

令和 3 年 4 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03046

研究課題名(和文) 分子科学的熱化学電池

研究課題名(英文) Molecular-Technology based thermocell

研究代表者

山田 鉄兵 (Yamada, Teppei)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：10404071

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)：熱化学電池は、酸化還元平衡の熱応答性を利用して、温度差から電力を生み出すシステムである。本申請で我々は、多様な分子科学的熱応答性を利用した新規熱化学電池を実証した。第一に酸化還元活性な化合物のホスト-ゲスト化学を利用した熱化学電池「超分子熱化学電池」を創成した。多様なホストゲスト反応を元に総説を作製するに至った。第二にイオン性固体中のイオン伝導度の差を利用した熱化学電池を実証した。第三にLCST相転移を用いた熱化学電池の研究を推進した。その他にもプロトン共役電子移動反応やミセルとの相互作用などを利用した熱化学電池について研究を推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究扱った熱化学電池は、申請時には非常にマイナーなデバイスであったが、我々の研究や、中国・韓国・オーストラリアの研究の進展もあって今では盛り上がりを見せている。実用化に向けた本格的な研究開発も始まっており、時宜をとらえた提案を支援頂き、本分野に日本の存在感を示すことが出来た。熱化学電池の研究の中でも我々のアプローチは超分子化学を用いるという点で独創的であり、注目を集めている。また熱化学電池の視点から検討することで、電荷の違いを認識するホスト材料、分子間相互作用の相転移といったコンセプトに至っており、超分子化学の展開という観点からも興味深いと考えている。

研究成果の概要(英文)：Thermo-electrochemical cell, or thermocell is an electrochemical system that generates electric power from temperature differences by utilizing the thermal responsiveness of various redox equilibria. With the support of this grant, we demonstrate novel thermocells that utilizes the thermal responsiveness of various molecular sciences. First, we created a field of "supramolecular thermocell", which based on the host-guest chemistry of redox-active compounds. A variety of host-guest systems were designed and demonstrated, and summarized into a review. Second, we demonstrated a thermocell based on the difference of ionic conductivity in ionic solids. Third, we studied thermocells based on the LCST phase transition. Other thermocells based on proton-coupled electron transfer reactions or interaction of micelles were also investigated.

研究分野：無機化学、電気化学、超分子化学

キーワード：熱化学電池 ホスト-ゲスト化学 シクロデキストリン プロトン共役電子移動 熱電変換

### 1. 研究開始当初の背景

エネルギーの有効利用のため、排熱を電気に変換する熱電変換が注目を集めている。化石燃料のエネルギーのうち 70%は排熱として捨てられている他、工場や乗用車などでも大量の排熱があるが、排熱は質の低いエネルギーで、利用が困難である。電気化学反応を利用した熱化学電池 (図 1) は高い熱起電力のため小型・簡素化が可能であることから近年注目を集めている。熱化学電池は図 1 に示すように、酸化体 ( $I_3^-$ ) と還元体 ( $I^-$ ) とを含んだ溶液と、電極で構成される。電極間に温度差を与えると、低温側ではエンタルピー的に有利な  $I_3^-$  へ会合される駆動力が働く一方、高温側ではエントロピー的に有利な  $I^-$  へと還元される方が有利になる。そのため 図 1 で示すようなイオンと電子の動きが起こり、温度差に由来する熱起電力が生じる。熱化学電池の歴史は古く、1890 年代に Nernst ら、1970 年代に池田司ら、2000 年代に MacFarlane らが報告している。他にも様々な酸化還元活性種を用いた熱化学電池が報告されているが、起電力は 1.9 mV/K 付近で頭打ちになっていた。

