

令和 4 年 9 月 2 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03921

研究課題名(和文) レドックス高分子での交換反応による電荷・水素の輸送と貯蔵の化学

研究課題名(英文) Charge/ Hydrogen -Transport and -Storage through the Exchanging Reactions in Redox Polymers

研究代表者

西出 宏之 (NISHIDE, Hiroyuki)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：90120930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：酸化還元(レドックス)反応すなわち電子の授受が迅速かつ可逆的に進む有機分子を連結して、研究代表者らが合成した一群のレドックス高分子を対象に、少量の電解質も含んでゴム状となった高分子での電荷(すなわち電子と対イオン)さらにはプロトンと水素分子の効率高い輸送と貯蔵をはじめて系統的に実証した。凝縮したレドックス席を介して、液相に似た迅速で可逆的な電荷および水素の交換反応が生起し、濃度勾配を駆動力として高分子内の隅々まで伝播する機作を、普遍的なエネルギー機能もつ有機材料の設計指針として描像した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電池のように電荷(すなわち電気)を貯蔵し放出できる材料の多くは金属・金属酸化物など無機物によっている。また水素の化学的な貯蔵でも同じである。これらエネルギーの貯蔵作用を、レドックス能もち軽量・成形性ある有機高分子材料で発現できる可能性を提示した研究である。無機材料には無い特性として、数秒でのフル充電、サロンプラスチック、水素運搬プラスチック、酸素バリアフィルムなどを例示し、資源制約少なく環境適合・安全な機能材料としてアピールした。

研究成果の概要(英文)：Redox polymers are organic polymers that reversibly undergo redox or electron-releasing and -gaining reactions. Very efficient transport and storage of charge (electron and counter ion) or hydrogen molecule (proton) in the redox polymers were experimentally characterized with the rapid exchanging-reactions and concentration-gradient-driven diffusion among the densely populated redox-active sites. Employing the redox polymers in rechargeable batteries, a hydrogen carrier, an oxygen-barrier film, etc. were demonstrated in the perspective of the functional polymers for use in sustainable energy-related technologies.

研究分野：高分子、有機材料およびその関連分野

キーワード：機能性高分子 機能性有機材料 高分子合成 レドックス反応 電荷貯蔵 グリーンマテリアル 二次電池 水素キャリア

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

研究代表者らの基盤研究(S)(平24-28)ラジカル高分子を電極とする有機電池が与えたインパクトと、水素の貯蔵への拡張(挑戦的萌芽・平27-28)を起点に、当時より急速に高まる次世代電池の開発研究のなかで、あわせ未開拓であった有機高分子での電荷(および水素)の貯蔵の機作解明、さらなる高い密度で貯蔵するための分子設計、またそれら知見の新しい科学としての高分子化学での位置づけを目的として、本研究の背景と立案に至った。

2. 研究の目的

レドックス高分子に独特である、迅速な交換反応による電荷と水素分子の輸送と貯蔵を、一群の同高分子を新たに合成して対象とし、その迅速反応と濃度勾配に基づく輸送・貯蔵現象として理論と実験の両面から解明するとともに、大電流密度の有機電池、高い密度で水素を保持運搬できるプラスチック、さらに波及しうる多くのデバイスを例示し、エネルギー機能もち、環境適合の有機高分子材料として新しい領域を切り拓くべく実施した。

3. 研究の方法

対象とした有機高分子の合成、有機電池の作製と性能解析・評価、および水素の可逆的な貯蔵能の測定・評価は、5. 発表論文各々に具体的に記載した。

4. 研究成果

(1) レドックス高分子から成る電極での大電流密度と高い出力電圧の実現

レドックス高分子としてテトラメチルピペリジニルオキシ(TEMPO)ポリマーを対象に、少量のカーボンナノチューブ・ネットワークとの複合電極を効率高く作動させるのに成功し、他に類例のない 1 A/cm^2 超の高い電流密度(既報値の100倍近い)を実証した。極めて卑な電位をもつベンゾチオフェンスルホン高分子を合成し、これを負極、TEMPOポリマー正極の全有機電池で、 2.6 V 超の出力電圧と 500 mWh/g 超の高いエネルギー密度を明示した。TEMPO超分子と対を成しうる負極レドックス部位として、ベンゾイルピリジニウムを見出し、それが置換したシクロヘキサジアミンの超分子を形成させ、全有機電池とした。極めて高い充放電速度と自己修復性ある有機物としての特性を明らかにした。

