

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05634

研究課題名（和文）ナノ元素置換科学：ナノ結晶相の構造変換と新奇機能開拓

研究課題名（英文）Nanoscale Element Replacement Science: Structural Transformation of Nanocrystalline Phases and Development of Novel Functions

研究代表者

寺西 利治 (Teranishi, Toshiharu)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：50262598

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 155,100,000円

研究成果の概要（和文）：dブロック金属ナノ粒子へpブロック元素を導入したナノ粒子群のガルバニック置換反応による合金ナノ粒子群の合および、可視プラズモン特性の発現に成功した。また、元素間相溶性を利用することで、前例のないZ3型構造合金ナノ粒子が合成できた。一方、イオン結晶ナノ粒子のカチオン交換反応において、Cu_{2-x}Seナノ粒子とNi(II)のカチオン交換により、アニオン副格子が保持された準安定相スピネル型Ni₃Se₄ナノ粒子とCu_{2-x}Se/Ni₃Se₄ヘテロ構造ナノ粒子の合成に成功した。さらに、六方晶系Cu_{1.8}Sナノ粒子のカチオン交換反応において、生成ナノ粒子の結晶構造決定因子を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

11族元素を含まない合金ナノ粒子において、可視プラズモン特性を示すことを実証し、その原理を解明した。また、特定の元素間相溶性を考慮することで、前例のない合金構造を安定化することを実証し、未踏合金結晶構造群の合成指針を示すことができた。一方、イオン結晶ナノ粒子のカチオン交換反応において、熱力学的準安定相を安定化することができることを実証したのみならず、カチオン交換後のナノ粒子の結晶構造決定因子を明らかにした。これらの材料は、新たな可視プラズモン材料や各種触媒（水分解触媒、酸素還元触媒など）として高いポテンシャルを有していることを示した。

研究成果の概要（英文）：A variety of unprecedented alloy nanoparticles have been successfully synthesized by galvanic replacement reactions of nanoparticles in which p-block elements have been introduced into d-block metal nanoparticles, and in manifesting novel plasmonic properties. By utilizing the interelement miscibility, unprecedented Z3-type nanoparticles have been synthesized for the first time. On the other hand, considering the characteristic that the anion sublattice is maintained in the cation exchange reaction of ionic nanoparticles, thermodynamically metastable spinel-type Ni₃Se₄ nanoparticles and Cu_{2-x}Se/Ni₃Se₄ heterostructure nanoparticles have been successfully obtained by cation exchange between Cu_{2-x}Se nanoparticles and Ni(II). Furthermore, in the cation exchange reaction of hexagonal Cu_{1.8}S nanoparticles, we have clarified the factors that determine the crystal structure of the nanoparticles after cation exchange.

研究分野：無機合成化学

キーワード：ナノ材料 元素置換 金属化合物 合金 イオン結晶 電子構造 触媒

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノスケール無機物質(無機ナノ粒子)は、太陽電池やプラズモン材料、不均一固体触媒など幅広い分野で実用化されており、科学技術や産業に必要不可欠であることは言を待たない。特に、持続可能な水素社会の到来を目前に控え、光機能材料や固体触媒としてのナノ粒子の果たすべき役割はますます重要になっている。しかし、その大部分を希少貴金属(第5、6周期dブロック金属)に依存していることが最大の課題であり、ナノ粒子の様々な構造制御により希少貴金属の物性変調や使用量低減が図られてきた。例えば、Ptナノ粒子は燃料電池の水素酸化および酸素還元触媒として高い触媒能と耐久性を示すが、その希少性(総採掘量:~200 m³)ゆえに、粒径制御による比表面積増大、形状制御による露出結晶面制御(Chen et al., *Science* **2014**, *343*, 1339.)、相構造制御(Zhang et al., *JACS* **2014**, *136*, 15921.)等によりPt使用量の低減が行われてきた。申請者らも、9割超の低Pt化と酸素還元触媒能の大幅増強を実現するPt基ナノ粒子のみならず、電子・プラズモン・磁性材料として様々な無機ナノ粒子を開発してきた(触媒:*JACS* **2012**, *134*, 816; *Chem. Sci.* **2014**, *5*, 2007; *Chem. Sci.* **2018**, *9*, 261、近赤外プラズモン材料:*JACS* **2009**, *131*, 17736; *Nature Commun.* **2018**, *9*, 2314、ナノコンジット磁石:*ACS Nano* **2012**, *6*, 2798; *Nanoscale Adv.*, **2019**, *1*, 2598.)。確かに貴金属ナノ粒子は優れた機能材料であり、dバンドセンターがフェルミ準位より数eV低いという貴金属の本質的なバンド構造が高い触媒能や貴金属物性を決定しているため、貴金属の縛りから脱却することは大変困難のように思われる。

