

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01062

研究課題名(和文)電子サイクロトロン加熱による超伝導トカマク起動法の開発

研究課題名(英文)non-inductive startup of superconducting tokamak by ECH

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・准教授

研究者番号：90322164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：電子サイクロトロン加熱(ECH)による無誘導トカマク起動において、磁気面形成時に主要な電流駆動源となる磁場を横切る通過軌道電子の閉じ込めを通常アスペクト比装置において改善する手法を開発するため、低アスペクト比装置LATEを通常アスペクト比と同等の条件になるように真空容器の上下方向を制限するプレートを設置し、様々な装置縦長度(プラズマ生成領域の縦横比)においてECHトカマク起動実験を行った。装置縦長度が小さくなるにつれ磁気面形成が可能な外部条件領域が狭くなるものの磁気面形成は可能であることを示し、また必要なマイクロ波電力及び外部垂直磁場ディケイインデックスの条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合トカマク装置では、コイルは超伝導となるため起動時に印加できるループ電圧が低くなり、トカマク起動の信頼度低下が懸念される。本研究では、ループ電圧を全く用いることなくマイクロ波入射による電子サイクロトロン加熱のみでトカマク起動を行う実験を様々なプラズマ生成領域形状において行い、真空容器縦長度が小さくなるにつれて必要な外部条件領域が狭くなるものの磁気面形成が可能であることを明らかにした。また、それに必要な外部垂直磁場ディケイインデックスや入射電力の条件を明らかにした。本成果により電子サイクロトロン加熱によるトカマク起動が可能になれば、トカマク炉の性能向上、トカマク炉の建設費低減が期待される。

研究成果の概要(英文)：Non inductive startup of Tokamak by electron cyclotron heating (ECH) and current drive (ECCD) in various aspect ratios of vacuum vessel poloidal cross section has been investigated in LATE. Limiters have been installed in top and bottom of the LATE device to vary the aspect ratio of poloidal cross section in the range of $K_{vv} = 1.7 - 2.3$ (K_{vv} is vacuum vessel elongation which is the ratio of vertical length to horizontal one of plasma production region). The results show that the formation of closed flux surfaces only by ECH is still possible for $K_{vv} = 1.7$ when we increase the decay index of external vertical field and incident microwave power.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：無誘導トカマク起動 電子サイクロトロン加熱・電流駆動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 超電導トカマクにおいては、中心ソレノイドの磁束の掃引速度に制約が加わるために起動時に印加できるループ電圧(V_L)は小さくなり、トカマク起動の信頼度低下が懸念されている。ITER では $V_L \leq 0.3V$ での起動が求められている。
- (2) 小型の低アスペクト比装置 LATE において、ループ電圧をかけることなく、適切な曲率を持った垂直磁場の下で EC 加熱によりプラズマを生成すると、自発的にプラズマ電流が発生し、急速な増大(電流ジャンプ)を経て閉じた磁気面形成に至り、磁気面形成後は電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)により更にプラズマ電流を増大させてトカマク形成が可能であった。一方、大型の通常アスペクト比装置 JT-60U および KSTAR において同様の立上げ実験を行うと、適切な垂直磁場ミラー比を設定すれば EC のみで放電を開始しプラズマ電流を立ち上げて小さな初期磁気面の形成まで実現出来るが、磁気面形成に至る前後で真空容器の上下面にホットスポットが現れ、その出現とともにプラズマ電流は減少に転じて最終的に放電停止に至った。また、どちらの装置においても、LATE 装置で見られたような明確な電流ジャンプは観測されなかった。
- (3) これらのことは、電流ジャンプにおいて鍵となる特殊な軌道をもつ高速電子と関連していると考えられる。トロイダル磁場に垂直磁場が印加された下では磁力線は螺旋構造となり、電子は螺旋状の磁力線に沿って上方または下方に進む。一方、トロイダル磁場 $\propto 1/R$ の下では電子はトロイダル磁場の勾配・湾曲ドリフトにより下方または上方に進む。ここに、両者の上下方向の運動が釣り合いトロイダル方向のみに運動する電子(v_{z0} 電子)が存在する。この v_{z0} 電子は位相空間(v_{\parallel} , v_{\perp})上で $v_{\parallel} > 0$ (プラズマ電流を運ぶ向き)の領域に偏在した楕円(v_{z0} 楕円)上の電子となり、これが最初期のプラズマ電流となる。これは、垂直磁場が z 方向のみの一様磁場の場合であるが、垂直磁場の湾曲指数をとってミラー磁場型とすると、位相空間上で v_{z0} 楕円の近傍にポロイダル面内でも有限の軌道をもちながら真空容器内に閉じ込められる電子(Cross field passing electron, CFP 電子)が存在するようになり、より多くのプラズマ電流が流れる。プラズマ電流が増大すると、垂直磁場の湾曲が局所的に更に強められて位相空間内の CFP 電子は更に増加する。ここに、正のフィードバックが働き、電流ジャンプを引き起こす。
- (4) CFP 電子の軌道はピッチ角が大きくなるにつれ上下に大きく伸びた軌道をとるため、真空容器が上下方向に大きいほどより多くの電子が閉じ込められることになる。低アスペクト比装置の場合、真空容器の上下方向のスペースは相対的に大きくなるが、アスペクト比が増加するにつれ、そのスペースは必然的に低下する。このため CFP 電子が上下面に衝突することとなり、総プラズマ電流が低下するとともにホットスポットを生じて不純物混入を招き、電子温度の低下を引き起こしてプラズマ崩壊へとつながったと考えられる。通常アスペクト比における確実な磁気面形成法を確立するには、この問題の解決が必要である。

