

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月19日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19105003

研究課題名（和文） ラジカルポリマーのSOMO設計と全有機二次電池の創製

研究課題名（英文） SOMO Design of Radical Polymers for Development of Fully Organic Rechargeable Batteries

研究代表者

西出 宏之（NISHIDE HIROYUKI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90120930

研究成果の概要（和文）：有機ラジカルポリマーを電極活物質とした「有機ラジカル電池」のプロトタイプについて、軽量かつ成型性に優れる有機材料の特徴に基づく高いエネルギー密度と、ラジカル種の高速電子移動に由来するパワー密度をあわせもつ類例のない電池特性の予備的実証を起点に、有機ラジカル種の電子移動とそれともなう電荷輸送特性の解明に基づく革新的有機電極材料の創出と、SOMO（半占有分子軌道）経由の有機電子移動に関する基礎化学開拓を目的とした。有機ラジカル種の基礎化学に立脚した合理的分子設計により、エネルギー密度と出力パワーを向上させ、安全・環境適合の次世代二次電池も提示した。

研究成果の概要（英文）：We have been developing “organic radical batteries” by fabricating the prototypes using organic radical polymers as electrode-active materials. The radical batteries are characterized by the unprecedented battery performances that accomplish both a high energy density and an excellent power rate capability, taking advantage of the designable polymer chain and the fast electron transfer kinetics found for the radical pendants. The present research aims at establishing novel organic electrodes by unraveling the the electron- and mass-transfer processes of the radical polymers, in pursuit of basic principles that dominate the organic redox reactions through singly occupied molecular orbitals (SOMO). Rational molecular design and synthesis of radical polymers have been attempted with a view to further improve the energy and power densities to provide next-generation and sustainable organic rechargeable batteries.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	18,100,000	5,430,000	23,530,000
2009年度	17,400,000	5,220,000	22,620,000
2010年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
2011年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
総計	77,600,000	23,280,000	100,880,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・高分子化学

キーワード：ラジカルポリマー、電極活物質、有機電気化学、超構造、二次電池

1. 研究開始当初の背景

有機材料を用いた電極活物質は、ドーブ・脱ドーブに基づく導電性高分子や有機ジスルフィド化合物などの既報がある。しかし

電子の非局在化度が大きい導電性高分子はエネルギー容量が小さく、酸化還元反応の遅いジスルフィド類はレート特性に劣るため、高速・大容量化のための全く新しい設計コン

セプトが待望されていた。安全性が高く、環境負荷の小さい有機材料に対する期待は益々高まっている背景にあった。

ラジカルポリマーの酸化還元特性は従来の有機電極活物質と異なり、定量的な電子授受（100%近いドープ率）、化学結合の生成・切断をともなわない速い1電子の移動、画期的な安定性（充放電サイクル寿命）、無臭・焼却可など諸点で非常に優れている。従来電池にはない高レート特性（例えば数秒での充電）も有している。化学的に安定な有機ラジカル分子を酸化還元活性種として捉え、有機電気化学の新しい局面が拓くと同時に電極活物質の拡張につながると着想し、本研究の立案に至った。

2. 研究の目的

室温大気下で安定なニトロキシドラジカル分子の電気化学的に可逆な酸化還元を、二次電池の電極反応として初めて利用し、p型およびn型活性の2種ポリマーをそれぞれ正・負極とした「全有機電池」のプロトタイプを試作し、その動作を予備的に実証している。本研究は、安定ラジカル種が関与する電子移動過程の確立を基盤として、SOMOのエネルギーレベルと不対電子の非局在化度をバランスさせる設計により、密度高く安定なレドックス席を有するラジカルポリマーを合成することを目的とした。また、物質移動過程の制御により、ポリマー内での迅速かつ大容量の電子移動過程を達成する。さらに、イオン輸送性を高めた新しい活物質の設計により、電解質および電解液の大幅な削減を目指した。これら基礎的追究から得られる知見を総合し、「次世代有機ラジカル電池」として具体化することを目的とした。

