

## 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 24年 6月 3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246137

研究課題名（和文） 圧力駆動電流による球状トカマクの立ち上げと制御

研究課題名（英文） Start-up and control of a spherical tokamak plasma using pressure driven current

研究代表者

江尻 晶 (EJIRI AKIRA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30249966

研究成果の概要（和文）：高周波波動による球状トカマクプラズマの立ち上げ・維持の理解と制御を目的に研究を行った。これまでに球状トカマクでは用いられたことのない低域混成波帯の波動(200 MHz)を用いて球状トカマクプラズマを維持することに成功した。平衡解析の精度・信頼度を向上させて、TST-2の種々のプラズマを解析した結果、波動維持プラズマが比較的高いポロイダルベータ比（1または1以上）で特徴づけられることがわかった。指向性のある波動を用いた実験から、波動で生成された高速電子が担うプラズマ電流があること、それとは別の圧力勾配で駆動されていると推定される電流があることがわかった。

研究成果の概要（英文）：The objectives of the research are understanding and control of RF wave start-up/sustainment of spherical tokamak (ST) plasmas. We have succeeded in the sustainment of ST plasma with lower hybrid (LH) range of frequency wave, which is applied to an ST for the first time. After the improvement of accuracy and reliability of equilibrium analysis, we compared equilibria of different scenarios, and we found that the equilibria of RF sustained ST plasmas are characterized by a relatively high (one or larger than one) poloidal beta. By injecting directive LH wave, it was found that the wave generates high energy electrons, which contribute to the plasma current. The residual plasma current seems to be pressure driven current.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2010年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	23,700,000	7,110,000	30,810,000

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：球状トカマク、電流駆動、高周波、平衡、トムソン散乱

## 1. 研究開始当初の背景

球状トカマク型核融合炉では、空間的制約から誘導電場を生成する中心ソレノイドコイル (CS) をなくすことが望ましい。このために、CSを使わない球状トカマク (ST) 配位

の形成と維持を目標とした実験が行われてきた。最初に、米国の CDX-U 装置において、電子サイクロトロン (EC) 周波数帯の波動を用いて ST 配位が自発的に形成されることが示された。その後、同様の EC 波を用いた実

験が京都大学の LATE 装置、東京大学の TST-2 装置、九州大学の CPD 装置、JAEA の JT-60U 装置、英国の MAST 装置で行われた。一方、EC 波を使わずに垂直磁場の誘導電圧を用いる方法、同軸プラズマを入射する方法、2つのプラズマの合体を用いる方法等過渡的な手法も試されていた。

EC 波を用いる手法は、球状トカマク (ST) 配位の生成、維持、電流の増大が可能なことから、もっとも有望であるが、肝心の電流駆動機構については諸説があり、以下の3つに分類できる。電子バーンスタイン波 (EBW) 電流駆動、圧力駆動、単一粒子軌道に起因する電流駆動。

一方、TST-2 では、イオンサイクロトロン周波数の 10 倍程度の高次高調波 (21MHz) のみで ST 配位を維持できることを示されており、従来考えられていた指向性のある波による電流駆動は必ずしも必要ないことが示されつつあった。

## 2. 研究の目的

電流駆動機構を現象論的に探るには、異なる条件、特に異なる波動を用いて電流が駆動できるかを探るのが有効である。また、圧力駆動電流を調べるには、高い精度で平衡を求め、平衡解析の精度、信頼度を高めること、直接的な温度密度測定手段であるトムソン散乱システムの開発、信頼度の高い干渉計の多コード化も重要である。高エネルギーの電子が担う電流も重要と考えられ、これを反映する X 線の信号をモニターする必要もある。これらの計測を整備しつつ、異なる波動での実験を行うことを目的とする。

また、より積極的なプラズマの制御を目指して、ホットカソード電流源を準備して、開いた磁気面領域に電流を注入し平衡や電流駆動に影響を及ぼすことも目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 新たな種類の波動として低域混成 (LH) 波帯の 200 MHz の高周波源、アンテナを整備し、TST-2 プラズマへ入射する。また、EC 波でより高いパワーを入射できる 8.2 GHz の高周波源、アンテナを整備し、TST-2 プラズマへ入射する。

(2) プラズマ電流が変動すると真空容器に渦電流が流れる。平衡解析ではこの渦電流の影響を正しく評価しなければならない。そこで、8本の Flux Loop を真空容器外に設置し、平衡解析に用いた。

