12608)	