

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360391

研究課題名（和文）

定常化球状トカマクにおける自律的構造形成研究のための高速プラズマ流入射

研究課題名（英文）Plasma flow injection for self-organization studies of steady state spherical tokamaks

研究代表者

永田 正義（NAGATA MASAYOSHI）

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00192237

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、将来の経済的な核融合炉の実現を目指した高 β 球状トカマクの定常維持のためのマルチパルス同軸ヘリシティ入射法の有用性を検証することである。兵庫県立大 HIST 球状トカマク装置において同手法の実験を実施した結果、電流増幅、プラズマ寿命の延長、イオン加熱効果等の閉じ込め特性の向上を観測した。さらに、ポロイダルフローシアと負径電場の自律的構造形成と 2 流体効果を含むダイナモ電流機構について探究した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research toward realization of an economic fusion reactor is to verify usefulness of the multi-pulsing Coaxial Helicity Injection (CHI) method which could maintain high β spherical tokamaks in steady state. We have demonstrated current amplification, extension of the plasma life time and increase in the ion temperature by the double-pulsing CHI on HIST. Furthermore, we have investigated self-organization of the poloidal flow shear, generation of the negative radial electric field and dynamo current drive mechanism including two fluid effects. The results are confirmed with help of 3D-MHD computational simulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	12,300,000	3,690,000	15,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：炉心プラズマ、球状トカマク、同軸ヘリシティ入射、ダイナモ

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合エネルギー開発はトカマク、ヘリカル方式を中心に進展してきており、現在 ITER による工学的実証段階に至っている。しかし、将来の経済性の高い商業炉の実現に向けた研究開発が必要である。核融合出力は磁場閉じ込めプラズマの経済性

を表す指標である β 値(プラズマ圧力/磁気圧)の2乗に比例するため、低磁場でコンパクトな核融合炉実現のためには β 値を上昇させる必要がある。バルーニング不安定性モードで決まる上限ベータ値を上昇させるには、低アスペクト比で非円形断面形状の球状トカマク (Spherical tokamak : ST) 磁場配位が有用で

あり、海外では NSTX(米国、プリンストン大学プラズマ物理研究所)や MAST(欧州、英国原子力公社)、国内では大学規模の装置で活発に研究が行われている。ST の重要な研究課題のひとつが、オーミック加熱(OH)コイルなしでのプラズマ立ち上げと電流維持である。ST では装置中心対称軸の付近に十分な空間を確保できないため、OH コイルのフラックスが十分とれず、誘導的な電流の立ち上げと維持が困難である。その解決方策として、高周波や同軸ヘリシティ入射(Coaxial Helicity Injection : CHI)による非誘導電流駆動実験が行われている。これまで、米国ワシントン大学の HIT-II 装置で初めて CHI 実験が実施され、その後 NSTX 装置において、5 kA の入射電流で、電流増幅率 60 倍となる 300 kA のプラズマ電流の立ち上げに成功している。

一方、多彩な遷移現象を伴う核融合炉心プラズマの自律的特性をうまく制御し、最適圧力勾配と高ベータを維持しなければならない。過去に発見された H モード遷移の要因は大きな径負電場の形成とそれに伴うポロイダルシア流による乱流輸送の低減である。現在、メソスケール構造のゾーナルフローによる乱流輸送の抑制の理解が核融合閉じ込め性能向上のための中心課題となっている。HIST 球状トーラス装置において、ダイナモ電流駆動に起因する自発的な径電場によるドリフトと回転フローが観測されている。本研究では、外部からの運動量入射によってポロイダルとトロイダルフローを有効に駆動することで、シアフローと乱流輸送の基礎過程を理解し、本課題解決に寄与する。

