

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01208

研究課題名(和文) 低炭素水素社会に向けたプラズマ触媒の気固境界面反応場の基盤技術

研究課題名(英文) Plasma catalysis at gas-surface interface for low-carbon hydrogen society

研究代表者

金 賢夏 (KIM, Hyun-Ha)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究グループ長

研究者番号：20356893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：新規低温触媒反応場の具現化するモデル反応としてアンモニア合成にRu触媒を用いる場合、従来の熱触媒反応に(90～120 kJ mol⁻¹)に比べ、プラズマ触媒では活性化エネルギーが1/3以下まで大きく減少することを明らかにした。これはプラズマ触媒では明らかに反応障壁が下がっていること裏付ける定量的な一例である。また、触媒表面で形成されるサーフェストリマの進展特性について電源の極性の影響を明らかにした。この研究成果は、今まで実験的に確認されてきた触媒の種類による反応活性の違いを解明する上で極めて重要な学術的情報が提供できると共に、今後の触媒の改良及び高度設計に有効に活用できるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマ触媒の学理確立に必要な基礎的知見を得ると同時に水素エネルギー普及を想定したアンモニア合成法への応用を検討した。触媒を従来の熱反応より低い温度で活性化させるためにはプラズマを効率よく触媒と接触させる必要がある。高感度カメラによる触媒表面のプラズマ形成や進展を短い時間分解能(< 5 ns)で検証し、触媒接触点付近におけるプラズマの強化と加速などの特異的な特徴を明らかにした。また、アンモニア合成における活性化エネルギーの評価ではプラズマ法では熱反応より活性化エネルギーを1/3程度まで下げられることを検証し、分散型アンモニア合成に向けたプラズマ触媒法の可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In NH₃ synthesis using Ru/alumina catalyst, Arrhenius plot indicated that plasma lowered the reaction barrier by one third. For example, activation energy in conventional thermal catalysis decreased to 1/3 for plasma-catalysis. We also investigated the surface streamer propagation with both polarities of negative and positive. In contrast to the CDS in the gas-phase with a positive polarity, the CDS in catalyst packed-bed under negative polarity showed a more branching and larger number of streamers in the presence of oxygen than in pure N₂. For the CO oxidation, Pd-Ag bimetallic catalyst was found to be very active for both CO oxidation and O₃ utilization efficiency. In-situ Fourier transform IR measurement revealed that cooperative effect in the bimetallic Ag-Pd catalyst involved modification of CO adsorption and the suppression of product accumulation. These finding may provide some useful insight in understanding fundamental working mechanism of plasma-catalysis.

研究分野：プラズマ触媒

キーワード：低温プラズマ 触媒 アンモニア合成 沿面ストリーマ

1. 研究開始当初の背景

水素エネルギーは最終利用において CO₂ を一切排出しないため低炭素社会の実現に必要なエネルギー媒体として大きな期待が寄せられている。近年、燃料電池自動車 MIRAI の実用化などで水素燃料の直接利用は身近なものになりつつあり、水素社会の更なる普及・拡大には、水素の貯蔵と長距離輸送技術の確保は極めて重要である。肥料として長年の実績と社会インフラが確立しているアンモニアは水素の貯蔵と長距離輸送媒体としても最近注目を集めている。現在アンモニア合成に用いられるハーバーボッシュ法(以下 HB 法)は、合成ステップ(温度 500°C、圧力 200~300 気圧)と冷却・回収ステップ(温度 -33°C、圧力 2~3 気圧)間で大きい圧力と温度のスウィングがあるため、エネルギー消費の主な原因となっている。近年、再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、出力変動、エネルギー源の偏在性そして余剰電力発生などを解決するため電気エネルギーを化学エネルギーに変換する方法(Power-to-Fuel; 以下 PtF)が注目を集めている。アンモニア合成ステップにおける反応温度と圧力を下げることが、HB 法の省エネルギー化に直結する研究課題であり、これの解決に向けて世界中の研究者により新しい材料、触媒、反応手法などの研究開発に取り組んでいる(例えば、Nature Chemistry, vol. 4, pp. 934-940, 2012; Science, vol. 345, pp. 637-640, 2014)。空気から窒素固定技術としてアーク放電が先に実用化されたが、HB 法の登場により過去のものになってしまった。それ以降もプラズマ技術を利用したアンモニア合成の試行的研究は散発的に数多く報告されているが、エネルギー収率で 2 g-NH₃/kWh を超える報告例はなかった。申請者らの最新の研究では、ルテニウム触媒・助触媒・パルス電源・反応温度などを巧妙に組み合わせることで、大気圧の流通式反応条件下でエネルギー収率を 36 g-NH₃/kWh まで向上させることに成功した(研究業績 2 の論文)。