2. 研究の目的

本研究では、理論・実験両面から貴金属の性能を凌駕する一連の新奇ナノ粒子群を創製する。すなわち、(1)低周期dブロック金属ナノ粒子へのpブロック元素の導入や低酸化還元電位金属との元素置換(ガルバニック置換)による合金化により電子構造を大きく変調し、貴金属ナノ粒子がもつ物性・触媒特性を圧倒的に凌駕する新金属相ナノ粒子群を創製する。さらに、(2)低周期dブロック金属からなるヘビードープ半導体ナノ粒子の元素置換(イオン交換)により、結晶構造・電子構造を部分的に変調し、貴金属ナノ粒子では困難な全近赤外光エネルギー変換ヘテロ構造ナノ粒子群を創製する。これらの研究を通じて、「基底電子構造変調」という新しい概念に根ざした『ナノ元素置換科学』という新しい物質科学を開拓する。

3. 研究の方法

本研究では、低周期dブロック金属ナノ粒子へのpブロック元素の導入や低酸化還元電位金属との元素置換により電子構造を大きく変調した新奇金属相ナノ粒子群、ならびに、イオン結晶ヘビードープ半導体ナノ粒子の元素置換による新奇ヘテロ構造ナノ粒子群を創製し、従来の貴金属ナノ粒子のもつ機能を圧倒的に凌駕する機能や全く新しい機能を開拓する。現時点での研究開発状況、ならびに、本研究の達成目標を以下に示す。

(1) 金属化合物ナノ粒子群および未踏合金ナノ粒子群の合成と新奇機能の開拓

本研究では、低周期dブロック金属(Fe、Co、Ni、Cu、Ru、Rh、Pd、Ag)と13~15族pブロック元素(B、C、N、P)からなる一連の金属化合物ナノ粒子の合成手法を5~20 nmのスケールで確立し、各金属化合物相の電子構造(バンド構造とフェルミ準位)を理論・実験両面から明らかにする。次に、最近発見した新奇ガルバニック置換反応を拡張し、Al($\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al} : E^0 = -1.68 \text{ V vs. NHE}$)より貴な標準酸化還元電位を有する一連の金属イオンと金属化合物ナノ粒子とのガルバニック置換反応(pブロック元素と異種金属イオン間の電子授受を伴う元素置換反応)により、未踏合金ナノ粒子群を創製する。さらに、電子構造変調に基づく電気伝導率・プラズモン特性などの基礎物性を明らかにした上で、希少貴金属を凌駕する酸素還元能等の高性能触媒への展開を図る。

