

22Da01

ダイバータ排気を用いた最近のLHD定常プラズマ研究で得られた 新たな物理的知見と工学的成果

New physical findings and engineering results from recent LHD steady-state plasma experiments using divertor pumping

本島 巖、増崎 貴、森崎 友宏、村瀬 尊則、土伏 悌之、
小林 政弘、渡邊 清政、居田 克巳

G. Motojima, S. Masuzaki, T. Morisaki, T. Murase, Y. Tsuchibushi et al.

核融合科学研究所

National Institute for Fusion Science

これまで長時間定常プラズマを達成するために、様々な粒子制御ノブが試されている。その重要な制御ノブの一つにダイバータによる粒子排気がある。ダイバータ領域では、閉塞化することにより中性粒子圧力を圧縮することができ、効率良く粒子排気を可能にする。例えば、大型ヘリカル装置(LHD)では、ダイバータ排気の開発を長年行ってきた。これまで、トロイダル内側セクションを閉塞化するとともに、ヘリカルダイバータにクライオ吸着型ポンプおよび非蒸発型ポンプを導入し、低リサイクリング状態を達成している(図1)[1]。また、ECH40秒長時間放電においてもダイバータ排気を適用し、粒子制御に改善が見られる結果が得られている[2]。ダイバータ排気がない場合、プラズマ電子密度($n_e \sim 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)がガスパフ燃料のみによるフィードバックでは制御できず、放電途中で放射崩壊に至った一方、ダイバータ排気がある場合、ガスパフにより安定した電子密度を維持することが可能となった(図2)。また、熱

輸送解析の結果、ダイバータ排気は周辺プラズマの熱伝導率に影響を与えないものの、電子内部輸送障壁の生成によりプラズマコアの熱伝導率を下げていることがわかった。このことは、ダイバータ排気によりリサイクリングの低下によりプラズマ周辺部の中性粒子の密度が減少、その結果プラズマコア部の熱輸送が低下したことを示している。プラズマコア部の輸送が周辺部のパラメ

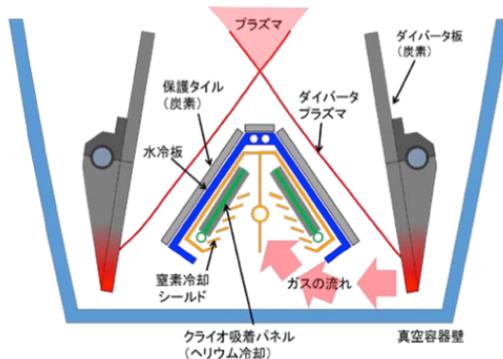


図1 高性能化された閉構造ダイバータ断面図。

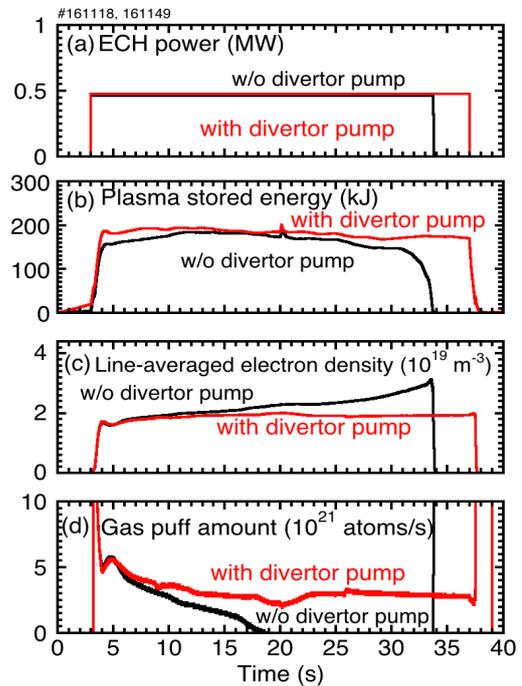


図2 ダイバータ排気有無におけるLHDのECH40秒放電例。(a)ECHパワー、(b)蓄積エネルギー、(c)線平均電子密度、(d)ガスパフ量。赤がダイバータ排気有、黒がダイバータ排気無。

