

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15506

研究課題名（和文）一重項分裂により生じた多重励起子におけるスピン変換メカニズムの解明

研究課題名（英文）Study for the spin conversion mechanism in the multiexciton generated by the singlet fission

研究代表者

長嶋 宏樹 (Nagashima, Hiroki)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60814027

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：一重項分裂(Singlet Fission, SF)は一つの一重項励起子から2個の三重項励起子を生成するユニークな反応である。本研究では、一重項分裂機構の理解と効率的な一重項分裂材料の創出に不可欠な、三重項励起子対におけるスピン変換機構の解明を目指し、時間分解電子スピン共鳴計測を行い、一重項分裂を引き起こす分子の立体配置とその構造変化が、スピン変換と密接に関わっていることを明らかにした。本研究は一重項分裂における構造の柔軟性の重要性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽電池は、現代のエネルギー問題を解決しうる切り札として知られる。太陽電池の効率にはショックリークワイサーリミットとして知られる、理論上の限界が存在するために、その性能向上や実用面には大きな制限がかかっていた。シングレットフィッションはそのような一つの光子から二つの三重項を生み出す、太陽電池の限界を超えられる反応である。本研究では一重項分裂で生じた三重項のダイナミクスを観測し、構造と関連づけ、分子の柔軟性が逆反応を防ぐスピン変換を引き起こすことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Singlet fission is a unique reaction which produces two triplet excitons from one singlet exciton. In this study, we measured time-resolved electron spin resonance to understand the spin conversion mechanism in the correlated triplet-triplet pair which is important to develop efficient singlet fission materials in future. The time-resolved electron spin resonance spectra of the singlet-fission-born quintet state revealed that geometric structures of the pair of singlet fission materials are related with the spin conversion. The study revealed that the structural flexibility of the singlet fission materials are important for spin conversion.

研究分野：物理化学

キーワード：電子スピン共鳴 一重項分裂 三重項 五重項 スピン化学 光化学

1. 研究開始当初の背景

一重項分裂(Singlet Fission, SF)¹は一つの一重項励起子から2個の三重項励起子を生成するユニークな反応である。光により励起した S_1 状態の分子が、近接した基底状態の分子と相互作用することで、二つの三重項状態を生成する。

逆反応である三重項-三重項消滅(Triplet-Triplet Annihilation, TTA)は2つの三重項励起子から高いエネルギーの一重項励起子1つを作り出す反応である。三重項-三重項消滅による低エネルギーの光子から高エネルギー状態を生成する反応はアップコンバージョンと呼ばれる。一重項分裂と三重項-三重項消滅は光デバイス効率を飛躍的に向上させる潜在性を秘めた多重量子現象である。一重項分裂で形成された三重項状態からさらに電荷分離を引き起こせば、一光子から一つの電荷分離しか引き起こせない太陽電池の理論限界(Shockley-Queisser limit)を超えた太陽電池を作り出せることが理論的に示されて注目されている²。三重項-三重項消滅は発光デバイスや生体の奥深くまで侵入できる赤外線を利用した生体計測へ応用されるなど、さらなる発展が期待されている。

一重項分裂や三重項-三重項消滅はスピン許容遷移である¹。一重項状態にある励起子ペア $^1(TT)$ を形成し、三重項-三重項消滅は一重項状態の TT から三重項状態を形成する。2つの三重項種が出会ったときに、三重項のペアが作るスピン状態は $3 * 3$ で9つの状態があるが、そのうちの一つのみが一重項である。残りの状態は3つの三重項状態、そして5つの五重項状態である。すなわち、三重項-三重項消滅により励起一重項(S_1)状態を形成できる確率は $1/(1+3+5) \sim 11\%$ しかない。そこでスピン変換により $^3(TT)$ や $^5(TT)$ から一重項状態へと変換すれば、三重項-三重項消滅の効率は大幅に向上する³。一重項分裂の場合は一重項分裂直後に生成した一重項状態 $^1(TT)$ から、逆反応が抑制される $^5(TT)$ へと変換することが重要である。実際に一重項分裂で $^5(TT)$ が生成することが時間分解EPR法により発見され、2つのグループによりNature Physics誌に同時に発表された⁴。それに続いて、 $^5(TT)$ 生成が他の一重項分裂材料においても報告された^{5,6}。

