

核融合炉を展望したLHDにおける定常運転の進展と  
IEAにおける定常運転の国際連携協力

**Progress of Steady State Operation in LHD Prospecting for Fusion Reactor, and  
Activities of Steady State Operations Coordinating Group in IEA**

武藤敬、笠原寛史、吉村泰夫、久保伸、LHD定常実験グループ

T. Mutoh, H. Kasahara, Y. Yoshimura, S. Kubo, and Steady State Operation Group in LHD

核融合科学研究所

National Institute for Fusion Science

安定した核融合プラズマを展望するためには、高温プラズマの閉じ込めに関わる集団現象の理解、プラズマを維持し続けるための熱・粒子バランス制御、核融合状態を自在に制御する定常加熱等の機器開発が重要である。磁場閉じ込め装置において高温プラズマの保持には成功しているが、核融合炉を精度良く設計するに十分な高性能プラズマの定常実証は行われていない。将来の発電炉では安定な核融合炉設計が必要であり、高性能定常プラズマの実証、メンテナンスを考えた熱負荷・炉壁材料選定および評価、自在なプラズマ制御の実現に関する重要性が増している。

大型ヘリカル装置(LHD)では、超伝導コイルによりヘリカルプラズマを安定に定常維持できる特性を生かし、高性能定常プラズマ研究を推進し、1.2MWの加熱電力を用いてイオン温度と電子温度が等しく、電子密度が $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のヘリウムプラズマを約48時間安定維持することに成功した。この実現のためには、少数イオン加熱のためのICHアンテナ開発、実時間多入力多出力制御、電子サイクロトロン加熱のためジャイロトロンと伝送路開発、定常運転手法の改善と高度な制御法の開発等が重要な役割を担っている。ダイバータへの熱負荷研究では、磁気軸を時間的にスイープさせることにより局所的な熱負荷を低減出来てはいるが、継続的な高い熱負荷が引き起こす堆積層成長やその堆積層剥離が重要な課題であることが分かってきた。この現象は短い大電力高性能プラズマの繰り返しでは顕著には表れず、繰り返し定常放電を行うことで堆積層が引き起こすプラズマの制御性劣化である。このプラズマの制御性劣化は、プラズマに自律的に生じる揺動や粒子供給性能の欠如、不純物のコア部での蓄積等で引き起こされるものではなく、プラズマ

放電の履歴を持ち、放電中に成長する堆積層の剥離が引き起こす頻度の高い不純物混入現象である。LHDではプラズマ中心部にECHを瞬時に短時間追加加熱することで、ある程度の頻度で起きる不純物混入は対処可能であった。図1にICHとECHの加熱入力2 MWにおけるヘリウム定常放電の制御例を示す。プログラムされた密度変化に沿って凡その密度制御は行われてお

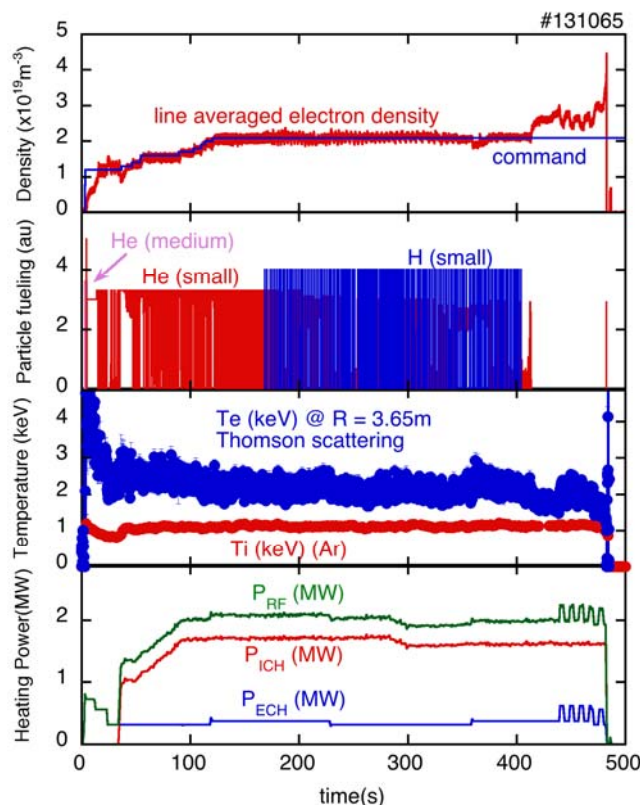


図1 LHDにおける定常プラズマ制御の例  
上から、プログラムされた密度変化（青線）と実際の電子密度、ヘリウムガスパフと水素ガスパフの制御電圧、トムソン散乱によるコア部の電子温度とアルゴン線によるイオン温度、加熱のICHとECHパワーの時間変化を示す。

