

LHD 真空容器内蔵型クライオポンプの熱構造設計

○村瀬尊則^{A)}、本島巖^{B)}、田中宏彦^{C)}、森崎友宏^{B)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 ヘリカル研究部

^{C)}名古屋大学大学院 工学研究科

概要

LHD 真空容器に内蔵するクライオポンプの開発には、1000°Cを超える受熱板からの強い輻射熱環境と、吸着パネルの極低温環境（～20 K）を狭小空間内で両立しつつ、更に排気性能を最大化することが要求されるため、高度な熱構造設計が必須である。そこで、精緻な 3D-CAD モデルを作成し、有限要素法による熱輸送解析とクライオポンプの構造設計を組み合わせることで、多角的な要求を満足するクライオポンプを実現した。

1 はじめに

定常核融合炉に向けて能動的粒子制御手法の確立が課題となっている。大型ヘリカル装置（以下、LHD）では、外部コイルのみで磁気面を形成するその特長から、高性能プラズマの定常保持に関する研究が先行して進められている。しかし、放電時間が長くなると、壁からのリサイクリング粒子の増加に伴う密度上昇が生じ、放電が阻害されることが観測されている。長時間放電における粒子バランスを考えた場合、密度の制御性を向上させるためには、壁からのリサイクリングに影響されない粒子バランスが担保可能な真空ポンプの整備が必要である。特に、真空容器内で相対的に中性粒子密度が高くなるダイバータ板近傍に設置できれば、より効果的な排気効果が期待できる[1-3]。そのため、これまで LHD では、極低温（～20 K）に冷却した活性炭にガスを吸着させることにより高真空を作り出す、クライオ吸着ポンプの開発を進めてきた。

LHD のダイバータ部にクライオ吸着ポンプを直接設置するためには、LHD のダイバータ部は真空容器とプラズマに挟まれた“ねじれたバナナ”のように湾

曲した細長い空間であるため、ポンプの設置可能領域が著しく制限される[4-6]。さらにプラズマやダイバータ受熱板からの強い輻射熱に曝されるため、コンパクト、かつ高い熱遮蔽性能を有し、熱シールドや吸着パネルを許容温度以下に抑える熱構造設計が求められる。

本稿では、LHD の閉構造ダイバータ内に設置することを目的としたクライオ吸着ポンプについて、その熱構造設計ならびに実機における排気能力試験の結果を述べる。

2 LHD に実装するクライオ吸着ポンプの熱設計

LHD 閉構造ダイバータ用に設計したクライオ吸着ポンプの模式図を図 1 に示す。クライオ吸着ポンプは炭素繊維複合材で保護されたステンレス鋼製の水冷シールドと無酸素銅製のルーバー型の液体窒素（LN₂）シールド、および 10 K のガスヘリウム（GHe）により冷却された吸着パネルで構成されている。排気ポンプとしての役割から、熱シールドは、気体の通り道を十分確保した上で光や熱の侵入を効果的に防

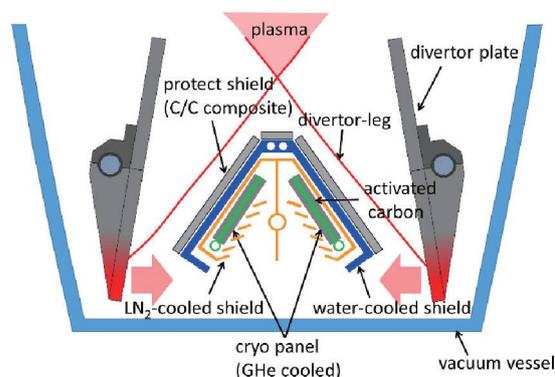


図 1. クライオ吸着ポンプの断面模式図。

ぎ、吸着パネルへの入熱を許容値以下まで低減させる必要がある。そのため水冷シールドは、LN₂シールドがダイバータ受熱板の高温部を見込まない構造とした。またルーバー型 LN₂シールドでは、吸着パネルが常温部を直接見込まないよう、ルーバーの傾斜角と個々の間隔を調整した。また水冷シールドの材質であるステンレス鋼 (SUS316) は 500 °C を超えると機械的強度が低下する。そのため多少裕度を持たせて許容温度を 450 °C とした。LN₂シールドの温度は、吸着パネルへの輻射熱量に関わるため、可能な限り低く抑えることが理想であるが、本設計では LN₂シールドの許容温度を 100 K とした。

