

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18615

研究課題名（和文）プラズマ触媒反応による非熱的CO₂還元とメタノール高速合成研究課題名（英文）Non-equilibrium CO₂ reduction by plasma catalysis: fast synthesis of methanol

研究代表者

野崎 智洋（Nozaki, Tomohiro）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：90283283

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：非平衡プラズマを用いてCO₂を振動励起することで、触媒上で炭酸塩またはホルメートを生成する速度が速くなることを明らかにした。中間体をメタノールに転換するために、多様な元素と合金化できるNi合金触媒（NiM/Al₂O₃: M = Zn, Ga, In）を開発し、CO₂転換に対する活性を維持しながらメタノールの高速合成を実現する高活性合金触媒のスクリーニングを行った。NiGaではCO₂転換率に対する低温活性化だけでなくプラズマによって低温でメタノール選択率が上昇し約30%に達することに成功した。プラズマは反応活性を高めるだけでなく反応選択性を制御する機能を有することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化学反応プロセスの多くは熱エネルギーの大量消費のうえに成り立っており、革新的な省エネルギー、環境負荷低減を実現するうえで大きな改善が要求されている。本研究では、プラズマによって振動励起されたCO₂が水素化される触媒反応を実現し、CO₂からメタノール（CH₃OH）を高速合成するプラズマ触媒反応の基盤となる合金触媒の開発に成功した。この技術を用いることにより、再生可能エネルギーを用いた電子駆動触媒反応制御が可能となり、熱エネルギー利用から脱却したCO₂利用技術および低炭素社会の早期実現に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：Vibrational excited CO₂ using nonthermal plasma was found to accelerate the formation of carbonate or formate on the catalyst. In order to convert the intermediate species to methanol, we developed a Ni alloy catalysts (NiM/Al₂O₃: M = Zn, Ga, In) that can be alloyed with various elements to convert CO₂ into methanol while maintaining the high activity of Ni for CO₂ conversion. We screened highly active alloy catalysts for high-speed synthesis of methanol. In NiGa, not only low-temperature activation for CO₂ conversion rate but also methanol selectivity was successfully increased at low temperature by nonthermal plasma application where methanol selectivity reached about 30%. It was demonstrated that plasma not only enhances reaction activity but also controls reaction selectivity.

研究分野：プラズマ化学，熱工学

キーワード：プラズマ化学 プラズマ触媒 カーボンリサイクル 炭素循環 カーボンニュートラル 二酸化炭素
メタノール メタン

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

CO₂ 排出量削減とともに CO₂ を炭素資源ととらえるカーボンリサイクル・炭素循環への関心が高まり、二酸化炭素の分離回収、有効利用技術に関して基礎研究、技術実装が活性化している。一連の物理・化学プロセスの実行にはエネルギーの投入が必要で、低炭素なエネルギー源として再生可能エネルギーの直接・間接的な利用が求められる。CO₂ を他の物質に転換する際に必要なグリーン水素の生産をはじめ、脱炭素技術は生産プロセスの電化と深くかかわり、水の電気分解を中心に CO₂ 共電解など新しい技術開発が推進されている。一方、電気化学反応では CO₂ の高効率、大量処理は実現できていないことに加え、CO₂ を CO に還元する反応で止まっており、さらに水素化して CH₄ や CH₃OH を合成するには至っていない。以上より、電気化学反応では対応できない新しい電化プロセスが要求されている。

2. 研究の目的

化学反応プロセスの多くは熱エネルギーの大量消費のうえに成り立っており、革新的な省エネルギー、環境負荷低減を実現するうえで大きな改善が要求されている。本研究では、プラズマによって振動励起された CO₂ が、Eley-Rideal 機構により直接水素化される触媒反応に着目し、低温で CO₂ からメタノール (CH₃OH) を高速合成するプラズマ触媒反応を開拓する。一般に、CO₂ は触媒に吸着してから吸着水素と反応する Langmuir-Hinshelwood 機構によりメタノールへ転換される。しかし、CO₂ の吸着過程が遅く律速過程になるためメタノール生成速度は遅い。一方、振動励起された CO₂ が吸着水素と直接反応すれば (Eley-Rideal 機構)、律速過程である CO₂ 吸着を回避して、低温でもメタノール生成速度を著しく加速できることが指摘されている。非平衡プラズマは低い温度で振動励起分子を生成する手法として優れた特性を有しており、熱化学反応では対応できない非熱的な触媒反応を生起し、基幹化学物質であるメタノールを CO₂ から高速合成するプロセス革新を実現する。さらに、プラズマが作用した触媒反応を直接観察する *operando* 赤外吸収分光法を開発してプラズマ触媒反応機構を解明する。

