

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H02065

研究課題名（和文）二酸化炭素の資源化に向けた耐熱合金プラズモニックナノ触媒の創成

研究課題名（英文）Research and development of novel plasmonic nanocatalyst for CO₂ conversion

研究代表者

葉金花（YE, Jinhua）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA主任研究者

研究者番号：90230630

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、太陽光を利用した二酸化炭素の資源化に向けて、金属ナノ触媒の光誘起表面プラズモン共鳴に基づく太陽光の高度利用および二酸化炭素の低温活性化に挑戦した。その結果、VIII族金属NiおよびCuをベースとした新規耐熱合金プラズモニックナノ触媒の創製に成功し、また、これらの触媒を利用した高効率な光誘起二酸化炭素からのメタノール生成などの触媒反応を実現した。また、理論計算と実験の連携によってプラズモニックナノ触媒におけるホットキャリアの挙動および反応促進機構を明らかにした。さらに熱輻射の少ない材料と複合させることで、屋外太陽光照射下で二酸化炭素のメタン化に成功し、将来的な実用化に道筋を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二酸化炭素の資源化研究は温室ガスの削減と新たな資源の創出に重要であり、世界中で激しい研究競争が繰り広げられている。本研究は従来の半導体人工光合成による光吸収利用のボトルネックを突破し、ナノ金属の表面プラズモン共鳴現象を利用することで、紫外から赤外までの太陽光エネルギーを利用可能にし、二酸化炭素からメタン等燃料への変換効率を大幅に向上させた。本研究は二酸化炭素の資源化を可能にする斬新な材料技術およびその学理に関する重要な知見を提供し、カーボンニュートラルの実現に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this project, we challenged the full solar spectrum utilization and the low-temperature activation of carbon dioxide based on the photo-induced surface plasmon resonance of metal nanocatalysts toward solar driven recycling of carbon dioxide. As a result, we succeeded in developing new heat-resistant plasmonic nanocatalysts based on group VIII metals Ni and Cu, and also achieved highly efficient conversion from carbon dioxide to fuels such as methane and methanol. In addition, the behavior of hot carriers and the reaction promotion mechanism in plasmonic nanocatalysts were clarified by conducting theoretical calculations and in-situ characterizations. Furthermore, by hybridizing a material with less heat radiation to the plasmonic nanocatalyst, we succeeded in methanating carbon dioxide under outdoor sunlight irradiation, demonstrating a potential strategy towards practical application in the future.

研究分野：光機能材料

キーワード：プラズモニックナノ触媒 二酸化炭素の資源化 太陽光吸収利用 表面プラズモン共鳴 ホットキャリア 小分子活性化 二酸化炭素の再利用

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

近年地球温暖化問題や化石燃料の枯渇危機に対する重要な解決策として、国内外において CO₂ を再資源化する研究が盛んに行われている。中でも、「人工光合成」技術は太陽光エネルギーを駆動力とし、半導体光触媒材料上に発生した光励起電子とホールの酸化・還元力で CO₂ と H₂O をメタン等の炭化水素燃料に変換することが可能であり、理想的な技術として期待されている。しかし、半導体材料のバンド吸収による太陽光の利用が限定的な上、CO₂ が最も安定性の高い分子の一つであるため、CO₂ の炭化水素化は熱力学的にも、動力学的にも進行が極めて困難である。

一方、近年 Au 等貨幣金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴 (SPR) により発生した熱電子を半導体材料へ注入することで太陽光利用範囲のさらなる拡大が示され、金属ナノ粒子のプラズモン共鳴を利用した太陽光化学エネルギー変換に新たな可能性が示唆された (文献 1)。さらに、研究代表者らは Ru や Ni などの第 VIII 族金属のナノ粒子を利用した効率的な太陽光利用、および金属ナノ粒子を反応場とする光誘起熱触媒反応による二酸化炭素の高効率メタン化を見出した (文献 2)。しかし、その詳細なメカニズムは不明なところが多く、また元素戦略の観点から、より広範な種類の遷移金属を含めた新たなプラズモニックナノ粒子の創成が望まれる。