また LHD におけるクライオ吸着ポンプは、ダイバータ受熱板やプラズマからの高い輻射熱にさらされる。万が一、吸着パネルに除熱能力以上の熱負荷が加わり、パネル温度が 20 K を超えると、活性炭に溜め込まれたガスが一気に放出し始め、排気ポンプとしての機能を喪失する。よって、吸着パネルの温度を 20 K 以内に抑えることが、最も重要な設計ポイントで

あり、そのためには、熱シールドの耐熱性・熱遮蔽性を高め許容温度を超えない構造とすること、さらに吸着パネルへの入熱 (放射熱・気体伝熱・固体伝熱) を抑制することが重要である。吸着パネルへの熱負荷が冷凍機の冷却性能を超えている場合には、ポンプ構造や冷凍機の増設等の見直し等を検討する必要がある。この設計条件をクリアする範囲内において、排気性能を高める構造設計が可能となる。構造設計におけるポイントは、ダイバータ部の狭小領域にも収まるコンパクトな設計で、さらにその領域の中で吸着 (排気) 面積を最大に、かつ排気コンダクタンスを大きくすること (ポンプの排気口や真空容器とのギャップを大きくする等) である。本章では熱シールドおよび吸着パネル温度を許容温度以下に抑えるための熱構造設計について述べる。

2.1 ダイバータ受熱板から熱シールドへの熱負荷

水冷シールドおよび LN₂シールドの耐熱性能・熱遮蔽性能は、プラズマおよびダイバータ受熱板との位置関係や熱シールドの材料および板厚、そして各熱シールド間のギャップで評価が大きく変わる。そのため実際の設計活動では、3D-CAD を用いた構造設計を進めつつ、ダイバータ受熱板-クライオ吸着ポンプ間の輻射熱を含めたシミュレーションを並行して行い、その結果を受け、さらに設計の改良をするという試行錯誤を繰り返して設計を進めた。以下に解析の一例について示す。

トロイダル非対称な LHD において、標準磁場配位で熱負荷の最も厳しくなる位置 (赤道面近傍) のクライオユニットおよびダイバータ受熱板を対象とした。図 2 に有限要素法による輻射伝熱解析モデルを示す。ダイバータ受熱板端部に、LHD の定常プラズマ実験に相当する定常熱流束 (2 MW/m²) を加えた。ダイバータ受熱板の冷却水配管部およびクライオポンプ上部の冷却水流路を 25 °C、液体窒素配管内壁を 80 K とした。ダイバータ受熱板の表面、水冷シールド、および LN₂シールド表面上の輻射面間に対して、ラジオシティ法 [7] を用いた面-面間の輻射設定を適用した。ダイバータ受熱板は等方性黒鉛、水冷シールドはステンレス鋼 (SUS316)、LN₂シールドは無酸素銅製であり、各材質の物性値 (熱伝導率、比熱、放射率)

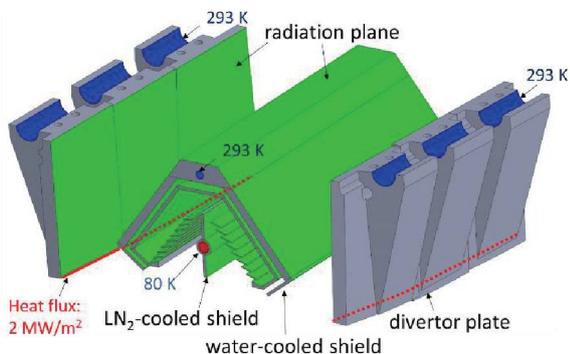


図 2. 有限要素解析モデル.

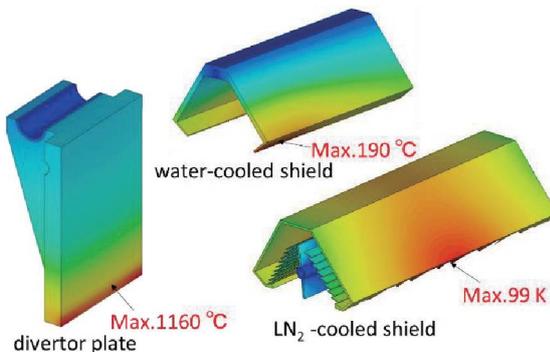


図 3. 各熱シールドの温度分布.

