

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01834

研究課題名(和文) 二次元薄膜への構造規定欠陥の精密導入と水素イオン同位体分離膜の創製

研究課題名(英文) Fabrication of well-defined structure in two-dimensional thin film for development of hydrogen isotope separation membrane

研究代表者

保田 諭 (Yasuda, Satoshi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：90400639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：電気化学をベースにした水素ポンピング法と二次元薄膜の一つであるグラフェン膜を融合した新しい水素同位体ガス分離システムについて研究を行った。グラフェン膜の水素同位体分離能を評価する実験系を構築すると同時に膜中への欠陥構造を精密導入する技術確立した。これによりグラフェン膜とその膜中の欠陥構造が水素同位体分離能に与える影響について基礎的知見を得た。また、グラフェン膜とパラジウム金属膜が接合したヘテロ構造が水素同位体分離を発現する電極触媒として機能することを新しく見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二次元薄膜の水素同位体分離能について詳細に評価する手法について十分に確立していなかった。本研究で得られた成果は、二次元薄膜の水素同位体分離の学理の発展に多大な貢献が期待される。また、水素同位体である重水素は、5GやIoTといった半導体産業や医薬品開発、将来のエネルギー源として期待されている核融合に必須な材料であるが、製造コストが高くほとんどを海外からの輸入に頼っている。本成果は、低コストでの水素同位体分離法の一つとなるポテンシャルを有しているだけでなく、国産化による日本の産業の活性化に貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：Deuterium has been currently extensive use and increasingly demands for manufacturing of silicon semiconductors and optical fiber, and drug developments. Despite importance, low natural abundance on earth and similar physicochemical properties of hydrogen isotopes make difficult its enrichment, and currently feasible enrichment on industrial plant scale is limited. In this study, we focus graphene membrane which has high potential for the enrichment material, and the hydrogen isotope separation property used the graphene was investigated. Using electrochemical hydrogen pumping technique, the hydrogen isotope separation property of the graphene and effect of defect in the graphene on the separation ability could be evaluated. Furthermore, we found that hetero structure consisting of graphene and palladium layer has the high isotope separation ability as electrode catalyst.

研究分野：表面科学、ナノカーボン

キーワード：グラフェン 水素同位体 欠陥 電気化学

1. 研究開始当初の背景

水素同位体である重水素は、5G や IOT 向けの半導体の高耐久化、光ファイバーの透過率向上、薬物代謝のトレーサー、将来のエネルギー源として期待されている核融合に必須な材料であり世界的に需要が増大している。重水素は、主に化学交換法や深冷蒸留法によって軽水素と重水素の混合ガスから分離濃縮することで得られる。しかしながら、同じ化学的性質を有するため、水素と重水素を分離する能力である H/D 分離能が小さい。また、腐食性ガスを利用するための装備設備や、極低温でのプロセスが必須となるため設備も大規模にならざるを得なく、重水素の製造コストは高い。このため、そのほとんどを米国がカナダからの輸入に頼っている。今後の需要増大と国産化による安定供給の観点から、室温・大気圧で高い H/D 分離能を有する低コストの重水素分離法の開発が必要不可欠である。

代替法の研究例として、ポーラス材料を用い、水素と重水素の零点振動エネルギー差を利用した chemical affinity quantum sieving(CAQS)による分離や、水素と重水素の量子効果によるサイズ差を利用した kinetic quantum sieving (KQS)による分離が知られている。しかしながら、これらの手法は低温下でのみしか分離能は発現しない(D 選択率 ~ 8@30K)。