3. 研究の方法

安定ラジカル種が関与する電子移動の確立は、高容量密度と高出力を兼ね備え、かつ環境に適合した電池の出現に繋がることを期待し、以下の目標項目を立てて推進した。

(1) 安定ラジカル種の有機電気化学確立

有機ラジカルの化学安定度を増加させ、斬新なレドックス活性種として見直すことにより、可逆応答を示す新しい有機化合物群を創出する。

(2) SOMO制御によるラジカルポリマー設計

ラジカル種のSOMOレベルと軌道分布に着目し、pまたはn型活性、酸化還元電位（電池の出力電圧）およびレドックス容量との相関を解明する。

(3) ラジカルポリマーの精密合成

安定ラジカル種をレドックス席として有するメタ(ア)クリレート、スチレン、アセチレンを合成し、アニオン重合(またはラジカル重合)を経て一連のラジカルポリマーを精

密に合成する。

(4) 新規n型ポリマーの開拓

アミノキシルアニオンを手掛りとして、従来類例に乏しいn型ポリマーを幅広く探索し、負極活物質としての性能を電池特性から評価する。

(5) 電子・イオン輸送現象の解明と制御

ポリマー層における電子および対イオンの移動過程を複素インピーダンスにより解析し、有機ラジカル電池の速い充放電速度（高レート特性）の要因を裏付ける。セルブドープ型に設計された活物質も含め、正・負極および電解質を至適設計して、次世代有機ラジカル電池を創出する。

4. 研究成果

(1) 安定ラジカル種の有機電気化学確立

閉殻構造を有する有機分子の電極反応は、一電子酸化還元により不安定な開殻電子配置（ラジカル種）を経由するため、一般に電気化学的に不可逆な応答が観測される。化学的に安定なラジカル種を対象とすれば、SOMO経由で可逆的な電極反応が幅広く観測されるとの着想を、ニトロキシド、ニトロニトロキシド、ガルビノキシル、フェノキシルなど多くの安定ラジカル種を用いた具体例の拡張により、一般性高い知見として導出した。

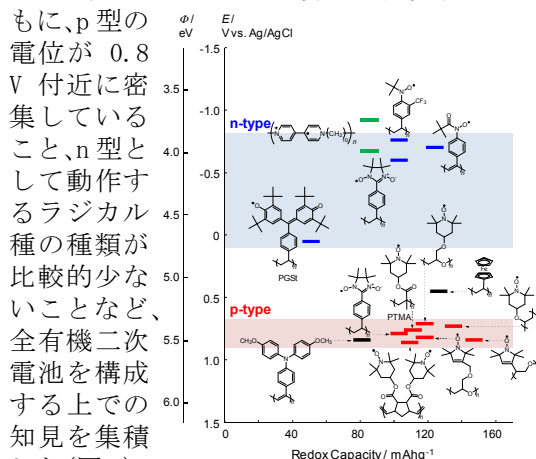
(2) SOMO制御によるラジカルポリマー設計

酸化還元電位と容量について、p型（中性 π カチオンの酸化還元）およびn型（中性 π アニオンの酸化還元）ラジカル双方の分布を把握するとともに、p型の電位が0.8 V付近に密集していること、n型として動作するラジカル種の種類が比較的小さいことなど、全有機二次電池を構成する上での知見を集積した(図1)。

図1 ラジカルポリマーのマッピング。

(3) SOMO制御によるラジカルポリマー設計

安定ラジカル種を置換したメタクリレート、アクリルアミド、スチレン、エポキシド、ノルボルネンなどをラジカルの失活なく重合させるため、開始剤との組み合わせを明らかにし、不対電子を高い密度で含むモノマーの重合化学を開拓した。例えば、オキシラニル基が直結した5員環ニトロキシドはZnEt₂-H₂O系開始剤により副反応なく配位ア



ニオン重合して高分子量体を与え、酸化還元容量の最高値更新となる高容量ポリマーを与えた(図2)。

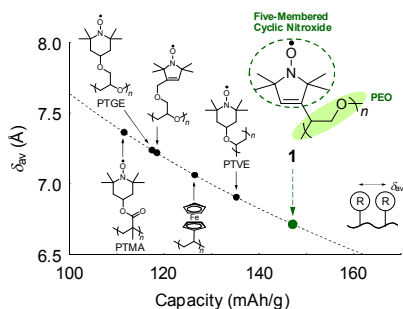


図2 高容量ポリマーの設計.

