小特集

プラズマ原子・分子過程の展望

5. 最近の実験的なトピックス

5.1 ダイバータプラズマ中の分子活性化再結合過程

大野 哲 靖

(名古屋大学大学院工学研究科)

Recent Topics in Experiments Molecular Activated Recombination Processes in Divertor Plasmas

OHNO Noriyasu

Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan

(Received 20 August 1999)

Abstract

Molecular processes in detached divertor plasmas, especially molecular activated recombination processes, are briefly reviewed. Several reaction chains related to the volumetric recombination process, that are associated with the vibrationally excited hydrogen molecule are explained. Experimental observations of the molecular activated recombination are also reported.

Keywords:

molecular activated recombination, divertor, detached plasma, vibrationally excited hydrogen molecule

5.1.1 はじめ

ダイバータは、環状閉じ込め核融合装置において炉心プラズマから周辺に流出してくる膨大な熱および粒子束の制御を担う仕組みである。この核融合実験装置におけるダイバータ領域のプラズマを低温プラズマのトピックスとすることに違和感があるかもしれない。しかし最近の研究では、中性ガスとの相互作用により電子温度1 eV程度の低温高密度プラズマが生成され、気相中での体積再結合過程によりダイバータ板への熱および粒子束の著しい減少が観測されている[1-10]。このプラズマは、非接触プラズマ (detached plasma) と呼ばれている。

非接触プラズマにおける体積再結合過程の実験的検証は、ダイバータ配位のトカマク実験装置や直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置で行われている[11-18]。

author's e-mail: ohno@ees.nagoya-u.ac.jp

ライマン系列およびバルマー系列の放射ならびに三体再結合に伴う連続スペクトルと高励起準位からの輝線発光スペクトル群が観測され、実際にダイバータ領域の非接触プラズマにおいてプラズマ体積再結合が起こっていることが実験的に検証されている。

現在の核融合研究は、10 keV という超高温の炉心プラズマから1 eV 以下の低温のダイバータプラズマまで、幅広いパラメータ領域に広がっている。このような低温ダイバータプラズマ中では、これまでの核融合研究ではあまり考慮されてこなかった分子が関与した物理過程が重要になってくると考えられる。

一例として、化学スパッタリングによる炭化水素の発生とその輸送過程の研究があげられる。清水らはモンテカルロシミュレーションによる不純物輸送解析と実験結

果との詳細な比較により、ダイバータ領域における炭素不純物の密度分布を考える上で、化学スパッタリングによる炭化水素の発生が重要であることを明らかにした[19]。

ダイバータプラズマ中の原子・分子過程は多岐多様であるため、著者の力量では限られた紙面ですべてを紹介することはできない。本稿では、最近注目されている非接触プラズマ中での分子過程に関連した再結合過程に焦点を絞り話を進めたいと思う。ダイバータ研究の一般的な解説については、すでに本学会誌においていくつかなされているのでそちらを参考にされたい[20,21]。

5.1.2 分子活性化再結合

(a)分子活性化再結合の基礎過程

R. Janev を始め、D.E. Post, S.I. Krashennnikov, A.Yu. Pigarov らの一連の理論研究によって、ダイバータプラズマ領域において、励起状態にある水素分子が関与した新しい再結合過程、いわゆる分子活性化再結合(Molecular Activated Recombination: MAR)の存在が予測されている[22-24]。この分子活性化再結合過程は以下の反応式で表される。

ここで $\text{H}_2(v)$ は振動励起状態にある水素分子を表し、 A^+ はプラズマ中の正イオンである。(a)では、まず振動励起状態の水素分子と電子との衝突により水素負イオンが形成され、この負イオンと正イオンにより荷電交換再結合過程が起こる。また(b)では、振動励起状態の水素分子とイオンとの衝突により生成された分子イオンの解離性再結合に基づく反応過程である。いずれの反応も振動励起状態の水素分子の存在が重要である。ダイバータプラズマ中の正イオンとしては、水素と核融合反応生成物であるヘリウムが主であると考えられる。この時、水素イオンに対しては上記の反応過程は

