

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01923

研究課題名(和文) 荷電粒子照射による原子空孔を利用した単原子触媒：高活性化メカニズムと設計指針

研究課題名(英文) Single-atom catalysts on atomic vacancies created by charged-particle irradiation: the mechanism of high activity and guiding principle for catalyst design

研究代表者

八巻 徹也 (YAMAKI, Tetsuya)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・プロジェクトリーダー

研究者番号：10354937

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：固体高分子形燃料電池のカソードに使用されるPt触媒の高性能化が大きな課題の一つである。研究代表者らは、イオンビームを照射して原子空孔を導入した炭素担体上に載せたPtナノ微粒子の酸素還元反応活性が向上することを見出している。本研究では、さらなる高性能化のための指針を得ることを目的として、原子空孔によるPt触媒の活性向上メカニズムの解明に取り組んだ。その結果、原子空孔を有する炭素担体とPtナノ微粒子との電子的相互作用の強化によってPt表面への酸素吸着が抑制され、触媒活性が向上することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンニュートラル実現に向け、固体高分子形燃料電池(PEFC)のコスト低減が不可欠な課題である。PEFC用カソード触媒の従来研究として、Ptナノ微粒子の粒径・分散性制御、Pt-M合金・複合化(M:安価な遷移金属)、非Pt系材料の探索などが試みられてきたが、本研究はこれらと異なる新しい発想をもとに高活性なPt触媒の作製方法を提案するものであり、PEFCの低コスト化に貢献できると期待される。

研究成果の概要(英文)：High activity is one of the primary requirements for the catalysts in proton exchange membrane fuel cell applications. Platinum (Pt) is the best known catalyst, especially for oxygen reduction at the cathode; however, further activity improvements are still required. Previous computational studies suggested that the activity of Pt nanoparticles could be enhanced by a Pt-carbon (C) support interaction. We have recently found that an enhanced electronic interaction occurs at the interface between an argon-ion (Ar⁺)-irradiated glassy carbon (GC) surface and Pt nanoparticles. Here, we report a more than twofold increase in specific activity for the Pt nanoparticles on the irradiated GC substrate compared to that on the nonirradiated GC substrate. The mechanism of this activity enhancement was investigated by local structure analysis of the interface. Ar⁺ irradiation of the carbon support led to the formation of Pt-C bonding, thus protecting the deposited Pt nanoparticles from oxidation.

研究分野：量子ビーム材料科学

キーワード：固体高分子形燃料電池(PEFC) 電極触媒 酸素還元反応(ORR) 荷電粒子ビーム 界面構造 原子空孔

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

家庭用、自動車用の次世代電源として期待される固体高分子形燃料電池(PEFC)の普及には、そのコスト低減が不可欠である。このため、PEFCカソードの酸素還元反応(ORR, $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$)の白金(Pt)触媒を高性能化(高活性化・高耐久化)しようという研究が盛んに行われてきた。それでも未だ解決に至っていないのは、この課題の克服が如何に困難かを表している。従来とは異なった発想に基づく触媒開発の方法論の確立が望まれている。

高活性化に向けた試みとして、Ptナノ微粒子と炭素担体との界面で形成されるPt-C相互作用の利用が検討されている。これまで研究代表者らは、荷電粒子(イオン・電子)ビームを利用した独自の手法によって、この相互作用を強化し高活性Pt触媒を開発するという難題に挑んでいる。最近、ビーム照射した炭素担体の原子空孔がPtナノ微粒子触媒と強い電子的相互作用を誘起し、その効果でORR活性が向上するという興味深い結果を得た。この結果は、照射による原子空孔が持つ新しい機能、ひいては触媒開発に向けた新しい方法論を見出す可能性を秘めている。

原子空孔の応用研究として、単一光子源(例えば、ダイヤモンドの窒素-空孔中心など)がよく知られ、ここでは原子スケールに局在化した電子スピンを利用している。これに対し、照射による原子空孔が持つ新しい機能、触媒開発に向けた新しい方法論を見出すことができれば、この単一光子源に並ぶ、PEFCカソード触媒というビーム利用工学の分野における新機軸が提示できる。