ラジカルポリマーを集電体に被覆固定した高分子層が可逆的な応答を示し、 10^4 回以上の繰返し酸化還元を行っても容量低下がないこと、電荷補償イオンの物質移動が電気容量に相応した量で履歴なく可逆的に観測されることを実証し、高密度レドックスポリマーの理想形に近い振舞いを明らかにした。

(4) 新規 n 型ポリマーの開拓

全有機二次電池の負極を構成する n 型活物質を探索した。予備知見を集積しているニトロニルニトロキシドを用いて、N-オキシルアニオンへの還元性を確かめた。また、SOMO レベルを指標として置換基効果を定量し、ラジカルの還元電位との相関を明らかにした。さらに、n 型活性が期待できる新しいラジカル種としてフェルダジルや DPPH に対象を広げ、酸化還元電位および電極反応速度定数などの物性値を定量すると共に、還元状態が安定で電荷貯蔵に適していることを明確にした。

(5) 電子・イオン輸送現象の解明と制御

① 非共役系での湿式導電現象

ラジカルレドックス席を高密度で含有するポリマーの優れた電荷輸送特性を物理化学的に解明した。例えば、有機安定ラジカルである 2, 2, 6, 6-テトラメチルピペリジン-N-オキシル (TEMPO) を置換したポリノルボルネンは、TEMPO 部位がそれ自身の溶解度を超えて濃縮されたゲルを形成し、可逆的・高密度な電荷貯蔵に付随して高速・長距離電荷輸送が可能であった。電極反応の速度定数が極めて大きい ($k_0 = 10^{-1}$ cm/s 桁) ため、外圏機構による自己電子交換速度定数も大きく

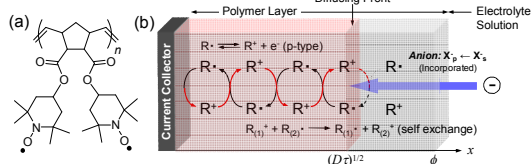


図3 (a) 厚み制御自在で均質な電極活性層を形成するラジカルポリマーの例. (b) 化学反応に基づく湿式導電ポリマー層の原理.

($k_{ex} = 10^8$ M⁻¹s⁻¹ 桁)、濃度勾配を駆動力とする電荷輸送が高速かつ長距離に亘って連続生起することを実証した。このような分子設計により、化学反応の繰返しによる電荷輸送をマクロな導電現象 (電荷の流束) として引き出せることを確立した(図3)。

② 電荷促進輸送系の構築

ポリマー内の電子・イオンの拡散過程を、AC インピーダンス法により各振動数域に分けて解析した。交換電流密度から電荷移動抵抗を求め、様々な材質の電極基板を用いてポリマーとの接触界面の影響を明らかにした。電荷移動を支配する抵抗成分を求め、ポリマーの一次構造や膨潤度との相関を解明した。

次に、ポリスチレンスルホン酸などと共重合させたセルフドープ型ポリマー(図4)やポリアニオンとのコンプレックスを合成し、電荷輸送の見かけの拡散定数の解明によりイオン輸送の観点から高密度化に寄与する斬新な活物質として実証すると共に、貴な電位での n 型酸化還元に基づく高エネルギー密度のロッキングチェア型有機二次電池(図5)として動作を確認した。

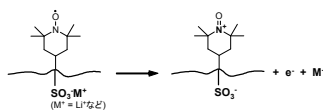


図4 カチオン (M⁺) のみ拡散するセルフドープ型ポリマーの例.