と書くことができる。またヘリウムイオンに対しては、

となる。

反応(f)においては、 $(\text{HeH})^+$ という分子イオンが形成される。核融合研究においては目新しい分子イオンである $(\text{HeH})^+$ は、宇宙プラズマ研究においては宇宙に多量に存在する水素とヘリウムから構成される最も簡単な極性分子として古くから注目され、これまで数多くの研究が行われている。また $(\text{HeH})^+$ の検出も、赤外吸収分光法を用いた $(\text{HeH})^+$ の回転励起間遷移の計測により確認されている[25-27]。

ところで、上記の分子活性化再結合過程においていくつかの留意すべきことがある。

これまでよく知られている放射および三体再結合

とは違い(本稿では以下、両再結合過程を総称して電子-イオン再結合過程、Electron-Ion Recombination: EIR と呼ぶことにする)、分子活性化再結合は原子、正イオン、負イオン、分子、分子イオン間の複雑な反応連鎖により起こる現象である。(a),(b)以外にも様々な反応過程が存在し、そのいくつかは分子活性化再結合と競合する。例えば(d)中の水素分子イオンの解離性再結合 $\text{H}_2^+ + e \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}$ に対しては、 $\text{H}_2^+ \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}^+$ という競合過程が存在し、この解離過程は比較的大きな速度係数を持つことが指摘されている[28]。この解離過程が主であるとなると、水素イオンから結局水素イオンが生成されることになり、分子活性化再結合は起こらないことになる。

また、最終的に生成される原子の励起状態も重要である。水素イオンに対する再結合過程(c)においては、最終的に荷電交換再結合により生成される水素原子の一つは基底状態にあるが、もう一つの水素原子は量子準位 2 ~ 4 の励起状態にあることが知られている。また(d)の水素分子イオンの解離性再結合においても、水素原子の一つは量子準位 2 ~ 4 の励起状態にある。(c),(d)の反応により生成された励起水素原子は、基底状態にある水素原子に比べて極めて容易に電離してしまう。もし生成された励起水素原子がプラズマ中で電離すると、この場合も分子活性化再結合は実効的に機能しないことになる。このように最終的に生成される水素原子の励起状態の定量的評価は分子活性化再結合を考える上で極めて重要である

ことがわかる。最近、解離性再結合により発生した水素原子の励起状態について精密な理論解析がなされており、水素原子の励起状態の電子エネルギー依存性が求められている[29]。

上記の種々の過程を定量的に評価し、実際に分子活性化再結合がプラズマ中で再結合過程として機能するかを明らかにするためには、3章で述べられている水素原子・分子を含んだ衝突輻射モデルによる解析が必要となる。

Fig. 1は衝突輻射モデルの一つであるCRAMDコードにより計算された水素プラズマ中での分子活性化再結合(MAR)の速度係数 S_{MAR} の電子温度依存性を示している。Fig. 1より明らかなように、電子温度0.5 eV以上で電子-イオン再結合の速度係数 S_{EIR} に比べて非常に大きな値をとることがわかる。一方プラズマ密度の増加に対して S_{EIR} が大きくなるのに対して、逆に S_{MAR} は小さくなる。これは、先に述べた励起原子の再電離効果によるものと考えられる。また、電子温度1.0 eV以下での S_{MAR} の急激な減少は、分子活性化再結合に必要な励起水素分子の生成効率の低下により決まっている。また水素プラズマ中では、解離性再結合を通じた分子活性化再結合である(d)が支配的である。

以上の分子活性化再結合と電子-イオン再結合を考慮すると、プラズマ中の粒子バランスは以下のように書くことができる。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = S_{ion} n_e n_0 - S_{EIR} n_e^2 - S_{MAR} n_e n_{H_2} \quad (1)$$

ここで、 n_0 は中性粒子の密度、 n_{H_2} は水素分子密度、

Fig. 1 Rate coefficients as a function of electron temperature.