2. 研究の目的

本研究は以上の研究背景を踏まえ、太陽光の高度利用が可能な耐熱合金プラズモニックナノ触媒の創製を行うと共に、金属ナノ粒子の光誘起表面プラズモン共鳴が深く関わっている二酸化炭素の低温活性化・資源化におけるメカニズムを明らかにすることを目的とする。本研究によって、太陽光エネルギーを利用した CO₂ の資源化研究に新たな可能性を切り開く。また、将来的には、光エネルギーを取り入れた光・熱併用触媒技術の開発に繋がり、CO₂ の資源化に限らず、様々な触媒反応による有用な物質の合成にも寄与することが期待される。

3. 研究の方法

前述した目的を達成するために、本研究では以下の 3 つの方面から研究を進めてきた：

(1) 新規耐熱合金プラズモニックナノ触媒の創製：元素戦略の観点から、IB 族の貨幣金属に限らず、より広範な種類の遷移金属を含めた新たな金属・合金を探索し、高いプラズモン共鳴効果および触媒反応効果を併せ持つ耐熱性ナノメタルの設計・創製を行った。

(2) 表・界面構造制御によるプラズモン共鳴の増強：半導体材料を中心にナノ金属を担持する担体の組成 & 形態の制御を行うことにより、担体の構造的・物理化学的特性が二酸化炭素等反応分子の吸着・活性化への影響について研究を行った。

(3) プラズモン共鳴が関わる触媒反応のメカニズム究明：二酸化炭素のメタン化等のモデル反応を用い、プラズモニックナノ触媒における二酸化炭素の活性化・資源化における詳細なメカニズムを検討した。特にその場フーリエ変換赤外分光や同位体 GC-MS 等を駆使し、触媒反応における中間生成物、最終産物の経時変化等を調べ、触媒反応メカニズムの解明に努めた。また、共同研究者の協力を得て、第一原理理論計算や電磁場シミュレーション等を通じ、不均一反応系全体の電子構造や反応に伴うポテンシャルエネルギーの変化、さらに光照射下の表面局在電場分布などを調べ、二酸化炭素等小分子の活性化メカニズムについて詳細な検討を行った。

4. 研究成果

本研究を通じ、新規金属・合金プラズモニックナノ触媒の設計・創製、表面・界面構造制御、およびプラズモニックナノ触媒に基づく触媒反応のメカニズム解明に関し、多くの重要な知見を得ることができた。以下にその代表的な成果について述べる。

(1) Cu プラズモニックナノ触媒を用いた CO₂ からのメタノール合成における光促進効果

幅広い太陽光スペクトルに対し吸収を有するプラズモニックナノ金属 Cu を紫外光しか吸収利用できない ZnO サポート上に分散し、常圧下における二酸化炭素からのメタノール合成反応における光励起ホットキャリアの影響について詳細に研究した。その結果、220 nm における従来の熱触媒反応に比べ、可視光 (420 < λ < 800 nm、0.58 W/cm²) を照射した場合には活性化エネルギーが約 40% 減少し、メタノール合成活性が 54% も高くなることが明らかとなった (図 1)。また、この光の照射による反応促進効果は繰り返し再現可能であり、高い安定性を示す。その場フーリエ変換赤外分光法や、表面局在電磁場分布のシミュレーション等を駆使した研究から、光照射によって Cu に生成したホット電子が速やかに ZnO に移動し、その界面において反応中間体の活性化が促され、その結果メタノール合成が大幅に促進されることが明らかとなった。本研究は、二酸化炭素から液体燃料への合成におけるプラズモニックナノ触媒の有効性を初め

て示した。また、その反応活性化プロセスについても定量的に解析した。これらの成果は CO₂ 等小分子の低温活性化、燃料化の実現に極めて重要な知見を提供した。なお、本研究成果は *Appl. Catal. B: Environ.* **250** (2019) 10-16 に発表した。