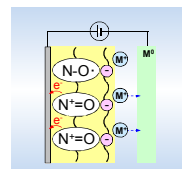


図5 ロッキングチェア型有機電池の構成.

(6) ラジカル電池の高性能化

ラジカルポリマーは集電体上への湿式成膜により電極活物質として使用した。一連の試作コイン型電池で、仕込みラジカル量に合致した充放電容量が観測され、ラジカル関与の電極反応の定量性を実デバイスでも発揮できた。電極反応が極めて速いこと、非晶質ラジカルポリマーの膨潤性に基づいて電荷補償イオンの物質移動が容易で電荷拡散が効率高く行われることにより、電流密度 100 C でも放電容量は 1 C 時の 90% 以上、全容量を数秒で放電しても容量・電位がほぼ維持されるなど、画期的な充放電特性を実証した。

(7) 多様な電荷貯蔵形式の実証

n 型ポリマーを Li 負極と組合せた場合、充放電時に電解質のアニオン移動を伴わず Li⁺ イオンのみが極間を移動する、いわゆるロッキングチェア型電池として動作し、電解質削減と電池全体でのエネルギー密度向上の方策を明確にした。p, n 型ポリマーを組み合わせた全有機二次電池では、両者の酸化還元電位差に対応する電圧で数百サイクル以上にわたり容量低下なく発電することを実証した。

特筆すべき知見として、僅か0.5秒(720C)でも全電池容量を取りきることが可能で、例えばガルビノキシル(薄黄)の充電時の着色(紺青)を残存容量のインジケータとして利用できるなど、薄型、(半)透明、フレキシブルな全有機二次電池ならではの新しい可能性が見出された。

以上を通じて、SOMO設計されたラジカルポリマーによる効率高い電荷輸送・貯蔵を実現すると共に、二次電池をはじめ多様な有機デバイスに展開するための基礎を確立した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計36件): 全て査読付き