一重項分裂の過程において、どのようにスピン変換されているのかは全くわかっていなかった。申請者は一重項分裂におけるスピン変換機構としてhot multiexciton機構を提唱した⁷。この機構では、一重項分裂直後に生成した三重項励起子ペア $^1(TT)$ が高い運動性をもち(hot multiexciton)、運動を介して始状態 $^1(TT)$ が $^5(TT)$ と混ざり合い $^5(TT)$ を形成する。その後、安定な $^5(TT)$ 状態(cold multiexciton)に移る。Cold $^5(TT)$ の運動性は低いため、その後の $^3T+^3T$ への解離は非常に遅い。分子間一重項分裂におけるhot multiexcitonの運動は、結晶性が高く分子間の相互作用が強い場所(hot spot)での三重項エネルギー移動で説明できる。実際にナノ粒子、薄膜、結晶などでの一重項分裂はエネルギー移動によるhot multiexciton機構でよく理解できる⁸。

一方で、三重項エネルギー移動が起こりえない分子内一重項分裂における五重項状態形成も報告されている^{5,9}。テトラセンを2つ連結した分子においては、テトラセン部位に2つの三重項状態が形成され $^5(TT)$ 状態になる。一分子内で反応が完結するため、三重項のエネルギー移動では説明できない。本研究の核心となる問いはどのようにスピン変換が起こるのかである。この問いに答えるために「五重項を作り出すhot multiexciton状態とは何か、安定なcold $^5(TT)$ はどのような構造なのか？」すなわち、一重項分裂反応における構造を含めたダイナミクスを解明する必要がある。

本研究では、一重項分裂機構の理解と効率的な一重項分裂&三重項-三重項消滅材料の創出に不可欠な、スピン変換機構の解明を目指す。そのために時間分解電子スピン共鳴(Time-resolved electron spin resonance, 時間分解ESR)法に基づく構造解析と量子化学計算とを組み合わせ、多重励起子の生成に関わる中間状態の構造解析に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究は時間分解ESR法によって $^1(TT)$ から $^5(TT)$ へのスピン変換がどう行われているのかを解明することを目的とする。これまでは観測や解析が困難であった、一重項分裂直後から始まる多重励起子の運動や構造を時間分解ESR法により明らかにするための方法論を構築し、一重項分裂の反応機構に迫る点に高い創造性がある。また、スピン変換を積極的に利用した一重項分裂や三重項-三重項消滅材料(太陽電池・発光材料)に加えて、有機磁性、量子コンピューティング、スピントロニクス材料など他分野への影響も見込まれ¹⁰、発展・波及性が高い。

3. 研究の方法

時間分解電子スピン共鳴計測を行った。計測のため、温度の安定したクライオスタットシステムと光励起のための光学系を立ち上げた。試料を凝集の起こらない溶液に溶かしたのち凍結させ、77 K-110 K程度の極低温で、Nd: YAGレーザー(波長532 nm, 10 Hz, fwhm = 5 ns)により

励起して五重項状態および三重項状態を形成し、ESR 信号の観測を試みた。その後観測された信号に対してスペクトルシミュレーションを行い、得られたパラメーターをもとに議論を行った。

4. 研究成果

まず、5,12-bis((triisopropylsilyl)-ethynyl)tetracene(TIPS-テトラセン, TIPS-Tc, 図 1)同士を、アダマンタンをリンカーとして連結した二量体(Tc-Ad-Tc, 図 1)における一重項分裂反応を調べた。この試料においては、照射により一重項分裂反応が起こり、比較的長寿命($t = 175 \mu\text{s}$)のマルチエキシトンが生じることが過渡吸収計測などによって明らかになっている。このことは時間分解 ESR スペクトルにより確認され、複雑な線形のスペクトルが得られた。量子化学計算によると、アダマンタンを中心としたテトラセン色素の配置の回転はほとんど大きなエネルギー差がなく、複数の立体構造が存在している可能性を示唆する結果を得た。

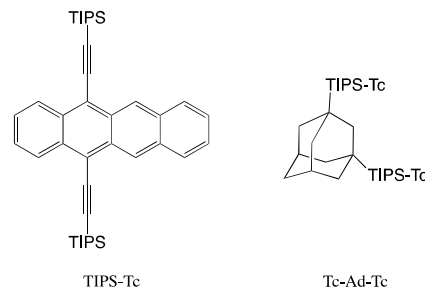


図 1. TIPS-テトラセンと、時間分解 ESR 計測に用いた Tc-Ad-Tc の構造式

スペクトルシミュレーションとして、申請者が以前に一重項分裂材料における時間分解 ESR の解析法として提案した理論を用いた計算を用いたところ、全く実験結果の再現ができなかった。そこで、テトラセンの平面の法線がなす角度が異なる二つの立体構造を仮定し、また、五重項状態のサブレベル Q_m ($m = -2, -1, 0, 1, 2$) の密度分布 W は以下の式で計算することで再現することに成功した。

$$W_{Q_m} = \frac{2}{\hbar^2} \left| \langle Q_m | H_{TTzfs} | S \rangle \right|^2 \frac{\tau_c}{1 + \omega^2 \tau_c^2}$$

