

Title	高粒子束ビーム照射による炭素材の損耗挙動に関する研究
Author(s)	大塚, 裕介
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3144025
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	大塚裕介
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第13911号
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科電磁エネルギー工学専攻
学位論文名	高粒子束ビーム照射による炭素材の損耗挙動に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 西川 雅弘 (副査) 教授 桂 正弘 教授 飯田 敏行

論文内容の要旨

本論文は、核融合炉心周辺で想定されている粒子束と同程度の高粒子束領域における炭素材の損耗挙動について D₃ビームと Ar ビーム照射によって得られた成果をまとめたものであり、全体で6章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景として核融合炉のプラズマ対向材である炭素材で生じる化学スパッタリングと照射促進昇華について述べ、本論文の目的と位置づけについて概説している。

第2章では、ビームの高粒子束化の方法として球面電極を用いることで $10^{22} \text{D m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の粒子束を達成できることを明らかにしている。また、照射試料の損耗率を求めるための測定法について述べている。

第3章では、高粒子束領域での化学スパッタリングによる炭素材の損耗率を調べている。低粒子束領域と高粒子束領域での損耗率の比較を行い、高粒子束領域では化学スパッタリングが抑制され、さらに損耗率が最大となる温度は高温側へシフトすることを明らかにしている。また、この結果をバルク中の水素密度に基づく質量平衡方程式から説明している。

第4章では、照射促進昇華による炭素材の損耗について調べ、高粒子束領域でも照射促進昇華が発生し、その基本的な現象は低粒子束と同じであることを確認している。しかし、粒子束 ϕ に対する損耗率は低粒子束とは異なり、粒子束に対して強く依存し $\phi^{-0.25}$ であることを明らかにし、ビームの入射角に対して損耗率はほとんど依存性が無いことを示している。さらに、照射促進昇華の反応過程の中にビーム照射によって生成した格子間原子が空孔あるいはシンクとの再結合によって消滅する過程を取り入れることによって、低粒子束から高粒子束にわたる広い粒子束の範囲で損耗率の粒子束依存性を解析し、実験結果とよく一致することを示している。

第5章では、炭素材の損耗を抑制する効果があるチタンやボロンを炭素に加えた炭素複合材の損耗挙動について調べている。まずチタンを炭素材に添加した RG-Ti の照射促進昇華による損耗率は炭素材より減少することを明らかにしている。また、ビーム照射後の RG-Ti の表面形状は温度と粒子束に依存しており、照射促進昇華が高粒子束で大きく減少することによって説明できることを示している。ボロンを添加した炭素材では化学スパッタリングが抑制されることを示している。また、ボロンの損耗挙動をボロン膜から放出されたスパッタ粒子を直接検出して調べ、B⁺の形でもスパッタされていくことを明らかにしている。

第6章は総括であり、本研究で得られた主たる結論をまとめている。

論文審査の結果の要旨

大型核融合装置では、黒鉛や炭素複合材等は低原子番号でかつ優れた耐熱性を持つことからプラズマ対向材として使われており、これらの材料はプラズマ特性を大きく改善してきた。しかし一方では、プラズマに接して粒子照射される炭素材は物理スパッタリングはもとより化学スパッタリングや照射促進昇華により損耗される。核融合実験炉設計段階において、これらの照射損耗とその抑制は重要な研究課題の一つになっている。本論文は従来の低粒子束ビームを用いたプラズマ・表面相互作用の研究結果のみで大型核融合装置のプラズマ対向材の損耗現象が説明し難いことから核融合炉心周辺で想定されている粒子束と同程度の高粒子束領域に着目し、他に先駆けて開発された高粒子束ビーム発生装置を用いて炭素材の損耗挙動についての研究をまとめたものであり、主な結果は次のとおりである。

- (1)高粒子束領域における炭素材の化学スパッタリングについては、 $1 \times 10^{20} \text{D m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の粒子束では920~1020 Kにかけて損耗率が最大値となり、重水素による化学スパッタリング率は0.03であると算出している。高粒子束での化学スパッタリングの最大値は低粒子束($\sim 10^{20} \text{D m}^{-2} \text{s}^{-1}$)での損耗率よりも約70%低くなっており、温度依存性において化学スパッタリングが最大となる温度は高温側へシフトすることを実験的に明らかにしている。
- (2)化学スパッタリングをモデル化した質量平衡方程式から高粒子束では高温側で低粒子束よりも捕獲サイトにある水素の密度が高くなるためピーク温度は高温側にシフトし、粒子束の増加ほど揮発性炭化水素の放出量が増えないために損耗率は減少していくことを指摘している。
- (3)照射促進昇華による炭素材の損耗については、温度に対する損耗率は活性化エネルギーが0.77eVで指数関数的に増加し、この活性化エネルギーは低粒子束領域での値とほぼ等しく、基本的な発生過程は高粒子束領域でも同じであることを明らかにした上で粒子束 ϕ に対する照射促進昇華の損耗率は、低粒子束での $\phi^{-0.07}$ とは異なり、高粒子束領域では粒子束に強く依存し $\phi^{-0.29}$ であることを明らかにしている。
- (4)照射促進昇華の反応過程の中にビーム照射によって生成した格子間原子が空孔とシンクとの再結合によって消滅する過程を取り入れると、低粒子束から高粒子束にわたる広い粒子束で実験結果の損耗率と一致することを示している。低粒子束では格子間原子はシンクとの再結合が支配的なため弱い粒子束依存性を示すが、粒子束が高くなるにつれて空孔との再結合による消滅が支配的になり、損耗率は強い粒子束依存性を示して大きく減少することを明らかにしている。
- (5)損耗抑制効果のあるチタンやボロンを炭素材に加えた炭素複合材の損耗挙動について実験を行っている。チタンを炭素材に添加したRG-Tiの照射促進昇華による損耗は炭素材より20~30%減少することを示している。一方、ボロンを3 wt% B添加した炭素材は化学スパッタリングを抑制するが、それ以上ボロンの添加量を多くしても損耗率は変化しないことを明らかにしている。

以上のように、炭素材特有の損耗現象である化学スパッタリングや照射促進昇華は、高粒子束領域($\sim 10^{20} \text{D m}^{-2} \text{s}^{-1}$)では従来の低粒子束ビーム実験の結果より損耗率が低減することを実験的に明らかにするとともに解析的に考察を加えている。また、高粒子束領域においても、チタンやボロンを炭素材に加えると損耗率がさらに抑制されることを明らかにしている。この結果はプラズマ対向壁の設計に対して有用な学術的基盤を与え、今後の核融合炉工学の発展に寄与することが大きい。よって本論文は博士論文として価値のあるものと認める。