さらに、本研究は同軸プラズマガンによる高速磁化プラズモイドの生成が可能であり、巨視的なダイナモ磁場発生の実験室内基礎実験としても位置付けることができる。地球ダイナモや天体・宇宙惑星の回転熱対流に起因するゾーナルフローの発生と構造形成の物理的理解に貢献する。また、磁化プラズモイド噴出に伴う合体・磁気リコネクションの探究は、太陽フレアの突発的現象の機構解明にもつながる。本申請のダイナモ電流駆動の研究はプラズマ基礎科学においても大きな貢献が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、「定常と高ベータ化」を目指した先進球状トカマク研究において、「プラズマフロー・電場の構造形成」および「プラズマフロー駆動制御技術の炉工学的応用」いう両観点から、ダイナモ電流駆動における乱流輸送物理の探求、フロー駆動技術を用いたプラズマ圧力とシア流(電場)の能動的制御を行う。具体的には、① マルチパルス CHI 入射法による高ベータ閉じ込めと準定常電流駆動の実現、② 局所的粒子・運動量入射と

ダイバータ電極バイアスの組み合わせによる圧力・電場・フロー分布制御の実現、③ ダイナモ電流駆動過程でのコア部への運動量乱流輸送の解明、である。

3. 研究の方法

本研究は兵庫県立大 HIST 装置を主要設備として使用した。運転制御のためのコンデンサー電源(全容量約 1MJ)は 11 系統あり、コンピューターによる充電放電制御が可能である。ダブルパルス CHI 実験のためのケミカルコンデンサーを使った電源系統の増設を行った。また、本研究では、装置本体の分解作業を実施し、真空容器の計測ポートを増設した。ダイナモ乱流研究のための大容量データ収集系として、既存カマックシステムの増設も実施した。

各種プラズマ計測の実施内容は以下の通りである。

a) シングルチャンネルの高時間分解ドップラーイオン分光器を用いた不純物イオン温度とフローの空間計測、b) 3 軸磁場コイル内蔵の 3 軸マッハプローブの製作、プラズマ中へ挿入し、径方向スキャンによるフロー揺動と磁場揺動の空間計測、c) 3 軸方向小型ロゴスキーコイルによる各電流密度分布計測、d) ダブルプローブによる径方向電場の空間計測、e) ダブルプローブによる三角波電圧掃引による電子温度と電子密度の空間計測、f) プラズマ中に磁気プローブアレイを 2 次元に挿入し、等ポロイダル磁束面の計測、g) CO₂ レーザー干渉計による平均電子密度計測。分担者の一人は 3 次元 MHD コンピュータシミュレーションコードを用いて、マルチパルス CHI のダイナミクスの計算および 2 流体緩和平衡解析を行った。

4. 研究成果

マルチパルス CHI 方式はパルスの磁気ヘリシティ注入とそれに続く高い閉じ込め特性が得られる抵抗減衰過程を繰り返すことでプラズマを準定常的に維持する革新的電流駆動法である。磁束の再注入時における磁気リコネクションによるイオン加熱と磁束増幅が同時に発生し、入射電圧がオフ後にはダイナモフリーの安定な高 β 特性が得られる。この運転シナリオはスフェロマック装置 SSPX(米国、ローレンスリバモア国立研)において初めて実施され、高温プラズマの準定常維持が確認された。HIST 装置において、この方式を ST に応用することでその効果を検証したのは世界で初めてである。

HIST 装置においてマルチパルス CHI 法として先ずダブルパルス放電による実験を行った。その結果を図 1 に示す。CHI によってプラズマの初期生成と初期電流立ち上げを行い、 $t=2.5$ ms にセカンド CHI パルスを入

射することで、図 1(a)で示す様に抵抗減衰するプラズマ電流が再び増加し、平均電子密度(同図(b))も増大することが示された。また、シングルCHIと比較してプラズマ寿命が2倍以上に延長していることがわかる。