に応じて設定した。ただし、LN₂シールドの輻射率は、外部の光を吸着パネルへ導かないよう黒化処理が施されているため、0.9とした。図3に計算結果を示す。熱解析の結果を設計にフィードバックし設計を重ねた結果、ダイバータ受熱板表面における最大温度は1000℃を超えるものの、水冷シールドの最大温度は190℃程度に抑制することができ、またLN₂シールドの温度は最大でも100K以下に抑えることができた。

2.2 輻射による吸着パネルへの熱負荷

前項の設計検討では水シールドおよびLN₂シールドへの熱負荷を抑制する検討を行った。実際の設計ではLN₂シールドから吸着パネルならびにGHe配管への輻射熱を評価し、熱仕様を満たさなければ、さらにシールド温度を下げるための設計変更を行う。本項では吸着パネルへの輻射熱の評価方法について述べる。LN₂シールドから活性炭への輻射熱 q_c (W)は、ステファンボルツマン定数 σ 、輻射率 ε 、および吸着パネルの受熱面積 A (0.568 m²)を用いて以下の式で試算できる。

$$q_c = \sigma \times \varepsilon \times (T_{LN_2}^4 - T_p^4) \times A \quad (1)$$

T_{LN_2} 、 T_p はそれぞれLN₂シールドと吸着パネルの温度である。そして2.1項の結果を基に、LN₂シールドの温度 T_{LN_2} を100Kとし、また吸着パネルの温度 T_p を10Kとすると、(1)式を用いて2.63Wを得る。輻射率 ε は並行平面の輻射率の式

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{LN_2}}{\varepsilon_{LN_2} + (1 - \varepsilon_{LN_2}) \varepsilon_p} \quad (2)$$

より求める。吸着パネルの輻射率 ε_p は、吸着パネル上に活性炭が隙間なく敷き詰められていると仮定し、1とした。またLN₂シールドの輻射率 ε_{LN_2} は0.9とした。

ここでクライオ吸着ポンプは1基6ユニットで構成され、各ユニット間では、GHe配管はLN₂シールドからの輻射熱を受ける(図4)。この輻射熱の評価には(1)式と同様に下記の式を用いる。

$$q_c = \sigma \times \varepsilon \times (T_{LN_2}^4 - T_{GHe}^4) \times A_{GHe} \quad (3)$$

ここで輻射率 ε は同軸円筒の輻射率の式

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{GHe} \varepsilon_{LN_2}}{\varepsilon_{LN_2} + \frac{A_{LN_2}}{A_{GHe}} (1 - \varepsilon_{LN_2}) \varepsilon_{GHe}} \quad (4)$$

を用いる。また A_{LN_2} 、 A_{GHe} はそれぞれLN₂シールド

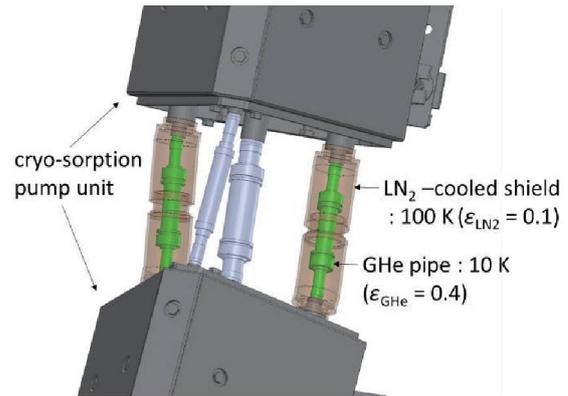


図4. クライオ吸着ポンプユニット間を繋ぐGHe配管 ($T_{GHe}=100$ K, $\varepsilon_{GHe} = 0.4$) およびGHe配管を覆う円筒形のLN₂シールド ($T_{LN_2}=100$ K, $\varepsilon_{LN_2} = 0.1$)。