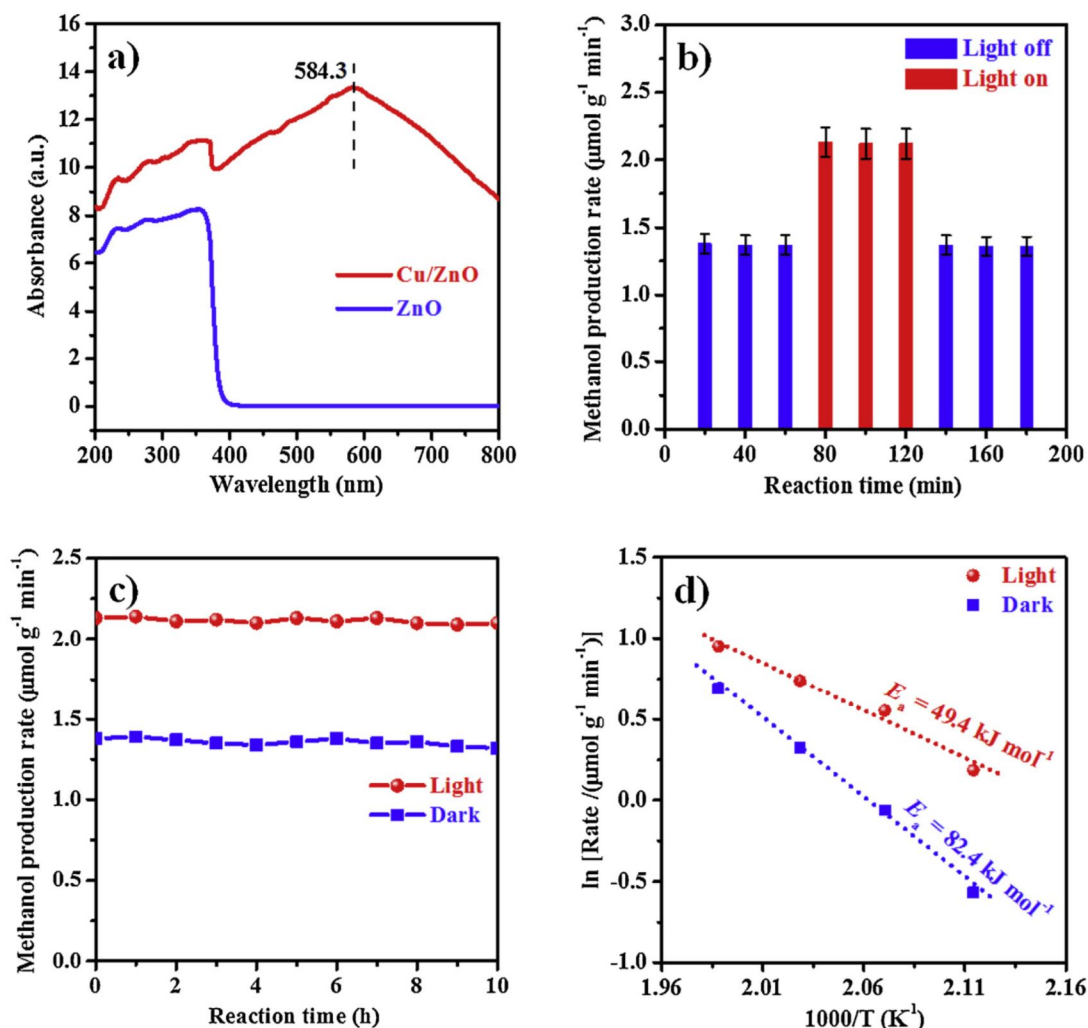


図1 Cu/ZnO 触媒による二酸化炭素からのメタノール合成における光照射の影響。(a) Cu/ZnO 触媒および ZnO 担体の UV-vis 吸収スペクトル。(b) 可視光照射ありとなしの場合におけるメタノールの生成速度比較 (温度はいずれも 220 °C)。 (c) メタノール生成の安定性比較。(d) アレニウスプロット比較。