1. K. Nakahara, K. Oyaizu, H. Nishide, "Electrolyte Anion-assisted Charge Transportation in Poly(oxoammonium cation/ nitroxyl radical) Redox Gels", *J. Mater. Chem.*, in press (2012).
2. N. Chikushi, H. Yamada, K. Oyaizu, H. Nishide, "TEMPO-substituted Polyacrylamide for an Aqueous Electrolyte-typed and Organic-based Rechargeable Device", *Sci. Chin. Chem.*, **55**, 822-829 (2012).
3. K. Oyaizu, H. Nishide, "Macromolecular Complexes Leading to High Performance Energy Devices", *Macromol. Symp.*, in press (2012).
4. T. Suga, M. T. Hunley, T. E. Long, H. Nishide, "Electrospinning of Radical Polymers: Redox-Active Fibrous Membrane Formation", *Polym. J.*, **44**, 264-268 (2012).
5. K. Oyaizu, T. Sukegawa, H. Nishide, "Dual Dopable Poly(phenylacetylene) with Nitronyl Nitroxide Pendants for Reversible Ambipolar Charging and Discharging", *Chem. Lett.*, **40**, 184-185 (2011).
6. T. Suga, S. Takeuchi, H. Nishide, "Morphology-Driven Modulation of Charge Transport in Radical/Ion-Containing, Self-Assembled Block Copolymer Platform", *Adv. Mater.*, **23**, 5545-5549 (2011).
7. T. Suga, S. Sugita, H. Ohshiro, K. Oyaizu, H. Nishide, "P- and N-Type Bipolar Redox-active Radical Polymer: Toward Totally Organic Polymer-based Rechargeable Devices with Variable Configuration", *Adv. Mater.*, **23**, 751-754 (2011).
8. S. Yoshihara, H. Katsuta, H. Isozumi, M. Kasai, K. Oyaizu, H. Nishide, "Designing Current Collector/composite Electrode Interfacial Structure of Organic Radical Battery", *J. Power Sources*, **196**, 7806-7811 (2011).
9. K. Oyaizu, W. Choi, H. Nishide, "Functionalization of Poly(4-chloromethylstyrene) with Anthraquinone Pendants for Organic Anode-active Materials", *Polym. Adv. Technol.*, **22**, 1242-1247 (2011).
10. W. Choi, S. Ohtani, K. Oyaizu, H. Nishide, K. E. Geckeler, "Radical Polymer-wrapped SWNTs at a Molecular Level: High-rate Redox Mediation through a Percolation Network for a Transparent Charge-storage Material", *Adv. Mater.*, **23**, 4440-4443 (2011).
11. W. Choi, D. Harada, K. Oyaizu, H. Nishide, "Aqueous Electrochemistry of Poly(vinylanthraquinone) for Anode-active Materials in High-density and Rechargeable Polymer/Air Batteries", *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 19839-19843 (2011).
12. K. Nakahara, K. Oyaizu, H. Nishide, "Organic Radical Battery Approaching Practical Use", *Chem. Lett.* (Highlight Review), **40**, 222-227 (2011).
13. F. Kato, N. Hayashi, T. Murakami, C. Okumura, K. Oyaizu, H. Nishide, "Nitroxide Radicals for Highly Efficient Redox Mediation in Dye-sensitized Solar Cells", *Chem. Lett.*, **39**, 464-465 (2010).
14. T. Ibe, S. Kaiho, K. Oyaizu, H. Nishide, "Electronic Communication in the Formation of a Quartet Molecule 2,6,10-Tris[bis(*p*-methoxyphenyl)aminiu m]triphenylene", *Chem. Lett.*, **39**, 356-357 (2010).
15. K. Oyaizu, A. Hatemata, W. Choi, H. Nishide, "Redox-active Polyimide/carbon Nanocomposite Electrodes for Reversible Charge Storage at Negative Potentials: Expanding the Functional Horizon of Polyimides", *J. Mater. Chem.*, **20**, 5404-5410 (2010).
16. X. Zhuang, H. Zhang, N. Chikushi, C. Zhao, K. Oyaizu, X. Chen, H. Nishide, "Biodegradable and Electroactive TEMPO-substituted Acrylamide/Lactide Copolymer", *Macromol. Biosci.*, **10**, 1203-1209 (2010).
17. S. Yoshihara, H. Isozumi, M. Kasai, H. Yonehara, Y. Ando, K. Oyaizu, H. Nishide, "Improving Charge/discharge Properties of Radical Polymer Electrodes Influenced Strongly by Current Collector/carbon Fiber Interface", *J. Phys. Chem. B*, **114**, 8335-8340 (2010).
18. K. Koshika, N. Chikushi, N. Sano, K.

