

氏 名 中 原 由 紀 夫

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第592号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 ニオブと水素原子の相互作用を利用した水素排気法と

その核融合実験装置への適用に関する研究

論 文 審 査 委 員	主 査 教授	野田 信明
	教授	大藪 修義
	教授	室賀 健夫
	教授	中村 幸男（核融合科学研究所）
	助教授	及川 俊一（北海道大学）

核融合炉を実現するために、核融合反応に必要な高温・高密度のプラズマを長時間、安定に保持する必要がある。高性能プラズマを生成するためには、プラズマ周辺部での粒子リサイクリングを制御することが特に重要であるとされている。トカマク型核融合実験装置では、ダイバータを利用してプラズマ周辺部で能動的に粒子排気を行うこと（ダイバータ排気）によって、容器壁の粒子インベントリを制御できることやプラズマの閉じ込め性能を改善できることが示されている。核融合科学研究所のヘリオトロン型核融合実験装置 LHD (Large Helical Device) でも、プラズマ性能を向上させるために高効率でダイバータ排気することが提案されている。能率のよい排気を実現するため、既存の排気法に替わる方法として Va 族遷移金属と水素原子の相互作用を利用した水素排気法の開発研究が進められている。Va 族遷移金属は、水素同位体の原子を効率良く吸蔵／透過することが知られている。この性質を利用して、ダイバータ板近傍で多量に発生する水素原子を効率良く除去すれば、高効率のダイバータ排気を実現できると考えられる。また、将来の D-T 炉では核融合反応で生じるヘリウムを定常的に排気する必要があるが、クライオポンプを使用するとヘリウムと共にトリチウムが吸着排気される。そこで、金属薄膜ポンプを設置して、排気ガスからトリチウムを選択的に分離／回収し、トリチウムインベントリを低減することも提案されている。本研究は、Va 族遷移金属の一つであるニオブと水素原子の相互作用を利用した水素排気法を核融合実験装置のダイバータ排気へ適用するための開発研究の一環として行われた。

水素原子がニオブ薄膜（メンブレン）を透過する場合、その透過率は入射側表面およびその反対側表面での再結合係数の大きさによって決まる。再結合係数は表面での水素粒子の放出されやすさを示し、大きいほど放出されやすい。再結合係数は表面状態によって変化し、入射側表面で再結合係数が大きくなると透過率は減少する。真空中で加熱処理されたメンブレン表面は 1 原子層程度の酸素被膜に覆われていて、その不純物層の存在によって再結合係数が非常に小さくなっている。しかしながら、メンブレンを核融合実験装置内のダイバータ領域あるいはコアプラズマに対面する領域へ設置した場合、荷電交換反応で生じる高エネルギー水素原子等によるスパッタリングで薄膜表面の酸素被膜が除去され、透過性能が劣化する恐れがある。また、プラズマ壁相互作用によって第一壁やダイバータ板の材料である鉄を始めとする金属元素や炭素が薄膜表面に堆積した場合も、薄膜の表面状態が変化して透過性能が劣化する可能性がある。そこで、核融合実験装置内で予想される、高エネルギー水素粒子によるスパッタリングや金属元素／炭素堆積がメンブレンの水素原子に対する透過性能に及ぼす影響を明らかにするため、実験を行った。

実験は、ダイバータ排気を模擬するプラズマ実験装置 PMTD (Plasma Membrane Test Device) を用いて行った。PMTD の円筒形真空容器内は、中心に設置された抵抗加熱可能な管状ニオブ薄膜（厚さ 0.2mm または 0.3mm）によってプラズマ側と排気側に分離され、それぞれ複合分子ポンプで排気されている。プラズマ側では、熱陰極を利用した直流放電でメンブレン外側を囲むように中空円筒状水素プラズマが生成される。プラズマによって生じた水素原子束がメンブレンのプラズマ側表面へ入射すると、水素粒子がメンブレンを透過して排気側圧力が上昇する。透過した水素粒子束は、排気側の圧力変化から求められ

る。

高エネルギー水素粒子入射の影響に関する実験では、プラズマ薄膜間へ電圧（0-370 V）を印加して水素イオンを表面へ照射し、その時の水素原子による透過束およびプラズマ側表面での再結合係数の変化を測定した。実験の結果、50V 以上では電圧が高くなるに従って再結合係数が単調に増加し、透過束は単調に減少した。また、0-50V の範囲では、10V 付近で再結合係数の増加が極大となり透過束の減少が極小となる現象がこの実験で初めて観測された。この実験の結果から、薄膜表面に高エネルギー水素粒子が入射すると再結合係数が大きくなり、薄膜の水素原子に対する透過性能が劣化することが検証された。