(2) プラズモニック Ga-Cu/CeO₂ 触媒の創製および光誘起 RWGS 反応の高効率化

Cu ナノ触媒は CO₂ を CO に変換する Reverse Water Gas Shift 反応 (RWGS) において活性的であることが知られているが、高温反応における粒子凝集による失活が大きな課題である。本研究では、Ga および Cu 含有 Ce 基金属有機構造体の直接熱分解により、CeO₂ サポートの表面に凝集を抑えられた高分散 Ga と Cu ナノ触媒の設計・創製に成功した。CeO₂ には強い金属-サポート間相互作用が期待され、また Ga は CO₂ 水素化の促進剤として導入した。一連の組成を制御した Ga-Cu/CeO₂ 触媒を用いて疑似太陽光の照射下における RWGS 反応を実施したところ、Cu と Ga の比率が約 2:1 の触媒において最も高い反応活性が得られた。従来報告を大きく凌ぐ CO の生成活性 (111.2 mmol g⁻¹ h⁻¹) が得られたと共に、CO への選択性が 100% に達した。

詳細なメカニズムの研究から、光照射による Cu ナノ触媒の効率的な光熱変換および光励起ホットキャリアによる相乗効果が見かけの活性化エネルギーを減らし、CO の劇的な増加をもたらしたことが明らかとなった。また、Ga の導入により、CeO₂ 表面での酸素空孔の生成が促進され、Cu と CeO₂ 間の相互作用が強くなった。その結果、触媒表面での CO₂ の吸着および bidentate formate 中間体の形成が促進された。一方、光照射によって生成したホットキャリアは、H₂ の H 種への解離を促進したのみならず、ギ酸塩種のカルボニルへの分解、そして最終的には生成物としての CO への分解を促進したと考えられる。つまり、CeO₂ サポートと表面に高分散した Ga と Cu が太陽光の効率的な吸収、触媒表面での CO₂ の吸着、ギ酸中間体の形成・分解を経て CO の生成において協奏的な作用を果たしていることが明らかとなった。なお、本研究成果は *Appl. Catal. B: Environ.* **298** (2021) 120519 に発表した。

(3) Cu 基プラズモニック合金触媒の創製および光誘起アルコールの脱水素化への応用

プラズモニック金属ナノ粒子を反応場とする光誘起熱触媒反応の優位性・普遍性およびそのメカニズムを明らかにするために、二酸化炭素の燃料化以外の触媒反応についても検討を行った。モデル反応として、光誘起アルコールの脱水素化を利用した。アルコールは水素含有量の高さおよび入手のしやすさから有望な水素キャリアとして知られているが、従来の熱触媒による脱水素化は高いエネルギー消費を必要としているため、温和な条件下での効率的な脱水素化反応を可能にする新規触媒技術の開発が求められている。本研究では、Cu 基プラズモニック金属触媒の粒子サイズおよび組成の設計・制御を通じ、太陽光エネルギーのみを利用した高効率なアルコール脱水素化反応の実現に挑んだ。また、プラズモン共鳴を介した反応物の活性化メカニズム解明にも取り組んだ。

その結果、Cu 触媒の表面に Ni を合金化させることによって、光駆動エタノール脱水素化反応において倍近い活性向上が得られることが明らかとなった。特に 4% の Ni を合金化させた触媒材料では、反応の活性化エネルギーが 45% も低下し、3.8% に上る太陽光エネルギーから燃料への変換効率を実現した。種々実験計測および理論計算から、Cu ナノ粒子で生成されたホットエレクトロンが Ni 原子に速やかに移動し、それによって、電荷分離および吸着分子の活性化が促進されたため、合金化した触媒において高活性が得られたことが明らかとなった (*Appl. Catal. B: Environ.*, 272 (2020) 118965 に発表)。