(2) イオン結晶ヘテロ構造ナノ粒子群の合成と新奇機能の開拓

これまでに、様々な形状(球状、多面体、ディスク状)のイオン結晶ナノ粒子のイオン交換反応に成功しており、露出結晶面に依存した常温常圧結晶構造制御(*Science* **2016**, *351*, 1306.)、ヘテロ構造ナノ粒子の欠陥経由近赤外プラズモン誘起電荷移動(*Nature Commun.* **2018**, *9*, 2314; *Nature Commun.* **2019**, *10*, 406.)、コアシェルナノ粒子における多重励起子の量子干渉(*Nature Commun.* **2018**, *9*, 3179.)など、半導体光化学分野で重要な発見を行ってきた。これらの知見を踏まえ、近赤外領域に局在表面プラズモン共鳴(LSPR)を示すヘビードープ半導体(p-Cu_{2-x}S、n-ITOなど)ナノ粒子の部分イオン交換により新奇ヘテロ構造(p-Cu_{2-x}S/CdS、n-ITO/SnO₂など)ナノ粒子を合成し、全近赤外プラズモン励起による高効率長寿命電荷分離を実現することにより、近赤外光エネルギー変換ナノ粒子群の創製を目指す。具体的には、近赤外プラズモン励起による水還元(水素生成)および水酸化(酸素生成)反応への展開、フォトンアップコンバージョン、透明太陽電池への展開を図る。

4. 研究成果

(1) 金属化合物ナノ粒子群および未踏合金ナノ粒子群の合成と新奇機能の開拓

貴金属の合金化の新手法として、単分散な Pd-P 合金ナノ粒子を出発物質とした Pd 基合金ナノ粒子の合成手法を利用した。これまでに、B2-PdIn ナノ粒子では、局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) に起因する吸収ピークが可視領域に確認されており、吸収ピークの極大波長は B2-PdIn ナノ粒子の粒径の増大とともに長波長側にシフトすることが観測されている。B2-PdIn ナノ粒子の LSPR 発現が 11 族元素に類似したバンド構造に由来であることに着目し、B2-ZnPd を同様の手法で合成した。その結果、B2-ZnPd ナノ粒子も可視領域に LSPR 吸収を示すことが分かった。すなわち、11 族元素に類似したバンド構造をもつ B2-Pd 基合金が、新たに可視領域に LSPR 吸収を示すナノ粒子群であることを実証した。

一方、新しい物性や高機能材料を発見する方法の一つとして、未踏構造の安定化が考えられる。ところが、特定の組成比をもつ二元金属間化合物においてさえ幾何学的に膨大な数の構造を取り得る一方で、実際には安定に合成できる構造はごくわずかしか存在しない。そのため、新しい結晶構造の安定化は極めて挑戦的な課題として考えられてきた。偶発的にはあるが、FePd 合金ナノ粒子を合成する過程において、[001]方向に Pd3 原子層と Fe1 原子層が交互に積層した Z3 構造 Fe(Pd,In)₃ 合金ナノ粒子が生成することを発見した。構造解析の結果、In/(Pd+In) < 11 at.% の組成では In が Fe と置換した L1₂-(Fe,In)Pd₃ 相、15 < In/(Pd+In) < 17 at.% の組成では In が Pd と置換した Z3-Fe(Pd,In)₃ 相が形成されることが分かった (図 1 a,b)。元素間相溶性による Z3 型構造の安定化について調べるために、第一原理計算を用いて 10~12 族金属元素 (Zn, Ga, Ge, Cd, In, Sn, Hg, Tl, Pb) を L1₂ 型構造と Z3 型構造に導入した際の形成エネルギーを算出した。その結果、鉄とは固溶できないパラジウムとは固溶可能な元素 (Cd, In, Hg, Tl, Pb) を微量導入したときのみ、Z3 型構造が L1₂ 型構造よりも安定になることが分かった (図 1 c)。そこで、In の代わりに Pb を用いて同様の実験を行ったところ、In と同様に Z3 型 Fe(Pd,Pb)₃ 構造の形成が確認され、特定の元素間相溶性が前例のない Z3 型構造を安定化することが実証された。Z3 型 Fe(Pd,In)₃ 構造の物理的・化学的特性の指標として電子状態密度 (DOS) を第一原理計算から算出した結果、Z3 型構造の DOS は In の有無でほとんど変わらず、擬似的に Z3-FePd₃ 相の特性が発現することが示唆された。Z3-Fe(Pd,In)₃ ナノ粒子の発見・合成をさらに発展させ、微量金属元素置換により三元素間相溶性の差異を誘起した新たな Pt-Ir-Fe 合金ナノ粒子の構造制御を行った。その結果、L1₂ と L1₀ の中間のような新規合金相が生成することを見出した。

