

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360381

研究課題名(和文) 遮断密度を大幅に超えた密度領域での電子バーンスタイン波加熱物理の探求

研究課題名(英文) Electron Bernstein heating at an extremely overdense torus plasma

研究代表者

打田 正樹 (Uchida, Masaki)

京都大学・エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：90322164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,600,000円

研究成果の概要(和文)：電子バーンスタイン(EB)波は伝播と吸収に密度上限が無いため、超高密度域の核融合プラズマの加熱に有力であると注目されている。しかしEB波は群速度が非常に遅いため単位長あたりの吸収が大きく、共鳴加熱層へと向かう途中で高速電子を加熱・生成しやすい問題がある。一方、線形理論によると電子密度がプラズマ遮断密度に比べて大きく上昇すれば高速電子による吸収が減少してこの問題を避けられる。本研究では遮断密度の10倍に達する球状トカマク形成・維持をEB波加熱により初めて実現するとともに、密度上昇に伴うEB波のバルク・高速電子加熱特性の変化を実験的に調べた。

研究成果の概要(英文)：There has been considerable interest in electron Bernstein (EB) wave heating and current drive since EB waves can propagate into and be cyclotron-absorbed in overdense fusion plasmas. However, EB Heating may lead a significant development of energetic electrons since the group velocity of EB wave is extremely slow and therefore the absorption is quite high. On the other hand, linear theory predicts the absorption by such energetic electrons could be much reduced if the bulk electron density increases well beyond the plasma cutoff density. In this study, we have been achieved the startup and formation of an extremely overdense spherical torus by EB heating and current drive, where the electron density reaches about 10 times the plasma cutoff density. In addition, we investigated the change in heating property of bulk and energetic electrons by EB waves as the density increases far beyond the cutoff density.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：電子バーンスタイン波 加熱・電流駆動 トカマクの無誘導立ち上げ

1. 研究開始当初の背景

電子サイクロトロン加熱(ECH)・電流駆動(ECCD)は、炉への適合性が高く、局所加熱・電流駆動が可能であることから、核融合プラズマの電流駆動・分布制御、MHD抑制制御などに不可欠な手段であり、ITERにおいてもいち早く組み込まれている。

近年、ヘリカル型装置や球状トカマク等、高ベータ化を目指す先進核融合研究において、プラズマ遮断密度を超えた電子密度のプラズマが実現されている。遮断密度を超えたプラズマでは電磁波モードが伝播できず、これによる加熱が不可能であるため、静電波モードの電子バーンスタイン(EB)波を用いたECH・ECCD法の研究が進められている。EB波はプラズマ中でしか存在しないが、入射電磁波からのモード変換により励起されれば、密度上限無くプラズマ中を伝播し、サイクロトロン吸収による局所加熱・電流駆動が可能である。しかしながら、いまだにEB波によるトラスプラズマの顕著な加熱例は極めて少なく、加熱領域の詳細な分布、電子密度・温度分布の変化、それによるEB波の伝播・吸収への影響など、明確に調べられていない点が多い。

EB波は電磁波モードとは違って、群速度が電子の熱速度程度と非常に遅いので、単位長さ当たりの吸収が極端に大きい。弱磁場側から共鳴層へと伝播する際、ドップラーシフトの大きな高速電子から先に吸収が始まるが、その際、吸収が大きいため高速電子を加熱・生成しやすい。高速電子は閉じ込めが悪く、損失による容器壁の損傷も懸念され、望ましくない。また、この吸収により、狙った共鳴層位置への電力が低下し加熱効率が劣化する。

一方、線形理論によると、電子密度がプラズマ遮断密度に比べて大幅に増大していくと、EB波の波動電場強度が小さくなり、高速電子による吸収を抑えることができる。しかしながら、この様な遮断密度を大幅に超えた領域でのEB波加熱特性についての実験は無く、検証されていない。

低アスペクト比のLATE装置において、EB波により10kAのプラズマ電流を立ち上げるとともにマイクロ波遮断密度の約7倍の電子密度を持つ球状トカマクプラズマの生成・維持に成功した。共鳴層配置を最適化することで、弱磁場側Oモードで入射された電磁波が、第二高調波共鳴層の内側に位置する高域混成波共鳴(UHR)層でEB波へとモード変換され、プラズマ中心に設定された基本波共鳴層においてバルク電子に吸収されて、遮断密度を大きく超える密度が実現された。可視光像には最外殻磁気面内で密度が大きく上昇する様子が観測され、真空紫外(XUV)強度分布よりEC共鳴層直前での顕著なバルク電子加熱が示された。この結果は、(1)EB波単独の加熱で、(2)高速電子を生成してプラズマ電流を駆動すると同時に、(3)

