研究成果報告書 科学研究費助成事業

今和 5 年 6 月 2 1 日現在

機関番号: 13701 研究種目: 若手研究 研究期間: 2020~2022

課題番号: 20K15378

研究課題名(和文)プラズマメンブレンリアクターにおけるゼオライトによる水素精製促進メカニズムの解明

研究課題名(英文)Mechanism of hydrogen purification enhancement by zeolite in plasma membrane reactors

研究代表者

早川 幸男 (Hayakawa, Yukio)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号:40799946

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3.000.000円

研究成果の概要(和文):水素キャリアであるNH3を触媒熱分解した混合ガスから高純度な水素を精製可能なデバイスとして,プラズマメンブレンリアクター (PMR)を開発してきた。PMRはプラズマ放電部にゼオライトを充填することで水素分離性能を向上させることが可能だが、そのメカニズムは解明されていない。本研究ではPMRに充填されたゼオライトの役割を解明することを目的とした。結果として、PMRの放電時にゼオライト表面に沿面放電が発生し、プラズマ状態を安定化する役割を担うことが明らかになった。また、ゼオライト表面でプロトンリレー現象が起こり,水素分離膜近傍のプロトン濃度が高くなることで水素分離が促進されている可能性も示 唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義
小規模な施設でアンモニアを燃料として利用する場合、アンモニアを水素に転換し、燃料電池へ供給することで
発電を行うのが一般的である。しかし、既存技術ではアンモニアから得られる水素には低濃度のアンモニアが混
人しており、燃料電池破損の原因となる。
プラズマメンブレンリアクターはアンモニア分解ガスから効率的かつ純度の高い水素を得られる技術であり、ゼ
オライト充填時のメカニズムが明らかになることでアンモニアを起点とした発電システムの構築をより現実的な
レベルに引き上げることが可能になる。また、大気圧プラズマと水素分離膜を組み合わせた反応場は他に類さな
い先進的な受術的特色を有する。

レベルに引き上げることが可能! い先進的な学術的特色を有する。

研究成果の概要(英文): A plasma membrane reactor (PMR) has been developed as a device that can purify high-purity hydrogen from a mixed gas in which NH3, a hydrogen carrier, is catalytically pyrolyzed. However, the mechanism has not been clarified. This study aimed to elucidate the role of zeolite packed in PMR. As a result, it was clarified that creepage discharge occurs on the zeolite surface during PMR discharge and plays a role in stabilizing the plasma state. It was also suggested that the proton relay phenomenon occurs on the zeolite surface, which may enhance hydrogen separation by increasing the proton concentration in the vicinity of the hydrogen separation membrane.

研究分野: 化学工学

キーワード: アンモニア 水素製造 大気圧プラズマ 脱炭素 カーボンニュートラル 水素分離膜

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様 式 C-19, F-19-1, Z-19(共通)

1.研究開始当初の背景

水素エネルギー社会を実現するうえの課題として、水素の輸送・貯蔵におけるエネルギーロス がある.その問題を解決するために水素キャリアである NH3 を利用して水素を貯蔵・輸送する ケミカルストレージが有用であり,エネルギー消費地にて脱水素して燃料電池にて発電を行う 水素キャリアエネルギーシステムが提案されている.このシステムでは.オンサイトで NHa か ら燃料電池用高純度水素を製造できる小型反応器の開発が重要となる. 当研究室では NH3 の脱 水素と水素分離精製が同時に出来る革新的な水素製造反応器を開発してきた.革新的な水素製 造反応器とは,図1に示すプラズマメンブレンリアクター(PMR)である.円筒型の水素分離膜 モジュールを中心に , 石英管 (ϕ 50 mm), 接地電極を二重に配置している . NH_3 や H_2 をギャッ プ部に流し水素分離膜に 10 - 20 kV の交流パルス電圧を印加すると放電分解により生成した H ラジカルが水素分離膜を透過して高純度 H_2 を得ることができる.図2には,これまでに解明し た PMR 反応場における NH3 放電分解, 水素生成, H ラジカル生成, H ラジカル吸着・透過・精 製の一連のメカニズムを示す.PMR は,水素分子から H ラジカルを多量に生成することで水素 分離膜での H 透過量が増加するため,常温・低圧で高純度水素が得られることを特長とする. 最近,ギャップ部に絶縁性固体粒子を充填すると,水素精製流量が向上することを発見した.ゼ オライト充填による水素分離性能向上のメカニズムはいまだ解明されておらず、ゼオライトの 有無やゼオライトの種類によって水素精製流量が異なる要因および反応メカニズムが解明でき れば、自立型燃料電池発電機を構成できる 500 L/h の目標水素製造量を達成できる可能性が高い.

