

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561027

研究課題名(和文) 赤外線吸収分光法による炉内炭素ダスト生成過程観測技術開発とモデル構築

研究課題名(英文) Observation by infrared spectroscopy on time-development growth of carbon dusts in hydrogen plasma

研究代表者

剣持 貴弘 (Kenmotsu, Takahiro)

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：10389009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：核融合実験装置内で生成される炭素ダストの成長過程について、小型実験装置を設計・作成し、炭素ダスト生成実験を行った。電子顕微鏡を用いて、本実験で生成された炭素ダストの断面を観察した結果、小さい粒子が成長の核となるカラムーナ成長と呼ばれる過程で、数nm～数100 μ mサイズまで成長している可能性が高いことを示された。また、赤外線吸収分光法を用いて、炭素ダストの経時成長について観測を試みた。得られた吸収スペクトルは、ノイズを多く含み、定量的な議論は困難であったが、ノイズを低減することで、炭素ダストの時間的な成長過程の観測が可能となると期待される。

研究成果の概要(英文)：We have studied the formation processes of carbon dust using the small experimental setup which we have been designed and built. The micron sized carbon dusts have been observed in the designed experimental setup after hydrogen plasma discharge. Almost of all carbon dusts have a spherical shape which are of the order of micro meter. The images of cross sections of carbon dusts observed by an electron scanning microscopy have indicated that the carbon dusts growth by columnar growth. The infrared spectroscopy have been adopted to observe the dynamic formation of carbon dusts. The experimental results have indicated that spectra of infrared spectroscopy have large amount of noise. The reduction of noise in infrared spectroscopy require to observe the dynamic growth of carbon dusts in the experimental setup.

研究分野：プラズマ壁相互作用

キーワード：炭素ダスト

1. 研究開始当初の背景

核融合発電が商業的な成功を収めるためには、核融合燃料であり高価なトリチウムの効果的な炉内リサイクルを確立する必要がある。炭素ダストによるトリチウム蓄積は、そのリサイクルを妨げるものである。また、ダストによるトリチウム蓄積は、放射性物質であるトリチウムの炉外への拡散という問題も引き起こす。さらに、炭素ダストによるプラズマ冷却による核融合反応の停止、プラズマ対向壁材料の熱伝達の悪化、高温の炭素ダストと水分との反応による爆発など、炉内炭素ダストの存在によって多くの問題が引き起こされることが懸念されている。しかしながら、炭素ダストが、どのような生成過程を経て数 nm~数 100 μm サイズに成長するのか、その詳細な生成過程は明らかにされていない。したがって、炉内での炭素ダストを制御するためには、その成長過程の理解が必要とされる。

2. 研究の目的

核融合炉開発において、炉内で炭素ダストが生成されることによって、トリチウム蓄積、核融合プラズマの冷却、トカマク・プラズマの電流遮断など様々な問題を引き起こす可能性が指摘されており、炉内炭素ダスト制御は経済性、安全性の面から解決すべき最重要課題の1つとなっている。しかしながら、炭素ダストが、どのような生成過程を経て数 nm~数 100 μm サイズに成長するのか、その詳細な生成過程は明らかにされていない。本研究においては、小型ダスト生成装置を設計・制作し、装置内で生成される炭素ダストの赤外線吸収スペクトルの時間変化を観測することによって、炭素ダストの時間的成長過程の観測を試み、炉内ダスト形成過程の解明およびモデル構築を試みる。

3. 研究の方法

設計・制作した実験装置はステンレス製の真空容器と石英ガラス管から成り、装置全体の寸法は直径 70 mm、長さ 370 mm であり、装置下部にはガラス管を設置することができる。ガラス管には NW40 のベルジャーの他、ニップルおよびブランクフランジを使用し、エラストマーシールとチェーンランプに