プラズマを用いる化学反応は、水処理、有害ガスの浄化、表面のエッチングなど様々な分野で応用されている。反応性に富んだ活性種はプラズマ化学反応の主役である一方で、大気圧における短い寿命は($\sim 10^{-5}$ sec)ヘテロ界面との相互作用において高いハードルとなっていた。触媒を充填したプラズマ反応器では、固体触媒表面でストリーマ放電が形成できるため、短寿命の活性種を固体表面の触媒活性点に直接供給し、室温下でも触媒反応を引き起こすことが可能となる。高い活性を有する気固界面を形成するためには、ナノサイズの遷移金属で表面を修飾した触媒の調製が重要であり、プラズマ進展の物理的相互作用と目的反応における反応活性などを総合的に評価しなければならない。特に、既存の触媒法より低い温度・圧力条件で高活性なプラズマ触媒技術を白金、ロジウム、パラジウムなどの高価な希少貴金属を使用せずに確立できれば、始まったばかりの低炭素水素社会構築への社会ニーズへの貢献だけでなく、元素資源戦略に基づいた次世代型の新規反応技術としての幅広い反応プロセスや化学産業に波及効果が期待できる研究課題である。

2. 研究の目的

本研究では、低い温度で高い反応性を有する低温プラズマと高選択性が得られる触媒技術を相補的複合させることによって、「中小規模の分散型エネルギーシステムに適した新規アンモニア合成技術」と「低温動作型 CO₂ の資源化技術」を従来の触媒法より低い温度と圧力で実現し、低炭素水素社会に向けたプラズマ利用の基盤技術の確立を目指す。この目的を達成するためには、各種遷移金属のナノ粒子で修飾した触媒表面と触媒表面近傍で形成されるプラズマとの相互作用の学理の理解が不可欠である。特に、機能の異なる活性金属成分を水素化目的反応に合わせて修飾する界面設計はまだ研究例が少ない未開拓の研究分野であり、プラズマ触媒技術の体系化に大いに貢献できる。

水素エネルギーの貯蔵と長距離輸送の媒体として注目されているアンモニアは、合成における温度と圧力のスウィングの大きい HB 法に依存している。HB 法は、2000 ton-NH₃/d 以上の大量生産に適した連続運転施設であり、規模が小さくなるほど生産コストが高くなるため 10 ton-NH₃/d 程度の小さいプラント規模の運用事例はない。本研究では、プラズマ触媒法の気固界面における相互作用を活用し、温度 300°C 以下、圧力 10 気圧以下の反応条件で HB 法に対抗できるアンモニア合成のエネルギー収率 150 g-NH₃/kWh の達成を目指す。CO₂ 資源化に関しては、メタノールあるいはメタン化などの研究例はいくつか報告例があるものの、付加価値の高いブタノールへの研究例は少ない。

この研究で予想される成果は、プラズマ触媒技術をベースとする様々な応用分野に必要な評価手段、反応条件の最適化、そして触媒材料開発などにおいて工学的設計指針が提供できる。