2. 研究の目的

1. の背景に基づき、究極の0次元構造体である単原子Pt触媒を利用して担体効果の本質、触媒の高性能化メカニズム解明を目指す本研究の着想に至った。言い換えれば、単原子Pt触媒を対象とすることで、原子空孔の持つ担体効果を最大化して、グラファイトに形成された原子空孔による担体効果の本質、Pt触媒の活性向上メカニズムを解明するとともに、最高性能への設計指針を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 試料の作製と構造・特性解析

炭素担体として、グラッシーカーボン(GC)や高配向性熱分解グラファイト(HOPG)の基板を用い、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所が保有するイオン照射研究施設(TIARA)において、380 keVのArイオンビームをフルエンス $1.0 \times 10^{13} \sim 1.0 \times 10^{16}$ ions/cm² で照射した。照射基板の上に、単原子に加えてナノ微粒子からなるPt触媒を化学還元法、物理蒸着法<文献>によって堆積した。

透過型電子顕微鏡(TEM)によりPt触媒のサイズや分散性を調べた。ORR活性は25°C、O₂飽和の0.1 M過塩素酸水溶液に対して、回転ディスク電極(RDE)法により測定した。得られたRDEボルタモグラムから拡散の効果を除去することで、ORR活性の指標となる活性化支配電流密度 i_k を導出し、電位とのプロット(Tafelプロット)で表した。

(2) X線吸収微細構造(XAFS)測定による界面原子の化学状態、局所構造の解析

XAFSのうち、吸収端から50 eV程度までのXANESスペクトルで構成元素の化学状態(価数) XANESより高エネルギー領域の広域X線吸収微細構造(EXAFS)スペクトルで局所構造(結合距離・配位数など)を評価した。3p軌道-5d空軌道間の遷移によるPt-M₃吸収端のXANESは高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー(KEK-PF)のBL27A、2p軌道-5d空軌道間の遷移によるPt-L₃吸収端のXANES及びEXAFSは高輝度放射光施設SPring-8のBL14B1において測定・解析した。

また、炭素K吸収端におけるXAFSスペクトルは、立命館大学SRセンターのBL-8において、電子収量法で取得した。

(3) 第一原理計算に基づく界面構造、電子状態の予測

密度汎関数理論(DFT)計算によって、Pt触媒の構造や電子状態、特にPt触媒とグラファイト中の原子空孔の配置や、それに由来するPtのd電子状態を計算する。フェルミ準位(E_F)近傍の電子状態密度からdバンド中心(E_F 以下にあるd電子エネルギーの平均値)を導出し、ORR活性を予測した。

4. 研究成果

(1) 触媒試料の作製と構造・特性解析

照射GC基板の上にRFマグネトロンスパッタリング法で堆積したPtナノ微粒子(以下、照射試料と呼ぶ)に加えて、比較のため照射せずに堆積したPtナノ微粒子も作製した(同、未照射試料)。図1は、照射試料の i_k を未照射試料と比較したTafelプロットである。ORR活性は、同電位での i_k を比較することで評価できる。照射試料はフルエンスによらず、すべての電位で未照

射試料よりも高い ORR 活性を示した。例えば、0.85 V vs. 可逆水素電極 (RHE) における i_k を未照射試料と比較すると、フルエンスが 1.0×10^{16} ions/cm² のとき最高で 2.2 倍に達した。また、このような ORR 活性向上は、フルエンスの増加とよく対応していることから、炭素担体中における原子空孔の効果、Pt-C 相互作用の強化に起因すると解釈できる。

(2) X 線吸収微細構造 (XAFS) 測定による界面原子の化学状態、局所構造の解析

照射試料の Pt-M₃ 吸収端 XANES スペクトルを図 2 に示す。すべての試料で 3p 5d 遷移による吸収端の立ち上がりピーク (white line) が観察された。white line の強度は Pt-5d 軌道空孔の充填率が低いほど大きくなることが知られている。したがって、フルエンス増加に伴う white line 強度の減少は、Pt-5d 軌道の空孔が少なくなっていることを示している。Pt/GC 界面における Pt-C 相互作用によって Pt 酸化が抑制されたためと考えられ、Pt-5d 軌道空孔の減少は Pt-C 相互作用の強化と相関がある可能性が高い。