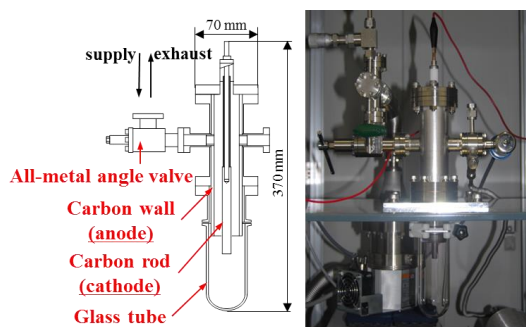


図1 小型炭素ダスト生成装置

よって固定されている(図1)。内部構造は、中空円筒構造の炭素筒があり、その中心に円柱構造の炭素棒を構成している。ここで炭素筒は内径 28 mm、外径 35 mm、長さ 195mm であり(図2)、炭素棒は直径 10 mm、長さ 120 mm である。また真空容器はバルブによって封じ切ることができる構造にしており、ガスを装置内に閉じ込めることができる。



図2 炭素製内壁

図3に、本実験装置により、水素プラズマ放電をした場合の炭素電極付近の状態を CCD カメラで撮影した様子を示す。

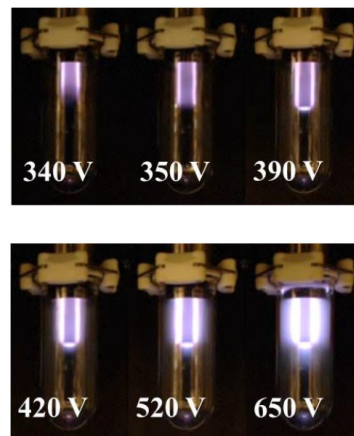


図3 炭素電極のまわりの水素プラズマ

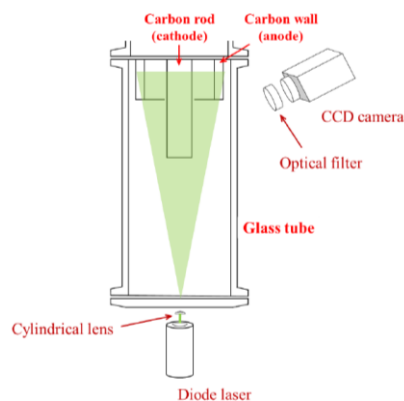


図4 レーザー散乱法による炭素ダスト計測システム

また、装置内で生成された炭素ダストを観測するために、レーザーを用いた光散乱により観測することを試みた。用いた光学測定系の概略図を図4に示す。本研究では NW40 のニップルおよびブランクフランジを使用し、紫外光を透過させることが可能である。外部

からガラス管を通して波長 532 nm および 650 nm の半導体レーザーを照射し、炭素ダストからの散乱光を CCD カメラによって撮影を行った。炭素ダストを観測するために、レーザーの出力口付近に円筒レンズを設置し、レーザー光を垂直方向に伸ばしている。CCD カメラには、狭線幅透過干渉フィルターを通すことによって、散乱された特定波長の光を受け取ることができるようにした。

4. 研究成果

(1) 走査型電子顕微鏡で観察された炭素基板上の炭素微粒子の表面形状と内部構造を図 5 に示す。実験条件は真空度 3.0×10^{-4} Pa, ガス種類 H_2 , ガス圧 100 Pa, 電流値 10 mA である。炭素基板には μm オーダーで球形形状の炭素微粒子が見られる一方で、内部構造が見える微粒子も観察することができた。生成された炭素微粒子は球状形状であることから、化学スパッタリングが顕著に働き、炭素壁表面から放出された炭化水素分子が気相中で成長していると考えられる。また内部構造については、自発的に割れたものであり、成長の痕跡が明確に表れている。これは試料を取り出す際に、大気解放によって圧力差が生じ、微粒子内部で残留応力が加わったことが影響していると考えられる。また微粒子は球状の断面の形状は、垂直方向に放射状に成長しているように見える。したがって、 μm オーダーの微粒子成長はカラムナー（柱状相）成長していると推測される。

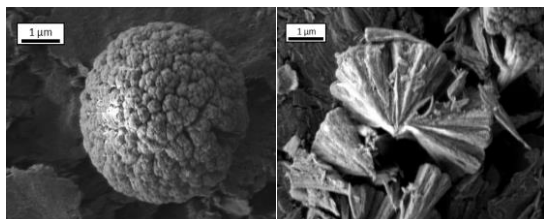


図 5 球状の炭素ダストとその断面

(2) 時間発展による炭素微粒子の粒径分布を図 6 に示す。実験条件は真空度 3.0×10^{-4} Pa, ガス種類 H_2 , ガス圧 100 Pa, 電流値 10 mA, 放電時間 3.0 h, 4.5 h, 6.0 h, 7.5 h, 9.0 h である。走査型電子顕微鏡で $\times 2000$ の画像を 10 枚抽出し、粒径を計測した。ここでは放電