2.研究の目的

本研究は、PMR内におけるゼオライトの役割に関する仮説を立て、それらを実験的に検証していくことで、ゼオライトを充填したPMR内における水素精製メカニズムを完全に解明する.そして、そのメカニズムに基づく水素精製装置を構成するためのブレイクスルーとなる知見を得ることを目的とする.

3.研究の方法

3.1 ゼオライト表面で生じる沿面放電と水素分離性能向上の相関性調査

図3にPMRによる水素精製試験の実験装置概要を示した 実験装置は試料ガス供給系 PMR , 高電圧パルス電源 , 水素ガス透過用減圧ポンプ , ガス分析系から構成されている . 試料ガスにはアンモニア分解ガスを模擬した混合ガス (H₂ 75% , N2 25%) を使用した . PMR による水素精製は印加電圧 , 供給ガス圧力 , 透過ガス圧力を調整することで実施された . 今回の実験では 6 種の異なるゼオライトを PMR に充填して , ゼオライト種ごとの水素透過性能の比較を行った . 表 1 には実験条件をまとめて示した . ゼオライト種ごとの水素分離性能は精製水素ガスの水素濃度と生成水素流量を計測することで評価した . 今回 , プラズマ反応場にゼオライトを充填することでプラズマ放電時にゼオライト表面にて微小な沿面放電が発生することが予測される . 沿面放電が起こると僅かながらジュール熱により周辺のガス温度が上昇する事を利用して , プラズマ点灯時の PMR 表面温度をサーモグラフィカメラで計測することで沿面放電発生の有無を調査した .

3 . 2 ゼオライトの触媒効果による NH3 分解促進効果確認

ゼオライトを充填したプラズマリアクター (分離膜なし)を使用して,プラズマ反応場にてゼオライトが NH_3 分解触媒として作用する事を確認する.比較として NH_3 分解触媒である $\mathrm{Ru/Al_2O_3}$

触媒を充填した実験も行い,ゼオライトと比較を行う.図4には NH_3 分解実験の装置概要を示した.装置は試料ガス供給系,プラズマリアクター,水素濃度計から構成されている.実験はプラズマリアクター(充填物なし),プラズマリアクター(ゼオライト充填),プラズマリアクター(Ru/Al_2O_3 充填)を用いて行い,出口ガス中の水素濃度を測定することで水素転換率を計算し,各実験条件における NH_3 分解性能を評価した.

4.研究成果

4.1 ゼオライト種ごとの水素分離性能比較および沿面放電の発生評価

図 5 に PMR 内に種々のゼオライトを充填した結果を示した.結果として,どのゼオライトを充填しても飛躍的に水素分離性能が向上することが確認された.特にゼオライト A を充填した PMR では 192 L/h の水素を混合ガスから分離することに成功した.

ゼオライト充填時の水素分離性能の向上はゼオライト表面での沿面放電が影響を与えている と考えて、プラズマ点灯時の PMR 表面温度を測定することで沿面放電の発生を確認した、図 6 にプラズマ放電時の PMR 表面温度をサーモカメラで測定した結果を示した.ゼオライト種ごと の PMR 表面温度はゼオライト A が一番低い値を示したが,ほとんど差異はなかった.沿面放電 の状態を評価するために PMR への投入電力の計測を行った結果を図 7 に示した.図 7 はリサー ジュ図と呼ばれるもので,横軸に印加電圧[kV],縦軸に放電場における電荷の移動量[μC]を示し ており、菱形状の図形の面積がパルス放電時のプラズマリアクターへの投入電力量を示してい る. 各条件における投入電力量は同じ印加電圧において, ゼオライトなし(24.3W) > ゼオライ トA(21.8W) > ゼオライトF(20.0W)という結果を得た.ここでゼオライトの有無で比較し た場合 ,同じ印加電圧であるのにゼオライトを充填していない PMR では投入電力量 ,PMR 表面 温度がともに高いのに対して ,ゼオライト充填した PMR は投入電力量 ,PMR 表面温度は共に低 い、この結果より、ゼオライトを充填していない PMR では投入電力がプラズマ放電だけではな くジュール熱に変換される割合が大きいことが考えられる .一方で ,ゼオライトを充填した PMR ではジュール熱の発生が軽減されていることより,ゼオライト表面で沿面放電が起こり,安定し た放電状態を形成できていることが示唆された.さらにゼオライト種による違いを見ると水素 透過性能が高いゼオライト A では投入電力量に比して PMR の表面温度は低い値を示しており, 他のゼオライト種と比較してより安定した放電状態を形成できているといえる.これらの結果 より、ゼオライトを充填することで PMR 内の放電状態が安定することで、PMR の水素分離性能 が向上している可能性が示唆された.

