



プロジェクトレビュー

核融合科学研究所双方向型共同研究 QUEST における 28 GHz 大電力ジャイロトロン管を用いた 電子サイクロトロン加熱電流駆動の連携研究

Bilateral Collaboration Research in National Institute for Fusion Science Collaborative Research on Electron Cyclotron Heating and Current Drive with 28 GHz High-Power Gyrotron in the QUEST Spherical Tokamak

出射 浩, 恩地拓己, 冨子秀樹, 花田和明, 佐藤浩之助, 假家 強¹⁾,
今井 剛¹⁾, 中嶋洋輔¹⁾, 坂本瑞樹¹⁾, 久保 伸²⁾, 辻村 亨²⁾

IDEI Hiroshi, ONCHI Takumi, ZUSHI Hideki, HANADA Kazuaki, SATO Kohnosuke, KARIYA Tsuyoshi¹⁾,
IMAI Tsuyoshi¹⁾, NAKASHIMA Yousuke¹⁾, SAKAMOTO Mizuki¹⁾, KUBO Shin²⁾ and TSUJIMURA Toru²⁾
九州大学応用力学研究所 高温プラズマ理工学研究センター, ¹⁾筑波大学プラズマ研究センター, ²⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2020年2月7日)

核融合科学研究所 (NIFS) 双方向型共同研究 (平成23年度~) で推進してきた, 九州大学, 筑波大学 (後に加えて NIFS) との連携共同研究の目的と進行状況について報告する. 本研究では, プラズマ境界力学実験装置 (QUEST 装置) の双方向型共同研究【連携】課題で, 28 GHz 高周波を用いた高電流・高密度プラズマの生成・維持, さらに比較的波長の長い 8.2 GHz 波の高周波を用いた電子バーンシュタイン波 (EBW) 加熱・電流駆動 (HCD) による生成・維持をめざしている. 28 GHz 波で, 10^{17} m^{-3} レベルの低密度プラズマであるが, 54 kA のプラズマを 0.9 s 保持し, さらに高電流となる 66 kA プラズマの非誘導立ち上げに成功した. さらに 8.2 GHz・28 GHz の複合周波数波加熱で, 8.2 GHz 遮断密度を超える 10^{18} m^{-3} レベルの 25 kA 高密度プラズマを 0.4 s 保持することに成功し, 高エネルギー電子成分を含む静電波の分散関係から EBW 加熱効果を考察した. 本プロジェクトは, 28 GHz 波の局所加熱による非誘導プラズマ立ち上げ, 定常維持をめざす, 第 2 ステージへと展開されており, その概要・初期結果も併せて紹介する.

1. はじめに

核融合科学研究所 (NIFS) 双方向型共同研究は, 5 つの大学・センターで, NIFS と相互的に, かつ, 他大学の研究者が参加する全国共同利用及び共同研究の枠組みである. 本研究は, 共に双方向型共同研究に供する装置を有するセンターである九州大学・高温プラズマ理工学研究センター (前, 高温プラズマ力学研究センター), 筑波大学プラズマ研究センター (後に加えて NIFS) とのセンター間連携の共同研究プロジェクトである.

九州大学高温プラズマ理工学研究センターでは, プラズマ境界力学実験装置 (QUEST 装置) [1] で高周波を用いた電流駆動, さらに高周波・非誘導立ち上げ・維持, 長時間放電プラズマで高温 (第一) 壁の温度 (環境) を含めた総合・能動制御によるプラズマ・壁相互作用の研究 [2] を, 九州大学双方向型共同研究のベース課題として推進している. プロジェクト開始当初, 高周波を用いた電流駆動に, 前 TRIAM-1M 装置で低域混成波電流駆動実験に用いていた (8 台のクライストロン管から成る) 8.2 GHz システムを活用することとした. QUEST 計画に先立って, 京都大

学 LATE 実験で, 遮断密度を超えるオーバードンスプラズマの非誘導プラズマ電流立ち上げに成功している [3]. 一方, 中型・球状トカマク装置である QUEST の電子バーンシュタイン波加熱・電流駆動 (EBWHCD) では, 共鳴層への近接性の劣化, 対プラズマ体積の入射電力密度の低減が懸念された. そこで, 先進高周波技術である位相配列アンテナによる入射ビーム集束・入射角制御が不可欠と判断し, 同アンテナを用いた定常運転システムの開発・構築に着手した [4, 5]. 低電力試験, QUEST 装置内での高電力試験を経て, 定常 200 kW 入射で, ビーム集束・制御が可能な位相配列アンテナが実装された. オーミック放電プラズマへの追加加熱で, 遮断密度を超えるプラズマで電流増大が観測され, EBWHCD 効果を確認したが, 生成された高密度プラズマを維持することができなかった [6]. オーミック放電プラズマに限らず, 8.2 GHz EBWHCD 実験のターゲットとなる高密度・高電流プラズマを如何に生成するかが議論され, 筑波大学で開発されていた大電力ミリ波発振管: 28 GHz ジャイロトロン管 [7] を用いた研究展開が検討された. 高周波数となる 28 GHz 波を用いて非誘導でプラズマ

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, FUKUOKA 816-8580, Japan

corresponding author's e-mail: idei@triam.kyushu-u.ac.jp

立ち上げ、EBWHCDで8.2 GHz波の遮断密度を超えるオーバーデンス・プラズマを維持することをめざし、本連携共同研究を開始することとした。

2. プロジェクトの目的

QUEST 装置は、球状トカマク装置であるという側面と、高温壁を用いた統合制御による定常運転をめざすトカマク装置との両側面を持つ。球状トカマク装置は、トカマク放電で必要となる中心ソレノイド (CS) コイルの設置スペース (センターポスト領域) が狭く、非誘導で、もしくは弱い誘導電場でプラズマを立ち上げることが重要である。電子サイクロトロン波は、プラズマと非接触な高周波ランチャーから波動励起 (入射) でき、定常トカマク運転に必要なプラズマ電流駆動が可能で、さらに非誘導プラズマ電流立ち上げができれば、炉設計に対するインパクトは大きい。QUEST 実験で、既に 8.2 GHz 波を用いて 25 kA 程度の非誘導プラズマ立ち上げに成功していたが[5]、QUEST 計画の目標の一つである、プラズマ電流 100 kA の非誘導立ち上げは達成されておらず、28 GHz 高周波による非誘導高電流プラズマ立ち上げ・維持への取り組みも、高温壁を用いた総合・能動制御による非誘導プラズマの定常維持とともに重要な課題である (目標は、当時、8.2 GHz EBWHCD を意識して設定されている)。