(2) 有機電池としてのレドックス高分子の機能拡張

親水性レドックス高分子、生理食塩水、生体適合性セパレータ・封止ポリマーから、厚み $1 \mu\text{m}$ 以下のナノシート型の電池を作製し、電池性能とあわせ、数倍伸縮可能、皮膚付着性から、幅広い展開の可能性を示した(図1)。

親水性のTEMPOポリマーのナノ粒子、キノンポリマーナノ粒子の水分散液を正負極とする、高エネルギー密度でかつ環境適合なレドックスフロー電池をはじめ構成するとともに、ナノ粒子内での高密度電荷の交換(拡散係数として $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)と貯蔵を解明した。チアントレン高分子がTEMPOより貴なレドックス電位 $4.1 - 4.3 \text{ V}$ (対Li)もち、しかもリチウムコバルト酸化物(粉末)と相容し、カスケード様に電荷移動をメディエートすることを実証した。過電圧無しでの高速充電に繋がる知見となった。

ゴム状TEMPOポリエーテル、リチウムコバルト酸化物、カーボンナノチューブの相容体は 300 mA/cm^3 超えの極めて高い蓄電容量を与え、柔軟性から同正極から成る薄型電池は繰り返す屈曲下でも動作した(図2)。

TEMPOポリマー、ポリチオウレアの高い分極能を見出し、エネルギー高容量の有機高分子キャパシターとして報告した。

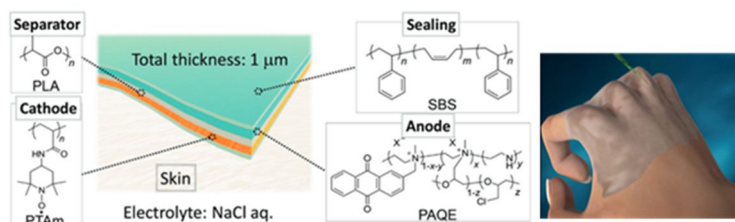


図1 超薄型有機電池と皮膚装着例

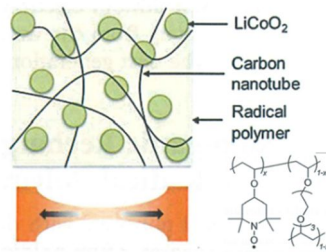


図2 フレキシブルで蓄電容量・出力あるレドックス高分子の電極
表1 レドックス高分子への可逆的な水素固定・貯蔵

Hydrogen-releasing and -fixing molecules	Hydrogen density (wt%)	Hydrogen-fixing	Hydrogen-releasing
	1.0	elect red (-1.5 V) + H ⁺ or Ir cat, H ₂ 1 atm, 25°C, 1 h	Ir cat, 95°C, 4 h
	2.6	elect red (-0.4 V) + H ⁺ or Ir cat, H ₂ 1 atm, 60°C, 1 d	Ir cat, 120°C, 5 h
	2.2	Ir cat, H ₂ 1 atm, 60°C, 1 d	Ir cat, 120°C, <2 h
	2.8	Ir cat, H ₂ 3 atm, 80°C, 1 d	Ir cat, 180°C, 1 h

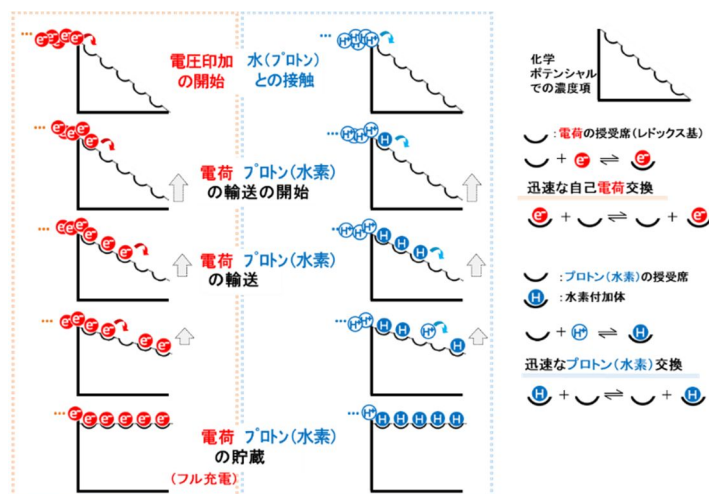


図3 濃度勾配を駆動力とした電荷および水素の輸送と貯蔵

(3) 高分子型水素キャリアと高密度貯蔵の分子設計

水素の高密度授受と水素キャリアの創成では、まずポリビニルフルオレノール/フルオレンを対象に、温和な条件下でのイリジウム触媒による脱水素・水素ガス発生、また共存する水からの電気化学的なプロトン取り込みによる水素化・水素固定を、その可逆サイクルとあわせ定量的に解析し、水素キャリア高分子として利点・未解決点を明らかにした。水素付加・脱離体をフルオレノンからキノキサリンなどの窒素複素環式化合物に拡張し、質量水素密度として有機ヒドライドと同程度 wt%の水素キャリアとして試験した。ポリ(ジメチルテトラヒドロキノキサリン)のゲルで、1時間桁の速い水素取り込みと放出を実証した。また新たに脂肪族高分子ポリ(メチルビニルケトン)を合成し、可逆的な水素化・脱水素から、水素質量密度 2.8%を達成した(表1)。これら水素キャリア高分子の親水化と安全な取り扱いも試験できた。