2. 研究の目的

- ・ 電子サイクロトロン加熱によるトカマク起動において、鍵となるプラズマ電流を運ぶ CFP 電子に着目し、真空容器上下方向スペースが CFP 電子軌道およびプラズマ電流立上げに及ぼす影響を実験的に確かめ、通常アスペクト装置における磁気面形成・維持のためのプラズマ制御法を開発する。実験は、LATE 装置を適宜改造して行う。

3. 研究の方法

- (1) LATE 真空容器内において、上下方向のプラズマ生成領域を制限する可動式プレート（リミタ）を設置し、プラズマ生成領域の縦長さを変化させられるようにする。可動式プレートは大半径方向に分割した構造とし、温度変化を計測することでそれぞれのプレートへの熱流入を計測できるようにする。この熱流分布と軟 X 線計測、硬 X 線計測、磁気解析、軌道計算等により高速電子の損失分布を推定する。
- (2) LATE 装置の真空容器内に上下方向の領域を狭くしていった際に、どのような高速電子が損失するか、またどのように電流分布が変化していくかを明らかにする。また、様々な垂直磁場形状の下で計測を行って、CFP 電子の制御法を探求する。

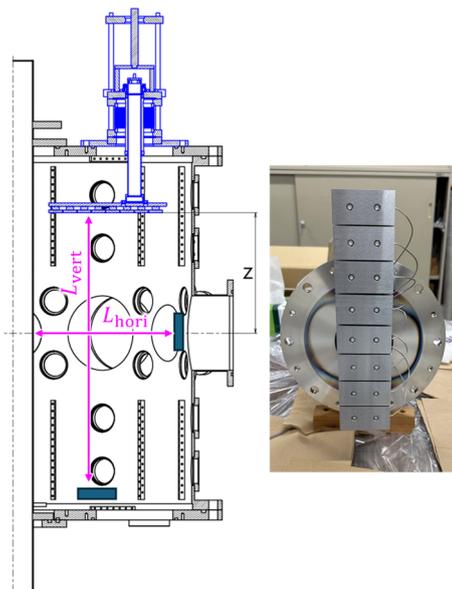


図 1. 可動式分割リミタ

4. 研究成果

- (1) LATE 真空容器内において、図 1 のような上下方向のプラズマ生成領域を制限する可動式プレート（リミタ）を LATE 上部に設置した。可動式プレートは $R = 0.1 \sim 0.42 \text{ m}$ までを 0.04 m おきに分割した 8 分割の Mo プレート（幅 74 mm 、厚さ 8 mm ）をプラズマ対向面とし、それぞれの背後は 10 mm 厚のステンレス材を介して、 10 mm 厚、長さ 330 mm の Mo 支持板に取り付けられている。支持板は 0.5 mm 厚のステンレス部を介して外部より水冷する。熱電対によりそれぞれの Mo プレートの温度を計測することで各プレートへの熱流入量を計測できる構造とした。
- (2) 可動式リミタを用いて、装置縦長度 ($K_{VV} = L_{vert}/L_{hori}$) (L_{vert} は垂直方向のリミタ間距離、 L_{hori} は水平方向の内側壁と外側リミタ間距離、図 1 を参照) を 1.7 ($0.68 \text{ m} / 0.39 \text{ m}$)、 1.95 ($0.76 \text{ m} / 0.39 \text{ m}$)、 2.3 ($0.88 \text{ m} / 0.39 \text{ m}$) の 3 通りに設定して、トロイダル磁場 (624 G , $R = 0.25 \text{ m}$) に弱い定常垂直磁場 (13 G , $R = 0.25 \text{ m}$) を加えた下での ECH による磁気面形成実験を行った。マイクロ波は 2.45 GHz （最大 25 kW 、 0.2 s ）を用い、基本共鳴層を $R = 0.18 \text{ m}$ に設定した。

