

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 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740363

研究課題名（和文） 電子サイクロトロントーラスプラズマにおける荷電分離電流の研究

研究課題名（英文） Charge separation current in a electron cyclotron heated torus plasma

研究代表者

打田 正樹（UCHIDA MASAKI）

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：90322164

研究成果の概要（和文）：電子サイクロトロントーラスプラズマの平衡形成の主要素である荷電分離電流の形成機構を LATE 球状トカマクにおいて調べた。トロイダル磁場中のイオン及び電子は、磁場の勾配および湾曲ドリフトによりそれぞれ上方向および下方向にドリフトする。真空容器が導体である場合、容器上部および下部において、同じ大きさの電流が流入および流出することによって真空容器導体を経た電流循環が形成される。LATE 装置において、半径方向に並べた 12 分割電極を容器上部および下部に設置し、この垂直方向荷電分離電流の径方向分布を初めて計測した。その結果、上部にイオン、下部に電子が流入しそれらの分布が同じであることが分かり、さらにこの分布がプラズマ中の $2p_e/RB \cdot$ 分布とほぼ一致することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In plasmas immersed in the toroidal field $B \cdot$, electrons drift downward while ions drift upward due to the field gradient and curvature ($B \cdot > 0$ assumed). The same amount of current must flow into and out from the conducting vessel walls at the top and bottom, respectively, to realize current circulation via the vacuum vessel. In an ECR plasma in the LATE device radial profiles of vertical charge separation currents have been measured by radially aligned multi-electrodes fabricated at the top and bottom. Both the profiles at the top and bottom are nearly the same as the profile $2p_e/RB \cdot$ in the plasma as theoretically predicted. Current characteristics upon the sweep of external voltage onto the top ion collectors reveal that the current is due to inflow of ions with no secondary electron emission.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
平成 23 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学、プラズマ科学

キーワード：単純トーラスプラズマ、平衡、電子サイクロトロン加熱

1. 研究開始当初の背景

単純トロイダル磁場中にマイクロ波を入

射すると、電子サイクロトロン（EC）共鳴によりプラズマが発生し、その後 EC 共鳴また

は高域混成波共鳴でのマイクロ波吸収によって放電が維持される。この EC トーラスプラズマはトカマク起動時における予備電離プラズマとして標準的に利用される他、乱流や輸送、不安定性、波動物理の基礎研究に広く利用されている。

ところで、こうした EC トーラスプラズマの利用はプラズマが維持できること、すなわち平衡が存在することによるが、その平衡形成機構はまだ検証されていない。単純トロイダル磁場中に置かれたトーラスプラズマにおいて、電子およびイオンは磁場の勾配・湾曲によりそれぞれ下向きおよび上向きにドリフトし、その速度は

$$v_z = \frac{m(v_p^2 + v^2/2)}{qRB_f} \quad (1)$$

で与えられる。またこのドリフトによる垂直方向電流（荷電分離電流）は、電子（イオン）の局所圧力 P_e (P_i) を用いて

$$j_{z(e,i)} = \frac{2P_e(P_i)}{RB_f} \quad (2)$$

で表される。このドリフトは上部に正電荷、下部に負電荷を蓄積させていき、垂直方向に大きな電場 E_z を生じる。この場合、イオンと電子は共に $E_z \times B$ による外向きのドリフトにより径方向に流出してしまい、平衡が実現されない。ところが、現実には、導体の真空容器の中において、単純トロイダル磁場中で EC 放電プラズマは容易に維持される。すなわち、荷電分離による際限のない電荷の蓄積は起こらず、定常状態では同じ大きさの電流が上部および下部の導体壁において流入および流出し、下部に流入した電子は真空容器導体を経て上部に流入するイオンと再結合し、電流循環を形成していると考えられる。

こうした電流循環が起こっていることは LATE 装置において初めて確認された。装置の上部および下部に全面を覆う電極を挿入して垂直方向電流を計測し、上部に流入する電流と下部より流出する電流が等しく、さらにこの電流が、プラズマ中の電子ドリフト電流密度 j_{ze} を水平面で積分した電流値に等しいことが示された。しかしながら、上部および下部において流入および流出する荷電分離電流の径方向分布や、それらとプラズマ中の電子ドリフト電流 j_{ze} の分布との関連は調べられておらず、荷電分離電流の径方向の空間的構造については未検証のままである。