2p 5d 遷移による Pt L₃ 吸収端の XANES 領域には、M₃ 吸収端と同様に、Ar イオンビーム照射によって white line 強度が減少するという傾向が確認された。そこで次に、EXAFS 領域から EXAFS 振動 $\chi(k)$ を抽出し、これをフーリエ変換することで、動径分布関数を得た。動径分布関数とは、原子の分布を示し、ある原子に着目してその周囲に位置する原子の分布 (存在確率) を距離 R の関数として定義される。各試料の結果を比較したのが図 3 である。このうち、動径距離 R = 1.3~3.3 Å の範囲でカーブフィッティングすることによって、配位数や結合距離を導出した。フィッティングには、Pt-Pt 結合と Pt-O 結合を構造パラメータとして用いた。

その結果を表 1 に示す。Pt-Pt 結合距離に注目すると、照射試料は未照射試料に比べ、0.007 Å 短くなっており、誤差が 0.0025 Å であることを考慮しても、結合距離が短縮していることが分かった。また、酸素との配位数に注目すれば、照射試料は未照射試料に比べて配位数が減少していることが確認できた。これらの結果を以下のように考察した。

既報<文献>によれば Pt-Pt 結合距離の短縮は Pt 格子の歪みによって起こるとされており、本研究における GC のイオンビーム照射が同様の影響を及ぼしていることが示唆される。このような格子歪みは、Pt-d 軌道電子のエネルギー平均値である d バンド中心を低下させ、その結果として表面への酸素吸着を抑制されることが知られている<文献>。したがって、照射試料における酸素配位数の減少はこれらの効果による変化に対応していると考えられる。酸素吸着の抑制が Pt-C 相互作用の強化と関係していることは、XANES の white line 強度からも考察されたとおりであり、互いに矛盾しない。

また、表面敏感な C-K 吸収端 XAFS による C-2p 非占有電子状態の解析では、炭素における sp² 結合特有のπ結合とσ結合による軌道成分を区別するため、HOPG 基板を担体として用いた。実験には、380 keV の Ar イオンビームを 1.0×10^{14} ions/cm² のフルエンスで照射した後、Pt ナノ粒子を堆積した試料を用いた。30°入射では、入射光の偏光方向と担体炭素の軌道成分の方向から C-C π*結合と C-C σ*結合がほぼ同じ散乱断面積で観測可能で、C-C σ*

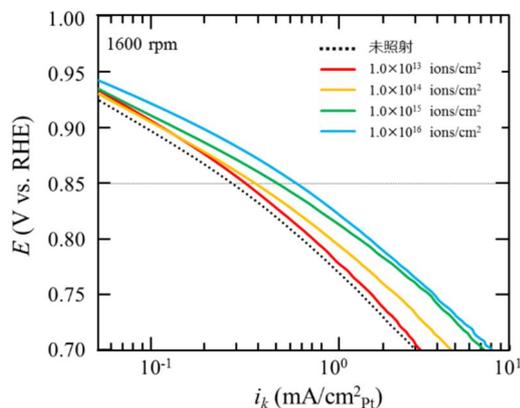


図 1 : RDEボルタモグラムから導出したTafelプロット

表 1 : EXAFS解析により得た結合距離と配位数

試料	結合	結合距離 (Å)	配位数
Pt箔	Pt-Pt	2.757	12.000
未照射試料	Pt-Pt	2.751	10.293
	Pt-O	1.923	2.041
照射試料 (7.5×10^{15} ions/cm ²)	Pt-Pt	2.744	10.799
	Pt-O	1.909	1.289