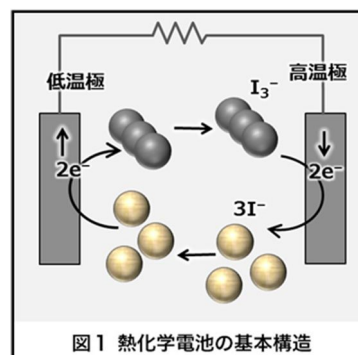


図 1 熱化学電池の基本構造

### 2. 研究の目的

我々はここにホスト - ゲスト化学を導入することで、世界最高の熱起電力を達成した (Yamada et al., J. Am. Chem. Soc., 2016)。スキームを図 2 に示す。添加した  $\alpha$ -シクロデキストリン ( $\alpha$ -CD) が、低温側で  $I_3^-$  を取り込み、高温側で放出させることで、 $I_3^-$  の濃度差を作った。この濃度差により Nernst の式に従って電位差が生じることで、起電力の向上を達成した。本申請ではこの熱化学電池に多様な分子化学的手法を導入することを目的とした。

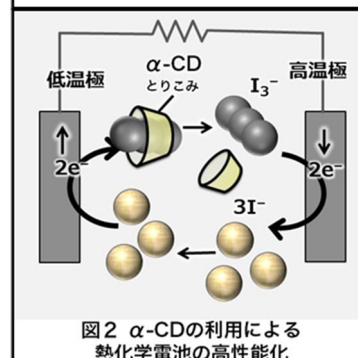


図 2  $\alpha$ -CD の利用による熱化学電池の高性能化

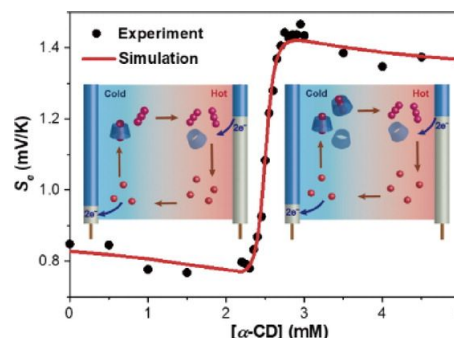
### 3. 研究の方法

本申請ではこれら分子論的な手法による熱起電力への応用は、ほとんど手つかずであり、新たな学術基盤を構築できると考えた。

### 4. 研究成果

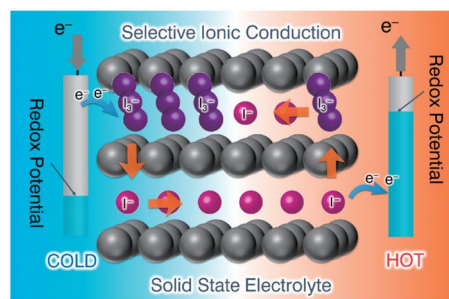
(1) 多様なホストゲスト相互作用を利用した「超分子熱化学」の学理の構築

多様な酸化還元種及びホストを用いた超分子熱化学電池を構築するとともにその理論的背景を明らかにした。 $\alpha$ -シクロデキストリンの代わりに  $\beta$ -シクロデキストリンを用いてそれらのホスト-ゲスト相互作用の強さとゼーベック係数の変化について理論式を構築し、その理論式とのフィッティングから会合エントロピー及びエンタルピーを導くことができることを明らかにした (Bull. Chem. Soc. Jpn. 2019, BCSJ 論文賞受賞)。 $\alpha$ -シクロデキストリンにアルキル基を修飾することで、会合エンタルピーを向上させたうえに  $I_3^-$  を取り込むことで、ゼーベック係数を向上させることが明らかになった (Chem. Sci., 2019)。またデンプンや PVP などのポリマーが  $I_3^-$  イオンを包摂することでゼーベック係数が向上することも明らかにした (Sustain. Energy Fuels, 2018)。酸化還元活性なゲスト化合物としてフェロセンカルボン酸を用いることができ、わずかながらゼーベック係数が向上することや、酸化体・還元体への選択性が不十分なために理論式からずれることもわかった (Polymer J. 2018)。



