

3.6.2 ダイバータ

3.6.2.1 LHD のヘリカルダイバータ (HD) - 設備の現状 -

LHD では、設計当初の標準的な運転磁場配位であった磁気軸 3.75m 配位を基準に、磁力線追跡計算結果を基に、ダイバータ板を配置している。図 3.6.2-1(a)に LHD におけるヘリカルダイバータ板の配置を示す (トーラス半周分)。特に、赤と青で色をつけたダイバータ板列を同図(b)に示している。ダイバータ板の総数は 1700 枚程度であり、その材料には等方性黒鉛 (東洋炭素 IG-430U) を用いている。

図 3.6.2-2 に、ダイバータ板構造を示す。ステンレス製 (SUS316L) の水冷配管に、銅製のヒートシンクをボルトで機械的に接合し、そのヒートシンクに等方性黒鉛製のダイバータ板をボルトで機械的に接合している。ダイバータ板構造の開発は、核融合科学研究所の電子ビーム照射装置 ACT において行われた。特に、LHD の実験目標である加熱入力 3 MW の 1 時間放電に耐え得るダイバータ構造を開発することを目標とした。ACT における実験では、LHD 定常実験の加熱入力の半分は放射損失で壁へ失われ、残りの 1.5 MW がダイバータへ流入すると仮定し、さらにダイバータ板の熱負荷は、HD の 3 次元構造によるピーキングファクターを 2 として、 $0.75\text{MW}/\text{m}^2$ の

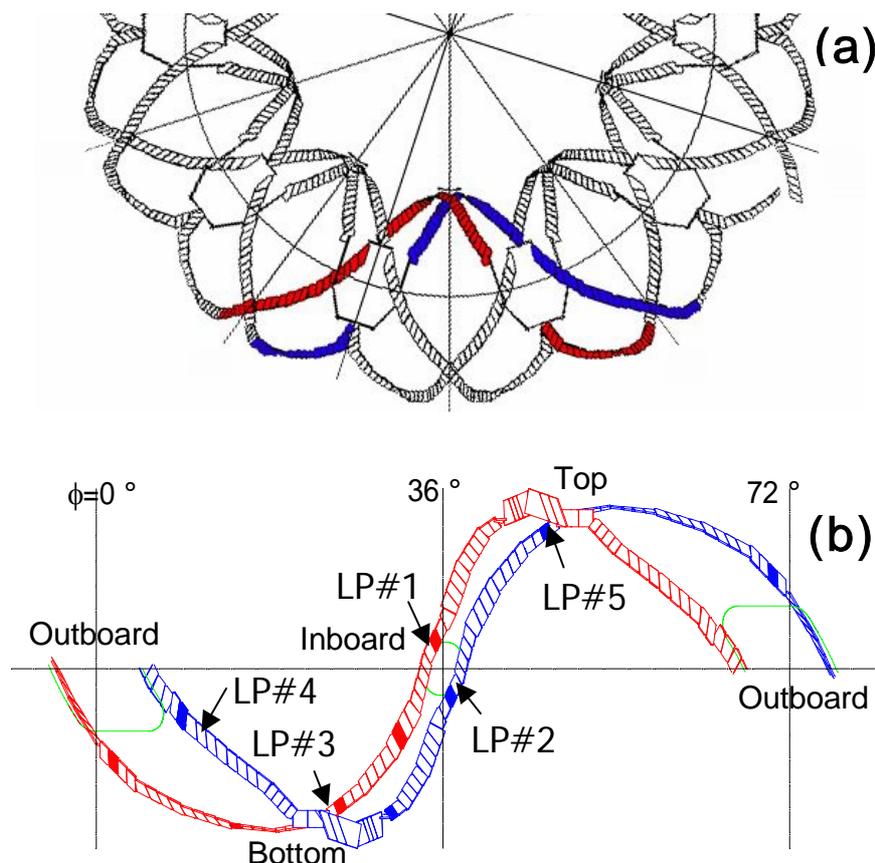


図 3.6.2-1 (a) LHD におけるダイバータ板列、(b) ダイバータ板列拡大図。(b)において、赤、青でハッチングしたダイバータ板には熱電対を、LP#1-5 と示したダイバータ板には静電プローブアレイをそれぞれ埋め込んでいる。