遮断密度の7倍のバルク電子密度を実現して、これまでにない極めて顕著なEB波加熱結果である。このプラズマを用いれば、遮断密度を大幅に超える領域でのEB波によるバルク・高速電子の加熱特性を詳細に調べることができる。特に、低アスペクト比の太いプラズマであるためUHR層での励起、EC共鳴層での吸収までの間を広くとることができ、バルク・高速電子それぞれの加熱特性を空間分解能良く計測できると期待される。

2. 研究の目的

EB波単独により形成される球状トカマクプラズマの密度領域を拡大し、遮断密度の1~10倍にわたる領域で、バルク・高速電子の加熱特性を系統的に調べ、電子密度上昇にともなう加熱特性の変化、高速電子加熱の低減・バルク電子加熱の改善を実験的に検証する。

3. 研究の方法

まず、より顕著で明確な実験結果を得るために、真空容器内にMoリミタを増設し、放電の安定化と高電力入射の準備を行った。その後、現有の2台の20kW、2.45GHzマグネトロンに加えて、2台の20kWマグネトロンを連携研究者の協力の下で借用し、合計4台で最大80kWの高電力入射での実験を行い、密度領域の拡大を目指した。

図1にマイクロ波入射ランチャーを示す。マイクロ波は全て赤道面弱磁場側から斜めに入射する(R=50cmにおいて $N_{||}=0.21$)。入射4系統のうち、3系統には偏波器(主な発表論文欄①参照)を設置し、任意の偏波での入射が可能となるようにした。これを用いて、EB波への高いモード変換率を得るための入射偏波調整(引用文献①参照)を行った。バルクの電子密度計測は、70GHzミリ波干渉計のコード数を垂直4コードから7コード(垂直および水平)に増設して行った。また、高速電子についての計測は、真空紫外(XUV)カメラ2台(視線数各20ch)、硬X線波高分析器(4コード)、リミタにおける熱負荷分布計測、17のフラックスループ計測に基づいた磁気解析及び平衡解析により行った。

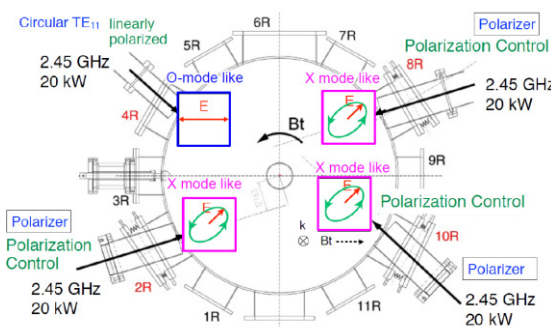


図1 2.45GHzマイクロ波入射システム

4. 研究成果

(1) 図2に0-modeマイクロ波電力60kWにおける典型的な放電波形を示す。弱い定常垂直磁場($B_v=20\text{G}$)を印加した下でマイクロ波を入射すると、基本波共鳴層($R_{\text{ECR}}=20.6\text{cm}$)において放電が開始され、プラズマ電流が自発的に発生・増大して磁気面形成に至り定常に達する。その後、マイクロ波電力の増大に伴い平衡垂直磁場強度を増大すると、プラズマ電流は増大し、10kAに到達してマイクロ波電力を遮断するまで定常を保った。図2(g)に示すように、赤道面上接線半径 $R_t=25\text{cm}$ に沿って計測した電流を運ぶ電子からの前方放射X線は、電流増大に伴いエネルギー帯及び光子数が増大しており、EB波加熱により生成された100keV帯の高速電子が電流を運んでいることを示唆している。図2(h)および(i)に磁気解析より推定したプラズマ電流分布とポロイダル磁束の等高線を示す。電流を運ぶ電子のエネルギー帯が高いため、電流分布も最外殻磁気面から大きく外側にシフトしている。水平コードの線積分密度(図2(c))は、プラズマ電流の増大とともに増加し、最