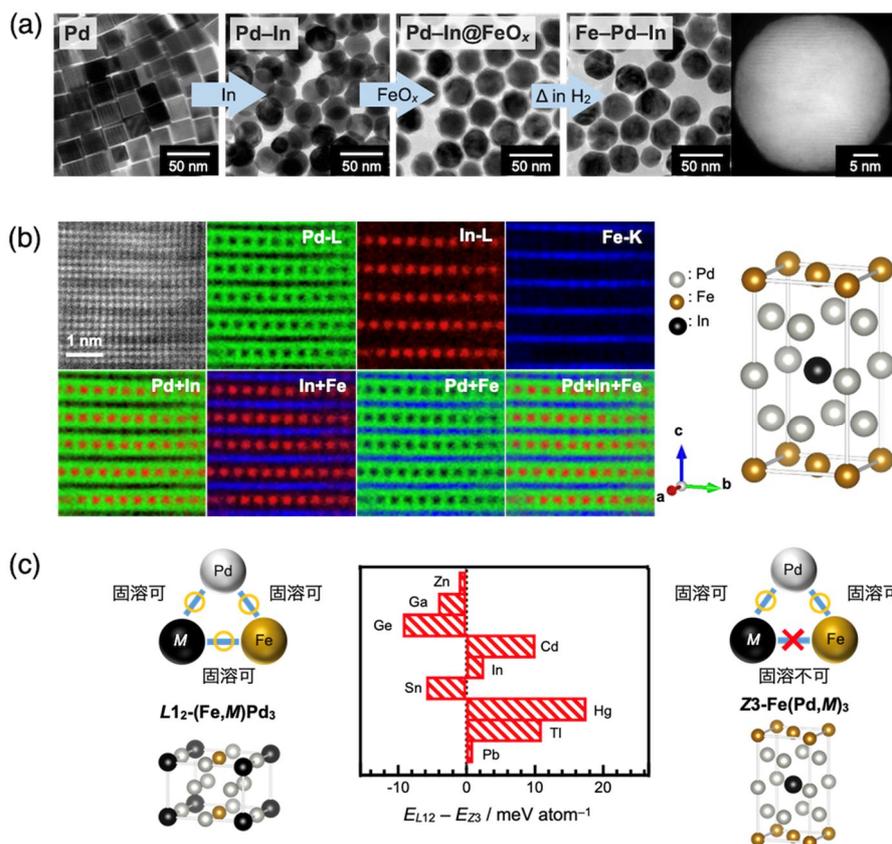


図 1 . (a) Z3 型 Fe(Pd,In)₃ 相に至るまでの逐次合成過程で形成されたナノ粒子の TEM 像、および Z3 構造の高角度環状暗視野走査 TEM (HAADF-STEM) 像、(b) エネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) による原子分解能での元素組成マップ図、および Z3 型 Fe(Pd,In)₃ 相の模式図、(c) 第一原理計算により算出された各導入元素の L1₂、Z3 型構造間の形成エネルギー差、および導入元素の元素間相溶性