一原子層のグラフェン膜は炭素原子からなる二次元薄膜として知られており高い電気伝導性や高機械的強度といったユニークな特徴を有する。近年では、グラフェン - 金属界面に分子を閉じ込めるとグラフェンとの相互作用により分子の結合エネルギーを変調する膜として機能することや、水素分子は透過しないがイオンであるプロトンは透過する選択的物質透過能を有すること、室温・大気圧下でプロトン(H⁺)とデューترون(D⁺)を分離する H/D 分離能を持つことが報告されている。このグラフェン膜の H/D 分離能の機構については、グラフェン膜とプロトン導電膜界面における水やスルホン基との水素結合の影響や、グラフェン内の欠陥部位が関与した水素同位体イオンのトンネル効果によるものなど様々な理論モデルが提唱されているが詳細は明らかになっていない。このようにグラフェン - 金属界面の分子の結合エネルギーの変調効果や室温・大気圧下での高い H/D 分離能を示す特徴は、重水素分離のための新しい原理となるばかりか代替手法になるポテンシャルを有しており大変興味深い。しかしながら、グラフェン膜を用いた H/D 分離能の実験的検証例がほとんどないばかりか、さらなる分離能向上に関する基礎的知見について研究が行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、電気化学をベースにした水素ポンピング法を用いて、グラフェン膜の固有の H/D 分離能だけでなく欠陥構造が分離能に与える影響について実験的検証を行う。また、グラフェン - 金属界面での閉じ込め効果を利用した、新しいグラフェン - 金属ヘテロ電極触媒による水素同位体分離を創製する基礎的知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

グラフェン膜の水素同位体分離能の評価だけでなく応用展開を見据えた分離デバイス創製を目指し、実験系には固体電解質膜からなる電気化学反応セルを用い水素ポンピング法を適用した。水素ポンピング法は、アノードに供給された水素が電極触媒の水素酸化反応により水素イオンに変換、固体電解質膜中を拡散した水素イオンがカソードの電極触媒の水素発生反応により、再度、水素に変換するデバイスである。水素の高純度化や高圧化などに利用され室温・大気圧下で動作可能なシンプルな電気化学リアクターである。この水素ポンピング法を用いることで、水素イオンの流れを固体電解質膜中に作り出すことが可能となる。

水素ポンピング法による評価に必要な膜電極接合体(MEA)は、ガス拡散層と電極触媒、固体電解質膜をホットプレスすることで作製した。固体電解質膜には 2 x 2 cm の Nafion(NRE212)を用い、アノード及びカソードの電極触媒のサイズは 1 x 1 cm である。

グラフェン膜は化学気相蒸着法を用いて Cu 箔上に作製したものをを用いた。水素同位体分離能評価には水素ポンピング法と質量ガス分析装置を組み合わせることで評価を行った。図 1 にその概念図を示す。作製した MEA を電気化学反応セルに組み込み、アノードに H₂ と D₂ の混合ガス(それぞれ 1.5 sccm)を、カソード側には加湿 Ar ガス(2.0 sccm)を供給し電極間に電圧を印加した。アノードでは水素同位体ガスは水素酸化反応によって水素同位体イオン(H⁺と D⁺)を生成し Nafion 膜中を介してカソード側に拡散する。カソードでは水素同位体イオンが水素発生反応により水素同位体ガスを生成、排出された生成ガスを四重極質量ガス分析により定量評価を行った。カソード側で観察される H₂ と HD、D₂ の水素同位体ガスのイオン電流から水素同位体分離能を示す

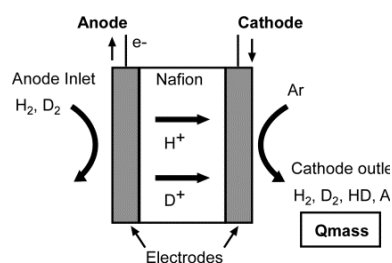


図 1 電気化学水素ポンピング法と質量ガス分析装置による水素同位体の分離能評価の概念図。

H/D を決定した。このとき H_2 , D_2 , HD のイオン電流をそれぞれ $[H_2]$, $[D_2]$, $[HD]$ とすると、H/D 分離能は、 $H/D = (2[H_2] + [HD]) / (2[D_2] + [HD])$ とした。