S_{ion} は電離の速度係数である。右辺第2項は電子-イオン再結合による粒子損失を、右辺第3項は、分子活性化再結合による粒子損失を表している。Fig. 2は、右辺第3項と第2項の比

$$R = \frac{S_{MAR} n_e n_{H_2}}{S_{EIR} n_e^2}, \quad (2)$$

の電子温度依存性を示している[30]。あとで紹介する直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置の水素プラズマパラメータ ($n_e < 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $P_{H_2} \sim \text{数 mTorr}$)では、分子活性化再結合が主な粒子損失過程となることが期待される。電子-イオン再結合が主な粒子損失過程となるには、より低温で高密度の水素プラズマが必要となるが、これはダイバータ配位のトカマク実験装置 Alcator-C MODなどで達成されている[13]。

(b)他の反応過程

以上の過程では水素分子 H_2 およびイオン H_2^+ までが考慮されていた。しかし、水素分子密度が大きい場合には、水素分子イオン H_3^+ を考慮する必要がある。

水素プラズマ中の分子活性化再結合過程(d)においては分子イオン H_2^+ が生成された後、電子衝突により解離性再結合が起こる。しかし水素分子密度が大きい場合は以下の競合反応により H_3^+ が生成される。

この H_3^+ は解離性再結合過程、

Fig. 2 Electron temperature dependence of the ratio between the particle loss rate due to the MAR and EIR, as parameters of plasma density and hydrogen molecule pressure.

果との詳細な比較により、ダイバーク領域における炭素不純物の密度分布を考える上で、化学スパッタリングによる炭化水素の発生が重要であることを明らかにした[19].

ダイバークプラズマ中の原子・分子過程は多岐多様であるため、著者の力量では限られた紙面ですべてを紹介することはできない。本稿では、最近注目されている非接触プラズマ中での分子過程に関連した再結合過程に焦点を絞り話を進めたいと思う。ダイバーク研究の一般的な解説については、すでに本学会誌においていくつかなされているのでそちらを参考にされたい[20,21].

5.1.2 分子活性化再結合

(a)分子活性化再結合の基礎過程

R. Janev を始め、D.E. Post, S.I. Krashennnikov, A.Yu. Pigarov らの一連の理論研究によって、ダイバークプラズマ領域において、励起状態にある水素分子が関与した新しい再結合過程、いわゆる分子活性化再結合 (Molecular Activated Recombination: MAR) の存在が予測されている[22-24]. この分子活性化再結合過程は以下の反応式で表される。

ここで $\text{H}_2(v)$ は振動励起状態にある水素分子を表し、 A^+ はプラズマ中の正イオンである。(a)では、まず振動励起状態の水素分子と電子との衝突により水素負イオンが形成され、この負イオンと正イオンにより荷電交換再結合過程が起こる。また(b)では、振動励起状態の水素分子とイオンとの衝突により生成された分子イオンの解離性再結合に基づく反応過程である。いずれの反応も振動励起状態の水素分子の存在が重要である。ダイバークプラズマ中の正イオンとしては、水素と核融合反応生成物であるヘリウムが主であると考えられる。この時、水素イオンに対しては上記の反応過程は

と書くことができる。またヘリウムイオンに対しては、

となる。

反応(f)においては、 $(\text{HeH})^+$ という分子イオンが形成される。核融合研究においては目新しい分子イオンである $(\text{HeH})^+$ は、宇宙プラズマ研究においては宇宙に多量に存在する水素とヘリウムから構成される最も簡単な極性分子として古くから注目され、これまで数多くの研究が行われている。また $(\text{HeH})^+$ の検出も、赤外吸収分光法を用いた $(\text{HeH})^+$ の回転励起間遷移の計測により確認されている[25-27].

ところで、上記の分子活性化再結合過程においていくつかの留意すべきことがある。

これまでよく知られている放射および三体再結合

とは違い (本稿では以下、両再結合過程を総称して電子-イオン再結合過程、Electron-Ion Recombination: EIR と呼ぶことにする)、分子活性化再結合は原子、正イオン、負イオン、分子、分子イオン間の複雑な反応連鎖により起こる現象である。(a),(b)以外にも様々な反応過程が存在し、そのいくつかは分子活性化再結合と競合する。例えば(d)中の水素分子イオンの解離性再結合 $\text{H}_2^+ + e \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}$ に対しては、 $\text{H}_2^+ \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}^+$ という競合過程が存在し、この解離過程は比較的大きな速度係数を持つことが指摘されている[28]. この解離過程が主であるとなると、水素イオンから結局水素イオンが生成されることになり、分子活性化再結合は起こらないことになる。