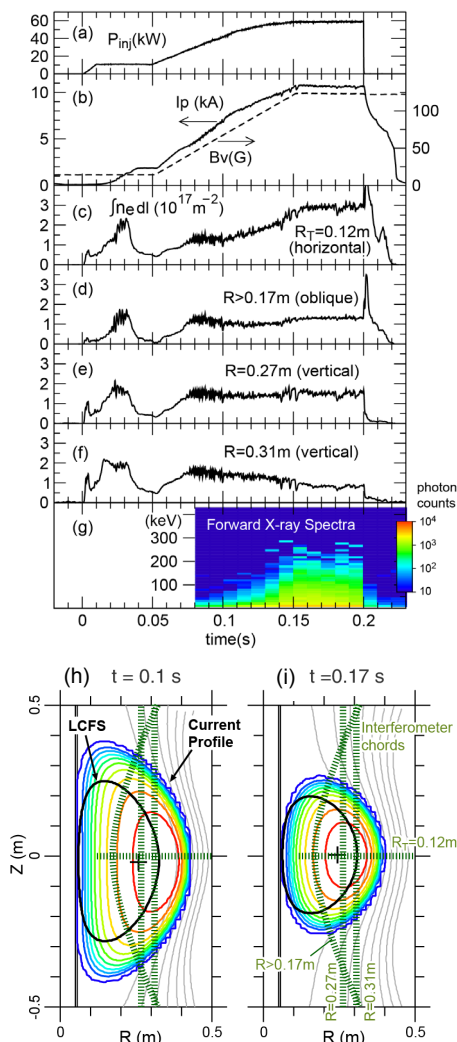


図2 典型放電波形 ($B_t=0.072\text{T}$ ($R=0.25\text{m}$)) (a) 入射電力 (準 O-mode)、(b) プラズマ電流及び垂直磁場強度、(c)-(f) 線積分密度、(g) 電流を運ぶ電子からの前方放射 X 線スペクトル、(h)-(i) ポロイダル磁束及びプラズマ電流分布

終の定常状態において線平均密度は $5.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ (最外殻磁気面 (LCFS) 内コード長 $L=0.55 \text{ m}$) となり、プラズマ遮断密度の7倍に達した。

(2) 弱磁場側から入射されたマイクロ波の一部は、高域混成波共鳴 (UHR) 層に到達し EB 波へとモード変換され、高磁場側へと伝播しサイクロトロン共鳴層 (ECR) 近傍で電子にサイクロトロン吸収される。入射波から EB 波へのモード変換率は、UHR 層近傍での密度勾配に依存し、密度勾配が緩やかな場合は 0-mode、急峻な場合は X-mode による入射が最も高い変換効率を得られる。上記の放電においては、プラズマ立ち上げの初期段階は密度が低く密度勾配は緩やかで 0-mode 入射が最適であるが、プラズマ電流が上がり密度が上昇するにつれ密度勾配は変化し、プラズマ遮断密度の約7倍に達する最終段階では、ほぼ X-mode に近い入射偏波が最適となる。

EB 波への高い結合電力を得るため、4 系統のマイクロ波入射系 (合計 80kW) のうち 3 系統 (60kW) の入射偏波を、高密度領域に最適化した入射偏波 (準 X-mode) に設定してプラズマ電流・密度の拡大を目指した実験を行った。入射電力や入射波の偏波設定を様々な組み合わせにおいて実験を行った結果、図3に示すように放電の初期段階を準 0-mode 電力により形成し、密度上昇後の後半に準 X-mode 電力を上昇させることで、プラズマ電流が 12 kA に達する球状トーラスを立ち上げ、40 ms 間定常を保つことが可能となった。最終定常での線平均密度は $5.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ (LCFS 内コード長 $L=0.55\text{m}$) であり、プラズマ遮断密度の7倍を超えた。

入射電力 60kW の下で、準 0-mode のみでプラズマ形成をした場合と上記の様に準 0-mode と準 X-mode の組み合わせによりプラズマ形成を行った場合の比較を図4に示す。準 0-mode と準 X-mode の組み合わせによる放電では、同じ密度領域においてプラズマ電流が 20% 上昇し、入射偏波調整を行うことでよ

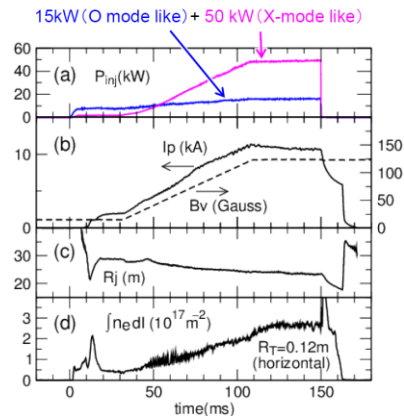


図3 (a) 入射電力 (準 O-mode 15kW, 準 X-mode 50kW)、(b) プラズマ電流及び垂直磁場強度、(c) プラズマ中心の大半径方向位置、(d) 線積分密度