QUEST 装置 (大半径 0.64 m, 小半径 0.42 m) は、中心磁場が 0.25 T で、28 GHz 波は中心位置で第 4 高調波共鳴となる。但し、低アスペクト比の球状トカマク装置であるため、28 GHz の第 2 高調波電子サイクロトロン共鳴 ($2f_{ce}^{28}$) の 0.5 T が装置内に存在する。図 1 に QUEST 装置のポロイダル断面図 ($2f_{ce}^{28}$ 位置: R_{2nd}^{28} , 8.2 GHz 基本波・第 2 高調波共鳴 $f_{ce}^{8.2} \cdot 2f_{ce}^{8.2}$ 位置: $R_{1st}^{8.2} \cdot R_{2nd}^{8.2}$, アンテナ設置の赤道面ポート) を示す。

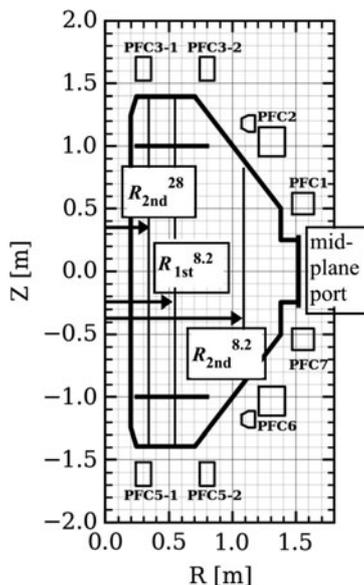


図 1 28 GHz 第 2 高調波共鳴位置 [R_{2nd}^{28}], 8.2 GHz 基本波・第 2 高調波共鳴位置 [$R_{1st}^{8.2}$, $R_{2nd}^{8.2}$] とアンテナ設置の赤道面ポートが示された QUEST 装置のポロイダル断面図[8]. Reproduced with Permission by IAEA, from H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion 60, 016030 (2020). Copyright 2020 IAEA.

高密度プラズマの生成といった観点で、対象となる閉じ込め磁場で高周波数となる 28 GHz を選択したが、センターポスト (主半径 $R=0.22$ m) 近くの off-axis 位置 ($R_{2nd}^{28}=0.32$ m) で第 2 高調波共鳴となり、果たしてトカマクプラズマを生成・維持できるか、即ちプラズマ電流駆動できるかが課題である。第 2 高調波共鳴の 110 GHz 波を用いた DIII-D 装置のプラズマ電流立ち上げ実験では、限られた領域でしか閉磁気面形成されなかった[9]。

8.2 GHz 非誘導プラズマ電流立ち上げで、効率良く高エネルギー電子が生成され、プラズマ電流に寄与している。28 GHz でも有効に (電流を担う) 高エネルギー電子を生成し、非誘導プラズマ電流立ち上げられるかを試みる。これまでの 8.2 GHz 波を用いた非誘導プラズマ電流立ち上げで検討・実施されてきたシナリオ・手法を用い、プロジェクトを推進する。8.2 GHz より高周波数である 28 GHz 波を有効に用いてトカマクプラズマを非誘導で立ち上げ、8.2 GHz 波の遮断密度を超えるオーバーデンスプラズマを維持することを目的とする。ジャイロトロン管を用いたシステム構築が必要となるが、その有効性の確認のため、最もシンプルなシステムを設計・検討した。

3. プロジェクトの基本構想[12]

九州大学応用力学研究所は、炉心理工学研究センター、高温プラズマ物理学研究センター、高温プラズマ理工学研究センターと、長時間トカマク放電の実現とそれに関わるプラズマ・壁相互作用の研究を推進してきた。炉心理工学研究センター・超伝導強磁場トカマク TRIAM-1M 装置で、国際熱核融合実験炉 ITER 同様の強い閉じ込め磁場で電子サイクロトロン加熱・電流駆動することを念頭に、170 GHz 電子サイクロトロン加熱・電流駆動 (ECHCD) システムが構築された。当時、ITER の Upper Launcher として検討されていた Remote Steering Antenna で動作入射角度の拡張に成功し、基本波 X モード斜め入射による電子サイクロトロン電流駆動実験を行った[10]。

用いられたダイオード・ジャイロトロン管運転に、高圧カソード電源 (75 kV・25 A) システムが整備されていたが、筑波大学で開発していたジャイロトロン管にアノード電極があり、アノード電源システムが必要となった。制御性を欠くものの安定度に優れた一般的な高圧電源と、高速スイッチングを可能とする多段 MOSFET スイッチを併用し、アノード電源 (50 kV・80 mA) を構築した。ジャイロトロン管は通常、80 kV のカソード電圧で運転されていたため、九州大学で 70–75 kV のカソード電圧で運転できるか、筑波大学で動作確認された[11]。

伝送系は、図 2 に示すように 1 つの 90 度マイターバンドと 63.5 mm 径円形コルゲート (CC) 導波管によるシンプルなシステムとした[12]。トロイダル磁場に平行方向電場の 28 GHz 波が、サファイヤシングルディスク窓、電気絶縁部を介し、 $R=1.5$ m 位置のコルゲート導波管アンテナから入射される。コンパクトなジャイロトロンタンク、さらにジャイロトロンマグネット、マイターバンド取り付けのアーksen など必要な周辺機器を整備した。アーksen

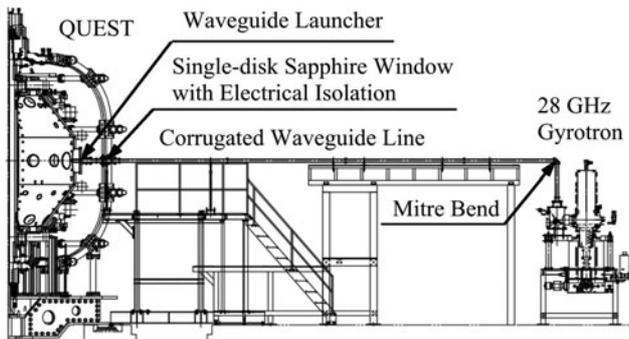


図2 28 GHz 電子サイクロトロン加熱システム[12]. Reproduced with Permission by IAEA, from H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion 57, 126045 (2017). Copyright 2017 IAEA.

