

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25246013

研究課題名(和文) 新しい化学種としての複合ナノ粒子の反応性と時間発展構造

研究課題名(英文) Reaction and structural properties of hybrid nanoparticle system

研究代表者

名嘉 節 (Naka, Takashi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：30344089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：深海底の熱水噴出や隕石の衝突などの極限環境を人工的に再現し、これらの連続的な反応やイベントで生じる微結晶の変遷・発展に関する系統的な研究を行った。本研究課題で開発した「海底熱水噴出孔」型反応システムを用いて、熱水中で生じる化学反応の連鎖が、有機分子と無機微結晶を含む単純な系を複雑な高次ミクロ構造や準安定な結晶相へと変化させていくことを明らかにした。高い衝突エネルギーにより局所的に高温高压状態を実現させ、物質の高温高压状態を常温常圧下に準安定状態として取り出すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：We conducted comprehensive investigations of time evolutions and reaction mechanism in hybrid nanoparticles (HNP's) under super- and sub-critical hydrothermal and high energy mechanochemical conditions. Multiple chemical reaction processes evolved the HNP's to novel hierarchical microstructures and/or metastable crystallographic states.

研究分野：無機材料科学

キーワード：複合ナノ結晶 海底熱水噴出孔 メカノナノホットスポット in-situ表面修飾

## 1. 研究開始当初の背景

地底の無機物を含んだ熱水が噴出する海底熱水噴出孔では、数年から数千年のスパンで連続的に無機微結晶が産出され続け、様々な形態の構造物が生成されている。無機物を含む熱水が海水に接触するため、噴出孔では晶出した無機物により煙突のような構造体が形成される。その近辺は高い温度勾配や還元雰囲気の実現していることに加え、海水に含まれる有機物と噴出する無機物が相互に作用しあって複雑な現象が生じていると考えられている。有機物がより複雑(単純)な構造に変化していく過程に、共存する無機物が触媒として作用する可能性もある。その一方、熱水中に融けていた無機物が、結晶核として晶出し無機結晶として成長していく「結晶成長」と呼ばれる過程では、有機物の存在が大きな影響を与えている。

申請者の所属していた東北大阿尻研究室では、高温高压の超臨界水熱場を用い単に酸化ナノ結晶ばかりではなく、その表面に有機分子を化学修飾した有機-無機複合ナノ結晶(以下、複合ナノ結晶)を合成する技術を開発してきた。すでに、張(現中国科学院放射光施設准教授)、大原(分担者)、名嘉(代表者)、阿尻(連携研究者)等は、世界で初めて表出する結晶面を制御したセリアナノ結晶を合成することに成功している。この方法は、テラーメイドナノ粒子合成法と呼ばれ、酸化結晶のサイズと粒形の両方を制御できるという驚くべき技術である。また、このような複合ナノ結晶は表面に結合した有機物の化学的な性質を反映して、水中あるいは油中に溶かすことが可能になる。このように通常の分子のように振舞うことから複合ナノ粒子を新しい化学種として理解しているという努力が始まっているが、まだ物理・化学的な性質では未知のことが多い。

最近我々は、このようにコントロールしたセリアナノ結晶を用いて、結晶(格子構造と形状)・表面修飾(その量と結合状態)・電子状態の間に明確な相関があることを明らかにした。結晶サイズが数ナノメートルになると格子定数が急激に増加するという所謂サイズ効果は、古くから知られていた。このサイズ効果が結晶表面に結合する有機分子により増強され、裸のナノ結晶より大きいサイズで価数転移を示すようになる。有機分子が存在する超臨界水熱場で複合ナノ結晶を合成する方法は in-situ 表面修飾法と呼ばれ、通常では得られにくい不安定な結晶相(価数状態等)を準安定状態として抽出できるプロセスを構築できる。最近の研究では、セリア以外でも in-situ 表面修飾法を用いると金属酸化ナノ結晶の結晶相、価数状態(酸素欠陥量)が制御できることを明らかにしている。一方、有機分子は無機物表面との相互作用(触媒作用など)により集積・重合・解離・分解・結合といった変性を受ける。有機物と無機物が頻りに邂逅し激しく反応する水熱