3. 研究の方法

一年目 (1)プラズマ触媒反応系の構築とメタノール合成、(2)Eley-Rideal 反応機構の検証、(3)*operando* 赤外吸収分光分析の構築を目的に研究を実施する。メタノール合成で用いられる Ni 系触媒に DBD (Dielectric Barrier Discharge) を作用させ、反応温度や比投入エネルギーなどの条件がメタノール選択率および合成速度におよぼす影響をパラメトリックに調べ、Eley-Rideal 機構によりメタノールが合成される条件を明示する。さらに、次年度に実施する *operando* 赤外吸収分光装置を構築し基礎データを取得する。メタノール分析には、既存のガスクロマトグラフィー、質量分析計を用いる。

二年目 (最終年度) (1)DBD が作用した状態で触媒吸着種、およびその反応挙動を計測する *Operando* 赤外吸収分光分析を適用して反応機構を解明する。メタノールの前駆体となるギ酸塩 (HCOO) の生成・反応挙動を解析することで、Eley-Rideal 機構と Langmuir-Hinshelwood 機構を明確に区別できることに着目する。(2)Ni を基盤とする合金触媒を適用し、DBD を作用させた状態で CO₂ 転換率を向上させ、さらに CH₃OH の選択率を高める合金触媒をスクリーニングによって同定する。反応機構は独自に開発する *operando* 赤外吸収分光分析を適用して解明する。

4. 研究成果

図 1 は CO₂ 水素化反応に適用したプラズマ触媒反応器の概略図である。内径 20 mm の石英管に触媒ペレットを充填し、中心電極に数 kV の高電圧を印加して気体を絶縁破壊する。DBD 電極系はコンデンサと等価であるため交流電圧を印加しなければならない。高電圧を印加するとペレット接点の電界集中を起点として気体が絶縁破壊し、微細放電 (ストリーマと称する) が形成される。DBD は過渡的に形成されるストリーマの集合体で、複数のストリーマがランダムに生成と消滅を繰り返すことで電極間の広い範囲をプラズマ化する。異なる誘電物質 (気体と触媒) の界面では、その接線方向の電界成分によって電子が加速されるため、ペレット表面を沿うようにストリーマが進展する。電離によって生じた電荷が誘電体をチャージアップして逆電界を形成するため、電離作用が弱められストリーマは 1-10 ns で消滅する。ストリーマが熱化する前にエネルギーの注入が断たれるため、大気圧でも電子温度だけが数万度に達する非平衡プラズマが形成される。金属担持量が多すぎる場合、あるいは BaTiO₃ など強誘電体を用いると、ペレット接点に局在化したスポット状のプラズマが形成され、ストリーマが進展しなくなる。このような場合、プラズマはホットスポットを形成し、反応器の広い範囲を非平衡プラズマ状態にすることができなくなる。触媒層の温度分布はあらかじめ熱電対で校正した赤外線カメラで測定した。発光分光分析により、電子励起された CO の回転スペクトル分布からガス温度を測定し、赤外線カメラの測定結果と比較した。その結果、ストリーマのガス温度と触媒温度はほぼ等しいことが確認されている。

