

| | |
|-----------|--|
| 氏 名 | やま だ れい じ 山 田 禮 司 |
| 授 与 学 位 | 工 学 博 士 |
| 学位授与年月日 | 昭和 58 年 5 月 11 日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 5 条第 2 項 |
| 最 終 学 歴 | 昭和 48 年 3 月 東北大学大学院工学研究科原子核工学専攻 修士課程修了 |
| 学位論文題目 | 低エネルギーイオン衝撃による核融合装置第一壁候補材料のスパッタリングと水素再放出に関する研究 |
| 論文審査委員 | 東北大学教授 小岩 昌宏 東北大学教授 平林 真 東北大学教授 諸住正太郎 東北大学助教授 山口 貞衛 |

論 文 内 容 要 旨

核融合炉を実現するためには、プラズマ物理を中心にした幅広い炉工学的研究が必要であるが、プラズマに直接に面する壁、すなわち第一壁、とプラズマとの相互作用はプラズマの振舞いに直接的な影響を与える点で重要な研究課題である。とくにスパッタリングと水素原子の再放出は、それぞれ第一壁からプラズマ側への不純物の混入と、プラズマと第一壁間の水素のリサイクリングを評価する上で重要な現象である。しかし、現在第一壁の候補とされている各種の材料について、これらの現象に関するデータの蓄積は必ずしも十分とは言えない。特に、比較的低エネルギーイオンを照射した場合のデータが不足している。

本研究は、低エネルギーイオン ($0.1-6 \text{ keV H}^+$, $0.6-2 \text{ keV He}^+$, $\sim 3 \text{ keV Ar}^+$) 衝撃による第一壁候補材料のモリブデン (Mo), 黒鉛および炭化チタン (TiC) のスパッタリングと水素原子の再放出現象を中心に種々の実験測定を行ない、核融合技術の開発に資する知見をうることを目的とするものである。

第 1 章 序 論

本研究の背景, 意義, 目的を述べた。すなわち, 核融合装置におけるプラズマ-壁相互作用, 第一壁候補材料のもつべき必要条件, プラズマ中の不純物および水素のリサイクリングに関する問題点を述べた。特に, Mo については低エネルギーイオンによる物理スパッタリングの, 黒鉛と TiC

については化学スパッタリングの信頼できるデータを得ることが、第一壁材料としての評価をする上で重要であることを指摘した。

第2章 水素，ネオンおよびアルゴンイオンによるモリブデンの物理スパッタリング

イオン衝撃によるスパッタリング収率の測定は従来数多く行なわれてきたが、核融合技術の点から重要である低エネルギー H^+ イオンとMoの組合せに関するデータは、Finfgeldによる1 keV以上のエネルギーに対するものがあるのみである。これは、Moのスパッタリング収率が他の金属、たとえばCuなどに比し、著しく低く測定が困難であるという実験技術上の問題点があったためである。本研究では、このような低収率のスパッタリングを測定するためにオージェ電子分光法を利用し、0.2–0.5 keVの H^+ イオンによるMoのスパッタリング収率をもとめ、0.5 keVで 1×10^{-4} 、0.2 keVで 2×10^{-5} atoms/ionの値を得た。

イオン衝撃によるスパッタリングは第一壁材料の損耗およびプラズマの汚染という両面からできるだけ抑えることが望まれる。物理スパッタリングという現象自体は、入射イオンと標的の材料の組合せによりほぼ一義的に定まるものであり、これを本質的な意味で低下させることは不可能である。しかしながら、材料の表面を複雑な形状、たとえば蜂の巣状に加工して、スパッタされた原子を捕捉することによりスパッタリング収率を実効的に低下させるというアイデアが提唱されている。本研究においては種々の形状に表面を機械加工したMoについて、 Ne^+ イオン照射によるスパッタリング収率を測定し、実効的収率を $1/20 \sim 1/30$ に低減できることを示した。

スパッタリングの進行に伴って、当初平滑であった材料表面には円錐状突起などの凹凸が生じる。Be, Al, Wなど数種の金属の場合には、このような表面形状変化によってスパッタリング収率は低下することが知られている。Moについても同様な現象が起るか否かを調べた。照射量の増大につれて多数の突起が発生するが、その分布は一様ではなく粒界付近に偏在していることが走査電子顕微鏡観察により知られた。Moのスパッタリング収率は照射量が増加しても減少する傾向を示さないのは、突起の形状、分布がBeなどと異なるためと考えられる。