(2) イオン結晶ヘテロ構造ナノ粒子群の合成と新奇機能の開拓

イオン性ナノ結晶の副格子のアニオン配列を変えることは非常に難しいため、一般にカチオン交換反応中に(ブラベー格子は変化することはあるが)結晶系は保持される。例えば、六方最密充填(*hcp*)アニオン副格子をもつナノ粒子のカチオン交換では、主に*hcp*構造のナノ結晶が生じる。アニオン副格子が保持されるという特徴を利用すると、カチオン交換反応により熱力学的準安定相を安定化することができる。生成物の結晶相が熱力学的に最安定でない場合でも、頑丈なアニオン骨格によって速度論的に安定化される。この概念を用いると、熱力学で支配される従来の直接合成法では得られない準安定相を意図的に合成することが可能となる。新奇イオン結晶ナノ粒子の例として、面心立方(*fcc*)セレン副格子をもつセレン銅鋳型 Cu_{2-x}Se ナノ粒子と Ni(II) のカチオン交換により、準安定相スピネル型 Ni_3Se_4 ナノ粒子および部分イオン交換物としての $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}/\text{Ni}_3\text{Se}_4$ ヘテロ構造ナノ粒子の合成に成功した。通常のセレン化ニッケルには、単純な *fcc* セレン副格子をもつ熱力学安定相は存在しないため、アニオン副格子の保持が熱力学的準安定相の選択的形成に大きく寄与していると考えられる。また、 $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}/\text{Ni}_3\text{Se}_4$ ヘテロ構造ナノ粒子が非常に高い水酸化電極触媒能(過電圧 $230\text{ mV}@10\text{ mA cm}^{-2}$)を有することが分かった。

一方、 Cu_{2-x}S および Cu_{2-x}Se ナノ粒子を用いた一連のカチオン交換反応において、「反応前後で結晶系が維持される」という従来の常識を覆す新たな発見があった。具体的には、六方晶系 $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ナノ粒子の Cu(I) イオンを Co(II) で交換したとき、薄いプレート形状の $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ からは同じ六方晶系の CoS が生成する一方で、細長いロッド形状の $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ は立方晶系の Co_9S_8 に結晶構造が変化することを発見した。結晶系変化が起こる条件を詳しく調べるために、幅と高さが異なる 16 種類の六角柱型 $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ナノ粒子を合成し、それらのカチオン交換反応を行った(図 2 a)。ナノ粒子の形と生成物の結晶構造を整理すると、 $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ナノ粒子の「高さ」が生成物の結晶構造を決める唯一の因子であり、高さが約 10 nm を境にして、それ以下のときは六方晶系(CoS)を保持し、それ以上のときは立方晶系(Co_9S_8)に結晶構造が変化するという関係性を見出した(図 2 b,c)。形によって結晶系が変わる原因として、ナノ粒子表面の安定性に注目し第一原理計算を行った結果、六角柱型六方晶系 CoS の側面は底面よりも表面エネルギーが高く、側面を大きく露出することが熱力学的に極めて不安定なことが分かった。このことから、六角柱の高さが大きくなり側面の面積が増え、なるべく露出を避けようとして、熱力学的に安定な立方晶系 Co_9S_8 へ構造変化する力がはたらくことが示唆された。六方晶 $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ナノ粒子とのカチオン交換反応において、 Co(II) 以外の 3 種類のカチオンでは、 Mn(II) や Zn(II) ではカチオン交換前後の体積変化が小さいため結晶系が維持され、 Ni(II) では熱力学的に安定な立方晶に構造変態することが分かった。

