

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01751

研究課題名（和文）水素イオン透過ヘテロ電極界面による水素同位体分離能の制御

研究課題名（英文）Control of hydrogen isotope separation by hydrogen ion permeable hetero electrode interface

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・研究主幹

研究者番号：90400639

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：二次元材料であるグラフェンとパラジウム金属膜からなるヘテロ電極が持つ水素同位体分離能の起源とその制御法に関する検証を行った。固体高分子膜からなる電気化学デバイスと質量ガス分析法を適用して評価した結果、グラフェンの分離能の起源はグラフェンを透過する水素同位体イオンの量子トンネル効果に起因していることを明らかにした。また、グラフェンへの空孔構造導入による分離能の変調効果に関する基礎的知見も得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二次元材料のグラフェンの水素同位体イオンの分離能が量子トンネル効果に起因していることを初めて明らかにすると同時に、分離能の制御因子に関する基礎的知見を得た。これらの成果は、水素同位体分離の新しい手法・制御法となるもので、水素同位体分離や二次元材料分野での学理の発展に貢献が期待される。また、水素同位体である重水素は、半導体産業や光通信分野、医薬品開発、核融合の材料であるにも関わらず、製造コストが高くすべてを海外から輸入している。本成果は、低コストでの重水素分離法の技術となる可能性を有しており、国産製造化と日本の産業の活性化と国際競争力強化といった貢献が期待でき社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：We performed verification on the origin and its control of the hydrogen isotope separation ability of a hetero-electrode which consists of two-dimensional material, graphene and a palladium metal film. It was found that the origin of the separation ability of graphene is due to the penetration of hydrogen isotope ions through graphene by a quantum tunneling effect. In addition, we obtained fundamental knowledge regarding the effect of introducing a vacancy structure into graphene on the separation ability.

研究分野：表面科学, ナノカーボン

キーワード：水素同位体 グラフェン 電気化学 トンネル効果

1. 研究開始当初の背景

水素同位体である重水素は、IOT や 5G 向けの LSI の長寿命化や光ファイバーの透過率向上、重水素化医薬品の開発、薬物代謝のトレーサーに必須の原料で、今後も需要の増大が予想されている。重水素は、主に化学交換法や深冷蒸留法、電解法などを用いて分離濃縮されて得られるが、H と D を分ける能力である H/D 分離能が低いだけでなく電力コストがかかるため製造コストが高い。このため、そのほとんどを海外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、高い H/D 分離能を有し低コストでの重水素分離濃縮の技術開拓が切望されている。

グラフェンは炭素原子からなる一原子層のナノ材料であり、高電気伝導性と高機械的強度によりデバイス材料として研究されているが、 D^+ よりも H^+ を多く透過し、H/D 分離能を有することが報告されている。

近年、この H/D 分離能を有するグラフェンを、高分子電解質膜からなる電気化学水素ポンピング (PEM-ECHP) 法に組み込むことで、水素と重水素の混合ガスから重水素ガスを選択的に分離濃縮するデバイスを構築できることが報告されている。PEM-ECHP は、アノードの電極触媒に供給された水素分子を酸化反応によりプロトンに変換、高分子電解質膜を介してカソードの電極触媒上での還元反応により、再度、水素分子に変換するデバイスである。水素ガスの高圧化や高純度化に利用され、室温・大気圧動作が可能であること、固体の電解質膜を用いるため操作性やメンテナンスが容易であること、拡張性が高い特徴からコストパフォーマンスに優れている。

研究代表者は、水素透過性をもち電気化学的に H^+ と D^+ の放出・吸収が可能なパラジウム (Pd) 膜電極とグラフェンのヘテロ構造からなる電極構造を構築し、PEM-ECHP に組み込んだ結果、分離能が大きく向上することを見出した。将来的により高い分離能を発現する電極構造の設計指針を得るためには、グラフェンそのものの分離機構を解明するだけでなく、その知見に基づきヘテロ構造界面を制御することが重要となる。しかしながら、グラフェンの H/D 分離機構に関する実験的知見は得られていないばかりか、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、研究代表者が開発した Pd グラフェンヘテロ電極を組み込んだ PEM-ECHP とガス分析法を用いて、グラフェンの H/D 分離機構を明らかにすると共に、ヘテロ界面を制御することでさらなる分離能向上に関する基礎的知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

