

# CD, C<sub>2</sub> 発光強度分布の周辺プラズマパラメーターへの依存性

川染 勇人\*, 大宅 薫\*\*, 河田 純\*, 西村 賢治\*\*\*, 田辺 哲郎\*\*\*\*

## Dependence of CD and C<sub>2</sub> emission profiles on the plasma parameters at edge plasma region

Hayato KAWAZOME, Kaoru OHYA, Jun KAWATA, Kenji NISHIMURA and Tetsuo TANABE

### Synopsis

In order to investigate the dependence of CD and C<sub>2</sub> emission profiles on the plasma parameters, we performed the model calculation by Monte Carlo method, and the emission profiles have been simulated at near the diverter plate. The plasma temperature ranged from 1 eV to 30 eV and the plasma density is  $1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ . The hydrocarbon molecules, CD<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>D<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>D<sub>6</sub> and C<sub>3</sub>D<sub>8</sub> are launched from the plate surface. In low temperature region (less than 5 eV), there is a difference of temperature dependence of the decay length of the emissions for each injection species. On the other hand, in the temperature region higher than 5 eV, there is not temperature dependence such as that observed in low temperature region. In high temperature region, launched hydrocarbon molecules dissociate methane family rapidly at near the plate ( $z < 1 \text{ mm}$ ). As a result, methane family molecules move toward the upstream of the plasma.

### 1. 緒言

磁場閉じ込め核融合炉を実現するために、プラズマ壁相互作用を解明することは、不純物発生量およびリサイクリング制御の観点から最も重要な課題の一つである。特に、国際熱核融合炉(International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER)に代表される DT 燃焼を念頭においた反応炉では、燃焼を維持するためにも燃料でもあるトリチウムのリテンション量を評価する必要がある。ITER のダイバーター板には炭素材が使用される予定である。ダイバーター板は、主プラズマから流れ出る水素同位体イオンの照射を受け、物理スパッタリングや化学スパッタリングにより損耗する。化学スパッタリングは炭素材独特の損耗過程であり、損耗による材料の寿命の評価の他に、化学スパッタリングにより生じた炭化水素同位体分子を介しての再堆積によるトリチウムリテンションが問題となる。炭化水素分子がトリチ

ウム化することによりトリチウムがダイバーター板に蓄積されることが定常的な燃焼プラズマを維持するうえで大きな妨げとなる。従って、化学スパッタリング収率を正確に評価することが重要であり、それは本研究の最終的な目的となる。

ダイバーター板近傍の炭化水素同位体分子および炭素分子からの発光スペクトルは、プラズマ-固体相互作用の結果によるものであり、発光分布の解析を通して、粒子放出過程の情報を得ることができる。しかしながら発光スペクトルには、放出過程および周辺プラズマでの原子・分子過程が関与しており、周辺プラズマパラメーターの発光スペクトル分布への関与を明らかにすることが、実験結果を解析するうえで重要である。

そこで本研究では、モンテカルロシミュレーションにより周辺プラズマ領域におけるプラズマパラメーター(温度、密度)の変化に対して、CD および C<sub>2</sub> バンドスペクトル強度の空間分布がどのように変化するかを調べることを目的とする。

### 2. シミュレーションモデル

本研究では、徳島大学で開発されたシミュレーション

\*情報工学科

\*\*徳島大学

\*\*\*沼津工業高等専門学校

\*\*\*\*九州大学

オンコードを用いた<sup>1)</sup>。本研究で考慮されている炭化水素同位体分子の反応過程は、(1) 電子衝突による電離および解離電離、(2) 電子衝突による解離、(3) 解離再結合、(4) 水素イオンとの荷電交換および(5) 水素原子との弾性衝突である。(1)–(4)の反応における速度係数は文献2)–5)を引用し、反応過程として考慮された炭化水素同位体分子種は、 $CD_y$  ( $y \leq 4$ ),  $C_2D_y$  ( $y \leq 6$ ),  $C_3D_y$  ( $y \leq 8$ )である。各反応が生じるまでの粒子の自由行程  $L$  は、全反応過程の平均自由行程の合計  $\lambda_{tot}$  と乱数  $\xi$  により、