り、ヘリウムと水素の2種のガスパフはICHの2種イオン混成共鳴加熱モードのためにプラズマ中のイオン比を制御するため用いられているが、加熱入力と壁のリサイクリング状況に応じてガス供給量は自動制御されている。このプラズマは400秒以降は壁のリサイクリングの変化によりガス供給が不要となったが、その後増加した密度に対してECHの加熱入力を増やして密度のポンプアウトを試みているのが加熱パワーの変化に現れている。

密度上昇フェーズのガスパフ制御の詳細が図2に示されている。コマンド指令された密度変化に対して多数イオンのヘリウムが断続的に供給されている。ガスパフパイプのコンダクタンスを含めた粒子供給時定数は0.2秒であり、それらの時間遅れに対応して指令値とプラズマ密度の時間差が現れる。加熱入力はプラズマ密度指令に沿って変化させているが、加熱入力の変化にも対応して粒子供給は制御する必要があり、そのため電力増加に伴って粒子供給量も増加している。ECHパワーは一部のジャイロトロンを交互に運転しており、切り替えるタイ

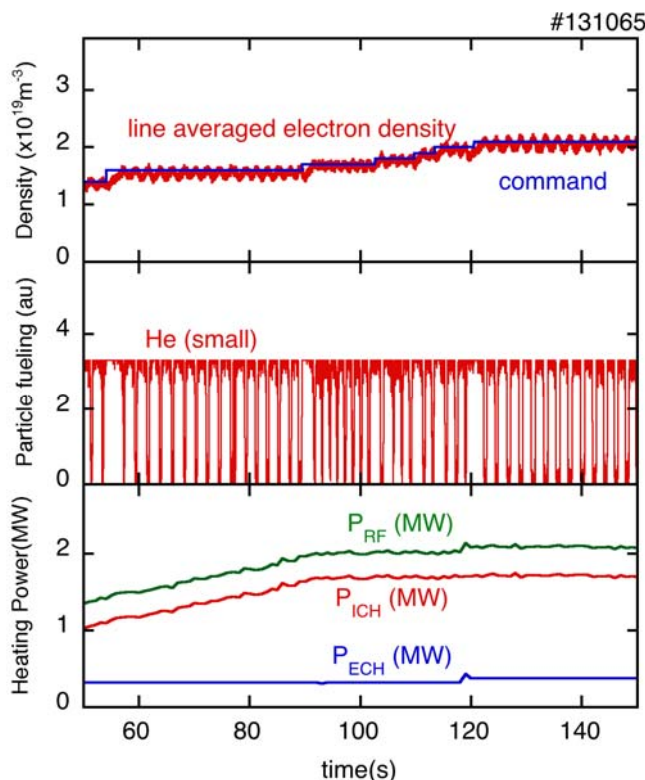


図2 図1の100秒付近の拡大図によりガス供給と密度変化の詳細を示す。プログラムされた密度に応じてガス供給量が自動制御されている。指令値と到達密度値の時間変化は1-2秒程度である。

ミングでスパイク状の変化が見られると同時にこのタイミングでは過剰の粒子供給がなされている。ICHパワーは徐々に増加させているが密度増加による結合度の増加、プラズマの磁気軸をスイングすることによるアンテナとプラズマ境界の距離の変化の影響でプラズマへの吸収パワーに揺らぎが見られている。

このプラズマでは見られていないが、不純物フレークの混入による突発的な密度上昇にはパルス運転モードのジャイロトロンを自動運転させてプラズマの密度を下げて放射崩壊を防ぐシーケンスも働いており、単発的な不純物混入には対応が出来る。

このように多くの要素をFPGAを用いた実時間feedback制御を行なうことに依り、LHDでは安定した定常運転が可能になった。現在は2MWレベルでは安定した定常運転が可能になっているが、今後は3MWレベルでの安定した定常運転が目標になる。プラズマ不純物フレークはカーボンダイバータとその付近のステンレス壁に出来たカーボンとメタルの複層堆積層が局所的な温度上昇による熱収縮差のために剥がれたものと考えられているが、ダイバータ板の形状を改良することと、運転モードを修正することで改善が見込まれている。

LHDの定常運転ではタングステンを用いたプラズマ暴露試験も重点的に行われており、核融合炉で問題になるヘリウム吸蔵による金属の改質の試験も注目されている。

安定した高性能定常プラズマを実証するためには、大規模な予算および人材を用いた開発と実験的経験が必要となるが、IEAの定常運転調整グループ (IEA-SSOCG、武藤が共同議長)を通して各々の装置特性にあった定常制御・計測・加熱器機に関する情報を共有する国際連携協力が始まっている。JETではITERと同様の容器壁条件における計測器機のダメージおよびプラズマ制御、WESTではタングステンを用いた高性能プラズマ維持研究、LHDおよびW-7Xでは炭素ダイバータを用いたプラズマ維持を研究する計画がある。国際協力により定常運転に関する実験研究を効率的に進めることが出来る。

本講演ではLHDで行ってきた高性能定常放電実現のために必要な加熱器機開発・プラズマ制御・ダイバータ熱負荷研究、IEA-SSOCGで現在進めている定常運転に関する国際協力の現状について報告する。