4. 研究成果

(1) グラフェン膜中への欠陥構造作製と H/D 分離能に与える影響の実験的検証

まず初めに、高真空 Ar イオン照射法によるグラフェン膜中への欠陥構造導入についてラマン分光及び走査型トンネル顕微鏡 (STM) により精査を行った。ラマン分光法から得られる欠陥構造由来の D バンド ($\sim 1300 \text{ cm}^{-1}$) の強度は、イオン照射時間の増加とともに増加し (図 2(a))、六員環構造由来の G バンド ($\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$) と欠陥構造由来の D バンドの強度比から、 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の空

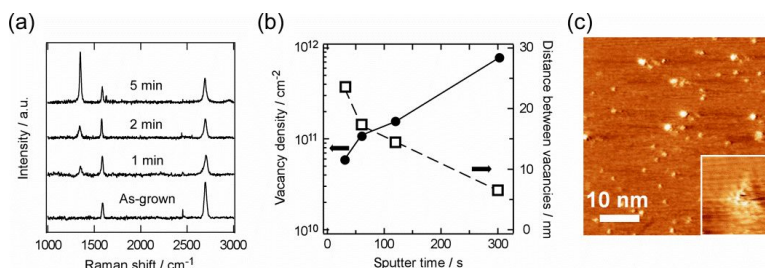


図 2(a) 高真空 Ar イオン照射法による照射時間によるグラフェン膜のラマンスペクトルの変化と (b) スペクトル変化から見積もった欠陥密度と欠陥間距離の照射時間依存性。(c) グラフェン膜中への単一原子空孔欠陥の STM 像。

孔密度、すなわち 30 ~ 5 nm 間隔でグラフェン膜内に欠陥構造を再現良く作製可能であることを明らかにした (図 2(b))。STM 測定の結果からは、放射状の特徴的な欠陥構造が観察され、過去に報告されている理論モデルから、単一の原子が抜けた単一原子空孔欠陥が形成しているのを明らかにした (図 2(c))。

このように欠陥導入されたグラフェン膜のプロトン透過能について、水素ポンピング法を用いて評価を行った。Nafion 膜 - グラフェン膜 - Nafion 膜の 3 層構造からなる膜を作製し、アノードとカソードの電極触媒には Pt のナノ微粒子が数十 nm のカーボンに担持した Pt/C を用いた。ガス拡散層と共にこれらをホットプレスすることで MEA を作製した。この MEA を用いて水素ポンピング法を行うことで、3 層構造膜中のグラフェン膜を介して水素同位体イオンがカソードに拡散、カソードでの水素発生反応によって水素同位体ガスに変換される。生成した H_2 , D_2 , HD の各成分量はグラフェン膜の水素同位体イオン分離能を反映した量であるため、これらガス成分の量を質量ガス分析によって評価することで H/D 分離能を決定した。

グラフェン膜を挟んでいない MEA を用いてガス分析を行った結果、H/D 分離能は 1.2 程度であった。Nafion 膜中における H^+ と D^+ の拡散係数の値には違いがあり、 $H/D=1.4$ 程度であることが知られている。この結果から、グラフェン膜を挟んでいない MEA の H/D 分離能は、Nafion 膜中における水素同位体イオンの拡散係数の違いを反映したと考えられる。

一方、グラフェン膜を含む MEA では、グラフェン膜内の欠陥構造の有無にかかわらず H/D 分離能はともに 1.2 程度の値であり、グラフェン膜を挟んでいない MEA と同様の値を示すことが明らかとなった。これまでのグラフェン膜の研究では、グラフェン - Nafion 界面における水やスルホン基の水素結合の影響により H/D 分離能は 10 程度の値を示すことが報告されているが、その後の詳細な研究について報告例がないのが現状である。本研究の結果は、同様の界面を作製したにも関わらず分離能が 1.2 程度とほぼ分離能を有さないこと、界面の作製条件を変えても分離能の向上が観察できなかったことから、H/D 分離能を有するグラフェン - Nafion 界面構造の詳細な知見を得ることが必要不可欠であることを示唆する。