り高いプラズマ電流に到達できることが分かった。より多くの電力が入射電磁波からEB波へと変換され、電流を運ぶ高速電子に吸収されたことを示唆している。

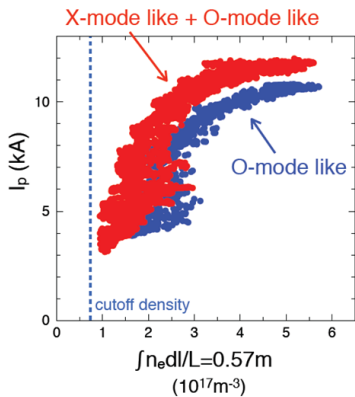


図 4. 異なる入射偏波における放電における密度及びプラズマ電流の軌跡

(3) 一方で、更に入射電力を高くして、プラズマ電流を上昇させ、密度領域を拡大することを目指したが、 $I_p=12\text{kA}$ を超える領域ではプラズマを安定に維持することが出来なかった。図 5 に示す放電では、プラズマ電流が $I_p=12\text{kA}$ に到達した後、電子密度・プラズマ電流が減少した。

プラズマ電流が $I_p=10\text{kA}$ を超える領域においては、図 6(d) に示すように磁気プローブに間欠的に大きなスパイク状信号が観測される。このとき、高速 CCD カメラで撮像した可視光像を見ると、スパイク前からスパイク頂点の時刻に向けて、LCFS の内側では減少、外側では増大しており、プラズマが最外殻磁気面を横切って外側に噴出していることを示唆している (図 6(e), (f) およびその差分像 (h))。また、同時に水平コード線積分密度 (図 6(b)) および、プラズマ中央部を見る XUV 信号 (図 6(c)) も減少しており、LCFS 内の密度が減少していることを示した。赤道面 XUV アレイによる径方向の信号分布をみると、LCFS の内側を通るコードでは信号は減少、外側を通るコードでは信号は増大しており、可視光像と同様に LCFS の内側から外側へとプラズマが噴出していることに対応していた。

$I_p = 10\text{ kA}$ を超える領域では、このような大きなプラズマ噴出現象が頻繁に観測され (平均周期 $\sim 3\text{ kHz}$)、その度に LCFS 内の密度が大きく減少しており、密度上昇を妨げて

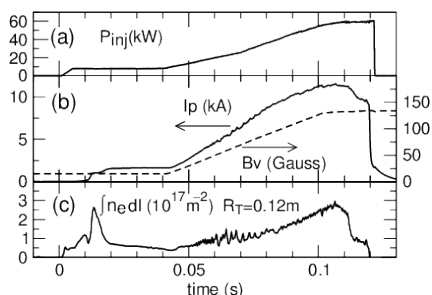


図 5 (a) マイクロ波入射電力、(b) プラズマ電流および垂直磁場、(c)-(h) 線積分密度

いることが分かった。従って、密度領域を拡大するためには、この現象の回避・抑制が必要である。真空容器内の 7 箇所磁気プローブを取り付け、高速 AD コンバータを導入して、この磁気現象の時間発展やモード構造を詳しく観察し、プラズマ噴出を引き起こすメカニズムの解明を目指す。