また、最終的に生成される原子の励起状態も重要である。水素イオンに対する再結合過程(c)においては、最終的に荷電交換再結合により生成される水素原子の一つは基底状態にあるが、もう一つの水素原子は量子準位 2 ~ 4 の励起状態にあることが知られている。また(d)の水素分子イオンの解離性再結合においても、水素原子の一つは量子準位 2 ~ 4 の励起状態にある。(c),(d)の反応により生成された励起水素原子は、基底状態にある水素原子に比べて極めて容易に電離してしまう。もし生成された励起水素原子がプラズマ中で電離すると、この場合も分子活性化再結合は実効的に機能しないことになる。このように最終的に生成される水素原子の励起状態の定量的評価は分子活性化再結合を考える上で極めて重要である

ことがわかる。最近、解離性再結合により発生した水素原子の励起状態について精密な理論解析がなされており、水素原子の励起状態の電子エネルギー依存性が求められている[29]。

上記の種々の過程を定量的に評価し、実際に分子活性化再結合がプラズマ中で再結合過程として機能するかを明らかにするためには、3章で述べられている水素原子・分子を含んだ衝突輻射モデルによる解析が必要となる。

Fig. 1 は衝突輻射モデルの一つである CRAMD コードにより計算された水素プラズマ中での分子活性化再結合 (MAR) の速度係数 S_{MAR} の電子温度依存性を示している。Fig. 1 より明らかなように、電子温度 0.5 eV 以上で電子-イオン再結合の速度係数 S_{EIR} に比べて非常に大きな値をとることがわかる。一方プラズマ密度の増加に対して S_{EIR} が大きくなるのに対して、逆に S_{MAR} は小さくなる。これは、先に述べた励起原子の再電離効果によるものと考えられる。また、電子温度 1.0 eV 以下での S_{MAR} の急激な減少は、分子活性化再結合に必要な励起水素分子の生成効率の低下により決まっている。また水素プラズマ中では、解離性再結合を通じた分子活性化再結合である(d)が支配的である。

以上の分子活性化再結合と電子-イオン再結合を考慮すると、プラズマ中の粒子バランスは以下のように書くことができる。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot J_e = S_{ion} n_e n_0 - S_{EIR} n_e^2 - S_{MAR} n_e n_{H_2} \quad (1)$$

ここで、 n_0 は中性粒子の密度、 n_{H_2} は水素分子密度、

Fig. 1 Rate coefficients as a function of electron temperature.

S_{ion} は電離の速度係数である。右辺第 2 項は電子-イオン再結合による粒子損失を、右辺第 3 項は、分子活性化再結合による粒子損失を表している。Fig. 2 は、右辺第 3 項と第 2 項の比

$$R = \frac{S_{MAR} n_e n_{H_2}}{S_{EIR} n_e^2} \quad (2)$$

の電子温度依存性を示している[30]。あとで紹介する直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置の水素プラズマパラメータ ($n_e < 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $P_{H_2} \sim \text{数 mTorr}$) では、分子活性化再結合が主な粒子損失過程となることが期待される。電子-イオン再結合が主な粒子損失過程となるには、より低温で高密度の水素プラズマが必要となるが、これはダイバータ配位のトカマク実験装置 Alcator-C MOD などで達成されている[13]。

(b)他の反応過程

以上の過程では水素分子 H_2 およびイオン H_2^+ まだが考慮されていた。しかし、水素分子密度が大きい場合には、水素分子イオン H_3^+ を考慮する必要がある。

水素プラズマ中の分子活性化再結合過程(d)においては分子イオン H_2^+ が生成された後、電子衝突により解離性再結合が起こる。しかし水素分子密度が大きい場合は以下の競合反応により H_3^+ が生成される。

この H_3^+ は解離性再結合過程、

Fig. 2 Electron temperature dependence of the ratio between the particle loss rate due to the MAR and EIR, as parameters of plasma density and hydrogen molecule pressure.