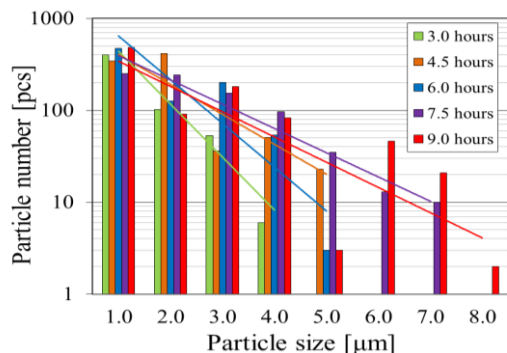


図 6 炭素ダストの粒径分布

時間が長くなるにつれて、粒径分布は線形に下降していることが分かった。また平均粒径は時間の 1 次比例しており、平均成長速度は $0.21 \mu m/h$ と推測される。このことから、微粒子の帯電量は粒径および時間の 1 次比例していることが分かる。

(3) レーザー散乱法により時間的変化による炭素ダスト群の初期生成過程の CCD 写真を図 7 に示す。実験条件は真空度 3.0×10^{-4} Pa, ガス種類 H_2 , ガス圧 100 Pa, 電流値 10 mA である。このとき、光散乱する炭素ダスト群が目視で確認できた時間は 10 数 sec で、その後、炭素ダスト群が大きくなっていくことが観測された。炭素ダスト群は、炭素電極付近で浮遊しており、炭素ダスト群は、放電開始後 140 sec で炭素陰極下から 4.9 cm の位置で観測され、840 sec で 31% 下降していることが分かった。

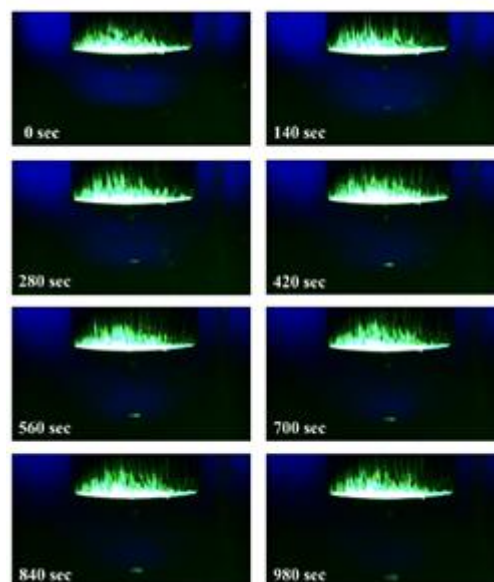


図 7 レーザー散乱法による炭素ダスト群の可視化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) Y. Hasegawa, N. Ashikawa, A. M. Ito, T. Kenmotsu, Y. Minami, H. Nakamura, M. Nishiura, M. Wada, “Agglomeration Process of Carbon Dusts in Laboratory Plasmas”, Plasma and Fusion Research, Volume 8, pp. 2402075_1-2402075-5, (2013), 査読有。

[学会発表] (計 2 件)

(1) Y. Hasegawa, N. Ashikawa, A. M. Ito, T. Kenmotsu, H. Nakamura, M. Nishiura, M. Wada, Time-development growth of carbon dusts in hydrogen plasma, 23th

International Toki Conference, Toki,
Japan, Nov. 20, 2013.

(2) Y. Hasegawa, M. Nishiura, Y. Minami,
T. Kenmotsu, M. Wada, Agglomeration
process of carbon dusts in hydrogen plasma,
22th International Toki Conference, Toki,
Japan, Nov. 20, 2012.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

剣持貴弘 (KENMOTSU, Takahiro)
同志社大学・生命医科学部・教授
研究者番号：10389009

(2) 研究分担者

和田元 (WADA Motoi)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号：30201263

(3) 連携研究者

中村浩章 (NAKAMURA Hiroaki)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：30311210

伊藤篤史 (ITO Atsushi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：10581051

芦川直子 (ASHIKAWA Naoko)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00353441

西浦正樹 (NISHIURA Masaki)
東京大学・新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：60360616