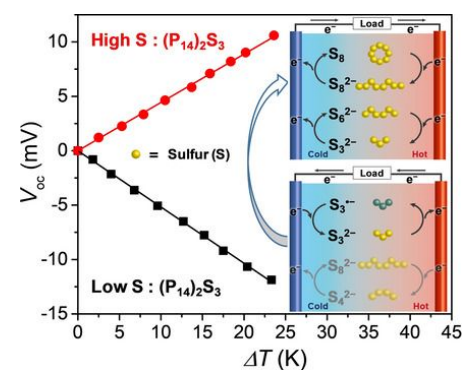
(2) イオン性固体中のイオン伝導度の差を利用した固体熱化学電池

ヨウ化コリンはイオン性固体であり、高温で柔粘性結晶相を取ることが知られている。ここに I<sup>3-</sup>イオンをドーピングすることで熱化学電池を作製した。すると溶液とは逆の n 型のゼーベック係数が得られた。一方柔粘性結晶相では熱起電力が得られなかった。これはイオン性固体中で I<sup>-</sup>と I<sup>3-</sup>とのイオン伝導度に差があるためと考えられる。イオン性固体中のイオン伝導度の差を利用した熱化学電池という新しいコンセプトを提案した。(Chem. Lett. 2018)



### (3) ポリスルフィドイオンを酸化還元対として用いた熱化学電池

酸化還元活性種としてリチウム硫黄電池に用いられるポリスルフィドイオンを用いた熱化学電池を構築した。ポリスルフィドは多様な酸化還元種が混在した状態となるため、それらの同定や酸化還元反応についての理解が不十分であった。熱化学電池にこのポリスルフィドを用い、多様な酸化還元状態において熱起電力を測定した。酸化還元状態の変化によってゼーベック係数は負から正へと変わることが見られた。またこれにより、酸化還元反応のエントロピーが見積もられ、いくつかの化学種の同定が確認された (ChemSusChem 2019)。この結果は、熱化学電池がレドックス反応のエントロピーを評価するための強力な手法であることを示唆している。