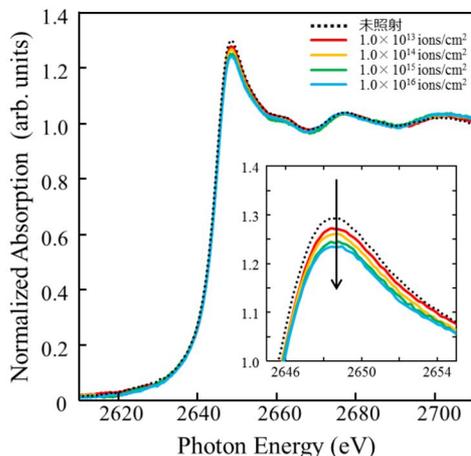


図 2 : Pt-M₃ 吸収端のXANESスペクトル

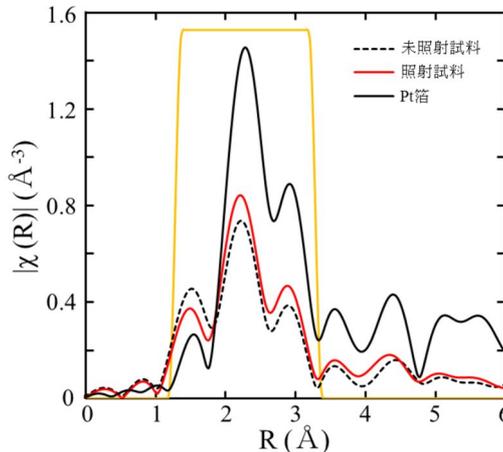


図 3 : Pt-L₃ 吸収端EXAFS領域から導出した動径分布関数

結合と C-C π^* 結合の両方の非占有電子状態を観測できる。先行研究を基に、得られた XAFS スペクトルのカーブフィッティングを行い、 σ 反結合性軌道 (σ^*)、水素吸着や酸素吸着による表面成分 (C=O もしくは C-H)、 π 反結合性軌道 (π^*)、Pt-C 結合 (Pt-C) によるピークを同定した。 π^* ピークに対する Pt-C ピークの強度比 (Pt-C/ π^*) を照射試料と未照射試料で比較すると、原子空孔の導入によって増加していることから Pt-C 相互作用が強化されていることが分かった。この点は、上で示した Pt-M₃ 吸収端、L₃ 吸収端 XANES の結果と一致する。

このように、Pt-C 相互作用の強化は、Pt-Pt 結合距離を短縮し d バンド中心を低下させることで、Pt 表面への酸素吸着を抑制することが明らかになった。このことが、イオンビーム照射 GC 基板における Pt ナノ微粒子の ORR 活性向上の原因と考えられる。

次なる展開として、Pt 触媒における酸素吸着状態の解析を行い、炭素担体への原子空孔の導入が触媒表面に化学吸着する酸素の弱結合化を引き起こすことの実験的確認が重要である。そこで、純酸素雰囲気下において、同試料のその場 XAFS 測定を行うことで、イオンビーム照射による原子空孔導入が ORR 初期過程である酸素吸着において、Pt-O の反結合準位を低下させていることを見出した。この結果は、酸素の化学吸着に伴う反結合準位への電子充填が起こりやすくなることを意味しており、Pt-O 結合が弱まり ORR の律速過程である酸素脱離が容易になっていることを明らかにした。

(3) 第一原理計算に基づく界面構造、電子状態の予測

Pt ナノ微粒子の酸化抑制がイオンビーム照射した炭素材料のどのような欠陥構造に起因するかを調べるため、DFT に基づく第一原理計算を実施した。ここでは、図 4 の (a) ~ (e) に示すように、GC を模擬する 3 層グラフェンシートの上に配置した 13 原子の Pt クラスター (Pt₁₃) を計算モデルとして、表面から第 1、2 層目のグラフェンシートに単一あるいは複数の原子空孔を導入したときの d バンド中心を計算した。

図 4 の計算結果では、原子空孔なしの (a) と比較して、(c) ~ (e) のグラフェンシート上で Pt₁₃ の d バンド中心が低下している。上述したように、 d バンド中心の低下は、反応する酸素と Pt 表面との結合が弱まることで ORR 活性が向上することを示唆する。したがって、GC 基板に導入された複数の原子空孔からなる欠陥構造がその上に堆積した Pt ナノ微粒子の酸素吸着性を弱めた、すなわち Pt 微粒子の電子構造を変化させた結果として ORR 活性が向上したと考えられる。

