

学位論文題名

核融合炉壁用金属材料のヘリウム捕捉特性の研究

学位論文内容の要旨

核融合炉では、自己点火条件の維持のため、コア・プラズマ中のヘリウム灰濃度を低減することが要求されている。ヘリウム灰は通常ポロイダルダイバータにより除去される。しかし、その排気効率が十分でない場合、付加的なヘリウム灰排気法を併用する必要がある。この排気法の一つとして、ダイバータ近傍にヘリウム排気金属を適用することが提案されている。ヘリウム排気金属とは、核融合反応の結果生じるヘリウム灰を多く捕捉する材料である。このヘリウム排気材料の適用により、ヘリウムの排気効率が上昇し、ダイバータ領域からコア・プラズマへのヘリウムリサイクリングが抑制される。このため、コア・プラズマ中のヘリウム灰濃度が低減すると予測されている。しかし、ヘリウム排気材料に対して、ヘリウム捕捉量やヘリウム脱離特性等についての評価はまだ十分に行われていない状況にある。

本研究では、ニッケル、タングステン、モリブデン、インコネル 625 及び 304 ステンレス鋼のヘリウム捕捉量の照射温度依存性を調べた。また、これらの金属の中で最も良好なヘリウム捕捉特性を示したニッケルに対し、ヘリウム捕捉量のヘリウム照射量依存性、ヘリウム入射エネルギー(基板バイアス電位)依存性についても調べた。これらの評価のため、ECR プラズマ照射装置を用いて、様々な条件下でヘリウムプラズマあるいはヘリウム-水素混合プラズマを照射し、昇温脱離分析(TDS)にてヘリウム脱離特性及びヘリウム捕捉量を調べた。また、ヘリウム排気材料としてニッケルを実験炉に適用した場合について検討した。以下、本研究の結果を述べる。

ニッケル、タングステン、モリブデン、インコネル 625 及び 304 ステンレス鋼に対し、照射温度を変化させて、ヘリウムプラズマを照射した。ニッケル、インコネル 625 及び 304 ステンレス鋼のヘリウム脱離ピークは、照射温度とともにピーク温度が高温側にシフトするものと、照射温度に依存せずほぼ同じ温度に出現するものに分類できることが分かった。一方、タングステンとモリブデンのヘリウムの脱離ピークは、照射温度とともにピーク温度が高温側にシフトするもののみであった。ニッケル、インコネル 625 及び 304 ステンレス鋼のヘリウム脱離量は、照射温度に大きく依存していた。特に、ニッケル及びインコネル 625 の場合は 600 °C 以上で、304 ステンレス鋼の場合は 500 °C 以上で、ヘリウム捕捉量は大きく減少した。一方、タングステンとモリブデンのヘリウム捕捉量は、照射温度に殆ど依存せず、700 °C においても減少しなかった。

評価した 5 種類の金属中、ニッケルが最も多くヘリウムを捕捉した。照射温度が 200 °C 及び 600 °C の時、ヘリウム捕捉量は最大となった。これらの温度下で捕捉量は 2.5×10^{16} He/cm² となった。ニッケルに対し、ヘリウム-水素混合プラズマを照射しても、ヘリウムプラズマのみの照射の場合とほぼ同量のヘリウムが捕捉された。従って、ヘリ

ウムと水素が同時に入射する核融合炉においても、ニッケルはヘリウムを捕捉することが分かった。

良好なヘリウム排気特性を示したニッケルに対し、ヘリウム捕捉のヘリウム照射量依存性およびヘリウム入射エネルギー依存性を調べた。照射量依存性の実験では、照射温度が 200 °C の場合、ヘリウム捕捉量は照射量とともに急激に増加し、照射量が 2×10^{18} He/cm² でほぼ飽和した。照射温度が 600 °C の場合、200 °C の場合と比較し、照射量に対するヘリウム捕捉量の増加の割合は小さかったが、飽和量は 200 °C の場合と同様に大きくなった。入射エネルギー依存性の実験では、ヘリウム捕捉量は、照射温度が 400 °C 以下の場合、入射エネルギーにほぼ比例して増加した。照射温度が 500 °C 以上の時は、入射エネルギーが 500~600 eV 以上の時のみヘリウムは捕捉された。

ヘリウム捕捉量のこれらの依存性を、表面領域とバルク領域の 2 領域からなるモデルで考察した。この 2 領域モデルにより、ヘリウム照射量依存性及び入射エネルギー依存性の実験結果の傾向をほぼ説明できた。

ニッケルの表面状態を変えて、ヘリウム捕捉量がどう変わってくるのかについても評価した。すなわち、メーカーで製造されたままのもの、鏡面研磨をしたもの、脱ガス処理をしたもの、エメリー紙により表面を粗くしたものに対し、ヘリウム捕捉特性を求め比較した。また、電子線ビーム蒸着により作製したニッケル蒸着膜に対しても捕捉特性を調べた。これらの試料間では、ヘリウム捕捉量はほぼ同じであった。

以上の実験結果より、ヘリウム排気金属としてニッケルが適切であり、この材料を実験炉に適用した場合について検討した。密度バランスの解析から、ニッケルをリミター配位よりダイバータ配位へ適用する方が効果的であることが分かった。実験炉では燃焼時間を 1000 s としており、この間ヘリウムを排気する必要がある。従って、ヘリウムの捕捉持続時間と必要な蒸着量を求めた。ニッケルのヘリウム捕捉率を 0.1 とすると、ヘリウムの入射エネルギーが 100 eV で約 10 s 間、1 keV で約 100 s 間のヘリウム捕捉効果を期待できることが分かった。ニッケルを繰り返し蒸着することにより、実験炉で予定されている 1000 s の放電に対しても十分適用できると考えられる。