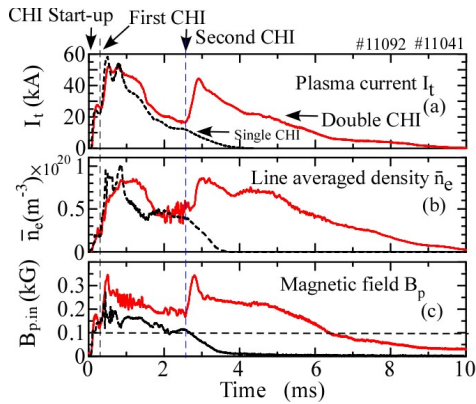


図1 ダブルパルスCHIによる再電流増幅

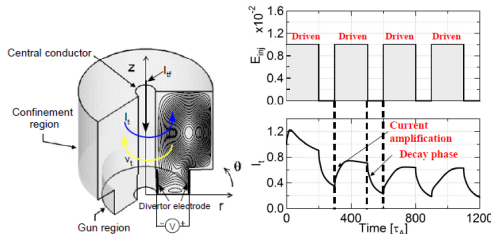


図2 3次元計算機シミュレーションによるマルチパルスCHI電流駆動の検証

実験結果と比較するための3次元MHD計算機シミュレーションが神吉隆司分担者(海上保安大学校)によって実施された。その結果を図2に示す。マルチパルス運転によるSTの定常電流の駆動過程では、磁化プラズモイドが同軸電極からの噴出後、閉じ込め領域のトーラス配位プラズマと磁気リコネクションを介して合体する。この緩和過程では磁束増幅が発生し、それに起因して磁気面構造が乱れるが、ガン電圧がオフになり減衰過程に移ると、安定な磁気面が形成され、熱・粒子輸送の低減による高 β 閉じ込め特性が得られる。

図3(a)からCHIで再増幅するトロイダル電流は外部トロイダル磁場に比例して増加することがわかる。図3(b)はトロイダル電流の大きさはポロイダル磁束に比例することを示している。また、内部磁界構造を詳しく調べ、CHI誘起ダイナモによる閉じたポロイダル磁束の形成を図3(c)のように検証した。

CHI電流増幅過程での酸素の不純物スペクトル線(OII:441.49 nm)を用いたイオンドップラー分光計測によって、イオン温度の時間発

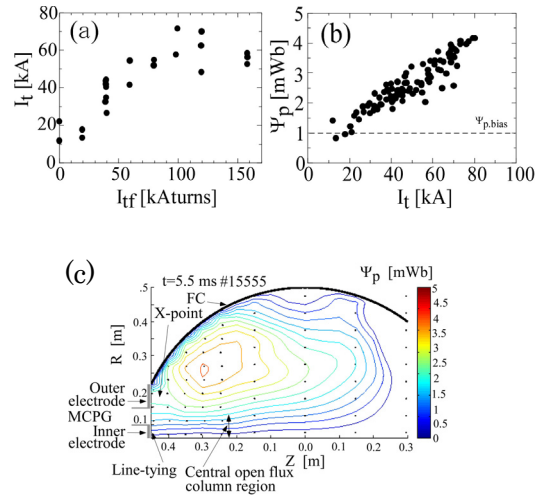


図3 (a)トロイダルコイル電流に対するトロイダル電流依存性、(b)トロイダル電流とポロイダル磁束の相関、および(c)電流維持過程でのポロイダル磁束の等高線図

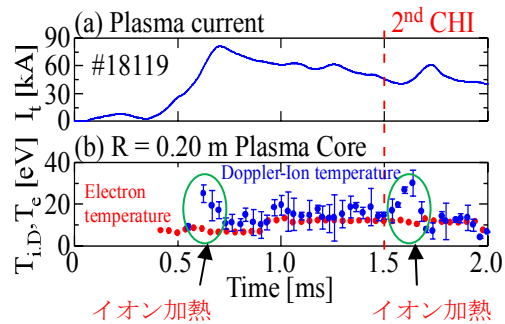


図4 (a)プラズマ電流、(b)ドップラーイオン温度と電子温度の時間発展。立ち上がり時と2nd CHI時のイオンの選択的加熱現象

展を調べた。図4(a)にプラズマ電流を示し、同図(b)にドップラーイオン温度(青)、ダブルプローブ計測による電子温度(赤)の時間変化を示す。プラズマのスタートアップ時と $t=1.5$ msのセカンドCHI時、電子温度はほとんど変化しないが、イオン温度が2~3倍に増加することが観測された、この結果から、CHIによりイオンの選択的加熱が行われていることが示唆される。