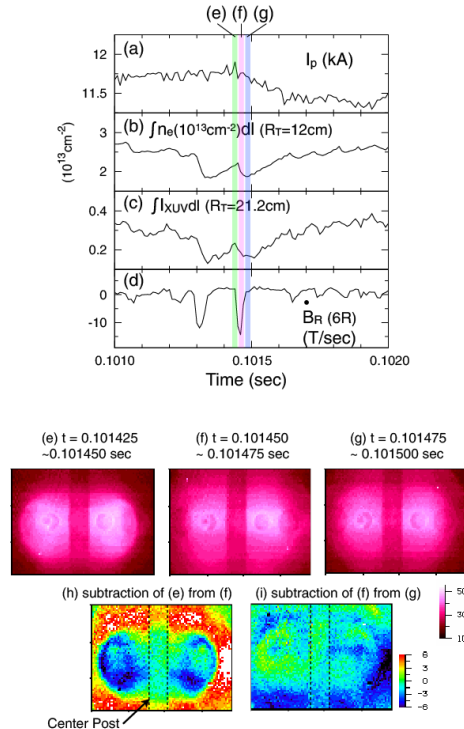


図 6 (a) プラズマ電流、(b) 線積分密度 (赤道面水平コード、接線半径 $R_t=12\text{cm}$)、(c) XUV 信号 (赤道面水平コード、接線半径 $R_t=21.2\text{cm}$)、(d) 磁気プローブ信号 (6R ポート (図 1 参照))、(e)-(g) 可視光カメラ像、(h)、(i) 可視光カメラ像の差分

(4) 上記 (1) ~ (3) で示したような遮断密度を大幅に超える密度領域の放電を得るためには、共鳴層位置の設定が重要である。図 7 に赤道面の線積分密度計測を接線半径 $R_t=12\text{cm}$ および $R_t=35.5\text{cm}$ において行った結果を示す。 $R_t=35.5\text{cm}$ コードの線積分密度は $I_p=9.5\text{kA}$ の最終の定常状態において $2.1 \times 10^{16}\text{ m}^{-2}$ と低く、赤道面に設置されている外側 Mo リミタ位置 $R=47\text{cm}$ から $R_t=35.5\text{cm}$ まで密度が単調に増加していると仮定すると、UHR 層は第二 ECR 共鳴

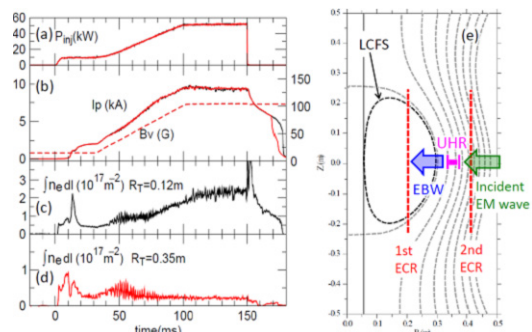


図 7 共鳴層位置 $R=20.6\text{cm}$ における (a)-(d) 典型放電波形、(e) 推定 UHR 層位置

層よりも十分高磁場側に存在していることが分かった (図 7(e))。従って、入射電磁波は EB 波の第一伝播帯 (基本~第二高調波 EC 共鳴層の間) において EB 波へと変換されており、その後基本波共鳴層へと向かって伝播し、基本波 EC 共鳴により電流を運び高速電子に加えてバルク電子を加熱することで、遮断密度の 7 倍を超える密度のプラズマが得られていることを示した。

(5) 一方で、少し磁場強度を下げて共鳴層位置を少し弱磁場側に設定すると、電子密度が大きく減少する。図 8 に基本波共鳴層位置 $R_{\text{ECR}}=21.3\text{cm}$ および $R_{\text{ECR}}=18.5\text{cm}$ における放電の比較を示す。 $R_{\text{ECR}}=21.3\text{cm}$ の場合は、プラズマ電流が $I_p=9.3\text{kA}$ までランプアップするとともに電子密度が大きく増大するのに対し、 $R_{\text{ECR}}=18.5\text{cm}$ とした場合は、電子密度はほとんど増大せず、最終定常でのプラズマ電流も低い。低密度の放電では、UHR 層が第二高調波共鳴層のすぐ外側に位置していると推定され (図 8(e))、この場合 EB 波は第二伝播帯で変換され、第 2 高調波 EC 共鳴により電子に吸収される。従って、入射電磁波の電力の多くが第二伝播帯 EB 波へと結合してしまうことで、第一伝播帯 EB 波への電力結合が大幅に減少し、プラズマ中心でのバルク電子密度が大きく減少したものと考えられる。逆に、高い密度の放電では、高域混成波共鳴層が第二共鳴層の十分内側に位置することで第一伝播帯 EB 波への良い結合が確保され、プラズマ中心部での基本波 EC 共鳴によって高いバルク電子密度を実現していると考えられる。