サは、NIFS で用いられているシステムを改良し、整備した。

導波管開口アンテナからの入射で伝搬波が広がってしまうことに加え、磁場に平行電場の O モード入射のため、第 2 高調波共鳴で有効な一回通過吸収は見込めないが、真空容器壁での多重反射で mode scrambling された X モード波吸収が期待される。入射 O モード波の吸収は、高エネルギー電子に対して、基本波アップシフト共鳴領域が、強いドップラー効果でセンターポスト位置より低磁場側に広がった場合に期待できる[12]。

8.2 GHz 波を用いた非誘導プラズマ電流立ち上げで、磁場に平行方向速度 v_{\parallel} の (+/-) 方向での電子閉じ込めの非対称性が議論されてきた。プラズマ立ち上げ時、垂直磁場で上下に繋がった磁力線で荷電分離を解消するように流れる電子の速度成分と、電子ドリフト速度成分が相殺され、 v_{\parallel} 方向によっては粒子閉じ込めが改善される[13]。粒子閉じ込めの v_{\parallel} 方向の非対称性で、生成・維持される高エネルギー電子成分も +/- v_{\parallel} 方向で非対称となれば、多重反射で符号の異なる磁場に平行方向屈折率 (N_{\parallel}) を併せて考える場合でも、ドップラーシフト効果で v_{\parallel} 方向で選択的な共鳴加熱が起き、電流駆動効果が見込まれる[12]。より高いエネルギーの電子がプラズマ中心付近で生成されれば、第 3・第 4 高調波共鳴加熱による電流駆動効果も期待される。

まず、プラズマ電流を一定制御したオーミック放電プラズマに 28 GHz 波で追加加熱することで、有効な加熱・電流駆動効果があるかを検証する。28 GHz 波による非誘導プラズマ立ち上げでは、平衡に必要な垂直磁場を一定にかけ、電流立ち上げ・維持を試みる。併せて垂直磁場をランブアップした際、より高電流のプラズマを非誘導で立ち上げられるか検証する。8.2 GHz 波を用いない、28 GHz 波のみによる単独・非誘導プラズマ電流立ち上げも視野に入れ、28 GHz 波で有効に高電流プラズマが生成・維持できるか検証する。

さらに、高周波数となる 28 GHz 波を用いた非誘導立ち上げプラズマに 8.2 GHz 波で追加加熱し、もしくは 8.2 GHz・28 GHz の複合周波数波で同時加熱し、高エネルギー電子生成・電流立ち上げと共にバルク電子加熱を実現し、非誘導で 8.2 GHz 波の遮断密度を超える高密度・高電流プラズマを立ち上げ・維持できるかを検証する。

4. 計画の進捗状況・成果

4.1 28 GHz 電子サイクロトロン波の加熱電流駆動・プラズマ電流立ち上げ[12]

i) off-axis 第 2 高調波・加熱電流駆動効果

センターポストから 0.1 m: off-axis 位置の第 2 高調波共鳴で有効な加熱電流駆動できるか、実験・検証した。図 3 に CS コイル電流でプラズマ電流を一定に制御したオーミック放電プラズマに 220 kW・28 GHz 波で追加加熱した際の CS コイル電流、プラズマ電流、周回電圧の時間変化を示す。低いトロイダル磁場 (B_t) で 28 kA オーミックプラズマを立ち上げ、CS コイル以外による垂直磁場 (B_v) は一定である。プラズマ電流を一定とする CS コイル電流制御のもと、28 GHz 加熱・電流駆動効果を相殺するために逆周回電圧が必要となり、CS コイル電流が Recharging する、明確な 28 GHz 波による加熱・電流駆動効果が観測された。逆電圧にも関わらず、プラズマ電流は徐々に上昇していく。

ii) 28 GHz 入射による高プラズマ電流の非誘導立ち上げとその維持

図 4 に 270 kW・28 GHz 波による非誘導プラズマ電流立ち上げ時の実験パラメータの時間変化を示す。5 kW の 8.2 GHz 波が予備プラズマ生成に用いられている。プラズマ電流の立ち上がりによる逆周回電圧に抗って、一定の垂直磁場でプラズマ電流が立ち上がっていく。 10^{17} m^{-3} レベルの低密度プラズマであるが、54 kA のプラズマを 0.9 s 保持した 8.2 GHz 入射を用いない単独 28 GHz 波による非誘導プラズマ立ち上げでも 40 kA レベルのプラズマ電流を達成した[12]。トカマク平衡 EFIT コード[14]で解析された平衡

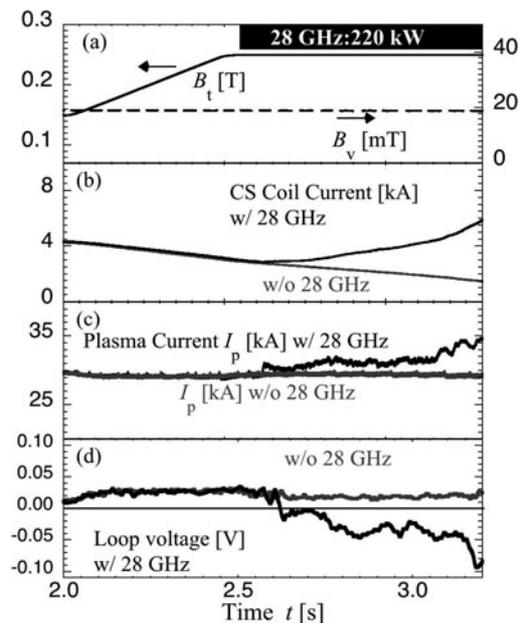


図3 CS コイル電流制御でプラズマ電流を一定とするオーミック放電プラズマへの 28 GHz:220 kW 入射実験時の (a) トロイダル磁場 (B_t), 垂直磁場 (B_v), 入射時 (w/)・非入射時 (w/o): (b) CS コイル電流, (c) プラズマ電流 (I_p), (d) 周回電圧の時間変化[12]. Reproduced with Permission by IAEA, from H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion 57, 126045 (2017). Copyright 2017 IAEA.

