

6 一般物理実験

6.1 江尻研究室

江尻研究室では、核融合発電の実現を目標に磁場閉じこめ型トーラスプラズマの研究を行っている。柏キャンパスに設置された TST-2 装置を用いた球状トカマクプラズマの基礎研究を行うと共に、量子科学技術研究開発機構の JT-60SA 装置、核融合科学研究所の LHD 装置、京都大学の LATE 装置、九州大学の QUEST 装置を対象とした共同研究を進めており、海外との共同研究も実施している。

6.1.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク (ST) 型の装置であり、プラズマの主半径、小半径はおよそ 0.36、0.23 m、電磁誘導、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120、27 kA である。ST は高い規格化圧力を安定に維持できる方式として魅力的である一方、プラズマ電流の立ち上げ維持は解決すべき課題である。TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW) を用いて高速電子を生成し、それによる電流駆動の研究を行っている。2021 年度は、高周波輸送モデルを改良し、その結果、LHW は、電流を駆動するだけでなく、粒子バランスに大きな影響を与えることがわかった。また、外側スクレイプ領域に金属ターゲットを挿入し、高速電子が存在することが確認され、逆方向に走る高速電子の存在が示唆された。新たな 2.45 GHz での LHW 励起源として、フィンラインアンテナを用いたアンテナを製作し実験を行っているが、今年度はフィーダー部を改善した上側入射アンテナを製作した。LHW は 3 波結合であるパラメトリック崩壊不安定性を引き起こすが、従来観測されていた不安定性とは別のタイプの 3 波結合が観測され、現在、その同定を行うための実験を準備している。LHW 維持プラズマではイオン加熱が観測されるが、パワー変調実験から、古典的な電子衝突による加熱では説明できないことが定量的に示され、不安定性によるイオン加熱を仮説とした実験を開始した。また、EC 補助オーミック立ち上げの実験とそれを説明するためのモデルの構築、非等方電子温度計測のためのダブルパストムソン散乱システムの開発、内部磁場測定用偏光計の開発を行った。

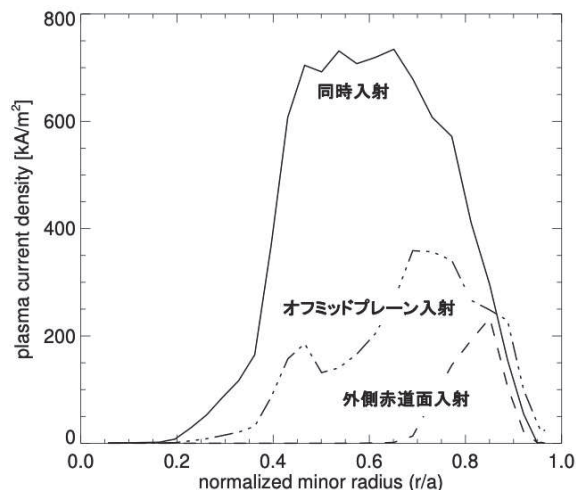


図 6.1.1: 規格化小半径に対する電流密度分布。点線：外側赤道面入射、3 点鎖線：オフミッドプレーン入射、実線：同時入射。

6.1.2 非誘導高周波駆動プラズマ

静電結合型進行波アンテナを用いて、200 MHz の LHW 入射によるプラズマ電流駆動実験を行った。プラズマの外側と上側に設置された 2 台のアンテナを用いることで、外側、上側及び下側模擬の 3 種類の入射方法による電流駆動実験を行い、これまでに従来法の誘導放電に比べて 1/4 程度 (27 kA) のプラズマ電流を達成している。