### (4) 多様な熱化学電池の探索

他にもプロトン共役電子移動反応、ポリマー・ホスト化合物の LCST 転移、高温液体などの多様な酸化還元反応を利用することで新たな分子科学を導入した熱化学電池の研究を展開した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sekine Yurina, Nankawa Takuya, Yamada Teppei, Matsumura Daiju, Nemoto Yoshihiro, Takeguchi Masaki, Sugita Tsuyoshi, Shimoyama Iwao, Kozai Naofumi, Morooka Satoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Carbonated nanohydroxyapatite from bone waste and its potential as a super adsorbent for removal of toxic ions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Chemical Engineering	6. 最初と最後の頁 105114 ~ 105114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jece.2021.105114	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 Nagai Yuki, Ishiba Keita, Yamamoto Ryosuke, Yamada Teppei, Morikawa Masa aki, Kimizuka Nobuo	4. 巻 60
2. 論文標題 Light Triggered, Non Centrosymmetric Self Assembly of Aqueous Arylazopyrazoles at the Air/Water Interface and Switching of Second Harmonic Generation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 6333 ~ 6338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202013650	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 Kobayashi Takashi, Yamada Teppei, Tadokoro Makoto, Kimizuka Nobuo	4. 巻 27
2. 論文標題 A Novel ThermoCell System Using Proton Solvation Entropy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry ? A European Journal	6. 最初と最後の頁 4287 ~ 4290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202004562	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 Sekine Yurina, Nankawa Takuya, Yunoki Shunji, Sugita Tsuyoshi, Nakagawa Hiroshi, Yamada Teppei	4. 巻 2
2. 論文標題 Eco-friendly Carboxymethyl Cellulose Nanofiber Hydrogels Prepared via Freeze Cross-Linking and Their Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Polymer Materials	6. 最初と最後の頁 5482 ~ 5491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsapm.0c00831	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 Guo Benshuai, Hoshino Yu, Gao Fan, Hayashi Keisuke, Miura Yoshiko, Kimizuka Nobuo, Yamada Teppei	4. 巻 142
2. 論文標題 Thermocells Driven by Phase Transition of Hydrogel Nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 17318 ~ 17322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.0c08600	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 Iwami Risa, Yamada Teppei, Kimizuka Nobuo	4. 巻 49
2. 論文標題 Increased Seebeck Coefficient of [Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>4-</sup> /3 <sup>-</sup> Thermocell Based on the Selective Electrostatic Interactions with Cationic Micelles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1197 ~ 1200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200410	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 Inoue Hiroataka, Liang Yimin, Yamada Teppei, Kimizuka Nobuo	4. 巻 56
2. 論文標題 Enhanced Seebeck coefficients of thermocells by heat-induced deposition of I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /hydrophobized -cyclodextrin complexes on electrodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 7013 ~ 7016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC02356F	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 Kitao Takashi, Nagasaka Yujiro, Karasawa Masanobu, Eguchi Toshiki, Kimizuka Nobuo, Ishii Kazuyuki, Yamada Teppei, Uemura Takashi	4. 巻 141
2. 論文標題 Transcription of Chirality from Metal-Organic Framework to Polythiophene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 19565 ~ 19569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b10880	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 Yamada Teppei, Shiraishi Kanji, Kimizuka Nobuo	4. 巻 48
2. 論文標題 Synthesis of a Redox-active Metal-Organic Framework MIL-116(Fe) and Its Lithium Ion Battery Cathode Properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1379 ~ 1382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.190613	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 Liang Yimin, Hui Joseph K. H., Yamada Teppei, Kimizuka Nobuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Electrochemical Thermoelectric Conversion with Polysulfide as Redox Species	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemSusChem	6. 最初と最後の頁 4014 ~ 4020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cssc.201901566	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 Ma Zihan, Lander Laura, Nishimura Shin-ichi, Fukakusa Chihoko, Yamada Teppei, Okubo Masashi, Yamada Atsuo	4. 巻 338
2. 論文標題 Synthesis, crystal structure and possible proton conduction of Fe(H <sub>2</sub> P <sub>0</sub> 4) <sub>2</sub> F	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Solid State Ionics	6. 最初と最後の頁 134 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ssi.2019.05.019	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 Liang Yimin, Zhou Hongyao, Yamada Teppei, Kimizuka Nobuo	4. 巻 92
2. 論文標題 A Theoretical Basis for the Enhancement of Seebeck Coefficients in Supramolecular Thermocells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1142 ~ 1147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20190062	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 Yamada Teppei, Eguchi Toshiki, Wakiyama Taro, Narushima Tetsuya, Okamoto Hiromi, Kimizuka Nobuo	4. 巻 25
2. 論文標題 Synthesis of Chiral Labtb and Visualization of Its Enantiomeric Excess by Induced Circular Dichroism Imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry ? A European Journal	6. 最初と最後の頁 6698 ~ 6702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201900329	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 Yamada Teppei, Zou Xiaopeng, Liang Yimin, Kimizuka Nobuo	4. 巻 50