固体電解質膜 (PEM) である Nafion (厚さ $51\mu\text{m}$) の片面にグラフェンを転写し、その上に Pd (厚さ $6 \sim 10\text{ nm}$) を蒸着した二層構造からなるアノードを作製した (Fig. 1(a))。このヘテロ構造を PdGr (Gr はグラフェン) と呼ぶ。また、燃料電池の一般的な電極触媒である Pt ナノ微粒子がナノカーボン材料に担持された Pt/C をカソードとして用いた。カーボンペーパーであるガス拡散層に Pt/C 粉末を塗布した Pt/C ガス拡散電極 (Pt/C GDE) を作製して Nafion のもう片面に接着し、PdGr - Nafion - Pt/C GDE から構成される膜電極集合体 (MEA) を作製した。この MEA を PdGr-MEA と呼ぶ (Fig. 1(a))。H/D 分離能の検証用のため、アノードとしてグラフェンが無い膜状の Pd でカソードには Pt/C GDE からなる Pd-MEA、両電極とも Pt/C GDE からなる Pt/C-MEA も作製した。

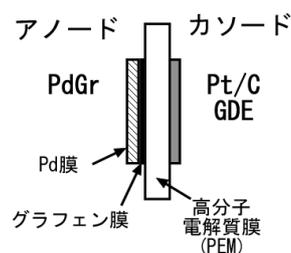


図 1 . (a) Pd/グラフェン電極 (PdGr) と Pt/C GDE からなる膜電極集合体 (MEA) の概念図。

これら MEA は電気化学反応セルにそれぞれ組み込み (図 2(a))、アノードには H_2 と D_2 の混合ガスを、カソードには加湿した Ar ガスを供給した。カソードの排出口には、H と D の定量評価のため四重極質量ガス分析装置を接続した (図. 2(b))。二つの電極間に電圧を印加すると、アノードでは一部の H_2 と D_2 が水素酸化反応によりイオン化されてそれぞれイオンになる。これらイオンは PEM 内をカソード方向に拡散し、カソードで水素発生反応により H_2 と D_2 、HD となって放出される。MEA に PdGr-MEA を用いた場合 (図 2(c))、アノードの PdGr に供給された水素と重水素ガスは、Pd 膜によりイオン化し、グラフェンがある面から H^+ と D^+ が放出される。このときグラフェンを透過し、カソードで H_2 、 D_2 、HD となって放出される。これらのガスの量を四重極質量ガス分析により決定し、H と D の選択性能である分離能を見積もった。この分離能は H/D として定義し、カソードで排出される H と D の量の割合をアノードに供給される H と D の量の割合で割った数値である ($H/D = [H/D]_{\text{カソード}} / [H/D]_{\text{アノード}}$)。

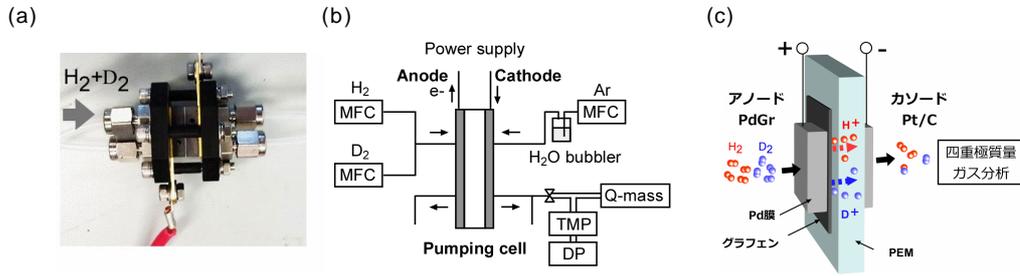


図 2. (a) 電気化学反応セルの写真 . (b) PEM-ECHP とガス分析装置を組み合わせた実験系の概念図 . (c) PdGr-MEA を用いた時の PEM-ECHP による分離能評価 .