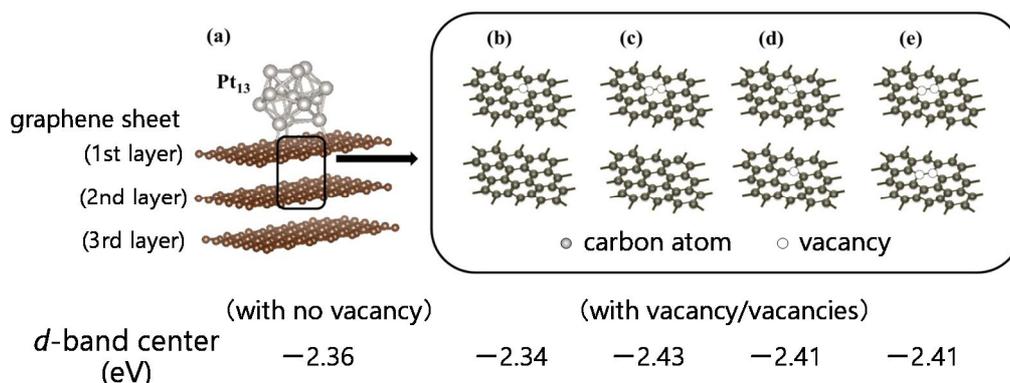


図 4 : DFT に基づく第一原理計算のため、3 層グラフェンシートの上に配置した Pt₁₃ クラスター計算モデル。表面から第 1、2 層目のグラフェンシートに単一あるいは複数の原子空孔を導入 ((a) 原子空孔なし、(b) 1 層目に単一の原子空孔、(c) 1 層目に二つの原子空孔、(d) 1、2 層目のそれぞれに単一の原子空孔、(e) 1、2 層目のそれぞれに二つの原子空孔)。 d バンド中心の計算値は Pt 13 原子の平均値

また、第一原理分子動力学 (MD) 法による反応経路の計算も進め、酸素の吸着様式、触媒活性点で可能な ORR 機構を予測した。具体的には、酸素吸着状態に対して MD 計算を行ったところ、炭素担体への原子空孔の導入により Pt 原子と O 原子の電子軌道混成が弱まっていることを確認した。このような Pt-O 弱結合化は、原子空孔の存在が触媒 - 担体界面において Pt 原子と C 原子との電子軌道の混成が強まったことと関連していることが示唆された。