(3) プラズマ内部の様子を把握するために周波数 50 GHz の干渉計と、その測定経路を整備した。

(4) Lab<sub>6</sub> ホットカソード電流源を製作し、開いた磁気面での電流駆動を試みる。

(5) 高周波で維持されたプラズマは密度が低

い。このプラズマの温度、密度分布を探るために、低密度測定用のマルチバستمソン散乱計測器を開発する。

## 4. 研究成果

(1) LH 波帯、EC 波入射によるプラズマの維持と平衡解析

LH 波帯 (200 MHz)、EC 波 (8.2 GHz) を用いて球状トカマクプラズマを維持することに成功した。LH 波帯を励起するために2種類のアンテナを用い、比較した。シングルストラップのアンテナでは、トーラス外側に電流分布がピークを持ち、コムラインアンテナでは、中心でピークした電流分布が得られる傾向があった。垂直磁場を適切なタイミングでランプアップさせることで、より大きなプラズマ電流が得られるようになった (図 1 左)。これまでの最大プラズマ電流は 15 kA である。このような放電では、垂直磁場、プラズマ電流の変動が渦電流を生成する。新たに真空容器外にフラックスループを設置して用いることで、平衡解析の信頼を向上させることができた。

高周波維持プラズマの平衡の特徴はポロイダルベータ比が 1 または 1 以上であり、圧力勾配による電流駆動の寄与が大きいことを示唆する。一方、LH 波帯で維持したプラズマは 100 keV を超える高エネルギー X 線を放射する。この X 線は高速電子を反映していると考えられ、X 線が観測されたことは、高速電子が電流駆動に寄与していることを示唆する。そこで、X 線の放射方向、電流の駆動方向、圧力駆動電流の向きを決めている垂直磁場の向きの関係を調べた。その結果、LH 波が高速電子を駆動し、それによるプラズマ電流と、それとは無関係の圧力駆動電流と考えられる電流 (最大 5 kA) が同程度であることがわかった。

プラズマ電流が低い時は、閉じた磁気面の外側の電流を仮定する必要があったが、電流が高い時は、その必要はなくなった。一方、EC 波 (8.2 GHz) を用いた場合は、閉じた磁気面の外側の電流を仮定する必要があった。従って、閉じた磁気面の外側に電流が流れているか否かは、量的な問題と質的な問題の両方の側面があると考えられる。

8.2 GHz の EC 波動を用いた実験では、入射方向を変えて実験したが、入射方向依存性は見られなかった。入射条件に依存しないことは 2.45 GHz の EC 波動を入射した実験でも見られ、このことは、プラズマの吸収が弱いこと、従来型の波動による電流駆動は寄与していないことを意味する。

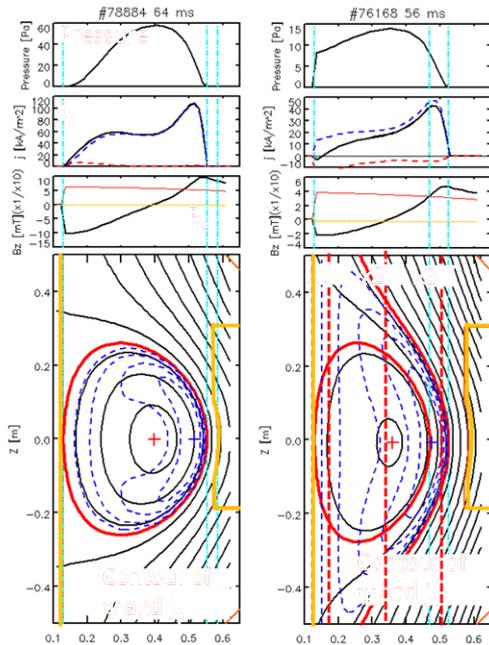


図 1 : 高周波維持プラズマの平衡。左は 200 MHz、右は 8.2 GHz で維持されており、プラズマ電流はそれぞれ、9 kA、4.5 kA。

### (2) 干渉計の整備

周波数 50 GHz のマイクロ波を用いた干渉計を製作し、最大 9 本の測定コード (鉛直コード:  $R=280, 390, 470, 520, 600$  mm, 水平コード:  $Z=0, 200, 220, -220$  mm) で高周波維持プラズマの線積分電子密度を測定した。電子密度に上下非対称性が見られることと、単純な分布では表せないことがわかった。

### (3) マルチパストムソン散乱計測

トムソン散乱計測は、電子温度を測定する信頼度の高い手法である。しかしながら、上述した、波動で維持された球状トカマクプラズマは、CS を用いた誘導プラズマに比べて 2 桁程度密度が低く、トムソン散乱の信号強度もまた 2 桁程度小さい。これまで、複数散乱信号の積算を行ったが、信号の検出には至っていない。そこで、プラズマに入射したレーザーが何度もプラズマ中を往復するマルチパストムソン散乱計測の開発研究を行った。

