

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01378

研究課題名（和文）量子ナノ構造界面層の創成と光電変換デバイス開拓

研究課題名（英文）Creation of quantum nanostructured interfaces enabling the innovative photovoltaic device

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） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：量子サイズ効果を有するシリコンナノ粒子を合成し、印刷技術によって作成する高効率太陽電池を開発する。光電デバイスの性能は模擬太陽光とともに標準室内光も用いて評価した結果、標準LED光源に対して10%の変換効率を得た。シリコンナノ粒子の大量合成、シリコンインク作成、バルクヘテロ構造の開発と評価、そして高効率光電デバイスの開発まで一貫して実現することで低コスト高効率光電変換デバイスの実装への道筋を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光が入手できない夜間の給電やIoTデバイスへの給電を念頭に、室内光を使って高効率に発電する光電変換電源を開発した。約6nmのシリコンナノ結晶を大量合成し、量子サイズ効果を活用することで500nm以下の短波長光を活用して発電する。高価な設備を必要とせず、印刷技術によって作成できるため低コスト化にも貢献する。

研究成果の概要（英文）：We have developed a high-efficiency solar cell created by synthesizing silicon nanoparticles with a quantum size effect and using printing technology. As a result of evaluating the performance of the photoelectric device using simulated indoor light as well as simulated solar light, a conversion efficiency of 10% was obtained with respect to the standard LED light source. We have shown the path to the implementation of low-cost and high-efficiency photovoltaic devices by consistently realizing mass synthesis of silicon nanoparticles, silicon ink production, development and evaluation of bulk heterostructures, and development of high-efficiency photoelectric conversion devices.

研究分野：熱工学

キーワード：ナノマイクロ熱工学 光電変換 量子ドット プラズマCVD 再生可能エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

太陽光発電ロードマップは、太陽光発電を将来の主要な再生可能エネルギーの1つに発展させることを目標に策定され、発電コスト、変換効率などに関して明確な目標が示された。2009年のPV2030+に続き、2014年には戦略目標の見直しが行われたが(NEDO PV Challenges)、火力発電などの一部を代替する再生可能エネルギー大量導入の位置づけはほとんど変わっておらず、例えば急速に普及するIoT機器への対応には言及されていない。2013年の調査では、ネットワークに接続されたIoTデバイスは300億個と推算され、2020年には500億個以上に成長すると予測されている。個々のIoTデバイスが消費する電力は微量であるが、その数が膨大であること、さらにIoT機器はワイヤレス構造で設計されているため、大規模電力供給を可能にする従来の太陽電池開発と並行して、多様な用途・環境に対応できる低コスト・高効率な光電変換デバイスの実現が急務である。

これを背景に、本研究では量子効果による発電効率向上が期待できる低コスト・新概念太陽電池の一つとして、SiNCを分散させたシリコンインクの開発、およびSiNCを用いた有機無機ハイブリッド太陽電池の開発を実施した。SiNCは真性半導体でも表面水素の影響で*n*型半導体として機能することを明らかにし、有機太陽電池でほぼ独占的に用いられるフラーレン誘導体を代替できる有力な機能材料であることを実証した。さらに、低温熱処理によってSiNCの結晶欠陥を取り除くと電子移動度が著しく向上し、模擬太陽光の照射で光電流が約1桁以上増大することを明らかにした。しかし、SiNCの内部には結晶成長欠陥と呼ばれる、空孔原子に起因した欠陥が含まれており、SiNC合成後に熱処理などによって完全に除去することが困難であることも判明した。欠陥の生成機構を理解しその形成を極限まで抑制するためには、核生成からナノ粒子成長に至る反応機構を詳細に解明しなければならない。

## 2. 研究の目的

本提案では、結晶成長欠陥を極限まで低減させたSiNCを合成するため、非平衡プラズマ反応場におけるナノ粒子反応機構を解明する。その知見に基づき、SiNCが結晶欠陥を低減しながら成長する新規なインフライトプラズマCVD法を確立し、量子サイズ効果を顕在化させた低欠陥SiNCを合成する。さらに、半導体高分子とハイブリッドさせたナノ構造化界面活性層を創成し、量子ナノ物性に立脚した低コスト・高効率光電変換デバイスを実現する。

## 3. 研究の方法

シリコンは融点が高いため(1687 K)、一般的なコロイド成長では結晶欠陥を多く含むアモルファスナノ粒子しか合成できない。本提案では、プラズマ固有の反応機構である非平衡過熱を活用してSiNCを気相孤立成長する高度なナノ粒子合成プロセスを確立する。非平衡過熱による結晶化成長制御は、熱反応では実現することができない。ナノ粒子生成の物理・化学過程の詳細を解明し、SiNCの非平衡過熱を効果的に生じさせることで、量子サイズ効果を顕在化させたSiNCを合成する。結晶欠陥を除外することでキャリア再結合やトラップを極限まで低減し、SiNCが本来有する量子サイズ効果を顕在化させる。さらに、欠陥準位を取り除くことで結晶サイズに依存したバンドギャップ制御および光吸収帯の制御を実現し、量子サイズ効果による光電変換機能を発現させる。中間バンドの形成や多重励起子生成も重要な光電変換機構となりうるが、その根幹となる欠陥のないSiNCの合成に焦点をあてる。