ここではプランク定数、 H_{TTzfs} はゼロ磁場分裂を表すハミルトニアンであり磁場と分子の角度に依存する、 τ_c は回転相関時間、 ω は五重項と一重項状態のエネルギー差を表している。この式はスピン格子緩和速度定数と同じものであり、一重項状態と五重項状態の間で一種の緩和が起こることで五重項状態を形成することを仮定している。これは時間分解 ESR の信号の立ち上がりが過渡吸収信号の立ち上がりの時定数(100 ns 以下)や ESR の装置の時定数(75 ns)よりもはるかに遅い(0.9 μs)ことから裏付けられていた。このスペクトルシミュレーションの結果、分子内シングレットフィッシュンによって得られた時間分解 ESR スペクトルは、五重項状態として帰属された。この式に基づき、緩和の相関時間を見積もると 100 ps ほど見積もられた。これは一重項状態と五重項状態のエネルギー差を決定している交換相互作用 J の揺らぎに由来するものと考えられる。交換相互作用 J の揺らぎは、一重項分裂材料の分子の振動や回転、あるいは溶媒分子の回転などに由来すると考えられる。以上の結果は、The Journal of Physical Chemistry C 誌に発表された。

一重項分裂材料の時間分解 ESR 信号の溶媒依存性も調べた。時間分解 ESR 信号は低温においてはメチルテトラヒドロフランやトルエンといった限られたガラス溶媒においてしか観測に成功しておらず、一部の溶媒では凝集が起こる。同様に室温でもガラス固体を形成する *o*-terphenyl, polystyrene などでは時間分解 ESR を示さなかったが、流動パラフィンを用いると時間分解 ESR 信号を示した。同様に時間分解 ESR の温度依存性も観測された。この結果は、一重項分裂後のスピン変換ダイナミクスが溶媒の影響を強く受けていることを示唆している。この結果は本研究で提案したメカニズムをサポートする。

さらに、TIPS テトラセン(図 1)を異なるリンカーで接続したもの(図 2)についてもそれぞれ時間分解 ESR スペクトルを計測した。これについてもアダマンタンで接続されたものと同様の理論を用いたシミュレーションにより再現された。この成果も上記で提唱した理論をサポートした。時間分解 ESR のスペクトルの形状は、特に TIPS-テトラセンのテトラセングループの面と面の間角度と強い相関があり、時間分解 ESR により一重項分裂を引き起こす構造が議論された。さらに、フェニルで結合したテトラセンにおいては弱く結合した三重項+三重項状態のサブレベルにも影響を与えることがわかった。三重項同士の交換相互作用は、テトラセンの立体配置と、それに由来するリンカーにおける軌道の重なりが決定していると考えられる。極低温においても五重項状態と三重項状態の形成が観測されたことから、上記の分子のコンフォメーションが変化して分子内の decoupling が起こっている

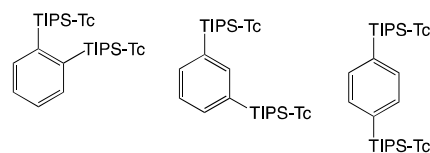


図 2. フェニルをリンカーとしたテトラセン二量体

と考えられる。¹¹

以上の成果は、一重項分裂材料において起こる反応のダイナミクスや中間状態の構造を実験的に議論したものであり、構造的柔軟性の重要性を示す結果であった。これは将来のより効率的な一重項分裂・三重項-三重項消滅材料の設計による太陽エネルギー変換システムの構築や、スピンを用いた量子ビット計算処理などに役立つ新たな知見を与えるものである。