以上、本研究では、種々の金属のヘリウム捕捉特性を調べるとともに、ニッケルが良好なヘリウム捕捉特性を有していることを示した。このニッケルに対して、照射量および入射エネルギー依存性についても評価した。また、核融合実験炉のヘリウム灰濃度の低減のため、ニッケルを適用した場合の条件を調べた。これらは核融合炉のヘリウム灰濃度の低減に重要な結果を提供している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 日 野 友 明
副 査 教 授 山 科 俊 郎
副 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 高 橋 平 七 郎

学 位 論 文 題 名

核融合炉壁用金属材料のヘリウム捕捉特性の研究

核融合炉では、自己点火条件の維持のため、コア・プラズマ中のヘリウム灰濃度を低減することが要求されている。ヘリウム灰は通常ポロイダルダイバータにより除去される。しかし、その排気効率が十分でない場合、付加的なヘリウム灰排気法を併用する必要がある。この排気法の一つとして、ダイバータ近傍にヘリウム排気金属を適用することが提案されている。このヘリウム排気材料の適用により、ヘリウムの排気効率が上昇し、コア・プラズマ中のヘリウム灰濃度が低減すると予測されている。しかし、ヘリウム排気材料に対して、ヘリウム捕捉量やヘリウム脱離特性等についての評価はまだ十分に行われていない状況にある。

本研究では、ニッケル、タングステン、モリブデン、インコネル 625 及び 304 ステンレス鋼のヘリウム捕捉量の照射温度依存性およびヘリウム排気特性を調べた。また、これらの金属の中で最も良好なヘリウム捕捉特性を示したニッケルに対し、ヘリウム捕捉量のヘリウム照射量依存性、入射エネルギー(基板バイアス電位)依存性及び表面状態の影響についても調べた。これらの評価のため、ECR プラズマ照射装置を用いて、様々な条件下でヘリウムプラズマあるいはヘリウム-水素混合プラズマを照射し、昇温脱離分析(TDS)にてヘリウム脱離特性及びヘリウム捕捉量を調べた。また、ヘリウム選択排気材料としてニッケルを実験炉に適用した場合について検討した。以下、結果の要点を述べる。

ニッケル、インコネル 625 及び 304 ステンレス鋼のヘリウム脱離ピークは、照射温度とともにピーク温度が高温側にシフトするものと、照射温度に依存せずほぼ同じ温度に出現するものに分類できることが分かった。一方、タングステンとモリブデンのヘリウムの 1000 °C以下の脱離ピークは、照射温度とともにピーク温度が高温側にシフトするもののみであった。ヘリウム捕捉量は、ニッケル及びインコネル 625 の場合は 600 °C以上で、304 ステンレス鋼の場合は 500 °C以上で大きく減少した。一方、タングステンとモリブデンのヘリウム捕捉量は、照射温度に強く依存せず、700 °Cにおいても殆ど減少しなかった。

評価した 5 種類の金属中、ニッケルが最も多くヘリウムを捕捉した。照射温度が 200 °C及び 600 °Cの時、ヘリウム捕捉量は最大となった。これらの温度下で捕捉量は 2.5×10^{16} He/cm² となった。ニッケルに対し、ヘリウム-水素混合プラズマを照射しても、ヘリウムプラズマのみの照射の場合とほぼ同量のヘリウムが捕捉された。従って、ヘリウムと水素が同時に入射する核融合炉においても、ニッケルはヘリウムを捕捉することが分かった。

ニッケルに対する照射量依存性の実験では、照射温度が 200 °Cの場合、ヘリウム捕捉量は照

射量とともに急激に増加し、照射量が 2×10^{18} He/cm² でほぼ飽和した。照射温度が 600 °C の場合、200 °C の場合と比較し、照射量に対するヘリウム捕捉量の増加の割合は小さかったが、飽和量は 200 °C の場合と同様に大きくなった。入射エネルギー依存性の実験では、ヘリウム捕捉量は、照射温度が 400 °C 以下の場合では、入射エネルギーにほぼ比例して増加した。照射温度が 500 °C 以上の時は、入射エネルギーが 500~600 eV 以上の時のみヘリウムは捕捉された。

以上の実験結果より、ヘリウム排気金属としてニッケルが適切であり、この材料を実験炉に適用した場合について検討した。実験炉では燃焼時間を 1000 s としており、この間ヘリウムを排気する必要がある。従って、ヘリウムの捕捉持続時間と必要な蒸着量を求めた。ニッケルのヘリウム捕捉率を 0.1 程度とすると、ヘリウムの入射エネルギーが 100 eV で約 10 s 間、1 keV で約 100 s 間の排気効果を期待できることが分かった。ニッケルを繰り返し蒸着することにより、実験炉で予定されている 1000 s の放電に対しても十分適用できると考えられる。

これを要するに、著者は、核融合炉のヘリウム灰濃度の低減に必要な金属のヘリウム捕捉特性について多くの新知見を得たものであり、核融合炉の自己燃焼の維持という課題に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。