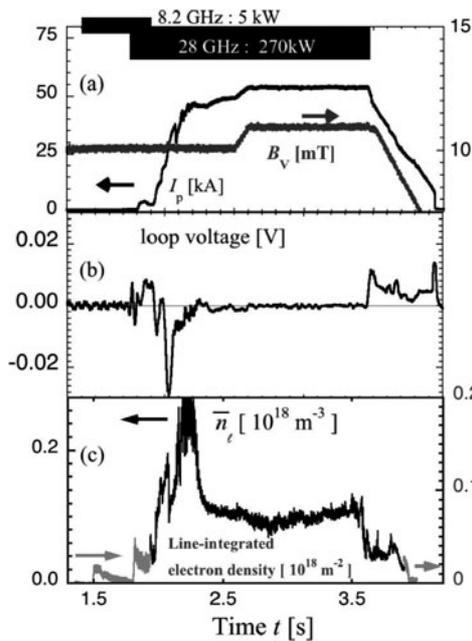


図4 28 GHz:270 kW 入射による非誘導プラズマ電流立ち上げ時の(a)垂直磁場(B_v), プラズマ電流(I_p), (b)周回電圧, (c)線平均密度(\bar{n}_e)の時間変化[12]. Reproduced with Permission by IAEA, from H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion 57, 126045 (2017). Copyright 2017 IAEA.

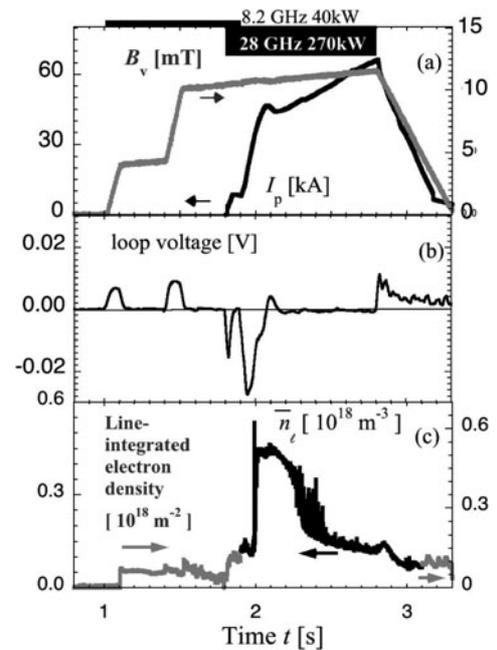


図6 28 GHz:270 kW 入射で垂直磁場(B_v)ランプアップした際の(a) B_v , プラズマ電流(I_p), (b)周回電圧, (c)線平均密度(\bar{n}_e)の時間変化[12]. Reproduced with Permission by IAEA, from H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion 57, 126045 (2017). Copyright 2017 IAEA.

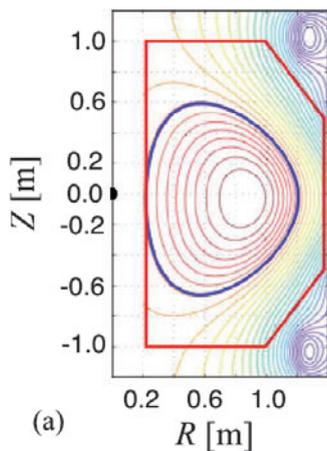


図5 28 GHz 非誘導立ち上げプラズマ (54 kA) のトカマク平衡 EFIT コードで解析された平衡磁気面[12].

磁気面を図5に示す。 $R = 1.2$ m まで広がったポロイダル断面プラズマが評価されているが、平衡解析で評価される中心プラズマ(電子)圧力は 300 Pa 程度で、バルク電子圧力では説明できず、大きな高エネルギー電子圧力の存在が示唆された。硬 X 線計測でプラズマ電流に寄与する 50 keV 程度の高エネルギー電子成分を観測している。平衡解析で評価された圧力は、電流を担う(バルク電子密度の数%程度)の高エネルギー電子で説明される。さらに非誘導でプラズマ電流立ち上げ後、垂直磁場をゆっくりランプアップし、低密度ではあるが 66 kA プラズマの非誘導立ち上げにも成功した(図6)[12].

4.2 8.2 GHz・28 GHz 複合周波数波を用いた高密度プラズマ立ち上げとその維持[8]

28 GHz波で電流立ち上げた30 kAのターゲットプラズ

マに、一定の垂直磁場のもと、8.2 GHz波による追加熱実験を行った。 $f_{ce}^{8.2}$ 位置は $R_{1st}^{8.2} = 0.55$ m プラズマ中心近くに位置し、 $2f_{ce}^{8.2}$ 位置は $R_{2nd}^{8.2} = 1.1$ m で28 GHzターゲットプラズマの外側境界より内側に位置する(図1)。8.2 GHz追加熱効果による電子圧力上昇に伴うシャフラノフシフトの増大でプラズマ平衡・形状が変化し、プラズマ電流が減少し始めた。プラズマ電流が減少すれば、一定に印加されていた垂直磁場は最早、強すぎてしまい、プラズマは内側に押されて閉磁気面領域が削られる。プラズマ電流がさらに減少し、さらにプラズマ半径・電流が減少していく。プラズマ半径が0.45 mから0.25 m、プラズマ電流は30 kAから10 kAまで減少し、漸く平衡が保たれた[8].

増加するシャフラノフシフトへの対応、さらにプラズマ外側最外殻位置を $R_{2nd}^{8.2}$ 位置より内側に押すために、8.2 GHz波の追加熱時に垂直磁場を上げた。垂直磁場の上昇で、プラズマ半径が僅かに減少したが磁気軸位置は変化せず、平衡は保たれた。その際、垂直磁場上昇で有意な周回電圧が生じたが、その後、プラズマ半径0.3 mの40 kAプラズマを非誘導で安定に0.4 s保持した。安定な平衡配位のもと、密度が上昇していったが、線平均密度で僅かに8.2 GHz波の遮断密度を超えることはなかった[15].

