

局所バイアス電圧印加基板で捕集したカーボンダスト量に対する  
水素プラズマエッチングの効果

Effects of H<sub>2</sub> plasma etching on amount of carbon dust particles  
collected using substrate applied by local bias voltage

立石 瑞樹<sup>1</sup>, 西山 雄士<sup>1</sup>, 森田 康彦<sup>1</sup>, 山下 大輔<sup>1</sup>, 鎌滝 晋礼<sup>1</sup>, 内田 儀一郎<sup>1</sup>, 徐 鉉雄<sup>1</sup>, 板垣 奈穂<sup>1</sup>,  
古閑 一憲<sup>1</sup>, 白谷 正治<sup>1</sup>, 芦川 直子<sup>2</sup>, 増崎 貴<sup>2</sup>, 西村 清彦<sup>2</sup>, 相良 明男<sup>2</sup>, LHD 実験グループ<sup>2</sup>,  
Mizuki Tateishi<sup>1</sup>, Katsushi Nishiyama<sup>1</sup>, Morita Yasuhiko<sup>1</sup>, Daisuke Yamashita<sup>1</sup>, Kunihiro Kamataki<sup>1</sup>,  
Giichiro Uchida<sup>1</sup>, Hyunwoong Seo<sup>1</sup>, Naho Itagaki<sup>1</sup>, Kazunori Koga<sup>1</sup>, Masaharu Shiratani<sup>1</sup>, Naoko Ashikawa<sup>2</sup>,  
Suguru Masuzaki<sup>2</sup>, Kiyohiko Nishimura<sup>2</sup>, Akio Sagara<sup>2</sup>, the LHD Experimental Group<sup>2</sup>  
九州大学<sup>1</sup>, 核融合科学研究所<sup>2</sup>  
Kyushu Univ.<sup>1</sup>, National Institute for Fusion Science<sup>2</sup>

核融合炉内で発生するダストの除去は、安全性や放電維持の観点から重要な課題である。我々は最近、核融合科学研究所の Large Helical Device (LHD) におけるダスト捕集実験により、局所バイアス電圧を用いたダスト除去の可能性を示唆する結果を得た[1]。捕集基板への局所バイアス電圧印加は、ダスト輸送だけでなく、基板へ流入する水素イオン、水素原子によるダストのエッチング速度に影響を与えらる。本研究では、ダイバータシミュレータ装置[2]を用いて、ダストに対するエッチングの効果を調べた。

実験では、水素ヘリコンプラズマとグラファイトターゲット間の相互作用で発生したダストを、接地から +15 V (プラズマ電位に対して -15 V) 直流バイアスし、グラファイトターゲットの下方 110 mm に設置したシリコン捕集基板(15×10 mm<sup>2</sup>)上に捕集した。このときのプラズマ密度は 2.5×10<sup>12</sup> m<sup>-3</sup>、電子温度は 8 eV、総放電時間  $t = 1200$  s であった。エッチング速度の推定では、あらかじめカーボン膜を堆積した基板を捕集位置に設置して、ターゲットをカーボンからステンレスに代えてプラズマを生成し、カーボン膜の膜厚変化からエッチング速度を求めた。捕集ダストの観察と膜厚の測定は SEM で行った。

捕集したダストは、球状、凝集形状、フレーク状の 3 つの形状に分けられる。LHD とダイバータシミュレータにおけるダスト捕集結果の比較より、球状ダストの捕集結果が LHD の結果を良く模擬しているため、ここでは球状ダストについて検討する。捕集した球状ダストの基板上面密度のサイズ依存性を図 1 に示す。球状ダストは 30 – 300 nm のサイズ範囲に存在している。TEM・SEM 観察からサイズが 10 nm 以上の球状ダストのサイズ分布は、ユング分布に良く一致している [3]。図 1 に示すように、今回捕集した球状ダストのサイズ分布は、50 nm 以上でユング分布と良く一致した。50 nm 以下の捕集ダスト面密度がユング分布に比べ低いのは、SEM の測定下限が 20 nm に近くカウント漏れがあるためだと考えられる。フィッティング結果を用いて、1 nm 以上のダストに対するエッチングの効果について検討した。バイアス電圧 +15 V でのエッチング速度は  $Er = 0.04$  nm/s であった。この値を用いて各サイズのダストの断面積と数密度の積を  $\sigma_d(d)$  とおくと、各サイズのダストがエッチングされる体積  $V_{etch}(d) = \sigma_d(d) \times Er \times t$  が得られる。ダストは放電時間中に発生、基板へ輸送されるので、 $V_{etch}$  はエッチングされた体積の最大値を意味する。1 m<sup>2</sup> あたりの捕集ダストの体積は 6.82×10<sup>-12</sup> m<sup>3</sup> であり、捕集ダストのエッチングされた体積の推定値は 4.39×10<sup>-12</sup> m<sup>3</sup> となった。一方、ユング分布より求めた 30 nm 以下のダストの体積は 9.75×10<sup>-13</sup> m<sup>3</sup> であり、エッチングされた体積は 7.73×10<sup>-12</sup> m<sup>3</sup> となった。捕集ダストの体積に対する、1 – 30 nm のダストの体積の割合は 14.3% であった。また、捕集ダストのエッチングされた体積に対する、1 – 30 nm のダストのエッチングされた体積の割合は 176% であった。この計算結果はサイズが小さなダストの除去法として、水素原子によるエッチングが効果的であることを示唆している。

本研究の一部は核融合科学研究所の一般共同研究の援助を受けた。

#### 参考文献

- [1] K. Koga, et al., J. Nucl. Fusion (2012) submitted.  
[2] S. Iwashita, et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES 8 (2009) 308.  
[3] S. Iwashita, et al., Fusion Engineering Design (2012) in press (DOI: 10.1016/j.fusengdes.2012.10.002).

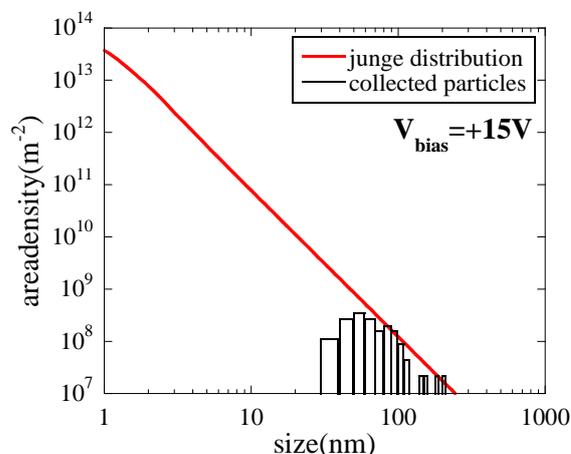


Fig. 1. Size distribution of area density of collected particles and fitted size distribution.