ジヒドロベンゾキノンとアルデヒドの縮合反応から一段で、ポリ(ジヒドロベンゾキノン)を合成した。0.2V(対Ag/AgCl)での可逆レドックスとそれに伴う2プロトン(水素)の授受を明らかにし、高分子層内での水素伝播としても解析できた。空気電池の電極活物質と成りえることも例示し、水素キャリア高分子ならではの新しい展開をアピールした。

水分子の高分子内および界面での特性を前提として理解するため、汎用 NMR 法と(高分子のモデルとなる)疎水性分子の添加により、初めて水クラスターの立方 8 量体構造と水素結合の役割を、クラスター寿命、安定性、物性など含め定量的に明らかにした。

分子構造によりエネルギー準位を調整したチオフェン共重合体による効率高い水電解・水素発生・過酸化水素生成も展開した。

表2 レドックス高分子での電荷・水素輸送のパラメータと導電高分子・プロトン伝導膜の比較

		Driving Force-Mechanism	Exchange Reaction Rate Constant	Diffusion Coefficient-Carrier Mobility	Flux (Thickness 1 μ m) [Target]	Carrier Conc	Capacity [Target]
Our Re-search	Charge-Transport	Concentration Gradient-Exchange Reaction	10^{5-6} M/s	10^{7-9} cm ² /s	20 mA/cm ² [> 1 A/cm ²]	10^{21-22} /cm ³	150 mAh/g [> 300 mAh/g]
	Hydrogen-Transport	Concentration Gradient-Exchange Reaction	10^{3-4} M/s	10^{11} cm ² /s	10^{-4} μ mol (H ₂)/cm ² s	10^{21-22} /cm ³	5 meq/g, 1 H ₂ wt% [> 5 H ₂ wt%]
Conducting Polymers (Organic Semiconductor)		Potential Gradient	—	10^{1-1} cm ² /Vs	(Application 1 V) 10^{1-3} A/cm ²	10^{20} /cm ³	~20 mAh/g
Proton-Conducting Membrane		Potential Gradient	—	10^{6-7} cm ² /Vs	10^{-2} μ mol	$< 10^{20}$ /cm ³	< 1 meq/g

(4) 交換反応に基づく電荷・水素の輸送貯蔵の描像と新しいエネルギー機能高分子としての提示

濃度勾配を駆動力とした高分子内での電荷、水素、プロトン拡散伝播として、レドックス反応速度、拡散係数など各パラメータと比較整理し(図3、表2)レドックス凝縮相での電子・イオン・小分子の輸送現象の物性化学として提示した。

さらに、アリル炭化水素高分子での活性酸素の伝播と酸素バリアフィルム応用など、知見の一般化を計った。

以上とりまとめ、有機電池、新しい空気電池、水分解セルなどを創発するエネルギー機能材料としての設計指針を示した。なおこれらの成果は22報の国際誌論文(いずれも当該科研費への謝辞有り)に印刷発表されている。