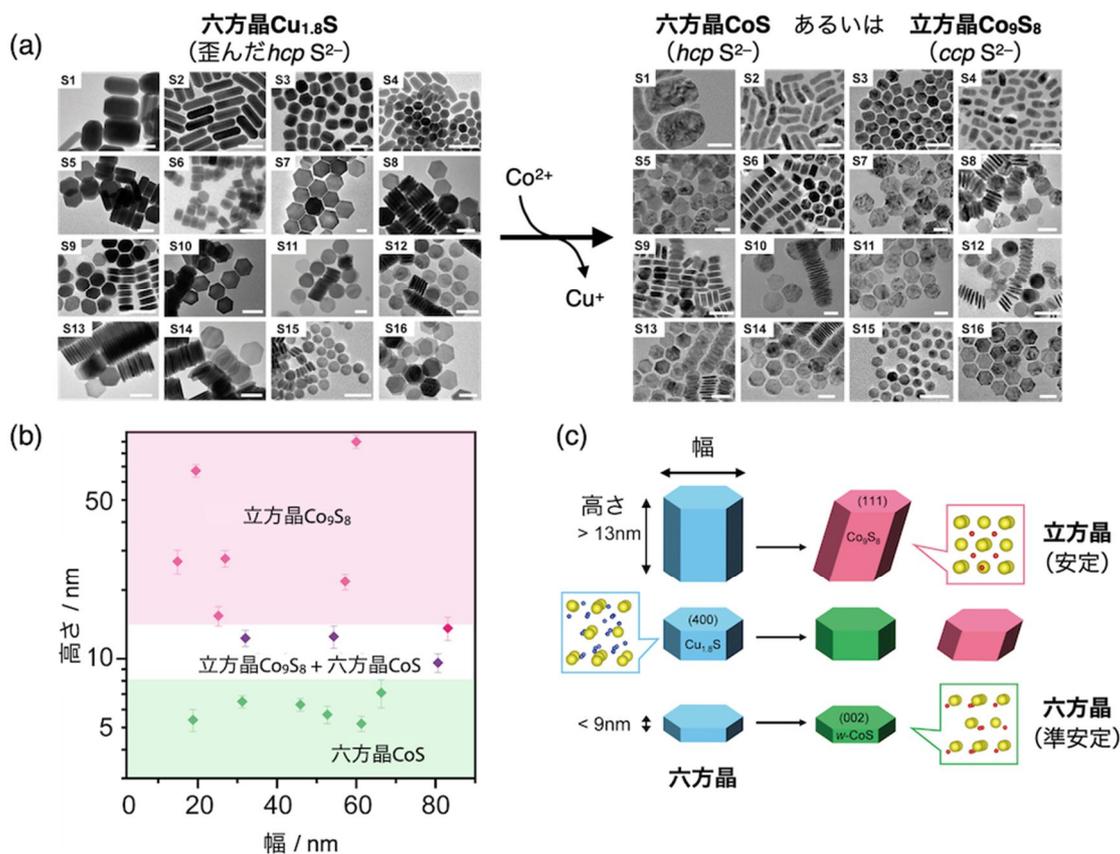


図 2 . (a) 16 種類の $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ナノ結晶の陽イオン交換反応前後の TEM 像 (スケールバー : 50 nm) (b) $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ナノ結晶の高さ・幅と生成物の結晶構造の関係、(c) $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ナノ結晶の高さに依存した結晶構造変化の模式図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Endo Kenichi, Saruyama Masaki, Teranishi Toshiharu	4. 巻 14
2. 論文標題 Location-selective immobilisation of single-atom catalysts on the surface or within the interior of ionic nanocrystals using coordination chemistry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-40003-8	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 Chiga Yuki, Takahata Ryo, Suzuki Wataru, Mizuhata Yoshiyuki, Tokitoh Norihiro, Teranishi Toshiharu	4. 巻 62
2. 論文標題 Isomer-Selective Conversion of Au Clusters by Au(I) Thiolate Insertion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 10049 ~ 10053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.3c01442	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 Saruyama Masaki, Takahata Ryo, Sato Ryota, Matsumoto Kenshi, Zhu Ling kai, Nakanishi Yohei, Shibata Motoki, Nakatani Tomotaka, Fujinami So, Miyazaki Tsukasa, Takenaka Miki hito, Teranishi Toshiharu	4. 巻 15
2. 論文標題 Pseudomorphic amorphization of three-dimensional superlattices through morphological transformation of nanocrystal building blocks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 2425 ~ 2432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3SC05085H	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 Chiga Yuki, Suzuki Wataru, Takahata Ryo, Kobiyama Etsuki, Tahara Hirokazu, Kanemitsu Yoshihiko, Shibuta Masahiro, Sakamoto Masanori, Teranishi Toshiharu	4. 巻 128
2. 論文標題 Tuning the Direction of Photoinduced Electron Transfer in Porphyrin-Protected Gold Clusters	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 3824 ~ 3831
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.3c06402	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 Suzuki Wataru, Takahata Ryo, Chiga Yuki, Kikkawa Soichi, Yamazoe Seiji, Mizuhata Yoshiyuki, Tokitoh Norihiro, Teranishi Toshiharu	4. 巻 144
2. 論文標題 Control over Ligand-Exchange Positions of Thiolate-Protected Gold Nanoclusters Using Steric Repulsion of Protecting Ligands	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 12310 ~ 12320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.2c03670	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 Matsumoto Kenshi, Sato Ryota, Teranishi Toshiharu	4. 巻 5
2. 論文標題 Stabilization of unprecedented crystal phases of metal nanomaterials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Trends in Chemistry	6. 最初と最後の頁 201 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trechm.2022.12.011	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 Saruyama Masaki, Pelicano Christian Mark, Teranishi Toshiharu	4. 巻 13