熱負荷を仮定した。図 3.6.2-3 に ACT におけるダイバータ板構造への熱負荷印加実験結果を示す。現在 LHD に設置しているダイバータ板構造は、熱流束が 0.4MW/m^2 を超えると、熱負荷と温度の関係が線形からずれることが分かる。これは銅ヒートシンクが、温度が 200 を超えると変形し、ダイバータ板との熱接触が劣化するためである。ヒートシンクは変形すると元に戻ることはないため、以後の実験に支障を来す可

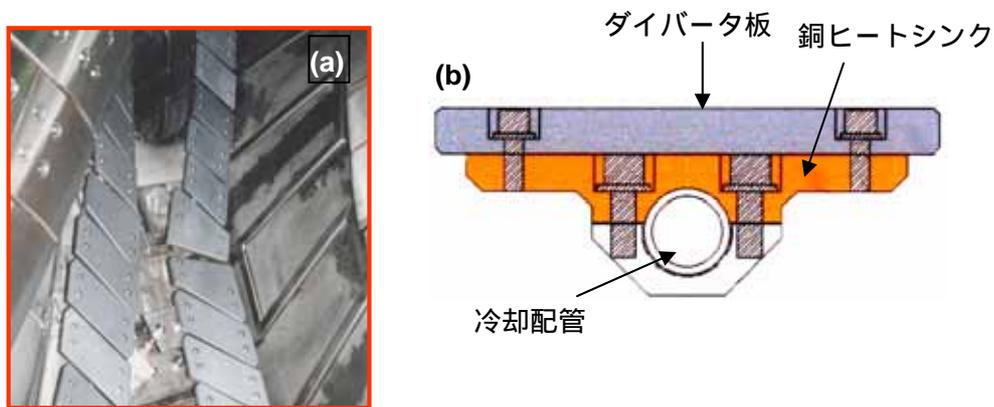


図 3.6.2-2 (a) LHD 真空容器内のダイバータ板列、(b) ダイバータ板構造

能性がある。

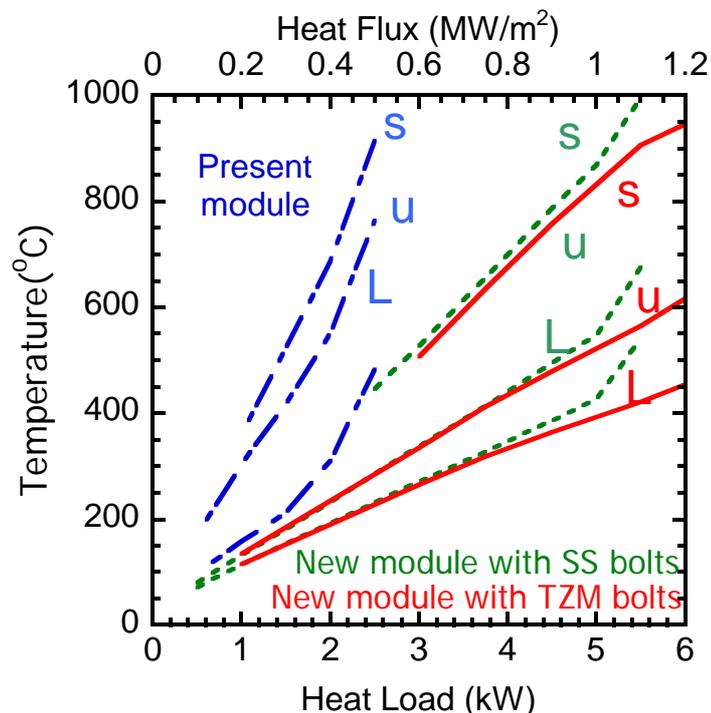


図 3.6.2-3 ダイバータ板構造熱負荷試験結果。各熱負荷条件における定常状態での温度を示す。青線は現在設置されているダイバータ板、緑及び赤線は新型機械接合型ダイバータ板。図中s, u, Lは、それぞれダイバータ板表面、ヒートシンク上部、ヒートシンク下部を示す。