新オフミッドプレーン入射アンテナ開発

光線追跡によると LHW を外側赤道面から入射した場合、プラズマ中心部では波の位相速度が大きすぎて熱電子と相互作用せず、電流を駆動できない。上側から入射した場合は、そもそも屈折により波がプラズマ中心部に到達しない。そのため、外側入射、上側入射共にごく周辺部での電流駆動になっており、電流駆動効率が制限される要因になっていると考えられている。そこで、よりプラズマ中心部で電流を駆動できる入射シナリオを検討した。その結果、赤道面上側 (オフミッドプレーン) から屈折率 $n_{||} \sim 13$ の波を励起することで外側赤道面入射の波数スペクトルと熱電子分布とのギャップを埋めることができたことがわかった。この外側赤道面とオフミッドプレーンの同時入射による相乗効果で電流駆動効率が改善することが期待される (図 6.1.1)。この予測を実験的に検証するため、オフミッドプレーンアンテナの設計を行なった。回路シミュレータ LTspice と有限要素解析ソフト COMSOL を用いて、 $n_{||} \sim 13$ の波を励起できるアンテナの設計と最適化を行なった。設計したアンテナの透過率は 90%、反射率は 10% となった。

固体ターゲットを用いた硬 X 線計測

TST-2 で近年提案された RF 駆動輸送モデルによると、低域混成波 (LHW) により生成される豊富な高速電子がスクレイプオフ層に存在すると予想される。これらの高速電子は装置壁やリミターに衝突し、硬 X 線を発生させるので、コアプラズマからの硬 X 線測定を汚染する可能性がある。そこで、スクレイプオフ層の高速電子の存在量や特性を調べるために、固体ターゲットを用いた硬 X 線測定を行った。

固体ターゲットとして、ステンレス製の板を TST-2 の外側の装置壁に設置した。主半径方向の位置およびポロイダル面内で走査できる導入機構を用いた。測定には、LYSO シンチレータ、光電子増倍管、増幅回路からなるシステムを使用し、硬 X 線ピークの波高解析によりそれぞれの X 線のエネルギーを求めスペクトルを測定した。

LHW によって維持されたプラズマの実験において、固体ターゲットに当たった高速電子からの硬 X 線がプラズマパラメータにほとんど影響を与えることなく確認された。固体ターゲットの主半径位置を変化させた測定により、硬 X 線フラックスが挿入長に比例すると考えると、高速電子はスクレイプオフ層におよそ一様に存在していることが分かった (図 6.1.2)。これは壁に向かって密度が減少するバルク電子とは異なる振る舞いであり、RF 駆動輸送モデルによる予想と整合性の取れたものである。高速電子のエネルギーフラックスは 1 MW/m^2 程度と評価されたが、これはプラズマ電流の値から単純に予測される値より十分小さく、高速電子の多くは上側リミターで失われると考えられる。

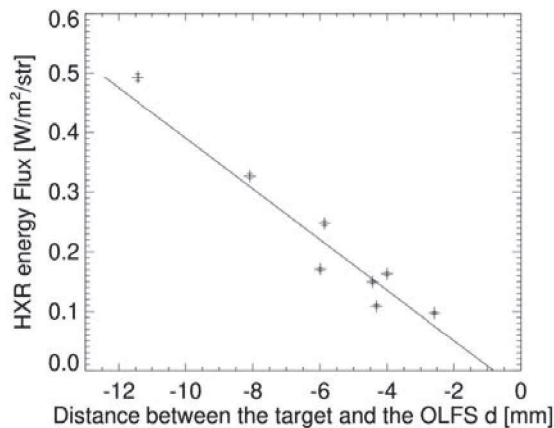


図 6.1.2: 硬 X 線フラックスの固体ターゲット挿入長依存性。

また、固体ターゲットを回転させた実験により、プラズマ電流を担う向きとは逆向き的高速電子の存在が示唆された。これは、LHW による直接の駆動、あるいは高速電子がリミターに衝突する際の後方散乱によって生成される可能性が考えられる。

これらの実験と解析により、線積分ではない点での測定を可能とする、固体ターゲットを用いた硬 X

線測定の有用性が確かめられた。

この他、コアプラズマからの硬 X 線のみを測定するために、視線内に壁やリミターを含まない垂直視線の硬 X 線計測システムが設計された。しかし、測定された硬 X 線は壁から由来するものが支配的と考えられ、更なる調査と開発が必要である。

