# 科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 27 年 5 月 2 9 日現在

機関番号: 32644
研究種目: 基盤研究(C)
研究期間: 2012 ~ 2014
課題番号: 2 4 5 6 1 0 2 6
研究課題名(和文)STOR-Mトカマクの外側垂直磁場コイルと非線形素子によるプラズマ電流延長実験
研究課題名(英文)Plasma current extension experiments using the non-linear element and outer vertical field coil in the STOR-M iron core tokamak
研究代表者
御手洗 修(MITARAI,OSAMU)
東海大学・熊本教養教育センター・教授
研究者番号:00181925
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): スフェリカルトカマクにおいては中心ソレノイドの設置が困難であり,それなしでプラズ マ電流をスタートさせる必要がある.そのために鉄心を用いる方法を提案し,プラズマ電流スタート実験をカナダ,サ スカチュワン大学のSTOR-M鉄心トカマクにおいて行った. 即ち,鉄心があれば,プラズマよりも外側に設置した垂直磁場コイルによって容易にプラズマ電流をスタートさせる ことができることを世界で初めて実験によって示し,さらに鉄心が飽和してもプラズマを安定に閉じ込めておくことが できることを,これも世界で初めて実証した.

研究成果の概要(英文): As it is difficult to set the central solenoid (CS) in a spherical tokamak due to limited space, it is necessary to start-up the plasma current without CS. We propose to use an iron core transformer to start-up the plasma current using the outer vertical field coil without CS. The plasma current start-up experiments have been conducted in STOR-M iron core tokamak after removing the CS.

It was successfully demonstrated that the plasma current start-up can be done by the outer vertical field coil without CS. Although this iron core transformer inevitably saturates, the plasma can be controlled during iron core saturation phase. These two experiments were the first demonstrations in the world.

研究分野:プラズマ核融合工学

キーワード: スフェリカルトカマク CSなし電流立ち上げ 鉄心トカマク 非線型飽和

#### 1.研究開始当初の背景

スフェリカルトカマク (ST)核融合炉にお いてはプラズマ電流を駆動する中心ソレノ イド(CS)を設置するスペースがないために, それなしでプラズマ電流をスタートさせる 技術が必要である.その方法として(1)真 空容器内に2枚の電極をいれてその間に電圧 を印加してねじれた磁力線方向に電流を流 してプラズマ電流を駆動する同軸へリシテ ィ入射や,(2)電磁波によってプラズマ電 流を駆動する方法,(3)プラズマよりも外 側に置かれた垂直磁場コイルによる誘導に よって電流を駆動する方法,等いろいろな方 法が提案され,研究代表者もこれら(2)(3) の実験を行ってきたが,まだ,満足のいくベ ストな方法は確立されていない.

特に中心ソレノイド(CS)なしでのプラズ マ電流スタートの問題は,初期プラズマ電流 の生成に関わるので,これを克服しない限り スフェリカルトカマク(ST)核融合炉には全 く期待ができないし,その後の進展もあり得 ない.さらに,この技術を確立しないと,よ り安全な核融合炉として可能性があるD-<sup>3</sup>He 核融合炉を実現させることは全く不可能と なる.このような状況を打破すべく本研究は 開始された.

#### 2.研究の目的

(1)本研究は中心ソレノイドを設置するこ となくプラズマ電流をスタートさせること を目指した研究である.即ち,中心ソレノイ ド(CS)を切り離した鉄心トカマク装置にお いて,プラズマよりも外側に置かれた垂直磁 場コイルによってプラズマ電流を生成する ことができるかどうかを調べるのが目的で ある.このアイディアはまだ試されたことは なく,それを実証する世界でも初めての研究 となる.

(2)また,この場合鉄心は外側に置かれた 垂直磁場コイル電流によって必ず放電の最 終段階では飽和してしまう.従って,その場 合にもプラズマ電流が維持できるかどうか が重要な問題となる.鉄心の非線形効果であ るヒステリシス曲線を測定し,その飽和中も プラズマ電流の維持制御が可能かを実験的 に調べるのが次の目的である.

中心ソレノイドを設置することなくプラ ズマ電流をスタートさせて,鉄心の飽和中も プラズマ電流の維持が行えるということに なると,より安全な D-3He スフェリカルトカ マク核融合炉の設計研究に移行することが でき,核融合研究をさらに進めることができ る.この安全な D-3He スフェリカルトカマク 核融合炉実現に資するのが本研究のさらな る目的である.

#### 3.研究の方法 3.

この研究目的を達成するために , カナダ , サスカチュワン大学の STOR-M 鉄心トカマ クを用いて , プラズマ電流スタート実験を国 際共同研究で行った.図1に示すように,同 装置において,中心部の鉄心上に設置してい る1次巻き線(CS)の接続を切り離し,プラ ズマよりも外側に設置した垂直磁場コイル のみを用いて,プラズマ電流をスタートする.



図1.STOR-Mトカマク装置の断面図

(注: "Outer OH coil "は "外側に置かれた垂直 磁場コイル "と同じものである.鉄心上に巻かれ た一次巻き線は切り離している.)