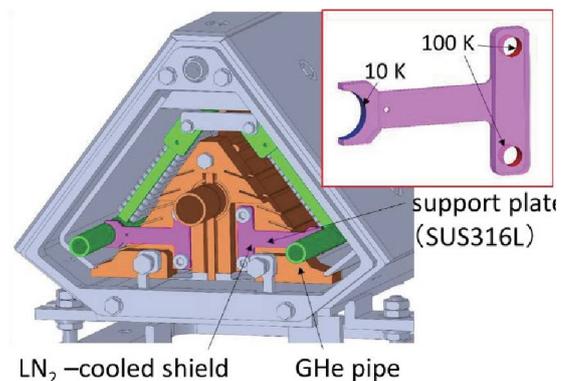


図5. GHe配管支持体構造および有限要素解析における境界温度設定。

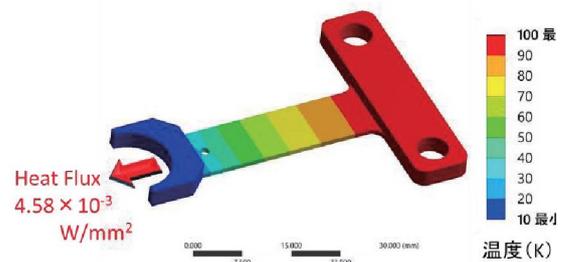


図6. GHe配管支持体の温度分布。

およびGHe配管の表面積 (0.235 m², 0.0772 m²) である。ユニット間のGHe配管はSUS316製、LN₂シールドは銅製であるため、それぞれ $\varepsilon_{GHe}=0.4$ 、 $\varepsilon_{LN_2}=0.1$ として計算すると、(1)式より輻射熱 q_c は、 6.82×10^{-3} Wと求まる。これは、(1)式から求めたユニット本体における輻射熱と比べて無視できるほど小さい。

2.3 支持体からの伝導による吸着パネルへの熱負荷

吸着パネルは、LN₂シールドに設置した断熱支持体により固定される。そのため吸着パネルは断熱支持体から熱伝導による熱負荷を受ける。通常、断熱支持体の設計では熱パスを出来るだけ細く、長くする設計が採用されるが、本クライオ吸着ポンプでは、もともと設置できるポンプ断面が小さく、断熱に効果的な長さの熱パスを確保できない。さらに熱パスを無理に長くすると、自重で歪み、周りの熱シールドと干渉する恐れもあることから、伝熱解析を通して、シンプルなT型構造の支持体を採用した(図5)。支持体はステンレス鋼(SUS316)製でLN₂シールドにボルトで固定される。クライオ吸着ポンプ1基あたり24個の支持体を用いる。最終的な支持体の設計については、吸着パネル全体の熱負荷および製作性を勘案して決定する。

ここでは支持体1個あたりの伝導熱を、有限要素法により計算した例について述べる。LN₂シールドとの接触部(ボルト固定部)を100 Kとし、GHe配管との接触部を10 Kに設定した。実際には完全接触ではないため、接触熱抵抗を考慮する必要があるが、多少過大な境界条件とした。伝熱解析による温度分布の結果を図6に示す。GHe配管との接触部を通る熱流束は、 $4.58 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2$ となる。GHe配管との接触面積は 57.5 mm^2 であることから支持体1個あたりの伝熱量は 0.26 W となり、よって1基あたりの支持体から入る熱負荷は、 6.24 W となる。

2.4 ガス吸着による吸着パネルへの熱負荷

ガス吸着による熱負荷は、排気するガスの仕様によって決定するため、構造設計による大きな制御は出来ないものの、吸着パネル全体の熱負荷を議論する上で欠かせない評価項目である。活性炭が水素を吸着する際に発生する吸着熱 q_{g1} (W)は、比熱 C_p (W/(Pa·L/s)/K)、吸着熱 λ (W/(Pa·L/s))、クライオポンプの排気速度 S (L/s)、および圧力 P (Pa)を用いて、

$$q_{g1} = C_p(T_g - T_p)SP + \lambda SP \quad (5)$$

と表される。ここで、吸着パネルに到達する水素分子は、LN₂シールドを通過する過程でルーバースライン

ド型の冷却面(100 K)と衝突・反射を繰り返すため、速度が十分に低下している。パネル周辺の水素ガスの温度はLN₂シールド温度と同一であると仮定し、 $T_g = 100 \text{ K}$ とした。なお、排気速度 S と圧力 P の積、つまりクライオポンプが排気する水素の流量 SP (Pa L/s)は吸着パネルの冷却が完了した定常状態と、プラズマ実験時とで計算条件が異なるため、ここでは場合分けして考える。