第3章 スパッタされたモリブデン原子の放出角度分布

スパッタリング現象については基礎的な見地から種々の理論的、実験的研究が行われてきている。研究課題の一つとしてスパッタされた粒子の放出角度分布がある。それに関する知見は、第一壁からのスパッタリングによるプラズマ中への不純物原子の混入を定量的に論ずるための基礎データとして、工学的にも必要である。この点から $Mo-H^+$ 、 $Mo-D^+$ の組合せに対して、数keV程度の入射エネルギーにおける放出角度分布を求めることが望ましい。しかしながら、これら組合せにおいてはスパッタリング収率が著しく小さいため測定が困難であり、従来 ^{40}Ar およびこれ以上の質量の入射イオンに対する結果しか報告されていない。このため本研究では、より軽い元素として ^{20}Ne をえらんでその放出角度分布を測定し、従来報告されているより重い元素についての結果と合せて検討し、 H^+ イオンの場合の放出角度分布を推測することを旨とした。垂直入射の場合、1.5 keV Ne^+ では放出角度分布が試料表面の法線方向を 0° とする cosine 関数で表わせ (cosine

分布), 0.6 keV Ne^+ ではスパッタ原子が 0° 方向に cosine 分布よりも強く放出される (over-cosine 分布) ことを明らかにした。この結果から, H^+ イオンの場合には, 0.5 keV程度で cosine 分布から over-cosine 分布になると推測した。斜入射の場合, 放出角度分布は前方放出となり, 1.5 keV Ne^+ よりも 0.6 keV Ne^+ において強い前方放出を示した。

スパッタリングによる試料表面形状変化が放出角度分布に与える影響を実験的に調べた報告はない。本研究では, Ne^+ イオンが斜入射したときのMo表面の形状変化と放出角度分布の関係を調べた。スパッタリングにより, 結晶粒界付近の表面が入射ビームに対してより平行になるように削られ, また, 平行に削られた領域が大きい程, 前方放出の傾向が著しい放出角度分布を示した。この結果から, 結晶粒界付近が優先的にスパッタされることが示唆された。

第4章 水素イオンと原子状水素による黒鉛材料の化学スパッタリング

黒鉛およびTiCのような炭素を含む材料を H^+ イオンで衝撃した場合には, いわゆる物理スパッタリング以外にメタン(CH_4)などの炭化水素の生成に伴う損耗, すなわち化学スパッタリングが起こる。とくに, 黒鉛においては化学スパッタリングが主要なスパッタリング機構であり, その詳細を把握しておくことは第一壁材料としての黒鉛の使用を検討する上で不可欠である。本研究においては, H^+ イオン照射による CH_4 生成収率の変化を室温-700 $^\circ\text{C}$ の温度範囲で測定した。収率は $2 \times 10^{18} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 以上の照射量において定常となり 1 keV, 525 $^\circ\text{C}$ 付近で $0.07 \pm 0.01 \text{ atoms/ion}$ の最大値をとる。定常収率は黒鉛の製造法や試料表面の結晶方向等によらず, ほぼ一定の値が得られた。照射初期の非定常状態では, 収率は黒鉛中の水素濃度に強く依存していることを明らかにした。定常収率が525 $^\circ\text{C}$ で最大となることは, 黒鉛中の水素濃度のみを考慮したErents等のモデルで解釈された。一方, 定常収率の入射エネルギー依存性は, 彼等のモデルに表面近傍での照射損傷の効果を取り入れたモデルにより説明できることを示した。

原子状水素を同時もしくは予備照射することによって, H^+ イオン照射による黒鉛の化学スパッタリングを低下させることの可能性を調べたが, 結果は否定的であった。

第5章 水素イオンによる炭化チタン材料の化学スパッタリング

TiCは高融点, 低原子番号材料であり第一壁として好ましい特性を備えているが, 化学スパッタリングの系統的な研究はなされていない。本研究では, H^+ イオン照射によるTiC表面における CH_4 生成収率を0.1-6 keVの入射エネルギー, 室温-700 $^\circ\text{C}$ の温度範囲で測定した。収率は $5 \times 10^{19} \text{H}^+/\text{cm}^2$ 以上の照射量で定常に達する。定常収率は温度および試料の種類によらずほぼ一定で, TiCにおいては, 物理スパッタリングによりTi原子が除去される過程が, 定常状態の化学スパッタリングを律速していると考えて, 実測された化学スパッタリングの温度依存性およびエネルギー依存性を説明した。一方照射初期の CH_4 生成収率の温度および照射量依存性の実験結果は, 非定常状態の収率が表面近傍の炭素濃度に強く依存していることを示唆している。このことは, 水素濃度に強く依存する非定常収率を示した黒鉛の場合と異なった特徴である。