<引用文献>

- (1) Smith, M. B.; Michl, J. Singlet fission. *Chem Rev* **2010**, *110* (11), 6891-6936. DOI: 10.1021/cr1002613.
- (2) Hanna, M. C.; Nozik, A. J. Solar conversion efficiency of photovoltaic and photoelectrolysis cells with carrier multiplication absorbers. *J Appl Phys* **2006**, *100* (7), 074510. DOI: Artn 074510, DOI:10.1063/1.2356795.
- (3) Cheng, Y. Y.; Fückel, B.; Khoury, T.; Clady, R. G. C. R.; Tayebjee, M. J. Y.; Ekins-Daukes, N. J.; Crossley, M. J.; Schmidt, T. W. Kinetic Analysis of Photochemical Upconversion by Triplet-Triplet Annihilation: Beyond Any Spin Statistical Limit. *J Phys Chem Lett* **2010**, *1* (12), 1795-1799. DOI: 10.1021/jz100566u.
- (4) Tayebjee, M. J. Y.; Sanders, S. N.; Kumarasamy, E.; Campos, L. M.; Sfeir, M. Y.; McCamey, D. R. Quintet multiexciton dynamics in singlet fission. *Nat Phys* **2017**, *13* (2), 182-188. DOI: 10.1038/Nphys3909. Weiss, L. R.; Bayliss, S. L.; Krafft, F.; Thorley, K. J.; Anthony, J. E.; Bittl, R.; Friend, R. H.; Rao, A.; Greenham, N. C.; Behrends, J. Strongly exchange-coupled triplet pairs in an organic semiconductor. *Nat Phys* **2017**, *13* (2), 176-181. DOI: 10.1038/Nphys3908.
- (5) Basel, B. S.; Zirzmeier, J.; Hetzer, C.; Phelan, B. T.; Krzyaniak, M. D.; Reddy, S. R.; Coto, P. B.; Horwitz, N. E.; Young, R. M.; White, F. J.; et al. Unified model for singlet fission within a non-conjugated covalent pentacene dimer. *Nat Commun* **2017**, *8*, 15171. DOI: 10.1038/ncomms15171.
- (6) Kumarasamy, E.; Sanders, S. N.; Tayebjee, M. J. Y.; Asadpoordarvish, A.; Hele, T. J. H.; Fuemmeler, E. G.; Pun, A. B.; Yablon, L. M.; Low, J. Z.; Paley, D. W.; et al. Tuning Singlet Fission in pi-Bridge-pi Chromophores. *J Am Chem Soc* **2017**, *139* (36), 12488-12494. DOI: 10.1021/jacs.7b05204.
- (7) Nagashima, H.; Kawaoka, S.; Akimoto, S.; Tachikawa, T.; Matsui, Y.; Ikeda, H.; Kobori, Y. Singlet-Fission-Born Quintet State: Sublevel Selections and Trapping by Multiexciton Thermodynamics. *J Phys Chem Lett* **2018**, *9* (19), 5855-5861. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.8b02396.
- (8) Saegusa, T.; Sakai, H.; Nagashima, H.; Kobori, Y.; Tkachenko, N. V.; Hasobe, T. Controlled Orientations of Neighboring Tetracene Units by Mixed Self-Assembled Monolayers on Gold Nanoclusters for High-Yield and Long-Lived Triplet Excited States through Singlet Fission. *Journal of American Chemical Society* **2019**, *141* (37), 14720-14727. DOI: 10.1021/jacs.9b06567.
- (9) Sakai, H.; Inaya, R.; Nagashima, H.; Nakamura, S.; Kobori, Y.; Tkachenko, N. V.; Hasobe, T. Multiexciton Dynamics Depending on Intramolecular Orientations in Pentacene Dimers: Recombination and Dissociation of Correlated Triplet Pairs. *J Phys Chem Lett* **2018**, *9* (12), 3354-3360. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.8b01184.
- (10) Wasielewski, M. R. Dynamic duos. *Nat Phys* **2016**, *13* (2), 114-115. DOI: 10.1038/nphys3943.
- (11) Nakamura, S.; Sakai, H.; Nagashima, H.; Fuki, M.; Onishi, K.; Khan, R.; Kobori, Y.; Tkachenko, N. V.; Hasobe, T. Synergetic Role of Conformational Flexibility and Electronic Coupling for Quantitative Intramolecular Singlet Fission. *J Phys Chem C* **2021**, *125* (33), 18287-18296. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c04734.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Bae Youn Jue, Zhao Xingang, Kryzaniak Matthew D., Nagashima Hiroki, Strzalka Joseph, Zhang Qingteng, Wasielewski Michael R.	4. 巻 124
2. 論文標題 Spin Dynamics of Quintet and Triplet States Resulting from Singlet Fission in Oriented Terrylenediimide and Quatterlylenediimide Films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 9822 ~ 9833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c03189	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 Mino Hiroyuki, Nagashima Hiroki	4. 巻 124
2. 論文標題 Orientation of Ligand Field for Dangling Manganese in Photosynthetic Oxygen-Evolving Complex of Photosystem II	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 128 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b10817	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 Zhang Zhujun, Nagashima Hiroki, Tachikawa Takashi	4. 巻 59