を通じて中性化する。(g)の速度係数は比較的大きな値を持つが、(d)の解離性再結合の速度係数と比べると2桁程度小さい。よって H_3^+ を介在した再結合過程が主は反応過程となるためには、水素分子密度が電子密度の2桁以上大きい必要がある。例えば、電子密度が $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の場合、水素ガス圧としては約10 mTorr以上が必要となる。

これまでは、振動励起状態の水素分子が関与した反応による再結合過程であった。最近、ダイバート領域での主な不純物である炭素に着目して、炭化水素を媒介とした分子再結合過程がR. Janevにより新たに提案されている[31]。

5.1.3 分子活性化再結合の実験的検証

非接触プラズマにおける電子-イオン再結合過程は、ライマン系列およびバルマー系列の放射および三体再結合に伴う連続スペクトルおよび高励起準位からの輝線スペクトル群の測定により同定できる。

一方、分子活性化再結合の実験的検証はどのようにして行うのであろうか。電子-イオン再結合のような直接的な同定は難しいが、以下の3項目の総合的な計測により分子活性化再結合の発生を同定することが可能であると考えられる。

まず、式(1)に表されているように水素分子密度の上昇に伴うプラズマ粒子束の減少が観測されることが必要である。この際プラズマの拡散過程および電子-イオン再結合による粒子束の減少についても考慮する必要がある。

次に、分子活性化再結合に関与する分子イオンの検出も重要である。 H_2^+ はFucler bandなどのバンドスペクトルの計測により検出することができる[32,33]。一方、 H_3^+ は安定な電子励起状態を持たないことが知られており、その分光的な検出は赤外領域の振動回転スペクトルを検出する以外にない[34,35]。(HeII) $^+$ についても赤外分光法により回転スペクトルを測定することにより検出することが可能であるが、ダイバートプラズマにおいてはこれまで観測されていない。以上の分子イオンの検出には質量分析も有効な方法である。カリフォルニア大学サンディエゴ校の直線型ダイバートプラズマ試験装置PISCES-Aの水素プラズマにおいて、オメガトロンによる質量分析計測が行われている。水素ガス圧5 mTorr程度で、 H_3^+ の割合が全イオン種の7割程度であることが観測されており、先に述べた H_3^+ を通じた分子活性化再

結合について議論されている[36]。

最後は、プラズマからのライマン系列やバルマー系列のスペクトル線強度比の観測である。各励起準位の占有密度分布を決定する要因として(1)放射および三体再結合過程、(2)電子による衝突励起過程、(3)分子活性化再結合過程、の3つが考えられる。Fig. 3は衝突輻射モデルにより計算されたバルマー系列の発光強度である。この計算のプラズマ条件では、各発光強度は分子活性化再結合過程により支配されていることがわかる。このように衝突輻射モデルによる解析において、各過程の寄与の大きさを変化させて計算を行い、実験で得られたスペクトル強度比と詳細に比較することにより、どの過程の寄与が主であるかを決定することが可能である。Alcator-C MOD トカマク装置においては、水素原子からの $L\alpha$ と $L\beta$ のスペクトル強度比を観測し、非接触プラズマ中での電子-イオン再結合と分子活性化再結合の寄与について議論している[12]。ここでは、名古屋大学大学院工学研究科の直線型ダイバートプラズマ模擬試験装置NAGDIS-IIの実験結果について簡単に紹介する[37]。

放電電流50 Aの直流放電により、ヘリウムプラズマを生成する。このとき、陽極から磁力線に沿った距離0.92 mで高速掃引プローブを用いて計測された電子密度は $6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ であり、電子温度は3.5 eVである。このヘリウムプラズマにそれぞれほぼ同じ分圧のヘリウムおよび水素ガスを導入し、可視光スペクトルおよびイオン粒子束の変化を観測した。

Fig. 4は、ヘリウムプラズマへ水素ガス(およびヘリウムガス)導入した時の発光スペクトルの変化を示している。ヘリウムガス導入時には、Fig. 4 (c) および (d) よ

Fig. 3 Calculated emission intensities of hydrogen Balmer series with the CRAMD code from hydrogen plasma at $T_e \sim 2.0 \text{ eV}$, $n_e \sim 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ and the neutral hydrogen molecule density $\sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$.

