

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289357

研究課題名(和文) ECH/ECCDを用いた大型トカマクにおける第一段階磁気面形成法の探求

研究課題名(英文) Research on formation of closed flux surfaces in large tokamaks using ECH/ECCD

研究代表者

前川 孝 (Maekawa, Takashi)

京都大学・エネルギー科学研究科・名誉教授

研究者番号：20127137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：トカマク炉の起動においてECH/ECCDにより非誘導的に $I_p \sim 100\text{kA}$ の電流を得て第一段階磁気面を形成し、ECHにより高電子温度を得れば、抵抗が下がり、低い一周電圧 $V_L$ で $I_p$ を燃焼プラズマ保持に必要な値まで立ち上げ得る。すなわち、中心ソレノイドを取り巻く炉中心部の設計の諸条件を緩和できる。大型装置KSTARで行われた予備実験に、小型装置LATEでの実験データを新たに加え、適切なモデリングにより、大型装置で機能する第一段階磁気面形成法を探求した。核融合プラズマの電流分布制御に用いられるO波は役に立たなくて、斜め伝播する異常波がこのような立ち上げプラズマに有効であることを見つけた。

研究成果の概要(英文)：Improvement in engineering of tokamak reactors would be possible, if a hot plasma with the electron temperature up to a few keV and a hundred kilo amperes of plasma current could be non-inductively built up prior to inductive current drive up. From the view point of reactor engineering, electron cyclotron (EC) heating and current drive (ECH/ECCD) is attractive for the non-inductive build up. We have analyzed experimental results on small LATE device in addition to preliminary results on KSTAR and made some modeling to explore new ECH/ECCD method for generation of a hot plasma. We have found that usual O waves are useless and oblique X waves are appropriate for these startup plasmas.

研究分野：プラズマ核融合

キーワード：ECH/ECCD 非誘導立ち上げ 大型トカマク

### 1. 研究開始当初の背景

炉では真空容器に加えて、ブランケット、中性子遮蔽板等が多重にプラズマを覆い、そこに誘起されるシールド電流がセンタソレノイドからの誘導電圧  $V_L$  の真空容器内への侵入を遮蔽するので、トロイダル電流  $I_p$  起動のための高  $V_L$  を得るにはシールド電流を抑制する抵抗構造を要する。電子サイクロトロン加熱・電流駆動 (ECH/ECCD) により第一段階磁気面を形成し、ECH で高温 ( $T_e=1keV$ ) プラズマを得れば、状況は大幅に改善する。ここでは、その断面積が十分に大きくなり、ECH 用ミリ波ビームのサイクロトロン吸収領域を磁気面内に完全に収める段階に達したものを第一段階磁気面と呼ぶ

すなわち、 $T_e=1keV$  のプラズマはステンレスが主体の構造物に比べて銅と同一の 40 倍の電気伝導度を持ち、上述の抵抗構造が不要になる (従来の ECH 予備電離方式では  $T_e=100eV$  のプラズマ (ステンレスと同じ電気伝導度) に高  $V_L$  で電流を駆動する必要がある)。これにより炉の中心構造が単純になり信頼度が大幅に上昇するとともに、CS 駆動電源の仕様も緩和される。ECH/ECCD システムはプラズマ近傍に構造物を要せず、炉工学的に好都合である。燃焼プラズマの新古典テアリングモードの抑制等に用意される ECH/ECCD 電力を有効利用できる。

低アスペクト比炉では低磁場でプラズマを保持でき、コイルの仕様が緩和され建設コストが下がる。プラズマ断面形状に三角度を持たせるために細い CS を具備したアスペクト比の低い SlimCS 炉が提案され (図 1)、建設費を大幅に低減できることが示された。第一段階磁気面形成が可能になれば SlimCS において燃焼に至るまでのプラズマ電流立上げの前半を ECH/ECCD でまかなうシナリオが構想できる。すなわち①第一段階磁気面を形成 ( $I_p \sim 100kA$ ) 後  $I_p \sim 1MA$  まで立上げ、②中性粒子入射の重畳により自発電流を発生させて  $I_p \sim 10MA$  まで立上げる。③電子温度が高くなるほど自己誘導電流が大きくなり非誘導電流駆動による立上げを妨げるので、CS は温存しておき燃焼に至る最終段階の電流立上げに投入する。

