

氏名 (本籍)	ZHANG BAIQIANG (中華人民共和国)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第557号
学位授与日付	令和元年9月30日
専攻	環境エネルギーシステム専攻
学位論文題目	Behavior of fluidized particles and plasma in a DBD plasma-enhanced spouted bed (噴流層型 DBD プラズマリアクターにおける粒子とプラズマ挙動の解明)
学位論文審査委員	(主査) 教授 板谷 義紀 (副査) 教授 神原 信志 准教授 小林 信介

論文内容の要旨

プラズマは、気体を構成する分子が電離し、陽イオンと電子に分かれて運動している状態で、固体、液体、気体のいずれとも異なる特有の性質を有しており、また高い活性・反応性を有していることから近年、環境、医療、エネルギー、合成化学など様々な分野でプラズマを用いた反応が利用されはじめている。

これまでの DBD プラズマ装置には、反応場に直接電場を印加する直接型と印加した電場にガスを流通させることでプラズマガスを発生させ反応場に供給するリモート型がある。直接型のプラズマ反応装置は反応場が平面に限定されており、リモート型は平面に限定されることはないものの、複数の 3 次元の物質への均一なプラズマ処理には適していなかった。そのため、当該論文では微粒子のプラズマによる表面改質や触媒粒子を流動化粒子とするプラズマ反応装置をアプリケーションとして想定し、複数の球状物質に対して均一にプラズマ処理が可能な噴流型 DBD プラズマリアクターを新たに提案した。また、流動化粒子をプラズマジェットで粒子を流動化させることにより通常の噴流層とは異なる流動挙動を示すことは予想されていたものの、プラズマジェットが流動化に与える影響やその原因については明らかになっておらず、装置のスケールアップを図るためには、プラズマ条件や流動化条件が粒子挙動やプラズマ挙動に与える影響について詳細に把握する必要があった。

そこで当該論文においては、プラズマジェットノズルと噴流層を組み合わせた噴流層型 DBD プラズマリアクターを新たに製作し、プラズマジェットによる粒子の表面改質実験を行うことで噴流層型プラズマリアクターのプラズマ処理性能を確認・評価するとともに、流動化粒子の PIV 測定およびプラズマスペクトル測定を実施することにより、噴流層型 DBD プラズマリアクターにおける粒子挙動とプラズマ挙動を定量的に明らかにした。以下に得られた主な成果を示す。

- 1) 新しく提案した噴流層型 DBD プラズマリアクターを用いて PP 粒子の表面改質実験 (親水性付与実験) を行い、流動化粒子の均一な表面改質が可能であることを明らかにするとともに、流動化粒子一つ一つについても均一な表面改質が可能であることを明らかにし、噴流層型 DBD プラズマリアクターが 3 次元構造を有する複数個の粒子に対しても均一なプラズマ処理が可能であることを定量的に明らかにした。
- 2) プラズマジェットにより粒子を流動化することにより、粒子の流動化状態はプラズマを照射しない場合と大きく異なり、プラズマジェットを用いると噴流開始速度は大幅に小さくなり、また印加電圧を上げるとともに噴流開始速度が小さくなることが分かった。個々の粒子の速度計測を行ったところ、プラズマを照射することにより粒子速度が増大することが明らかとなり、印加電圧により粒子の速度が大きく変化することも明らかになった。実験当初は流動化ガスのプラズマ化によるガス密度および粘度が流動化挙動に大きな影響を与えているものと考えていたがプラズマガス密度および粘度が流動化粒子の挙動に与える影響は小さかった。今後詳細な検討が必要ではあるが、プラズマのエネルギーの一部が運動エネルギーに変換されていることが示唆され、流動化状態の制御因子として、これまでのように粒径や粒子数、層高、ガス流量だけではなく、印加

電圧も重要であり、粒子挙動に大きな影響を与えることが明らかとなった。

- 3) プラズマ照射部に流動化粒子が存在することで層内より得られるプラズマ強度が大幅に増大することが明らかとなった。ただし、粒子の存在により高エネルギースペクトル（低波長）は失われ、低エネルギー（高波長）のスペクトルが大幅に大きくなっていることから流動化粒子によりプラズマが増幅されているわけではなかった。プラズマ強度は粒子性状によっても異なっており、粒子の誘電率が低くなるほどプラズマ強度が大きくなることが分かった。その一方で粒子の存在下においてはプラズマ温度が低下していることも分かった。得られるプラズマ強度およびプラズマ温度は反比例の関係にあるが、粒子の誘電率に対して比例関係にあるわけではなかった。
- 4) 噴流層型 DBD プラズマリアクターにおける表面改質状態、流動挙動およびプラズマ挙動が明らかとなり、その原因として噴流層型 DBD プラズマリアクター内ではプラズマの照射により流動化粒子表面に電荷が付与され、同時に高電圧の印加による生じる電界により流動化粒子の挙動が大きく変化することが分かった。また、流動化粒子の良好な噴流が得られる噴流開始速度付近において良好な粒子の表面改質およびプラズマ強度の増大が見られたことから、噴流層型 DBD プラズマリアクターにおいては流動化ガス（プラズマガス）流量および印加電圧を制御し、良好な噴流状態を形成することにより最大のプラズマ反応場を形成できることが明らかとなった。

論文審査結果の要旨

当該博士論文では粒子の均一な混合が可能な噴流層と物質の表面改質が可能なプラズマジェットを組み組み合わせることにより、プラズマによる粒子の均一な表面改質を可能とする新たな噴流層プラズマリアクターを新たに提案し、噴流層を用いたプラズマ反応装置においてこれまで全く明らかとなっていなかった粒子の挙動とプラズマの挙動をそれぞれ定量的に明らかにするとともに、噴流層内でプラズマが粒子の挙動に与える影響および粒子挙動とプラズマの関係、さらにはプラズマジェット（電圧の印加）が流動化粒子の挙動に影響を与える理由について明確にしている。

上記のように、本論文は有用な知見を数多く見出しており、新規性、有用性の点で優れていると評価できることから、学位審査委員会は、審査の結果この論文を学位論文に値するものと判定した。

最終試験結果の要旨

学位審査会は、提出論文の基礎となる発表論文（査読付論文 3 編）の内容を確認し、令和元年 7 月 23 日開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、ZHANG BAIQIANG 氏は博士の学位に相応しい資質を有していることが認められたため、最終試験の結果を合格と判定した。

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. Baiqiang ZHANG, Nobusuke KOBAYASHI, Yoshinori ITAYA, Kyosuke OHNO, Akira SUAMI, Optical Emission Spectroscopy Diagnostics of DBD Plasma with Particles in a two-dimensional Spouted Bed, Chemical Engineering Science, 206, 31-40 (2019)
2. Baiqiang ZHANG, Nobusuke KOBAYASHI, Yoshinori ITAYA, Effect of Plasma Irradiation on the Fine Particle Behavior in a Spouted Bed Corresponding, Powder technology, 343, 309-316 (2019)
3. 小林信介, 花井健吾, 張 百強, 板谷義紀, 噴流層プラズマリアクターを用いた粒子表面改質, 化学工学論文, 44, 236-241 (2018)