プラズマ電流が流れ,時間が経つと鉄心は飽 和し電流駆動能力が減少するので,できるだ け長い時間プラズマ電流を維持できるよう に,図2に示すように,放電回路に第3コン デンサーバンクを増設し,垂直磁場コイル電 流をさらに増加させることでプラズマ電流 の維持を図る.即ち鉄心が飽和し,徐々に空 心コイルにかわるので,垂直磁場コイル電流 を急激に増大させる必要がある.また,垂直 磁場コイル電流が増大すると,プラズマ電流 が内側に移動するために,それを制御するフ ィードバックコイル(図1のFeedback BV coil)を用いている.



図2.垂直磁場コイル電流放電回路(C<sub>03</sub>は第3コ ンデンサーバンクを示す)

第3コンデンサーバンクの印加電圧を増加 するにつれて,第1,第2コンデンサーバン クの保護ダイオードがサージ電圧のために 破壊されることが2年度目の実験で明らかに なった.そこで3年度目の実験の際にダイオ ードと並列に RC スナバー回路を取り付けた. その結果,サージ電圧を低減し,保護ダイオ ードを壊すことなく,第3コンデンサーバン クの印加電圧を増大させることが可能とな った.こうして実験を安全に行うことができ て,かつ運転パラメータ領域を広げることも できるようになった.

#### 4.研究成果

#### (1) プラズマ電流スタートアップ実験:

垂直磁場コイルはバイアスコイル電流を 印加せずに,コイル電流0から通電を開始す るので,最初に不整磁場を全く作らない.も し,バイアスコイル電流を流しても電流値そ のものが小さいので不整磁場は少なく,放電 にはほとんど影響はない.従って図3に示す ように,非常に簡単に,再現性よくプラズマ 電流を生成することができた.これは世界で 初めての実証実験である.

次に,このコイル配位(図1)のとき,フ ィードバックコイル電流が小さくてすむし, 放電終了時の急速なディスラプションがな いので,次の鉄心飽和実験には最適であるこ とが明らかになった[発表論文2]. #196096





図3.図1のコイル配位で行ったプラズマ電流ス タートアップ実験結果(N=4巻き).((a)プラズマ 電流,(b)ループ電圧,(c)プラズマ位置,(d)外側垂 直磁場コイル電流(e)鉄心の磁化電流,(f)フィ

ードバックコイル電流 .) [ ただし本図は発表論文 (2)の Fig.7 である .]

# (2)鉄心飽和中のプラズマ電流維持実験 [発表論文(2)と(3)]

さらにプラズマ電流が流れ,時間が経つと 鉄心は飽和するので,飽和してもプラズマ電 流を維持できるように,30msで第3コンデ ンサーバンクを放電しコイル電流を増大す るとともに,プラズマ位置をフィードバック コイルで制御した.その結果,図4に示すよ うに,鉄心が飽和してもプラズマ電流を維持 することができることを,これもまた世界で 初めて実証した.



図 4.30 ms で第3コンデンサーバンクを印加した ときの放電波形.30 ms 以降の鉄心飽和中もプラ ズマ電流を維持することができる(N=4巻き)(a) プラズマ電流,(b)ループ電圧,(c)プラズマ位 置,(d)外側垂直磁場コイル電流,(e)鉄心の磁化電 流,(f)フィードバックコイル電流.)[ただし本図 は発表論文(3)のFig.3左図である.]

図4だけでは鉄心が飽和しているかどうか 明確ではないので,図5に示すように鉄心の ヒステリシス曲線を測定し,その上に放電時 間を表示し,確かに鉄心飽和中もプラズマ電 流が維持できていることを明確に示した.比 較のために第3バンクを印加していない場合 の放電波形を図6に示す.



図 5.N=4 巻きでのヒステリシス曲線.第3コンデ ンサーバンクをかけていないとき(図6.#253739) は鉄心の磁化電流 I<sub>M</sub>=2kA で放電は終了するが,第 3コンデンサーバンクを印加すると(#253744),放 電は飽和度の高い磁化電流 I<sub>M</sub>=2.8 kA まで続く. [ただし本図は発表論文(3)の Fig.3 右図であ る.]



図 6.第3コンデンサーバンクを印加していない ときの放電波形.(#253739)((a)-(e)は図3と同 じ.)[ただし本図は発表論文(1)(3)のFig.5で ある.]

#### (3)巻き数を変えた場合の実験:

図1に示す additional OH coil をさらに結 線し,垂直磁場コイルの巻き数を N=4 巻き から6巻きに増やした実験も行った.その結 果,初期プラズマ電流生成は N=4 巻きと同 様に容易であるが,プラズマ電流が増加する ために,フィードバックコイル電流値が不足 し,そのために鉄心飽和中の制御は最適化が 完全にはできなかった.さらなる実験が必要 ではあるが,今までの結果を総合すると,巻 き数の少ない弱い結合(N=4巻き)の方が 鉄心が飽和したときの制御は行いやすい傾 向にある.