< 引用文献 >

- S. Sun, G. Zhang, N. Gauquelin, N. Chen, J. Zhou, S. Yang, W. Chen, X. Meng, D. Geng, M.N. Banis, R. Li, S. Ye, S. Knights, G.A. Botton, T.-K. Sham, X. Sun, *Sci. Rep.* 3 (2013) 1775.
 D.-S. Kim, C. Kim, J.-K. Kim, J.-H. Kim, H.-H. Chun, H. Lee, Y.-T. Kim, *J. Catal.* 291 (2012) 69.
 M. Mavrikakis, B. Hammer, J.K. Nørskov, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 2819.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 Kakitani Kenta, Kimata Tetsuya, Yamaki Tetsuya, Yamamoto Shunya, Taguchi Tomitsugu, Kobayashi Tomohiro, Mao Wei, Terai Takayuki	4. 巻 355
2. 論文標題 The interface between platinum nanoparticle catalysts and an Ar ⁺ -irradiated carbon support	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Surface and Coatings Technology	6. 最初と最後の頁 259 ~ 263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surfcoat.2018.01.044	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 Kakitani Kenta, Kimata Tetsuya, Yamaki Tetsuya, Yamamoto Shunya, Matsumura Daiju, Taguchi Tomitsugu, Terai Takayuki	4. 巻 153
2. 論文標題 X-ray absorption study of platinum nanoparticles on an ion-irradiated carbon support	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 152 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radphyschem.2018.09.017	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 Kimata Tetsuya, Kakitani Kenta, Yamamoto Shunya, Yamaki Tetsuya, Terai Takayuki, Nakamura Kazutaka G.	4. 巻 444
2. 論文標題 Raman spectroscopy of Ar ⁺ -irradiated graphite surfaces supporting platinum nanoparticles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 6 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.02.005	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 Okazaki Hiroyuki, Kakitani Kenta, Kimata Tetsuya, Idesaki Akira, Koshikawa Hiroshi, Matsumura Daiju, Yamamoto Shunya, Yamaki Tetsuya	4. 巻 152
2. 論文標題 Changes in electronic structure of carbon supports for Pt catalysts induced by vacancy formation due to Ar ⁺ irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 124708 ~ 124708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5144568	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 Kimata Tetsuya, Kakitani Kenta, Yamamoto Shunya, Yamaki Tetsuya, Terai Takayuki, Nakamura Kazutaka G.	4. 巻 175
2. 論文標題 Platinum nanoparticles on HOPG surface modified by 380 keV Ar ⁺ irradiation: TEM and Raman studies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiation Effects and Defects in Solids	6. 最初と最後の頁 433 ~ 439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10420150.2020.1737866	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 Nakagawa Nobuyoshi, Ishitobi Hirokazu, Abe Soma, Kakinuma Masaki, Koshikawa Hiroshi, Yamamoto Shunya, Yamaki Tetsuya	4. 巻 364
2. 論文標題 A novel method to enhance the catalytic activity of PtRu on the support using CeO ₂ by high-energy ion-beam irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 118 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cattod.2019.12.017	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 Kimata Tetsuya, Kakitani Kenta, Yamamoto Shunya, Shimoyama Iwao, Matsumura Daiju, Iwase Akihiro, Mao Wei, Kobayashi Tomohiro, Yamaki Tetsuya, Terai Takayuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Activity enhancement of platinum oxygen-reduction electrocatalysts using ion-beam induced defects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.035801	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 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 八巻 徹也、垣谷 健太、木全 哲也、山本 春也、松村 大樹、寺井 隆幸
2. 発表標題 XAFSによるナノ粒子触媒 / イオンビーム照射担体の界面構造解析
3. 学会等名 立命館大学SRセンター研究成果報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木全 哲也、山本 春也、八巻 徹也、松村 大樹、寺井 隆幸、中村 一隆
2. 発表標題 Arイオン照射炭素担体を利用した燃料電池用Pt触媒の作製：量子ビームで創る・測る
3. 学会等名 日本原子力学会2018年秋の大会（学生ポスターセッション）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木全 哲也、山本 春也、八巻 徹也、寺井 隆幸、中村 一隆
2. 発表標題 イオンビーム照射炭素表面を利用した白金触媒の作製
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 岡崎 宏之、出崎 亮、松村 大樹、越川 博、山本 春也、前川 康成、八巻 徹也
2. 発表標題 イオン照射炭素に担持された白金ナノ粒子触媒のXAFS解析
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Okazaki Hiroyuki、Idesaki Akira、Koshikawa Hiroshi、Matsumura Daiju、Yamamoto Shunya、Maekawa Yasunari、Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 Catalyst Durability of Pt Nanoparticles on the Ar+ Irradiated Glassy Carbon
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 出崎 亮、越川 博、岡崎 宏之、山本 春也、前川 康成、八巻 徹也
2. 発表標題 イオンビーム照射炭素担体 / 白金触媒の性能に及ぼすイオン照射条件の効果
3. 学会等名 電気化学会第86回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakagawa Nobuyoshi、Ishitobi Hirokazu、Abe Soma、Kakinuma Masaki、Koshikawa Hiroshi、Yamamoto Shunya、Tetsuya Yamaki
2. 発表標題 Ion-beam irradiation to the CECNF support of the anode catalyst for DMFC
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okazaki Hiroyuki、Idesaki Akira、Koshikawa Hiroshi、Matsumura Daiju、Yamamoto Shunya、Maekawa Yasunari、八巻 徹也