- Oyaizu, H., Nishide, "A TEMPO-substituted Polyacrylamide as a New Cathode Material: an Organic Rechargeable Device Composed of Polymer Electrodes and Aqueous Electrolyte", *Green Chem.*, **12**, 1573-1575 (2010).
19. T. Murakami, F. Kato, K. Oyaizu, H. Nishide, "Porphyrin-dye Sensitized Solar Cell Utilizing Nitroxide Radical Mediator", *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **23**, 353-355 (2010).
 20. T. Hyakutake, J. Y. Park, Y. Yonekuta, K. Oyaizu, H. Nishide, R. Advincula, "Nanolithographic Patterning via Electrochemical Oxidation of Stable Poly(nitroxide radical)s to Poly(oxoammonium salt)s", *J. Mater. Chem.*, **20**, 9616-9618 (2010).
 21. X. Zhuang, C. Xiao, K. Oyaizu, N. Chikushi, X. Chen, H. Nishide, "Synthesis of Amphiphilic Block Copolymers Bearing Stable Nitroxyl Radicals", *J. Polym. Sci., A*, **48**, 5404-5410 (2010).
 22. K. Oyaizu, T. Kawamoto, T. Suga, H. Nishide, "Synthesis and Charge Transport Properties of Redox-active Nitroxide Polyethers with Large Site Density", *Macromolecules*, **43**, 10382-10389 (2010).
 23. K. Koshika, N. Sano, K. Oyaizu, H. Nishide, "An Ultrafast Rechargeable Polymer Electrode Based on the Combination of Nitroxide Radical and Aqueous Electrolyte", *Chem. Commun.*, 836-838 (2009).
 24. T. Suga, H. Ohshiro, S. Sugita, K. Oyaizu, H. Nishide, "Emerging N-Type Redox Active Radical Polymer for a Totally Organic Polymer-Based Rechargeable Battery", *Adv. Mater.*, **21**, 1627-1630 (2009).
 25. H. Nishide, K. Koshika, K. Oyaizu, "An Environmentally Benign Battery Based on Organic Radical Polymers", *Pure Appl. Chem.*, **81**, 1961-1970 (2009).
 26. K. Koshika, M. Kitajima, K. Oyaizu, H. Nishide, "A Rechargeable Battery Based on Hydrophilic Radical Polymer-electrode and Its Green Assessment", *Green Chem. Lett. Rev.*, **2**, 169-174 (2009).
 27. K. Koshika, N. Sano, K. Oyaizu, H. Nishide, "An Aqueous Electrolyte-type Rechargeable Device Utilizing a Hydrophilic Radical Polymer-cathode", *Macromol. Chem. Phys.*, **210**, 1989-1995 (2009).
 28. T. Suga, S. Takeuchi, T. Ozaki, M. Sakata, K. Oyaizu, H. Nishide, "Synthesis of Poly(oxoammonium salt)s and Their Electrical Properties in the Organic Thin Film Device", *Chem. Lett.*, **38**, 1160-1161 (2009).
 29. K. Oyaizu, H. Nishide, "Radical Polymers for Organic Electronics: A Radical Departure from Conjugated Polymers?", *Adv. Mater.*, **21**, 2339-2344 (2009).
 30. Y. Takahashi, N. Hayashi, K. Oyaizu, K. Honda, H. Nishide, "Totally Organic Polymer-based Electrochromic Cell Using TEMPO-substituted Polynorbornene as a Counter Electrode-active Material", *Polym. J.*, **40**, 763-767 (2008).
 31. K. Oyaizu, T. Suga, K. Yoshimura, H. Nishide, "Synthesis and Characterization of Radical-bearing Polyethers as an Electrode-active Material for Organic Secondary Batteries", *Macromolecules*, **41**, 6646-6652 (2008).
 32. K. Oyaizu, Y. Ando, H. Konishi, H. Nishide, "Nernstian Adsorbate-like Bulk Layer of Organic Radical Polymers for High-density Charge Storage Purposes", *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 14459-14461 (2008).
 33. H. Nishide, K. Oyaizu, "Toward Flexible Batteries", *Science*, **319**, 737-738 (2008).
 34. Y. Yonekuta, K. Oyaizu, H. Nishide, "Structural Implication of Oxoammonium Cations for Reversible Organic One-electron Redox Reaction to Nitroxide Radicals", *Chem. Lett.*, **36**, 866-867 (2007).
 35. Y. Takahashi, K. Oyaizu, K. Honda, H. Nishide, "Low-energy Driven Electrochromic Devices Using Radical Polymer as Transparent Counter Electroactive Material", *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **20**, 29-34 (2007).
 36. Y. Yonekuta, K. Susuki, K. Oyaizu, K. Honda, H. Nishide, "Battery-inspired Non-volatile and Rewritable Memory Architectures: a Radical Polymer-based Organic Device", *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 14128-14129 (2007).
- [学会発表] (計 424 件: 主たる講演のみ記載)
1. H. Nishide, "Radical polymers toward organic battery and photovoltaic cell", IUPAC 7th International Conference on Novel Materials and Synthesis (NMS-VII), Shanghai (2011).
 2. H. Nishide, "Radical polymers for an organic-based rechargeable battery and

photovoltaic cell”, European Polymer Congress (EPF2011), Granada (2011).