また、単一の原子空孔をもつ欠陥構造を導入したグラフェン膜においても H/D 分離能の向上は観察されなかった。これまでにグラフェン膜内の 5 員環や 6 員環、7 員環といった環状構造や欠陥構造の H/D 分離能に関して理論モデルを用いて議論されているが、実験的な検証例はなかった。本結果から、単一の原子空孔欠陥構造は H/D 分離能の向上に寄与しないことを実験的に実証しただけでなく、欠陥を用いて分離能を向上させるためには、欠陥部位周辺に水素イオン同位体と水素結合する官能基などの導入が必要であることが示唆された。

以上、水素ポンピング法を用いてグラフェン膜の H/D 分離能や欠陥構造が分離能に与える影響について実験的に検証する手法を確立し、それらに関する基礎的知見を得ることができた。これらの結果は、Nafion-グラフェン界面や欠陥構造が H/D 分離能に与える影響を実験的に得た重要な知見であり、グラフェン膜を構築する重要な設計指針となった。

(2) グラフェン - 金属ヘテロ電極を用いた H/D 分離能発現の検証

グラフェン膜は、グラフェン - 触媒金属界面に分子を閉じ込めるとグラフェンとの相互作用により分子の触媒活性が変調されることが報告されている。これらの知見に基づき、H/D 分離能を有するグラフェン - 金属ヘテロ電極を新しく創出する試みを行った。

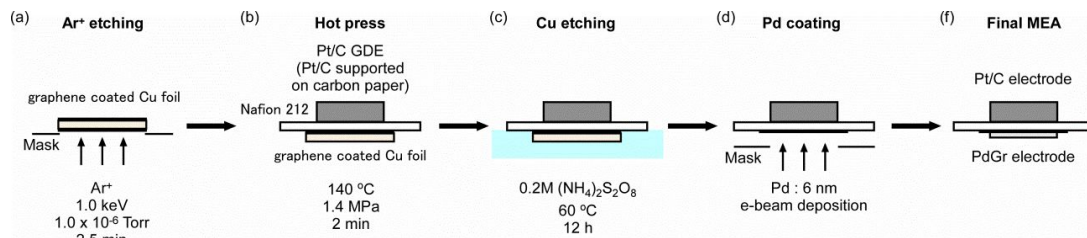


図 3 PdGr – Pt/C MEA の作製プロトコル .

金属材料には水素透過性を有し電気化学反応により水素同位体イオンの放出・吸収が可能で水素ポンピング法の電極触媒として使用可能なパラジウム(Pd)膜を用いた。グラフェン膜(Gr)上に Pd 膜を蒸着した Pd/Gr 膜をアノードの電極触媒として用いた場合には、Pd 膜上で水素同位体ガスが吸着・吸収され Pd 膜内を拡散、Pd 膜裏面に現れた吸着原子は電気化学酸化反応によりイオン化され Nafion 膜中へ放出され電極触媒として機能すると予想される。

本研究では、Pd/Gr 膜だけでなく、Gr が無い Pd 膜、Pt もしくは Pd のナノ微粒子が数十 nm のカーボンに担持した Pt/C と Pd/C をアノードの電極触媒として用い、これら電極触媒からなる MEA を作製してそれぞれの H/D 分離能を評価・比較した。カソードの電極触媒にはすべて Pt/C で、PdGr 膜及び Pd 膜の Pd の厚さは 6nm である。アノードに PdGr 膜をカソードに Pt/C を用いた MEA(PdGr – Pt/C MEA)の作製プロトコルを図 3 に示す。Cu 箔の両面に合成されたグラフェン膜の片方をエッチングにより除去し、ホットプレス法により Pt/C 電極触媒と Nafion 膜、Cu 箔上のグラフェン膜を接着する。その後、エッチングにより Cu 箔を除去し、真空蒸着法により Pd 膜(6nm)をグラフェン膜上に蒸着することで PdGr – Pt/C MEA を作製した。