4. 研究成果

図 3(a)は 3 種類の MEA を用いた時の、ある一定電流値 (25mA cm⁻²) で観察された H/D を示す。一般的な燃料電池で用いられている MEA である Pt/C-MEA では、H/D は 1.2 程度とほとんど分離能が発現しない。一方、グラフェンを含まない Pd-MEA の H/D は 2.5 程度で、グラフェンを含む PdGr-MEA では 8 程度の値を示すことが分かった。Pd-MEA の分離能は、予想した通り、Pd 膜自身の水素同位体の分離特性に由来するものであり、Pd 膜中の H および D 原子の溶解度や拡散定数の違いを反映した結果である。PdGr-MEA の場合では、H/D が Pd-MEA のそれよりも大きな値が観察されたが、この結果はグラフェンの水素同位体イオンの選択透過性に由来しているものと示唆される。

グラフェンの分離機構に関するより詳細な知見を得るため、それぞれの MEA に対して H/D の電圧依存性についても評価を行った (図 3(b))。その結果、PdGr-MEA では、電圧の増加に伴い H/D も減少する傾向があることが明らかとなり、特に電圧が低い、すなわち反応電流が低い場合には、H/D 分離能は 20 程度と大きな値を示した。一方、Pt/C-MEA と Pd-MEA においては、H/D は電圧によらず一定値を示すことが明らかとなった。PdGr-MEA の H/D は、グラフェンと Pd のそれぞれの分離能の相乗効果によるものであるため、グラフェンのみの H/D は、PdGr-MEA の H/D を Pd-MEA のそれで割ることで見積もることができる。図 4 は、算出したグラフェンの H/D の電圧依存性のグラフを示すが、低電圧領域では H/D は 10 程度で、電圧増加により減少していく特徴を示すことが分かった。

以上の観察された H/D の電圧依存性について電気化学の観点から考察する。PdGr-MEA の PdGr では、酸化反応により Pd 膜中に取り込まれた水素同位体はグラフェンがある面からイオンとして放出される。この Pd 膜から放出された水素同位体イオンは、グラフェンの六員環構造の中央部位を透過して電解質膜に移動するものと考えられる。この透過過程でエネルギー障壁があるため、この障壁を乗り越える必要があるが、電極間に電圧を加えるとグラフェンと電解質膜の界面には強い電場が加わるため、このエネルギー障壁も変化することが考えられる。この考察を踏まえ、グラフェンの分離機構について理論的検証を行った。これまでの研究によると、主に二つの分離能機構が提唱されている。一つは、グラフェン近傍に存在する水などの水酸基と水素同位体イオンの相互作用が関与したものである。D⁺が H⁺よりも質量が 2 倍程度重たいことによるゼロ点振動エネルギー差により D⁺が水酸基とより強く相互作用し、結果として H⁺が多く透過するモデルである。しかしながら、このモデルでは、印加電圧によりエネルギー障壁が変化しても、ゼロ点振動エネルギー差は影響を受けないため、H/D は電圧依存性を示さないものと考えられる。二つ目は、グラフェンのエネルギー障壁を水素同位体イオンが量子トンネル効果により透過するモデルである。質量が軽い H⁺は、D⁺よりも高い透過確率を示すことから、H⁺が多くグラフェンを透過できる。これらイオンの透過確率は、電圧によるエネルギー障壁の高さや幅の変化に対して変化するため、実験で観察された H/D の電圧依存性を説明することができる。以上の考察から、

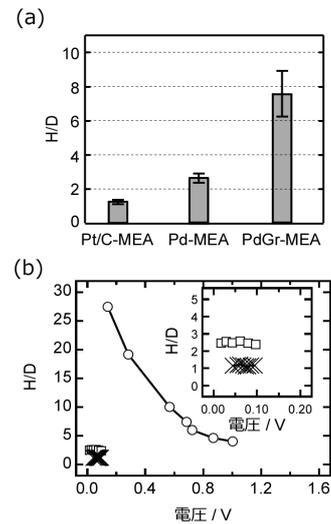


図 3 . (a) 各 MEA による H/D (25 mAcm⁻²での値). (b) 各 MEA の電圧依存性 . ○ が PdGr-MEA、□ が Pd-MEA、× が Pt/C-MEA .

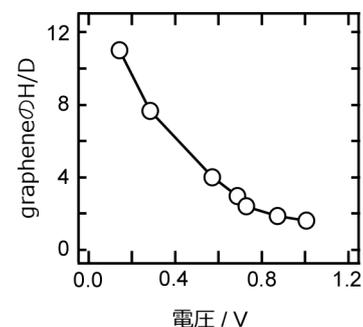


図 4 . グラフェン (Gr) の H/D の電圧依存性 .