場では、無機-有機系の触媒反応の影響により、多種多様な分子種・化学種・結晶状態が生じ、時間とともに系全体が変化していくと考えられる。

阿尻等が開発した「流通式」と呼ばれる合成法は、ナノ結晶の大量合成が可能のため工業的に非常に重要な技術である。連続的に金属塩を含む溶液を超臨界水に混合させることにより、速やかに反応・晶出させる技術である。この方法をブラックスモーカーと呼ばれる海底熱水噴出孔の近傍で生じている無機物合成場と比較してみよう。後者では、地盤を伏流する水がマントルに接触して金属塩を溶かしこんだ熱水となる。それが海底噴出孔で低温高压の海水と接触し、無機微結晶の噴出流が生じる。両者は、ともに高温高压水や有機物が関与する動的な無機結晶合成プロセスであるが、いくつか異なる点がある。後者では反応が複数回あるいは連続して起こるため、生じる分子種、結晶状態に多様性が生じ、それが時間とともに変化(熟成)していくことが考えられる。

## 2. 研究の目的

有機分子で表面修飾された複合ナノ結晶は、固有の溶解度、蒸気圧、凝集温度、解離定数を有すると考えられる。穏やかな環境下では新しい化学種として振る舞うことから、体系的に理解しようという研究の方向がある。しかし、超臨界水熱場や多段衝突場(高エネルギー遊星ボールミル)のような苛烈な反応場では、複合ナノ粒子がどのような反応性を持つのかは明らかではない。特に複合ナノ粒子間や複合ナノ粒子と高分子などの有機物との反応性に関する研究は寡聞である。本申請課題では、上述したような準安定状態のナノ結晶を内包した複合ナノ結晶(セリア、ジルコニア、鉄やコバルトの酸化物など)の高温高压水下的安定性と反応性を調べる。生成された無機および有機物を化学量論的な立場から解析し、その反応機構の解明を行う。また、準安定結晶相の工業応用化をめざし常温・常圧下での安定性・経時変化を調べる。連続的に複合ナノ結晶が生成されると同時に、すでに生成された「古い」複合ナノ結晶や各種有機分子種が存在する場を実現する「熱水噴出孔」型の反応炉(図1)を開発する。多種多様な反応場として「熱水噴出孔」型の反応場の時間発展構造を明らかにする。同様に遊星ボールミルの衝突エネルギーを用いた反応場に、金属塩水溶液、有機分子を導入して、多種多様な反応により、複合ナノ結晶の反応性と生成物の特性の時間発展構造を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 金属酸化ナノ結晶を合成し、材料として扱うことができるレベルで安定化させる技術を確立する。既存技術である「流通式」超臨界ナノ結晶合成法および回分式合成法

を用いて、有機表面修飾、結晶形態 (morphology)、サイズ等の制御により、準安定あるいは不安定な結晶相、価数状態、材料特性 (磁気、光学等) を有する複合ナノ結晶を合成した。

(2) 大原らが最近開発した衝突気相反応法は、150G という強力な遊星ボールミルを用いて、局所的な高温・高圧状態 (メカノナノホットスポット) を瞬間的に発生させる新規物理プロセスであり、カーボンナノチューブやカーボンオニオンなどの新規炭素材料ばかりではなく、金属酸化物ナノ結晶の合成にも応用され始めている。このプロセスを用い各合成条件 (処理時間、強度、雰囲気等) 下で得られた金属酸化物ナノ結晶の安定性および反応性を調べた。また、系統的に得られたナノ結晶の結晶構造解析および材料特性の評価を行った。生成される結晶相の時間発展を精査し、静的な超高压下で得られている物質相図 (実験・理論) と比較検討した。

(3) 「海底熱水噴出孔」を模した複合ナノ結晶合成装置を開発した (図1 および図2)。熱水噴出孔を有する晶析・冷却部の容器は、高压冷水下で高温部 (300 ) と低温部 (10 数 ) で大きな温度差がある条件に耐えしかも耐酸・耐アルカリ性に優れた材料で作製する必要がある。SUS304 などのステンレス鋼やより高強度の合金などの金属材料を使い、最適な容器をデザインした。開発した「海底熱水噴出孔」型合成装置を用いて、複数回反応を連続的に行い複合ナノ結晶の高次構造化を観測し、時間発展構造を明らかにすることを主な目的とした。

#### 4. 研究成果

(1) 強力な遊星ボールミルを用いた局所的な高温・高圧状態 (メカノナノホットスポット) を瞬間的に発生させる多段衝突反応場で、イルメナイト (チタンと鉄を含む鉱物) の高温高圧で安定な結晶相を常温・常圧で準安定相として取り出すことに成功した。大規模で高価なアンビルを用いる高压合成装置を用いることなく、簡便で安価ながら比較的少量の生成物を合成できる可能性を有していることから、さらに研究を進展させる必要があると考える。