また、Cu 触媒に水分子の活性化に有効とされる Zn を担持した材料においては、太陽光のみを利用したメタノール水蒸気改質反応による高効率な水素生成を実現した。Cu 触媒に比較し、0.8%、1.3% および 1.8% の Zn を表面に合金化した触媒材料では、疑似太陽光照射による表面温度の増加に大差がないものの、メタノール水蒸気改質反応による水素生成においては数倍の活性向上が得られた(図 2)。特に 1.3% の Zn を含有する触媒では従来報告を大きく凌ぐメタノール水蒸気改質反応による水素生成を達成した。種々実験計測および理論計算から、Cu 触媒の優れた光熱変換能力に加え、Cu と Zn 原子がそれぞれメタノールおよび水分子の活性サイトを担い、その協奏作用が高活性の実現において重要な役割を果たしていることを見出した (*J. Am. Chem. Soc.* 2021, 143, 12145–12153 に発表)。これらの成果は、アルコールの脱水素化に限らず、様々な太陽光駆動触媒反応の高効率化に重要なプラズモニック金属触媒の設計、創成、および反応メカニズムを明らかにする上で重要である。

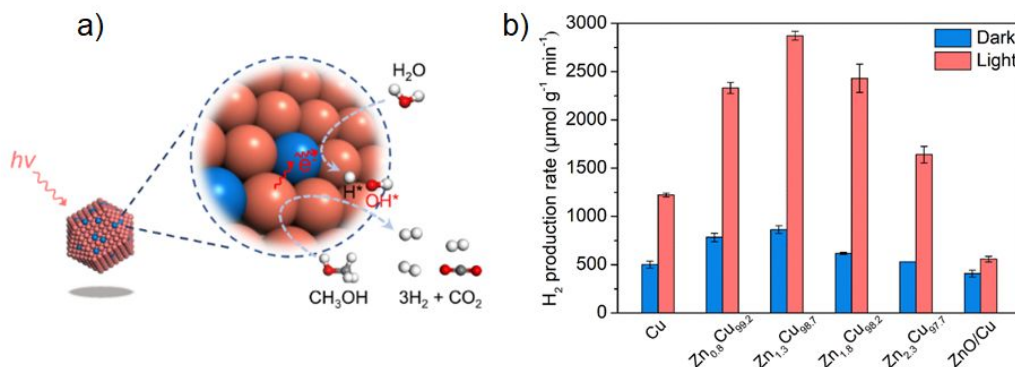


図 2 Cu 基合金触媒の設計・制御による高効率な光誘起メタノール水蒸気改質反応。左図：合金の構造および反応イメージ。右図：反応活性の合金組成依存

(4) Ni 基プラズモニック触媒複合材料による自然光照射二酸化炭素メタン化の実現

プラズモニックナノ触媒に基づく二酸化炭素資源化研究の実用化を目指すため、より高効率で、屋外の弱い太陽光照射下でも二酸化炭素のメタン化反応を可能にする新規ナノ触媒複合材料の開発が必要不可欠である。それを実現するカギとしては、熱放射をいかに減らし、太陽光の照射のみでメタン化反応に必要な 200 以上に昇温することが重要である。そこで、本研究は、安価で優れた太陽光吸収および光熱変換能力を有する Ni プラズモニック触媒に熱放射をほとんど発生しない選択的光吸収材(AlN_x/Al foil)と複合させることで、弱い太陽光照射 ($1\ kWm^{-2}$) 下でも高温を発生する光熱触媒材料システムの構築を試みた(図 3)。Ni 触媒としてはより優れた光誘起熱触媒効果を引き出すため、アモルファス Y_2O_3 ナノシートに単原子 (SA) の状態で分散させた。この新規 SA Ni/ Y_2O_3 ナノ触媒は、他の Ni 触媒に比べ、初期反応温度が低く、 CO_2 メタン化においてより高い活性を示した。また、選択的光吸収材との相乗効果により、標準太陽光の照射下で $288\ ^\circ C$ にも達することができ、従来の光熱変換より温度が 3 倍も高くなった。