3. 研究の方法

本研究のキーポイントは、低温プラズマの非平衡性と活性種をプラズマ(気)と触媒(個)の界面で相互作用させる設計技術と反応制御の確立である。水素化の目的反応に適した触媒を単一成分または二元合金としてナノサイズに修飾した触媒の開発、水素化反応促進に有効な助触媒の開発、触媒表面特性がプラズマ形成に与える影響などを精査し、二つの目的反応に設定したエネルギー収率の数値目標達成への道筋を明らかにする。ナノ粒子で修飾した新規触媒は、所内の共同分析施設のエックス線光電子分光法(XPS)、X線回折(XRD)、電子顕微鏡(SEM, TEM)などの分析法を駆使し、材料の評価を行う。また、触媒の種類による反応活性、反応収率に対する温度と圧力などの影響、そしてプラズマの計測・診断を同時に行える加圧式反応チャンバーを構築し、プラズマの進展特性と触媒評価を同時に行う。特に、プラズマ触媒複合プロセスの報告例のほとんどは大気圧で行われた結果であり、圧力依存性について詳細な研究結果を報告した例はない。本研究で目指す目標を達成する上で必要不可欠な実験システムを研究初年度に構築することは、世界に先駆けて詳細なパラメータを系統的に評価し効率的に研究を進める。プラズマ触媒複合プロセスにおける、相互作用を理解するためには、プラズマと触媒のそれぞれに関連した分析が必要となる。プラズマの進展様子はICCDカメラ(現有装置)を用いナノ秒刻みでストリーマの進展特性を計測する。プラズマに暴露された触媒表面における表面活性種はESR(所内共通装置)を用いて分析を行う。特に、レーザ誘起蛍光法(LIF法)や分光装置(現有装置)ではNHラジカル(336.7nm)、Hラジカル(H 656.6 nm, H 486.1 nm, H 434.4 nm)、窒素のFNS(39.14 nm)およびSPS(337.1 nm)、CH(431.4 nm)などの活性種の空間分布及び時間変動を調べ、プラズマによる触媒表面への活性種の供給フラックスを調べる予定である。そして、アイソトープ標識分子($^{15}\text{N}_2$, D_2 , $^{13}\text{CO}_2$)を用いプラズマによる活性種の表面への取り込みを、また、すでに表面に吸着されているアイソトープ標識分子・原子の反応特性をオンライン質量分析器(現有装置)により追跡する。また、沿面ストリーマにより固体表面で進行する触媒反応のin-situ観察には拡散反射赤外分光法(DRIFT)を用いる。気相のプラズマと個体表面の分析を目的反応のキーステップにリンクして行うことにより、反応メカニズムの解明と学理の体系化を推進できる。

4. 研究成果

触媒の活性化と反応促進をプラズマで行う場合、両者の接触面積を大きくする必要がある。プラズマ中で生成される活性種は寿命が短く、大気圧では拡散距離が $60\ \mu\text{m}$ 程度しかないため触媒表面から離れた場所で形成されるプラズマは表面への直接作用が期待できない。そのため、触媒表面を這うように進展するサーフェスストリーマは触媒表面との相互作用を最大限に発揮するために極めて重要な要素となる。プラズマの進展特性が触媒活性に密接に関係していることが分かっている。これは従来の熱触媒の設計にはないプラズマ触媒の特異的なパラメータともいえる。図1には正極性と負極性のパルス高電圧を印加した際に触媒表面で形成される沿面ストリーマの様子を示す。高感度ICCDカメラの露光時間を $100\ \text{ns}$ にした場合、極性による放電進展違いは明瞭ではなく、両極性ともに触媒表面を這うような沿面ストリーマが観察される。これを $5\ \text{ns}$ の時間分解能で充填層の放電進展を観察したのが図2です。図2には2枚のメッシュ電極間に(a)正極性パルス電圧と(b)負極性パルス電圧を印加したとき触媒表面で進展する沿面ストリーマの進展様子を $5\ \text{ns}$ の時間分解能で計測した例を示す。正極性の場合、気相の1次ストリーマのようにcathode-directed streamer(CDS)が進展する。注目すべきポイントとして、触媒ペレットの接触ポイントではストリーマ先端の発光強度が強くなる。ストリーマの平均進展速度は $600\ \text{km s}^{-1}$ 程度であるが、発光強度と同様に展開強度が強いペレットの接触点では加速される。1次ストリーマが電極間を横断してから、2次ストリーマが観測される。2次ストリーマの速度は印加電圧に依存せずほぼ一定の値を取る($\sim 80\ \text{km s}^{-1}$)。一方では、負極性の印加では、1次ストリーマは観測されず、メッシュ電極付近でグロー放電が観測される。(b)の $+25\ \text{ns}$ から接地電極から陰極に向けてストリーマが進展する。これは、正極性で観察されるCDSが反対向きに形成されるものである。触媒表面で観察されるCDSの進展速度は気相と水上ストリーマの間であり、ストリーマの進展速度が媒体依存することは非常に興味深い: 気中($\sim 2000\ \text{km s}^{-1}$) > 触媒表面($300\sim 600\ \text{km s}^{-1}$) > 水面($40\sim 70\ \text{km s}^{-1}$) > 水中(2次; $\sim 40\ \text{km s}^{-1}$)。

