

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 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：24561026

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 非線形飽和

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、かつ運転パラメータ領域を広げることが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]。

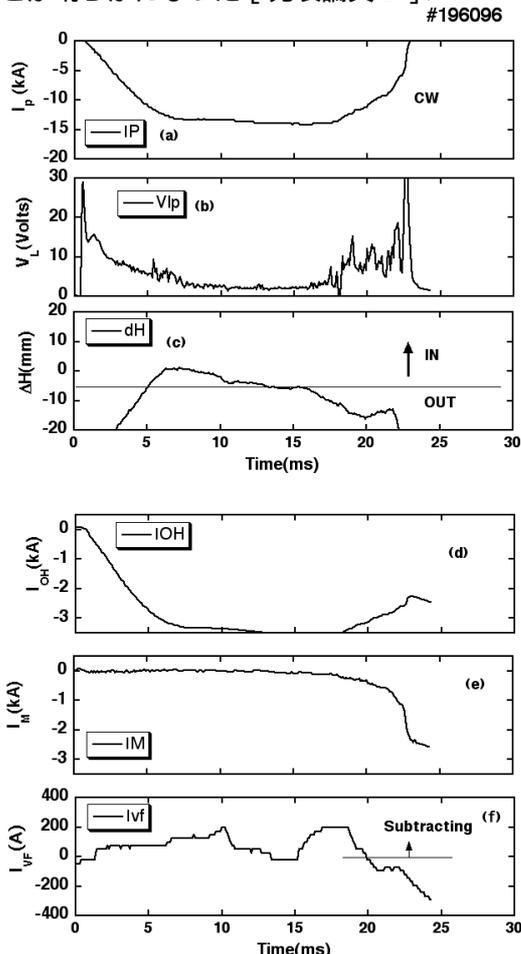


図3. 図1のコイル配位で行ったプラズマ電流スタートアップ実験結果(N=4巻き).((a)プラズマ電流,(b)ループ電圧,(c)プラズマ位置,(d)外側垂直磁場コイル電流(e)鉄心の磁化電流,(f)フィ

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。

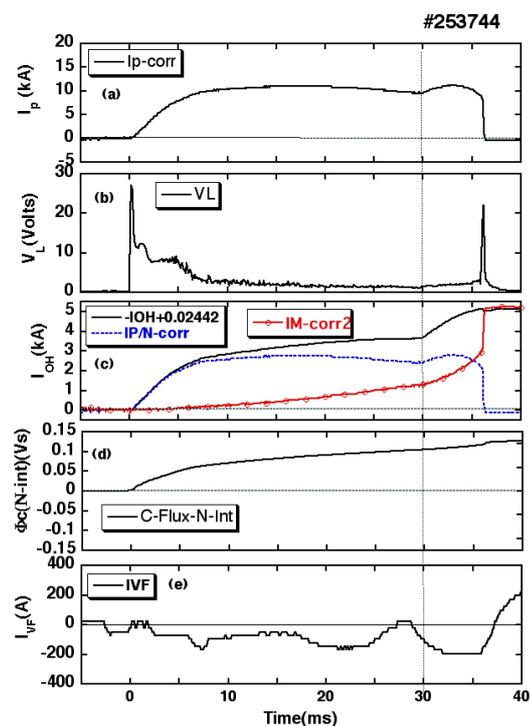


図4. 30 msで第3コンデンサーバンクを印加したときの放電波形. 30 ms以降の鉄心飽和中もプラズマ電流を維持することができる(N=4巻き)(a)プラズマ電流,(b)ループ電圧,(c)プラズマ位置,(d)外側垂直磁場コイル電流,(e)鉄心の磁化電流,(f)フィードバックコイル電流.)[ただし本図は発表論文(3)のFig. 3左図である.]

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。

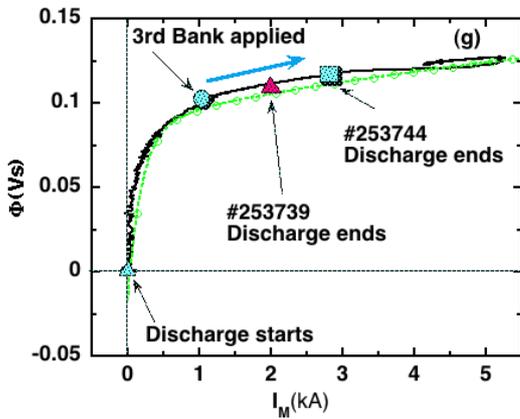


図 5. N=4 巻きでのヒステリシス曲線．第 3 コンデンサーバンクをかけていないとき(図 6. #253739)は鉄心の磁化電流 $I_M=2\text{kA}$ で放電は終了するが，第 3 コンデンサーバンクを印加すると(#253744)，放電は飽和度の高い磁化電流 $I_M=2.8\text{ kA}$ まで続く．[ただし本図は発表論文(3)の Fig.3 右図である.]