この複合触媒材料を用い、屋外太陽光 ($0.52\sim 0.7\ kW\ m^{-2}$) の直接照射による光熱 CO_2 メタン化を行ったところ、90% の CO_2 変換効率および 100% のメタン選択性を実現した(図 3c)。本

研究は自然光照射によるメタン化において世界で初めての成功例であり、プラズモニックナノ触媒に基づく二酸化炭素の資源化が将来的に実用可能な技術であることを強く示唆した。なお、本研究はその新規性とインパクトが高く評価され、*Nat. Commun.* (2019) **10**:2359 に発表した。

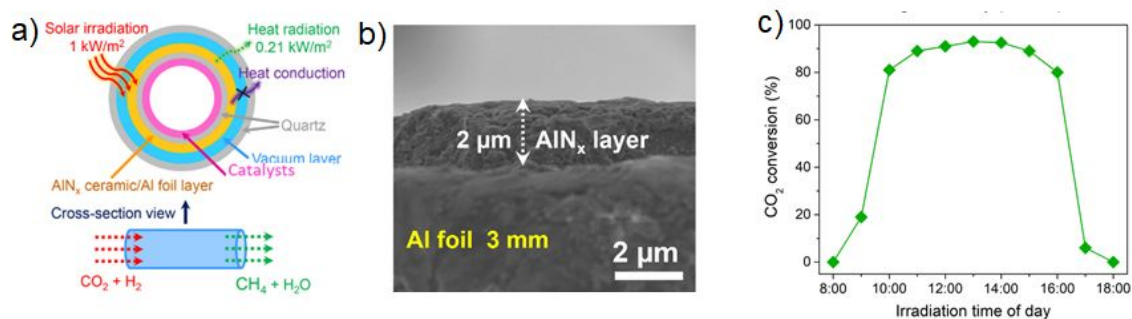


図3 a) 新規光誘起熱触媒材料を利用した反応リアクターのイメージ、b) 複合光誘起触媒材料の断面 SEM イメージ、c) 屋外自然光照射による二酸化炭素のメタン化反応

以上のように、本研究は耐熱合金プラズモニックナノ触媒の設計・創成および二酸化炭素の資源化などへの応用を目指し、鋭意研究開発を進めてきたところ、VIII 族金属 Ni および Cu をベースとしたナノ複合触媒の開発に成功した。また、これらの新規プラズモニックナノ触媒を利用し、高効率な光誘起二酸化炭素の燃料化のみならず、アルコールの脱水素反応など他の光誘起触媒反応への応用を実現した。また、理論計算とその場計測実験の連携によってプラズモニックナノ触媒におけるホットキャリアの挙動および反応メカニズムに関し、多くの重要な知見を得ることができた。さらにプラズモニックナノ金属触媒に選択的光吸収材を複合させることで、屋外太陽光照射下でも二酸化炭素のメタン化を実現し、将来的な実用化に道筋を示した。

最後になるが、本研究で得られた知見について *Chemical Science* 誌の依頼に基づき“Plasmonic photothermal catalysis for solar-to-fuel conversion: Current status and prospects”と題する Review 論文、また、*Joule* 誌の依頼で“Towards solar-driven carbon recycling”と題する Perspective 論文を発表した。さらに、光と熱の協奏効果による二酸化炭素の資源化について、*Angew. Chem. Int. Ed.* 誌に“Coupling of Solar Energy and Thermal Energy for Carbon Dioxide Reduction: Status and Prospects”と題する Review 論文を発表した。これらの総説において本研究が挑戦したプラズモニックナノ触媒に基づく太陽光駆動二酸化炭素の資源化研究における最新の進展を総括し、今後の課題・発展方向および実用化へのロードマップを示した。