$$\int_0^L \frac{ds}{\lambda_{tot}} = -\ln \xi \quad (1)$$

として決定される。ここで  $s$  は粒子の軌跡に沿った移動距離である。

図1にシミュレーション領域およびダイバーター板と磁力線との幾何学的関係を模式的に示す。図中の  $\alpha$  および  $\beta$  は、それぞれトロイダル方向およびトロイダル方向における磁力線のダイバーター板に対する角度であり、シミュレーション条件に応じて設定可能である。本研究では、 $\alpha = 5^\circ$  および  $\beta = 30^\circ$  とした。対象とする領域は、ダイバーター板（もしくは壁面）近傍に限定しているため磁力線は曲率を持たずに直線的であるとしている。シミュレーション領域は  $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$  である。各炭化重水素分子は、シミュレーション領域の中央（図1中の Center position）から熱速度  $0.1 \text{ eV}$  のマックスウェル分布の粒子群の1つとして放出される。放出粒子数は統計的に十分となる量を考慮して、各炭化重水素分子ともに  $100000$  個とした。粒子の軌跡は、シミュレーシ

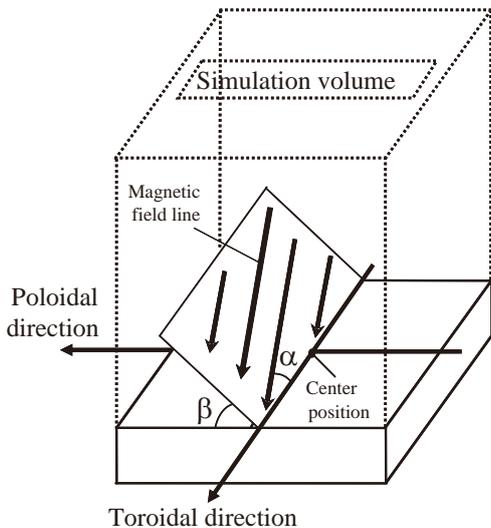


図1. シミュレーションでの計算領域および磁力線構造<sup>1)</sup>。領域は  $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$  である。

ョン領域外に達するか、ダイバーター板に再堆積するまで計算される。また、ダイバーター板での粒子の反射係数は、分子動力学により計算されたものを用いた。

放出された粒子は電氣的に中性であるため反応により電荷を帯びてイオンになるまで、放出時のエネルギーを保ったまま直進する。イオン化した後は、ローレンツ力および磁力線に平行な力  $F_{\parallel}$  によって式(2)に従って運動する。

$$m \frac{dv}{dt} = Ze(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + F_{\parallel} \quad (2)$$

ここで、 $m$ ,  $Z$  および  $e$  はそれぞれ、炭化重水素/炭素イオンの質量、荷電数および電気素量である。また、磁力線に平行な力  $F_{\parallel}$  は、

$$F_{\parallel} = m \frac{v_{\parallel} - v_{\perp}}{\tau_s} + \alpha \frac{dT_e}{ds} + \beta \frac{dT_i}{ds} \quad (3)$$

である。式(3)中の左辺第一項は、プラズマの粘性により生じる摩擦力である。ここで、 $v_{\parallel}$  は磁力線に対して平行な速度成分であり、 $v_{\perp}$  は磁力線に対して垂直な速度成分である。 $\tau_s$  は不純物イオンとプラズマイオンとの間の衝突が生じる特定の時間であり Spizer の衝突係数により求められる。第二項は、電子温度の空間的な勾配により生じる熱的力であり、第三項はイオン温度の勾配により生じる熱的力である。 $\alpha$  と  $\beta$  は各熱的力の係数である<sup>7)</sup>。本研究では簡単のため、温度勾配は無視しているため熱的力の影響はシミュレーション結果には反映されていない。

水素原子との弾性衝突は、散乱角を  $\delta$ 、エネルギー損失率を  $\gamma$ 、炭化水素/炭素イオンおよび水素原子の質量をそれぞれ  $m$  および  $m_H$  して、

$$\delta = \tan^{-1} \left[ \frac{m_H \sin(\pi - 2\theta)}{m + m_H \cos(\pi - 2\theta)} \right] \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{[(m - m_H)^2 \cos^2 \theta + (m + m_H)^2 \sin^2 \theta]}{(m + m_H)^2} \quad (5)$$