ナノ粒子/高分子複合材料では、その境界に厚さ1-10 nmの界面領域が形成される。界面領域の厚さはエキシトンの拡散長に等しいため、太陽電池の性能に大きな影響をおよぼす支配因子になる。SiNCは結晶サイズが5-10 nmであり、比表面積が極めて大きく界面領域と同じ空間スケールを有しているのが特徴である。界面領域で選択的に生成される励起子の拡散と解離、およびトンネル効果でSiNCをホッピング輸送される電子移動度に大きな影響を与える。赤外吸収分光法により界面領域およびその構造と物性を明らかにする。

SiNCを溶媒に分散させたシリコンインクに加工することで、多様な高分子材料と複合化し常温常圧で薄膜化できる。低コスト化において本質的に重要となる、高真空・ドライプロセスから脱却した簡便・廉価なプロセス技術で全固体光電変換デバイスを開発する。さらに、模擬太陽光だけでなく標準室内光に対する発電特性を明らかにする。

## 4. 研究成果

### 4.1. シリコンナノ粒子の合成

図1に示したインフライトプラズマ CVD 装置を開発し、粒形がそろった SiNC を合成することに成功した。SiCl<sub>4</sub> が水素プラズマで還元されることで前駆体 (SiCl<sub>n</sub>) が形成される。SiCl<sub>n</sub> は再結合を繰り返すことで核を形成するが、Cl の一部は H によって引き抜かれダングリングボンドを形成し SiCl<sub>n</sub> の再結合を促す。すなわち、Si 蒸気の凝集ではなく SiCl<sub>n</sub> の CVD 成長により微粒子の成長が進む。CVD 成長の特徴は高い非平衡性にあり、数 nm の微粒子に対して不純物をドーピングすることもできる。非平衡プラズマでは微粒子は移動度の大きい電子によって負に帯電しているため、互いにクーロン力で反発している。そのため、微粒子の孤立成長が可能となり粒径がそろいやすい。粒子の成長は反応時間で制御できることを示しており、図2に示すように平均粒径は反応時間とほぼ直線関係にある。さらに、微粒子表面では電子とイオンが再結合によってエネルギーを放出するため、微粒子の温度は気体温度より数 100K 高くなり非平衡過熱が生じる。このように原料濃度 (SiCl<sub>4</sub>)、反応時間、エネルギー密度が SiNC の性状を決定する。流量を変化させると反応時間とともにエネルギー密度 (SEI: Specific Energy Input) も変化するため、原料分解と結晶化度が練成して変化する。一方、エネルギー密度が小さいと原料転換率、すなわち SiNC 収量も低下する。このように、1つのパラメータだけを変化させても SiNC の性状は複雑に変化する。これをパラメトリックにまとめたのが図2である。副生する HCl および Cl<sub>2</sub> によって SiNC がエッチングされるため、収量は SEI に対して極値を持つ。また、還元に必

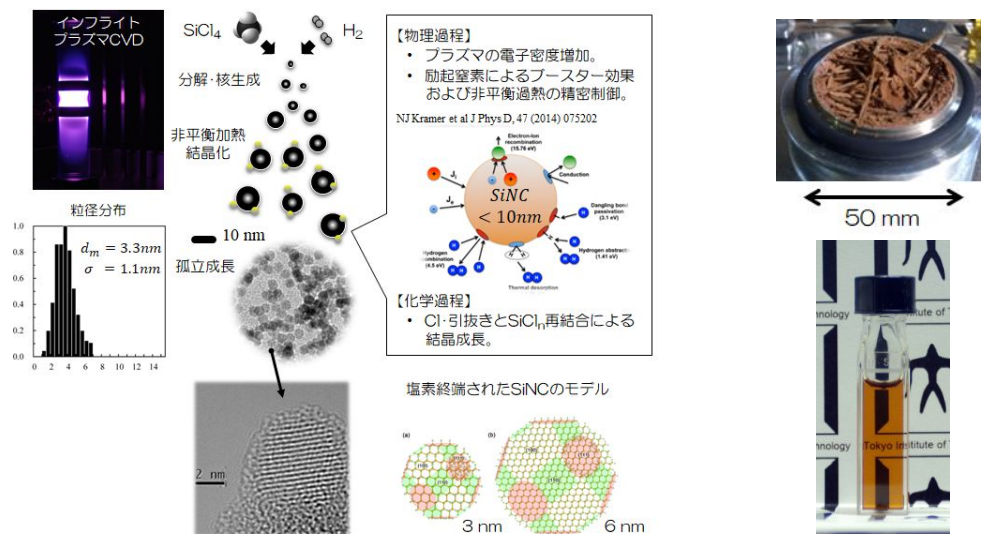


図 1 インフライトプラズマ CVD による粒径が揃った SiNC の孤立成長と微粒子成長・結晶化機構。熱力学的に最も安定な SiNC (6 nm) の構造: Si<sub>5707</sub>Cl<sub>1372</sub>。右上段: 合成直後の SiNC (500mg/hour)。右下段: 有機溶媒に SiNC を分散させたシリコンインク。