28 GHz波で生成・維持されたターゲットプラズマへ8.2 GHz波で追加熱せず、同時複合周波数波加熱で非誘導プラズマ電流立ち上げ・維持する実験を試みた[8]. 同時入射で平衡が保たれた25 kAプラズマに比較的強いガス供給をしたところ、線平均密度が8.2 GHz波の遮断密度に達した。その後、遮断密度を維持できずに密度減少したが、さらに減少を続ける、もしくは密度減少が止まり自発的に上昇に転じて、8.2 GHz遮断密度を超えるといった分岐現

象が観測された[8]。高密度プラズマ立ち上げ・維持をめざし、複数回ガス供給して密度を上昇させる同時複合波加熱実験を行った。ガス供給タイミングは供給ガスタンクの差圧計信号で確認した。H α ライン強度信号は、ガス供給時に応じて上昇するが、密度は必ずしも応答せずに、異なる二度のタイミング ($t_{SDJ,1,2}$) で自発的に密度上昇し、8.2 GHz 波の遮断密度を超えて 0.4 s 保持された (図 7)。図 8 にトムソン散乱計測で観測された電子温度、密度、圧力分布を示す。2 回目の SDJ 時 ($t_{SDJ,2}$) 以前 ($t=1.85$ s) に、既にプラズマ中心付近の密度は遮断密度を超えている。2

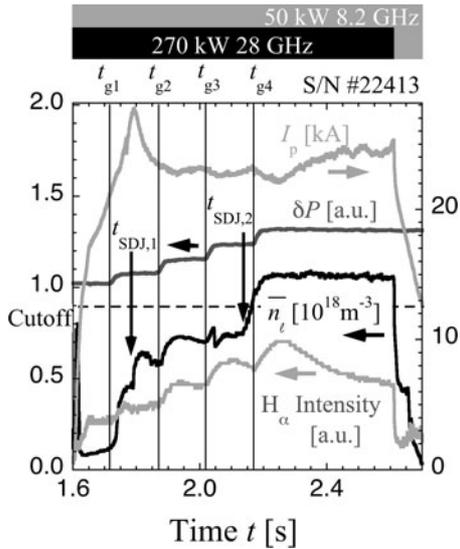


図 7 複合周波数入射実験時のプラズマ電流 (I_p)、供給ガスタンクの差圧計信号 (δP)、線平均密度 (\bar{n}_l)、H α 強度の時間変化 [8]. Reproduced with Permission by IAEA, from H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion 60, 016030 (2020). Copyright 2020 IAEA.

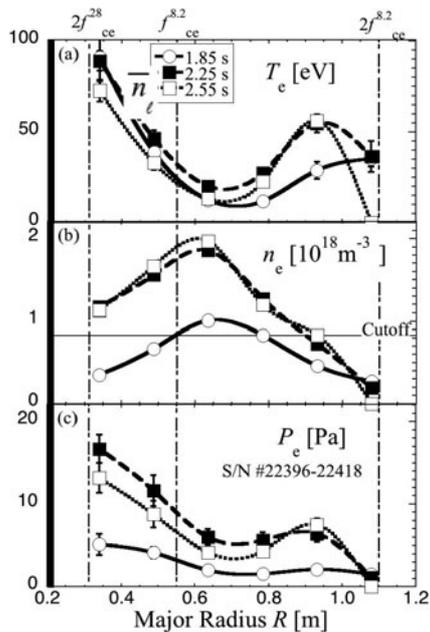


図 8 複合周波数入射実験時のトムソン散乱計測で観測された電子温度 (T_e)、密度 (n_e)、圧力 (P_e) 分布の時間変化 [8]. Reproduced with Permission by IAEA, from H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion 60, 016030 (2020). Copyright 2020 IAEA.

度目の SDJ で広域的な密度上昇が起き、コア部で大きく遮断密度を超えて電子圧力が上昇し、遮断密度に到達する $R=0.93$ m で電子温度、圧力が共に上昇した。また、 $t_{SDJ,2}$ 以後に、遮断密度を超えるコア部で、0.4 keV 以上の軟 X 線に感度がある AXUV 信号が 3 倍程度に増加し、バルク電子、及び軟 X 線計測で感度がある高エネルギー電子成分への加熱効果が確認された [8]。用いた 8.2 GHz システムのクライストロン管は TRIAM-1M 実験を含め 25 年以上運転した経年劣化のため、順次、運転不能となり、複数のアンテナ素子による位相配列アンテナを用いたビーム集束・制御ができなかった。観測された加熱効果は、ビーム集束・制御に基づく光線追跡解析でなく、高エネルギー電子成分を含む静電波の分散関係を用いた波動励起・吸収解析で評価した。解析から 0.5~1.0 keV 程度の高エネルギー電子が EBW 加熱され、さらにその緩和過程でバルク電子が加熱されると考察した [8]。また、大きく遮断密度を超えたコア部で観測された、500 keV 程度の高エネルギー電子の維持について、28 GHz 波の相対論的ドップラー共鳴の速度ピッチ解析で、有効な高次高調波、複合高調波共鳴のシナジー・アップシフト加熱・電流駆動効果を考察した [8]。

5. 第 2 ステージへ

28 GHz 波加熱の有効性を確認するため、システム構成は最もシンプルなものとしたが、当初のプロジェクトの目的をほぼ達成し、28 GHz 波を用いた非誘導立ち上げで 54 kA プラズマを 0.9 s 維持し、8.2 GHz 波との同時複合周波数加熱で 8.2 GHz 波の遮断密度を超える 25 kA プラズマを 0.4 s 維持することに成功した。但し、QUEST 計画では、密度 $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度で 100 kA のプラズマ立ち上げ・維持し、さらに高温壁を用いた統合能動制御による定常運転、関連するプラズマ・壁相互作用研究を推進することが目標であり、さらなる研究展開が必要である。それまでの実験では、28 GHz、8.2 GHz 入射ともにビーム集束・制御されていないため、光線追跡などの局所加熱解析に基づく実験シナリオを検討できず、その効果も実験・検証されていない。連携研究の第 2 ステージとして、28 GHz 波の局所加熱による非誘導プラズマ立ち上げ、さらにその定常維持をめざす。