図5(a)に示すようなゾーナルフロー様ポロイダルフロー分布が3軸マッププローブを用いて観測された。ポロイダルフローはイオンの $E \times B$ ドリフトと反磁性ドリフトで駆動される。中心導体の周りのオープン磁束コラムと呼ばれる領域は内側セパトトリックスによって閉じた磁束領域と分離しており、この $R=0.15$ m近傍の大きな圧力勾配(図5(c))による反磁性ドリフト効果が発生し、フローシアが形成され、CHIパルスがそれを強めていると解釈している。

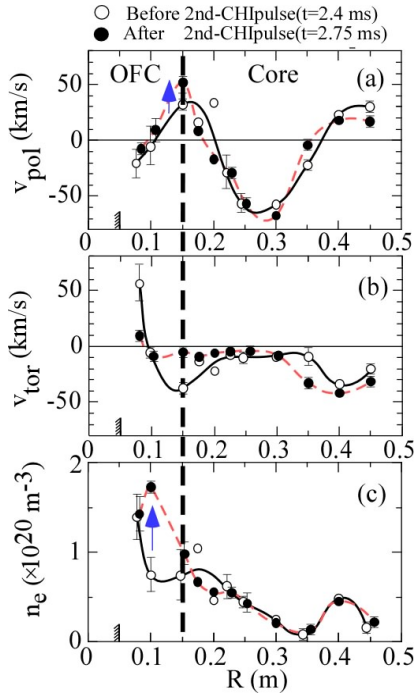


図5 セカンドCHIパルス前後の(a)ポロイダルフロー、(b)トロイダルフロー、(c)電子密度の各径方向分布の変化

図6は磁気軸方向の負の径電場が形成されていることを示しており、その結果、その近傍の磁気揺動のレベルが軽減されることを確認した。この負径電場形成はトカマクの輸送障壁やL-H遷移と類似している。また、ダイナモによるオープンコラム領域から運動量がコア領域に向かって輸送されている。

CHIによるダイナモ電流駆動機構について、2流体モデルをベースに一般化されたMean-field オームの(1)式を用いて解析を進めた。ここで、右辺第1項はMHDダイナモ、第2項はHallダイナモと呼ばれており、 η はプラズマ抵抗率である。

$$\eta \mathbf{j}_{\parallel 0} - \mathbf{E}_{\parallel 0} = \langle \tilde{\mathbf{v}} \times \tilde{\mathbf{B}} \rangle_{\parallel} - \langle \tilde{\mathbf{j}} \times \tilde{\mathbf{B}} \rangle_{\parallel} / en \quad (1)$$