図 4(a)はアノードに Pt/C をカソードに Pt/C を用いた MEA(Pt/C – Pt/C MEA)の水素ポンピングによりカソードから排出された水素同位体ガスの質量ガス分析の結果で、H₂ 及び D₂、HD ガスのイオン電流の時間発展である。測定開始から 5 分間は、開回路(電圧を印加していない)の状態であり、5 分以降から閉回路とし 2 分間かけて 25mA/cm² の電流値にセットしたのち 7 分以降は定電流で評価を行った。開回路である 0~5 分の間に、H₂ や HD、D₂ のイオン電流がバックグラウンドとして観察されるが、これらはアノードからのクロスリークによるものである。HD に関してはアノードの Pt/C 触媒上における交換反応(H₂ + D₂ ⇌ 2HD)によって生じたガスである。5 分以降から閉回路とし徐々に電流量を増やし 7 分以降で定電流にした結果、電流量の増加に合わせ各イオン電流も大きく増加し 20 分以降からはほぼ一定の値を示すことが分かった。一定電流となる 60 分以降に観察された水素同位体ガスのイオン電流の各成分比を図 4(b)右に示すが、各水素同位体ガスはほぼ同程度の量でカソードから排出されているのが分かる。この結果をもとに H/D 分離能について算出した結果、H/D 分離能は 1.2 程度であることが分かる(図 4(c)右)。同様の測定を各 MEA について行い、H/D 分離能を算出した結果(図 4(c))、アノードに一般的な電極触媒である Pt/C 及び Pd/C を用いた場合には、H/D 分離能はおよそ 1.2 程度で、Nafion 膜中の拡散係数の違いを反映した値が示され、H/D 分離能がほぼ発現しないことが分かった。一方、アノードに Pd 膜電極触媒を用いた場合には H/D 分離能が 3 程度に増加することが明らかとなった。

同じ金属触媒にも関わらずナノ微粒子状の Pd/C では分離能が発現しないのに対し、膜状の Pd 膜で分離能が発現したのは、各 Pd での水素酸化反応プロセスの違いを反映したものと考えられる。Pd/C 上の水素酸化反応では、Pd 表面上で水素同位体分子が吸着・解離し、酸化されてイオンになるが、Pd 膜では水素同位体分子が Pd 膜表面に吸着・解離したのち、原子状の水素同位体が膜内に吸収・拡散し Pd 膜裏面に現れた原子状水素同位体が酸化反応によりイオンになる。このように Pd 膜では、Pd 膜内への原子状水素同位体の吸収・拡散プロセスが、水素酸化反応に関与することが Pd/C と異なる点である。

過去の研究から水素同位体ガスの吸収・放出測定における Pd 膜の H/D 分離能が 2.2 程度と報告されている。本研究での Pd 膜 - Pt/C MEA の H/D 分離能は、Nafion 膜中での拡散係数の違

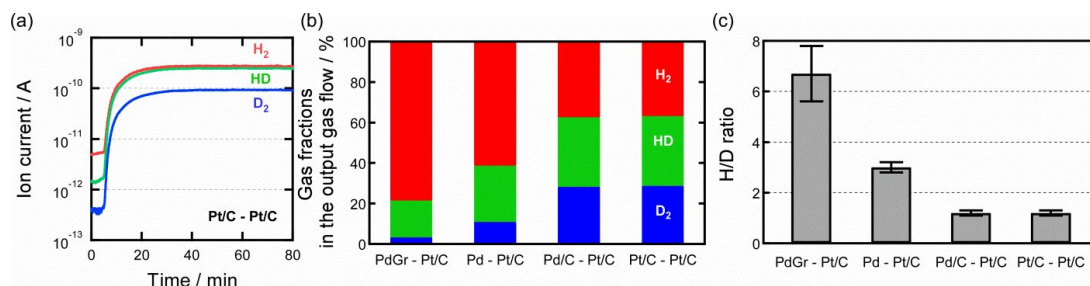


図 4(a) 質量ガス分析により観察された Pt/C – Pt/C MEA のカソードから排出された水素同位体ガスのイオン電流の時間発展 . (b)各 MEA のカソードから排出された水素同位体ガスの成分比と(c)各 MEA における H/D 分離能 .