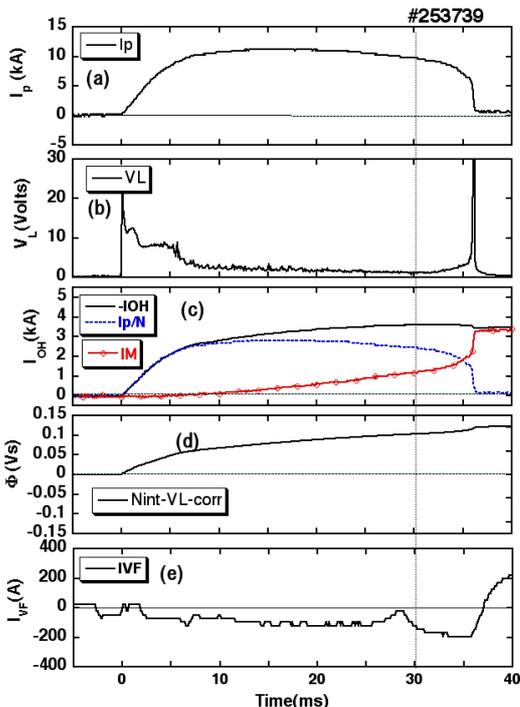


図 6. 第 3 コンデンサーバンクを印加していないときの放電波形．(#253739) ((a)-(e)は図 3 と同じ.) [ただし本図は発表論文(1)(3)の Fig.5 である.]

(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．

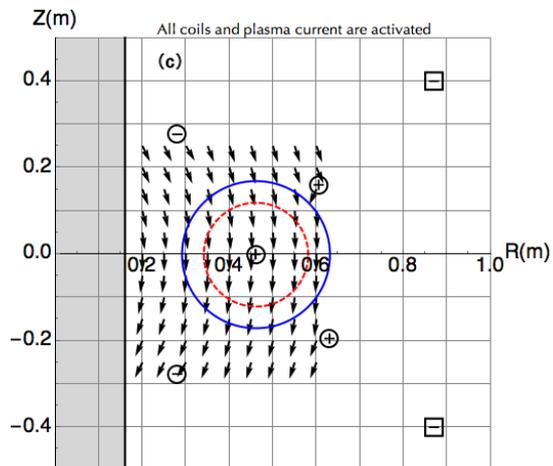


図 7. プラズマ電流と垂直磁場ベクトルの分布図．[ただし本図は発表論文(3)の Fig.11-(c)である.]

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．

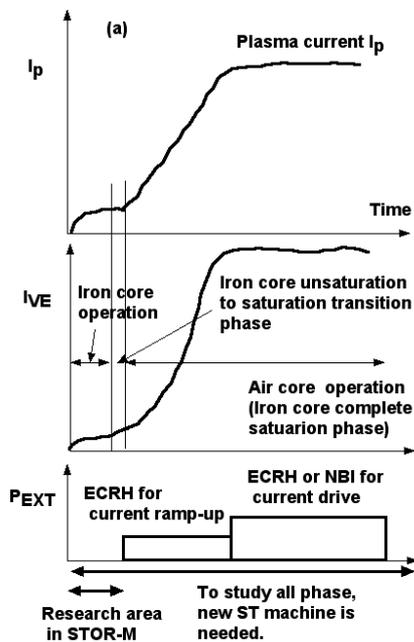


図 8. 本研究結果をスフェリカルトカマクに適用した場合の波形と加熱パワー。(a)プラズマ電流波形, (b)外側垂直磁場コイル電流, (c) 外部加熱パワー [ただし本図は発表論文(1)の Fig.7-(a)である.]

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、そのことによりより安全な 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) O.Mitarai, 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", Nuclear Fusion(査読あり) 2015年, 55巻, p063034-063045.

- (2) O.Mitarai, 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) O.Mitarai, 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) O.Mitarai, 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) O.Mitarai, 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", (25th IAEA FEC, 2014年10月16日, サンクトペテルブルク, 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