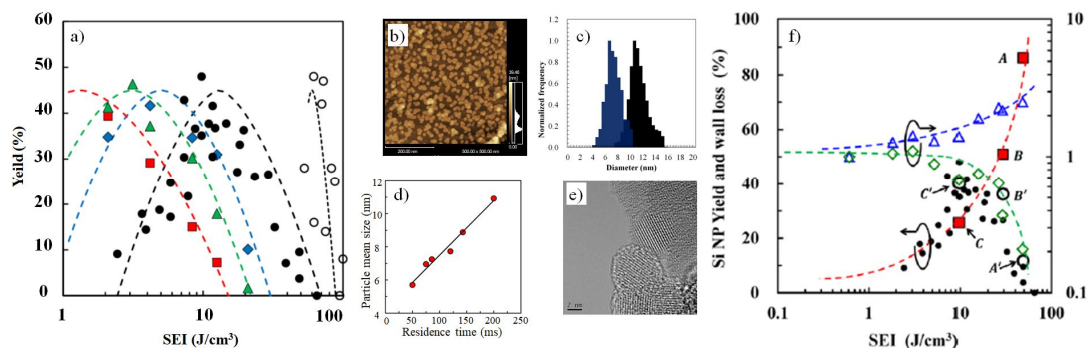


図 2 SiNC 収量と SEI, H<sub>2</sub>/SiCl<sub>4</sub> 比の関係: a) H<sub>2</sub>/SiCl<sub>4</sub> = 10(○), 5(◆), 2(□), 1(△), b) AFM によるイメージング, c) 粒径分布, d) 平均粒径と反応時間の関係, e) TEM 像, f) Si NP 収量(○: A', B', C')と壁面への損失(△: A, B, C)。質量分析計で測定した SiCl<sub>4</sub> と比較することで原料消費率との相関を示している。実験に対する実験条件: H<sub>2</sub>/SiCl<sub>4</sub> = 10; 全ガス流量 = 123 cm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>; 電力 = 20, 60, 100 W; 圧力 = 400 Pa。

要な水素を増やすと ( $H_2/SiCl_4$  比を大きくすると), 収量の極値を示す  $SEI$  は大きくなる。これは, 水素を分解するためにより多くのエネルギーを要するためである。極値より低  $SEI$  では電力不足によりアモルファスになりやすいが, 高  $SEI$  では結晶化度が高くなる。異なるプラズマを用いても, 塩素系ガス ( $SiCl_4$ ) を用いた場合には最大収量は 50% 程度になることがわかった。X 線回折パターンでは (111)(220)(311) 結晶面が確認できた。(111) 面が熱力学的に最も安定であるが, ナノ結晶の場合は (111) 以外にも多くの結晶面で構成される。高温プロセスでは結晶サイズが大きくなりやすいため ( $> 100\text{ nm}$ ), シャープで  $S/N$  比の高い XRD パターンが得られる。非平衡プラズマでは  $10\text{ nm}$  以下になるため各ピークはブロードで弱い。いずれの場合でも, ナノ粒子を構成する結晶面は同じである。すなわち, 非平衡プラズマは CVD 成長および非平衡過熱により高温プロセスと異なる粒子成長過程を経るため結晶サイズおよび粒径分布制御で優位である。しかし, 結晶化過程は熱プロセスと類似で熱力学的に安定な結晶面が成長しやすいことがわかる。なお,  $SiNC$  の合成速度 ( $g/s$ ) で比較すると, 高温熱プロセスは非平衡プラズマより 3 桁以上速い。しかし, 消費エネルギーあたりの生成量で比較すると ( $g/s/W = g/J$ ), 熱プロセスと非平衡プラズマはほとんどそんな色ない。非平衡プラズマは粒形分布を狭く制御しやすいため高温熱プロセスより極めて優位にある。