### 2. 研究の目的

JT-60U と KSTAR において得られている知見に、LATE 装置での実験データを新たに加え、適切なモデリングにより、大型装置での第一段階磁気面形成法を見つける。

### 3. 研究の方法

第一段階磁気面形成に至るには ECH/ECCD 放電は次の経過をたどる。①放電開始と、適切な垂直磁場  $B_v$  下で自発的平衡電流の発生。②開磁場下での自発的平衡電流の発展。③初期磁気面の発生。④電子サイクロトロン電流駆動による第一段階磁気面の形成。

ここで①から③に到る過程については研究代表者による理論モデルの提案がなされていた [1]。特に②については垂直方向の荷電分離電流として発生する平衡電流がトロイダル電流に変換される過程である。またこのモデルによる圧力支配方程式により、トロイダル電流分布よりプラズマの圧力分布を得ることができる。これらについて LATE 装置での基礎実験で妥当性を調べモデルの確認を行う。また②から③については初期磁気面が得られた KSTAR 実験の解析を進める。最後に、初期磁気面形成から第一段階磁気面形成に至るには、適切なミリ波入射モードによる高効率の ECH/ECCD が不可欠である。最適の入射モードを探索する。

### 4. 研究成果

#### (1) LATE 装置における開磁場下での自発的平衡電流の発展

##### (1-1) 実験装置

LATE 装置の真空容器内に上下の電極と可動プローブを設置し、ECR プラズマを調べた。

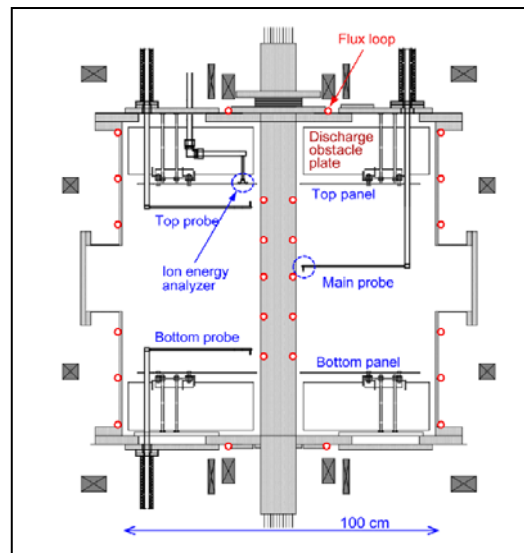


図 1 LATE 装置真空容器の側面図

##### (1-2) 単純トロイダル磁場下での ECR プラズマの電子とイオン流

単純トロイダル磁場下の ECR プラズマではイオンドリフト方向に向けて増大する正の静電ポテンシャルが発達し、電子はこのポテンシャルによる  $ExB$  ドリフトと  $VTF$  (vacuum toroidal field) ドリフトにより流れが生じる。イオン (プロトン) は温度が低いので主に  $ExB$  ドリフトにより流れるが、上部電極直下では大きなポテンシャル勾配が生じ、 $VTF$  ドリフトが生じる。一方電子の  $VTF$  ドリフトは抑制される。すなわち、プラズマの大部分で荷電分離電流は電子の  $VTF$  ドリフトで運ばれるが上部電極近くでイオンの  $VTF$  ドリフト電流に置き換えられる (図 2 参照)。