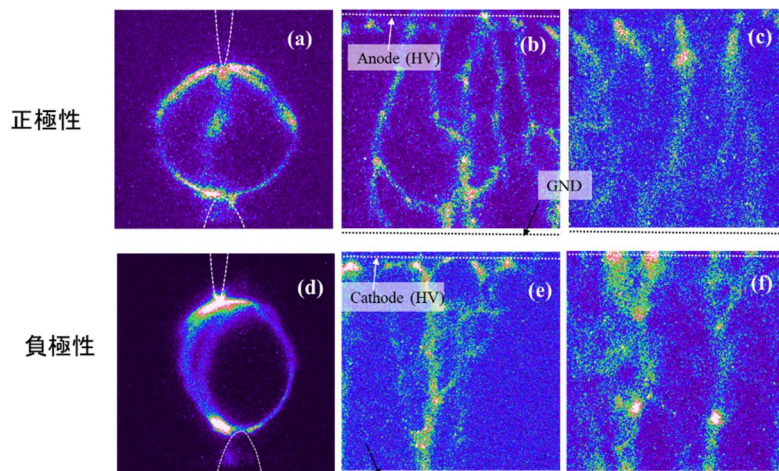


図 1。極性が触媒表面で発生する沿面ストリーマに与える影響 (ICCD gate-time of 100 ns) : (a), (d) non-porous Al_2O_3 with 1 scan, (b) $\text{Ag}(2)/\text{TiO}_2$ with 3 scans, (e) $\text{Ag}(2)/\text{TiO}_2$ with 5 scans, and (c) $\text{Ag}(5)/-\text{Al}_2\text{O}_3$ with 3 scans, (f) $\text{Ag}(5)/-\text{Al}_2\text{O}_3$ with 5 scans.

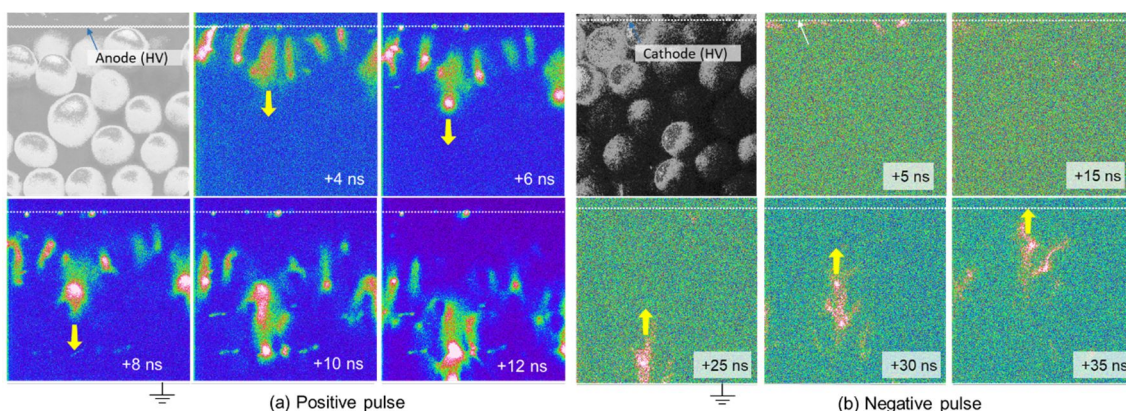


図 2 Time-resolved ICCD imaging of surface streamers in air on Ag/TiO_2 catalysts; (a) positive pulse of 12.5 kV, and (b) negative pulse of -14.5 kV.

アンモニア合成を含めて触媒活性を評価する上で、反応の障壁を超えるために必要な活性化エネルギーが良く用いられる。図 3 には交流またはパルス印加したルテニウム触媒によるアンモニア合成のアレニウスプロットを示した。プラズマ化学の特徴でもあるが、比投入エネルギーが異なる条件ではデータがよりバラツクことは注意いただきたい。プラズマを用いない熱触媒では、アンモニア合成の活性化エネルギーが $102.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ であり、従来の熱触媒で報告されている値 ($90 \sim 120 \text{ kJ mol}^{-1}$) にほぼ等しい [1]。プラズマ触媒では、アンモニア合成の活性化エネルギーが $1/3$ 以下まで大きく減少し、パルスで 28.7 kJ mol^{-1} 、交流で 24.4 kJ mol^{-1} の活性化エネルギーが得られた。これらの活性化エネルギーの比較から、プラズマ触媒では明らかに反応障壁が下がっていることは推察できる。プラズマ中では、各種ラジカル (N , NH , H など) や励起・振動分子などが触媒表面に供給されるため、従来の熱触媒には存在しない新しい反応経路が形成されることでエネルギー障壁が大幅にさがったとも理解できる。