さらに、大きな疑問点は、どのような機構で上部と下部の電流が等しく保たれているかである。通常の ECR プラズマにおいてはイ

オンの直接的な加熱は無いため、式 (2) において j_{zi} は j_{ze} に比べて遥かに小さく、このままでは上部に流入するイオン電流は極めて小さくなってしまふ。一つの可能性として、プラズマ中に形成される静電ポテンシャル勾配によりイオンが加速され、上部に流入しているか、もう一つの可能性として、上部において加速されたイオン衝撃による二次電子放出が考えられる。

2. 研究の目的

単純トーラスプラズマにおいて、その平衡形成の主要素である荷電分離電流がどのように形成・維持されているかを明らかにする。特に、プラズマ中、上部・下部境界のそれぞれにおいて、電流が何によって運ばれ、真空容器境界でどのように流入・流出しているかを明らかにする。最大の疑問点は荷電分離電流の一翼を担うイオンがどのような機構で真空容器上部に流入しているかである。

3. 研究の方法

図 1 に示すように、LATE の真空容器上部に径方向に 1/2 分割されたイオンコレクタレイ、およびリミタレイ、真空容器下部に

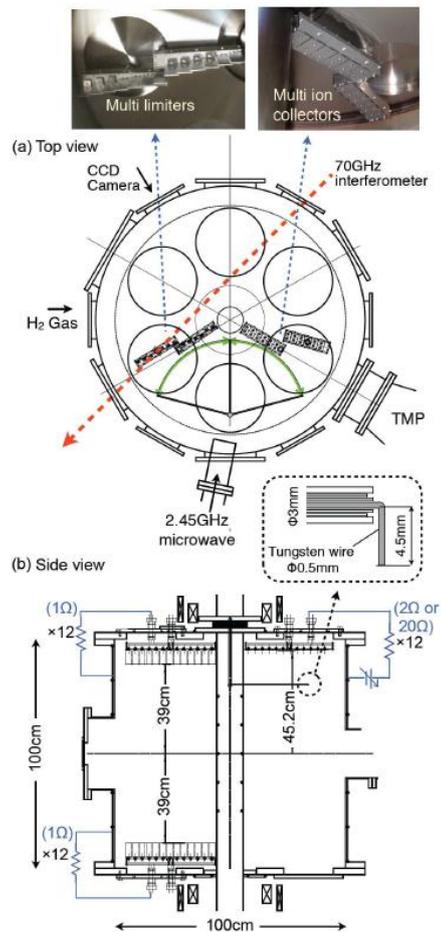


図 1 実験装置図

リミタアレイを設置し、容器に流入するイオンおよび電子の径方向分布を計測した。イオンコレクタおよびリミタアレイはそれぞれの電極の中心が $R_{\text{cntr}}=8\text{cm}$ から 41cm まで 3cm おきに設置した。リミタは径方向に 3.2cm の幅、イオンコレクタは 2.9cm の幅の電極とした。上部イオンコレクタ表面は、上部リミタ先端よりも 6.2cm 上に設置した。イオンコレクタアレイはそれぞれ電圧を印加し掃引出来る構造とし、流入イオンのエネルギー分解を行った。また、プラズマ中の電子温度・密度はラングミュアプローブを用いて計測した。さらに、イオンセンシティブプローブを用いてプラズマ中のイオン温度の計測を行った。