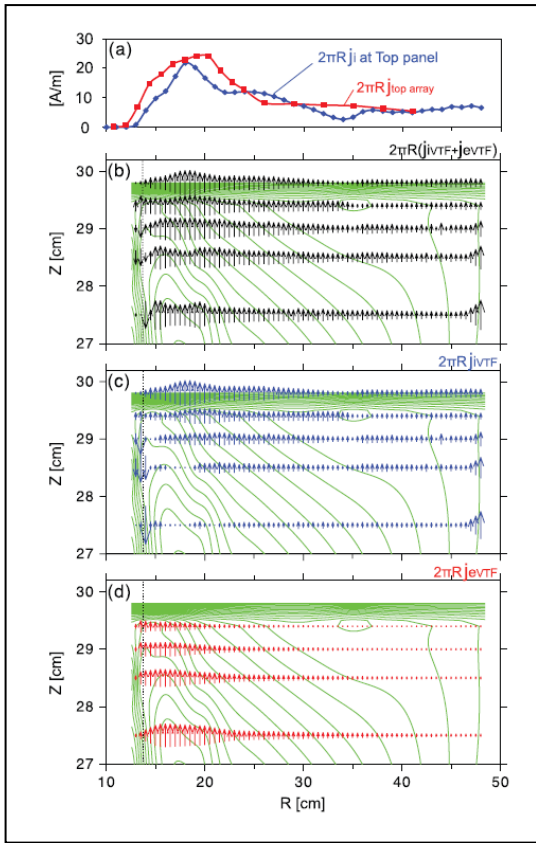


図2 上部電極 (イオンドリフト側) 近くで電子 VTF ドリフト電流はイオン VTF ドリフト電流に置き換えられる [③ Kuroda et al. ]

### (1-3) 弱い垂直磁場 $B_v$ を加えた場合の ECR プラズマと自発的平衡電流

弱い垂直磁場  $B_v$  を印加するとプラズマはヘリカル磁力線に沿って等温になり、密度は磁力線に沿ったポテンシャルに対してボルツマン分布をとる。

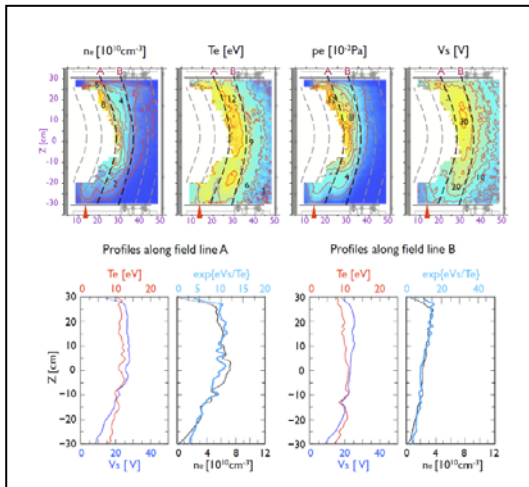


図3 磁力線 A, B に沿って等電子温度であり。密度はボルツマン分布となる。[④ Kuroda et al. ]

### (1-4) 圧力支配方程式による圧力分布の推定

開磁場下では通常の力の平衡の式

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \nabla P$$

は完全には成立しないが、R 方向と Z 方向については成立すると予測される。是に加え、

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

を要請すると圧力支配方程式が得られ、トロイダル電流分布と垂直 (Z 方向) 電流分布の情報より圧力分布を導出できる [④ Kuroda et al 参照]。LATE の放電について実験と比較した結果良い一致が得られた (図 4 参照)。