#### 4.2. 結晶欠陥の制御

合成後の  $SiNC$  は高い結晶性を示し, ラマン分光分析でもアモルファス成分は確認できないことが多い。しかし電子スピン共鳴 (ESR: Electron Spin Resonance) で調べると, 常温でも結晶欠陥に起因した強いピークを確認できる。これは  $Si-Si$  結合に起因した結晶欠陥だけではなく,  $SiNC$  表面で水素が脱離したダングリングボンド, シリコン酸化物 ( $SiO_x, x < 2$ ),  $Si$  と  $Si_x$  界面の格子ミスマッチなどが含まれる。亜酸化物はフッ化水素 ( $HF$ ) によるドライエッチング取り除き, さらに  $SiNC$  表面を水素終端する。これによって  $E, Pb$  欠陥を除去した。さらに, 低温熱処理を組合わせて  $D$  欠陥を低減した。バルクシリコンの場合, 表面は主に  $SiH, SiH_2$  で終端されるが,  $SiNC$  では曲率が大きいので  $SiH_3$  も形成される。水素が脱着する際の活性化エネルギーは  $SiH_3$  が最も小さく, 水素脱離によって容易に欠陥を生成する可能性が高い。 $SiNC$  の全反射赤外吸収分光スペクトルを分析すると, 合成直後は塩素で終端されているが, フッ化水素で処理すると  $SiH_n$  のピークが確認できる。 $2100\text{ cm}^{-1}$  付近には 3 つのピークが重なっており, これをデコンボリューション処理して面積強度を比較することで,  $SiH_n$  ( $n=1-3$ ) の相対的な割合を見積もった。フッ化水素でエッチングした  $SiNC$  を熱処理によってさらに欠陥の除去を行った。200 熱処理では欠陥量が低下するが 400 では再び欠陥が増える。50 ステップで詳細を調べると, 250 から欠陥が増え始め, 350 より高温では欠陥量が顕著に増大する。このような傾向はシリコンウェハの水素処理でよく知られており,  $SiNC$  でも同様の結果を示すことがわかる。 $SiH_n$  各成分に対して温度依存性を調べると, 200 から  $SiH_3$  が優先的に脱離していることがわかる。続いて  $SiH_2, SiH$  の順で水素が脱離しており, ESR の欠陥量が増大していく傾向と一致している。フォトルミネッセンスの寿命を測定し,  $SiNC$  の欠陥と光吸収キャリアの挙動の相関を調べたところ, 低温熱処理によって表面欠陥をパッシベーションできることが示された。

#### 4.3. $SiNC$ と高分子のブレンド薄膜

水素終端した  $SiNC$  と高分子の相溶性を調べるために, ポリスチレン (PS) をモデル物質として相溶性を調べた。太陽電池として良好なバルクヘテロ構造を作成するためには, 有機無機材料が相分離してはいけない。一方, 完全に相溶してもいけない。それは, 有機無機界面がエキシトンの解離サイトを与えることと, キャリアが輸送されるパスを形成しなければならないためである。このような理由から,  $2\text{ nm}$  程度の大きさを有するフラレン ( $n$  型半導体) を用いる場合, フラレンを部分的に凝集させて約  $10\text{ nm}$  のドメインを作る。さらに一方の電極から他方に向かって傾斜させるように相溶性を制御する必要がある。あるいは, バルクヘテロ層と電極の間に中間層を挿入する。一方,  $SiNC$  は約  $6\text{ nm}$  であるため, エキシトンの拡散長とほぼ等しいサイズを有するナノ界面を形成しやすい。さらに,  $SiNC$  が最接近したサイトで電子が粒子間をホッピングして輸送され, 他方 粒子の間隙に存在する高分子から電子が供給される。そのためには, サイズがそろった  $SiNC$  を凝集させずに高分子と完全に相溶させてバルクヘテロ層を形成する点でフラレンとはデバイス構造が本質的に異なる。

$SiNC$  と PS を異なる体積分率でブレンドして相溶性を調べた。ここで, キャリアとして電子とのアナロジーを考えてフォノンの輸送を考えている。これにより, 間接的であるが  $SiNC$  間の輸送抵抗を定式化し, バルクヘテロ構造との相関を明らかにした。 $SiNC$  の添加量が少ない場合,  $SiNC$  は凝集して孤立アイランドを形成する。 $SiNC$  は電子の輸送パスを形成しなければならないため, このような状態では太陽電池として機能しない。一方,  $SiNC$  添加量を増やすと,  $SiNC$

は PS にほぼ一様に分散している。前者の場合、SiNC を添加した効果は少なく、フォノン輸送、すなわち熱伝導率は PS に近い値を示す。SiNC を増やすと SiNC と PS の界面が増大し、予想通りフォノン輸送が制限された。すなわち、SiNC-PS が理想的なバルクヘテロ構造を形成していることが示された。

#### 4.4. 高効率光電変換デバイスの開発

4.1 から 4.3 で述べた研究成果に基づき、高効率ハイブリッド光電変換デバイスを開発した。図 3 は *p* 型半導体として PTB7 を用いた有機無機ハイブリッド太陽電池の断面 TEM 像とエネルギーダイアグラムを示している。PTB7 が可視光を吸収してエキシトンを生じ、これが SiNC との界面で分離したあと電子は SiNC ネットワークを輸送してアルミ電極に到達する。一方、正孔は PTB7 のネットワークを輸送されて ITO へと流入する。このデバイスではホールだけ選択的に輸送するため PEDOT:PSS を中間層として設けている。SiNC と PTB7 は質量比で同程度にブレンドすることで均一なバルクヘテロ層を形成している。