5.1 局所電子サイクロトロン加熱シナリオ

これまでの多重反射による加熱シナリオでは、符号の異なる $N_{||}$ も併せて考える必要があり、プラズマ立ち上げ時の電子閉じ込めの $v_{||}$ 方向の非対称性によって $v_{||}$ 方向で選択的に起こる共鳴加熱で電流駆動効果を考えて。ビーム集束・制御した際には、入射 $N_{||}$ を限定することができ、さらに有効に $v_{||}$ 方向で選択的な電子加熱が起き、効率良く高エネルギー電子生成・プラズマ電流駆動できると期待される。

局所加熱を実現するには、入射偏波面制御、ビーム集束・制御が重要である。入射偏波面制御は、加熱に適切なモード励起する上で、ビーム集束は共鳴加熱の実空間領域を制御する上で、入射 $N_{||}$ は共鳴加熱の主に速度空間領域を制御する上で重要である。共鳴電子の空間・速度領域は、相対論的ドップラー共鳴条件から評価される。共鳴条

件は、磁場に平行方向速度 (v_{\parallel}) と垂直方向速度 (v_{\perp}) の $[v_{\parallel}, v_{\perp}]$ 速度空間で、楕円として表される[12, 16]. 但し、楕円中心は、ドップラーシフト効果で v_{\parallel} 方向にシフトする. 検討する共鳴電子の等エネルギー条件は、速度空間で円として表される. この共鳴楕円と等エネルギー円の交点 (v_{\parallel}, v_{\perp}) が、検討するエネルギーで相対論的ドップラー共鳴の条件を満たす.

低アスペクト比の球状トカマク装置では、広いプラズマ領域のため、多数の高調波共鳴が存在し得る. 電子のエネルギーが比較的高ければ、第3・第4高調波共鳴のXモード加熱も有効となる. N_{\parallel} は主にトロイダル方向屈折率 N_{θ} で、 N_{\parallel} は広いプラズマ領域で大きく変化する ($RN_{\parallel} = \text{一定}$). $R=1.0\text{ m}$ 位置で $N_{\parallel}=0.2, 0.3$ であっても、低磁場側からの伝搬で $2f_{ce}^{28}$ の R_{2nd}^{28} 位置で各々、0.6, 0.9程度となり、比較的大きな値へと発展する. N_{\parallel} の発展を考慮し、相対論的ドップラー共鳴条件を満たす共鳴電子の速度ピッチ $[v_{\parallel}/v_{\perp}]$ を各々の R 位置で評価した (図9). ここで電子のエネルギーを 50 keV とし、 R_{2nd}^{28} 位置で $N_{\parallel}=0.75$ とした. ドップラーシフト効果がない $v_{\parallel}=0$ で n 次高調波共鳴条件を満たす R 位置は、相対論効果で nf_{ce}^{28} の R_{n-th}^{28} 位置から高磁場側にシフトし、さらにドップラーシフト効果で低磁場、高磁場側に共鳴領域が広がる.

図9に示されるように $v_{\parallel}=0$ での共鳴位置から低磁場・高磁場側で、各々 $+v_{\parallel}$, $-v_{\parallel}$ 成分で共鳴条件を満たすアップシフト共鳴、ダウンシフト共鳴が存在する. 低磁場側からの伝搬波がアップシフト共鳴で完全に吸収されれば、 v_{\parallel} 符号で選択的な (ここでは $+v_{\parallel}$ 方向の) 電子のみが加熱され、強い電流駆動効果が現れる. これまでの TRIAM-1M 実験解析[10]で用いられた TASK/WR コード[17]に加え、GENRAY コード[18], RT-4 コード[19]を用いてベンチマーク評価しつつ、一回通過吸収率を検討している. 波動吸収を評価する上で、 50 keV といった高エネルギー電子の相対論効果を如何に扱うかが課題となるが、高エネルギー電子密度を 10^{17} m^{-3} 程度としても、一回通過吸収率は20-30%程度で、この場合、電流駆動効果はアップ・ダウン

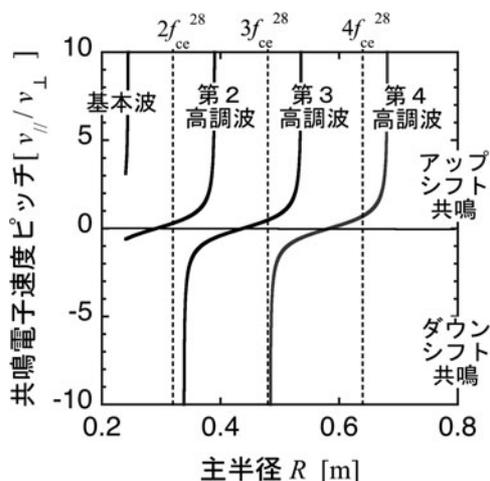


図9 n 次高調波相対論的ドップラー共鳴条件を満たす共鳴電子の速度ピッチ $[v_{\parallel}/v_{\perp}]$ の主半径方向分布.

シフト共鳴加熱の差し引きで現れる. 図に示されるように、第4高調波ダウンシフト共鳴領域が、第3高調波アップシフト共鳴領域と、第3高調波ダウンシフト共鳴領域が、第2高調波アップシフト共鳴領域と重なる. 重複領域では、低次アップシフト共鳴の加熱効果が大きく、広い領域でアップシフト共鳴の有効な電流駆動効果が見込める. 伝搬につれて $R=0.24\text{ m}$ で接線入射 ($N_{\parallel}=1$) となり、より高磁場 (ダウンシフト共鳴) 側に伝搬できない. 吸収が強い第2高調波共鳴で、高エネルギー電子の $v_{\parallel}=0$ での共鳴位置は相対論効果で高磁場側 ($R=0.29\text{ m}$) にシフトし、低磁場側からの斜め伝搬で、ダウンシフト共鳴領域の一部がセンターポスト領域と重なる、もしくは入射波が接線入射となって高磁場 (ダウンシフト共鳴) 側に到達できず、有効なアップシフト共鳴加熱による電流駆動が見込まれる. 適切に斜め入射角・ N_{\parallel} 制御すれば、高エネルギー電子加熱に有効な高次高調波を含め、電流駆動効果が高いアップシフト共鳴加熱の広範な領域が見込めることが明らかとなった.