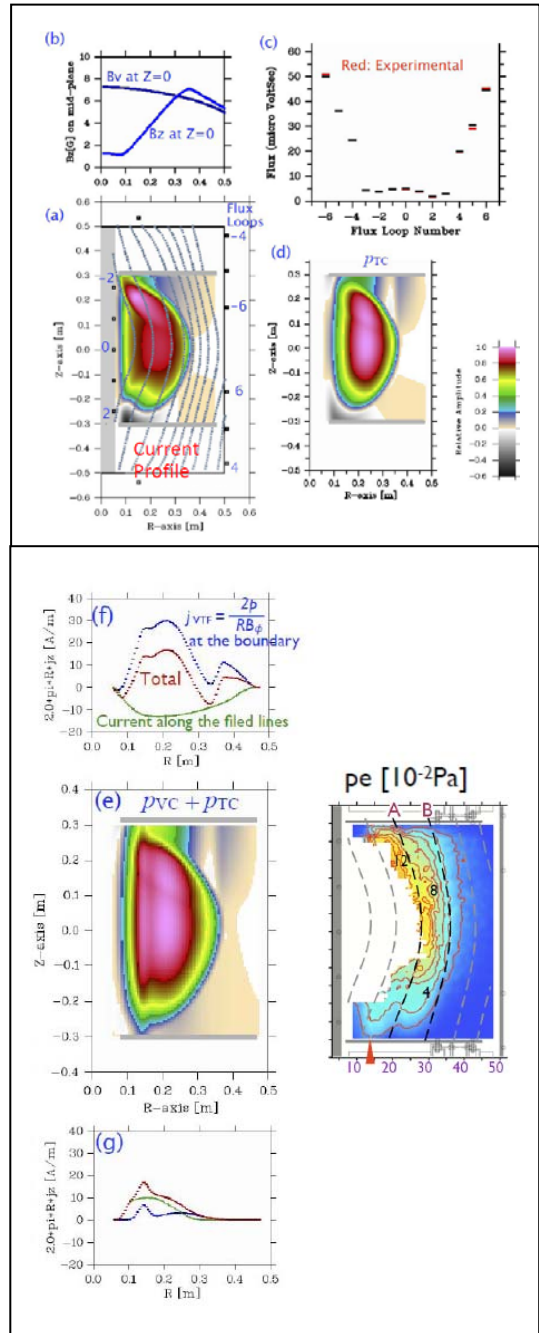


図4 圧力支配方程式を用いてトロイダル電流分布 (a) 及び垂直電流分布 (g) より圧力分布 (e) を導出し実験値 ((e) の右) と比較 [④ Kuroda et al. ]

(1-5) 自発的平衡電流は電子温度の上昇とともに荷電分離電流からトロイダル電流へ変換

VTFドリフトに起因する垂直方向荷電分離電流の一部は真空容器を経て帰還し、残りはヘリカル磁力線に沿って帰還しトロイダル電流となる(図5)。この電流は両者ともプラズマの径方向フープ力をバランスするための内向きの力を発生する、自発的平衡電流である。電流の大きさは圧力に比例する。

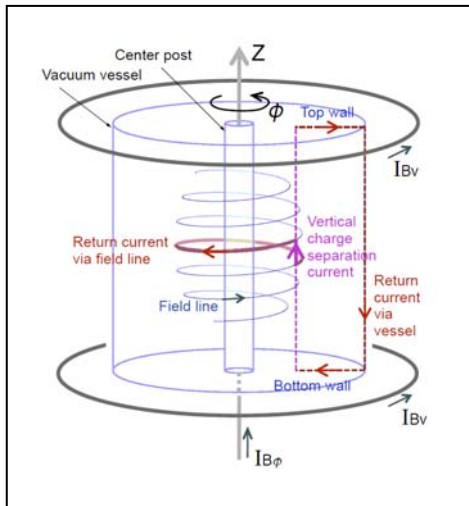


図5 VTFドリフトに起因する垂直方向荷電分離電流の一部は真空容器を経て帰還し、残りはヘリカル磁力線に沿って帰還しトロイダル電流となる[④Kuroda et al. ]。

電子温度の上昇とともに、電流が大きくなるだけでなく、トロイダル電流となる割合が大きくなり、初期磁気面形成直前では、ほとんどが、トロイダル電流となることLATE実験で分かった。

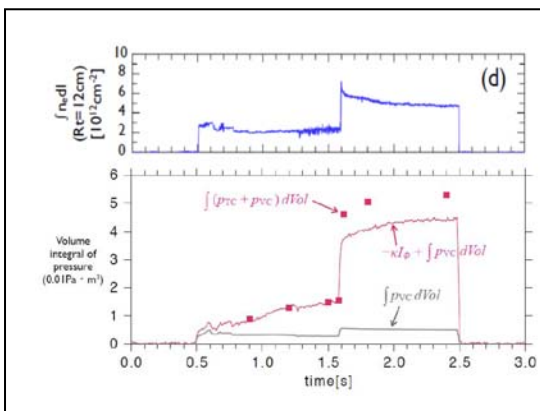


図6 電子温度の上昇とともにプラズマ圧力の大部分はトロイダル電流により支えられるようになる。[④Kuroda et al. ]

(2) KSTAR 装置における開磁場下での自発的平衡電流の発展と初期磁気面形成

(2-1) 自発的平衡電流分布の発展

図7に示す様に KSTAR 装置において 84GHz, 190KW のミリ波電力により、トロイダル電流  $I_p=14.5\text{kA}$  までの非誘導立ち上げに成功した。ミリ波は弱磁場側からほぼ赤道面に沿って正常波モードでトロイダル磁場に対して 75 度の角度で斜め入射された。理論解析によると、この正常波は  $R=1.5\text{m}$  にある ECR 層をほぼ吸収無に横切り、内壁面で鏡面反射し、再び ECR 共鳴層に向かう。鏡面反射の際、70%の電力は異常波にモード変換され、ECR 共鳴層の前面で完全に吸収される。