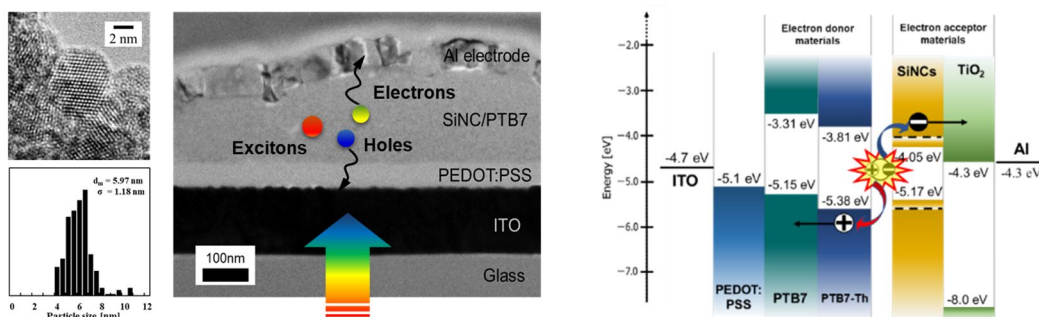


図 3 新規開発した有機無機ハイブリッド光電変換デバイスの断面 TEM 像とエネルギーダイアグラム

模擬太陽光 (1 SUN) を使って発電特性を調べた結果、200 °C で熱処理した SiNC に対して変換効率 3% が得られた。400 °C で熱処理した SiNC は結晶欠陥が増加するため *V-I* 特性は著しく劣化する。SiNC と同程度の伝導体準位を有する TiO<sub>2</sub> をブレンドした場合の発電効率は低く、SiNC の *n* 型半導体としての優位性が示された。しかし、図 4 に示すように、可視光の吸収は PTB7 によるもので、SiNC の光吸収は 500 nm より短波長で強い。そこで、本研究の目的である IoT 電源としての有用性を検証するために、標準 LED 室内光に対して、光電変換効率を測定した。LED 照明は紫外発光により蛍光体を励起して可視光を発するため、図 4 に示すように紫外領域に強いスペクトルを有する点で太陽光と本質的に異なる。そのため、夜間に用いる電源として室内光に対して高い光電変換効率を示す電源は極めて有用である。標準室内項に対する *V-I* 特性は図 4 に示す通りで変換効率約 10% に到達した。

SiNC は *n* 型半導体として優れた特性を有しており、高分子との相溶性もよく、理想的なバルクヘテロ構造を形成することで高い変換効率を実現できた。また、500 nm 以下の光量子に対しても光電変換能を有していることが示された。結晶サイズのチューニングにより可視光吸収を実現するだけでなく、短波長光源に特化した光電変換デバイスの材料として利用することで、IoT 電源として実用化を加速できる可能性がある。今後の課題としては、さらなる結晶欠陥の低減、バルクヘテロ層の膜厚増大による光吸収量増大、電子伝導中間層の導入によるキャリア再結合抑制などが考えられる。