2. 論文標題 Bridging electrocatalyst and cocatalyst studies for solar hydrogen production via water splitting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 2824 ~ 2840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1SC06015E	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 Matsumoto Kenshi, Sato Ryota, Tatetsu Yasutomi, Takahata Ryo, Yamazoe Seiji, Yamauchi Miho, Inagaki Yuji, Horibe Yoichi, Kudo Masaki, Toriyama Takaaki, Auchi Mitsunari, Haruta Mitsutaka, Kurata Hiroki, Teranishi Toshiharu	4. 巻 13
2. 論文標題 Inter-element miscibility driven stabilization of ordered pseudo-binary alloy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-28710-0	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 Pelicano Christian Mark, Saruyama Masaki, Takahata Ryo, Sato Ryota, Kitahama Yasutaka, Matsuzaki Hiroyuki, Yamada Taro, Hisatomi Takashi, Domen Kazunari, Teranishi Toshiharu	4. 巻 32
2. 論文標題 Bimetallic Synergy in Ultrafine Cocatalyst Alloy Nanoparticles for Efficient Photocatalytic Water Splitting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2202987
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202202987	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 T. Nishino, M. Saruyama, Z. Li, Y. Nagatsuma, M. Nakabayashi, N. Shibata, T. Yamada, R. Takahata, S. Yamazoe, T. Hisatomi, K. Domen, and T. Teranishi	4. 巻 11
2. 論文標題 Self-activated Rh-Zr mixed Oxide as a Nonhazardous Cocatalyst for Photocatalytic Hydrogen Evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 6862-6867
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0sc01363c	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 M. Saruyama, R. Sato, and T. Teranishi	4. 巻 54
2. 論文標題 Transformations of Ionic Nanocrystals via Full and Partial Ion Exchange Reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Accounts of Chemical Research	6. 最初と最後の頁 765-775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.0c00701	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 Z. Li, M. Saruyama, T. Asaka, Y. Tatetsu, and T. Teranishi	4. 巻 373
2. 論文標題 Determinants of Crystal Structure Transformation in Cation Exchange Reaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 332-337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abh2741	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 S. Kim, H. Mizuno, M. Saruyama, M. Sakamoto, M. Haruta, H. Kurata, T. Yamada, K. Domen, and T. Teranishi	4. 巻 11
2. 論文標題 Phase Segregated Cu ₂ -xSe-Ni ₃ Se ₄ Bimetallic Selenide Nanocrystals Formed through Cation Exchange Reaction for Active Water Oxidation Catalyst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 1523-1530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9sc04371c	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 -