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 10件 / うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Oka Kouki, Tobita Yuka, Kataoka Miho, Murao Saki, Kobayashi Kazuki, Furukawa Shuhei, Nishide Hiroyuki, Oyaizu Kenichi	4. 巻 53
2. 論文標題 Synthesis of vinyl polymers substituted with 2-propanol and acetone and investigation of their reversible hydrogen storage capabilities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 799 ~ 804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-021-00475-1	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 Oka Kouki, Nishide Hiroyuki, Winther Jensen Bjorn	4. 巻 8
2. 論文標題 Copolymer of Phenylene and Thiophene toward a Visible Light Driven Photocatalytic Oxygen Reduction to Hydrogen Peroxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 2003077 ~ 2003077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202003077	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 Oka Kouki, Winther Jensen Bjorn, Nishide Hiroyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Organic Conjugated Polymers as Photocathode Materials for Visible Light Enhanced Hydrogen and Hydrogen Peroxide Production from Water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Energy Materials	6. 最初と最後の頁 2003724 ~ 2003724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.202003724	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 Oka Kouki, Tobita Yuka, Kataoka Miho, Kobayashi Kazuki, Kaiwa Yusuke, Nishide Hiroyuki, Oyaizu Kenichi	4. 巻 71
2. 論文標題 Hydrophilic isopropanol/acetone substituted polymers for safe hydrogen storage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer International	6. 最初と最後の頁 348 ~ 351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pi.6337	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 Oka Kouki, Murao Saki, Kataoka Miho, Nishide Hiroyuki, Oyaizu Kenichi	4. 巻 54
2. 論文標題 Hydrophilic Anthraquinone-Substituted Polymer: Its Environmentally Friendly Preparation and Efficient Charge/Proton-Storage Capability for Polymer?Air Secondary Batteries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 4854 ~ 4859
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.1c00865	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 Kaiwa Yusuke, Oka Kouki, Nishide Hiroyuki, Oyaizu Kenichi	4. 巻 32
2. 論文標題 Facile reversible hydrogenation of a poly(6 vinyl 2,3 dimethyl 1,2,3,4 tetrahydroquinoxaline) gel like solid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymers for Advanced Technologies	6. 最初と最後の頁 1162 ~ 1167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pat.5163	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 Oka Kouki, Nishide Hiroyuki, Winther-Jensen Bjorn	4. 巻 2
2. 論文標題 Completely Solar-Driven Photoelectrochemical Water Splitting Using a Neat Polythiophene Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cell Reports Physical Science	6. 最初と最後の頁 100306 ~ 100306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.xcrp.2020.100306	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 Kouki Oka, Shuhei Furukawa, Saki Murao, Tatsuya Oka, Hiroyuki Nishide, Kenichi Oyaizu	4. 巻 56
2. 論文標題 Poly (dihydroxybenzoquinone): Its High-density and Robust Charge Storage Capability in Rechargeable Acidic Polymer-air Batteries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 4055-4058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0cc00660b	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 Yang Feng, Yui Hasegawa, Takeo Suga, Hiroyuki Nishide, Liuqing Yang, George Chen, Shengtao Li	4. 巻 52
2. 論文標題 Tuning Conformational H-Bonding Arrays in Aromatic/Alicyclic Polythiourea Toward High Energy-Storable Dielectric Material	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 8781-8787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0PY00091D.	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 Oka Kouki, Strietzel Christian, Emanuelsson Rikard, Nishide Hiroyuki, Oyaizu Kenichi, Stromme Maria, Sjodin Martin	4. 巻 105
2. 論文標題 Characterization of PEDOT-Quinone Conducting Redox Polymers in Water-in-salt Electrolytes for Safe and High-energy Li-ion Batteries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electroche. Commun.	6. 最初と最後の頁 106489-106489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elecom.2019.106489	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 Yu Wang, Motoharu Shoda, Ayako Hisama, Kenichi Oyaizu, Hiroyuki Nishide	4. 巻 220
2. 論文標題 Oxygen Scavenging and Oxygen Barrier Poly (1, 2 butadiene) Films Containing an Iron Complex Catalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromol. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 1900294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/macp.201900294	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 Ryo Kato, Kouki Oka, Keisuke Yoshimasa, Masataka Nakajima, Hiroyuki Nishide, Kenichi Oyaizu	4. 巻 40
2. 論文標題 Reversible Hydrogen Releasing and Fixing with Poly (Vinylfluorene) through a Mild Ir Catalyzed Dehydrogenation and Electrochemical Hydrogenation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromol. Rapid Commun.	6. 最初と最後の頁 1900139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/marc.201900139	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 Kan Hatakeyama-Sato, Tomomi Masui, Takuma Serikawa, Yusuke Sasaki, Wonsung Choi, Seok-Gwang Doo, Hiroyuki Nishide, Kenichi Oyaizu	4. 巻 2
2. 論文標題 Nonconjugated Redox-Active Polymer Mediators for Rapid Electrocatalytic Charging of Lithium Metal Oxides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 6375-6382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.9b01007	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 Kan Hatakeyama-Sato, Rieka Ichinoi, Yoshito Sasada, Yusuke Sasaki, Kenichi Oyaizu, Hiroyuki Nishide	4. 巻 48
2. 論文標題 n-Type Redox-active Benzoylpyridinium-substituted Supramolecular Gel for an Organogel-based Rechargeable Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 555-557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.190085	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 Kan Hatakeyama Sato, Hisato Wakamatsu, Kento Yamagishi, Toshinori Fujie, Shinji Takeoka, Kenichi Oyaizu, Hiroyuki Nishide	4. 巻 15
2. 論文標題 Ultrathin and Stretchable Rechargeable Devices with Organic Polymer Nanosheets Conformable to Skin Surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 1805296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.201805296	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 Kouki Oka, Kanako Noguchi, Takeo Suga, Hiroyuki Nishide, Bjorn Winther-Jensen	4. 巻 9
2. 論文標題 Poly (1, 4 di (2 thienyl)) benzene Facilitating Complete Light Driven Water Splitting under Visible Light at High pH	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Energy Materials	6. 最初と最後の頁 1803286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.201803286	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 Yang Feng, Takeo Suga, Hiroyuki Nishide, Yoshimichi Ohki, George Chen, Shengtao Li	4. 巻 40
2. 論文標題 How to Install TEMPO in Dielectric Polymers-Their Rational Design toward Energy Storable Materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromolecular rapid communications	6. 最初と最後の頁 18007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/marc.201800734	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 Kouki Oka, Toshimichi Shibue, Natsuhiko Sugimura, Yuki Watabe, Bjorn Winther-Jensen, Hiroyuki Nishide	4. 巻 9
2. 論文標題 Long-lived water clusters in hydrophobic solvents investigated by standard NMR techniques	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-36787-1	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 Kan Hatakeyama-Sato, Takashi Nagano, Shiori Noguchi, Yota Sugai, Jie Du, Hiroyuki Nishide, Kenichi Oyaizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Hydrophilic Organic Redox-Active Polymer Nanoparticles for Higher Energy Density Flow Batteries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Polymer Materials	6. 最初と最後の頁 188-196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsapm.8b00074	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 Kouki Oka, Ryo Kato, Kenichi Oyaizu, Hiroyuki Nishide	4. 巻 28
2. 論文標題 Poly(vinylidenedibenzothiophenesulfone): its Redox Capability at Very Negative Potential toward an All-Organic Rechargeable Device with High Energy Density	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1805858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201805858	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 Kan Hatakeyama Sato, Hisato Wakamatsu, Ryu Katagiri, Kenichi Oyaizu, Hiroyuki Nishide	4. 巻 30
2. 論文標題 An Ultrahigh Output Rechargeable Electrode of a Hydrophilic Radical Polymer/Nanocarbon Hybrid with an Exceptionally Large Current Density beyond 1 A cm ⁻²	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1800900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201800900	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 Kouki Oka, Oriie Tsujimura, Takeo Suga, Hiroyuki Nishide, Bjorn Winther-Jensen	4. 巻 11
2. 論文標題 Light-assisted electrochemical water-splitting at very low bias voltage using metal-free polythiophene as photocathode at high pH in a full-cell setup	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energy & Environmental Science	6. 最初と最後の頁 1335-1342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7ee03669h	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