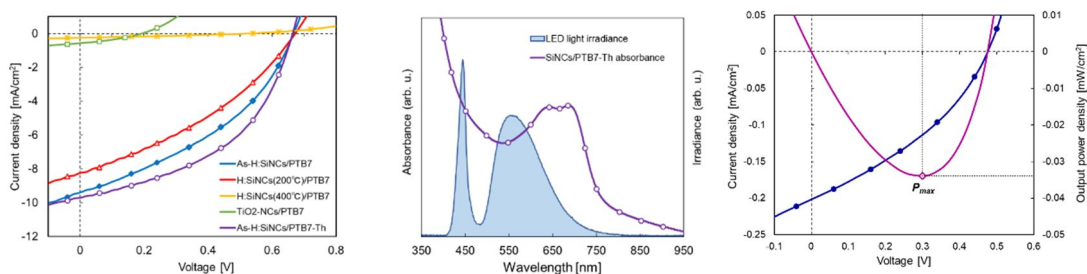


図 4 模擬太陽光に対する光電変換特性(左)と SiNC/PTB7 膜の光吸収スペクトル(右)。表は *V-I* 特性の詳細

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Juangsa Firman Bagja, Arief Budiman Bentang, Sambegoro Poetro Lebdo, Setyo Darmanto Prihadi, Nozaki Tomohiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Synthesis of Nanostructured Silicon Nanoparticles for Anodes of Li-Ion Battery	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 6th International Conference on Electric Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 175 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICEVT48285.2019.8993999	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 Zunrong Sheng, Kenta Sakata, Yoshiki Watanabe, Seigo Kameshima, Hyun-Ha Kim, Shuiliang Yao, Tomohiro Nozaki	4. 巻 52
2. 論文標題 Factors determining synergism in plasma catalysis of biogas at reduced pressure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 414002(13pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab2d36	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 Ben W-L Jang, Anis Allagui, Chang-jun Liu, Tomohiro Nozaki, Xin Tu, Xiaobing Zhu	4. 巻 337
2. 論文標題 Frontiers in plasma catalysis (ISPCEM 2018)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cattod.2019.06.021	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 T Iwase, Y Kamaji, S Y Kang, K Koga, N Kuboi, M Nakamura, N Negishi, Tomohiro Nozaki, S Nunomura, D Ogawa, M Omura, T Shimizu, K Shinoda, Y Sonoda, H Suzuki, K Takahashi, T Tsutsumi, K Yoshikawa, T Ishijima, K Ishikawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Progress and perspectives in dry processes for nanoscale feature fabrication: fine pattern transfer and high-aspect-ratio feature formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SE0802(24pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab1638	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 T lwase, Y Kamaji, S Y Kang, K Koga, N Kuboi, M Nakamura, N Negishi, Tomohiro Nozaki, S Nunomura, D Ogawa, M Omura, T Shimizu, K Shinoda, Y Sonoda, H Suzuki, K Takahashi, T Tsutsumi, K Yoshikawa, T Ishijima, K Ishikawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Progress and perspectives in dry processes for emerging multidisciplinary applications: how can we improve our use of dry processes?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SE0803(17pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab163a	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 T lwase, Y Kamaji, S Y Kang, K Koga, N Kuboi, M Nakamura, N Negishi, Tomohiro Nozaki, S Nunomura, D Ogawa, M Omura, T Shimizu, K Shinoda, Y Sonoda, H Suzuki, K Takahashi, T Tsutsumi, K Yoshikawa, T Ishijima, K Ishikawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Progress and perspectives in dry processes for leading-edge manufacturing of devices: toward intelligent processes and virtual product development	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SE0804(21pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab163b	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 坂田謙太, 亀島晟吾, Zunrong Sheng, 渡邊善紀, 野崎智洋	4. 巻 43
2. 論文標題 プラズマ・触媒反応によるCH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> 改質の反応速度論的解析	5. 発行年 2019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) 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 Otsuka Munechika, Kurokawa Yuki, Ding Yi, Juangsa Firman Bagja, Shibata Shogo, Kato Takehito, Nozaki Tomohiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Silicon nanocrystal hybrid photovoltaic devices for indoor light energy harvesting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 12611 ~ 12618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ra00804d	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 Adrianto Dimas, Zunrong Sheng, Tomohiro Nozaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Mechanistic study on nonthermal plasma conversion of CO2	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 e01003(9pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34343/ijpest.2020.14.e01003	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 Yao Shuiliang, Chen Zhizong, Xie Han, Yuan Yuchen, Zhou Ruowen, Xu Bingqing, Chen Junxia, Wu Xinyue, Wu Zuliang, Jiang Boqiong, Tang Xiujian, Lu Hao, Nozaki Tomohiro, Kim Hyun-Ha	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(9pp)
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 Juangsa Firman Bagja, Ryu Meguya, Morikawa Junko, Nozaki Tomohiro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Interfacial region effect on thermal conductivity of silicon nanocrystal and polystyrene nanocomposites	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Processes and Polymers	6. 最初と最後の頁 e1900212(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ppap.201900212	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 Juangsa Firman Bagja, Ryu Meguya, Morikawa Junko, Nozaki Tomohiro	4. 巻 51
2. 論文標題 Nonthermal plasma synthesis of silicon nanoparticles and their thermal transport properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 505301(12pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aae3a6	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 Gelloz Bernard, Juangsa Firman Bagja, Nozaki Tomohiro, Asaka Koji, Koshida Nobuyoshi, Jin Lianhua	4. 巻 7
2. 論文標題 Si/SiO <sub>2</sub> Core/Shell Luminescent Silicon Nanocrystals and Porous Silicon Powders With High Quantum Yield, Long Lifetime, and Good Stability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2019.00047	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 Juangsa Firman Bagja, Muroya Yoshiki, Ryu Meguya, Morikawa Junko, Nozaki Tomohiro	4. 巻 1984(1)
2. 論文標題 Phonon transport properties in silicon nanoparticles and polymer nanocomposite thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Proceeding Series	6. 最初と最後の頁 020010(8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5046594	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 Zhou Shu, Nozaki Tomohiro, Pi Xiaodong	4. 巻 51
2. 論文標題 Boron nanocrystals as high-energy-density fuels	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025305(7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aa9df6	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 Yao Shuilian, Chen Zhizong, Weng Shan, Mao Linai, Zhang Xuming, Han Jingyi, Wu Zuliang, Lu Hao, Tang Xiujian, Jiang Boqiong, Nozaki Tomohiro	4. 巻 373
2. 論文標題 Mechanism of CO <sub>2</sub> -formation promotion by Au in plasma-catalytic oxidation of CH <sub>4</sub> over Au/ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> at room temperature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Hazardous Materials	6. 最初と最後の頁 698 ~ 704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhazmat.2019.04.003	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