(i) 定常状態

クライオポンプの冷却が完了すると、吸着パネルへ出入りする熱の収支が釣り合い、吸着パネル温度が一定となる。この時、吸着パネルは真空容器内に残るごく僅かなガスを吸着するのみで流量 SP は無視できるほど小さい。よって $q_{g1} = 0$ と考えることができる。

(ii) プラズマ実験時

閉構造ダイバータ用クライオ吸着ポンプの設計において、LHD真空容器内に入射される固体水素ペレット(直径2.5 mm、長さ2.5 mm)を10 Hzで入射したときのガス流量($10 \text{ Pa m}^3/\text{s}$)を連続排気できることが目標として設定されている[4]。本稿では、現状のパイプガンペレットで用いられているより大きな固体水素ペレット(直径3 mm、長さ3 mm)[8]を反映して吸着熱の見積もりを行った。固体水素ペレット1個あたりの水素は 2 Pa m^3 であるので、10 Hz(1秒間に10個)で入射された水素ペレットの水素ガス流量 SP は $2 \times 10^4 \text{ Pa L/s}$ と考えられる。よって、このときの吸着パネルへの吸着熱は(5)式より 70 W と求まる。

2.5 気体の熱伝導による吸着パネルへの熱負荷

LN₂シールドと吸着パネルの間にある水素ガスを介して、LN₂シールドから吸着パネルへの気体の伝導熱が存在する。この場合の熱負荷の計算は圧力が低い時の真空壁間の残留ガスによる熱伝導の式が適用できる。この伝導熱量を q_{g2} (W)とすると、

$$q_{g2} = 0.243 \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot a_0 \cdot (T_g - T_p) \cdot \frac{P}{\sqrt{MT}} \cdot A \quad (6)$$

と表すことができる[9]。ここで γ は気体の比熱比、 M は分子量、 P は水素ガスの圧力(Pa)そして A は受熱面積(m^2)である。また熱適応係数 a_0 は以下の

式で与えられる.

$$a_0 = \frac{a_1 a_2}{a_2 + \frac{A_2}{A_1} (1 - a_2) a_1} \quad (7)$$

なお a_1, a_2 はそれぞれ吸着パネル, LN₂ シールドの熱適応係数であり, $a_1 = 1, a_2 = 0.5, A_2/A_1 \approx 3$ とすると, $a_0 = 0.25$ を得る. T は平均温度であり, 以下の式で与えられる.

$$\sqrt{T} = \frac{\sqrt{T_g} + \sqrt{T_p}}{2} \quad (8)$$

$T_g = 100 \text{ K}, T_p = 10 \text{ K}$ のとき, $T = 43 \text{ K}$ を得る. ここで, この熱負荷は水素ガスの圧力によって値が異なるため, 定常状態とプラズマ実験時とで場合分けを行う.

(i) 定常状態

LHD における高密度プラズマ実験において, ベース圧力は最大 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 程度である. このとき (6) 式より, 熱負荷 q_{g2} は $1.35 \times 10^{-4} \text{ W}$ となる. よって定常状態における残留水素ガスによる熱伝導は無視できるほど小さい.

(ii) プラズマ実験時

LHD ダイバータ部を閉構造化すると, 中性粒子が凝集され圧力が最大 1 Pa 程度に上昇することが実験により観測されている[4]. よって (6) 式より熱負荷 q_{g2} は, 1.35 W となる.

2.6 吸着パネルの熱的健全性評価

2.1 項から 2.5 項までの設計検討により吸着パネルへの最大熱負荷は 80.2 W まで抑制することができた. このときの吸着パネルへの熱負荷を表 1 にまとめる. 吸着パネルへの熱負荷は, 定常状態では支持体からの伝導熱が支配的となる. 一方, プラズマ実験時には, 水素ガスの吸着熱が支配的となる.

熱設計の最終目標は, 熱負荷が最も厳しくなる条件において吸着パネルの表面温度が局所的でも 20 K を超えないことである. そのため設計変更の都度, 有限要素法による熱計算を行い, 最大熱負荷時における吸着パネルの表面温度分布を求め, 許容範囲内であるか確かめた. 満足していない場合は, 構造を改良して満足できる結果が得られるまで繰り返した. 以下に吸着パネルの熱解析について述べる. GHe 配管内壁の温度を 10 K とし, 吸着パネルに入る熱負荷

(80.2 W) をパネル面積 (0.568 m^2) で除算した熱流束 (141 W/m^2) を吸着パネル表面 (両面) に与えた. 図 7 に吸着パネルの温度分布を示す. 吸着パネルの表面温度は, GHe 配管から最も離れた活性炭位置で最大 17.8 K であることがわかる. このように熱解析を利用しながら, ポンプ機能を維持する目安温度である 20 K 以下を維持可能な熱構造設計を行った.

