

氏名	杉本 有隆
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	総博甲第 155 号
学位授与年月日	令和 4 年 3 月 1 8 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項
文部科学省報告番号	甲第 754 号
専攻名	総合理工学専攻
学位論文題目	核融合プラズマ対向材料としてのベリリウムの微細組織変化とガス吸蔵特性に関する研究 (Microstructural evolution and gas retention property for beryllium as a plasma facing material in fusion reactors)
論文審査委員	主査 島根大学准教授 宮本 光貴 島根大学教授 廣光 一郎 島根大学教授 山田 容士 島根大学教授 森戸 茂一 島根大学教授 荒河 一渡

論文内容の要旨

建設中の国際熱核融合実験炉（ITER）では、超高温のプラズマに直接面するプラズマ対向材料としてベリリウムを使用する予定である。プラズマ対向材料は、燃料粒子である水素同位体や核反応生成粒子のヘリウムや中性子に曝され、材料中には照射損傷が生じるとともに、ガス原子が蓄積する。これは、放射性物質であるトリチウムの取り扱いやボイドスウェリング等の機械的特性劣化といった安全性の問題へとつながるため、核融合炉を運転するうえで、プラズマ対向材料のガス吸蔵特性および微細組織変化を把握することは重要な課題である。一方で、ベリリウムの粉塵は人体に有害であり、その取扱い上の制約からベリリウムの研究例は他のプラズマ対向材料と比べて著しく少ない。さらに、一部のベリリウムを用いたプラズマ対向材料研究は、照射後試料の間接的な分析手法による過渡的現象の後に残存する静的照射効果に関する報告が主であり、材料中の動的なガス原子挙動を微細組織変化と直接関連付ける決定的な知見は依然として得られていないのが現状である。そこで本研究では、その場透過電子顕微鏡観察を用いて、照射下・昇温下における微細組織変化を観察し、ベリリウムのガス吸蔵特性と微細組織変化の相関性について調査した。

本論文は、6 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の学術的背景と研究目的を述べた。

第 2 章では、本研究で使用した実験方法や解析方法について説明した。

第 3 章では、イオン照射したベリリウムの昇温下におけるガス保持特性および微細組織の相関性を調査した結果をまとめた。重水素およびヘリウムをそれぞれ単独照射したベリリウム試料を、昇温脱離分光法とその場観察 TEM により評価した結果、高温域で重水素とヘリウムの脱離挙動

には明確な違いがあることを明らかにした。昇温にともない重水素バブルは比較的低温で収縮し、消滅するのに対し、ヘリウムバブルはより高温まで残存し、バブルの移動にともなう合体成長や瞬間的に消滅する様子が観察された。このことから、重水素は容易にバブルから解離するのに対し、ヘリウムは高温まで解離すること無く、バブルが試料表面まで移動することで放出されることが明らかになった。このガス保持特性の違いは、ガス種の安定性の違いにあると考え、ガス放出スペクトルから見かけの脱離の活性化エネルギーを評価したところ、ヘリウムガスの方が高い値を示し、ベリリウム内部ではヘリウムの方が安定であることが分かった。

第4章では、ベリリウムにおけるヘリウムバブルの内圧が、昇温下のバブル成長挙動に与える影響についてまとめた。走査型透過電子顕微鏡にエネルギー損失分光装置が搭載された STEM-EELS を用い、バブル内部の圧力を見積もることに成功し、バブルの内圧と形状との関係性を評価した。さらに内圧が異なるヘリウムバブルに着目し、昇温下におけるバブル成長を観察したところ、高圧のバブルの方が、低圧のバブルよりもバブルサイズが増加し、バブルの数密度が減少することが明らかになった。ベリリウムにおいて 973~1073 K にかけてヘリウムバブルの拡散が見られた。圧力の異なるヘリウムバブルの拡散について調べたところ、高圧のバブルの方が高い拡散係数を示すことが明らかとなった。

第5章では、ベリリウムよりも水素保持特性、高温下における化学安定性が優れているベリライドのプラズマ対向材料としての適用可能性を検討した。直線型高密度プラズマ発生装置 PISCES-B を用いて、単独重水素プラズマ曝露および重水素とヘリウムの混合プラズマ曝露実験を行った。また比較対象としてベリリウムに対しても同様の実験を行った。昇温脱離分光装置と SEM, TEM そして XPS を用いて分析を行ったところ、高密度プラズマに曝したベリライド試料表面においては、金属 Be で見られる特異なコーン状組織の形成が軽減されることが明らかになった。また、重水素プラズマに曝したベリライド試料は、金属 Be と比較し高い重水素保持量を示したが、プラズマ中へのヘリウムの混合により、その保持量が 1/3 以下に抑制されることが分かった。結果として、ベリライドは、重水素とヘリウムの混合高密度プラズマに曝される環境下において、水素保持、耐損耗性の観点から優位であることが明らかになった。

第6章では、本研究の成果を総括するとともに、今後の研究課題、展望について述べた。

論文審査結果の要旨

本論文は6章で構成されている。第1章では、研究の背景として核融合炉の研究・開発に関する国内外の取り組みの現状、および、その実現のカギとなるプラズマ・壁相互作用について説明されている。さらに、現在建設が進む国際熱核融合実験炉 ITER で使用が予定されているベリリウムについての課題が述べられ、研究の目的が示されている。第2章では、本研究で用いられたベリリウムのガス保持特性や微細組織変化の評価方法、原理が述べられている。第3章では、ベリリウム中の水素同位体とヘリウムの挙動について調べられ、その捕捉機構が大きく異なるといった結果が示されている。第4章では、第3章で得られた知見をもとに、ベリリウム中の水素同位体とヘリウムの保持量、捕捉エネルギー、またその温度依存性等について定量的に評価した結果がまとめられている。第5章では、より実用的な観点からベリリウム、およびベリリウム金属間化合物の核融合プラズマ対向材料としての適応可能性が検討されている。第6章では、結論として本論文のまとめが行われ、さらに、今後の展望について述べられている。

本論文研究で得られた知見は、照射および昇温下での微細組織変化を実時間でとらえる事により初めて明らかになったものであり、現象の解明には、ナノレベルでの微細組織の観察が不可欠

である事を示している。これらの成果は、申請者の緻密な実験計画の立案とそれを遂行する実行力に負う所が大きく、本博士論文により初めて明らかとなったものであると認められた。得られた成果については、関連論文として、2 件のレフェリー付き掲載論文が学術誌に出版されており、博士論文はこれらの公表論文に基づいて作成されていることを確認した。

また、公聴会では、審査委員の同席のもと、申請者本人が研究内容を 1 時間程度の口頭発表形式で丁寧に説明し、その後、委員および公聴会出席者による 1 時間程度の質疑応答が行われた。論文題目に沿った研究が本人により着実に進行しており新規性のある結果が得られていることが確認された。

以上のことから、審査委員会は本博士論文が博士（工学）の学位授与に十分値する内容であると、全員一致で判定した。