2. 論文標題 A supramolecular thermocell consisting of ferrocenecarboxylate and $\alpha$ -cyclodextrin that has a negative Seebeck coefficient	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 771 ~ 774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-018-0061-7	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 Hisamitsu Shota, Yanai Nobuhiro, Kouno Hironori, Magome Eisuke, Matsuki Masaya, Yamada Teppei, Monguzzi Angelo, Kimizuka Nobuo	4. 巻 20
2. 論文標題 Two-dimensional structural ordering in a chromophoric ionic liquid for triplet energy migration-based photon upconversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 3233 ~ 3240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7cp06266d	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 Matsuki Masaya, Yamada Teppei, Dekura Shun, Kitagawa Hiroshi, Kimizuka Nobuo	4. 巻 47
2. 論文標題 Enhancement of Ionic Conductivity in Organic Ionic Plastic Crystals by Introducing Racemic Ammonium Ions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 497 ~ 499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.171181	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 Yang Yufeng, Ishida Masatoshi, Yasutake Yuhsuke, Fukatsu Susumu, Fukakusa Chihoko, Morikawa Masa-aki, Yamada Teppei, Kimizuka Nobuo, Furuta Hiroyuki	4. 巻 58
2. 論文標題 Hierarchical Hybrid Metal/Organic Frameworks: Tuning the Visible/Near-Infrared Optical Properties by a Combination of Porphyrin and Its Isomer Units	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 4647 ~ 4656
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.9b00251	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 Liang Yimin, Yamada Teppei, Zhou Hongyao, Kimizuka Nobuo	4. 巻 10
2. 論文標題 Hexakis(2,3,6-tri-O-methyl)- $\beta$ -cyclodextrin/15 <sup>+</sup> complex in aqueous 1 <sup>+</sup> /13 <sup>+</sup> thermocells and enhancement in the Seebeck coefficient	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 773 ~ 780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SC03821J	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 Nagatomi Hisanori, Yanai Nobuhiro, Yamada Teppei, Shiraishi Kanji, Kimizuka Nobuo	4. 巻 24
2. 論文標題 Synthesis and Electric Properties of a Two-Dimensional Metal-Organic Framework Based on Phthalocyanine	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chem. Asian J.	6. 最初と最後の頁 1806 ~ 1810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201705530	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 Shimono Tomoya, Matsuki Masaya, Yamada Teppei, Morikawa Masaaki, Yasuda Nobuhiro, Fujigaya Tsuyohiko, Kimizuka Nobuo	4. 巻 47
2. 論文標題 Selective Ionic Conduction in Choline Iodide/Triiodide Solid Electrolyte and Its Application to Thermocells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 261 ~ 264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.171069	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 Matsuki Masaya, Yamada Teppei, Yasuda Nobuhiro, Dekura Shun, Kitagawa Hiroshi, Kimizuka Nobuo	4. 巻 140
2. 論文標題 Nonpolar-to-Polar Phase Transition of a Chiral Ionic Plastic Crystal and Switch of the Rotation Symmetry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 291 ~ 297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.7b10249	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 H. Zhou, T. Yamada, N. Kimizuka	4. 巻 2
2. 論文標題 Thermo-electrochemical Cells Empowered by Selective Inclusion of Redox-active Ions by Polysaccharides	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sustainable Energy and Fuels	6. 最初と最後の頁 472-478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7SE00470B	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 Miyake Ryosuke, Kuwata Chika, Ueno Manami, Yamada Teppei	4. 巻 24
2. 論文標題 Humidity-Responsive ON/OFF Switching of Gas Inclusion by Using Cooperative Opening/Closing of Heterogeneous Crystalline Cavities in a Peptide Nill Macrocyclic	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Chem. Eur. J	6. 最初と最後の頁 793 ~ 797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201704809	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 Okumura Keisuke, Matsuki Masaya, Yamada Teppei, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 2
2. 論文標題 Sensitizer-Free Photon Upconversion in Single-Component Brominated Aromatic Crystals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Chemistryselect	6. 最初と最後の頁 7597 ~ 7601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/slct.201701769	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 Teppey Yamada, Kanji Shiraishi, Hiroshi Kitagawa, Nobuo Kimizuka	4. 巻 53
2. 論文標題 Applicability of MIL-101(Fe) as cathode of lithium ion battery	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 8215-8218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7CC01712J	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 Yang Yufeng, Sakashita Ryuichi, Yamasumi Kazuhisa, Ishida Masatoshi, Yamada Teppey, Furuta Hiroyuki	4. 巻 46
2. 論文標題 Zirconium-based Metal?Organic Frameworks with N-Confused Porphyrins: Synthesis, Structures, and Optical Properties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 1230 ~ 1232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.170461	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 Ono Kenta, Ishizaki Manabu, Kanaizuka Katsuhiko, Togashi Takanari, Yamada Teppey, Kitagawa Hiroshi, Kurihara Masato	4. 巻 129
2. 論文標題 Grain-Boundary-Free Super-Proton Conduction of a Solution-Processed Prussian-Blue Nanoparticle Film	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Angew. Chem., Int. Ed.	6. 最初と最後の頁 5623 ~ 5627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ange.201701759	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山田研究室  
<https://inorg.chem.s.u-tokyo.ac.jp/>

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