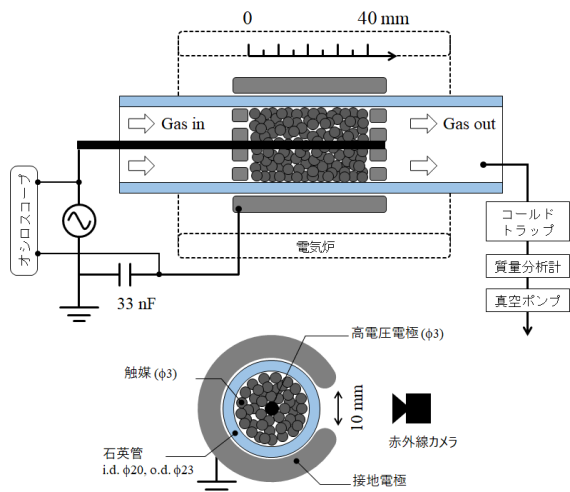


図1 触媒充填型 DBD 反応器の構成

図2は種々のNi合金触媒を使ってCO₂/H₂混合ガスを流通させたときのCO₂転換率を表している。それぞれ、熱反応とプラズマ反応を適用してCO₂の反応量の変化を調べた。NiZnでは低温におけるCO₂活性化が向上し約100の低温度化を実証した。生成物はCOとCH₄でプラズマによってCH₄選択性が向上することを確認した。プラズマは反応活性を高めるだけでなく反応選択性を制御する機能を有することを実証した。一方、NiZnではメタノールは生成されなかった。これに対し、NiGaではCO₂転換率に対する低温活性化だけでなくプラズマによって低温でメタノール選択率が上昇し約30%に達することに成功した。図3に示すように、NiGaではプラズマによって生成される中間物が明確に異なっている。他の合金触媒では、ピーク強度は異なるが同じ中間生成物が得られている。Ni系触媒はC-H結合の形成を促進するが、合金元素を添加することでC-O結合の生成機能を発現することを実証した。廉価で豊富なNiを基盤としつつ、合金化によってC-C結合の形成制御にも展開できることを示唆しており、電子駆動触媒科学に関する新しい学術を開拓するだけでなく、CO₂からジェット燃料合成など幅広い応用展開の道筋が示され、本研究提案の基本概念となるプラズマ触媒科学の重要性と意義が実証された。

CO₂をメタンやメタノールに変換する際、プラズマによるCO₂の活性化だけでなく、同時に供給する水素の励起も重要であることが指摘されている。一方、触媒に吸着した水素は赤外吸収分光で同定できないため、TPD法(Temperature programmed desorption)で定量的に評価した。まず、常温で水素を吸着させた後、一定速度で昇温して脱着する水素を定量した。図4左は熱反応の場合で、水素の吸着は二つのピークで構成される。ピークIは金属に吸着した水素を示しており、ピークIIは金属と担体の界面に吸着した水素を示している。図4右に示すように、プラズマによって水素の吸着量は明らかに増加しており、CO₂の励起だけでなくプラズマによって水素を活性化することが重要であることがわかる。プラズマと触媒の距離を遠くするほど励起された水素の脱励起が進むため水素の吸着量は減少するが、その場合でも熱反応より約1.5倍の水素吸着量を示している。一般に、飽和吸着量はプラズマの影響を受けないとされるが、吸着ピークがずれていることから活性サイトそのものが異なっている可能性を示唆しており、プラズマ触媒反応における励起水素の重要性を示唆している。合金触媒のどのサイトでCOおよび水素が励起されているか解明することで、メタノール合成に高い活性を示す触媒の設計指針を明示することが期待できる。

