

氏名	寺門 明紘
学位の種類	博士 (理学)
学位記番号	博 甲 第 8941 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Study of Hydrogen Recycling and Plasma Detachment by Utilizing End-loss Plasma of the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror
(GAMMA 10/PDX タンデムミラーの端損失プラズマを活用した水素リサイクリングと非接触プラズマに関する研究)

主査	筑波大学 教授	工学博士	中嶋 洋輔
副査	筑波大学 教授	理学博士	坂本 瑞樹
副査	筑波大学 准教授	理学博士	假家 強
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	江角 直道

論 文 の 要 旨

本論文は、核融合プラズマを安定に維持するために必要不可欠である周辺プラズマの粒子制御とダイバータへの熱・粒子束低減に関する問題に、水素リサイクリング過程と非接触プラズマの原子分子過程の観点から考察し、プラズマと材料の相互作用に起因する水素分子の放出とその状態を明らかにすることと、分子活性化再結合 (MAR) 反応に起因する非接触プラズマの水素の振る舞いを明らかにしたものである。

第 1 章では、本研究の背景・目的が述べられている。第 2 章では、水素リサイクリングと非接触プラズマに関する原子分子過程が述べられている。第 3 章では、本研究で用いた実験装置および計測装置についての説明が述べられている。第 4 章では、高温タングステンターゲットを用いた水素リサイクリングに起因する脱離水素分子の特性評価について述べられている。第 5 章では、分子活性化再結合に起因する非接触プラズマの原子分子過程に関する考察が述べられている。第 6 章では、プラズマの密度変調に対する非接触プラズマの応答の評価に関して述べられている。第 7 章は本論文が総括されている。

タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10/PDX では、端損失プラズマを活用してダイバータプラズマの物理研究が行われている。GAMMA 10/PDX はバックグラウンドの中性ガス圧力が非常に低く、水素リサイクリング研究に有利な特徴を有する。また、GAMMA 10/PDX はダイバータ実験領域とプラズマ生成領域が分割されており、非接触プラズマの物理研究に活用する

ことができる。本論文では、プラズマと材料の相互作用に起因する水素分子の放出とその状態を明らかにすることと、MAR に起因する非接触プラズマの水素の振る舞いを明らかにすることを目的として、GAMMA 10/PDX の端損失プラズマを活用してダイバータ模擬実験が行われている。

GAMMA 10/PDX の西エンド領域に設置されているダイバータ模擬実験モジュール(D-module)には、プラズマ対向材料として V 字ターゲットが設置されており、端損失プラズマを照射することができる。水素リサイクリングに起因する脱離水素分子の特性評価のために、V 字ターゲットの表面温度を室温(~300 K)から 573 K まで制御し、GAMMA 10/PDX の端損失プラズマの照射実験が行われている。ターゲット温度を室温から 573 K まで上昇させると、ターゲット前面のプラズマの H_{α} 線強度と H_{β} 線強度が約 2 倍増加し、電子密度は約 20% 増加したことから水素リサイクリングが促進されることを示している。ターゲット温度の変化に対して電子温度はほぼ一定(~30 eV)であったことから、電子密度の増加率を大幅に上回るバルマー線強度の増加の原因は、基底準位の水素原子の増加および電子衝突励起の増加ではないことが示唆されている。ターゲット温度が室温から 573 K まで変化しても振動励起温度はほとんど変化せず約 3300 K であり、ターゲット温度を室温から 573 K まで上昇させると、Fulcher- α band Q1-branch の発光強度(I_{Q1})は 2 倍程度上昇したことが示されている。 I_{Q1} は電子温度と水素分子振動温度が一定である場合は水素分子密度に比例するため、水素分子密度がターゲット温度とともに増加することを明らかにしている。ターゲット温度より振動励起温度の高い原因が、タングステン表面での Hot-atom recombination に起因する振動励起分子の生成によるものであることを示している。振動励起分子の解離の速度係数は大きく、励起原子に直接解離する。したがって、ターゲット温度の増加とともにバルマー線強度が増加した原因として、ターゲット温度の増加とともに脱離する振動励起分子の数が増加し、励起原子へと解離したためであると考察している。また、電子密度の増加は励起原子の電離に起因していると考えられている。ターゲット温度上昇にともなう水素リサイクリングの促進は、タングステン表面から脱離する振動励起分子の増加に起因することを明らかにしている。

