

博士学位論文審査要旨

2018年 1月 16日

論文題目： Spectroscopy Study of Hydrogen Particle Reflection at Helium-Induced Fuzzy Tungsten Surface
(ヘリウム誘起微細構造化タングステン表面での水素粒子反射の分光法による研究)

学位申請者： 土居 謙太

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 和田 元

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 粕谷 俊郎

副査：理化学研究所播磨研究所 上席研究員 山岡 人志

要 旨：

本論文は、将来のエネルギー源として期待される核融合装置の運転において、核融合反応によって生成される He の灰を装置から除去するダイバーターと呼ばれる装置を構成するタングステン金属表面での水素の反射について行った研究結果について纏めている。タングステンダイバーター表面は He の照射によって Fuzz と呼ばれるナノ構造を形成する。形成された Fuzz 表面は平坦なタングステンよりも水素反射率が低くなるが、具体的な測定データはこれまで報告されていなかった。そこで水素反射率を測定するための装置を構築し、ダイバーターの装置性能を予測する上で必要となる基礎データを採取している。論文ではタングステン表面から反射される水素の正・負イオンを検出する方法と、バルマー α 光の分光分析による 2 種類の方法により計測される反射水素原子の速度分布関数測定結果を報告している。また測定で得られた速度分布関数を、表面衝突カスケード計算プログラム、ACAT コードのソースコードに変更を加えて得た計算結果と比較・検討している。特に分光法を用いた計測においては、申請者独自の発想により原子からの線スペクトルとともに放射される分子線スペクトルによる影響を低減するため、観測視線をプラズマ外に設定する新たな手法を用いて 300 電子ボルト以下の入射エネルギー領域での固体反射後の水素原子速度分布関数を、これまでにない精度で測定することに成功し、結果がシミュレーション結果と良く一致すると結論づけている。

本研究の成果は、単なる Fuzz 化タングステン表面の反射率測定に留まらず、低エネルギー領域における粒子反射計測を初めて可能にしたものとして高く評価できる。よって本論文を、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分高いものと認める。

総合試験結果の要旨

2018年 1月 16日

論文題目： Spectroscopy Study of Hydrogen Particle Reflection at Helium-Induced Fuzzy Tungsten Surface
(ヘリウム誘起微細構造化タングステン表面での水素粒子反射の分光法による研究)

学位申請者： 土居 謙太

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 和田 元

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 粕谷 俊郎

副査：理化学研究所播磨研究所 上席研究員 山岡 人志

要 旨：

本論文の提出者は同志社大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程（前期課程）を2015年3月に修了し、2015年4月に本学理工学研究科電気電子工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在、在籍中である。

本論文の主たる内容は *Physica Scripta*, T167, 014044 (2016), および *AIP Conference Proceedings* No. 1869, 020010 (2017) に掲載済みであり、既に十分な評価を受けている。2017年12月22日午後3時より二時間に亘り、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれた。講演後種々の質疑が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。公聴会終了後、審査委員による学力確認のための口頭試験を実施したところ、論文提出者の十分な学力を確認することができた。また、博士課程在学中に国際会議に第一著者として五件の論文を提出して自ら英語で発表を行っているのに加え、半年間英国オックスフォード大学ラザフォードアップルトン研究所にて共同研究を行い、成果を挙げるなど高い英語運用能力を有するものと認められた。以上論文提出者の専門分野における学力、ならびに語学力は十分であることを確認した。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士学位論文要旨

論文題目：Spectroscopy Study of Hydrogen Particle Reflection at Helium-Induced Fuzzy Tungsten Surface
(ヘリウム誘起微細構造化タングステン表面での水素粒子反射の分光法による研究)

氏名： 土居 謙太

要旨：

本研究では、低粒子エネルギー領域における金属表面からの反射水素原子を水素原子バルマーアルファ (H α) 発光ドップラー分光計測によって検出する実験系を構築し、ヘリウムによるタングステン表面の微細構造化が水素粒子反射特性に与える影響を調査した。

核融合炉排気系に設置されるダイバータでの水素粒子反射特性は炉の稼働性能を決定する大きな要素である。反射粒子の速度分布関数や反射係数は境界領域プラズマモデルに入力定数として用いられる。現在南仏カダラッシュで建設が進む国際熱核融合実験炉 ITER では、ダイバータ材料としてタングステンの使用が決定された。水素プラズマとタングステン固体壁との相互作用に関する研究は古くから存在するが、低エネルギー領域に対しては水素粒子反射特性のデータベースは数値シミュレーションに基づいて提供されているのみである。また、近年、ヘリウムプラズマの照射効果によってタングステン表面に微細構造物が形成されることが明らかとなった。表面温度が 1000 K 以上の高温状態でヘリウムを照射すると現れるその表面構造は Fuzz と名付けられ、名前の通りナノメートルサイズの繊維状の構造物が樹木状に生い茂っているような姿で観測される。この構造物は核融合炉ダイバータ表面にも形成される可能性がある。タングステン表面 Fuzz 構造化がスパッタ収率に与える影響はすぐに D. Nishijima らにより調査されたが、水素粒子反射特性に与える影響についてはこれまでのところ報告がない。