ドップラー分光によるイオン温度計測

イオン温度は可視分光器を用いて測定しているが、 10 eV ほどで径方向にブロードな分布をしていることがわかっている。LHW のパワー変調実験を行い、それに伴うイオン温度の応答を調べた。LHW のパワーを切ると光量、温度ともに減少することが確認され、周辺部のほうが早く温度が下がった。中心部は 4 ms ほど高い温度を維持していた。周辺部の緩和時間は 1 ms ほどであったが、これより推定される閉じ込め時間を用いると、定常状態では電子との衝突加熱よりも数十倍大きな加熱パワーが必要であることが分かった。パワーが 0 の状態からパワーを入れた直後の時間変化を見ると、周辺部では温度上昇が計測されたが中心部では計測されなかった。このことから、加熱はプラズマの周辺で起こっていることが示唆された。

6.1.3 中心ソレノイド駆動プラズマ

軌道平均運動論コードによるブレイクダウン成否の推定

電子サイクロトロン加熱 (ECH: Electron Cyclotron Heating) 補助オーミック立ち上げにおけるブレイクダウンの成否を推定するため、軌道平均運動論コードを作成した。TST-2 の捕捉粒子配位 (TPC: Trapped Particle Configuration) において、リミタからの電子損失と中性粒子のイオン化による電子利得を含めた大域的な電子輸送を計算した。全電子数の増減によってブレイクダウンの成否を推定したところ、垂直磁場、中性ガス圧、周回電圧、ECH 電力を変化させた時の依存性は実験結果と一致した (図 6.1.3)。特に ECH 電力を増加させるとブレイクダウンが起こりにくくなるのは、ECH による準線形拡散項が増加し、リミタからの損失が大きくなることが原因と分かった。

6.1.4 計測器開発

ダブルパストムソン散乱計測

TST-2 でのトムソン散乱測定用にダブルパス構成を開発した。概略図を図 6.1.4 に示す。前方 (赤) と後方 (橙) の両方のビームの焦点をプラズマ内部に調整した。低 YAG レーザー出力 ($\sim 1 \text{ W}$) でのダブルパス・ラマン散乱計測を行なった結果、前方ビー