いによる H/D 分離能を考慮すると、Pd 膜中への水素同位体の吸収・拡散が分離能の発現に寄与したものと考えられる。

グラフェンによる分離能向上効果を検証するために、グラフェンに Pd 膜を被覆した Gr/Pd 膜アノード電極触媒を用いて評価を行った。その結果、図 4(b)左から分かる通り、カソードから排出される水素同位体ガスの成分比で D_2 が大幅に減少しているのが観察され、H/D 分離能が 6.5 程度と高い分離能を示すことが明らかとなった(図 4(c)左)。この結果は、グラフェン - Pd 界面における水素同位体原子の閉じ込め効果に起因しているものと考えられる。

アノード反応過程で、水素同位体は Pd 膜中に吸収・拡散し、グラフェン膜が被覆している Pd 膜裏面に原子状の水素同位体が現れるが、裏面に吸着しているこれら水素・重水素原子はグラフェン膜との相互作用により吸着エネルギーが変わることで、H/D 分離能に重要なゼロ点振動エネルギー差が増大したものと考えられる。

現状ではさらなる分離能の向上が必要不可欠であること、純粋な D_2 ガスだけでなく HD ガスも副生成物として形成されてしまう課題がある。しかしながら、本研究によりグラフェン膜と金属膜とのヘテロ電極化によって H/D 分離能を大幅に向上可能であることを示したのは、今後の大気圧・室温での低コスト分離膜の創製に新たな道筋を建てたものであり、今後の同分野への発展に大きな貢献が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kato Masaru, Fujibayashi Natsuki, Abe Daiki, Matsubara Naohiro, Yasuda Satoshi, Yagi Ichizo	4. 巻 11
2. 論文標題 Impact of Heterometallic Cooperativity of Iron and Copper Active Sites on Electrocatalytic Oxygen Reduction Kinetics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 2356 ~ 2365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.0c04753	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 Kato Masaru, Nakahoshi Ryota, Ogura Kazuya, Tokuda Shoichi, Yasuda Satoshi, Higashi Kotaro, Uruga Tomoya, Uemura Yohei, Yagi Ichizo	4. 巻 3
2. 論文標題 Electronic Effects of Nitrogen Atoms of Supports on Pt-Ni Rhombic Dodecahedral Nanoframes for Oxygen Reduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 6768 ~ 6774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00903	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 Yasuda Satoshi, Tamura Kazuhisa, Terasawa Tomo-o, Yano Masahiro, Nakajima Hideaki, Morimoto Takahiro, Okazaki Toshiya, Agari Ryuushi, Takahashi Yasufumi, Kato Masaru, Yagi Ichizo, Asaoka Hidehito	4. 巻 124
2. 論文標題 Confinement of Hydrogen Molecules at Graphene-Metal Interface by Electrochemical Hydrogen Evolution Reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 5300 ~ 5307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c00995	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 Balois Maria Vanessa, Hayazawa Norihiko, Yasuda Satoshi, Ikeda Katsuyoshi, Yang Bo, Kazuma Emiko, Yokota Yasuyuki, Kim Yousoo, Tanaka Takuo	4. 巻 3
2. 論文標題 Visualization of subnanometric phonon modes in a plasmonic nano-cavity via ambient tip-enhanced Raman spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj 2D Materials and Applications	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41699-019-0121-7	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 Terasawa Tomo-o, Taira Takanobu, Yasuda Satoshi, Obata Seiji, Saiki Koichiro, Asaoka Hidehito	4. 巻 58
2. 論文標題 Effect of hydrogen on chemical vapor deposition growth of graphene on Au substrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SI1B17 ~ SI1B17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab19ae	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 Yasuda Satoshi, Uchibori Yosuke, Wakeshima Makoto, Hinatsu Yukio, Ogawa Hiroaki, Yano Masahiro, Asaoka Hidehito	4. 巻 8
2. 論文標題 Enhancement of Fe-N-C carbon catalyst activity for the oxygen reduction reaction: effective increment of active sites by a short and repeated heating process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 37600 ~ 37605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8RA08359B	査読の有無 無
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 Zhou Ruifeng, Yasuda Satoshi, Minamimoto Hiro, Murakoshi Kei	4. 巻 3