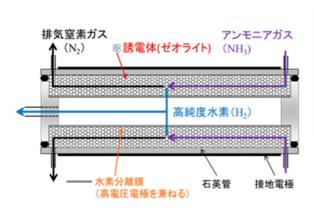
4.2 NH3放電分解時のゼオライトの触媒効果

図8にゼオライトAを充填したPMRによる NH_3 放電分解実験の結果を示した.比較として,ゼオライトなしおよび還元触媒 (Ru/Al_2O_3)を充填した結果も記載した.PMRにゼオライト Aを充填するとわずかに水素転換率が向上することを確認した(ゼオライトなし:26% ゼオライト A 充填:33%).この水素転換率の向上はゼオライト表面で発生している沿面放電によって NH_3 の放電分解が促進されたことに起因していると考えている.また,PMR 内部に還元触媒を充填した際の結果として,大きく水素転換率が向上することが確認された.これは放電時に発生したジュール熱により還元触媒が活性化し, NH_3 が触媒熱分解されたことが原因と考えられる.

4.3 ゼオライト性状と PMR の水素分離性能向上の相関性調査

表2に本研究で使用したゼオライトの各種物理性状を示した.これらの結果と水素分離性能

の相関性を検討すると, Si/Al 比と水素分離能の間にわずかに相関関係が確認された(図9). Si/Al 比が最も低い Zeolite A (Si/Al 比=2.2)をプラズマメンブレンリアクター(PMR)内に充填した際に最も高い水素分離能を示したことである.一般的にゼオライトのイオン交換容量はゼオライトの単位格子内に含有される Al 原子数に比例することが報告されている.今回使用したゼオライトは結晶格子内にイオンは H 原子であり, Si/Al 比の小さいサンプルほどその H 原子内包容量が大きくなる.そのため, Si/Al 比が小さいサンプルほど PMR による放電水素分離を行った際にゼオライト表面でプロトン輸送現象が起こり,分離膜近傍のプロトン濃度が高くなり,水素分離性能が向上したことが以上の結果より推測される.



Hydrogen separation membrane

Hydrogen separation membrane

3) diffusion

Hydrogen separation membrane

4) recombination

図1 プラズマメンブレンリアクター概要

図2 PMR の水素透過メカニズム

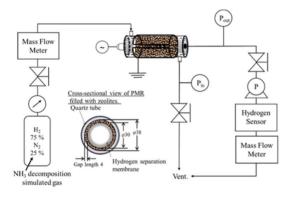


図3 PMR による水素分離試験装置 概要

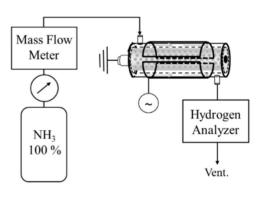


図4 PMR による NH3 放電分解装置概要

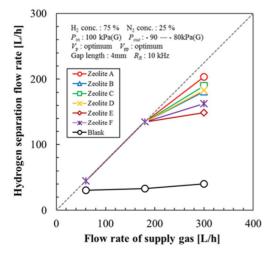


図 5 ゼオライト充填 PMR の水素分離性能

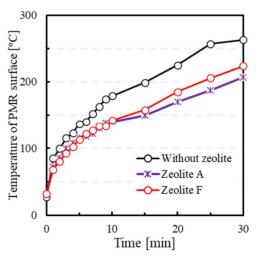
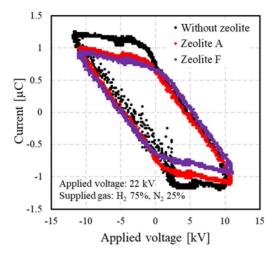


