

平成22年 4月 8日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760578

研究課題名（和文） ECH球状トカマクにおける静電場およびフローの効果

研究課題名（英文） Effects of electrostatic field and flow in ECH spherical tokamak

研究代表者

吉永 智一（YOSHINAGA TOMOKAZU）

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・研究員

研究者番号：30467899

研究成果の概要（和文）：国内最大の球状トカマクプラズマ実験装置 QUEST において、マイクロ波を用いた電子サイクロトロン加熱・電流駆動（ECH/ECCD）によるプラズマ電流生成実験を行なった。8.2GHz、35kW のマイクロ波を用いて、約 10kA のプラズマ電流を 0.8 秒間維持することに成功した。このようなプラズマにおいて指向性ラングミュアプローブ計測を行った結果、100eV 程度の電子が速度空間において非等方に存在することが示唆された。これらの電子がプラズマ電流の発生・維持を担っていると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Non-inductive plasma current start-up experiment by electron-cyclotron-heating and current-drive (ECH/ECCD) using microwaves has been conducted in the QUEST device, which is the largest spherical tokamak device in Japan. Plasma current reached ~ 10kA and was sustained for 0.8 sec during the microwave injection at 8.2GHz, 35kW. The directive Langmuir probe measurement suggested the isotropic distribution of electrons at ~ 100eV in the velocity space, which is considered to drive and sustain the plasma current.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：周辺プラズマ・球状トカマク・非誘導電流立ち上げ

## 1. 研究開始当初の背景

（1）トカマク型の核融合炉においては、閉じ込め磁場配位を形成するためにトーラスプラズマ中にプラズマ電流を誘起する必要がある。従来型のトカマク装置においては、

プラズマ電流は一般的に装置中心部に配置された中心ソレノイド（CS）による電磁誘導を利用して生成される。一方で、将来の核融合炉においては全ての磁場コイルは超伝導化され、コイル電流の時間変化は極めて低速

に抑えられなければならない。従って、プラズマ電流を立ち上げるための誘導電場を十分に大きく取れる補償がない。高ベータ（プラズマのエネルギーと閉じ込め磁場のエネルギーとの比）、高自発電流率等の利点を有する球状トカマク（ST）では、問題は更に深刻となる。プラズマ形状を低アスペクト比（2以下）にするために装置中心部の空間が狭く限られ、大型の中心ソレノイド（CS）を配置することが困難となるためである。放電の開始とプラズマ電流の立ち上げは、トカマク型核融合炉を実現するために解決すべき重要な課題である。

（2）電子サイクロトロン加熱・電流駆動（ECH/ECCD）システムは、ITERにおいてOHプラズマ電流立ち上げのための予備電離にも用いられる見込みであり、ITERの主要加熱装置の一つとなっている。トロイダル磁場に垂直磁場を重畳した螺旋状磁場配位のもとでは、ECHのみによってプラズマ電流が発生することが古くから知られていた。更に、閉じた磁気面配位（初期ST平衡配位）が急激なプラズマ電流増大現象（電流ジャンプ）によって自発的に発現することが近年の小型ST装置での実験で相次いで確認され、ECH/ECCDを用いる手法の有用性が示されつつあった。電流ジャンプによる電流立ち上げ手法を確立し、ST炉への適用検討を行うためには電流ジャンプの駆動メカニズムを明らかにすることが必須である。

（3）電流ジャンプにおいて、プラズマ電流は電流の増加に伴う逆電場に反して急激に増大するため、極めて強力な電流生成機構が存在していることになる。以前の研究から、高速電子の軌道閉じ込めによる電流生成機構が関与している可能性が示唆されていたが、実験的に確認されたことはなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、螺旋状磁場配位のもとでのECHにより、電流ジャンプを介して初期ST平衡が形成される過程において、高速電子流とプラズマ電流生成との関連について調べることである。特に、高速電子の軌道閉じ込めが実際に存在し、プラズマ電流の生成・駆動に寄与しているか否か確認する。

## 3. 研究の方法

（1）実験は、九州大学における中型ST装置QUEST（平成20年度に建設完了・運転開始）で行った。本研究はQUESTにおいて電流ジャンプが得られなければ意味を成さないため、まずは定常外部磁場下でのECH放電を行い電流ジャンプの再現を目指した。LATE（京大）、TST-2（東大）、CPD（九大）等の小型ST装置では電流ジャンプが再現されていたが、中規模の装置での試みは初めてであった。電流ジャンプが発生する入射電力値が装置規模の違いによって異なることが予想されたが、CPDにおける実績（25kW程度）から外挿したQUESTにおける電力の閾値は200kWとなり、電流ジャンプの再現は可能であると考えた。最適な放電条件を探索するため、外部磁場、初期封入水素ガス圧等の外部条件についてパラメータスキャンを行った。