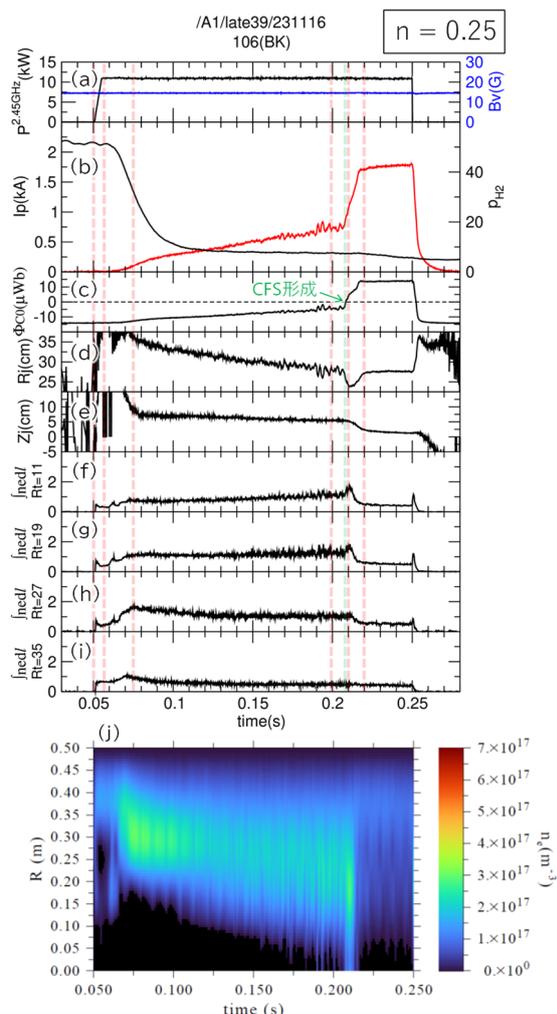


図 2. 装置縦長度 1.7 における磁気面形成

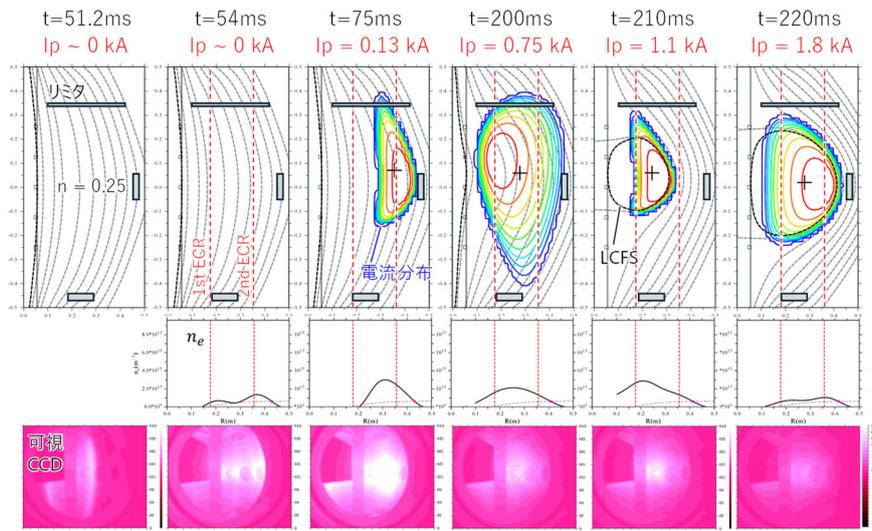


図 3. 図 2 に示す放電の各時刻におけるプラズマ電流分布、密度分布、可視光画像

- (3) 図 2 に $K_{VV} = 1.7$ における典型的な放電波形を示す。また図 3 に各時刻におけるプラズマ電流分布およびポロイダル磁束、赤道面上での密度分布、可視光像を示す。密度分布は図 2 (f) – (i) に示す水平 4 コード（それぞれ接線半径 $R_T = 0.11, 0.19, 0.27, 0.35$ m）の線積分よりアーベル変換により求めた。図 2 (j) にはその時間発展を示す。定常の垂直磁場、トロイダル磁場の下で水素ガスを充填しマイクロ波を入射すると、基本波電子サイクロトロン共鳴層より放電が開始され（図 2 および図 3 の可視光像参照）、すぐに弱磁場側へと広がり、図 3 に示す密度分布は基本波共鳴および第二高調波共鳴付近に頂点を持つ 2 山の分布となる。その後、基本波共鳴と第二高調波共鳴の間に一つのピークを持つ分布へと変化するとともに、プラズマ電流が流れ始める（図 2 (b) および図 3 の電流分布参照）。同時にイオンゲージで計測した中性ガス圧力が下がり始める。プラズマ電流位置および密度分布が徐々に大半径内側へと移動していくとともに、プラズマ電流値 (I_p) も増加する。密度分布のピークが基本波共鳴層へと近づき、プラズマ電流分布が内側壁まで広がり、 $I_p \sim 0.75$ kA に達すると、急速に電流が上昇し（電流ジャンプ）、 $I_p \sim 1.8$ kA に達してその後定常に至る。図 3 のポロイダル磁束を見ると、この電流ジャンプの後、磁気面が形成されていることがわかる。

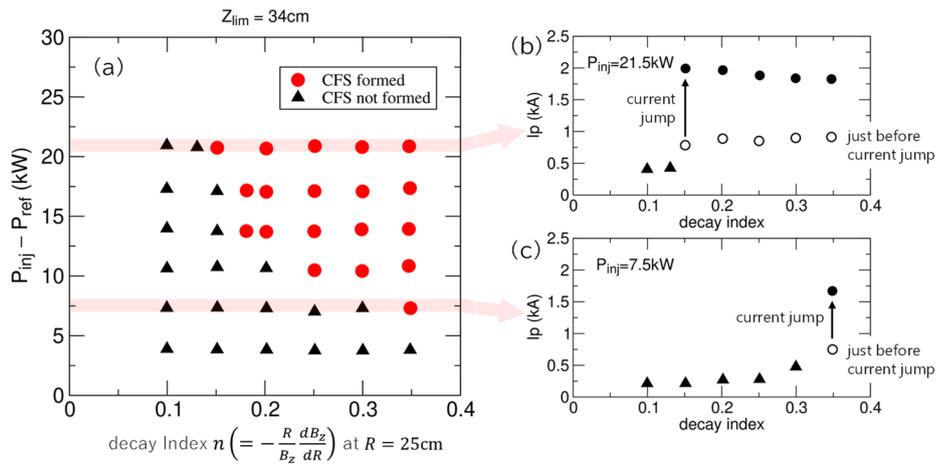


図 4. 装置縦長度 1.7 における磁気面形成の入射電力および垂直磁場ディケイ指数への依存