ータの影響を強く受けるという、プラズマコア・周辺の相互作用現象として物理的に興味深い結果である。

さらに、ダイバータ排気として用いられている活性炭を用いたクライオ吸着型の真空ポンプの技術的開発についても特筆すべき成果を挙げている。一つは、インジウムを用いた無機接手法の確立である[3]。これまで、ヒートシンクと活性炭の接着には有機接着が用いられてきており、メンテナンス期におけるアウトガスによって真空容器を汚染してしまう懸念があった。そこで、本研究ではインジウムによる無機接手法を確立し、アウトガス放出がないクライオポンプがLHDに供されており、重水素実験の中性子環境下でも排気性能は維持されている。また、プラズマ焼結による活性炭の成形手法の確立も行ってきた[4]。この手法により、排気性能の高い細孔制御された活性炭を自由に選択することが可能となった。通常活性炭はヤシガラなどの原材料に対して炭化処理をして賦活したり、原料に賦活剤を混合させて炭化・賦活処理をして製造される。最近では、活性炭に高機能性を持たせるために、炭素源にアルカリ土類金属化合物でできた鋳型を混合し、炭化させた後、鋳型を溶出させることで、多孔質構造体を作り出す製法が工業的に確立されている[5]。例えば、CNovel™ [6]や Triporus™ [7]といったものが挙げられる。このような鋳型を用いて活性炭を製造する場合の最大の利点は、細孔径分布を

人為的に制御することが可能な点である。これにより、高分散、耐酸化性・耐熱性、長寿命・不変性などの機能と細孔制御を組み合わせることができ、新機能材料として魅力ある活性炭を生み出すことが可能である。燃料電池の触媒などに用途展開されている事例が報告されている[8]。こうした細孔制御された活性炭をクライオポンプの活性炭として展開することも十分に可能だと考えられる。核融合科学研究所ではCNovel™をクライオ吸着ポンプの活性炭として用いるべくR&Dを行っている。図3に市販品の活性炭とCNovel™を成形したものを、20 K以下まで冷却し、排気速度試験を行った結果を示す。CNovel™の方が市販品の活性炭よりも排気速度が高く維持されていることがわかる。CNovel™の細孔径分布を調べたところ、メソ孔ーマクロ孔の細孔量は市販品の活性炭を凌駕するものであることがわかり、高い排気速度が得られたものと推測できる。このことは、CNovel™のような細孔制御された活性炭がクライオ吸着ポンプの活性炭として使用できる可能性を示唆するものである。

このように、本招待講演では、これまでのダイバータ排気研究のプラズマ物理実験の結果、さらには技術的優位性を持つクライオポンプ開発について講演を行う。

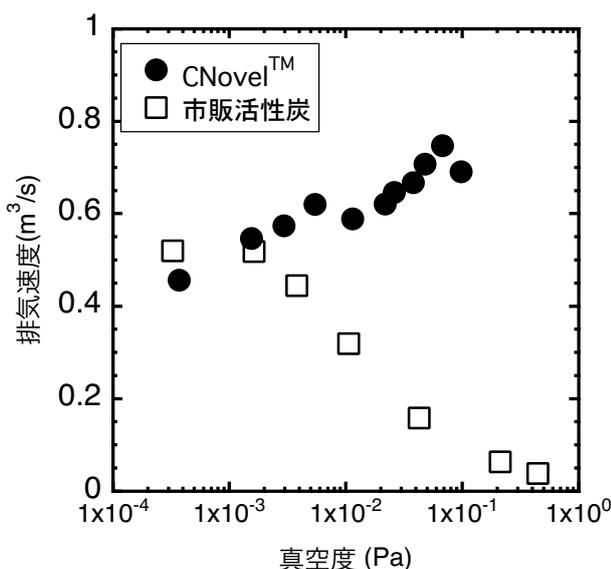


図3 CNovel™活性炭と市販活性炭の排気速度試験結果。

- [1] G. Motojima et al., Nuclear Fusion 59 (2019), 086022.
- [2] G. Motojima et al., Physica Scripta 97 (2022), 035601.
- [3] 特許 6021276、“クライオ吸着パネル及びその製造方法、並びにそれを用いた真空装置”、村瀬尊則、本島巖、田中宏彦、森崎友宏、三田正弘
- [4] 特許 7016080、“活性炭を含有する焼結体及びその製造方法”、村瀬尊則、本島巖、森崎友宏、小樋 誠二、高橋 雄太、北垣 慎二
- [5] 森下隆広、TANSO、2017 278 103.
- [6] <https://www.toyotanso.co.jp/Products/cnovel/>
- [7] <https://www.sony.com/ja/SonyInfo/triporous/>
- [8] 2020 年炭素材料学会 1 月セミナー 講演要旨集