研究方法で記載したMHDダイナモプローブとHallプローブをプラズマ中の同じ位置に挿入し、空間、時間的に揺動するフロー、

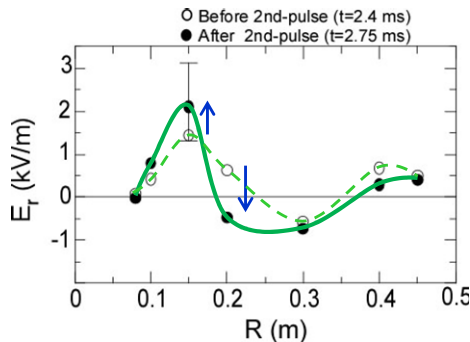


図6 径電場 E_r の径方向分布の変化

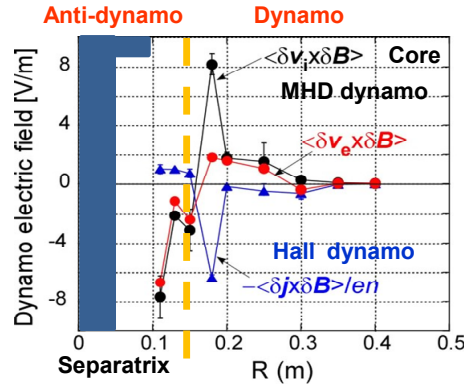


図7 MHDダイナモ電場とHallダイナモ電場の径方向分布

磁場および電流密度を 1μ 秒の時間分解で計測した。この各ダイナモ電場の計測法は本研究による独自開発技術である。その径方向分布の計測結果を図7に示す。内部電極（負バイアス電位）表面と鎖交しているインボード側のダイバータオープン磁束の駆動領域ではアンチダイナモ電場が発生し、一方、セパトリックを境界にしてコア領域内ではダイナモ電場が誘起され、トロイダル電流が駆動される。放電の後半のプラズマ密度が低くなる時間では、イオンスキン長が大きくなり、HallダイナモがMHDダイナモに比べて大きくなるといった2流体効果も確認された。

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8件)

- ① T. Hanao, H. Hirono, T. Hyobu, K. Ito, K. Matsumoto, T. Nakayama, Y. Kikuchi, N. Fukumoto, M. Nagata: Observation of Direct Ion Heating in Double-pulsing CHI on Helicity Injected Spherical Torus Plasmas, Plasma and Fusion Research (Rapid Communications), to be published, (2013).
- ② T.R. Jarboe, C. Akcay, M.A. Chilenski, D.A. Ennis, ..., M. Nagata: Recent results from the HIT-SI experiment, Nuclear Fusion Vol. **51**, pp. 063029-1-063029-15 (2011).
- ③ T. Kanki, M. Nagata, Y. Kagei: Magneto-hydro-dynamics simulation of kink instability and plasma flow during sustainment of coaxial gun spheromak, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Vol. **5**, pp. S2055-1-S2055-4 (2010).

[学会発表]

(計 28 件 国際会議 14 件、国内学会 14 件)

- ① M. Nagata, T. Higashi, M. Ishihara, T. Hanao, K. Ito, K. Matsumoto, Y. Kikuchi, N. Fukumoto, T. Kanki: Flow and Magnetic Field Profiles in the HIST Spherical Torus Plasmas Sustained by Double Pulsing Coaxial Helicity Injection, IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, ICC/1-1Rb (2012).
- ② M. Nagata, T. Hanao, H. Hirono, T. Hyobu, M. Ishihara, K. Ito, T. Nakayama, K. Matsumoto, Y. Kikuchi and N. Fukumoto: Dynamo current drive via low-frequency waves in the HIST helicity-driven spherical torus plasma, Proc. of 39th EPS Conference on Plasma Physics & 16th ICPP, Stockholm, P5.072, (2012).
- ③ M. Nagata, T. Higashi, M. Ishihara, T. Hanao, K. Ito, K. Matsumoto, Y. Kikuchi, N. Fukumoto: Measurements of dynamo effects in the HIST helicity-driven spherical torus plasma, Proc. of 38th EPS Conference on Plasma Physics, Strasbourg, P-4.081 (2011).
- ④ M. Nagata, T. Higashi, M. Ishihara, Y. Kikuchi, N. Fukumoto, T. Kanki: Flow and dynamo measurements in the HIST double pulsing CHI experiment, Workshop on Innovation in Fusion Science (ICC2011) and US-Japan Workshop on Compact Torus Plasma, Seattle, USA, (2011).
- ⑤ M. Nagata, Y. Kikuchi, K. Ando, T. Higashi, N. Fukumoto, T. Kanki, Y. Kagei : Demonstration of Multipulsed Current Drive Scenario using Coaxial Helicity Injection in the HIST Spherical Torus Plasmas, IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, EXC/P2-04, (2010).

6. 研究組織

(1)研究代表者

永田 正義 (NAGATA MASAYOSHI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00192237

(2)研究分担者

福本 直之 (FUKUMOTO NAOYUKI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90275305
菊池 祐介 (KIKUCHI YUSUKE)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00433326
神吉 隆司 (KANKI TAKASHI)
海上保安大学校・教授
研究者番号：40524468

(3)連携研究者

関子 秀樹 (ZUSHI HIDEKI)
九州大学応用力学研究所・教授
研究者番号：20127096