斜め入射では、高エネルギー電子の相対論的ドップラーシフト効果で、高次高調波を含めた広範な領域で共鳴加熱が起きるが、垂直入射では、相対論的ドップラー効果による高エネルギー電子による吸収が軽減され、有効なバルク電子による吸収[16]が期待される. バルク電子温度が上昇すれば、さらに吸収率が上がりその加熱効果が現れるといった正帰還が起こる. $2 \times 10^{18}\text{ m}^{-3}$, 500 eV までバルク電子パラメータが上昇すれば、垂直入射時の第2高調波共鳴でのバルク電子による一回通過吸収率は数%に達する. 入射角・ N_{\parallel} によって共鳴加熱の速度ピッチ、さらに (高エネルギー電子・バルク電子といった) 速度領域の制御が可能であり、実験・検証することとした.

5.2 局所電子サイクロトロン共鳴加熱の実空間・速度空間制御

定常・局所加熱を指向し、大型準光学集束ミラーを用いた 28 GHz ランチャーシステムを開発・実装し、さらに定常ジャイロトロン管を開発・実装する. 筑波大学の定常ジャイロトロン管開発に加え、九州大学がランチャーシステムを、NIFSが局所加熱に必要な入射偏波面制御用偏波器[20]を連携して開発することとした.

R_{2nd}^{28} 位置は、センターポスト位置から 0.1 m しか離れておらず、斜め入射で局所加熱効果を実験検証するためには、 0.05 m 程度のビーム径で入射することが望ましい. ランチャー設置位置は、 R_{2nd}^{28} 位置から 1.3 m ほど離れており (図1), 比較的遠い位置に小径ビームへ集束させる必要がある. CC 導波管 HE_{11} モードの放射ビームを1枚目ミラーで拡げ、拡げたビームを2枚目の大型ミラーで遠方の R_{2nd}^{28} 位置に小径ビームへと集束するランチャーシステムを検討・設計した. この際、開発したキルヒホッフ積分コード[21]で HE_{11} モードからビーム径が大きく変化する準光学伝送を扱い、(汎用ガウスビームと異なる) 任意ビームを扱えるミラー面設計コードを併せて開発し、2つのミラー面を決定した[22]. フルフェーズ解析コードを用い、設計した2つのミラーのランチャーシステムで、CC 導波

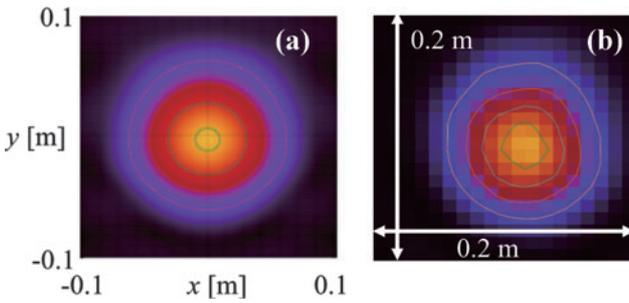


図10 開発されたランチャーシステムで第2高調波共鳴位置に集束されるビームの(a)フルウェーブ解析、(b)低電力試験で評価された強度分布[22].

管からの HE_{11} 放射ビームが、 R_{2nd}^{28} 位置で0.05 m径のガウスビームに集束されるかを確認した。また、低電力試験でも同様に、設計通りのビーム集束を確認した。図10に R_{2nd}^{28} 位置でフルウェーブ解析、低電力試験された集束ビームの強度分布を示す。

局所加熱で重要となる入射偏波面制御性は、偏波器の単独動作、さらに実伝送路での偏波面変化[23]を、ビーム入射角制御性は、整備したミラー駆動機構を用いた垂直入射から接線入射までの動作[22]を、低電力試験・評価し確認した。

実際に伝送系に偏波器・ランチャーシステムを実装すると、偏波器でアーキングが発生し、当初、入射偏波面を正しく制御することができなかったが、230 kWの斜め入射(R_{2nd}^{28} 位置で $N_{\parallel} = 0.75$)で、 R_{2nd}^{28} 位置近傍で斜め入射時の遮断密度に近く、4.1章：第1ステージ実験より1桁大きい密度($\sim 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$)を達成し、より高い80 kAレベルの非誘導プラズマ電流立ち上げに成功した[22]。その後、偏波器の改良を重ねてアーキングを回避し、入射偏波面を制御できるようになった。入射偏波面制御のもと、より低い(150 kW)電力の同様な斜め入射で80 kAレベルの非誘導プラズマ電流立ち上げ、さらにCSコイル電流ランプアップによる0.5 V程度の周回電圧を用いた(オーミック)追加熱で100 kAの高プラズマ電流立ち上げに成功した。斜め入射時の一回通過吸収率は、バルク電子密度の数%程度の高エネルギー電子密度(10^{17} m^{-3} 程度)で、20–30%程度と評価される。有効な高エネルギー電子への一回通過吸収で、より低い入射電力で高プラズマ電流を立ち上げ、さらに比較的弱い誘導電場による追加熱で100 kA電流立ち上げを達成した。

さらに有効なバルク電子への局所加熱をめざし、入射 N_{\parallel} を変えて共鳴加熱の速度空間領域を制御する実験を行った。同じ条件で準垂直入射(R_{2nd}^{28} 位置で $N_{\parallel} = 0.11$)すると、プラズマ電流は40 kA程度とほぼ半減するが、 R_{2nd}^{28} 位置近傍で200 eV程度までバルク電子温度が上昇した。但し、同じ垂直磁場でプラズマ電流が小さいため、プラズマサイズが小さくなる。さらに同じく準垂直入射で、0.05 V程度の極僅かな周回電圧が発生する垂直磁場ランプアップのもと、30 kA程度のプラズマを立ち上げると、 R_{2nd}^{28} 位置近傍で $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、500 eVを達成した。さらに僅かな0.1 V程度の周回電圧の(オーミック)追加熱で、830 eV

