

高性能ダイバータクライオポンプの開発 ～効率良く粒子を排気する～

本島 徹

大型ヘリカル装置 (LHD) では、不純物やプラズマになりそびれた燃料の水素ガスを炉心プラズマから離れたところに効率よく一まとめにするため、真空容器内にダイバータと呼ばれる構造を導入しています。このダイバータは LHD 特有の形をしており、ヘリカルコイルと同様に螺旋状をしています。2010 年より、ダイバータは、より多くの水素ガスを集めるために“閉構造化”と呼ばれる改造を行っており、改造前に比べて 10 倍以上の水素ガスを集めることに成功しています（詳細は、NIFS ニュース 2010/194 号の「研究最前線」をご覧ください）。しかし、一まとめにした水素粒子は、そのままではいずれ周りに散ってしまい、一部はプラズマに戻っていきます（粒子リサイクリングといいます）。粒子リサイクリングが低い状態にすることによりプラズマの性能が向上したり、プラズマの密度が制御しやすくなったりすることが分かっており、低い粒子リサイクリング状態にするためには、ダイバータで一まとめにした水素は真空ポンプで排気する必要があります。落ち葉をほうきでかき集めても、そのままでは風が吹けば飛び散ってしまいます。しっかりちりとりで集めて袋に詰める必要があることと同じです。この袋と同じ役割を担うために、ダイバータ内にガス吸着型のクライオポンプ（以下、クライオポンプと呼びます）を設置することにしました（図 1）。ダイバータクライオポンプは、活性炭が接着された吸着パネルと、吸着パネルを冷却するための冷却装置によって構成され、活性炭がマイナス 253 度以下に冷却されると、水素ガスを吸着するようになる性質を利用した真空ポンプです。活性炭とは、内部に小さな孔（細孔）がたくさんある黒炭で、ご家庭でも脱臭剤としてよく使われています。

核融合科学研究所では、高性能なダイバータク

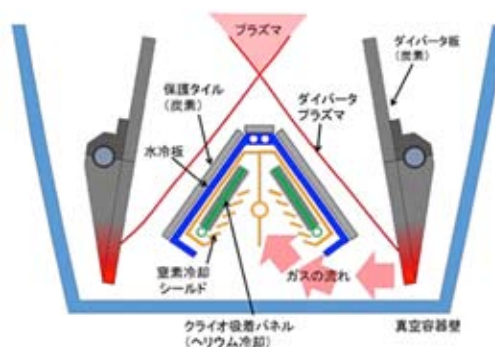


図1 高性能化されたダイバータ。
ダイバータ内部にクライオポンプが実装されている。

ライオポンプの実現を目指し、2014 年から様々な種類の活性炭の排気特性を調べる開発試験を行い、非常に性能の良い活性炭を発見しました。この試験では、小さな真空容器を用いて、異なる活性炭を何度も冷却して試験をするという地道な作業が必要で、時には朝から晩まで根気よくデータを収集する必要がありました。図 2 に試験をしていた頃の写真を掲載しています。開発試験は、決して派手さ



図2 開発試験時の様子
(1 番左から、筆者、田中宏彦氏（現 名古屋大学）、村瀬尊則氏)

はないのですが、試験している活性炭が性能の良いものだと分かった時には、実験の面白さを改めて教えてくれるものでした。「千里の道も一歩から」という言葉がありますが、地道な開発試験を通して、活性炭の細孔分布（細孔の大きさとその容積の関係）が水素ガスを吸着する性能と強く関係することが分かり、今では、クライオポンプに適した細孔分布に制御された活性炭の開発を企業との共同研究で進めるほどになりました。近い将来、さらに性能の良い活性炭が生み出されるかもしれません。

さて、上記の開発試験に基づくダイバータクライオポンプ開発により、2017年にはLHDの真空容器内のダイバータ10セクションのうち5セクションに高性能ダイバータクライオポンプを実装することができました。そのうちの1セクションに導入されたダイバータを図3に示しています。第19サイ

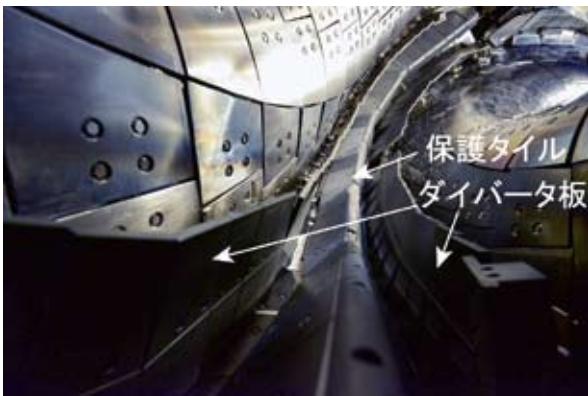


図3 真空容器内に設置されたダイバータの様子

クル実験が始まる前に、試験用の水素ガスをLHDの真空容器に導入してダイバータクライオポンプの排気性能を試験しました。その結果を表1に示しています。表では、第18サイクル実験時の排気性能も示しています。第18サイクル時に比べて、約7倍の排気速度が得られていることが分かりました（図4）。また、排気容量は約15倍向上していることが分かりました。ここで、排気速度（立方メートル/秒）は水素ガスの圧力（パスカル）を掛けることで1秒間あたりの粒子排気量を表し、排気容量（パスカル・立方メートル）は排気可能な全粒子量を表

	排気速度 (立方メートル/秒)	排気容量 (パスカル・立方メートル)
第18サイクル	~10	~3,300
第19サイクル	~70	~58,000

表1 ダイバータクライオポンプの排気性能試験結果

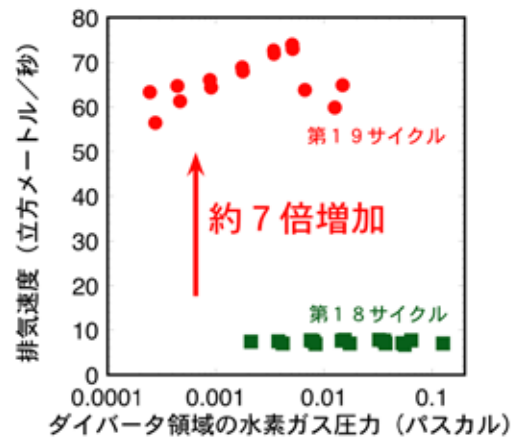


図4 ダイバータクライオポンプの排気速度試験結果

しています。今回得られた排気速度は、LHDの主真空排気装置に迫る値であるほか、ダイバータ部では効率的に水素ガスを集められている分、粒子を排気する量はダイバータクライオポンプの方が多くなります。また、排気容量は燃料供給用の固体水素ペレット20,000発分で、これはLHDの高密度実験1日で使用される水素供給量の約20日分に相当し、排気速度、排気容量ともにプラズマ実験に貢献できる値であることを確認しました。

現在第19サイクル実験中であり、これらの高性能化されたダイバータクライオポンプを用いたプラズマ実験を行い、その効果を確認しています。その初期結果として、ダイバータクライオポンプによりプラズマの密度が低く、また粒子供給停止後の密度の減少速度が速い、いわゆる「粒子リサイクリングの低い状態」が観測されました。これは、ダイバータクライオポンプの排気効果が表れていることを示しています。今後、閉じ込め性能に与える影響のほか、密度制御性について詳細に調べていく予定です。

(高密度プラズマ物理研究系 准教授)