り電子-イオン再結合過程に伴う高励起準位からの輝線スペクトル群と連続スペクトルが観測される。しかし、水素ガスを導入した場合、ガス圧 6.5 mTorr (すなわち水素ガス分圧 1.5 mTorr) では、ヘリウムプラズマの電子-イオン再結合過程に伴うスペクトルが消失している (Fig. 4 (b))。挿入図は、高速掃引ラングミュアプローブにより計測された上流側 (陽極からの距離 0.92 m) と下流側 (距離 1.58 m) でのイオン粒子束の径方向分布を示している。ヘリウムガスを導入した場合、Fig. 4 (c) および (d) より電子-イオン再結合過程により、イオン粒子束が磁力線方向に急激に減少していることがわかる。一方水素ガス導入の場合、ガス圧約 5.5 mTorr (Fig. 4 (a))

ではイオン粒子束の変化はヘリウムガス導入時とほとんど同じである。しかし、ガス圧 6.5 mTorr (Fig. 4 (b)) においては、上流側のイオン粒子束も急激に減少していることがわかる。しかしこの時、電子-イオン再結合に伴うスペクトル線は観測されておらず、このイオン粒子束の減少を電子-イオン再結合では説明できない。特に、上流側のイオン粒子束も減少していることは注目すべきことである。以上の結果は、電子-イオン再結合ではなく、電子温度が比較的高い上流部から他の再結合過程によりイオン粒子束が減少していることを意味しており、水素分子の効果による分子活性化再結合が起こっていることを示唆している。水素ガスを導入した場合 (Fig. 4 (b)) の

Fig. 4 Visible emission spectra from helium plasmas with hydrogen gas puff : (a) and (b) ; and with helium gas puff : (c) and (d). In the inset, radial profiles of the ion flux. Closed circles and open ones are obtained in the upstream ($X = 0.92$ m) and in the downstream ($X = 1.58$ m), respectively.

ヘリウム原子からのスペクトル線強度比の測定により主量子数 $n=3$ からの発光は $n=4$ の発光より 2 桁ほど大きい。これは水素分圧 1.4 mTorr の場合には、量子数 $n=3$ の占有密度が選択的に大きくなっていることを意味する。この結果は CRAMD コード中で分子活性化再結合の寄与を考慮した計算結果と極めてよく一致した。以上の結果により、分子活性化再結合の実験的検証がなされた。

5.1.4 まとめ

本稿では、最近のダイバークプラズマ研究において注目を集めている分子活性化再結合過程を中心に概説した。核融合研究においても分子が関与した反応が重要になってきていることは驚くべきことである。また、プロセスプラズマや熱プラズマなどの他のプラズマの分野とも共通する課題も考えられる。例えば放電におけるアフターグロー制御やプラズマトーチの形状などでは水素添加の効果が報告されており、これも分子活性化再結合のひとつであると考えられている。

しかし分子が関与した反応過程は極めて複雑である上に、個々の反応の断面積（速度係数）はよくわかってない場合も少なくない。今後、分子が関与した反応過程の解析に必要なデータベースの構築が不可欠であると考えられる。