図 6 プラズマ点灯時の PMR 表面温度



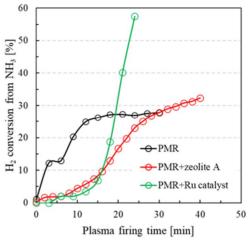


図7 PMRへの投入電力量比較

図8 ゼオライト充填 PMR の NH3 分解特性

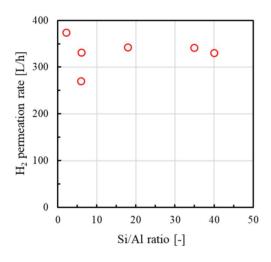


図9 各種ゼオライトを充填した際の水素透過流量と Si/Al 比の相関性

表 1 PMR による水素分離実験条件

表 2 使用したゼオライトの物理性状

Conditions of II amounting booth a DMD	C11 - 1			1		I	I
Conditions of H ₂ separation by the PMR filled with zeolite				Pore size	Particle size	Si/Al ratio	
H ₂ concentration of supply gas	%	75.0	Sample	[-]	[]	[mm]	[-]
Gas flow rate of supply gas	L/h	60 — 420	-		. ,	. ,	
Supplied side pressure, P_{in}	kPa(G)	100	A	Type X	9.0	1.5	2.2
Permeable side pressure, P_{out}	kPa(G)		В	Beta	6.5	1.5	40.0
Repetition rate of power-supply, R_{R}	kHz	10	С	ZSM-5	5.8	1.5	40.0
Power supply voltage, V_p	V	100 — 120	D	Mordenite	7.0	1.5	18.0
Applied voltage, V_{pp}	kV	13 — 25	Е	Type L	8.0	1.2	6.1
Gap length inside the PMR	mm	4	F	Type Y	9.0	1.5	6.0

5 . 主な発表論文等

「雑誌論文 〕 計4件(うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件)