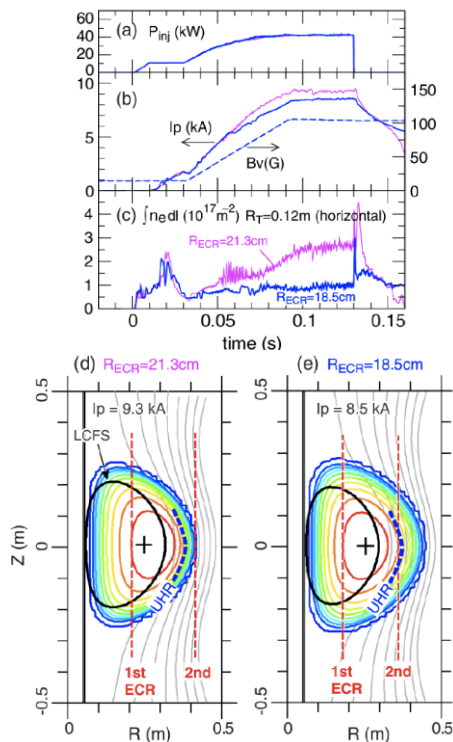


図 8 基本波共鳴層位置を $R_{\text{ECR}}=21.3\text{cm}$ と $R_{\text{ECR}}=18.5\text{cm}$ に設定した場合の比較

(6) 上記の密度の違う 2 つの放電における硬 X 線波高分析の結果を図 9 に示す。垂直コード ($R=33\text{cm}$ 及び $R=40.5\text{cm}$) で計測した。両者を比較すると、 $R_{\text{ECR}}=18.5\text{cm}$ とした低密度放電の方が、 $R_{\text{ECR}}=21.3\text{cm}$ の高密度放電の場合に比べて、どちらのコードにおいても X 線スペクトルのエネルギー帯および強度が大きい。すなわち、低密度放電の方では高速電子が大きく発達しており、一方、高密度放電ではそれが抑えられていることが分かった。

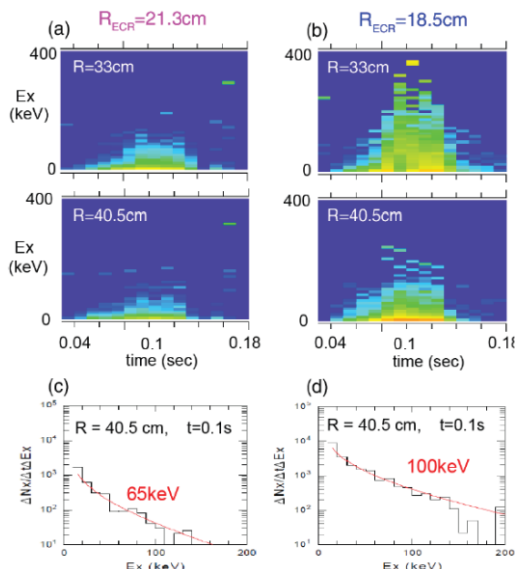


図 9 (a)-(b) 垂直コード ($R=33\text{cm}$ 及び $R=40.5\text{cm}$) で計測した硬 X 線スペクトルの時間発展、(c)-(d) $t=0.14\text{sec}$ における X 線スペクトル ($R=40.5\text{cm}$ コード)

<引用文献>

- ① H. Igami, H. Tanaka, T. Maekawa
Plasma Phys. Control. Fusion 48 (2006) 573-598
5. 主な発表論文等
[雑誌論文] (計 6 件)
- ① M. Uchida, Y. Noguchi, H. Tanaka, T. Maekawa “Non inductive formation of an extremely overdense spherical Tokamak by electron Bernstein wave heating and current drive on LATE”, Web of Conf. 87 (2015) 02006 査読無
DOI:10.1051/epjconf/20158702006
- ② H. Tanaka, M. Uchida, T. Maekawa, K. Kuroda, C. Ikeda, T. Shigemura, et al., “Observation of Intermittent Plasma Ejection from a Highly Overdense Spherical Tokamak Plasma Maintained by Electron Bernstein Wave Heating and Current Drive in LATE”, Proc. 25th Int. Conf. on Fusion Energy (2014) EX/P7-41, 査読有
- ③ Yuto Noguchi, Masakazu Hibino, Masaki Uchida, Hitoshi Tanaka, Takashi Maekawa, “Circular TE11-based waveguide polarizer for efficient coupling to electron Bernstein wave”, Plasma