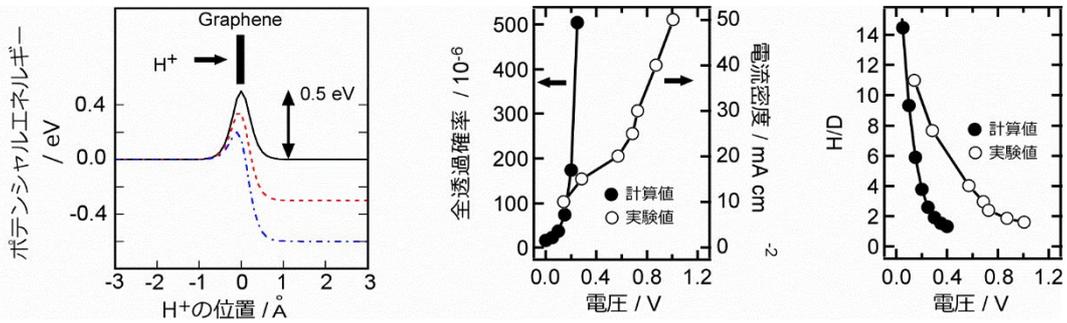


図5. (a) グラフェンを介して水素同位体イオンが透過するモデルポテンシャルと電圧による変化. (b) 理論計算で得られた全透過確率 (左縦軸:) と実験で得られた電流密度 (右縦軸:) の電圧依存性. (c) 理論計算 () と実験 () で得られた H/D の電圧依存性のグラフ.

量子トンネル効果に基づく理論モデルを構築し、実験結果との比較検証を行った。

図5(a)は、 H^+ がグラフェンの六員環の中心を透過するときのエネルギーポテンシャルのモデル図である。 H^+ の位置がゼロのところからグラフェンが存在し、マイナス側がPd膜、プラス側が電解質膜である。 H^+ がPd膜表面から脱離してグラフェンに近づき、六員環の中心を透過したとき(位置がゼロのとき)にエネルギー障壁の高さが最大となり、その高さは $0.5eV$ 程度と第一原理計算によって見積もられた。実験系を再現するように電圧を印加したときのモデルポテンシャルを図中に示すが(点線)、印加する電圧の大きさによって、エネルギー障壁の高さや幅が大きく変化することが分かる。このグラフェンのエネルギー障壁を介して水素同位体イオンが電解質膜側に移動するプロセスには、熱エネルギーによりエネルギー障壁を乗り越える古典的な移動プロセスと障壁をすり抜ける量子トンネル効果に基づく移動プロセスの2つが存在する。これら二つの移動プロセスの寄与による水素同位体イオンの全透過確率(電流に対応)とH/Dの電圧依存性について、図5(a)のモデルポテンシャルを用いて計算を行った。図5(b)は理論計算で得られた全透過確率と実験で得られた電流密度の電圧依存性の結果を示すが、電圧が増加するにつれて、両結果ともに増加するのが分かる。H/Dの電圧依存性についても、理論計算と実験結果の両方とも、電圧増加によりH/Dが減少することが明らかになった(図5(c))。このように古典的および量子トンネル効果に基づく移動プロセスを考慮したモデルを適用すると、実験で得られた電流とH/Dの電圧依存性の結果を良く再現できることが分かった。

図6は、実験及び理論で得られた電圧とH/Dの電圧依存性を説明した水素同位体イオンのエネルギーポテンシャルの概念図である。印加電圧が低い場合、グラフェンのエネルギー障壁が高いため、イオンがこの障壁を熱エネルギーで乗り越えて移動する古典的なプロセス(点線)よりも、量子トンネル効果(実線)により透過するプロセスが優勢となる。量子トンネル効果による移動プロセスは、水素同位体イオンの質量差に起因する透過確率の違いを反映して高いH/D分離能が発現する。このため低電圧では高いH/Dを示すが、透過するイオン量は少ないため電流は小さい。一方、印加電圧が高くなると、グラフェンのエネルギー障壁が低くなるため、量子トンネル効果よりも古典的な移動プロセスが支配的となる。古典的な移動プロセスではH/D分離能が小さい。このためH/Dは減少していくが、障壁の低下によりイオンの移動量が増加するため、電流は大きく増加していく。以上の理論と実験結果から、グラフェンのH/D分離能は、水素同位体イオンの量子トンネル効果に起因していることを明らかにした。