これは、薄膜表面の酸素被膜が除去されるためだと考えられる。酸素被膜を維持するために予めメンブレンに 0.2at.% あるいは 0.6at.% の酸素を溶解させて、メンブレン温度 560-850°C で高エネルギー水素イオンを照射し、酸素溶解の効果を調べた。実験の結果、酸素を溶解させることで高エネルギー水素イオン照射による水素原子透過束の減少を小さくすることが出来、酸素濃度が 0.2at.% よりも 0.6at.% 溶解させた場合に効果が大きかった。

酸素を溶解させた場合でも温度が低いと高エネルギー水素粒子照射による水素原子束の減少が見られた。以上の結果から、酸素濃度や薄膜温度を高くすることによって、薄膜の内部から表面への酸素の偏析が速やかに起こるようになり、表面の酸素被膜が維持されると考えられる。

PMTD では、円筒状プラズマの外側を囲むようにターゲットが設置されている。金属元素/炭素堆積の影響に関する実験では、プラズマターゲット間に 100-400V の電圧を印加し、高エネルギー水素イオン照射によるスパッタリングで生じたターゲット材をプラズマ側表面へ堆積させて、メンブレンの水素透過性能に対する影響を調べた。ステンレス鋼をターゲット材に用いた実験では、プラズマ側表面にステンレス鋼成分の金属元素（主に鉄）が堆積すると水素原子の透過束が減少した。ステンレス鋼成分元素の堆積によって、プラズマ側表面での再結合係数が大きくなるためと考えられる。黒鉛をターゲット材に用いた実験でも、プラズマ側表面に炭素を堆積させると水素原子の透過束が減少した。堆積した炭素によって水素原子束が遮蔽され、メンブレン内部に到達できなくなるためと考えられる。ステンレス鋼成分元素/炭素堆積によって劣化したメンブレンの水素原子透過性能は、薄膜を約 1200°C で数分間加熱することで元に戻すことが出来た。また、ステンレス鋼および黒鉛をターゲット材にしたいずれの実験でも、ステンレス鋼成分元素/炭素堆積時の薄膜温度を高くすると、不純物堆積による水素原子透過束の減少が小さくなり、ある温度（700-800°C）以上では不純物堆積の影響が見られなくなった。薄膜温度を高くすると、堆積した鉄や炭素の薄膜内部への拡散速度が大きくなり、表面に堆積した不純物が速やかにメンブレン内部へ拡散するため、表面での不純物密度が低くなるからだと考えられる。

ニオブと水素原子の相互作用を利用した水素排気法実証のため、プロトタイプのポンプを作製し、核融合実験装置で実験を行った。厚さ 0.2mm 直径 1.5cm 長さ 10cm の管状ニオブ薄膜を 2 本用いたメンブレンポンプを作製し、日本原子力研究所のトカマク型核融合実験装置 JFT-2M (JAERI Fusion Torus-2M) のダイバータへ適用した実験では、プラズマ実験でメンブレンをダイバータプラズマにさらすと排気側での圧力上昇が観測され、ダイバータプラズマで生成される水素原子をメンブレンポンプによって排気できることを初めて

実証した。この実験では、排気水素粒子束はダイバータ室の圧力  $P_{div.} \leq 0.03\text{Pa}$  の範囲でその圧力に比例し、 $P_{div.} = 0.03\text{Pa}$  の時  $7.3 \times 10^{15} \text{ D cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であった。また、LHD 実験への適用のために、ニオブの水素原子吸蔵性を利用して水素を吸蔵排気するパネルポンプ（厚さ 1mm 縦横 40cm×40cm のニオブ板）を作製した。高温金属（アトマイザ）表面での水素分子の熱解離によって生じる水素原子を利用した予備実験では、パネルポンプが十分な排気性能（吸蔵水素粒子束密度および吸蔵量）を有していることを確認した。LHD での実験では、初期結果として約 8 時間のプラズマ実験で約  $0.02 \text{ Pa m}^3$  の水素がパネルポンプに吸蔵されるということが分かった。この結果から、パネルポンプによって放電中に吸蔵される水素粒子束密度は平均すると  $3 \times 10^{13} \text{ H cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であると推定される。

