

氏名（本籍）	MOSTAFA IBRAHIM MOSTAFA ALI ELSHAFIE (エジプト・アラブ共和国)
学位の種類	博士(工学)
学位授与番号	甲第603号
学位授与日付	令和3年3月25日
専攻	環境エネルギーシステム専攻
学位論文題目	Hydrogen permeation and hydrogen production by DBD plasma in different type reactors (異なるタイプの反応器におけるDBDプラズマによる水素透過と水素生成)
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

CO₂排出量削減のため、分散型水素エネルギーシステムに用いる安価なCO₂フリー水素の製造法の開発は極めて重要である。その代表的な技術として再生可能エネルギーを用いる水電解法があるが、装置コストや水素製造エネルギー効率の改善が必要である。本研究では、大気圧プラズマ（放電）を利用して、水蒸気から水素を製造するプラズマリアクターを開発し、水蒸気から水素を製造するエネルギー効率やリアクター形状について検討した。

過熱水蒸気、飽和水蒸気、アンモニアを添加した過熱水蒸気を原料として、平板型および円筒型プラズマリアクターで水素を製造し、それらの特性を比較した。また、飽和水蒸気および過熱水蒸気を原料として、大気圧プラズマと水素分離膜を組み合わせた平板型プラズマメンブレンリアクターでの水素生成反応メカニズムを検討した。

水素分離膜（厚さ15μmおよび20μmのPd-Cu40wt%合金）の水素透過速度を、異なるプラズマメンブレンリアクターで測定し、水蒸気から生成する水素ラジカルが水素透過速度をコントロールしていることを明らかにした。温度と差圧の効果は、移動速度論に一致した。

大気圧プラズマによる水蒸気分解のメカニズムについて素反応シミュレーションにより検討を行った。印加電圧の増加、水蒸気分圧の減少、水蒸気流量の減少にともない、水素転換率は増加した。6つの素反応式を用いて、水蒸気のプラズマ分解による水素生成反応についてシミュレーションを行った結果、計算値と実験値はほぼ一致し、主要な反応メカニズムを解明した。

水蒸気または過熱水蒸気にアンモニアを混合すると、水素転換率は10倍以上向上することを見出した。

論文審査結果の要旨

本論文では、過熱水蒸気、飽和水蒸気、アンモニア過熱水蒸気を原料として、異なるプラズマリアクターで水素を製造し、それらの特性を比較した。特に飽和水蒸気および過熱水蒸気を原料として、大気圧プラズマと水素分離膜を組み合わせた平板型プラズマメンブレンリアクターの開発に取り組んだ。

水素分離膜での水素透過速度を、平板型および円筒型の異なるプラズマメンブレンリアクターで測定し、プラズマ（印加電圧）によって水蒸気から生成する水素ラジカルが水素透過速度を制御していることを明らかにした。温度と差圧の効果は、移動速度論に一致した。

誘電体バリア放電による水蒸気分解による水素生成について、実験的および理論的分析を行った。印加電圧の増加、水蒸気分圧の減少、水蒸気流量の減少にともない、水素転換率は増加した。これは水蒸気分解反応がプラズマの電子密度に支配されていることを示した。6本の水蒸気プラズマ分解素反応式を用いて、プラズマの数値シミュレーションを行った結果、計算値と実験値はほぼ一致し、提案した6つの素反応によって水素が生成することを明らかにした。

飽和水蒸気および過熱水蒸気を原料としたときのプラズマによる水素転換率を実験的に比較した。過熱水蒸気は水素分離膜温度を上昇させるため、水素分離効率の向上に寄与した。水蒸気にアンモニアを混合すると、水素転換率は10倍以上向上することを見出した。エネルギー効率とエクセルギー効率を比較評価

した。

申請された学位論文を慎重に審査した結果、本論文は新規性ある有効な知見を見出しており、優れた研究成果であることを確認した。学位審査委員会における審査の結果、本論文は学位論文に値するものと判定した。また、岐阜大学大学院工学研究科における課程申請による博士の学位に関する取扱要項第4の規定において、提出する学位論文の基礎となる学術論文の数は環境エネルギーシステム専攻における規定に達しているものと確認された。

最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる発表論文（査読付き論文 13 編）の内容を確認し、令和 3 年 2 月 2 日に開催された学位論文公聴会において、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、最終試験に合格と判定した。

発表論文（学位論文に直接関係するもの）

1. Comparative study between the simulation and experimental results of H₂ production from water vapor plasmolysis, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, AIMS Energy, 8(5):835-858, 2020.
2. Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, Int. J. Hydrogen Energy, in press, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.249>, 2020.
3. Study of the hydrogen production and heat transfer distributions of ammonia decomposition in atmospheric pressure plasma plate reactor, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Sys., in press, <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0347>, 2020.
4. One-dimensional simulation of hydrogen production kinetic models by water vapor plasmolysis in a DBD plate reactor, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, J. Theor. Appl. Phys., 14, 181–194, 2020.
5. A comparative study of hydrogen permeation through Cu/Pd membrane in different reactor types, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, J. Appl. Phys. 59, 056003, 2020.
6. Study of the plasma and heating effect on hydrogen permeation through Pd_{0.60}-Cu_{0.40} membrane in a micro-channel plate reactor, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, Int. J. Hydrogen Energy, 45(49), 26300-26309, 2020.
7. Experimental analysis of plasma and heating effect on H₂ permeation behavior through Pd–Cu40% membranes in 1mm gap length plate reactor, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, Int. J. Hydrogen Energy, 45(49), 26310-26320, 2020.
8. Alumina particle size effect on H₂ production from ammonia decomposition by DBD plasma, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, Energy Reports, 6, 25-30, 2020.
9. Study of zirconia material effect on H₂ production from ammonia-argon base gas in plasma plate type reactor. Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.908 012002, 2020.
10. A comparison between GDP and PDP experiments of hydrogen permeation through 15 μm Pd₆₀-Cu_{40%} membrane thickness in a micro channel plate type reactor, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, Fusion Engineering and Design, 149, 11320-11327, 2019.
11. Preliminary results of hydrogen production from water vapor decomposition using DBD plasma in a PMCR reactor, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, Int. J. Hydrogen Energy, 44, 20239-42028, 2019.
12. Hydrogen production technologies overview, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, J. Power & Energy Eng., 7, 107-154, 2019.
13. Study of the reactor temperature effect on H production from steam decomposition using DBD plasma, Mostafa El-Shafie, S. Kambara, Y. Hayakawa, Energy Reports, 6(2), 45-51, 2020.