1 · 著名名	〔雑誌論文〕 計4件(うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件)	
2. 論文程態 Hydrogen production from ammonia by the plasma merbrane reactor 3. 補証を	1.著者名	4 . 巻
#ydrogen production from ammonia by the plasma membrane reactor 2020年 3. 組証名 International Journal of Pydrogen Energy 32008 - 32008 - 32008 32008 - 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008	Hayakawa Yukio、Kambara Shinji、Miura Tomonori	45
#ydrogen production from ammonia by the plasma membrane reactor 2020年 3. 組証名 International Journal of Pydrogen Energy 32008 - 32008 - 32008 32008 - 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008 32008		
3. 補語名 International Journal of Hydrogen Energy 1. 著名名 International Journal of Hydrogen Energy International Journal of Chemical Engineering International Journal of Chemical Engineering International Interna		
International Journal of Hydrogen Energy 32082 - 32088 日報論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2020.08.178 有	Hydrogen production from ammonia by the plasma membrane reactor	2020年
International Journal of Hydrogen Energy 32082 - 32088 日報論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2020.08.178 有	2 434 5	c = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
### Table ###		
10.1016/j.jijhydene.2020.08.178 有	International Journal of Hydrogen Energy	32082 ~ 32088
10.1016/j.jijhydene.2020.08.178 有		
10.1016/j.jijhydene.2020.08.178 有	担耕公立のNOL/=ごがカルナブジーカト部団マン	本芸の右無
### ### #############################		_
1 著名名 El-Shafia Mostafa, Kambara Shinji, Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma 3 . 確認名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文の201 (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jihydene.2020.08.249 1 . 著名名 El-Shafia Mostafa, Kambara Shinji, Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3 . 婦話名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文の201 (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オーブンアクセス オーブンアクセスではない、又はオーブンアクセスが困難 1 . 著名名 El-Shafia Mostafa, Kambra Shinji, Hayakawa Yukio 2 . 論文標題	10.1016/].1Jnyderie.2020.06.176	Ħ
1 著名名 El-Shafia Mostafa, Kambara Shinji, Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma 3 . 確認名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文の201 (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jihydene.2020.08.249 1 . 著名名 El-Shafia Mostafa, Kambara Shinji, Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3 . 婦話名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文の201 (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オーブンアクセス オーブンアクセスではない、又はオーブンアクセスが困難 1 . 著名名 El-Shafia Mostafa, Kambra Shinji, Hayakawa Yukio 2 . 論文標題	オーブンアクセス	国際共著
1. 著名名 El-Shafie Mostafa, Kambara Shinji, Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 透読の有順 有 オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難		-
EI-Shafie Nostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### #	カープングラと人ではない。 人はカープングラとスカ 四無	
EI-Shafie Nostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### ### #	1.著者名	4 . 拳
2. 論文標題 Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non- thermal plasma 3. 碑誌名 International Journal of Hydrogen Energy		
Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma 3 . 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	21 Sharre mostara, kambara shrinjik hayakana rakto	
Energy and exergy analysis of hydrogen production from ammonia decomposition systems using non-thermal plasma 3 . 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	2.論文標題	5.発行年
thermal plasma 3 ・ 触誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j・i-jhydene.2020.08.249 オープンアクセス オープンアクセス 1 ・著者名 El・Shafie Mostafa、Kambra Shinji、Hayakawa Yukio 2 ・ 論文標題 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j・sajce.2020.09.005 オープンアクセス 撮載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j・sajce.2020.09.005 オープンアクセス 1 ・著者名 El・Shafie Mostafa、Kambra Shinji、Hayakawa Yukio 2 ・ 論文標題		
3 ・雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 6 ・最初と最後の頁 ・		,
International Journal of Hydrogen Energy - 10.1016/j.ijhydene.2020.08.249	'	6.最初と最後の頁
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2020.08.249 オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambra Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 カープンアクセス 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 超載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 オープンアクセス 国際共者	11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11	-
### 10.1016/j.ijhydene.2020.08.249 有	ena. com a constant an injurity and a constant	
### 10.1016/j.ijhydene.2020.08.249 有		
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambra Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 4. 巻 South African Journal of Chemical Engineering 5. 発行年 2021年 20	掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
### 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa, Kambra Shinji, Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering #### 2021年 #### 2021年 #### 2021年 1. 18	10.1016/j.ijhydene.2020.08.249	有
### 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa, Kambra Shinji, Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering #### 2021年 #### 2021年 #### 2021年 1. 18		
1. 著者名 EI-Shafie Mostafa, Kambra Shinji, Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 相戦論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa, Kambara Shinji, Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 オープンアクセス 国際共著		国際共著
EI-Shafie Mostafa、Kambra Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オープンアクセス I 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 オープンアクセス 国際共著	オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	-
EI-Shafie Mostafa、Kambra Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オープンアクセス I 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 オープンアクセス 国際共著		