までにバルク電子温度が上昇した。準垂直入射による有効なバルク電子への局所加熱で、高電子温度プラズマの立ち上げに成功した。入射 N_{\parallel} による共鳴電子の速度空間領域制御で、効率良く高エネルギー電子を生成し、高プラズマ電流を立ち上げられること、さらに有効にバルク電子加熱し、高電子温度プラズマを得られることを明らかにした。今後、放電中の入射 N_{\parallel} 制御、さらに異なる入射 N_{\parallel} を有する(同一・複合周波数)複数ビームを用いた実験などで、高エネルギー電子生成による高電流プラズマ立ち上げと、有効なバルク電子加熱が両立するよう、実験シナリオを組み立て、研究展開していきたい。

定常ジャイロトロン管の開発も、筑波大学プラズマ研究センターで順調に年次を迫って進められ、令和2年度に最終アセンブルする。九州大学では、定常運転に向け、冷媒(純水)で直接冷却するCC導波管を開発し、500 kW・2 s程度の入射電力が評価可能なダミーロードを整備した。新たな定常ジャイロトロン管(短パルス： $>1 \text{ MW}$ 、定常： 400 kW)は、エネルギー回収型であるため、九州大学でその運転に対応する高圧電源の整備を進める。いよいよ、本格的な高電流・高密度プラズマ、高温プラズマの定常維持に向けたチャレンジが始まる。

謝辞

本プロジェクトは核融合科学研究所・双方向型共同研究として推進されており、これまでの円滑なプロジェクト推進のために、核融合科学研究所双方向型共同研究委員会、九州大学QUEST実験推進会議などで、常にご支援いただいています。すべての関係者各位に感謝いたします。QUEST実験は、九州大学・高温センター会議の外部コーディネーターである東京大学・高瀬雄一博士、外部委員である京都大学・福山淳博士、村上定義博士から、有益な実験計画立案・遂行、実験解析へ助言、議論をいただいで推進されており、ここに感謝いたします。

プロジェクト遂行につき、九州大学・黒田賢剛博士、長谷川真博士、池添竜也博士、永島芳彦博士、藤澤彰英博士、井戸毅博士、中村一男博士、東京大学・渡辺理博士、核融合科学研究所・松岡啓介博士、九州大学・技術室島袋瞬氏、永田貴大氏、東島亜紀氏、中島寿年氏、川崎昌二氏、テクニカルスタッフ河野香氏、山下雅典氏、石村吉雄氏、馬場賢哉氏に感謝します。

双方向型共同研究課題で、電子温度・分布の時間変化を観測するトムソン散乱計測で東京大学・江尻晶博士グループ、分光計測で京都大学・四竈泰一博士グループ、硬X線計測で核融合科学研究所・磯部光孝博士グループが研究展開しており、本プロジェクトの研究成果は、それらの双方向型共同研究課題で得られた実験データ・成果のもとに結実しています。ここに感謝いたします。また、ミリ波干渉計システム構築につき、筑波大学プラズマ研究センター・吉川正志博士、光線追跡解析、加熱電流駆動検討につき、京都大学・福山淳博士、プリンストンプラズマ物理研究所・小野雅之博士、Nicola Bertelli博士、EFITによる平衡解析につき中国科学技術院プラズマ物理研究所・

Jinping Qian 博士に感謝いたします。

本プロジェクト研究は九州大学総合理工学府先端エネルギー理工学専攻の教育にも供されています。小島信一郎氏, 福山雅治氏, 柚木美羽氏, 芦田竜一氏, 尾形大地氏, 加藤凌哉氏, 工藤倫大氏を始めとする多くの学生の方々の研究活動を通じた貢献に感謝します。

高圧カソード電源 (75 kV・25 A) の 28 GHz ジャイロトロン管運転への対応, アノード電源整備につき日新パルス電子・吉近友宏氏, 福井大学・斉藤輝雄博士, 電源周辺整備につき日本タングステン・(故)山口徳夫氏, 電源・伝送系設置, 大型準光学鏡ランチャー・偏波器・ダミロード開発につき北野製作所・伊藤俊之氏, 伊藤貴志氏に感謝いたします。また, 集束ビームのフルウェーブ解析につき古河 C&B・坂口政嗣博士, ジャイロトロン管製作につきキャノン電子管デバイス・満仲義加氏, 江口濯氏に感謝いたします。本プロジェクトは一部, 科研費 (JP15H04231) の支援を受けています。

参考文献

- [1] K. Hanada, K.N. Sato *et al.*, Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference (2008) FT/P3-25.
- [2] K. Hanada *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 126061 (2017).
- [3] T. Maekawa *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 1439 (2005).
- [4] H. Idei *et al.*, IEEJ Trans. Fundam. Mater. **53**, 511 (2012).
- [5] H. Idei *et al.*, Proc. 19th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas 473 (2011).
- [6] H. Idei *et al.*, Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conference (2012) EX/P6-17.
- [7] T. Kariya *et al.*, Nucl. Fusion **5**, 093009 (2015).
- [8] H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion **60**, 016030 (2020).
- [9] G.L. Jackson *et al.*, Nucl. Fusion **51**, 083015 (2011).
- [10] H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion **46**, 489 (2006).
- [11] H. Idei *et al.*, J. Plasma Fusion Res. Series **8**, 1104 (2009).
- [12] H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 126045 (2017).
- [13] M. Ishiguro *et al.*, Phys. Plasmas **19**, 062508 (2012).
- [14] L.L. Lao *et al.* Nucl. Fusion **25**, 1421 (1985).
- [15] H. Idei *et al.*, Proc. 25th IAEA Fusion Energy Conference (2014) EX/P1-38.
- [16] V. Erckmann and U. Gasparino, Plasma Phys. Control Fusion **36**, 1869 (1994).
- [17] A. Fukuyama, Fusion Eng. Des. **146**, 1149 (2011).
- [18] A.P. Smirnov and R. W. Harvey, Bull. Am. Phys. Soc. **40**, 1837 (1995).
- [19] M. Ono, N. Bertelli *et al.*, Proc. 23rd Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (2020).
- [20] T.I. Tsujimura *et al.*, Fusion Eng. Des. **114**, 97 (2017).
- [21] H. Idei *et al.*, J. Infrared Millim. Terahertz Waves **36**, 662 (2015).
- [22] H. Idei *et al.*, Fusion Eng. Des. **146**, Part A 1149 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.027>
- [23] M. Fukuyama *et al.*, Fusion Eng. Des. **146**, Part B 1437 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.099>