これまで、共焦点ミラーを用いた往復光学系の解析的検討、数値的検討、可視光による往復光学系の試験を行った。幾つかの理由から、実際のプラズマ測定では、数往復程度が限界であると考えられる。そこで、現在はポッケルスセルを用いた同軸型往復光学系の開発を計画している。

マルチパストムソン散乱計測の開発の一環として、ダブルパス散乱の配位を既設のシステムに組み込んで、プラズマ測定を行った。測定対象は密度の高い誘導プラズマである。往路、復路の電子温度が誤差 (約 10%) の範囲内で一致すること、誤差以上の非等方性が温度にあれば、その検出が期待できることが

わかった (図 2)。

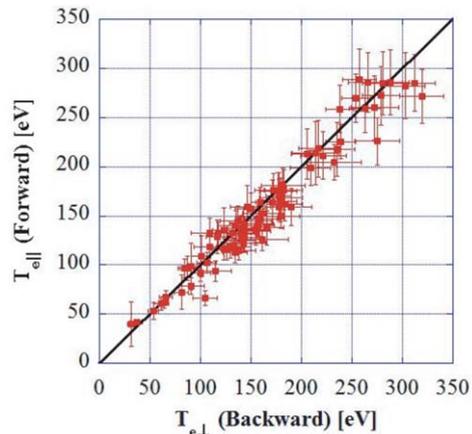


図 2 : ダブルパストムソン散乱による温度の非等方性の検証

### (4) Lab6 ホットカソード電流源を用いた電流駆動

開いた磁気面領域への電流注入と平衡制御を目的に、Lab6 ホットカソードおよび、対向アノードを製作し実験をおこなった。真空磁場において、プラズマ電流 15 A、電子密度  $5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  のプラズマを生成することができた。また、マイクロ波加熱時には、十分な予備電離効果を持つことが確かめられたものの、駆動される電流値が小さく、高周波維持プラズマへの大きな影響は期待できないことがわかった。

### 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 13 件)

① H. Tojo, A. Ejiri, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, Y. Takase, 他 2 名, "First measurement of electron temperature from signal ratios in a double-pass Thomson scattering system", Review of Scientific Instruments, **83**, 023507 (2012) 査読有

② Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, M. Sonehara, 他 12 名, "Evaluation of edge electron temperature fluctuation by the use of fast voltage scanning method on TST-2", Plasma Fusion Research, **6**, 2402036 (2011) 査読有

③ Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, Y. Nagashima, 他 12 名, "Development of a plasma current ramp-up technique for spherical tokamaks by the lower hybrid

wave”, Nuclear Fusion ,51, 063017 (2011) 査読有

④J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, 他 9 名, “Development of a Double-pass Thomson Scattering System in the TST-2 Spherical Tokamak”, Plasma Fusion Research, 6, 1202133 (2011) 査読有

⑤H. Kurashina, A. Ejiri, Y. Takase, 他 11 名, “Electron Density Measurements of Non-Inductive Start-Up Plasmas in the TST-2”, Plasma Fusion Research, 5, 024 (2010) 査読有

⑥O. Watanabe, A. Ejiri, H. Kurashina, T. Ohsako, Y. Nagashima, 他 11 名, “Comparison of Hydrogen and Deuterium Plasmas in ECH Start-Up Experiment in the TST-2 Spherical Tokamak”, Plasma Fusion Research 5, S2032 (2010) 査読有

⑦T. Yamaguchi, A. Ejiri, J. Hiratsuka, Y. Takase, Y. Nagashima, 他 12 名, “Development of a Thomson scattering system in the TST-2 spherical tokamak”, Plasma Fusion Research, 5, S2092 (2010) 査読有

⑧A. Ejiri, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, Y. Takase, 他 2 名, “Development of a bright polychromator for Thomson scattering measurements”, Plasma Fusion Research, 5, S2082 (2010) 査読有

⑨J. Hiratsuka, A. Ejiri, Y. Takase and T. Yamaguchi, “Feasibility of a Multi-Pass Thomson Scattering System with Confocal Spherical”, Plasma Fusion Research, 5, 44 (2010) 査読有

⑩Y. Nagashima, J. Ozaki, M. Sonehara, Y. Takase, A. Ejiri, 他 15 名, “Fluctuation measurement in the edge plasma on TST-2”, Plasma Fusion Research, 5, S2049 (2010) 査読有

⑪Y. Nagashima, K. Nagaoka, K. Itoh, 他 16 名, “Observation of edge Reynolds stress increase preceding an L-H transition in Compact Helical System”, Plasma Fusion Research, 5, 022 (2010) 査読有

⑫ H. Tojo, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Nagashima, 他 11 名, “Phase Alignments between MHD Modes Followed by Minor