3 クライオ吸着ポンプの排気能力試験

本稿で概説したクライオ吸着ポンプは, 平成 28 年度までの真空容器内改造作業において, LHD トーラ

表 1. 吸着パネルへの熱負荷

	Steady State	Plasma Operation
Thermal radiation (W)	2.6	2.6
solid heat conduction (W)	6.2	6.2
Adsorption enthalpy (W)	0	70
Gaseous heat conduction (W)	0.00135	1.35
Heat load to cryo panels (W)	8.8	80.2

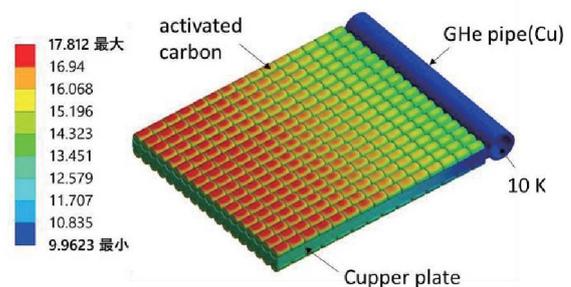


図 7. 吸着パネルの温度分布.

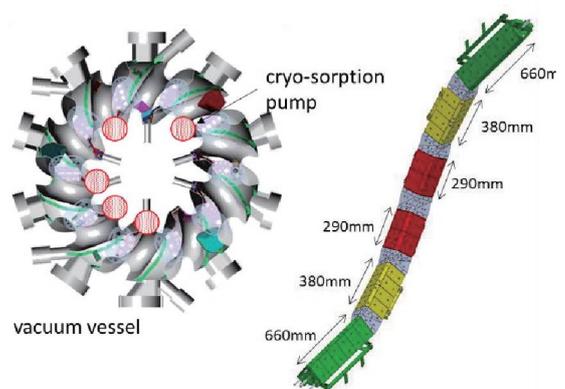


図 8. クライオ吸着ポンプの配置と形状.

ス内側，トロイダル 10 セクションの内，5 セクションに配置された（図 8）．より大きなポンプ体積を確保するため，ダイバータレグと真空容器壁に囲まれた狭小領域を塞ぐように，サイズの異なる 3 種類，1 セクションあたり計 6 台のクライオ吸着ポンプユニットを“ねじれたバナナ”のように繋げて構成している．また，吸着パネルの冷媒である GHe は循環方式を採用しており，3 台の GM 冷凍機（住友重機械工業製 RDK-415D）で冷却された GHe は，トランスファ

表 2. クライオ吸着ポンプの性能諸元

Pumping area	0.568 m ²
Ultimate pressure	1 × 10 ⁻⁵ Pa
Pumping speed	15-20 m ³ /s for hydrogen
Pumping capacity	13,640 Pa m ³

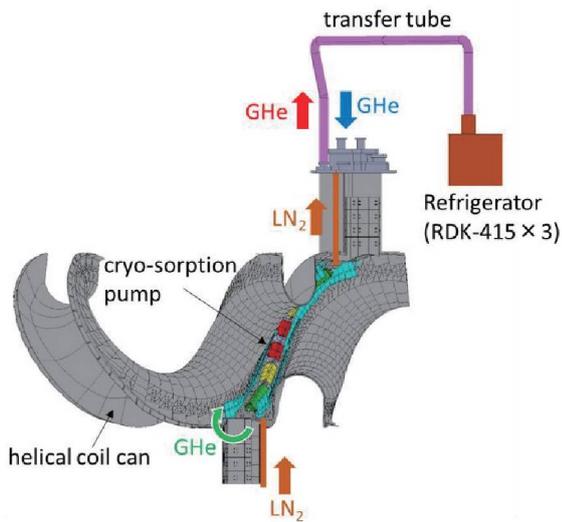


図 9. クライオ吸着ポンプの冷却システム.