新たに金属コルゲート表面を用いる「フィンラインアンテナ」を開発している。コルゲート表面には、真空中では電場と伝搬方向の同じ縦波が伝送される。アンテナ前面にプラズマが存在する場合、低域混成波に結合する。2021年度はフィーダー部を改善した上側入射用フィンラインアンテナを製作した。磁気プローブを用いたベンチテストにより、設計通りの電場分布が励起されていることが確認できた。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K.Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, T. Saito, K. Yamamoto, and LHD Experiment Group: “A W-band millimeter-wave back-scattering system for high wavenumber turbulence measurements in LHD,” *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 043536 (2021).
 - [2] Y. Ko, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, K. Iwasaki, Y. Peng, J.H.P. Rice, Y. Osawa, T. Wakatsuki, M. Yoshida and H. Urano: “Optimization of Poloidal Field Configuration for Electron Cyclotron Wave Assisted Low Voltage Ohmic Start-Up in TST-2,” *Plasma and Fusion Res.* **16**, 1402056 (2021).
 - [3] S. Kojima, K. Hanada, H. Idei, T. Onchi, R. Ikezoe, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Kuroda, K. Nakamura, A. Higashijima, T. Nagata, S. Kawasaki, S. Shimabukuro, H. Elserafy, M. Fukuyama, A. Ejiri, T. Shikama, N. Yoneda, R. Yoneda, T. Kariya, Y. Takase, S. Murakami, N. Bertelli and M. Ono: “Observation of second harmonic electron cyclotron resonance heating and current-drive transition during non-inductive plasma start-up experiment in QUEST,” *Plasma Physics and Controlled Fusion* **63**, 105002 (2021).
 - [4] A. Ejiri, M. Hirata, M. Ichiura, M. Yoshikawa, R. Ikezoe and S. Kamio: “Development of a Fast Visible Light Measurement System for the Study of Ion Cyclotron Range of Frequency Waves in GAMMA 10/PDX Plasmas,” *Plasma and Fusion Research* **16**, 1402096 (2021).
 - [5] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice, Y. Osawa, C.P. Moeller, Y. Yoshimura: “Modification of the magneto-hydrodynamic equilibrium by the lower-hybrid wave driven fast electrons on the TST-2 spherical tokamak,” *Nuclear Fusion* **61**, 116047 (2021).
 - [6] Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, T. Onchi, Y. Ono, H. Tanaka, N. Tsujii, M. Uchida, K. Yasuda, H. Kasahara, S. Murakami, Y. Takeiri, Y. Todo, S. Tsuji-Iio and Y. Kamada: “Overview of coordinated spherical tokamak research in Japan,” *Nuclear Fusion* **62**, 042011 (2022).
 - [7] Y. Kamada and E. Di Pietro and M. Hanada and P. Barabaschi and S. Ide and S. Davis and M. Yoshida and G. Giruzzi and C. Sozzi and the JT-60SA Integrated Project Team: “Completion of JT-60SA construction and contribution to ITER,” *Nuclear Fusion* **62**, 042002 (2022).
 - [8] M. Yoshida et al.: “Plasma physics and control studies planned in JT-60SA for ITER and DEMO operations and risk mitigation,” *Plasma Physics and Controlled Fusion* **64**, 054004 (2022).
 - [9] O. Watanabe, Y. Ko, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Peng, K. Iwasaki, I. Yamada, G. Yatomi, C.P. Moeller and Y.-K.M. Peng: “Design of a finline antenna for current drive in TST-2,” *Fusion Engineering and Design* **178**, 113094 (2022).
- (学位論文)
- [10] 山田巖: 「TST-2 球状トカマクプラズマの立ち上げ実験における誘導電場と電子サイクロトロン波加熱の相乗効果の数値解析」
 - [11] 弥富豪: “Hard X-ray measurement in the scrape off layer using a solid target in the TST-2 spherical tokamak”
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, T. Onchi, Y. Ono, H. Tanaka, N. Tsujii, M. Uchida, K. Yasuda, Y. Kamada, H. Kasahara, S. Murakami, Y. Takeiri, Y. Todo, S. Tsuji-Iio: “Overview of Coordinated Spherical Tokamak Research in Japan”, 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
 - [13] A. Ejiri, H. Yamazaki, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice, Y. Osawa, C.P. Moeller, Y. Yoshimura, H. Kasahara, K. Saito, T. Seki and S. Kamio: “Energy, momentum and particle balances of electrons in lower hybrid wave sustained plasmas on the TST-2 spherical tokamak”, 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
 - [14] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice, Y. Osawa, C.P. Moeller and Y. Yoshimura: “Modification of the Magneto-Hydro-Dynamic Equilibrium by the Lower-Hybrid Wave Driven Fast Electrons on the TST-2 Spherical Tokamak,” 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
 - [15] H. Takahashi, K. Mukai, T. Kobayashi, S. Murakami, H. Nakano, K. Nagaoka, S. Ohdachi, M. Yoshinuma, K. Ida, R. Yanai, Y. Yoshimura, T.-I.