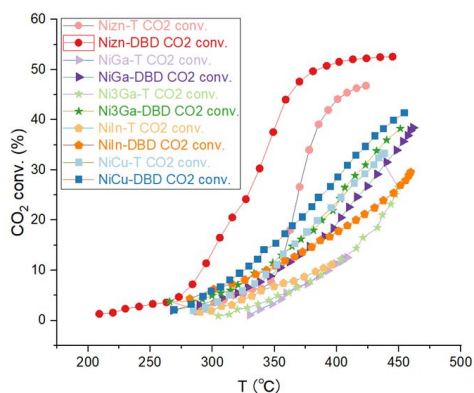


図2 CO₂ 転換率

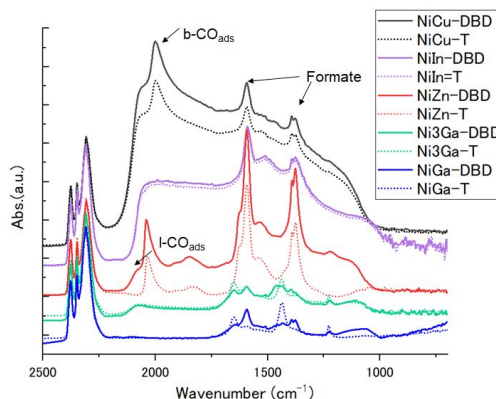


図3 中間生成物に及ぼすプラズマの影響

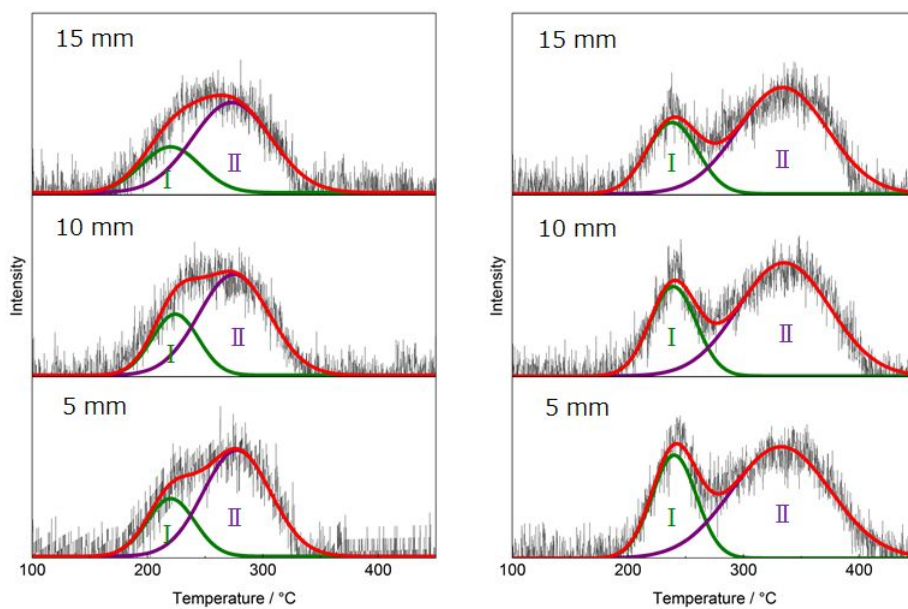


図 4 吸着水素の昇温脱離ピーク。左：熱反応，右：プラズマ反応

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Chen Xiaozhong, Kim Hyun Ha, Nozaki Tomohiro	4. 巻 e2200207
2. 論文標題 Plasma catalytic technology for CH ₄ and CO ₂ conversion: A review highlighting fluidized bed plasma reactor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma Processes and Polymers	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ppap.202200207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kim Dae-Yeong, Saito Atsushi, Sasaki Koichi, Nozaki Tomohiro	4. 巻 31
2. 論文標題 In situ infrared absorption probing of plasma catalysis: vibrationally-excited species induced Mars-van Krevelen type mechanism	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 124005(9pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/acab28	査読の有無 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	国際共著 -
1. 著者名 Chunyuan Zhan, Dae-Yeong Kim, Xu Shuya, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Nonthermal plasma catalysis of CO ₂ methanation over multi-metallic Ru based catalysts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Plasma Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 e03006(12pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34343/ijpest.2022.16.e03006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kim Dae-Yeong, Ham Hyungwon, Chen Xiaozhong, Liu Shuai, Xu Haoran, Lu Bang, Furukawa Shinya, Kim Hyun-Ha, Takakusagi Satoru, Sasaki Koichi, Nozaki Tomohiro	4. 巻 144
2. 論文標題 Cooperative Catalysis of Vibrationally Excited CO ₂ and Alloy Catalyst Breaks the Thermodynamic Equilibrium Limitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 14140 ~ 14149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.2c03764	査読の有無 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	国際共著 -