として表わされる<sup>8)</sup>。

### 3. 発光強度分布

本節では、各プラズマパラメーターにおける CD および  $C_2$  バンドスペクトルの強度分布を示す。シミュレーションによりダイバーター板から放出された粒子種は、メタン系 ( $CD_4$ )、エタン系 ( $C_2D_4$ ,  $C_2D_6$ ) およびプロパン系 ( $C_3D_8$ ) である。発光強度の積算領域は、シミュレーション領域の高さ方向 ( $z$  方向) に幅  $1 \text{ mm}$  の範囲で区切って行った。CD Gerö バンドおよび  $C_2$  Swan バンドを対象として、発光強度をコロナモデルにより求めた。励起速度係数は、IPProg

コードにより計算されたものを使用した<sup>9)</sup>。

図 2 に CD 発光強度分布を示す。図 2 においてプラズマ密度はともに  $1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  である。プラズマ

$\text{CD}_4$ , (b)  $\text{C}_3\text{D}_8$  である。図 3 の(a), (b)ともにメタン系, エタン系, プロパン系の分子の密度はプラズマ上流に進に従ってなだらかに減衰している。分子の損失

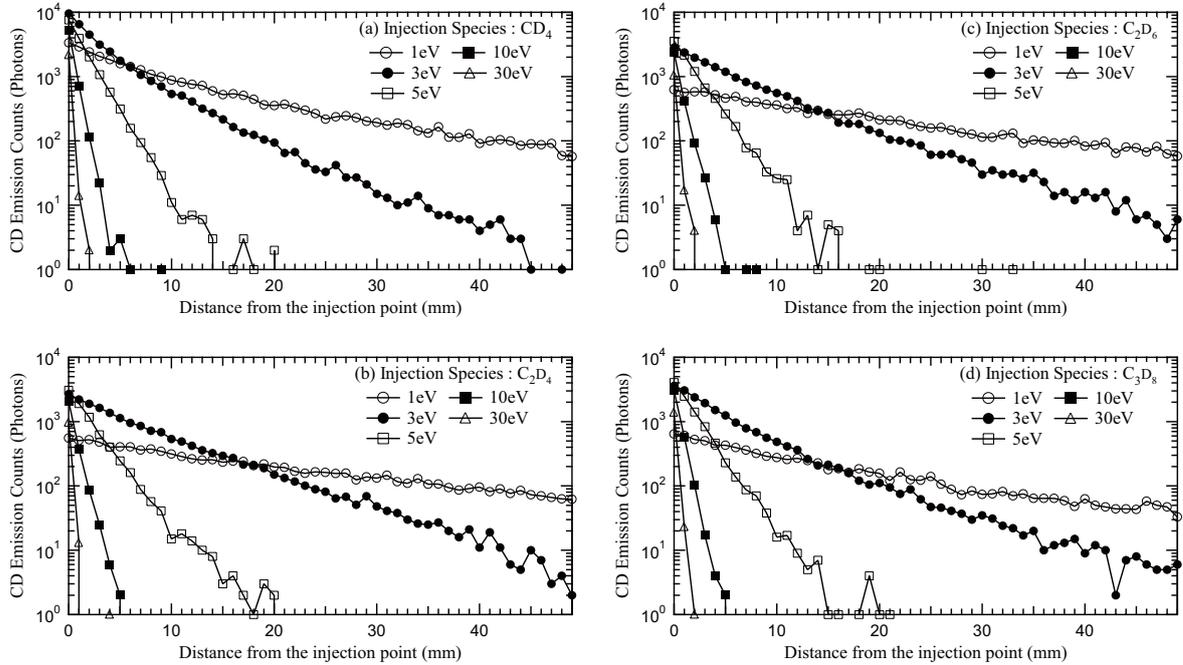


図 2. プラズマ温度に対する CD 発光強度分布の変化。放出粒子種は(a)  $\text{CD}_4$ , (b)  $\text{C}_2\text{D}_4$ , (c)  $\text{C}_2\text{D}_6$ , (d)  $\text{C}_3\text{D}_8$  である。各粒子種において、温度が高くなると同時に減衰長が短くなっている。各炭化重水素分子ともにプラズマ温度の変化に対して同様の傾向であり、放出粒子種間の大きな違いは示されていない。