以上の研究成果から、ダイバータ排気を高効率化するための粒子排気法として、メンブレンポンプやパネルポンプの実用化の見通しが得られた。

## 論文の審査結果の要旨

本研究は、核融合装置ダイバータ排気の新手法として期待される金属薄膜排気（メンブレンポンプ）法開発の一環として行なわれた。この水素排気法は水素原子が金属薄膜を高い確率で透過する現象（超透過）を利用したもので、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）をはじめとする核融合実験装置のダイバータ排気への適用が提案されている。メンブレンポンプは既存の排気法に比べ、1) 水素原子の高効率排気、2) 定常排気、3) 高圧縮比（吸気側圧力に対する排気側圧力の比）4) DT-He 分離を可能にするという特長を有し、実用化すれば将来の核融合炉定常核燃焼運転における有力な排気法となる。これまでメンブレンの超透過性自体に関する基礎的な研究、また核融合実験装置へ適用するためのいくつかの準備研究が進められてきた。本研究は、ニオブ薄膜を用い、1) メンブレンポンプを核融合装置のダイバータ領域内へ設置した場合に懸念される表面変質とその影響の評価、問題解決等を目的とする基礎実験、2) 核融合実験装置にメンブレンを実際に適用し、排気の実証、排気性能特性とプラズマ条件との相関を調べる実機実験とで構成される。

メンブレンの上流側（プラズマ側）表面状態は超透過性維持に重要な影響を持つと考えられている。基礎実験装置を用いた研究では、1) 高エネルギー水素粒子入射による酸素被膜除去は上流側表面での水素分子放出を容易にすること、2) 鉄不純物堆積は同じく水素分子放出促進の条件をもたらすこと、3) 炭素不純物堆積は表面での水素原子吸収を妨げる働きをすること、その結果いずれの場合も超透過性の劣化につながることを明らかにしている。劣化を回避する方法としては、1) メンブレン中に酸素を予注入し、メンブレンの高温保持によって酸素の表面への偏析を促進することにより、水素粒子入射による酸素除去の影響を抑制できること、2) 同じくメンブレンの高温保持により、表面に堆積した鉄、炭素のメンブレン内部への拡散を促進することで表面不純物濃度増加を抑えられること、3) 炭素堆積については、表面へ高エネルギー水素粒子を同時照射することによってもそれを抑制できることを実験的に示した。これらは核融合実験装置内でメンブレンポンプの水素原子排気性能を長時間維持するための重要な指針を与える結果である。

核融合装置での実験では、まず日本原子力研究所のトカマク装置 JFT-2M のダイバータ領域に小型のメンブレンポンプを設置し、実機プラズマによって生成された重水素原子を透過により排気できることを初めて実証した。また、透過水素原子束はダイバータ室の中性ガス圧力に比例して増加することが示され、メンブレン近傍のプラズマ条件と透過・排気能率との定量的な関係を議論する基礎的なデータが得られた。LHD 実験への適用に際しては、第一段階として設置自由度の高いパネルポンプ（ニオブパネルの水素原子吸蔵性を利用した水素排気法）を考案し、基礎実験装置を用いてその性能試験を行った。そこで得られた排気及び吸蔵特性を基礎にパネルポンプの設計、製作を行ない、LHD のコアプラズマ対向領域に設置し、水素排気特性の評価を行なった。主放電、グロー放電それぞれについて、パネルポンプによる水素排気を示す結果が得られている。とくに、ヘリウムガス供給を主体とする一連の実験と水素ガス供給を主体とする一連の実験とで、実験後のニオブパネル表面の吸着水素量に顕著な差が見られており、実験中の水素総供給量とパネル表面による総排気量との相関を示す結果が得られている。JFT-2M での結果と合わせ、メンブ

レンポンプに関する研究を核融合装置周辺部の中性水素粒子束と定量比較のできる段階にまで引き上げたことは評価に値する。

本論文は、以上の一連の実験研究をまとめたものであり、ニオブと水素原子の相互作用を利用した水素排気法を核融合実験装置に適用する上での問題点及び対策を明らかにし、実機プラズマでの排気性能を実証し、新しい粒子排気法としての展望を与えたものとして十分に評価できる。よって、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な水準にあり、本専攻にふさわしい内容をもつものであるとの結論に達した。