

Study of Hydrogen Recycling and Plasma Detachment by Utilizing End-loss Plasma of the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror

著者（英）	Akihiro Terakado
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
year	2019
その他のタイトル	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
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2018
報告番号	12102甲第8941号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00156558

専攻名	物理学
学籍番号	201630074
学生氏名	寺門 明紘
学位名	博士 (理学)
指導教員	坂本 瑞樹

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)

1. 研究目的

核融合プラズマを安定に維持するためには、周辺プラズマおよびダイバータの熱・粒子制御とプラズマと壁やダイバータ板との相互作用の理解が重要な課題である。ダイバータでの熱・粒子束低減には非接触プラズマの生成による非接触ダイバータが最も有望な解決策であると考えられている。非接触プラズマの生成には電離を上回るプラズマの体積再結合の発生が必要不可欠であり、比較的高温でのプラズマ再結合のメカニズムの解明が重要である。比較的高い電子温度($T_e \sim 3$ eV)において、電離よりも反応速度係数が大きい分子活性化再結合(MAR)に注目した研究が行われている。様々な装置で MAR の原子分子過程が実験的に研究されているが、中性粒子の状態や中性粒子の分布などの条件により主要な反応過程が異なることが報告されている。そのため、非接触ダイバータにおける MAR の可能性の検討のために、MAR の原子分子過程の統一的な理解が必要である。

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別れており、非接触プラズマの物理研究に活用することができる。本研究では、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以下の実験および考察を行った。

2. 結果・考察

2.1. 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

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。本研究では、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を行った。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がわかった。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)であり、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た。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 であった。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。 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が分かった。ターゲット温度より振動励起温度が高いのは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と考えられる。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のは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えられる。また、電子密度の増加は励起原子の電離によると考えられる。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が明らかになった。

2.2. 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および密度変調に対する応答の評価

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 ~ 1 eV 以下まで減少した。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た。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わかった。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分かった。

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わかった。 $n_{H_2}(v)$ 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と考えられる。 $I_{H\alpha}$ 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がわかった。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えられる。本研究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えられる。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。したがって、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が明らかとなった。

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 追加印加を行った。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。これから、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わかった。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えられる。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が明らかとなった。

3. 総括

プラズマと材料と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ため、高温タングステンターゲットへのGAMMA 10/PDX端損失プラズマを照射する実験を行い、ターゲット板の温度上昇に伴い水素リサイクリングが促進されることが示された。ターゲット板に照射される粒子フラックスが大きい場合、ターゲット板上でのHot-atom recombinationに起因してターゲットから脱離する水素分子は振動励起状態であることが明らかとなった。ターゲット温度の上昇によりターゲットから脱離する振動励起水素分子の数の増加およびその解離による励起原子の生成により水素リサイクリングが促進されたと考えられる。

MARに起因する非接触プラズマにおける水素の振る舞いを明らかにするため、D-moduleダイバータ模擬プラズマへの水素ガス追加供給によりMARによる非接触プラズマの生成実験を行い、原子分子過程についての考察を行った。MARにおける非接触プラズマの $H\alpha$ 線強度の変化に関して、プロトン化水素分子と電子の解離性再結合により作られる振動励起分子が大きく寄与していることが明らかとなった。また、MARにおける反転分布の形成は水素分子イオンと負イオンの相互中性化反応に起因することがわかった。反転分布形成時は振動励起分子の数が減少しており水素分子の電子付着解離による負イオン生成は主要ではないため、水素分子イオンと負イオンの相互中性化反応に寄与する負イオンはResonant ionization processにより作られることが明らかになった。GAMMA 10メインプラズマへのECH追加印加により、再結合プラズマに流入する粒子束の増加に起因してV字ターゲット表面近傍で水素分子密度が増加しMARの発生量が増加することが明らかとなった。