< 引用文献 >

- 1) S. Linic, P. Christopher, D. B. Ingram, *Nat. Mater.* 10, 911-921, 2011.
- 2) X. Meng, S. Ouyang, J. Ye, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* 53, 11478-11482, 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 26件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Deng Bowen, Song Hui, Peng Kang, Li Qian, Ye Jinhua	4. 巻 298
2. 論文標題 Metal-organic framework-derived Ga-Cu/CeO ₂ catalyst for highly efficient photothermal catalytic CO ₂ reduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 120519 ~ 120519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2021.120519	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 Luo Shunqin, Ren Xiaohui, Lin Huiwen, Song Hui, Ye Jinhua	4. 巻 12
2. 論文標題 Plasmonic photothermal catalysis for solar-to-fuel conversion: current status and prospects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 5701 ~ 5719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sc00064k	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 Lin Huiwen, Luo Shunqin, Zhang Huabin, Ye Jinhua	4. 巻 6
2. 論文標題 Toward solar-driven carbon recycling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Joule	6. 最初と最後の頁 294 ~ 314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.joule.2022.01.001	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 Luo Shunqin, Lin Huiwen, Wang Qi, Ren Xiaohui, Hernandez-Pinilla David, Nagao Tadaaki, Xie Yao, Yang Gaoliang, Li Sijie, Song Hui, Oshikiri Mitsutake, Ye Jinhua	4. 巻 143
2. 論文標題 Triggering Water and Methanol Activation for Solar-Driven H ₂ Production: Interplay of Dual Active Sites over Plasmonic ZnCu Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 12145 ~ 12153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.1c04315	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 Luo Shunqin, Song Hui, Philo Davin, Oshikiri Mitsutake, Kako Tetsuya, Ye Jinhua	4. 巻 272
2. 論文標題 Solar-driven production of hydrogen and acetaldehyde from ethanol on Ni-Cu bimetallic catalysts with solar-to-fuels conversion efficiency up to 3.8 %	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 118965 ~ 118965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2020.118965	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 Wang Zhou jun, Song Hui, Liu Huimin, Ye Jinhua	4. 巻 59
2. 論文標題 Coupling of Solar Energy and Thermal Energy for Carbon Dioxide Reduction: Status and Prospects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 8016 ~ 8035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201907443	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 Li Yaguang, Hao Jianchao, Song Hui, Zhang Fengyu, Bai Xianhua, Meng Xianguang, Zhang Hongyuan, Wang Shufang, Hu Yong, Ye Jinhua	4. 巻 10
2. 論文標題 Selective light absorber-assisted single nickel atom catalysts for ambient sunlight-driven CO2 methanation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-10304-y	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 Wang Zhou-jun, Song Hui, Pang Hong, Ning Yanxiao, Dao Thang Duy, Wang Zhuan, Chen Hailong, Weng Yuxiang, Fu Qiang, Nagao Tadaaki, Fang Yunming, Ye Jinhua	4. 巻 250
2. 論文標題 Photo-assisted methanol synthesis via CO2 reduction under ambient pressure over plasmonic Cu/ZnO catalysts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Catalysis B: Environmental	6. 最初と最後の頁 10 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcatb.2019.03.003	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

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 葉 金花
2. 発表標題 カーボンニュートラルを目指した光機能材料の設計・制御
3. 学会等名 光機能材料研究会第83回講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 葉 金花
2. 発表標題 太陽光エネルギーの高度利用による温室効果ガスの資源化に関する研究
3. 学会等名 光機能材料研究会第77回講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 葉 金花
2. 発表標題 Recent Advances in Solar Energy Mediated CO ₂ and CH ₄ Conversion
3. 学会等名 C-MRS（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 葉 金花
2. 発表標題 Recent Advances in Solar Energy Mediated Carbon Dioxide Reduction
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (Photocatalysis 3)（招待講演） （国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 葉 金花
2. 発表標題 Solar Fuel Production by Artificial Photosynthesis: Current Status and Prospects
3. 学会等名 中国材料大会2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	長尾 忠昭 (NAGAO Tadaaki)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテク トニクス研究拠点・MANA主任研究者	
	(40267456)	(82108)	

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