1. 著者名 Toshiro Kaneko, Hiromitsu Kato, Hideaki Yamada, Muneaki Yamamoto, Tomoko Yoshida, Pankaj Attri, Kazunori Koga, Tomoyuki Murakami, Kazuyuki Kuchitsu, Sugihiko Ando, Yasuhiro Nishikawa, Kentaro Tomita, Ryo Ono, Tsuyohito Ito, Atsushi Ito, Koji Eriguchi, Tomohiro Nozaki, Takayoshi Tsutsumi, and Kenji Ishikawa	4. 巻 61
2. 論文標題 Functional nitrogen science based on plasma processing: Quantum devices, photocatalysts and activation of plant defense and immune systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA0805(25pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac25dc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Xiaozhong Chen, Zunrong Sheng, Sho Murata, Shungo Zen, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki	4. 巻 54
2. 論文標題 CH4 dry reforming in fluidized-bed plasma reactor enabling enhanced plasma-catalyst coupling,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of CO2 Utilization	6. 最初と最後の頁 101771(9pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcou.2021.101771	査読の有無 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	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Saito, Zunrong Sheng, Dae-Yeong Kim, Yutaka Imamura and Tomohiro Nozaki	4. 巻 15
2. 論文標題 In situ transmission infrared spectroscopy of plasma-assisted CO2 hydrogenation on ZnO: role of catalyst support materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Plasma Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 e02008(11pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34343/ijpest.2021.15.e02008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Benjamin King, Darsh Patel, Johnny Zhu Chen, Donata Drapanauskaite, Robert Handler, Tomohiro Nozaki, Jonas Baltrusaitis	4. 巻 304
2. 論文標題 Comprehensive process and environmental impact analysis of integrated DBD plasma steam methane reforming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 121328(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2021.121328	査読の有無 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	国際共著 該当する

1. 著者名 Atsushi Saito, Zunrong Sheng, Tomohiro Nozaki	4. 巻 15
2. 論文標題 In situ Raman spectroscopy of plasma%catalyst interfaces for conversion of CO2 and CH4 to valuable compounds, International	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 e02007(12pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34343/ijpest.2021.15.e02007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hyun-Ha Kim, Ayman A Abdelaziz, Yoshiyuki Teramoto, Tomohiro Nozaki, Karol Hensel, Young-Sun Mok, Dae-Hoon Lee, Woo-Seok Kang	4. 巻 15
2. 論文標題 Interim report of plasma-catalysis; Footprints in the past and blueprints for the future	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Plasma Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 e01004(pp39)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34343/ijpest.2021.15.e01004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 野崎智洋, Zunrong Sheng	4. 巻 45(1)
2. 論文標題 CH4/CO2改質におけるPacked-bed DBDの放電特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 2-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34342/iesj.2021.45.1.2	査読の有無 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	国際共著 -

1. 著者名 野崎智洋	4. 巻 73
2. 論文標題 プラズマ触媒：持続可能な低炭素社会の実現に向けて	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 26-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 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	国際共著 -

1. 著者名 野崎智洋	4. 巻 63
2. 論文標題 非平衡プラズマを利用した新規触媒プロセス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 触媒	6. 最初と最後の頁 171-177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 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	国際共著 -

1. 著者名 野崎智洋	4. 巻 45
2. 論文標題 総論：大気圧プラズマと反応工学	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 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	国際共著 -

〔学会発表〕 計46件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 32件)