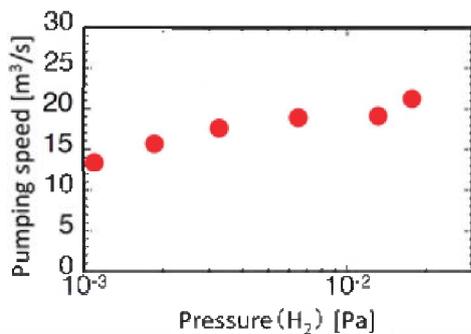


図 10. クライオ吸着ポンプの排気速度.

ーチューブにより，真空容器上部ポートを經由してクライオ吸着ポンプに供給される．そしてポンプ内を通過した GHe は，再び真空容器上部ポートよりトランスファチューブを通して冷凍機に戻る．LN₂ は圧送方式を採用しており，真空容器下部ポートからクライオ吸着ポンプに供給され，上部ポートから排出される（図 9）．

表 2 に，LHD 真空容器内に設置したクライオ吸着ポンプ 1 基あたりの主な性能諸元を示す．LHD 真空容器（体積：250 m³）を主排気装置で排気した後，開発した真空容器内蔵型クライオ吸着ポンプ単独で排気した結果，およそ 1 × 10⁻⁵ Pa（水素換算）の真空度に達した．また LHD ガスパフ用マスフローコントローラで水素ガスの流量を調整し，クライオ吸着ポンプの排気とつり合う平衡圧力から排気速度を求めた．ここで，現状のペレットを 10 Hz で入射した際のガス流量（20 Pa m³/s）を想定した場合には，クライオ吸着ポンプ 1 基あたりのガス流量（2 Pa m³/s）で排気試験を行う必要がある．しかしながら本試験ではマスフローコントローラの制約上，1.5 × 10⁻² ~ 0.37 Pa m³/s の流量範囲で試験を行った．排気速度は約 15~20 m³/s（水素換算）を示し（図 10），ガス圧の増加に対して減少の傾向は見られなかった．また排気容量は，13,640 Pa m³ となった．実際のプラズマに対する効果は，2016 年 - 2017 年度の LHD 実験において，本クライオポンプの作動によるリサイクリングの低減を確認した．これにより，リサイクリングの影響を受けやすい低密度放電時の密度制御が可能となった．

4 まとめ

本開発では，LHD の閉構造ダイバータ内に設置することを目的として，核融合実験装置の真空容器内に設置可能な吸着型のクライオポンプを開発した．特に，ダイバータ部の熱的・空間的に厳しい制約の中で，クライオ吸着ポンプを実装するため，3D-CAD による構造設計と輻射熱解析を相互に補完しながら設計検討を行った．その結果，ダイバータ受熱板やプラズマからの高い熱負荷を受けても十分な耐熱性・熱遮蔽性能を有する構造とすることができた．また同

時に、熱解析を活用しながら、吸着パネルへの輻射・気体／固体伝熱による熱負荷を、許容温度以下に抑制した構造とすることができた。この熱構造設計を通して、LHD ダイバータ部の高熱負荷環境下においても、真空ポンプとして成立するクライオ吸着ポンプの見通しを得た。

本稿で開発したクライオポンプをLHD トーラス内側、トロイダル10セクション中、5セクションに配置し、その排気能力試験を行った。その結果、1基あたりの排気速度は、設計目標の約1.5～2倍の排気性能[4]となり、さらに排気容量は、LHDの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。

5 謝辞

クライオポンプの開発・運用に携わっている核融合科学研究所内・所外関係者の皆様、特にクライオ吸着パネルの製造に必須な無機接着法[5]に対する三田正弘氏(榊協同インターナショナル)の多大な貢献に感謝いたします。なお、本開発は、核融合科学研究所予算NIFS10ULPP801の支援を受けて実施したものであり、ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] K. M. Schaubel *et al.*, *Advances in Cryogenic Engineering* **39**, 1583 (1994).
- [2] Q.S. Hu *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **85**, 1508 (2010).
- [3] R. J. Pearce *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **88**, 809–813(2013).
- [4] S. Masuzaki *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **85**, 940–945 (2010).
- [5] 村瀬尊則 他 :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.
- [6] T. Murase *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **11**, 1205030 (2016).
- [7] E.M. Sparrow *et al.*, *Radiation Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, (1978).
- [8] R. Sakamoto *et al.*, *Review of Scientific Instruments*

84, 083504 (2013).

- [9] 熊谷寛夫, 富永五郎編, 真空の物理と応用. 裳華房, (1970).