従来より、1 keV 以上の入射エネルギーに対する反射粒子のエネルギー・角度分布計測はイオンビームを用いた実験に基づいて行われている。イオンビームを固体試料表面に入射し、反射イオンのエネルギー・角度分布を磁気質量分析器により計測する。本論文ではこのイオンビームに基づく計測手法を粒子法と名付ける。本研究では、タングステン表面が Fuzz 構造化することによって水素イオン反射強度が低下することを粒子法により明らかにした。1 keV の水素イオンを表面に入射した場合には、Fuzz 表面構造化タングステンからの反射イオン強度は表面構造を持たないタングステンからの強度と比較して 1/3 程度まで低下した。核融合炉ダイバータプラズマは数 100 eV 以下の比較的低温になることが予測されるが、粒子法では数 100 eV 以下の低エネルギー領域における計測が困難である。低エネルギー領域ではイオンビームへの空間電荷効果が顕著になるため、十分なイオンビーム量を確保することが難しい。加えて、金属表面に入射するイオンの大半は中性原子として反射することが知られており、主に中性反射原子が核融合炉ダイバータプラズマへ影響を与えることが予測される。実際に、ダイバータ入射時にシースで加速されたイオンが中性粒子として反射しダイバータプラズマの温度を上昇させることが報告されていることから中性原子として反射する粒子の速度分布や反射係数を調査する必要がある。

本研究では、まず低粒子エネルギー領域での固体壁からの中性反射原子の検出手法の開発を行った。磁化水素プラズマ中に負バイアスを印加した金属試料を曝し、反射原子からの H α 発光スペクトルドップラー成分を検出する手法を考案した。イオンはプラズマから直接シースを経て試料表面へ加速され入射するため、イオン輸送距離を短縮することができ、空間電荷効果によるイオンビーム発散の問題を解決することができる。一方、反射水素原子からの H α 発光は微弱であ

ることから、背景プラズマからの高強度発光による低信号対雑音比が問題となる。本研究ではプラズマ周辺部を観測することにより信号対雑音比を大幅に向上することに成功した。本研究によって、反射水素原子はプラズマ周辺領域の水素分子との衝突によって $n=3$ へ励起され $H\alpha$ 発光ドップラー成分を形成することが明らかになった。この事実を応用し、観測視線をプラズマから外すことで背景プラズマからの信号を抑えた反射原子からの微弱信号の検出が可能となった。反射原子からの信号は背景信号の 1%未満の強度であったのに対し、本研究で開発した手法では 10%程度まで向上した。

表面が Fuzz 構造化したタングステン試料からの水素粒子反射特性の計測を上記の $H\alpha$ ドップラー分光計測に基づく手法で行った結果、200 - 300 eV の入射粒子エネルギー領域では、反射する水素原子の量 (粒子反射係数) が表面構造を持たないタングステンと比較して 1/2 程度まで減少することが明らかになった。Fuzz 表面構造化タングステン試料へのプラズマの定常照射によって、表面の Fuzz 層は除去される。この事実より、照射中は $H\alpha$ ドップラースペクトルの時間変化を計測し、Fuzz 層が存在する計測開始時のスペクトル強度と Fuzz 層が除去された後のスペクトル強度を比較することで、粒子反射係数の低下を相対的に評価した。実際の境界領域プラズマモデルでは反射係数の絶対値が必要であるが、過去に報告されているデータから今回の Fuzz 試料の反射係数の絶対値を見積もることができる。表面構造を持たないタングステンからの水素粒子反射係数は W. Eckstein の数値シミュレーションにより、300 eV の水素粒子入射において ~ 0.6 ということが明らかになっている。ここから、Fuzz 試料は粒子反射係数を 1/2 に低下させるという実験結果を考慮して、Fuzz 試料からの水素反射係数は 300 eV の水素粒子入射では ~ 0.3 となることが見積もられる。今後、この結果をもとに核融合炉ダイバータプラズマのモデル計算を行うことでダイバータ表面 Fuzz 層形成によるダイバータプラズマへの影響を調査することが可能になる。

最後に、本研究で開発した $H\alpha$ ドップラー分光による水素反射原子検出法を適用することで、反射粒子の速度分布を計測することが可能になる。数 100 eV 以下の低粒子エネルギー領域における信頼性の高い実験データは多く存在しないため、本研究で開発した手法は今後の実験データの蓄積に貢献できる。また、本研究では、容易ではないと考えられていたタングステン表面 Fuzz 層の除去が水素プラズマ照射によって比較的簡単に起こった。水素のタングステンスパッタリング閾値は 443 eV であることに対して本研究では 200 eV の水素イオン照射でも 2000 秒程度の短い間で Fuzz 層が除去された。プラズマ照射による試料表面の高温化が Fuzz 層除去に寄与していると考えられるが、背景にある物理の説明には更なる研究が必要であり、核融合研究で解決すべき新たな工学的課題を浮き彫りにした。