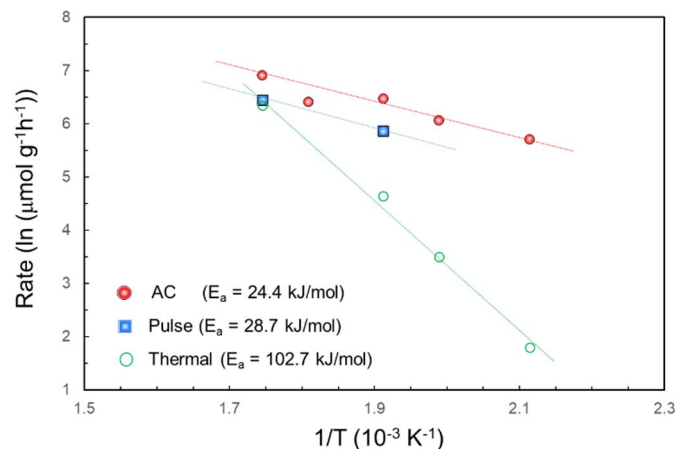
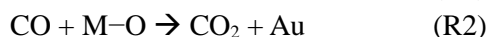
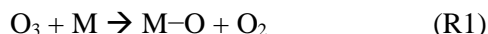


図3 . プラズマ触媒によるアンモニア合成反応のアレニウスプロット。

触媒の反応活性評価のモデル反応として古くから広く使われているのが CO の酸化である。本来の触媒活性を完全に失った析出沈殿法で調製した金ナノ粒子(Au)触媒にプラズマを印加すると高いCO 転換率が得られる。これは、担体から接合境界面周縁部に酸素が供給されるルートが閉鎖されても、気相のプラズマから金ナノ粒子表面に直接供給される酸化活性種により反応が進行していると考えられる。本来室温では活性点として機能しない Au 表面をプラズマにより有効利用していると推察できる。熱触媒では Pd-LaFeO₃ 触媒が一番活性が高く Ag-Pd 触媒が最も低い活性を示す。しかし、オゾン援用触媒法ではこの順序が逆転して Ag-Pd 触媒が最も優れており、Pd-LaFeO₃ 触媒は最も低い活性を示す。オゾンは担持金属(M)の表面で分解された酸素原子をトラップして(M-O)CO の酸化反応に消費される。銀触媒の場合 CO とオゾン濃度が等しい場合、ほぼ化学量論比で反応が進行する。オゾン濃度が過剰となると R3 によりオゾン分解が促進されオゾンの利用率が低下する。



オゾンの転換率も CO 酸化活性とおおむね一致しており、Ag-Pd 触媒の場合オゾンは完全に消費される。拡散反射型フーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR)でその場で反応を観察した結果、PdO 上に吸着した CO (2142 cm⁻¹)はオゾンによって酸化されやすいこと、Pd に蓄積されるカーボネート種 (1456, 1570 cm⁻¹)が Ag-Pd では抑制されることが高活性の原因となっていることが明らかとなった。