- (4) $K_{VV} = 1.7$ において、同様の磁気面形成実験を様々な入射電力および垂直磁場ディケイ指数において行った結果を図 4 に示す。図 4 (a) において、赤丸は磁気面形成が可能であったことを示し、黒三角は磁気面形成に至らなかったことを示す。マイクロ波入射電力およ

び垂直磁場ディケイ指数が大きな領域（図の右上三角領域）においては磁気面形成が可能であることがわかる。図 4 (c) に、入射電力 7.5 kW において、垂直磁場ディケイ指数を 0.1 から 0.35 まで変化させた場合の、最大到達プラズマ電流（▲印、磁気面形成に至らなかった放電）、電流ジャンプ直前のプラズマ電流値および最終定常でのプラズマ電流値（それぞれ○および●印、磁気面形成に至った放電）を示す。垂直磁場ディケイ指数が 0.1 においては最大到達電流が $I_p \sim 0.25 \text{ kA}$ であり磁気面形成に至らないが、垂直磁場ディケイ指数を増大させていくと最終到達電流が徐々に増大していき、垂直磁場ディケイ指数 0.35 とすると、電流ジャンプが起こり、磁気面が形成されて $I_p \sim 1.75 \text{ kA}$ に至る。入射電力を 21.5 kW において同様の実験を行うと（図 4 (b) 参照）、垂直磁場ディケイ指数がより低い領域（0.15 以上）でも電流ジャンプが起こり磁気面形成へと至るようになる。同じ垂直磁場ディケイ指数 0.1 で入射電力の違いによる最終到達電流の違いを見ると、入射電力が大きい方がプラズマ電流が大きい。また、どちらの入射電力においても、垂直磁場ディケイ指数を増大させるにつれ、最終到達電流が徐々に大きくなっていく。これらのことは入射電力もしくは垂直磁場ディケイ指数を増大させることで、プラズマ圧力が上昇し、開磁場構造における圧力駆動電流が増大していることを示唆している。圧力駆動電流が十分に流れ（ $I_p \sim 0.5 \text{ kA}$ ）、自己磁場により CFP 電子の閉じ込めが十分に確保されれば、電流ジャンプに至り磁気面形成に至ると推察される。