〔図書〕(計7件)

1. H. Nishide, K. Oyaizu, “Organic Batteries”, Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, ed by R. A. Meyers, Springer, New York (2012). ISBN 978-0-387-89469-0.
2. K. Oyaizu, H. Nishide, “Polyradicals in Batteries”, Encyclopedia of Radicals in Chemistry, Biology and Materials, ed by C. Chatgililoglu, A. Studer, Wiley, Chichester (2012). ISBN: 978-0-470-97125-3.
3. 小柳津研一, 西出宏之, “有機ラジカル電池”『最先端電池と材料』, 最先端材料システムワンポイントシリーズ, 高分子学会編, 共立出版 (2012), 第7章, in press.
4. K. Oyaizu, H. Nishide, “Mesoscale Radical Polymers: Bottom-up Fabrication of Electrodes in Organic Polymer Batteries”, *Advanced Nanomaterials*, ed by K. Geckeler, H. Nishide, Wiley-VCH, Weinheim (2010), pp. 319-332. ISBN: 978-3-527-31794-3.
5. T. Suga, H. Nishide, “Rechargeable Batteries Using Robust But Redox-Active Organic Radicals”, ed by Robin G. Hicks, “Stable Radicals: Fundamental and Applied Aspects of Odd-electron Compounds”, Wiley, Chichester (2010), pp507-519. ISBN: 978-0470770832.
6. 小柳津研一, 西出宏之, “有機ラジカル電池の展望”『高性能蓄電池』, エヌ・ティー・エス (2009), pp. 361-370. ISBN: 978-4-86043-263-8.
7. 小柳津研一, 西出宏之, “フレキシブルラジカルポリマー電池”『次世代二次電池材料の開発』, シーエムシー出版 (2009), pp. 114-123. ISBN: 978-4-7813-0179-2.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計4件: 主たる出願のみ記載)

名称: Film for an Electrochemical Device, Electrode for an Electrochemical Device, and Photoelectrochemical Cell

発明者: H. Nishide, K. Oyaizu, W.-S. Choi, A. Hatemata

権利者: 早稲田大学

種類: 特許

番号: WO2009113585

出願年月日: 2009年3月11日

国内外の別: 国外

名称: キノンポリマー電極、電荷貯蔵材料、及び電池

発明者: 西出宏之、小柳津研一、崔源成

権利者: 早稲田大学

種類: 特許

番号: 特許公開 2009-217992

出願年月日: 2008年3月7日

国内外の別: 国内

〔その他〕

①Web 掲載

1. RSC *Chem. Technol.*にて「薄型・フレキシブルな新しい電池」の紹介,
http://www.rsc.org/Publishing/ChemTech/Volume/2007/04/flexible_battery_power.asp, 転載記事として例えば
<http://www.sciencedaily.com/releases/2007/03/070323141052.htm>, <http://www.gizmag.com/go/7018/>.
2. *Nature Asia Mater.*にて「全有機ラジカル電池」の紹介,
http://www3.interscience.wiley.com/journal/10008336/home/2089_aia.html.
3. *Nature*にて米物理学会の講演内容の紹介 (http://blogs.nature.com/news/blog/2009/03/_the_batteries_of_tomorrow_tod.html). またドイツ放送により報道 (<http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/937359/>).

②新聞掲載

1. インタビュー記事: 毎日新聞(2011.3.28, 2.17), 朝日小学生新聞(2011.1.14)ほか.
2. 読売新聞(2011.2.10)「柔らか電池で電源革命」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西出 宏之 (NISHIDE HIROYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 90120930

(2) 研究分担者

小柳津 研一 (OYAIZU KENICHI)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号: 90277822

平20年度より連携研究者へ移動

須賀 健雄 (SUGA TAKEO)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号: 10409659

平19年度より分担者から除外 (海外機関へ転出)