時刻  $t=1.45\text{s}$  からトロイダル電流の上昇率が増加する。このとき ECE 信号も急増して、CFP(Cross Field Passing) 電子[1]の出現を示唆している。

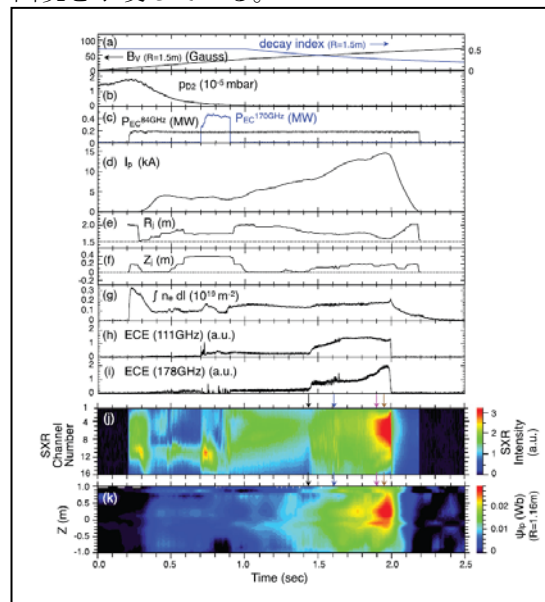


図7 KSTAR 装置における ECH/ECED による非誘導立ち上げ放電。84GHz, 190KW のミリ波電力による。[⑤Tanaka et al. ]

(2-2) CFPEモデルと初期磁気面形成の解析

図7の放電でのトロイダル電流分布と圧力分布の時間発展を図8に示す。トロイダル電流  $I_p=11\text{kA}$  のとき初期磁気面が発生し、最大電流  $I_p=14.5\text{kA}$  の時には最外殻磁気面の径は約 40cm に成長している。初期磁気面が出現する直前には  $R=1.5\text{m}$  の ECR 層に沿って垂直報告に延びた圧力の峰が生じているのが特徴である。この圧力分布は(1-4)で述べた圧力支配方程式を用いてトロイダル電流分布より得たものである。

以上の KSTAR での結果は「3. 研究の方法」欄で述べた理論モデル[1]が妥当であることを示唆している。

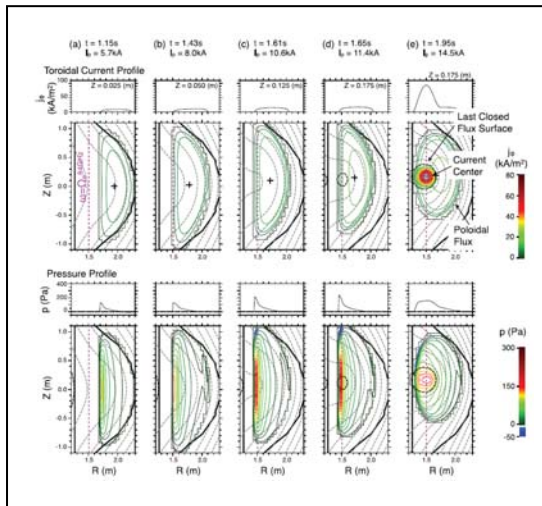


図8 図7に示したKSTAR装置における非誘導立ち上げ放電のトロイダル電流分布(上段)と圧力分布(下段)の時間発展。[©Tanaka et al.]

### (3) ITERでの第一段階磁気面形成に向けたミリ波の最適入射

低密度領域で斜め伝播する異常(X)波の偏波は右手回転円偏波成分が主となり、電子と強く相互作用し、低電子温度プラズマにおいても強くEC共鳴吸収される。すなわち、波がEC R層( $\omega = \Omega_{ce}$ )に近づくとドップラー効果により吸収が始まり共鳴層に到達する前に完全吸収される。 $\Omega_{ce} = eBt/m$ はEC周波数。

通常密度の場合、斜め入射されたX波はサイクロトロン遮断層と高域混成共鳴層の間の厚い非伝播領域に妨げられ、EC共鳴層に近接できない(図9、図10(I)参照)。しかし、密度が十分下がると(図9及び図10(II)参照)、遮断層は共鳴層に肉薄し、ドップラー効果により遮断層前面でEC共鳴吸収される(a)。正常(O)波入射の場合、ほとんど無吸収で共鳴層を通過し(b)、内壁面での鏡面反射の際X波に変換され、強磁場側から共鳴層に近づき吸収される(c)。KSTAR実験ではこの入射方式を採用した。