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 非平衡プラズマを基盤とした電子駆動触媒反応の創成
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 触媒反応における非平衡プラズマ化学の活用
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマによるプロセス電化と低炭素技術
3. 学会等名 グリーン・DXプラズマコンソーシアム第4回講習会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chunyuhan Zhan, Xu Shuya, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma-sustained CO ₂ methanation over Ru-based multi-metallic catalysts
3. 学会等名 MRS 2022 Fall Meeting & Exhibit(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dae-Yeong Kim, Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Dynamics of plasma and catalyst interfacial reactions: in situ IR spectroscopy of CO ₂ hydrogenation
3. 学会等名 11th International Conference on Reactive Plasmas and 75th Gaseous Electronics Conference(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma catalysis of CO ₂ hydrogenation: elucidating interfacial reaction mechanisms by in situ infrared spectroscopy
3. 学会等名 17th International Congress on Plasma Surface Engineering(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマ触媒表面反応の機構解明とCO2資源化技術
3. 学会等名 表面技術協会第146回講演大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 In situ infrared spectroscopy of plasma-catalyst interfacial reactions: aiming better catalyst design
3. 学会等名 Gordon Research Conference: Plasma Processing Science（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki, Dae-Yeong Kim, Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa
2. 発表標題 Plasma catalytic conversion of CO2: an emerging decarbonizing technology towards a sustainable society
3. 学会等名 MRS 2022 Spring Meeting & Exhibit（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Yuta Nishina, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 CO2 fixation as carbon black: plasma-enhanced Boudouard reaction over Fe/MgO
3. 学会等名 The 32nd Annual Meeting of MRS-J
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ming Li, Dae-Yeong Kim, Chunyuan Zhan, Shuya Xu, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 In situ transmission infrared analysis of DBD-induced CO ₂ methanation on Ni-La-Ru/Al ₂ O ₃
3. 学会等名 The 32nd Annual Meeting of MRS-J
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chunyuan Zhan, Shuya Xu, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma-enhanced Carbon Capture and Utilization in CO ₂ Methanation
3. 学会等名 11th International Conference on Reactive Plasmas and 75th Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma Catalysis in Fluidized-bed Reactor for Reverse Water Gas Shift Reaction
3. 学会等名 11th International Conference on Reactive Plasmas and 75th Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dae-Yeong Kim, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma assisted CO ₂ hydrogenation over intermetallic Pd ₂ Ga/SiO ₂
3. 学会等名 11th International Conference on Reactive Plasmas and 75th Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xu Shuya, Chunyuan Zhan, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Auto-methanation using plasma catalysis at room temperature
3. 学会等名 11th International Conference on Reactive Plasmas and 75th Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chunyuan Zhan, Xu Shuya, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Pulsed CO ₂ methanation in plasma-enhanced catalytic reaction
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Plasmas for Catalysis and Energy Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Fluidized-bed DBD Reactor for reverse water gas shift reaction: Break Kinetic and Equilibrium Limit
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Plasmas for Catalysis and Energy Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dae-Yeong Kim, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 in situ Transmission IR spectroscopy of plasma catalytic conversion of CO ₂ over Pd ₂ Ga/SiO ₂ alloy catalyst
3. 学会等名 The 12th International Conference on Environmental Catalysis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Reverse water gas shift reaction in fluidized-bed nonthermal plasma reactor: An Experimental Kinetic Study
3. 学会等名 The 12th International Conference on Environmental Catalysis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chunyuhan Zhan, Xu Shuya, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 CO ₂ Methanation over Ru Based Catalysts in Plasma Environment
3. 学会等名 International Symposium on Nonthermal/Thermal Plasmas for Pollution Control Technology & Sustainable Energy / International Symposium on Electrohydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dae-Yeong Kim, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma assisted CO ₂ hydrogenation over Pd ₂ Ga/SiO ₂ alloy catalysts
3. 学会等名 International Symposium on Nonthermal/Thermal Plasmas for Pollution Control Technology & Sustainable Energy / International Symposium on Electrohydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kim Dae-Yeong, Chen Xiaozhong, 古川森也, 野崎智洋
2. 発表標題 Pd ₂ Ga/SiO ₂ 触媒によるプラズマ支援逆水性ガスシフト反応: 熱平衡の限界を超えた反応促進
3. 学会等名 第24回静電気学会春期講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kim Dae-Yeong, 齋藤敦史, 佐々木浩一, 野崎智洋
2. 発表標題 CO振動励起によるMars-van Krevelen反応機構の促進
3. 学会等名 第46回静電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金 賢夏, Ayman A Abdelaziz, 寺本慶之, 野崎智洋