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 Allylic polymers as an Ultrahigh Oxygen-scavenging and Active Packaging Film
3. 学会等名 7th Congress of Federation of Asian Polymer Societies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 “Solar-Driven Water Splitting with a Specialty Polymer”
3. 学会等名 8th Int Symp on Specialty Polymers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 “ Macromolecular Complexes as an Advanced Functional Polymer ”
3. 学会等名 18th IUPAC Int Symp on Macromolecule-Matal Complexes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 “ Radical Polymers as an Organic Charge-transport and Energy-storage Material ”
3. 学会等名 Organic Battery Days 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 “ Polythiophenes for Solar-Driven Water Splitting ”
3. 学会等名 6th FAPS Polymer Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 “ Polythiophenes for Solar-Driven Water Splitting ”
3. 学会等名 12nd East Asian Symp on Polymer for Advanced Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 Radical Polymer/ Nanocarbon Hybrid as an Ultrahigh Output Rechargeable Electrode
3. 学会等名 8th Int. Symp. Polymer Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 Ultrathin and Flexible Rechargeable Deavies with Organic Polymer Nanosheets
3. 学会等名 5th Int. Biomaterials Symp. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 Materials Informatics for Enegy-related Functional Polmers
3. 学会等名 Polymer Soc. Korea, Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nishide
2. 発表標題 Redox- active Polymers as an Organic Charge- Trangat and Energy- Storage Material
3. 学会等名 12th Inter. Polymer Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 過酸化水素の製造法	発明者 西出宏之、岡弘樹、 ピヨーン ウィンザー ジェンセン	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-175028	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 水素の製造方法	発明者 西出宏之、岡弘樹、 ピヨーン ウィンザー ジェンセン	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-5878	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

〔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
連携研究者	小柳津 研一 (OYALIZU Kenichi) (90277822)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

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			
スウェーデン	Uppsala大学			
オーストラリア	Monash大学			
中国	西安交通大学			
韓国	サムソン中央研究所			