(2) 「熱水噴出孔型」反応装置を開発し、有機分子で表面修飾したセリアナノ粒子の大量合成に成功した。本装置は複数の金属源 (プリカーサー) を熱水反応場に導入することができ、比較的大きな口径を生かして無機結晶相を基板に積層させる機構を導入することができるなど、従来の流通式反応装置には無い特徴を有する。この装置を用いてシリコン基板上にセリアを成長させることに成功した。セリア微結晶の配向制御が可能であることを見出した。

同反応装置においては長時間の反応実験が可能になったことから、熱水中で樹枝状の複雑な無機微細構造を作製することに成功

した。熱水中に有機分子が存在するか否かでセリアの結晶成長が大きく変調を受け、成長

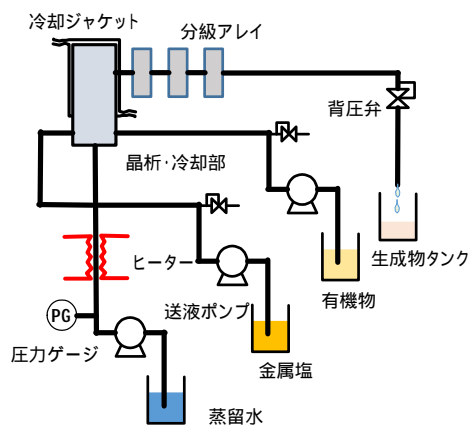


図1 海底熱水噴出孔型反応装置のブロックダイアグラム

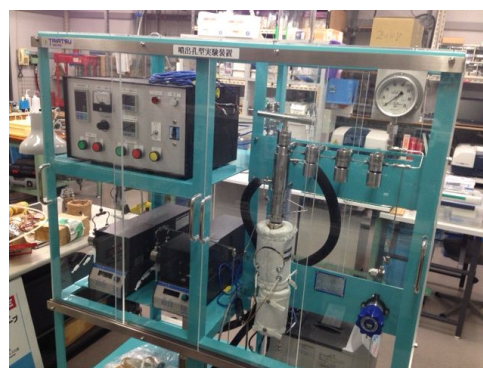


図2 海底熱水噴出孔型反応装置の外観 (下)



図3 樹枝結晶 (セリア) の電子顕微鏡像

形が通常の相互貫入した多面体構造から樹枝 ( dendraite ) 結晶に変化する ( 図3 )。この樹枝結晶は数ミリ大の平板上に稠密に群生する樹林のように成長しており、複合ナノ結晶が高次構造体として自己組織化によって形成された可能性がある。

(3) 表面修飾したナノ結晶を含む原料 ( 硝酸塩とアジピン酸 ) を熱処理することにより、

バルク大の多孔質セリアを合成する方法を発見した。超・亜臨界水熱処理と大気中の熱処理を併用した本プロセスは、簡便で安価な多孔質材料を合成できることから、排ガス処理用触媒、医療部材などへ応用可能と考えられる。

(4)超臨界水熱場で合成されたコバルトブルーナノ結晶の特異な結晶構造と磁気状態(クラスター磁性の発現)が見出されていたが、その起源を解明するために、参照系であるバルク結晶の磁気状態を詳細に調べた。通常用いられる固相反応法では1千を超える高温で合成される。磁性を担うコバルトイオンは“磁気フラストレーション”と呼ばれる競合状態に置かれているため、わずかな構造変化に敏感であることが明らかになった。比較的低温で合成されコバルトブルーナノ結晶の結晶構造は固相反応法では得られない特異なイオン配置をしており、ナノ結晶の表面の効果や金属イオン配置の乱れにより電子状態が変調されたことにより結晶内に磁気クラスターが生じていることが結論される。

(5)金属イオンの価数に対応して結晶相が変化するコバルト酸化物に関して、無機結晶相(価数状態)の制御法を既存のワンショット型合成技術を用いて開発した。コバルト酸化物における価数(結晶相)転移は通常では摂氏900度以上で生じるが、超・亜臨界水熱場でははるか低温の摂氏400度以下で生じることを見出した。また、微量の表面修飾剤(有機物)の添加により結晶相(コバルトの価数)を制御できる技術を確認した。