Phys. Control. Fusion 55 (2013)
125005 (12pp), 査読有

DOI:10.1088/0741-3335/55/12/125005

- ④ M. Uchida, T. Maekawa, H. Tanaka,
et al., “Noninductive Formation of
Spherical Tokamak at 7 Times the Plasma
Cutoff Density by Electron Bernstein Wave
Heating and Current Drive on LATE”,
Proc. 24th Int. Conf. on Fusion Energy
(2012) EX/P6-18, 査読有
- ⑤ T. Maekawa, T. Yoshinaga, M. Uchida,
F. Watanabe, H. Tanaka, “Open field
equilibrium current and cross-field
passing electrons as an initiator of a
closed flux surface in EC-heated toroidal
plasmas” Nucl. Fusion 52 (2012)
083008 (19pp) 査読有
DOI:10.1088/0029-5515/52/8/083008
- ⑥ H. Tanaka, S. Omi, J. Katsuma,
Y. Yamamoto, M. Uchida, T. Maekawa
“Development of an ion beam probe system
for potential measurement in the Low Aspect
ratio Torus Experiment Device”, _IEEJ
Trans. Fundamentals and Materials, 132567
(2012) 査読有
DOI:10.1541/ieejfms.132.567

[学会発表] (計 11 件)

- ① M. Uchida, “Formation of microwave
spherical torus by electron Bernstein wave
heating and current drive on LATE”,
Plasma Conference 2014, 2014 年 11 月 21
日、朱鷺メッセ (新潟市)
- ② M. Uchida, “Noninductive formation of
extremely overdense Spherical Tokamak
plasma by electron Bernstein wave heating
and current drive on LATE”, 24th
International Toki Conference, 2014 年 11 月
4 日、セラトピア土岐 (岐阜県土岐市)
- ③ H. Tanaka, “Observation of Intermittent
Plasma Ejection from a Highly Overdense
Spherical Tokamak Plasma Maintained by
Electron Bernstein Wave Heating and
Current Drive in LATE”, 25th IAEA Fusion
Energy Conference, 2014 年 10 月 13 - 18,
Saint Petersburg, Russia
- ④ M. Uchida, “Noninductive formation of an
extremely overdense spherical tokamak by
electron Bernstein wave heating and
current drive on LATE”, 18th Joint
Workshop on Electron Cyclotron Emission
and Electron Cyclotron Resonance Heating,
2014 年 4 月 22 日, 新公会堂 (奈良県)
- ⑤ 打田正樹, LATE における第一伝播帯 EB 波
加熱による球状トカマク形成、プラズマ・核
融合学会第 30 回年会、2013 年 12 月 5 日、
東京工業大学 (東京都)
- ⑥ T. Maekawa, “Fast magnetic activity
accompanied with plasma ejection across
last closed flux surface in an EC started up
plasma in the LATE device”, 17th

International Spherical Torus Workshop,
2013 年 9 月 17 日, University of York, UK

- ⑦ M. Uchida, “Recent results on spherical
tokamak startup by EBW on LATE”,
US-Japan Workshop on RF Heating
Physics, 2013 年 9 月 24 日, MIT, Boston,
USA
- ⑧ H. Tanaka, “Non-inductive Start-up by
ECH in KSTAR”, Japan-Korea Workshop
on Physics and Technology of Heating and
Current Drive, 2013 年 1 月 28 日, Haeundae,
Busan (Korea)
- ⑨ M. Uchida, “Formation of an extremely
overdense spherical Tokamak by EBW on
LATE”, Workshops on Physics and
Technology of RF Heating of Fusion
Plasmas 2012, 2012 年 12 月 14 日, Nara
Prefectural New Public Hall, Nara, Japan
- ⑩ 打田正樹、LATE における第一伝播帯 EB 波
による遮断密度超越領域での球状トカマク形
成、プラズマ・核融合学会第 29 回年会、2012
年 11 月 29 日、クローバープラザ (福岡市)
- ⑪ M. Uchida, “Noninductive Formation of
Spherical Tokamak at 7 Times the Plasma
Cutoff Density by Electron Bernstein Wave
Heating and Current Drive on LATE”, 24th
IAEA Fusion Energy Conference, 8-13
October 2012, San Diego, USA

[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

<http://plasma47.energy.kyoto-u.ac.jp/>

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

(2) 研究分担者

前川 孝 (MAEKAWA, Takashi)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授
研究者番号：20127137

田中 仁 (TANAKA, Hitoshi)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・
准教授

研究者番号：90183863

(3) 連携研究者

東井 和夫 (TOI, Kazuo)

核融合科学研究所・教授

研究者番号：20093057

磯部 光孝 (ISOBE, Mitsutaka)

核融合科学研究所・准教授

研究者番号：00300731