（2）電流ジャンプの駆動機構の候補として重要視されている高速電子流の空間分布計測を行うため、指向性ラングミュアプローブの設計、製作を行った。小型装置CPDにおいて使用したものを長ストロークのものに改造し、QUEST装置においてもプローブ計測端子がプラズマ中心付近まで到達できるようにした。並行して、電流分布推定のための磁気計測用フラックスループ系、および磁気解析用のプログラム整備等を行った。

（3）パラメータスキャンおよび放電コンディショニングにより、電流ジャンプ発現に必要な外部条件を整える（1）。（2）で整備した指向性ラングミュアプローブをプラズマ中に挿入し、高速電子の非等方性に関する計測を行う。指向性ラングミュアプローブはプラズマに擾乱を与える可能性があるため、プローブ位置の設定によってプラズマに影響が出難い放電条件に絞る。

## 4. 研究成果

（1）QUEST建設完了後から定常外部磁場条件下で8.2GHzのマイクロ波を入射し、電流ジャンプに必要な放電条件の探索を行った。これに並行して指向性ラングミュアプローブを始めとする計測システムの整備を進めた。平成20年度は、トロイダル磁場0.13T、垂直磁場16mTの外部磁場下で、60kWのマイクロ波電力を用いて0.8kAのプラズマ電流発生を確認したが、電流ジャンプおよび初期ST

平衡（閉じた磁気面の形成）には到らなかった。実験初年度ということもあり、真空容器壁から放出される不純物ガスにより、プラズマの電子温度の上昇が抑制されたためだと考えられる。

(2) 平成 21 年度も同様の実験を行い、引き続き最適放電条件の探索を行った。トロイダル磁場 0.13T、垂直磁場 32mT の外部磁場下で、35kW のマイクロ波電力の入射により 10kA のプラズマ電流を 0.8 秒にわたって維持することに成功した (図 1)。

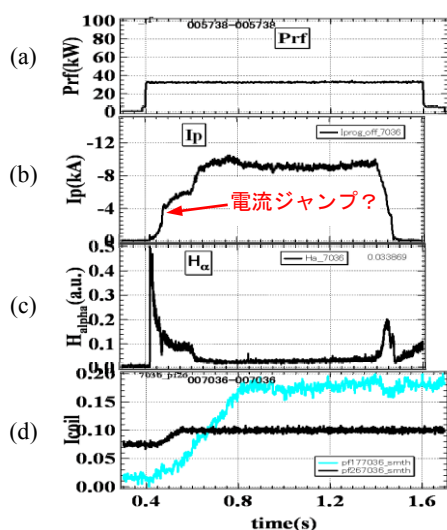


図 1: プラズマ電流 10kA が得られた放電波形。(a):入射電力、(b):プラズマ電流、(c):プラズマ発光信号、(d):垂直磁場コイル電流。

この放電では、電流ジャンプは放電開始直後 0.48 秒付近で発生していると考えられる。その後、プラズマ電流は垂直磁場の増大に合わせて 6kA から 10kA 程度まで増加し、維持されている。磁気計測・解析の結果、この放電では閉じた磁気面（初期 ST 平衡）の形成が確認された。

(3) 初期 ST 平衡が形成される放電において、プラズマ外から指向性ラングミュアプローブを挿入し、浮遊電位の空間分布を調べた。また、このときのプラズマ電流値、X 線発光強度についてプローブ先端位置との依存性を調べた (図 2)。

図 2 (b) は、指向性プローブで計測した浮遊電位の空間分布を示している。正のプラズマ電流を運ぶ電子が運動する方向（順方向とする；図中赤点）の端子で計測した浮遊電位のみが負極性に増大し、最外殻磁気面 ((d)

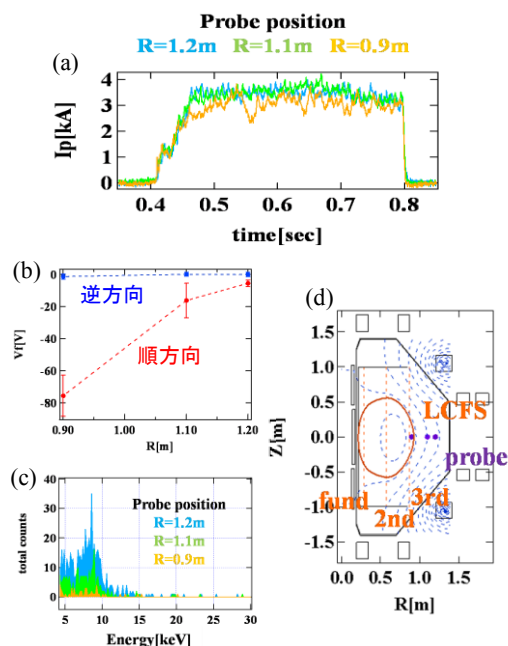


図 2: 初期 ST 平衡形成に致る放電における指向性プローブ実験結果。(a):プラズマ電流、(b):浮遊電位の空間分布、(c):X 線信号強度、(d):計測磁場配位とプローブ位置。