2. 発表標題 The change of electronic structure at the interface between Pt nanoparticles and the carbon support by the ion irradiation
3. 学会等名 Materials Research Meeting (MRM) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okazaki Hiroyuki、Idesaki Akira、Koshikawa Hiroshi、Yamamoto Shunya、Maekawa Yasunari、Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 The improvement of corrosion resistance of carbon by the ion irradiation
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakagawa Nobuyoshi、Ishitobi Hirokazu、Abe Soma、Kakinuma Masaki、Koshikawa Hiroshi、Yamamoto Shunya、Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 Improved catalytic activity of PtRu/CECNF by the ion-beam irradiation to the CECNF support
3. 学会等名 Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、越川 博、松村 大樹、山本 春也、前川 康成、八巻 徹也
2. 発表標題 イオンビーム照射した炭素担体上のPtナノ粒子触媒の界面電子構造
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、越川 博、山本 春也、前川 康成、八巻 徹也
2. 発表標題 イオンビーム照射による炭素担体の耐腐食性向上
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 出崎 亮、越川 博、岡崎 宏之、山本 春也、前川 康成、八巻 徹也
2. 発表標題 イオンビーム照射炭素担体 / 白金触媒の性能に及ぼすイオン照射条件の効果
3. 学会等名 電気化学会第86回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、越川 博、松村 大樹、山本 春也、前川 康成、八巻 徹也
2. 発表標題 イオンビームによる炭素担体の格子欠陥を利用したPtナノ微粒子触媒の炭素吸収端スペクトル
3. 学会等名 電気化学会第86回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、越川 博、松村 大樹、山本 春也、前川 康成、八巻 徹也
2. 発表標題 イオンビーム照射により欠陥導入した炭素担体上のPtナノ粒子触媒の酸素雰囲気下XAFS測定
3. 学会等名 電気化学会第87回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、松村 大樹、越川 博、山本 春也、八巻 徹也
2. 発表標題 イオンビーム照射によるカーボン担持Pt ナノ粒子の 吸着酸素との弱結合化
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 Ion Beam Technology: Development of Nanomaterials for Future Hydrogen Energy and Fuel Cells
3. 学会等名 International Conference on Nuclear Science, Technology, and Application (ICONSTA2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Okazaki Hiroyuki、Idesaki Akira、Koshikawa Hiroshi、Daiju Matsumura、Yamamoto Shunya、Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 The electronic state of Pt nanoparticles on an ion-beam-irradiated carbon support
3. 学会等名 PACIFIC RIM MEETING (PRiME) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Okazaki Hiroyuki、Yamamoto Shunya、Koshikawa Hiroshi、Taguchi Tomitsugu、Idesaki Akira、Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 The suppression of oxidative corrosion of carbon by structural change due to ion irradiation
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、松村 大樹、越川 博、山本 春也、八巻 徹也
2. 発表標題 イオン照射カーボン担持Ptナノ粒子の弱い酸素吸着
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、越川 博、松村 大樹、山本 春也、八巻 徹也
2. 発表標題 イオン照射カーボン担持Ptナノ粒子触媒のin situ XAFS測定 ~酸素吸着状態の変化~
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Okazaki Hiroyuki、Idesaki Akira、Koshikawa Hiroshi、Matsumura Daiju、Yamamoto Shunya、Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 Changes of oxygen adsorption state of Pt nanoparticle catalyst on the carbon support by the ion irradiation
3. 学会等名 240th ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、松村 大樹、池田 隆司、越川 博、山本 春也、八巻 徹也
2. 発表標題 炭素担体へのイオン照射によるPt ナノ粒子触媒の酸素吸着状態の変化
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、越川 博、山本 春也、八巻 徹也
2. 発表標題 炭素担体へのイオン照射によるPtナノ粒子触媒のORR活性向上
3. 学会等名 第18回放射線プロセスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Okazaki Hiroyuki、Idesaki Akira、Koshikawa Hiroshi、Matsumura Daiju、Yamamoto Shunya、Yamaki Tetsuya
2. 発表標題 Oxygen adsorption state of Pt nanoparticles deposited on the ion-irradiated carbon support
3. 学会等名 Materials Research Meeting (MRM) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎 宏之、出崎 亮、越川 博、松村 大樹、池田 隆司、山本 春也、八巻 徹也
2. 発表標題 担体へのイオン照射による炭素担持Pt触媒の酸素吸着状態変化
3. 学会等名 電気化学会第89回大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 寺井 隆幸、垣谷 健太、木全 哲也、八巻 徹也、山本 春也、小林 知洋	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日本学術振興会炭素材料第117委員会	5. 総ページ数 4
3. 書名 炭素材料科学の進展	

1. 著者名 八巻 徹也	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日本学術振興会第132委員会	5. 総ページ数 9
3. 書名 電子・イオンビームハンドブック（第4版）	

1. 著者名 Kimata Tetsuya, Nakamura Kazutaka, Yamaki Tetsuya	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 20
3. 書名 High-Energy Chemistry and Processing in Liquids	

〔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	出崎 亮 (IDESAKI Akira) (10370355)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主幹研究員(定常) (82502)	
研究分担者	松村 大樹 (MATSUMURA Daiju) (30425566)	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 物質科学研究センター・研究主幹 (82110)	
研究分担者	田口 富嗣 (TAGUCHI Tomitsugu) (50354832)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員(定常) (82502)	
研究分担者	池田 隆司 (IKEDA Takashi) (60370350)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 放射光科学研究センター・研究統括(定常) (82502)	
研究分担者	岡崎 宏之 (OKAZAKI Hiroyuki) (90637886)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主任研究員(任常) (82502)	
研究分担者	寺井 隆幸 (TERAI Takayuki) (90175472)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	

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