第 6 章 モリブデンおよび炭化チタンにおける重水素の再放出

核融合装置の運転環境においては、第一壁は一定線量、一定温度で長時間照射されるのではなく、線量および温度の変動が常にある。水素原子の再放出に関しても、その温度および照射量依存性や、照射を中断後再照射したときの再放出の挙動を知る必要がある。本研究では、TiC および Mo に 6 keV D^+ イオンを衝撃し重水素の再放出率と保持量を 100 °C – 500 °C の温度範囲で測定した。照射を中断後再照射する場合、Mo 中に新たに保持される重水素の量は、温度の上昇とともに急激に減少するのに対し、TiC 中のそれは増加する。500 °C においては、TiC は Mo よりも 2 桁程度大きな重水素保持量を示し、照射中断中に捕捉重水素を再放出し、つぎの D^+ イオン照射中に新たな重水素を保持できることが明らかとなり、プラズマ密度制御の上から、TiC は第一壁材料として好ましい特性を有することが知られた。

前もって D^+ イオンを打ちこんだ Mo 試料に H^+ イオンを照射すると重水素が衝撃脱離して来る。この過程の照射量（照射時間）依存性は重水素放出断面積という量によって表現することができる。当初の D^+ イオンおよび衝撃放出のために照射する H^+ イオンの入射エネルギーをいずれも 0.5 – 6 keV の範囲で変化させ、種々の組合せに対する断面積を求めた。 D^+ イオンを 1 keV で打ちこんだ場合、 H^+ イオンのエネルギーによらず放出断面積はほぼ一定の値となる。 D^+ イオン、 H^+ イオンの入射エネルギーを同一にした組合せの場合には、放出断面積はエネルギーの増加とともに減少する、すなわち重水素放出は起こりにくくなることが知られた。また、総ての組合せに対して D^+ イオンの照射量の増加とともに、放出断面積は減少した。これらの結果は、低エネルギーの H^+ 、 D^+ イオンの照射によって導入される格子欠陥が重水素の保持、捕捉の上で無視できない影響を及ぼすことを示している。

第 7 章 総 括

第 2 ~ 第 6 章の結果を総括した。

審査結果の要旨

核融合炉を実現するためには、プラズマ物理を中心とした幅広い炉工学的研究が必要であるが、中でも材料研究の重要性が近年認識されてきた。核融合炉材料の中でもプラズマに直接面する壁、すなわち第一壁とプラズマの相互作用はプラズマのふるまいに直接的な影響を与えるから、それに関する研究はとくに重要である。本論文は第一壁の候補材料であるモリブデン、黒鉛および炭化チタンについて、低エネルギー・イオン衝撃によるスパッタリングと水素の再放出挙動を明らかにすることを目的として行った研究の成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章および第3章ではモリブデンの物理スパッタリングについてのべている。低エネルギーの軽イオンによるモリブデンのスパッタリング収率は著しく低く、従来測定されていなかったが、本研究ではオージェ電子分光法を利用し、0.2～0.5 keV 水素イオンによるスパッタリング収率の測定に成功している。またスパッタリングの際のモリブデン原子の放出角度分布を測定し、衝撃イオンの入射角度により前方放出の程度が変化することを示している。

炭素を含む材料に水素イオンが入射すると、物理スパッタリング以外にメタンなどの炭化水素の生成による損耗、すなわち化学スパッタリングが起る。

第4章では黒鉛、第5章では炭化チタンについて、化学スパッタリング収率の入射エネルギーおよび温度依存性を測定した結果をのべている。黒鉛では525℃付近で定常収率が最大となるのに対し、炭化チタンでは温度によらずほぼ一定値を示すことを見出している。黒鉛の場合、水素イオンエネルギーが1 keV 付近のとき最大の収率を示すことを見出し、このエネルギー依存性を説明するために照射損傷効果を取り入れた新しいモデルを提案している。

第6章ではモリブデンおよび炭化チタンにおける水素の再放出挙動を詳しく調べ、プラズマ密度制御の点から炭化チタンが好ましい特性を有すると結論している。

第7章は総括である。

以上要するに、本論文は核融合装置における第一壁とプラズマの相互作用、とくにスパッタリングと水素再放出に関して種々の実験を行い、多くの知見を得たもので原子核工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。