4. 研究成果

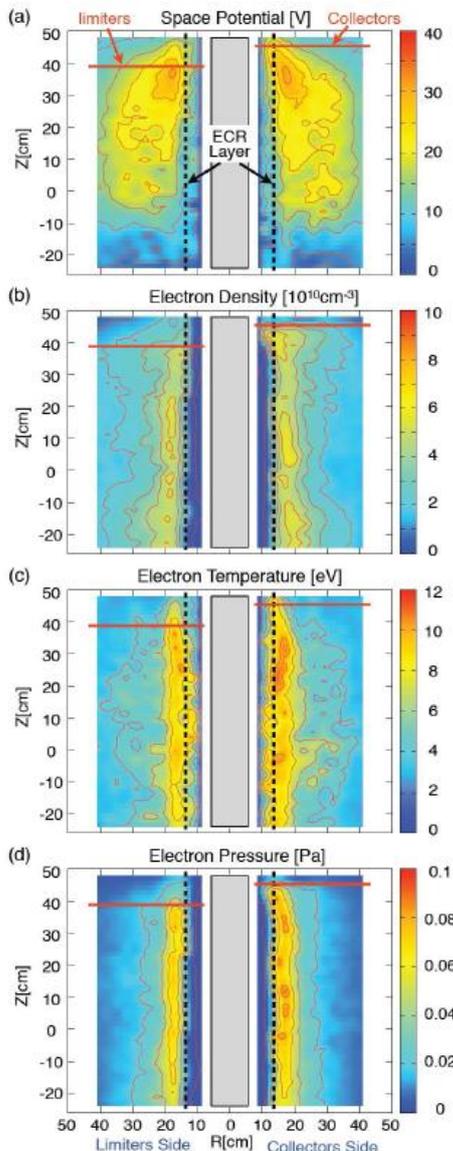


図2 プラズマ分布

1kW, 2秒の 2.45GHz マイクロ波を用いて、単純トロイダル磁場中において基本共鳴による ECR トーラスプラズマ (H_2 放電) を生成して計測を行った。トロイダル磁場は定常に印加し、基本共鳴層は $R=13.7\text{cm}$ に設定した。真空容器内に水素ガスを $\sim 10^{-3}\text{Pa}$ まで充填した後、マイクロ波を入射すると、即座に放電が開始され、圧力は 0.5 秒で $\sim 4 \times 10^{-3}\text{Pa}$ まで低下し、その後一定の値を保つ。マイクロ波干渉計で計測した線積分密度、及び CCD カメラで撮像した可視光プラズマ像も放電開始 0.5 秒後より定常となる。すべての計測はこの定常状態において行った。

(1) 図2にプローブ計測により計測したプラズマの分布を示す。空間電位は容器上部の近くに正のピークを持つ分布であり、最大 40V 程度である。電子温度は $4\sim 12\text{eV}$ であり、共鳴層付近にピークを持つ分布であった。 $R=25\text{cm}$ において $Z=30\sim 39\text{cm}$ の領域でイオンセンシティブプローブによりイオン温度を計測すると、 $T_i \sim 1\text{eV}$ であった。現在の低密度プラズマでは、衝突による電子からイオンへのエネルギー輸送時間は遅く、荷電交換が大きいのでイオン温度は共鳴層近傍においても低いと考えられる。また、イオンのラーマー半径は数 mm であるので、 ExB ドリフトによる案内中心軌道はイオン・電子共に有効であり、 ExB により運ばれる電流は正味ゼロと考えられる。これらのことから、プラズマ中においては、式(1)で示される電子のドリフト電流 j_{ze} のみが流れていることが示唆された。

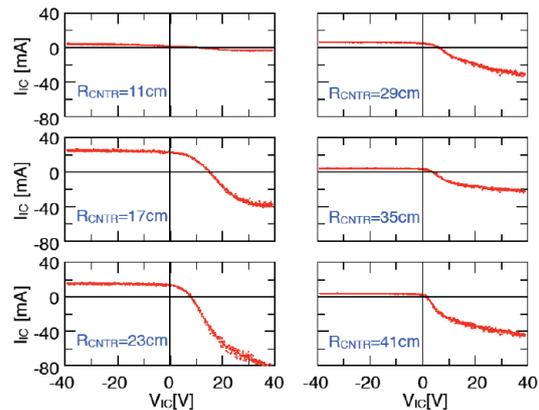


図3 イオンコレクタの電流電圧特性

(3) 上部イオンコレクタに電圧を印加し、 $V_{\text{ic}}=-40\text{V}$ から 40V まで掃引して電流電圧特性を計測した結果を図3に示す。 $R_{\text{cntr}}=17\text{cm}$ の特性をみると浮動電位は $\sim 15\text{V}$ であり、 $V_{\text{ic}}=0\text{V}$ のときに最大で 15eV 程度のイオンがコレクタに流入していることを示唆した。主プラズマ中のイオン温度が 1eV 程度であることから、真空容器上部と主プラズマ間においてイオンが運動エネルギーを得る機構が存

在していることが示された。これは、真空容器上部近傍における空間電位の下降勾配(図2(a)参照)によりイオンがエネルギーを得て流入するとして理論モデルと整合する結果であった。さらに、コレクタ電圧が 0V から -40V の範囲で、流れこむイオン電流は変化しておらず、イオンコレクタに流れこむ電流は本質的にプラズマからのイオン流入によるものであり、2次電子放出による寄与はほとんど無いことがわかった。