### (4) プラズマ安定性の解析:

なぜこのように鉄心と外側垂直磁場コイ ルによって簡単にプラズマ電流スタートア ップが行えるかを検討した,鉄心によるいわ ゆる n-減衰指数と呼ばれるプラズマの上下 安定性を表す値を計算し,その値が正となる ために初期プラズマが容易に生成できるこ とが明らかになった、フィードバックコイル の配位は上下不安定性になる配位であるが、 コイル電流を逆向きに流すのでむしろ上下 安定であり,かつ鉄心によるプラズマ電流の 作る垂直磁場の分布が上下安定に寄与する ので,初期プラズマ電流が容易に生成できる ことになる、この様子を表すプラズマ電流、 コイル電流を通電した場合の垂直磁場のベ クトル分布を図7に示す.垂直磁場ベクトル からなる磁力線の曲率が外側に向かって凸 の形状をしているので,上下安定であること がわかる.即ち垂直磁場の曲率が作る水平磁 場成分によって,プラズマが上に移動すると 下向きのローレンツ力が働き押し戻され,安 定となる.



図 7. プラズマ電流と垂直磁場ベクトルの分布図. [ただし本図は発表論文(3)の Fig.11-(c)である.]

この結果は今までの他の装置での中心ソ レノイドを設置していない場合のプラズマ 電流スタート実験がなぜ難しいかというヒ ントを与える重要な結果である.

## (5) スフェリカルトカマク炉への適用

小型鉄心と外側垂直磁場コイルによって プラズマ電流スタートアップができ,かつ鉄 心飽和時もプラズマ電流の維持制御ができ ることが明らかになった.この実験結果をス フェリカルトカマクの電流立ち上げに応用 する際の運転方法の概要を図8に示す.



図 8.本研究結果をスフェリカルトカマクに適用 した場合の波形と加熱パワー.(a)プラズマ電流波 形,(b)外側垂直磁場コイル電流,(c)外部加熱パ ワー[ただし本図は発表論文(1)のFig.7-(a)であ る.]

鉄心と外側垂直磁場コイルでプラズマ電 流を生成し,鉄心が飽和すると外側垂直磁場 コイル電流を増大し,同時に外部加熱パワー を印加し,加熱パワーと垂直磁場でさらにプ ラズマ電流を増大させて,核融合反応を起こ す状態に入る.これがこの成果を取り入れた 場合のスフェリカルトカマク核融合炉の運 転シナリオである.

#### (6)まとめと今後:

これらの3年間の実験研究により,小型鉄 心と外側垂直磁場コイルによってプラズマ 電流スタートアップができ,かつ鉄心飽和時 もプラズマ電流の維持制御ができることが 明らかになった.このように信頼性の高い初 期プラズマ電流が得られることにより,次の 研究フェーズに進むことができるようにな った.また,過去何年間も行われてきた研究 に終止符を打つことも可能となり,そのこと によってより安全な D-3He スフェリカルト カマク核融合炉の設計計算に邁進できるよ うになる.このように本研究の画期的な実験 成果により核融合研究が急速に進展するこ とが期待できる.

## 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3件)

(1) <u>O.Mitarai</u>, G.Tomney, E.Lewis, D. McColl, C.Xiao, A.Hirose <sup>"</sup>Plasma Current Start-up Experiments without Central Solenoid in the Iron Core STOR-M Tokamak", Nuclear Fusion(査読あり) 2015 年,55 巻,p063034-063045.

- (2) <u>O.Mitarai</u> C.Xiao, D.McColl, M.Dreval, A.Hirose and M.Peng, "Plasma current start-up by the outer ohmic coil in the STOR-M iron core tokamak", Review of Scientific Instruments (査読あり) 2015 年, 86 巻, p033508-033518
- (3) <u>O.Mitarai</u>, Y.Ding, M.Hubeny, Y.Lu, T. Onchi, D.McColl, C.Xiao and A.Hirose, "Plasma current sustainment after iron core saturation in the STOR-M tokamak" Fusion Engineering and Design, (査読あ り), 2014年, 89巻, p2467-2471,

## [学会発表](計2件)

- (1) <u>O.Mitarai</u>, G.Tomney, E.Lewis, D. McColl, C.Xiao, A.Hirose "Plasma current start-up experiments without central solenoid in the iron core STOR-M tokamak" (Plasma conference 2014, 2014年11月21日,新潟市中央区 朱鷺メッセ,新潟コンベンションセン ター) 21PA-001
- (2) <u>O.Mitarai</u>, G.Tomney, E.Lewis, D. McColl, C.Xiao, A.Hirose <sup>Plasma</sup> Current Start-up Experiments without Central Solenoid in the Iron Core STOR-M Tokamak", (25th IAEA FEC, 2014年10 月16日,サンクトペテルプルク,ロシア) EX/P5-46

# [図書](計0件)

**〔その他〕** ホームページ等 なし

# 6.研究組織

(1)研究代表者
御手洗 修 (MITARAI Osamu)
東海大学・熊本教養教育センター・教授
研究者番号:00181925