[学会発表] 計25件 (うち招待講演 25件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 New Class of Plasmonic Alloy Nanoparticles
3. 学会等名 243rd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 Transformation of Inorganic Nanocrystals by Element Substitution Reactions
3. 学会等名 Nanomaterials Chemistry Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 Development of visible-to-near infrared plasmonic nanomaterials by element substitution reactions
3. 学会等名 The 31st International Conference on Photochemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters XXI
3. 学会等名 Transformations of Inorganic Nanocrystals by Element Substitution Reactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 元素置換反応が拓くナノ物質科学
3. 学会等名 大阪大学ナノ理工学人材育成コンソーシアム2023ナノ理工学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 元素置換反応が拓くナノ物質科学
3. 学会等名 電気化学会第91回大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 原子層・結晶相配列制御による未踏ナノ物質の創製と機能発現
3. 学会等名 日本化学会第91春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 Transformations of Ionic Nanocrystals via Ion Exchange Reactions
3. 学会等名 241st ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 Synthesis of Near Infrared Plasmonic Nanoparticles for Hydrogen Evolution
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 元素置換による可視 - 近赤外プラズモンナノ材料の開拓
3. 学会等名 2022光化学討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 Synthesis of Near Infrared Plasmonic Nanoparticles for Hydrogen Evolution
3. 学会等名 Conference on Advanced in Catalysis for Energy and Environment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 元素置換反応が拓くナノ物質科学
3. 学会等名 第23回プラズモニク化学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 元素置換反応が拓くナノ物質科学
3. 学会等名 GTR-IRCCS-RCMSセミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 Transformations of Ionic Nanocrystals via Ion Exchange Reactions
3. 学会等名 241st ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 元素置換による新奇プラズモニク合金ナノ粒子の合成
3. 学会等名 第18回プラズモニク化学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 近赤外プラズモニクスの開拓と水素生成触媒への展開
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会中長期企画（人工光合成）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 ナノ元素置換科学：未踏構造ナノ粒子の合成と構造特異機能
3. 学会等名 光・量子デバイス研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiharu Teranishi
2. 発表標題 Nanoscale Element Replacement Science: Structural Transformation of Nanocrystalline Phases and Development of Novel Functions
3. 学会等名 Seminar on Low-dimensional Physics and Devices（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Teranishi
2. 発表標題 Novel Plasmonic Nanomaterials for Near Infrared Light Energy Conversion
3. 学会等名 ChinaNano（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Teranishi
2. 発表標題 Plasmon-induced Hot Carrier Chemistry
3. 学会等名 ASNANO-2 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺西利治
2. 発表標題 新しい可視・近赤外プラズモン合金ナノ粒子
3. 学会等名 第68回高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Teranishi
2. 発表標題 Plasmon-induced Hot Carrier Chemistry
3. 学会等名 KU-UNIST Joint Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Teranishi
2. 発表標題 Plasmon-induced Hot Carrier Chemistry in Inorganic Nanoparticles
3. 学会等名 12th China Japan Joint Symposium on Metal Cluster Compounds (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Teranishi
2. 発表標題 Novel Plasmonic Nanomaterials for Near Infrared Light Energy Conversion
3. 学会等名 Okinawa Colloids 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Teranishi
2. 発表標題 Novel Plasmonic Nanomaterials for Near Infrared Light Energy Conversion
3. 学会等名 8th International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 寺西利治 他	4. 発行年 2024年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 167
3. 書名 CSJ Current Review 49 固体材料開発のフロンティア	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Teranishi Laboratory https://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~teranisi/</p>
--

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
研究協力者	猿山 雅亮 (Saruyama Masaki)		
研究協力者	佐藤 良太 (Sato Ryota)		
研究協力者	松本 憲志 (Matsumoto Kenshi)		
研究協力者	竹熊 晴香 (Takekuma Haruka)		
研究協力者	金光 義彦 (Kanemitsu Yoshihiko)		
研究協力者	飯田 健二 (Iida Kenji)		
研究協力者	浅香 透 (Asaka Toru)		
研究協力者	遠藤 健一 (Endo Kenichi)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	鈴木 航 (Suzuki Wataru)		
研究協力者	高畑 遼 (Takahata Ryo)		

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