1. 著者名 Yao Shuiliang, Zhang Huanhuan, Chen Zhizong, Lin Hanghao, Han Shoushan, Wu Xinyue, Dong Ruoyu, Wu Zuliang, Nozaki Tomohiro	4. 巻 363
2. 論文標題 Promotion of graphitic carbon oxidation via stimulating CO <sub>2</sub> desorption by calcium carbonate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Hazardous Materials	6. 最初と最後の頁 10 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhazmat.2018.09.048	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 Sheng Zunrong, Kameshima Seigo, Yao Shuiliang, Nozaki Tomohiro	4. 巻 51
2. 論文標題 Oxidation behavior of Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> catalyst in nonthermal plasma-enabled catalysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 445205(8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aae17d	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 Yao Shuiliang, Zhang Huanhuan, Shen Xing, Han Jingyi, Wu Zuliang, Tang Xiujian, Lu Hao, Jiang Boqiong, Nozaki Tomohiro, Zhang Xuming	4. 巻 57
2. 論文標題 A Novel Four-Way Plasma-Catalytic Approach for The After-Treatment of Diesel Engine Exhausts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 1159 ~ 1168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.7b04166	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 Kameshima Seigo, Mizukami Ryo, Yamazaki Takumi, Prananto Lukman A, Nozaki Tomohiro	4. 巻 51
2. 論文標題 Interfacial reactions between DBD and porous catalyst in dry methane reforming	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 114006(8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aaad7d	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 Mao Lingai, Chen Zhizong, Wu Xinyue, Tang Xiujuan, Yao Shuiliang, Zhang Xuming, Jiang Boqiong, Han Jingyi, Wu Zuliang, Lu Hao, Nozaki Tomohiro	4. 巻 347
2. 論文標題 Plasma-catalyst hybrid reactor with CeO <sub>2</sub> / -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> for benzene decomposition with synergetic effect and nano particle by-product reduction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Hazardous Materials	6. 最初と最後の頁 150 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhazmat.2017.12.064	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 Zunrong Sheng, Seigo Kameshima, Kenta Sakata, Tomohiro Nozaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Plasma-Enabled Dry Methane Reforming, IntechOpen, Aug/ 2018. in press.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Chemistry and Gas Conversion	6. 最初と最後の頁 37 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5772/intechopen.76273	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 -