2. 論文標題 Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 信義教育のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 有 1. 著者名 El-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 1. 養養名 El-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 「表現の関係を表現します。」 4. 巻 4. 巻 4. 巻 4. 巻 47 2022年 1. 養養名 El-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 5. 発行年 2022年 2022年 2022年 1. 養養の頁 2022年 2022年 20231 「表現と最後の頁 2028年 2016年 2022年 2022年 2029年 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 オープンアクセス 国際共著	1.著者名	_
Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オープンアクセス 国際共著 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 和オープンアクセス 国際共著 2021年 2021年 2021年 2028年 国際共著	El-Shafie Mostafa、Kambra Shinji、Hayakawa Yukio	35
Performance evaluation of hydrogen permeation through pd/cu membrane at different plasma system conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オープンアクセス 国際共著 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 1. 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 和オープンアクセス 国際共著 2021年 2021年 2021年 2028年 国際共著		
Conditions 3. 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 信託の有無 10.1016/j.sajce.2020.09.005 カープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 1. 著者名 El-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy おります。 は、巻におります。 のも、一般ないでは、これを表します。 は、一般ないでは、これを表します。 は、一般ないでは、これを表しますます。 は、一般ないでは、これを表します。 は、一般ないでは、これを表します。 は、一般ないでは、これを表しますます。 は、一般ないでは、これを表しますます。 は、一般ないでは、これを表しますます。 は、一般ないでは、これを表しますます。 は、一般ないでは、これを表しますます。 は、これを表しますますます。 は、これを表しますますます。 は、これを表しますますますます。 は、これを表しますますますますますます。 は、これを表しますますますますますますますますますますますますますますますますますますます		
3 . 雑誌名 South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オープンアクセス 国際共著 1 . 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3 . 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 オープンアクセス 国際共著		2021年
South African Journal of Chemical Engineering 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sajce.2020.09.005 オープンアクセス 1. 著者名 El-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2. 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 オープンアクセス 国際共著		c = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	1	
### 10.1016/j.sajce.2020.09.005 有	South African Journal of Chemical Engineering	118 ~ 125
### 10.1016/j.sajce.2020.09.005 有		
### 10.1016/j.sajce.2020.09.005 有		
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 1 . 著者名 El-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3 . 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 オープンアクセス 国際共著		
コ・著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3 . 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy おもずりを表現します。 ままりを表現します。 ままりを表現します。 おもずりを表現します。 おもずりを表現します。 おもずりを表現します。 おもずりを表現します。 ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現します	10.1010, 3.00300.2020.00.000	Ħ
コ・著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3 . 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy おもずりを表現します。 ままりを表現します。 ままりを表現します。 おもずりを表現します。 おもずりを表現します。 おもずりを表現します。 おもずりを表現します。 ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現します。 ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現しまする。ままりを表現します	オープンアクセス	国際共著
1 . 著者名 EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2 . 論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3 . 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 本ープンアクセス 4 . 巻 47 5 . 発行年 2022年 6 . 最初と最後の頁 22819~22831		-
EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2.論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3.雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 本ープンアクセス 47 5.発行年 2022年 6.最初と最後の頁 22819~22831		
EI-Shafie Mostafa、Kambara Shinji、Hayakawa Yukio 2.論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3.雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 本ープンアクセス 47 5.発行年 2022年 6.最初と最後の頁 22819~22831	1.著者名	4 . 巻
2.論文標題 Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3.雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 1 国際共著		_
Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 国際共著		
Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and palladium?copper membranes 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 国際共著	2 . 論文標題	5 . 発行年
palladium?copper membranes 6.最初と最後の頁 3.雑誌名 6.最初と最後の頁 International Journal of Hydrogen Energy 22819~22831 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 査読の有無 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 オープンアクセス 国際共著	Comparative study on the numerical simulation of hydrogen separation through palladium and	
International Journal of Hydrogen Energy 22819~22831 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 査読の有無 オープンアクセス 国際共著	palladium?copper membranes	
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)		
10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 オープンアクセス 国際共著	International Journal of Hydrogen Energy	22819 ~ 22831
10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 オープンアクセス 国際共著		
10.1016/j.ijhydene.2022.05.094 有 オープンアクセス 国際共著		
オープンアクセス 国際共著		
	1 40 4040/: ::hdara 0000 0F 004	右
	10.1016/j.1jnydene.2022.05.094	H
オーノンアクセスではない、又はオーノンアクセスが困難 -	, , ,	
	オープンアクセス	

〔学会発表〕 計3件(うち招待講演 0	件/うち国際学会 2件)	
1 . 発表者名 Yukio Hayakawa		
,		
2 75 主 4本 15		
2. 発表標題 H2 production characteristics fro	m NH3 by plate-type plasma reactor	
2 24 6 8 6 7		
3 . 学会等名 The 12th EU-Japan Joint Symposium	on Plasma Processing(国際学会)	
4.発表年		
2020年~2021年		
1.発表者名		
蟹江拓未		
2.発表標題		
大気圧プラズマによるアンモニア燃炸	売用ガスのプレトリートメント	
3.学会等名		
第52回 中部化学関係学協会支部連合	秋季大会	
4 . 発表年		
2020年~2021年		
1.発表者名 Yukio Hayakawa		
Takto nayakawa		
2.発表標題 Verification of H2 Purification F	nhancement Effect of Zeolite Filled the PMR	
3. 学会等名 ISPlasma2023 (国際学会)		
4.発表年		
2022年~2023年		
〔図書〕 計0件		
〔産業財産権〕		
〔その他〕		
_		
6 . 研究組織		
氏名	所属研究機関・部局・職	備考
(研究者番号)	(機関番号)	en 3

7.科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------