< 引用文献 >

[1] Aika, *et al.*, J. Catal., Vol.136, pp. 126-140, 1992.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Hyun-Ha Kim, Nozomi Takeuchi, Yoshiyuki Teramoto, Atushi Ogata, Ayamn A. Abdelazia | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Plasma candle: A new type of scaled-up plasma jet device | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Plasma Environmental Science and Technology | 6. 最初と最後の頁 e01004 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34343/ijpest.2020.14.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 Shuiliang Yao, Zhizong Chen, Han Xie, Yuchen Yuan, Ruowen Zhou, Bingqing Xu, Junxia Chen, Xinyue Wu, Zuliang Wu, Boqiong Jiang, Xiujuan Tang, Hao Lu, Tomohiro Nozaki, Hyun-Ha Kim, | 4. 巻 247 |
| 2. 論文標題 Highly efficient decomposition of toluene using a high-temperature plasma-catalysis reactor | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Chemosphere | 6. 最初と最後の頁 125863 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2020.125863 | 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 A. Ayman, H.H. Kim | 4. 巻 53 |
| 2. 論文標題 Temperature-dependent behavior of nitrogen fixation in nanopulsed DBD operated at different humidity levels and oxygen contents | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 4001 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab5c78 | 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 K. Rouwenhorst, H.H. Kim, L. Lefferts | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Vibrationally excited activation of N ₂ in plasma-enhanced catalytic ammonia synthesis: a kinetic analysis | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 ACS Sustainable Chem Eng | 6. 最初と最後の頁 17515-17522 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.9b04997 | 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 Y. Teramoto, H.H. Kim | 4. 巻 52 |
| 2. 論文標題 Effect of vibrationally excited N2(v) on atomic nitrogen generation using two consecutive pulse corona discharges under atmospheric pressure N2 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 494003 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab3f83 | 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 金賢夏 | 4. 巻 95 |
| 2. 論文標題 プラズマ触媒複合プロセスの環境・エネルギー応用 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 J. Plasma Fusion Res | 6. 最初と最後の頁 309-316 |
| 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 Tou Akihiro, Kim Hyun-Ha, Einaga Hisahiro, Teramoto Yoshiyuki, Ogata Atsushi | 4. 巻 355 |
| 2. 論文標題 Ozone-assisted catalysis of CO: In situ Fourier transform IR evidence of the cooperative effect of a bimetallic Ag-Pd catalyst | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal | 6. 最初と最後の頁 380 ~ 389 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2018.08.159 | 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 Kim Hyun-Ha, Teramoto Yoshiyuki, Ogata Atsushi, Kang Woo Seok, Hur Min, Song Young-Hoon | 4. 巻 51 |
| 2. 論文標題 Negative surface streamers propagating on TiO2 and -Al2O3-supported Ag catalysts: ICCD imaging and modeling study | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 244006 ~ 244006 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aac04d | 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13件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hyun-Ha Kim |
| 2. 発表標題 Understanding the Interaction of Nonthermal Plasma and Catalyst |
| 3. 学会等名 APSPT-11 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hyun-Ha Kim, Ayman A. Abdelaziz |
| 2. 発表標題 Plasma candle: A new type of plasma-jet device |
| 3. 学会等名 EA-PETEA 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hyun-Ha Kim, Ayman A. Abdelaziz, Yoshiyuki Teramoto, Atsushi Ogata |
| 2. 発表標題 Nonthermal plasma for nitrogen fixation and ammonia synthesis |
| 3. 学会等名 ISNPEDADM 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hyun-Ha Kim, Ayman A. Abdelaziz, Yoshiyuki Teramoto, Atsushi Ogata |
| 2. 発表標題 Plasma candle: A new type of plasma-jet |
| 3. 学会等名 ISPC-24 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hyun-Ha Kim, Ayman A. Abdelaziz, Yoshiyuki Teramoto, Atsushi Ogata |
| 2. 発表標題 プラズマキャンドル：大気圧Heプラズマジェットのスケーリングアップ |
| 3. 学会等名 静電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ayman A. Abdelaziz, Hyun-Ha Kim |
| 2. 発表標題 Quantitative analysis of the influences of gas temperature on nitrogen fixation in nano-pulsed DBD |
| 3. 学会等名 静電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 金賢夏 |
| 2. 発表標題 低温プラズマと触媒の相互作用の理解と新規反応プロセスの構築 |
| 3. 学会等名 日本表面真空学会第12回関東支部セミナー（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H.H. Kim, Y. Teramoto, N. Takeuchi, A. Ogata |
| 2. 発表標題 Plasma Candle: A New Type of Atmospheric Pressure Plasma Jet |
| 3. 学会等名 ISPlasma2019/IC-PLANTS2019（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 金賢夏 |
| 2. 発表標題 低温プラズマと触媒の相互作用の探求と応用 |
| 3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会シンポジウム (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H.H. Kim |
| 2. 発表標題 Introduction of Plasma-Catalysis |
| 3. 学会等名 Gordon Research Conference; Plasma Processing Science (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H.H. Kim |
| 2. 発表標題 Understanding of Plasma Catalysis form Surface Streamer Propagation |
| 3. 学会等名 MRS 2018 Fall Meeting (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H.H. Kim, Y. Teramoto, N. Takeuchi, A. Ogata |
| 2. 発表標題 Gas Flow-Assisted Electrospray of Water and Ethanol |
| 3. 学会等名 ISNTP-11 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H.H. Kim, A. Tou, H. Einaga, Y. Teramoto, A. Ogata |
| 2. 発表標題 Low Temperature CO Oxidation Using Ozone-Assisted Catalysis |
| 3. 学会等名 ISNTP-11 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

| | | |
|---|-------------------------|------------------|
| 産業財産権の名称 プラズマジェット生成装置およびプラズマジェット生成方法 | 発明者 金賢夏、竹内希、寺本慶之、尾形敦 | 権利者 産業技術総合研究所 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-201948 | 出願年 2018年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

| |
|------|
| 特に無し |
|------|

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 | 寺本 慶之 (Teramoto Yoshiyuki) (00635328) | 国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|