[学会発表] 計39件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマ触媒反応における振動励起分子の役割 (招待講演)
3. 学会等名 第33回プラズマ新領域研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 非平衡プラズマを利用した低温触媒反応: メタン改質への応用 (招待講演)
3. 学会等名 日本表面真空学会関東支部セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Yoshiki Watanabe, Chen Xiaozhong, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Power-to-Chemicals (P2C) via plasma catalysis of CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> (Plenary)
3. 学会等名 7th Korea-Japan Joint Symposium on Advanced Solar Cells 2020 and 4th International Symposium on Energy Research and Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマ触媒研究の進展と将来展望 (基調講演)
3. 学会等名 第35回九州・山口プラズマ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma enabled catalysis towards sustainable methane conversion (Invited)
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマ励起前駆体による触媒作用顕在化 (招待講演)
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 A source of synergism in plasma catalysis of methane dry reforming (Invited)
3. 学会等名 The 12th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T Kato, Y Kurokawa, K Hirata, R Oshima, M Otsuka, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Morphology Control for Nano-Phase Separation Structure of Functional Layer
3. 学会等名 29th Annual Meeting of MRS-J (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M Otsuka Y Ding, S Shibata, F B Juangsa, Y Kurokawa, T Kato and Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Characteristic of Silicon Nanocrystals and Their Application in Photovoltaics
3. 学会等名 29th Annual Meeting of MRS-J (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M Otsuka, Y Ding, S Shibata, F B Juangsa, Y Kurokawa, T Kato, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Printable Organic-Inorganic Hybrid Solar Cell via Silicon Inks
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shogo Shibata, Shuhei Wakamatsu, Firman B Juangsa, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Defect Control of Plasma Synthesized Free-standing Silicon Nanocrystals
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y Watanabe, K Sakata, S Kameshima, Z Sheng, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Kinetic study of plasma mediated heterogeneous catalysis of biogas
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kotaro Takehana, Ken Okazaki, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Thermodynamic Analysis of Hydrogen Combustion Power Generation Systems
3. 学会等名 The 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference, December 13-17, 2019, Maui, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Yoshiki Watanabe, Kenta Sakata, Seigo Kameshima, Hyun-Ha Kim, Shuiliang Yao, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Electrical diagnostics of plasma-catalytic biogas reforming
3. 学会等名 The 7th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Firman Bagja Juangsa, Bentang Arief Budiman, Poetro Lebdo Sambegoro, Prihadi Setyo Darmanto, Tomohiro Nozaki
2 . 発表標題 Synthesis of Nanostructured Silicon Nanoparticles for Anodes of Li-Ion Battery
3 . 学会等名 The 6th International Conference on Electric Vehicular Technology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S Kameshima, Z Sheng, T Nozaki
2 . 発表標題 Mechanism of reaction enhancement of unexcited molecules in plasma catalytic dry methane reforming
3 . 学会等名 The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Ihara, Y. Kajikawa, T. Shimizu, K. Hasegawa, Y. Kikuchi, M. Tsujimoto, T. Okubo, H. Lee, I. Yamanaka, T. Nozaki, Y. Kudo, H. Takagi, Y. Mizuno, E. Kato, K. Murata, A. Kurosawa, S. Iida, K. Sakata, K. Okazaki
2 . 発表標題 Techno-economic scenario study on future energy system using hydrogen
3 . 学会等名 The World Hydrogen Technologies Convention (WHTC 2019) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K Sakata, Y Watanabe, Z Sheng, S. Kameshima, H-H Kim, K Okazaki, T Nozaki
2 . 発表標題 Pulsed reaction spectrometry of DBD-mediated biogas reforming
3 . 学会等名 The 24th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC-24) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Interaction between streamers and micro-pored catalyst pellets
3. 学会等名 The 10th International Workshop on Microplasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Kenta Sakata, Yoshiki Watanabe, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Electron-driven catalysis for low-temperature biogas upgrade
3. 学会等名 13th Korea-China- Japan Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K Takehana, K Okazaki, T Nozaki
2. 発表標題 Analysis of Hydrogen Combustion Turbine Power Generation Systems
3. 学会等名 13th Korea-China- Japan Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野崎智洋, Zunrong Sheng
2. 発表標題 プラズマ触媒反応による消化ガス高度利用技術の開発
3. 学会等名 第56回下水道研究発表会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 武埜浩太郎, 岡崎健, 野崎智洋
2. 発表標題 水素燃焼タービン発電システムの基本特性に関する研究
3. 学会等名 第24回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野崎智洋
2. 発表標題 大気圧プラズマの新分野開拓：プラズマ触媒
3. 学会等名 第34回九州・山口プラズマ研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀島晟吾, Zunrong Sheng, 山崎匠, 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマを利用した触媒反応によるメタンのドライ改質
3. 学会等名 第29回プラズマ新領域研究会（応用物理学会プラズマエレクトロニクス主催）（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki, Seigo Kameshima, Takumi Yamazaki, Kenta Sakata
2. 発表標題 Nonthermal plasma-assisted catalysis of greenhouse gas
3. 学会等名 ISPlasma2018 and IC-PLANTS2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki, Zunrong Shen, Seigo Kameshima, Kenta Sakata, Yoshiki Watanabe
2. 発表標題 Plasma catalysis of dry methane reforming: bridging micro and macroscopic understanding
3. 学会等名 International Symposium on Plasmas for Catalyses and Energy Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki, Seigo Kameshima, Zunrong Shen
2. 発表標題 Nonthermal plasma enabled electrification of energy and materials conversion processes
3. 学会等名 The 7th International Conference on Microelectronics and Plasma Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Munekika Otsuka, Ding Yi, Shogo Shibata, Yuma Tanabe, Firman B Juangsa, Tomohiro Nozak
2. 発表標題 Silicon Nanocrystal Synthesis and Application to Organic-Inorganic Hybrid Solar Cells
3. 学会等名 6th Korea-Japan Joint Symposium on Advanced Solar Cells (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Seigo Kameshima, Kenta Sakata, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Nonthermal plasma enabled catalysis of greenhouse gas
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seigo Kameshima, Zunrong Sheng, Kenta Sakata, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Plasma-enhanced CH <sub>4</sub> oxidation by CO <sub>2</sub> via catalyst oxidation/reduction cycle
3. 学会等名 40th International symposium on Dry Process (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Nozaki, Zunrong Shen, Seigo Kameshima, Kenta Sakata, Yoshiki Watanabe
2. 発表標題 Plasma catalysis of methane towards industry application
3. 学会等名 The 6th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Seigo Kameshima, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 CO <sub>2</sub> oxidation of Ni-based catalyst in nonthermal plasma-assisted dry methane reforming
3. 学会等名 The 6th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Seigo Kameshima, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Oxidation characteristic of Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> catalyst in DBD-enabled dry methane reforming
3. 学会等名 International Symposium on Plasmas for Catalyses and Energy Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zunrong Sheng, Seigo Kameshima, Kenta Sakata, Tomohiro Nozaki
2. 発表標題 Pulsed reaction diagnosis of nonthermal plasma-mediated CH <sub>4</sub> reforming
3. 学会等名 Gordon Research Conference (Plasma Processing Science) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀島晟吾, Zunrong Sheng, 坂田謙太, 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマ励起CO <sub>2</sub> によるNi触媒へのO原子供給と新規触媒反応パスの発現
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zunrong Shen, 坂田謙太, 亀島晟吾, 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマ触媒作用によるCH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> 改質反応の速度論的解析
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂田謙太, 亀島晟吾, Zunrong Sheng, 渡邊善紀, 野崎智洋
2. 発表標題 プラズマ・触媒反応によるCH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> 改質の反応速度論的解析
3. 学会等名 第42回静電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bernard Gelloz, Firman Bagja Juangsa, Tomohiro Nozaki, Nobuyoshi Koshida, Lianhua Jin
2. 発表標題 Stable luminescent silicon nanocrystals and porous silicon powders with very high quantum yield passivated by High-pressure Water Vapor Annealing
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Tomohiro Nozaki, Seigo Kameshima, Zunrong Sheng, Keishiro Tamura, Takumi Yamazaki	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer, Cham	5. 総ページ数 348
3. 書名 Plasma Catalysis -Fundamentals and Applications-	

1. 著者名 野崎智洋, 多数(分担)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 (株)技術情報協会	5. 総ページ数 650
3. 書名 ナノ粒子塗工液の調整とコーティング技術	

1. 著者名 Ding Yi, Nozaki Tomohiro	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 338
3. 書名 Advances in Silicon Solar Cells	

〔産業財産権〕

〔その他〕

The Best Presentation Award : 6th Korea-Japan Joint Symposium on Advanced Solar Cells 2019 (2019.2)  
機械学会熱工学部門・講演論文表彰 受賞(2018.5)  
東京工業大学野崎研究室ホームページ  
<http://www.nano-silicon.com/ats/>  
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](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
---------	---------