Collapses on TST-2”, Plasma Fusion Research, 4, 015 (2009) 査読有

⑬A. Ejiri, Y. Takase, T. Oosako, 他 19 名, “Non-inductive plasma current start-up by EC and RF power in the TST-2 spherical tokamak”, Nuclear Fusion, 49, 065010 (2009) 査読有

[学会発表] (計 18 件)

①江尻晶, 安保貴憲, 大迫琢也, 角田英俊, 他 21 名, “TST-2 における平衡解析”, 日本物理学会 2012 年春季大会, 兵庫県西宮市 (関西学院), Mar. 24, 2012

②J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, 他 9 名, “Off-axis temperature anisotropy measurement by a double-pass Thomson scattering diagnostic system on TST-2”, 21th International Toki Conference, 岐阜県土岐市 (セラトピア土岐), Nov. 28, 2011

③H. Tojo, J. Hiratsuka, A. Ejiri, T. Yamaguchi, Y. Takase, “Demonstration of an in-situ relative calibration method for a Thomson scattering diagnostics on TST-2”, 21th International Toki Conference, 岐阜県土岐市 (セラトピア土岐), Nov. 28, 2011

④Y. Takase, A. Ejiri, H. Furui, 他 21 名, “Plasma current ramp-up by waves in the lower hybrid frequency range on TST-2”, 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Salt Lake City, USA, Nov. 14, 2011

⑤A. Ejiri, T. Wakatsuki, H. Kakuda, Y. Takase, 他 16 名, “Equilibrium analysis of the RF start-up plasma on the TST-2 spherical tokamak device”, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 岐阜県土岐市 (核融合科学研究所), Sep. 27, 2011

⑥T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Kakuda, 他 16 名, “X-ray Measurements during Plasma Current Start-up Experiments using Waves in the Lower Hybrid Frequency Range on the TST-2 Spherical Tokamak”, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 岐阜県土岐市 (核融合科学研究所), Sep. 27, 2011

⑦Y. Takase, T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Kakuda, 他 15 名, "Plasma Current Start-up Experiment using Waves in the Lower Hybrid Frequency Range in TST-2", The 19th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Rhode Island, USA, Jun. 1, 2011

⑧A. Ejiri, H. Kurashina, Y. Takase, 他 13 名, "Non-inductive Plasma Current Start-up Experiments in the TST-2 Spherical Tokamak", 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct. 11, 2010

⑨Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, 他 11 名, "Development of a Plasma Current Ramp-up Technique for Spherical Tokamaks by the Lower-Hybrid", 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct. 11, 2010

⑩江尻晶, 山口隆史, 平塚淳一, 篠遼太, 高瀬雄一, 長谷川真, 成原一途, "コンパクトなトムソン散乱システムの開発", 第 5 回 QUEST 研究会 (春日) Aug. 30, 2010

⑪平塚淳一, 江尻晶, 高瀬雄一, 山口隆史, "共焦点ミラーを用いたトムソン散乱計測", 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 高山 (岐阜県), Jun. 10, 2010

⑫江尻晶, 高瀬雄一, "非等方圧力平衡によるバナナ状圧力分布", 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 高山 (岐阜県), Jun. 10, 2010

⑬Y. Nagashima, "Nonlinear phenomena of edge fluctuations in RF range during high harmonic fast wave heating experiments in the TST-2 spherical tokamak", 2010 US-Japan RF Physics Workshop, San Diego, USA, Mar. 8, 2010

⑭A. Ejiri, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, Y. Takase, M. Hasegawa and K. Narihara, "Development of a bright polychromator for Thomson scattering measurements": 19th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 8, 11, 2009, P1-81

⑮Y. Takase, "RF Experiments on TST-2", The 51st Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2, 2009

⑯江尻晶, 高瀬雄一, "非誘導トカマク立ち

上げ過程における電場, 粒子軌道, 電流", 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本), Sep. 25, 2009

⑰Y. Takase, "RF Start-up, Heating and Current Drive Studies on TST-2 and UTST (invited)", The 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, Madison, USA, Sep. 22, 2009

⑱A. Ejiri, H. Kurashina, Y. Takase, "Microwave reflectometry and interferometry in the TST-2 spherical tokamak", International Workshop on Microwave - Laser Diagnostics for burning plasma experiment (IWML-2009), Toki, Japan, Aug. 17, 2009

[その他]

ホームページ

<http://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

江尻 晶 (EJIRI AKIRA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号 : 30249966

### (2) 研究分担者

永島 芳彦 (NAGASHIMA YOSHIHIKO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号 : 90390632

### (3) 連携研究者

高瀬 雄一 (TAKASE YUICHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号 : 70292828