2. 発表標題 オペランド赤外イメージングによる触媒反応の可視化と迅速な触媒のスクリーニング
3. 学会等名 第46回静電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Diagnostics of plasma-catalyst interfacial reaction by in situ IR spectroscopy
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/15th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Fluidized-bed DBD reactor for better plasma-catalyst coupling: a new reactor design concept
3. 学会等名 The 39th Symposium on Plasma Processing and The 34th Symposium on Plasma Science for Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma catalytic conversion of CO ₂ towards sustainable society
3. 学会等名 Plasma catalytic conversion of CO ₂ towards sustainable society, 3rd International Symposium on Plasma Science and Energy Conversion, December 18-19, 2021, Online (China). (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma-enhanced catalysis of CO ₂ as a new concept of electricity-driven chemical reaction
3. 学会等名 Bridging the Pandemic: Reigniting Cooperation on Plasma Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma-catalytic hydrogenation of CO ₂ : elucidating thermodynamically- or kinetically-limited step
3. 学会等名 The 74th Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 振動励起分子が誘起する表面反応：プラズマ触媒
3. 学会等名 日本学術振興会第153委員会第153回研究会「プラズマプロセスにおける表面科学を理解する」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma catalysis of CH ₄ and CO ₂ towards decarbonizing society
3. 学会等名 The 8th International Symposium of Institute for Catalysis: Novel approaches for next generation catalysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 非平衡プラズマにより誘起される電子駆動触媒反応
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chunyuan Zhan, Xu Shuya, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma-enhanced catalytic performance in CO ₂ methanation over Ru(La-Ni)/Al ₂ O ₃
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/15th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Fluidized-bed DBD Reactor for Kinetic Study of Reverse Water Gas Shift Reaction
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/15th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dae-Yeong Kim, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Mechanism study on plasma-activated CO ₂ hydrogenation over Pd ₂ Ga/SiO ₂
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/15th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Efficient plasma-catalysis coupling in fluidized-bed DBD reactor for CO ₂ Hydrogenation
3. 学会等名 Bridging the Pandemic: Reigniting Cooperation on Plasma Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dae-Yeong Kim, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 CO ₂ hydrogenation over Pd ₂ /SiO ₂ alloy catalysts boosted by plasma-activated vibrationally excited CO ₂
3. 学会等名 Bridging the Pandemic: Reigniting Cooperation on Plasma Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dae-Yeong Kim, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Mechanistic study on plasma assisted CO ₂ hydrogenation over Pd ₂ Ga/SiO ₂ : in situ infrared absorption spectroscopy
3. 学会等名 The 8th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chunyuan Zhan, Ryoya Iseki, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma catalysis of CO ₂ methanation over multi-metallic Ru based catalysts for Power-to-Chemicals Application
3. 学会等名 The 8th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chunyuan Zhan, Ryoya Iseki, Hyun-Ha Kim, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma effect on CO ₂ methanation over Ni-modified Ru/Al ₂ O ₃ catalyst
3. 学会等名 The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (2nd ACTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Saito, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 In situ Transmission Infrared Absorption Spectroscopy of Plasma-Catalyst Interfacial reaction for CO ₂ Hydrogenation
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/14th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuai Liu, Haoran Xu, Bang Lu, Dae-Yeong Kim, Xiaozhong Chen, Hyungwon Ham, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki, Kiyotaka Asakura, Satoru Takakusagi
2. 発表標題 In-situ XAFS investigation of Pd ₂ Ga/SiO ₂ catalysts during plasma-assisted CO ₂ hydrogenation
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kim Dae-yeong, 古川森也, 野崎智洋
2. 発表標題 2022年度静電気学会春期講演会
3. 学会等名 プラズマ触媒反応のoperando診断: CuZn合金触媒によるCO水素化反応
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kim Daeyeong, 古川森也, 野崎智洋
2. 発表標題 振動励起CO2の水素化反応促進機構
3. 学会等名 第128回触媒討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Fluidized-bed plasma catalysis for reverse water gas shift reaction
3. 学会等名 The 8th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiaozhong Chen, Sho Murata, Shinya Furukawa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Fluidized-bed Plasma Reactor and Application to CO2 hydrogenation
3. 学会等名 Asian Conference on Thermal Sciences (2nd ACTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 野崎智洋	4. 発行年 2022年
2. 出版社 サイエンス&テクノロジー	5. 総ページ数 262
3. 書名 CO2の分離回収・有効利用技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

野崎研究室ホームページ http://www.energy-lab.mech.e.titech.ac.jp/ 東京工業大学リサーチリポジトリ http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherinfo.cgi?q_researcher_content_number=CTT100380618
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------