- (5) $K_{VV} = 2.3$ において、同様の磁気面形成実験を様々な入射電力および垂直磁場ディケイ指数において行った結果を図 5 に示す。

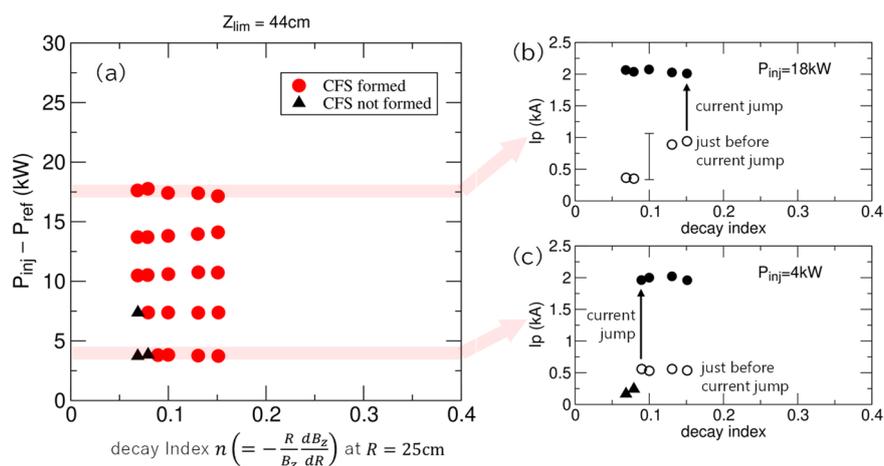


図 5. 装置縦長さ 2.3 における磁気面形成の入射電力および垂直磁場ディケイ指数への依存

装置縦長さ 1.7 の場合と比べて、より低い入射電力、垂直磁場ディケイ指数で磁気面形成が可能であり、広いパラメータスペースにおいて電流ジャンプが起こり磁気面形成に至ることがわかる。入射電力が 10kW 以上では、垂直磁場ディケイインデックスが非常に低い 0.07 でも磁気面形成に至り、ほとんど湾曲のない垂直磁場形状でも電流ジャンプによる磁気面形成が可能であった。真空容器の上下方向スペースが大きくとれる場合、外部垂直磁場のディケイ指数が低くても、縦長軌道をとる CFP 電子が真空容器内で閉じ込め軌道となってプラズマ電流を流し、自己磁場が増大することによりポロイダル磁場の湾曲が大きくなって更に多くの CFP 電子が閉じ込められてプラズマ電流が増大し、最終的に磁気面形成に至る。