LHD では、1998年の実験開始から現在まで、ダイバータ板で発生した不純物やリサイクリング粒子を積極的に制御するような設備（例えば排気装置）は設置してい

ない、いわゆる「開いた」HD 配位において実験を行い、HD プラズマ特性の研究を進めてきた。

3.6.2.2 LHD におけるヘリカルダイバータの閉構造化・高性能化検討

重水素を用いた実験で、主プラズマの閉じ込め性能の向上及び高性能プラズマの長時間保持を目的とする計画の1つとして、HD の閉構造化・高性能化を行う。

バッフル構造を設置してダイバータ室を形成し、ダイバータ板上で再結合した粒子や発生した不純物がダイバータ部から流出することを防ぐことを閉構造化という。図 3.6.2-4 に閉構造 HD の概要図を示す。閉構造化とともにダイバータ部に排気装置を設置することにより、効率的なりサイクリング及び不純物制御、及び長時間放電における粒子制御が可能となる。図 3.6.2-5 に中性粒子輸送コード DEGAS で計算された、水素分子密度分布を示す。初期的な設計であるが、バッフル構造を設置することによりダイバータ部の水素分子密度を3倍程度上げることができると予測されている。一方、リサイクリング粒子をダイバータ部に閉じ込めることにより、主プラズマ周辺部の中性粒子密度は低下する。これにより、ローカルアイランドダイバータ配位で得られている超高密度プラズマを、HD 配位でも再現性よく得ることができ、また、ダイバータ部の中性粒子圧力が上がることで現在は得られていないダイバータデタッチメントの安定維持を実現できる可能性がある。ダイバータ排気系は排気速度の観点からは、ダイバータ室内にクライオパネルあるいはクライオパイプ型のポンプを設置することが望ましい。この場合、液体ヘリウムの流路は上下ポートを通して設置する。クライオポンプの設置位置は、トーラス部、あるいはヘリカルコイル容器側板部(2箇所)を検討している。いずれの場合も、例えばトーラス内側のみにポンプを設置した場合、長手方向に約4mのクライオパネルあるいはパイプを設置することになる。クライオポンプはシェブロン及び80Kシールドで放射熱から遮蔽する。ダイバータ排気系で必要な排気速度について、単位時間当たりペレットで供給する粒子数を基準として考えてみる。定常運転が可能な現有の連続入射ペレット(10Hz、ペレット1個当たり 1×10^{21} atoms)では、 1×10^{22} atoms/s が単位時間当たりの入射粒子数であり、したがって必要な排気粒子束としては約 $20 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となる。ダイバータ室内の中性粒子圧力を

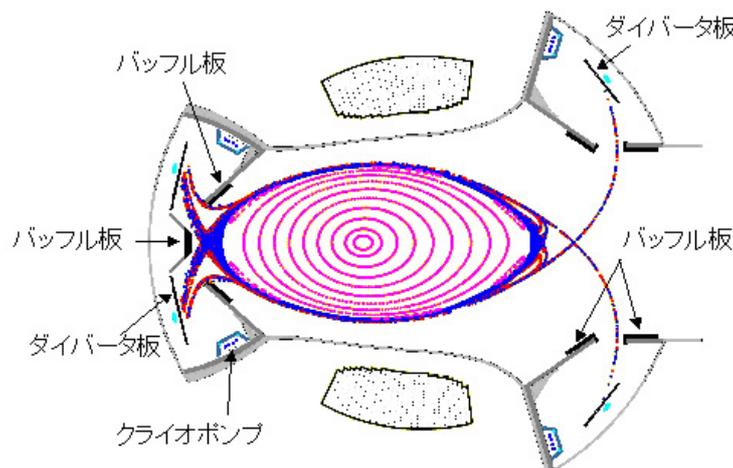


図 3.6.2-4 ヘリカルダイバータの閉構造化

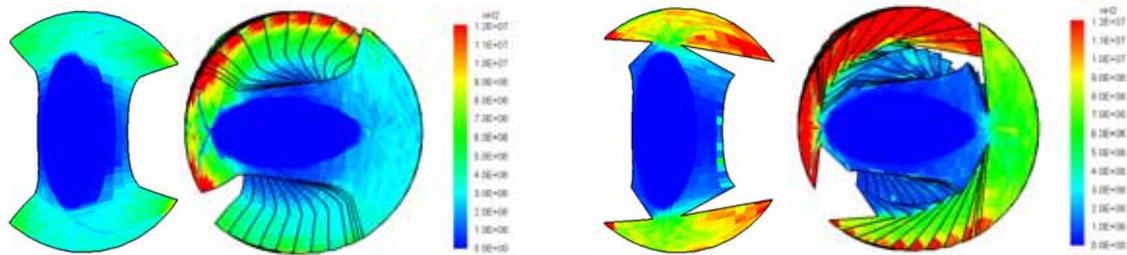


図 3.6.2-5 DEGAS コードによる中性粒子輸送計算で得られた水素分子密度分布。(左) 現行の開いた HD 配位。(右) バッフル構造を設置した、閉構造化 HD 配位。