温度はそれぞれ 1 eV, 3 eV, 5 eV, 10 eV および 30 eV である。プラズマ温度が 1 eV の場合、CD 発光強度分布はなだらかに減少して、シミュレーション領域の上限まで発光が得られており、プラズマ温度の上昇にともない発光分布の減衰が大きくなる。30 eV の場合は、ダイバーター板の近傍の 1 mm 以下の領域でのみ発光していることが分かる。放出された各炭化重水素分子において、プラズマ温度に対する変化は同様の傾向を示しており  $\text{C}_2$  発光強度分布においても同様の傾向が示された。

CD および  $\text{C}_2$  分子からの発光を得るには、放出された各炭化重水素分子が解離過程を数回繰り返す必要がある。CD および  $\text{C}_2$  分子へ到達する解離過程の経路は数通り存在し、各過程において当然異なった速度係数を有する。従って、プラズマ温度の変化に対して、発光分布にも変化が生じると期待されるが図 2 に示したようにその様な結果は得られていない。このような結果を得た原因を調べるために、各炭化重水素系の密度分布を調べた。

図 3 にプラズマ温度が 1 eV の場合の炭化重水素系分子の密度分布を示す。放出粒子種はそれぞれ (a)

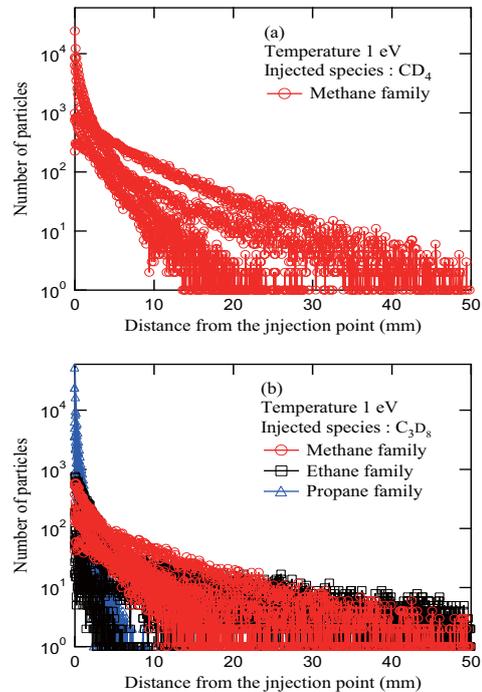


図 3. プラズマ温度 1 eV における炭化重水素系分子の密度分布。放出粒子種はそれぞれ (a)  $\text{CD}_4$ , (b)  $\text{C}_3\text{D}_8$  である。

過程は、解離および再堆積である。また電離の過程は、プラズマ温度が 1 eV 程度の場合、荷電交換によるものが主流となる。(b) においてダイバーター板から 8 mm 以上離れた領域ではプロパン系の分子は存在していないことより、上流への輸送は、メタン系およびエタン系分子の組成で行われることが分かる。しかしながらプラズマ温度が低い場合エタン系からメタン系への解離過程が生じる領域はシミュレーション領域の端(z = 50 mm)まで広がっているため、エタン系分子(C<sub>2</sub>D<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>D<sub>6</sub>)およびプロパン系分子(C<sub>3</sub>D<sub>8</sub>)を放出した場合、メタン系分子で輸送されている途中で、エタン系分子からの解離による生成項を含むことになる。これにより発光強度分布の減衰長さは、CD<sub>4</sub>を入射した場合に比べて、C<sub>2</sub>D<sub>4</sub>およびC<sub>2</sub>D<sub>6</sub>を入射した場合の方が長くなる。プラズマ温度が 1 eV の場合において、ダイバーター板との反射を過程に含む粒子は全体の 30–45%であり、再堆積率は 15–20%であった。

図 4 にプラズマ温度が 10 eV の場合の炭化水素系分子の密度分布を示す。放出粒子種はそれぞれ (a) CD<sub>4</sub>, (b) C<sub>3</sub>D<sub>8</sub> である。図 4 において(a), (b)ともに各炭化水素系分子の密度は、プラズマ上流に進むに