H/D分離能のさらなる向上とその制御を目指し、ヘテロ界面がH/D分離能に与える基礎的知見を得ることも試みた。界面の変調法として、グラフェンへの高密度な空孔構造の導入が分離能に与える影響についても検証を行った。

これまでに確立した高真空Arイオン照射法による空孔構造導入技術を用い、PdGrヘテロ電極のグラフェンに空孔構造を導入することで水素同位体分離能に与える影響を精査した。およそ $2\sim 5nm$ 間隔程度の高密度でグラフェン内に空孔構造を導入したPdGr-MEAを構築し、水素同位体分離能を評価した結果、分離能と印加電圧の減少が観察された。この結果は、空孔構造導入によってグラフェンのバリア高さが減少したことでトンネル効果による分離能の影響が低

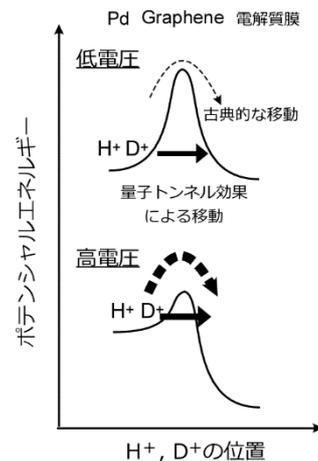


図6. 電圧による水素同位体イオンの移動プロセスの変化の概念図.

減した一方で、印加電圧が小さくなったと考えられる。図 3(b)のグラフから分かる通り、グラフェンのトンネル効果による水素同位体分離は、グラフェンのバリア高さが高いため印加電圧が高い。これらの結果は、バリア高さを低減することで、分離能は減少するが印加電圧も低減、すなわち反応量に対応する電流量を増加させる制御因子になりえることを示したものである。今後は理論計算と合わせ変調効果の有効性について検証を行う。

以上、1 原子層の厚さしかないグラフェンが、水素同位体イオンの量子トンネル効果によって高い同位体分離能が発現すること初めて明らかにした。また、グラフェンへの空孔構造導入が分離能の制御因子になる基礎的知見も得た。