2. 論文標題 Ultra Narrow Depletion Layers in a Hematite Mesocrystal Based Photoanode for Boosting Multihole Water Oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 9047 ~ 9054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202001919	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 Matsui Yasunori, Kawaoka Shuhei, Nagashima Hiroki, Nakagawa Tatsuo, Okamura Naoki, Ogaki Takuya, Ohta Eisuke, Akimoto Seiji, Sato-Tomita Ayana, Yagi Shigeyuki, Kobori Yasuhiro, Ikeda Hiroshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Exergonic Intramolecular Singlet Fission of an Adamantane-Linked Tetracene Dyad via Twin Quintet Multiexcitons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 18813 ~ 18823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b04503	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 Saegusa Toshiyuki, Sakai Hayato, Nagashima Hiroki, Kobori Yasuhiro, Tkachenko Nikolai V., Hasobe Taku	4. 巻 141
2. 論文標題 Controlled Orientations of Neighboring Tetracene Units by Mixed Self-Assembled Monolayers on Gold Nanoclusters for High-Yield and Long-Lived Triplet Excited States through Singlet Fission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 14720 ~ 14727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b06567	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 Zhang Zhujun, Karimata Izuru, Nagashima Hiroki, Muto Shunsuke, Ohara Koji, Sugimoto Kunihisa, Tachikawa Takashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Interfacial oxygen vacancies yielding long-lived holes in hematite mesocrystal-based photoanodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12581-z	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 Mino Hiroyuki, Nagashima Hiroki	4. 巻 124
2. 論文標題 Orientation of Ligand Field for Dangling Manganese in Photosynthetic Oxygen-Evolving Complex of Photosystem II	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 128 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b10817	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 Zhang Zhujun, Nagashima Hiroki, Tachikawa Takashi	4. 巻 132
2. 論文標題 Ultra Narrow Depletion Layers in a Hematite Mesocrystal Based Photoanode for Boosting Multihole Water Oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie	6. 最初と最後の頁 9132 ~ 9139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ange.202001919	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8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shuhei Arai, Hiroki Nagashima, Lewis M Antill, and Kiminori Maeda
2. 発表標題 SCRIP measurement of AQDS-BSA bound system
3. 学会等名 Kanto Area Spin Chemistry Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増澤健太, 立野明宏, 長嶋宏樹, 菅原道彦, 前田公憲
2. 発表標題 AWGを用いたラジカル対の反応異 方性制御
3. 学会等名 電子スピンスイェンス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎恭佑, 長嶋宏樹, 三野広幸, 立川貴士, 小堀康博
2. 発表標題 植物PSIIの電荷再結合に対する活性化パラメータの再評価
3. 学会等名 電子スピンスイェンス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Nagashima
2. 発表標題 Practical modern spin dynamics simulation using MATLAB
3. 学会等名 Kanto Area Spin Chemistry meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Nagashima, Lewis M. Antill and Kiminori Maeda
2. 発表標題 Light-induced DEER measurement on the AQDS-binding site in the Bovine Serum Albumin.
3. 学会等名 生物物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Nagashima, Yasunori Matsui, Shuhei Kawaoka, Seiji Akimoto, Takashi Tachikawa, Hiroshi Ikeda, Yasuhiro Kobori,
2. 発表標題 The quintet state generation process via inter- and intra-molecular singlet fission
3. 学会等名 The Rocky Mountain Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Nagashima and Hiroyuki Mino
2. 発表標題 Structural analysis of the water oxidation center using electron spin resonance and membrane-oriented photosystem II
3. 学会等名 QST Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Nagashima Yasunori Matsui, Shuhei Kawaoka, Seiji Akimoto, Takashi Tachikawa, Hiroshi Ikeda and Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 偏光励起による五重項状態の効率的形成に関する研究
3. 学会等名 電子スピンスイェンス学会年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

太陽光、水、赤錆から水素ガスを高効率に製造 光触媒開発に新たなブレイクスルー
https://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2020_05_01_01.html
赤錆を用いて水と太陽光から水素を製造 太陽光水素製造システムの実用化に新たな一歩
https://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2019_10_23_01.html

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

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