2. 論文標題 Sensitive Raman Probe of Electronic Interactions between Monolayer Graphene and Substrate under Electrochemical Potential Control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 2322 ~ 2328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.7b01928	査読の有無 無
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 Jeheon, Zhou Ruifeng, Murakoshi Kei, Yasuda Satoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Advantage of semi-ionic bonding in fluorine-doped carbon materials for the oxygen evolution reaction in alkaline media	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 14152 ~ 14156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8RA01636D	査読の有無 無
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 Yano Masahiro, Uozumi Yuki, Yasuda Satoshi, Asaoka Hidehito	4. 巻 57
2. 論文標題 Uniform Si nano-dot fabrication using reconstructed structure of Si(110)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 06HD04 ~ 06HD04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.06HD04	査読の有無 無
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 Yano Masahiro, Uozumi Yuki, Yasuda Satoshi, Tsukada Chie, Yoshida Hikaru, Yoshigoe Akitaka, Asaoka Hidehito	4. 巻 57
2. 論文標題 Characterization of SiO ₂ reduction reaction region at void periphery on Si(110)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 08NB13 ~ 08NB13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.08NB13	査読の有無 無
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10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 保田諭、松島永佳、朝岡秀人、福谷克之
2. 発表標題 グラフェン - パラジウム電極を用いた水素同位体分離
3. 学会等名 2021年電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 保田諭、寺澤知潮、矢野雅大、小河浩晃、加藤優、八木一三、朝岡秀人
2. 発表標題 グラフェンの水素イオン同位体透過能の評価
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 保田諭、寺澤知潮、矢野雅大、小河浩晃、加藤優、八木一三、朝岡秀人
2. 発表標題 膜電極接合体を用いたグラフェンのプロトン透過能評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 保田諭、寺澤知潮、矢野雅大、小河浩晃、加藤優、八木一三、朝岡秀人
2. 発表標題 単層グラフェンへの構造規定欠陥の導入と電気化学水素ポンプ法によるプロトン透過能評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 保田諭、田村和久、矢野雅大、寺澤知潮、朝岡秀人、丹野駿、佐藤祐輔、加藤優、八木一三
2. 発表標題 水溶液中における単層グラフェンへの電気化学ドーピング評価
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 保田諭、田村和久、朝岡秀人、丹野駿、佐藤祐輔、加藤優、八木一三
2. 発表標題 単層グラフェンへの電気化学ドーピングとその電気化学的挙動の評価
3. 学会等名 2018年電気化学秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yasuda, K. Tamura, S. T. Terasawa, M. Yano, S. Tanno, Y. M. Kato, I. Yagi, H. Asaoka
2. 発表標題 Hydrogen Nano Balloon Formation at Graphene-Metal Interface by Electrochemical Hydrogen Evolution Reaction
3. 学会等名 ACSIN-14&ICSPM26 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yasuda, K. Tamura, T. Terasawa, M. Yano, S. Tanno, M. Kato, I. Yagi, H. Asaoka
2. 発表標題 電気化学的手法によるグラフェン - 金属界面への水素ナノバブル形成
3. 学会等名 2018年 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 保田諭、田村和久、矢野雅大、寺澤知潮、加藤優、八木一三、朝岡秀人
2. 発表標題 単層グラフェンのプロトン透過能と電気化学的手法を利用したグラフェン-金属界面への水素ナノバブル形成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 保田諭、田村和久、矢野雅大、寺澤知潮、上利龍史、高橋康史、加藤優、八木一三、朝岡秀人
2. 発表標題 グラフェン - 金属界面で形成されるナノバブルの水素同位体効果
3. 学会等名 2018年電気化学会第86回大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 水素同位体濃縮装置	発明者 保田諭、朝岡秀人、 松島永佳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-39878	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 水素同位体濃縮装置	発明者 保田諭、朝岡秀人、 松島永佳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-39879	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	矢野 雅大 (Yano Masahiro) (30783790)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職 (82110)	
研究 分担者	朝岡 秀人 (Asaoka Hidehito) (40370340)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・副セン ター長 (82110)	

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