これまでに様々な原理に基づく水素同位体分離の研究が行われてきたが、1 原子層の厚みの二次元材料への水素同位体イオンの量子トンネル効果を動作原理にした分離技術は、これまでに報告例が無く、全く新しい学術分野と手法になりえる。今後は、理論と実験を合わせた設計指針に基づき、量子トンネル効果がより効果的に発現する電極設計を進め、低コストの水素同位体分離デバイスの開発を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Yasuda Satoshi, Matsushima Hisayoshi, Harada Kenji, Tanii Risako, Terasawa Tomo-o, Yano Masahiro, Asaoka Hidehito, Gueriba Jessiel Siaron, Dino Wilson Agerico, Fukutani Katsuyuki | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Efficient Hydrogen Isotope Separation by Tunneling Effect Using Graphene-Based Heterogeneous Electrocatalysts in Electrochemical Hydrogen Isotope Pumping | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 ACS Nano | 6. 最初と最後の頁 14362-14369 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.2c04655 | 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, Matsunaga Kazuya, Hayashi Naoki, Ito Takahiro, Tanaka Shin-ichiro, Yasuda Satoshi, Asaoka Hidehito | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Band Gap Opening in Graphene by Hybridization with Au (001) Reconstructed Surfaces | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Phys. Rev. Mater. | 6. 最初と最後の頁 14002 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.7.014002 | 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-Oguchi Maria Vanessa, Hayazawa Norihiko, Yasuda Satoshi, Ikeda Katsuyoshi, Nguyen Tien Quang, Escano Mary Clare, TanakaTakuo | 4. 巻 127 |
| 2. 論文標題 Probing Strain and Doping along a Graphene Wrinkle Using Tip-Enhanced Raman Spectroscopy | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C | 6. 最初と最後の頁 5982-5990 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.2c08529 | 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, Kato Masaru, Asaoka Hidehito Yagi Ichizo | 4. 巻 125 |
| 2. 論文標題 Electrochemically Driven Specific Alkaline Metal Cation Adsorption on a Graphene Interface | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C | 6. 最初と最後の頁 22154-22162 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.1c03322 | 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 保田 諭 | 4. 巻 89 |
| 2. 論文標題 グラフェンの選択的プロトン透過能を利用した水素貯蔵電極材料の創製 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 電気化学 | 6. 最初と最後の頁 256-261 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/denkikagaku.21-FE0023 | 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 YASUDA Satoshi, DINO Wilson Agerico, FUKUTANI Katsuyuki | 4. 巻 66 |
| 2. 論文標題 グラフェンを介したヒドロンの量子トンネリングによる水素同位体分離 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science | 6. 最初と最後の頁 514 ~ 519 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.66.514 | 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 YASUDA Satoshi, DINO Wilson Agerico, FUKUTANI Katsuyuki | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 固体高分子形電気化学デバイスと質量ガス分析法を組み合わせたグラフェンの水素同位体分離能評価 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Isotope News | 6. 最初と最後の頁 13 ~ 16 |
| 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 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 YASUDA Satoshi | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 グラフェンを用いた量子トンネル効果による水素同位体分離技術 | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 表面技術 | 6. 最初と最後の頁 131 ~ 135 |
| 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 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7件(うち招待講演 1件/うち国際学会 0件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuda Satoshi, Matsushima Hisayoshi, Terasawa Tomo-o, Yano Masahiro, Asaoka Hidehito, Gueriba Jessiel Siaron, Dino Wilson Agerico, Fukutani Katsuyuki |
| 2. 発表標題 Hydrogen Isotope Separation by Tunneling Effect used Graphene-based Heterogeneous Electrocatalysts in Electrochemical Hydrogen Pumping |
| 3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress IVC-22 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 保田 諭, 松島永佳, 矢野雅大, 寺澤知潮, 朝岡秀人, J. S. Gueriba, W. A. Dino, 福谷克之 |
| 2. 発表標題 グラフェンの量子トンネル効果による水素同位体分離 |
| 3. 学会等名 第70回 応用物理学会 春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 保田 諭, 松島永佳, 矢野雅大, 寺澤知潮, 朝岡秀人, J. S. Gueriba, W. A. Dino, 福谷克之 |
| 2. 発表標題 単層グラフェンを用いた量子トンネル効果による水素同位体分離 |
| 3. 学会等名 学術変革領域研究(B) 表面水素工学「スピルオーバー水素の活用と量子トンネル効果の検証」 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 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 固体高分子形電気化学セルを用いた水素同位体ガス分離の研究 |
| 3. 学会等名 第4回ハイドロジェノミクス研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 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 水素ポンピング法によるグラフェン-金属ヘテロ電極を用いた水素同位体ガスの分離 |
| 3. 学会等名 第82回 応用物理学会 秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 保田諭、松島永佳、矢野雅大、寺澤知潮、朝岡秀人、J. S. Gueriba、W. A. Dino、福谷克之 |
| 2. 発表標題 グラフェン パラジウム電極の量子トンネル効果による水素同位体分離能の発現 |
| 3. 学会等名 電気化学会第89回大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 保田 諭 |
| 2. 発表標題 グラフェンを介した水素同位体イオンの量子トンネル効果と水素同位体分離技術への応用 |
| 3. 学会等名 ニューダイヤモンドフォーラム 2023年度第1回研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 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、2022-139472 | 取得年 2022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、2022-139473 | 取得年 2022年 | 国内・外国の別 国内 |

〔その他〕

| |
|---|
| <p>2022/08/31 プレスリリース 原子一個の厚みのカーボン膜で水素と重水素を分ける https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22083101/</p> <p>2023/03/13 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース 原子一個分の厚さの「グラフェン」を活用し、重水素の新たな精製技術を実証 https://www.jsap.or.jp/docs/pressrelease/JSAP-2023spring-chumoku-09.pdf</p> <p>2023/06/01 新技術説明会（オンライン，口頭発表） 「グラフェンを活用した水素・重水素の新規精製装置」</p> <p>2024/02/07 東海村新産業創出セミナー（ハイブリッド，口頭発表） 「水素社会に向けたJAEAの挑戦 水素、そして重水素が創る新しい未来」</p> |
|---|

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 | 福谷 克之 (Fukutani Katsuyuki) (10228900) | 東京大学・生産技術研究所・教授 (12601) | |
| 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) | |

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