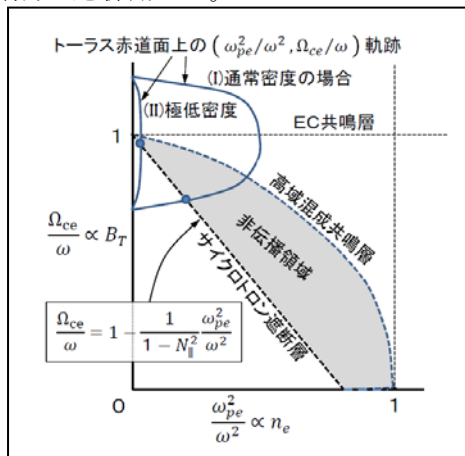


図9 異常(X)波の伝播・非伝播領域

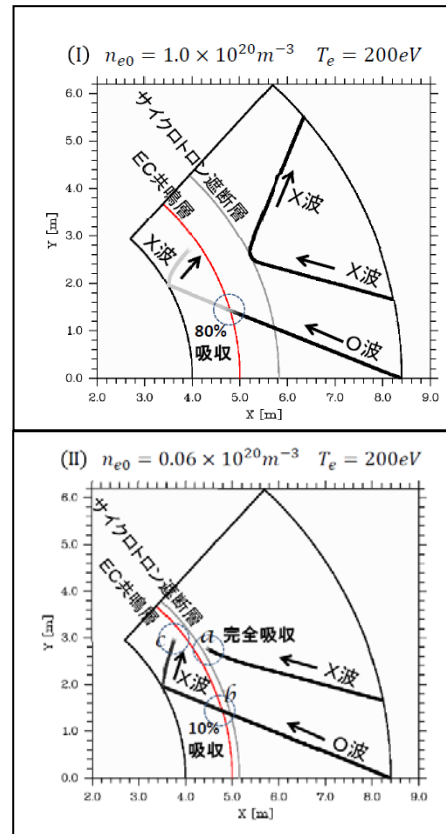


図10 弱磁場側からの正常(O)波及び異常(X)波の入射(赤道面上の波動伝播軌道と電子サイクロトロン吸収) 入射周波数 170

磁場に平行方向に速度成分  $v_{||}$  を持つ電子のEC共鳴条件  $\omega - k_{||}v_{||} = \Omega_{ce}$ 、遮断層の式(図10参照)、及び熱速度の2.5倍の  $v_{||}$  を持つ電子が主に共鳴吸収を行うことから、遮断層前面でのEC共鳴吸収が実現するための密度の上限  $n_{UL}$  と、遮断層のEC共鳴層( $R=R_{ECR}$ )からのズレ  $\delta R$  が与えられる。穏やかな斜め入射(磁場方向屈折率  $N_{||} = k_{||}c/\omega \sim 0.5$ )の場合は、それぞれ

$$n_{UL} = (v_t/c) n_c \quad (1)$$

$$\delta R = (v_t/c) (1 + N_{||}^2) R_{ECR} \quad (2)$$

である。ここで  $v_t = (2T_e/m)^{1/2}$  は電子熱速度、 $c$  は光速、 $n_c (= m \epsilon_0 \omega^2 / e^2)$  は入射周波数に対するプラズマ遮断密度で、周波数の2乗に比例し、170GHzの場合は  $n_c = 3.6 \times 10^{20} m^{-3}$  であり、 $T_e = 200eV$  の場合、 $n_{UL} = 1 \times 10^{19} m^{-3}$  となる。トカマク炉では磁場が強く、EC周波数が高いので遮断密度も高くなり、低温の立ち上げプラズマにおいても現実的な密度帯 ( $\sim 1 \times 10^{19} m^{-3}$ ) でこの方式が可能になる。

### 参考文献：

- [1] T. Maekawa, T. Yoshinaga, M. Uchida, F. Watanabe, H. Tanaka, Nuclear Fusion, Vol.52, 2012, 083008 (19pp)

