

# LHD閉構造ダイバータにおける真空容器内蔵型クライオ吸着ポンプの開発 Development of in-vessel cryo-sorption pump for LHD closed helical divertor

村瀬尊則<sup>1</sup>, 本島巖<sup>1,2</sup>, 田中宏彦<sup>3</sup>, 森崎友宏<sup>1,2</sup>  
MURASE Takanori<sup>1</sup>, MOTOJIMA Gen<sup>1,2</sup>, TANAKA Hirohiko<sup>3</sup>, MORISAKI Tomohiro<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>核融合研, <sup>2</sup>総研大, <sup>3</sup>名大院工  
<sup>1</sup>NIFS, <sup>2</sup>SOKENDAI, <sup>3</sup>Grad. Sch. Eng., Nagoya Univ.

大型ヘリカル装置 (LHD) 閉構造ダイバータのバップル内に圧縮された中性粒子を排気するための装置として、真空容器内蔵型クライオ吸着ポンプを開発した。真空容器を汚損しない無機接着法を新たに開発することに加え、クライオポンプに最適な活性炭の選定、および高い輻射熱環境下においても熱的に堅牢な構造設計を実現することで、閉構造ダイバータ1セクションあたり約15~20 m<sup>3</sup>/sの排気速度を達成した。

LHDは、外部コイルのみで磁気面を形成できることから、高性能プラズマの定常保持が可能である。しかし、放電時間が長くなると、リサイクリング粒子の増加に伴って密度上昇が生じ、放電を妨害することが観測されている。定常放電における密度の制御性を向上させるには、粒子供給量と同等の排気を可能にする真空排気装置の整備が必須である。

トラスプラズマ実験装置における、これまでの真空容器内蔵型クライオポンプは、DIII-DやEASTに見られるように、液体He (~4 K) を用いるクライオ凝縮ポンプが主流であった。しかし、クライオ凝縮ポンプはHe液化機を必要とし、システムが巨大かつ高コストとなる。一方、活性炭を用いるクライオ吸着ポンプは液化機を必要とせず、凝縮型と比べて、より高温 (~20 K) での運用が可能という利点がある。しかしながら、従来のクライオ吸着パネルは、活性炭の冷却基盤への貼付けに有機接着剤を使用しており、経年劣化や真空容器汚損の問題から超高真空の容器内に直接設置することは避けられてきた。本研究では、有機ガス放出の無いインジウムによる無機接着法を開発した[1, 2]。特に、活性炭表面に3層の金属層 (Ti, Ni, Ag) をスパッタ成膜する手法を用いて、課題であったインジウムの活性炭に対する濡れ性を改善した。実運用を想定した耐ヒートサイクル性を検証するため、冷熱衝撃試験 (約-190°Cの液体窒素による冷却と約80°Cのヒートガンによる加熱を10分毎に計10回実施) を行い、十分な強度の接着層が形成されていることを確認した。

また、クライオ吸着ポンプにおいて、活性炭の特性は排気性能に直結するため、その選定は特に重要である。一般に、活性炭の吸着性能は、主に比表面積 (m<sup>2</sup>/g) と平均細孔径 (nm) で評価される。これに加えて、本研究では吸着の場であるナノ細孔、および活性炭内で分子の運搬経路として働く、数十ナノ~マイクロスケールの細孔に着目した。上記の指標を比較評価することで、よりクライオ吸着ポンプに適した、賦活度の高い活性炭を選定した。さらにテストスタンドで活性炭の排気能力を評価し、高排気性能を示した活性炭

(Shirasagi GH2X4/6) を採用した。

クライオ吸着ポンプは、図1に示すように、炭素材で保護された水冷シールドとルーバー型の液体窒素 (LN<sub>2</sub>) シールド、およびガスヘリウム (GHe) 冷却されたクライオ吸着パネルで構成されている。また、ダイバータ受熱板からの高い輻射熱を受けてもポンプとして正常に機能する必要がある。水素の吸着熱、構造材からの伝導熱、プラズマからの輻射熱等、熱負荷に対する熱的健全性を、有限要素解析により評価した。

図2に、LHD真空容器内に設置したクライオ吸着ポンプの排気速度を示す。1台 (トロイダル1セクション) あたり約15~20 m<sup>3</sup>/sを示した。これは当初目標の約1.5~2倍の排気性能である。また排気容量は約13,640 Pam<sup>3</sup>であり、LHDにおける高密度実験において使用する、約1週間分の粒子数に相当し、十分な排気容量を有することが示された。

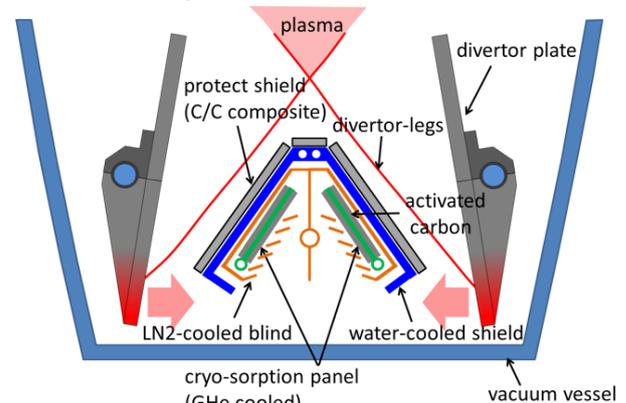


図1. クライオ吸着ポンプの模式図

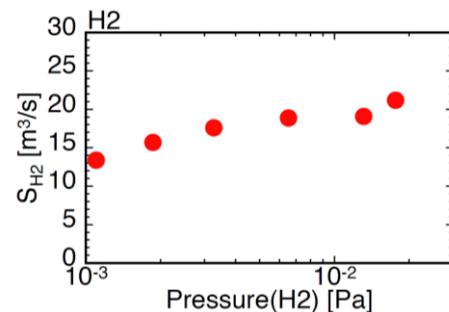


図2. 水素の排気速度

[1] 村瀬尊則, 本島巖, 田中宏彦, 森崎友宏, 三田正弘: 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。特許第 6021276 号, 2016.

[2] T. Murase et al., Plasma Fusion Res. **11** (2016) 1205030.