参考文献

- [1] D. Lumma, J.L. Terry and B. Lipschultz, *Phys. Plasmas* **4**, 2555 (1997).
- [2] R. Isler, G.R. McKee, N.H. Brooks, W.P. West, M.E. Fenstermacher and R.W. Wood, *Phys. Plasmas* **4**, 2989 (1997).
- [3] L. Schmits, B. Merriman, L. Blush, R. Lehmer and R.W. Conn, *Phys. Plasmas* **2**, 3081 (1995).
- [4] G.S. Chiu and S.A. Cohen, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1248 (1996).
- [5] W. Leonard, M.A. Mahdavi, S.L. Allen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 769 (1997).
- [6] S.I. Krasheninikov, A.Yu. Pigarov, D.A. Knoll, B. LaBombard, B. Lipschultz, D.J. Sigmar, T.K. Soboleva, J.L. Terry and F. Wising, *Phys. Plasmas* **4**, 1638 (1997).
- [7] K. Itami, N. Hosogane, N. Akasaka *et al.*, *Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference*, Montreal, Canada, 1996 (The International Atomic Energy Agency, Vienna, 1997) Vol. 1, p. 385.
- [8] G.C. Vlases, J.M. Adams, P. Ageladarakis *et al.*, *Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference*, Montreal, Canada, 1996 (The International Atomic Energy Agency, Vienna, 1997) Vol. 1, p. 371.
- [9] V. Mertens, A. Herrmann, A. Kallenbach *et al.*, *Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference*, Montreal, Canada, 1996 (The International Atomic Energy Agency, Vienna, 1997) Vol. 1, p. 413.
- [10] M.A. Mahdavi, S.L. Allen, N.H. Brooks *et al.*, *Proc. 16th IAEA Fusion Energy conference*, Montreal, Canada, 1996 (The International Atomic Energy Agency, Vienna, 1997) Vol. 1, p. 397.
- [11] 久保博孝, 澤田圭司: *プラズマ・核融合学会誌* **74**, 562 (1998).
- [12] N. Ezumi, N. Ohno, Y. Uesugi *et al.*, *Proc. 24th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics*, Berchtesgaden (European Physical Society, Petit-Lancy, 1997) Vol. 21A, Part III, p. 1225.
- [13] J.L. Terry, B. Lipschultz, A.Yu. Pigarov, S.I. Krasheninikov, B. LaBombard, D. Lumma, H. Ohkawa, D. Pappas and M. Umansky, *Phys. Plasmas* **4**, 2555 (1997).
- [14] A.W. Leonard, G.D. Porter, R.D. Wood *et al.*, *Phys. Plasmas* **5**, 1736 (1998).
- [15] A.Yu. Pigarov, J.L. Terry, B. Lipschultz, *Plasma Phys. Control. Fusion* **40**, 2055 (1998).
- [16] N. Ohno, M. Tanaka, N. Ezumi *et al.*, *Phys. Plasmas* **6**, 2486 (1999).
- [17] B. Lipschultz, J.L. Terry, C. Boswell *et al.*, *Phys. Plasmas* **6**, 1907 (1999).
- [18] U. Wenzel, K. Behringer, A. Carlson, J. Gafert, B. Napiontek and A. Thoma, *Nucl. Fusion* **39**, 873 (1999).
- [19] 清水勝宏, 滝塚知典: *プラズマ・核融合学会誌* **71**, 1135 (1995).
- [20] 嶋田道也: *プラズマ・核融合学会誌* **69**, 1145 (1993).
- [21] 大藪修義 他: *プラズマ・核融合学会誌* **72**, 857 (1996).
- [22] S.I. Krasheninikov, A.Yu. Pigarov, D.J. Sigmar, *Phys. Lett. A* **214**, 285 (1996).
- [23] D.E. Post, *J. Nucl. Mater.* **220-222**, 143 (1995).
- [24] A.Yu. Pigarov and S.I. Krasheninikov, *Phys. Lett. A* **222**, 251 (1996).
- [25] D.E. Tolliver, G.A. Kyralla and W.H. Wing, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 1719 (1979).
- [26] P. Bernath and T. Amano, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1719 (1982).
- [27] M.W. Crofton, R.S. Altman, N.N. Haese and T. Oka, *J. Chem. Phys.* **91**, 5882 (1989).
- [28] D. Reiter, Chr. May, M. Baelmans and P. Boerner,

- J. Nucl. Mater. **241-243**, 342 (1999).
- [29] S. Takagi, *to be appeared in Proc. International Seminar on Atomic Processes in Plasmas*, Toki, Japan, 1999.
- [30] N. Ezumi, D. Nishijima and H. Kojima *et al.*, J. Nucl. Mater. **266-269**, 337 (1999).
- [31] R. Janev, *to be appeared in Proc. International Seminar on Atomic Processes in Plasmas*, Toki, Japan, 1999.
- [32] U. Fantz and B. Heger, Plasma Phys. Control. Fusion **40**, 2023 (1998).
- [33] U. Fantz, K. Behringer, D. Coster *et al.*, *Proc. 26th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics*, Maastricht (1999) ECA Vol. 23J, p. 1549.
- [34] 岡 武史; 日本物理学誌 **48**, 417 (1993).
- [35] S. Miller, J. Tennyson, S. Lepp and A. Dalgarno, Nature **30**, 420 (1992).
- [36] J. Zhang, L. Blush, R. Conn *et al.*, *Bulletin of 40th Annual Meeting of the American Physics Society of Plasma Physics Division* (1998) R8, p.29.
- [37] N. Ohno, N. Ezumi, S. Takamura, S.I. Krasheninnikov and A.Yu. Pigarov, Phys. Rev. Lett. **81**, 818 (1998).

植 文