## 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6件)

- ① H. Tanaka, M. Uchida, T. Maekawa, K. Kuroda, C. Ikeda, T. Shigemura, K. Nagao, M. Wada Proc. 25th IAEA Fusion Energy Conf. Saint Petersburg, 2014 (Vienna: IAEA), 査読有、EX/P7-41(8pp)
- ② M. Uchida, Y. Noguchi, H. Tanaka, T. Maekawa, Proc. 18<sup>th</sup> Joint Workshop on ECE and ECRH, 査読無、Vol.87, 2015 (5pp), DOI:<https://doi.org/10.1051/epjconf/20185702006>
- ③ K. Kuroda, M. Wada, M. Uchida, H. Tanaka, T. Maekawa, Plasma Phys. Control. Fusion,, 査読有、Vol.57, 2015, 075010 (20pp) DOI: 10.1088/0741-3335/57/7/075010
- ④ K. Kuroda, M. Wada, M. Uchida, H. Tanaka, T. Maekawa, Plasma Phys. Control. Fusion, 査読有、Vol.58, 2016, 025013 (15pp) DOI: 10.1088/0741-3335/58/2/025013
- ⑤ H. Tanaka, M. Uchida, T. Maekawa, Y. -S. Bae, M. Joung, J.H. Jeong and KSTAR team, Nuclear Fusion, 査読有, Vol.56, 2016, 046003 (15pp) DOI: 10.1088/0029-5515/56/4/046003
- ⑥ H. Tanaka, M. Uchida, T. Maekawa, K. Kuroda, C. Ikeda, T. Shigemura, K. Nagao, M. Wada Proc. 25th IAEA Fusion Energy Conf. Kyoto, 2016 (Vienna: IAEA), 査読有、EXW/P4-40(8pp)

[学会発表] (計8件)

- ① T. Maekawa  
“Non-inductive Start-up of tokamaks by ECH/ECCD toward  $I_p=100\text{kA}$  and  $T_e=1\text{keV}$ ” US-Japan Workshop on RF Heating Physics, 2014年9月17日～19日 京都大学楽友会館
- ② 前川孝「ECRプラズマの磁気面形成に向けた平衡電流の発展—LATE装置における実験と解析」第32回プラズマ・核融合学会・年回、2015年11月24日～27日、名古屋大学東山キャンパス豊田講堂
- ③ 打田正樹、前川孝「LATEでの電子バーンスタイン波加熱・電流駆動によるマイクロ波球状トカマク形成における高速電子の生成と損失」第32回プラズマ・核融合学会・年回、2015年11月24日～27日、名古屋大学東山キャンパス豊田講堂
- ④ K. Kuroda, T. Maekawa, “Observation of toroidal and vertical current in EC heated plasmas under vertical field in the LATE device”, 42<sup>nd</sup> European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2015年6月

22日～26日、Centro Cultural de Belem Conference Centre, Lisbon

- ⑤ M. Uchida, T. Maekawa, “Modeling of non-inductive current generation upon superposition of vertical field on EC heated plasma in the LATE device”, 42<sup>nd</sup> European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2015年6月22日～26日、Centro Cultural de Belem Conference Centre, Lisbon
- ⑥ 前川孝、打田正樹、田中仁、福山淳 「大型トカマクのECH/ECCDによる非誘導立ち上げのための数値解析」プラズマ核融合学会第33回年回、東北大学青葉キャンパス
- ⑦ 打田正樹、田中仁、前川孝 他9名「電子バーンスタイン波のみで維持された球状トカマクプラズマの電流を担う高速電子の軌道の発展と損失」プラズマ核融合学会第33回年回、東北大学青葉キャンパス
- ⑧ 田中仁、打田正樹、前川孝 他9名「電子バーンスタイン波による無誘導球状トカマク立ち上げのEC共鳴層位置に対する依存性」プラズマ核融合学会第33回年回、東北大学青葉キャンパス

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

Title: The Low Aspect Ratio Torus Experiment Group  
[http://plasma47.energy.kyoto-u.ac.jp/index\\_e.html](http://plasma47.energy.kyoto-u.ac.jp/index_e.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川孝 (MAEKAWA Takashi)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・名誉教授  
研究者番号：20127137

(2) 研究分担者

田中仁 (TANAKA Hitoshi)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授  
研究者番号：90183863

(3) 研究分担者

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