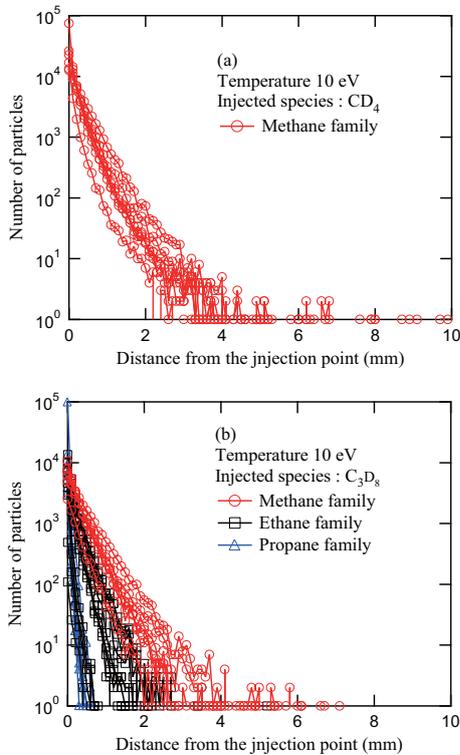


図 4. プラズマ温度 10 eV における炭化水素系分子の密度分布。放出粒子種はそれぞれ (a) CD<sub>4</sub>, (b) C<sub>3</sub>D<sub>8</sub> である。

従って急激に減衰している。この場合における解離による分子の損失過程には電子衝突によるものが大きく関与している。(b)において、プロパン系分子は、ダイバーター板から 1 mm 以下の領域で消滅しており、プロパン系分子での再堆積が無いことから全てエタン系分子に解離していることが分かる。その後、エタン系分子およびメタン系分子の組成で上流に輸送される。(a)において、1 eV の場合とは異なりプラズマ温度が高いため、メタン系分子についても 5 mm 以下の領域でほぼ全てが消滅している。このことから C<sub>3</sub>D<sub>8</sub> を入射した影響はダイバーター板から 1 mm 程度の領域にしか現れないことが分かる。これは、実機実験において、発光強度分布を測定する際に 1 mm 程度の空間分解能を有する必要があることを示している。

まとめ

周辺プラズマ領域における CD, C<sub>2</sub> バンドスペクトルの強度分布のプラズマ温度依存性をモンテカルロシミュレーションにより調べた。空間的に一様なプラズマ温度 (1–30 eV) の条件下で、温度が ~10 eV 以上において、CD, C<sub>2</sub> 発光分布に大きな違いは見られなかった。一方、温度が ~5 eV 以下においては発光分布に放出粒子種による違いが見られた。これらの結果と各炭化水素分子の空間密度分布を比較することにより、発光分布は上流に流れ込む分子の組成により決まることが分かった。組成を決める要因としては、プラズマ温度・密度、ダイバーター板と磁力線との幾何学的関係、反射係数等が考えられる。今後は、より詳細なパラメータスキャンを行い、発光分布と各種パラメーターとの相関を明らかにする。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費特定領域研究 (No. 20049007) の援助をうけて行われました。

参考文献

- 1) K. Inai and K. Ohya, Jpn. J. Appl. Phys., **46** 1149 (2007).
- 2) R. K. Janev and D. Reiter, Rep. Forschungszentrum Julich, Jul-3966 (2002).
- 3) R. K. Janev and D. Reiter, Rep. Forschungszentrum Julich, Jul-4005(2003).
- 4) D. A. Alman, D. N. Ruzic and J. N. Brooks, Phys. Plasmas **7** 1421 (2000).
- 5) A. B. Ehrhardt and W. D. Langer, Rep. Plasma Physics

Laboratory, Princeton University, PPPL-2477 (1987).

6) M. A. Lennon, K. L. Bell, H. B. Gilbody, J. G. Hyghes, A. E. Kingston, M. J. Murray and F. J. Smith, Rep. CulhamLab., CLM-R270 (1986).

7) J. Neuhauser, W. Schneider, R. Wunderlich and K. Lackner, Nucl. Fusion, **24** 39 (1984).

8) T. Motohiro and Y. Taga, Thin Solid Films, 112 **161** (1984).

9) U. Fantz, S. Meir and ASDEX Upgrade Team, J. Nucl. Mater., **337-339** 1087 (2005).