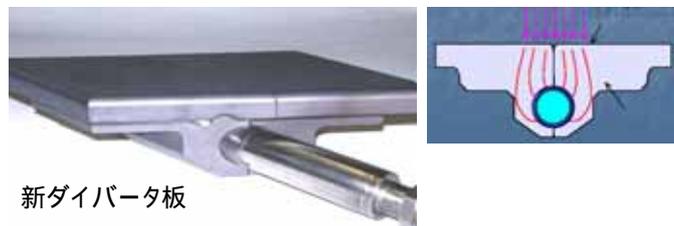


図 3.6.2-6 新型機械接合型ダイバータ板構造。(右) 冷却配管への熱の流れ。

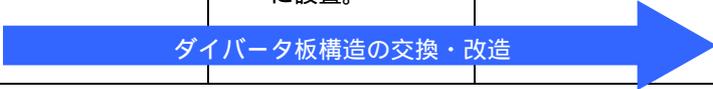
10^{-1}Pa のオーダーまで上げることができれば、排気系の必要排気速度は $100\text{ m}^3/\text{s}$ のオーダーになる。

3.6.2.1 節で述べたように、高性能定常プラズマ保持実験時に熱負荷が高い部位では、現在設置しているダイバータ板の熱特性が劣化する可能性がある。そこでダイバータ板構造を、より高熱負荷に耐え得る構造に交換する。これを高性能化という。黒鉛 - 銅のロウ付け材を用いることが理想的である。ITER のダイバータ板開発などで、LHD 設計時に比べて技術的には進んでいるが、高コストが問題ではある。また、ボルトを用いた機械接合タイプでも、最近核融合科学研究所で開発した新型機械接合型ダイバータ板構造(図 3.6.2-6)は、図 3.6.2-3 に示すように(図中、“new module”)現在のダイバータ板構造に比べて熱除去性能は大きく向上している。現在のダイバータ板の場合、ダイバータ板からヒートシンクへの熱流束は主として、これらを接合するボルトを通して流れていたが、新型機械接合型ダイバータ板構造ではダイバータ板とヒートシンクが等方性黒鉛で一体構造となっているため、図 3.6.2-6 右図に示すようにダイバータ表面から冷却管までの熱流路長が短く、熱抵抗が小さいと考えられる。さらに新型機械接合型ダイバータ板構造では、これまでプラズマ対向部に露出していた金属製ボルトがなくなるため、金属不純物発生の抑制という観点からも有利である。ダイバータ板構造の交換・改造としては、ロウ付け型あるいは新型機械接合型ダイバータ板構造を用いることにより、より加熱入力の高い長時間放電実験に対応することができる。

以上を踏まえ、ヘリカルダイバータ閉構造化・高性能化のスケジュールを以下のよう
に計画している。

表 3.2.6-1 ヘリカルダイバータ閉構造化・高性能化計画案

FY	準備1年度	準備2年度	準備3年度	重水素実験初年度
内容	<ul style="list-style-type: none"> トロイダル1セクション(全体の10%)への試験バップル構造の設置 	<ul style="list-style-type: none"> 前年度の結果からバップル構造の最適化を行う。 全体の50%にバップル構造を設置。 ダイバータ排気系を全体の50%に設置。 	<ul style="list-style-type: none"> バップル構造及びダイバータ排気系をトロイダル全周に設置。 	リサイクリング粒子及び不純物制御による、閉じ込め改善実験及び高性能プラズマ定常保持実験

3.6.3 中性粒子入射加熱装置整備計画案

中性粒子入射加熱装置(NBI)は、LHDにおける主加熱装置であり、現在、3台の負イオン源NBIシステムを用いた高エネルギー(180keV)軽水素ビームの接線入射を行っており、合計で13MWを超える入射電力を達成している。重水素実験では、3.3節の実験シナリオで述べられているように、低エネルギー(60-80keV)の垂直入射の正イオン源NBIシステム2台による重水素ビーム入射を主とした実験シナリオが策定されている。また、現状の接線入射NBIにおいては、入射エネルギーを変更することなく、軽水素ビームおよび重水素ビームのいずれも入射可能とする計画である。図3.6.3-1にNBIシステムの配置計画を示す。既存の3台の接線入射NBIシステム(BL1, BL2, BL3)と垂直入射NBIシステム(BL4, BL5)の配置が示されている。以下では、重水素ビーム入射システムの構成およびその整備計画案について述べる。