の赤線部分;R=0.9m) 表面では約-75V に達している。一方、逆方向の端子 (図中青点) における浮遊電位は数 V のままで空間的に変化していない。このことは、少なくとも 75eV を超えるエネルギーを持つ電子が存在し、且つ順方向に選択的に運動していることを示している。

図 2 (a) に見られる様に、指向性プローブ先端を最外殻磁気面 ((d) の赤線部分) 表面まで移動させても、プラズマ電流は多少減少するだけであり、プローブ位置の変化による大きな影響は見られない。一方、(c) の X 線強度はプローブが最外殻磁気面に近づくにつれて顕著な現象が見られている。即ち、X 線信号に寄与する 5~15keV の高エネルギー電子は、存在はするものの、プラズマ電流の駆動には寄与していない。

以上から、プラズマ電流を担う電子は数 keV 以下のエネルギー帯にあり、最外殻磁気面の内側を流れていることが分かった。

### 成果の位置付けとインパクト：

STにおけるECHによるプラズマ立ち上げの研究は、国内の小型 ST において積極的に行われてきたが、国外の大型 ST (MAST (英国)、NSTX (米国) 等) において大きな磁気面の形成に至った例はこれまでにない。QUEST で電流ジャンプが観測されたことにより、ECH を用いて電流を立ち上げる手法が装置規模によらず発生しうる可能性が示された。今後は、国外大装置および従来型トカマク装置においての適用と研究発展が見込まれる。

今後、他の装置へのECHプラズマ電流立ち上げ手法の適用について検討する際、電流ジャンプの駆動機構ならびに電流を担う電子の特性についての理解は不可欠である。最も重要な情報は速度空間における電子の分布情報である。本実験によって初期的な結果ながら電流を担う電子のエネルギー帯に関する情報が得られた。今後は、より低エネルギー帯 (1~5keV) の X 線計測と組み合わせ、磁気面内を流れる電子のエネルギー帯について調べる必要がある。

QUEST における本実験の結果は、これまでに行われてきた小型 ST 装置で得られた結果に本質的に異なるものではない。しかし、電流ジャンプの発現するマイクロ波電力の閾値に関しては CPD 装置の結果から推定した値 (~200kW) よりかなり低い 35kW となった。また、主に電流を担う電子の存在領域が最外殻磁気面の内側である点は、LATE 装置での結果と大きく異なる (LATE では電流分布は最外殻磁気面から大きく外側にシフト)。さらに LATE では、電流ジャンプ後の垂直磁場上昇に伴い、100keV を超える硬 X 線が観測されており、これらの高速電子が電流を担っていると報告されている。

以上の様な装置規模間のギャップを埋め、ECH による電流生成に関する物理機構を解明できれば、大型 ST への適用検討が可能となる。ECH による非誘導電流立ち上げの手法が ITER 規模の装置においても適用可能であれば、ST のみならず、従来型トカマク核融合炉においても課題の一つである電流立ち上げの問題の有力な解決手段になると考える。

### 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 1 件)

- ① Tomokazu YOSHINAGA, Kazuaki HANADA, 他 18 名, "Non-Inductive Formation of Spherical Tokamak Plasmas by ECH on CPD", Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol.8, 2009, pp. 100-104

[学会発表] (計 3 件)

- ① 吉永智一 他, "LHD におけるマイクロ波イメージング", 第 26 回プラズマ・核融合学会年会, 2009 年 12 月 1 日, 京都市国際交流会館
- ② Tomokazu Yoshinaga 他, "Physics Study of EC-Excited Current Generation via Current Jump in the Compact Plasma-Wall-Interaction Experimental Device", 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008 年 10 月 16 日, 国連欧州本部(スイス)
- ③ Tomokazu Yoshinaga 他, "Non-Inductive Formation of Spherical Tokamak Plasmas by ECH on CPD", International Congress on Plasma Physics 2008, 2008 年 9 月 8 日, 福岡国際会議場

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

吉永 智一 (YOSHINAGA TOMOKAZU)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
研究員  
研究者番号：30467899

#### (2) 研究分担者

なし

#### (3) 連携研究者

なし