分子活性化再結合による非接触プラズマの原子分子過程の評価のために、D-module へ水素ガスの追加供給による非接触プラズマ生成実験が行われている。D-module に水素ガスを追加供給すると、中性ガス圧力の上昇とともに電子密度~25 eV から~1eV 以下まで減少し、中性ガス圧力が 1.5Pa までは電子密度が増加し、その後ガス圧力の増加とともに減少する密度のロールオーバーが観測されている。電子密度が減少するにもかかわらず、 H_{α} 線強度($I_{H_{\alpha}}$)が増加し続けたことから、MAR に起因した非接触プラズマが生成されたことが示されている。中性ガス圧力が 12 Pa 以上で、高励起原子からの発光が急激に増加し、 $n_H(n=4)$ よりも $n_H(n=5)$ が大きい反転分布が形成されることが示されている。中性ガス圧力と水素分子の振動励起温度から推定した振動励起分子の占有密度 $n_{H_2}(v)$ は、非接触プラズマが生成されると 2 桁ほど増加することが示されている。 $n_{H_2}(v)$ の増加は $H_3^+ + e \rightarrow H_2(v) + H$ (DR3 反応)により作られる振動励起分子に起因することが示されている。 $I_{H_{\alpha}}$ の増加は $n_{H_2}(v)$ の増加により $H_2(v) + e \rightarrow H + H$ (DA 反応)が増加し、それに続く $H + H^+ \rightarrow H + H(n=2, 3)$ (MN 反応)の増加に起因することを明らかにしている。また、 $I_{H_{\alpha}}$ の減少は電子温度の低下に伴う DR3 反応の分岐比の変化($H_3^+ + e \rightarrow 3H$)による $n_{H_2}(v)$ の減少に起因すると考察している。この実験では電子密度が低く三体再結合による高励起原子の生成は考えにくいいため、水素分子イオン

(H_2^+)と負イオンの相互中性反応 $H_2^+ + H^- \rightarrow H_2 + H(n \geq 2)$ (MN2 反応)による $H(n=4-6)$ の生成が一因となっていると考察している。また、12Pa 以上では $n_{H_2}(v)$ が減少するため、DA 反応による水素負イオンの生成は減少するはずである。これらの考察から、MN2 反応に寄与する水素負イオンは Resonant ionization process によって作られることを明らかにしている。

密度変調に対する MAR による非接触プラズマの応答を明らかにするため、D-module で非接触プラズマを生成し、GAMMA 10/PDX のメインプラズマに 70kW の ECH 追加印加が行われている。非接触プラズマ生成時、V 字ターゲットのコーナー付近において H_β 線強度に対する H_α 線強度の比($I_{H\alpha}/I_{H\beta}$)が ECH 印加により増加したことから、ECH 印加時は MAR の発生量が V 字ターゲットのコーナー付近で増加することが示されている。また、V 字ターゲットのコーナー付近での $I_{H\alpha}$ の ECH 印加による増加率は電子密度の増加率よりも大きい。V 字ターゲットコーナー付近の電子温度は ECH を印加しても変化していないことから、 $I_{H\alpha}$ の増加は水素分子密度の増加を示している。この水素分子密度の増加は、ターゲットへの粒子フラックスの増加による水素リサイクリングの増加に起因すると考察された。また、粒子フラックス増加による MAR 発生量の増加はターゲット表面付近に局在化することを明らかにしている。

審 査 の 要 旨

[批評]

核融合プラズマの安定維持のためには、水素リサイクリングと非接触プラズマに関する基礎過程の理解が重要である。この論文では、タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10/PDX の特徴を生かし、端損失プラズマを活用してこれらの課題に取り組み、プラズマと材料の相互作用に起因する水素分子の放出とその状態を明らかにすること、並びに分子活性化再結合 (MAR) に起因する非接触プラズマの水素の振る舞いについての研究がまとめられている。高温ターゲットを用いた実験において、ターゲット温度上昇とともに水素リサイクリングが促進することを示している。この時、電子密度の変化と水素のバルマー線強度の変化の違いに着目し、分子からの発光強度の詳細計測と解析、考察を通して、ターゲット温度上昇にともなう水素リサイクリングの促進は、タングステン表面から脱離する振動励起分子の増加に起因することを明らかにしている。ダイバータ模擬プラズマに対して追加の水素ガス供給実験を行い、分光計測を中心に詳細な解析と考察を行い、分子活性化再結合の生成過程が明らかにされている。また、追加の水素ガス供給量を増加させると、中性ガス圧力が 12 Pa 以上で、高励起原子からの発光が急激に増加し、 $n_H(n=4)$ よりも $n_H(n=5)$ が大きい反転分布が形成されることを示し、この現象を引き起こす原子分子過程として、Resonant ionization process が重要な役割を果たすことを明らかにしている。さらに、密度変調に対する非接触プラズマの応答を解析し、粒子フラックス増加により分子活性化再結合の発生量が増加し、その増加はターゲット表面付近に局在化することを明らかにしている。以上の結果は、周辺プラズマにおける重要なリサイクリング現象を解明する上での有益な知見を与えると共に、ダイバータ開発に対して重要な非接触プラズマ形成に関する MAR の重要性を指摘するものであり、学位論文として十分価値のあるものであると評価できる。また、学位論文審査における質問に対する的確な回答が得られている。

〔最終試験結果〕

平成 31 年 2 月 19 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。