- (6) この様な CFP 電子の軌道特性を調べるため、分割リミタによる熱計測（CFP 電子の損失計測）に加えて、分割リミタを視野にもつアレイ型 AXUV フォトダイオード、2次元 X 線カメラを設置し、上部リミタを変化させて装置縦長さを変化させた場合の CFP 電子の損失分布を計測する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Guo Xingyu, Ashida Ryo, Noguchi Yuto, Kajita Ryusuke, Tanaka Hitoshi, Uchida Masaki, Maekawa Takashi	4. 巻 64
2. 論文標題 Direct measurement of electron Bernstein waves in Low Aspect ratio Torus Experiment (LATE)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 035008 ~ 035008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac4522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 GUO Xingyu, ASHIDA Ryo, NOGUCHI Yuto, TANAKA Hitoshi, UCHIDA Masaki, MAEKAWA Takashi	4. 巻 17
2. 論文標題 Development of an Excitation and Detection System of Electron Bernstein Waves in LATE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401024 ~ 1401024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1401024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nozawa Y., Uchida M., Igami H., Kajita R., Tanaka H., Maekawa T.	4. 巻 92
2. 論文標題 Homodyne interferometry using a phase rotator for calibration of sine?cosine phase detection of a 70?GHz probe beam through a plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 083501 ~ 083501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0049771	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. TANAKA, T. KUZUMA, R. ASHIDA, R. KAJITA, T. NAGAEKI, T. NAKAI, S. MATSUI, S. YAMAGATA, R. NAKAI, X. GUO, Y. NOZAWA, M. UCHIDA, T. MAEKAWA	4. 巻 IAEA-CN-123
2. 論文標題 ELECTRON BEAM INJECTION TO NON-INDUCTIVELY-PRODUCED SPHERICAL TOKAMAK PLASMAS BY ELECTRON BERNSTEIN WAVE IN LATE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 28th IAEA Fusion Energy Conference, 2020, IAEA-CN-123/759	6. 最初と最後の頁 EX P7-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 H. Tanaka, M. Uchida, R. Kajita, W. Ootaka, S. Ozaki, M. Hamaguchi, R. Kobayashi, M. Komeda Y. Yasui
2. 発表標題 Overview of Low Aspect ratio Torus Experiment (LATE): Recent Results and Plans
3. 学会等名 The 21st International Spherical Torus Workshop 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浜口睦宏、大高航、梶田竜助、尾崎祥平、小林良輔、米田元樹、安井優太、打田正樹、田中仁
2. 発表標題 LATE 装置におけるマイクロ波球状トカマクプラズマの軟X線CT計測II
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大高航、梶田竜助、尾崎祥平、浜口睦宏、小林良輔、米田元樹、安井優太、打田正樹、田中仁
2. 発表標題 LATE 装置におけるHIBPによる空間電位計測精度の改善
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎祥平、打田正樹、梶田竜助、大高航、浜口睦宏、小林良輔、米田元樹、安井優太、田中仁
2. 発表標題 ECH/ECCD 無誘導電流立ち上げに対する非軸対称磁場の影響
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Tanaka, M. Uchida, R. Kajita, W. Ootaka, S. Ozaki, M. Hamaguchi, R. Kobayashi, M. Komeda, Y. Yasui, T. Maekawa
2. 発表標題 Present Status of LATE Experiment
3. 学会等名 11th QUEST Workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 打田正樹、大高航、尾崎祥平、浜口睦宏、小林良輔、米田元樹、安井優太、梶田竜助、田中仁
2. 発表標題 LATE装置(II)
3. 学会等名 先進トカマク開発のための実験研究
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 打田 正樹、尾崎 祥平、大高 航、濱口 睦宏、出田 雄己、吉岡 慎太郎、郭 星宇、梶田 竜助、田中 仁、前川 孝
2. 発表標題 球状トカマク装置LATEにおけるプラズマ電流分布推定のための 磁気計測システム
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 郭星宇, 梶田竜助, 出田雄己, 吉岡慎太郎, 大高航, 尾崎祥平, 浜口睦宏, 打田正樹, 田中仁, 前川孝
2. 発表標題 LATE 装置におけるモード変換とEBW 検証のための2次元波動パターン測定
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 出田雄己、打田正樹、梶田竜助、郭星宇、吉岡慎太郎、大高航、尾崎祥平、浜口睦宏、田中仁
2. 発表標題 LATE 装置におけるマイクロ波球状トカマクプラズマの軟X線CT計測
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶田竜助、出田雄己、吉岡慎太郎、郭星宇、大高航、尾崎祥平、浜口睦宏、打田正樹、田中仁
2. 発表標題 LATE におけるECHによる球状トカマク立ち上げ時の間欠的噴出現象のメカニズム
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡慎太郎、梶田竜助、大高航、出田雄己、尾崎祥平、浜口睦宏、郭星宇、打田正樹、田中仁
2. 発表標題 LATE での重イオンビームプローブによるマイクロ波球状トカマクプラズマの空間電位変動の計測
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. TANAKA, T. KUZUMA, R. ASHIDA, R. KAJITA, T. NAGAEKI, T. NAKAI, S. MATSUI, S. YAMAGATA, R. NAKAI, X. GUO, Y. NOZAWA, M. UCHIDA, T. MAEKAWA
2. 発表標題 ELECTRON BEAM INJECTION TO NON-INDUCTIVELY-PRODUCED SPHERICAL TOKAMAK PLASMAS BY ELECTRON BERNSTEIN WAVE IN LATE
3. 学会等名 IAEA FEC 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 LATE装置
2. 発表標題 打田正樹、田中仁、前川孝
3. 学会等名 先進トカマク開発のための実験研究
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 仁 (Tanaka Hitoshi) (90183863)	京都大学・エネルギー科学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------