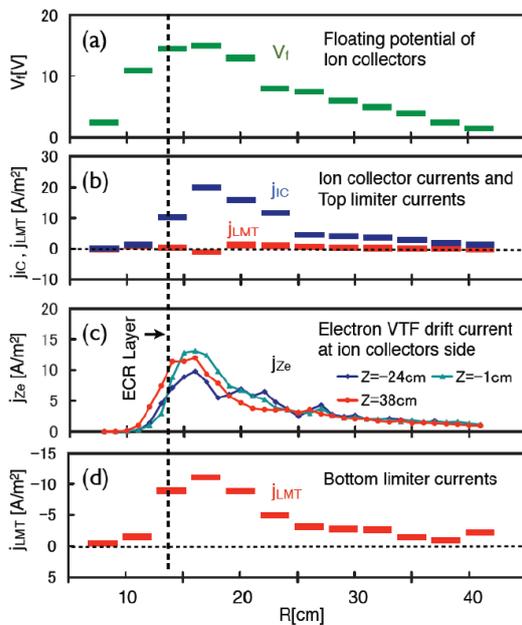


図4 径方向分布の比較

(4) 図4(b)に上部イオンコレクタ、リミタで計測された電流の径方向分布、図4(d)に下部リミタで計測された電流の径方向分布を示す。イオンコレクタにおいてはコレクタ面積、リミタについてはリミタ幅をZ軸に一周したリングの面積を用いて電流密度にした。図4(c)に、ラングミュアプローブにより計測された電子圧力分布を用いて式(1)電子のドリフト電流密度を計算した結果を示す。これらの分布はよく一致しており、荷電分離電流が、真空容器下部から出て真空容器上部に流入するまで、その径方向分布を保ちながら、運ばれることがわかった。

また、図4(a)にイオンコレクタの浮動電位の分布を示す。この分布も一致しており、最大で15V程度まで上昇していることから、真空容器上部に流れこむ電流は、プラズマ上部での静電位の急な下降勾配によりイオンが電子と同等の運動エネルギーを得て流入するとして理論モデルと整合することがわかった。

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3件)

- ① M.Uchida, T.Maekawa, H.Tanaka, S.Ide, Y.Takase, F.Watanabe, S.Nishi
“Generation of initial closed flux surfaces by ECH at a conventional aspect ratio of $R/a \sim 3$: experiments on the LATE device and JT-60U tokamak”
Nucl. Fusion, 査読有, Vol. 51, 2011, 063031 (9pp)
DOI:10.1088/0029-5515/51/6/063031
- ② M.Uchida, T.Maekawa, H.Tanaka, S.Ide, Y.Takase, F.Watanabe, S.nishi
“Generation of Initial Closed Flux Surface by ECH at Conventional Aspect Ratio of $R/a \sim 3$; Experiments on the LATE device and JT-60U Tokamak”
Proc. 23rd Int. Conf. Daejeon, 2010 (Vienna: IAEA), 査読無, 2010, EXW/P2-10
- ③ S.Nishi, T.sakabe, M.Uchida, H.Tanaka, T. Maekawa
“Current circulation and equilibrium in toroidal electron cyclotron resonance (ECR) plasmas in the LATE device”
Plasma Phys. Control. Fusion, 査読有, Vol. 52, 2010, 125004 (32pp)
DOI:10.1088/0741-3335/52/12/125004

[学会発表] (計5件)

- ① 黒田賢剛, 打田正樹, 田中仁, 前川孝, 他8名
LATE 装置におけるトロイダル ECR プラズマの平衡特性
Plasma Conference 2011, 2011/11/22, 石川県立音楽堂
- ② 前川孝, 田中仁, 打田正樹, 渡辺文武, 吉永智一
磁場を横切る高速通過電子群による初期磁気面形成
Plasma Conference 2011, 2011/11/22, 石川県立音楽堂
- ③ 打田正樹, 渡辺文武, 田中仁, 前川孝
ECH による様々なアスペクト比での初期磁気面形成
日本物理学会, 2010年8月26日, 大阪府立大学
- ④ 前川孝, 西誠司, 坂部智久, 田中仁, 打田正樹
トロイダル ECR プラズマにおける垂直荷電分離電流の循環 I
日本物理学会, 2010年8月26日, 大阪

- 府立大学
- ⑤ 前川孝、西誠司、坂部智久、田中仁、
打田正樹
トロイダル ECR プラズマにおける垂直荷
電分離電流の循環 II
日本物理学会、2010 年 8 月 26 日、大阪
府立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

打田 正樹 (UCHIDA MASAKI)
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・
助教
研究者番号：90322164