- Tsujimura, K. Tanaka, M. Nakata, H. Yamaguchi, R. Seki, M. Yokoyama, T. Oishi, Y. Kawamoto, M. Goto, T. Seki, K. Saito, H. Kasahara, S. Kamio, Y. Suzuki, R. Sakamoto, G. Motojima, M. Kobayashi, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba, K. Ogawa, M. Isobe, T. Tokuzawa, A. Ejiri, M. Osakabe, T. Morisaki, Y. Takeiri and the LHD experiment group: “Performance Integration of High Temperature Plasmas in the LHD deuterium operation,” 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
- [16] T. Onchi, H. Idei, M. Fukuyama, D. Ogata, T. Kariya, A. Ejiri, K. Matsuzaki, Y. Osawa, Y. Peng, R. Ashid, S. Kojima, K. Kuroda, M. Hasegawa, R. Ikezoe, T. Ido, K. Hanada, A. Higashijima, T. Nagata, S. Shimabukuro, I. Niiya, K. Nakamura, N. Bertelli, M. Ono, Y. Takase, A. Fukuyama, S. Murakami: “Plasma current ramp-up with 28 GHz second harmonic electron cyclotron wave in the QUEST spherical tokamak,” 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
- [17] G. Yatomi, A. Ejiri, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, I. Yamada, T. Hidano, Y. Shirasawa, R. Tsubata, Y. Takase, H. Yamazaki: “HXR measurement of the scrape off layer using a target plate in TST-2,” 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16–19, 2021.
- [18] O. Watanabe, Y. Ko, N. Tsujii, Y. Peng, G. Yatomi, I. Yamada, K. Iwasaki, Y. Shirasawa, T. Hidano, R. Tsubata, K. Shinohara, A. Ejiri, Y. Takase, C. P. Moeller, Y-K M Peng and ENN team: The first experiment of a finline antenna for lower hybrid wave current drive, 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16–19, 2021.
- [19] I. Yamada, N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko and G. Yatomi: “Finite element modeling of electron transport for electron cyclotron wave assisted tokamak start-up,” 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16–19, 2021.
- [20] H. Takahashi, M. Motojima, R. Seki, M. Kobayashi, T. Kobayashi, K. Mukai, K. Ida, M. Yoshinuma, H. Nakano, Y. Yoshimura, M. Goto, T. Oishi, Y. Kawamoto, T. Kawate, I. Yamada, H. Funaba, K. Ogawa, S. Murakami, A. Ejiri, M. Osakabe, T. Morisaki, Y. Takeiri: “Performance Integration and Optimization of High Temperature Plasmas in the LHD,” 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16–19, 2021.
- [21] A. Ejiri and TST-2 team: “Plasma current start-up by using the lower hybrid wave and its modeling on TST-2,” 10th Workshop on RF start-up and sustainment in ST, online, Feb 2–4, 2022.
- [22] Y. Ko, N. Tsujii, A. Ejiri, O. Watanabe, K. Shinohara, K. Iwasaki, Y. Peng, Y. Lin, I. Yamada, G. Yatomi, Y. Shirasawa, T. Hidano, Y. Tian: “Development of a capacitively coupled combline antenna for off-midplane launch of lower-hybrid waves in TST-2,” 10th Workshop on RF start-up and sustainment in ST, online, Feb 2–4, 2022.
- [23] N. Tsujii, Y. Ko, O. Watanabe, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, G. Yatomi and I. Yamada: “Lower-hybrid start-up experiments on TST-2,” Korea-Japan Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Online, Feb 21–22, 2022.
- 招待講演
- [24] A. Ejiri: “R & D for nuclear fusion reactors/High temperature plasma as a complex system,” A3F-CNS Summer School 2021, Online, August 16–20, 2021.
- (国内会議)
- 一般講演
- [25] 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邊理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彥廷, 弥富豪, 山田巖, 白澤唯汰, 飛田野太一, 津幡倫平, 吉村泰夫, 高瀬雄一: 「TST-2における低域混成波電流立ち上げ実験とモデリング」, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月 20–23 日.
- [26] 高竜太, 辻井直人, 江尻晶, 渡邊理, 篠原孝司, 岩崎光太郎, Peng Yi, 山田巖, 弥富豪, 白澤唯汰, 飛田野太一: 「2 系統低域混成波の相乗効果による電流駆動最適化」, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月 20–23 日.
- [27] 江尻晶, 平田真史, 市村真, 吉川正志, 池添竜也, 神尾修治: 「GAMMA 10/PDX プラズマ中の ICRF 波動研究のための高速可視発光計測システムの開発」, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月 20–23 日.
- [28] 辻井直人: 「LH 電流駆動シミュレーション」, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2021 年 11 月 22–25 日.
- [29] 江尻晶, 辻井直人, 弥富豪, 渡邊理, 篠原孝司, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彥廷, 山田巖, 白澤唯汰, 津幡倫平, 飛田野太一, 高瀬雄一, 吉村泰夫: 「TST-2における低域混成波実験」, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2021 年 11 月 22–25 日.
- [30] 白澤唯汰, 辻井直人, 江尻晶, 篠原孝司, 渡邊理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彥廷, 弥富豪, 山田巖, 津幡倫平, 飛田野太一: 「TST-2における偏光法を用いた内部磁場分布の計測」, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 2021 年 11 月 22–25 日.
- [31] 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邊理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彥廷, 弥富豪, 山田巖, 白澤唯汰, 飛田野太一, 津幡倫平, 田一鳴, 吉村泰夫, 高瀬雄一: 「TST-2における低域混成波電流立ち上げ実験とモデリング」, 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン, 2022 年 3 月 15–19 日.