(6)光触媒や太陽光発電、化粧品、各種半導体デバイスなど、幅広い分野で応用研究が行われているチタニア $TiO_2$ には、いくつかの結晶相が存在することが知られている。作製が容易なルチル型とアナターゼ型とは異なり、ブルッカイト型やブロンズ型の $TiO_2$ 相の物性には未知な部分が多い。ルチル型、アナターゼ型、ブルッカイト型、ブロンズ型の4相を回分式水熱合成法で作分けすることに成功した。また、反応時間の短い流通式で合成を行うことにより、マグネリ相などこれまでの合成法では得られにくい結晶相が得られた。

(7)触媒や紫外線光源としての応用が期待される $ZnAl_2O_4$ ナノ粒子の合成を水熱場中で行い、反応溶液のpHをコントロールすることによりナノ粒子の組成比や粒径を変化させることができることを見出した。その構造的な特徴と触媒性能の相関を明らかにした。

これらの結果は、海底熱水噴出や隕石の衝突などの極限環境下でのイベントで生じる物質の変遷・発展に関する研究につながる可能性を秘めており、更なる研究の深化が期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

(雑誌論文)(計19件)

S. Ishii, T. Nakane, T. Furusawa, T. Naka, “Synthesis of single-phase  $ZnAl_2O_4$  nanoparticles via a wet chemical approach and evaluation of crystal structure characteristics”, *Crystal Research & Technology* **51** (2016) 324 - 332. DOI:10.1002/crat.201500297. 査読有.

M. Taguchi, Y. Ishikawa, S. Kataoka, T. Naka, T. Funazukuri, “ $CeO_2$  nanocatalysts for the chemical recycling of polycarbonate”, *Catalysis Communications*, **84** (2016) 93 - 97. DOI:10.1016/j.catcom.2016.06.009. 査読有.

T. Hashishin, H. Onoda, T. Sawada, D. Fujioka, K. Kojima, T. Naka, “Magnesium Ferrite Sensor for  $H_2S$  Detection”, *Sensors and Materials*, **28** (2016) 1229 - 1236, DOI:10.18494/SAM.2016.1284. 査読有.

M. Nakayama, R. Sasaki, C. Ogino, T. Tanaka, M. Umetsu, S. Ohara, Z. Tan, Y. Nishimura, H. Akasaka, K. Sato, C. Numako, S. Takami, A. Kondo, “Titanium peroxide nanoparticles enhanced cytotoxic effects of X-ray irradiation against pancreatic cancer model through reactive oxygen species generation in vitro and in vivo”, *Radiation Oncology*, **11-19** (2016) 1-11. DOI:10.1186/s13014-016-0666-y. 査読有.

M. Taguchi, A. Matsushita, Y. Sakka, T. Uchikoshi, T. Funazukuri, T. Naka, “Influence of the crystal structure on the physical properties of monoclinic  $ZrO_2$  nanocrystals”, *Nano-Structures & Nano-Objects*, **1**, (2015) 1 - 6. DOI:10.1016/j.nanos.2015.03.001. 査読有.

T. Naka, K. Sato, Y. Matsushita, N. Terada, S. Ishii, T. Nakane, M. Taguchi, M. Nakayama, S. Ohara, S. Takami, A. Matsushita, “Multistage ordering and critical singularities in  $Co_{1-x}Zn_xAl_2O_4$  ( $0 < x < 1$ ): Dilution and pressure effects in a magnetically frustrated system”, *Physical Review B*, **91/224412** (2015) 1-10. DOI:10.1103/PhysRevB.91.224412. 査読有.

Takayuki Nakane, Takashi Naka, Koichi Sato, Minori Taguchi, Minako Nakayama, Tadashi Mitsui, Akiyuki Matsushita and Toyohiro Chikyow, “Spectroscopic and crystallographic anomalies of  $Co_{1-x}Zn_xAl_2O_4$  spinel oxide”, *Dalton Trans*, **44** (2015), 997 - 1008. DOI:10.1039/C4DT01599A. 査読有.

Minori Taguchi, Takayuki Nakane, Akiyuki Matsushita, Yoshio Sakka, Tetsuo Uchikoshi, Toshitaka Funazukuri, Takashi Naka, “One-pot synthesis of monoclinic  $ZrO_2$  nanocrystals under subcritical

hydrothermal conditions”, *J. Supercritical Fluids*, **85** (2014), 57 - 61. DOI:10.1016/j.supflu.2013.11.001. 査読有.  
Hiroki Kaneko, Takanari Togashi, Takashi Naka, Manabu Ishizaki, Katsuhiko Kanaizuka, Masatomi Sakamoto and Masato Kurihara, “Low-temperature Crystal Growth of aluminum-doped zinc oxide nanoparticles in a melted viscous liquid of alkylammonium nitrates for fabrication of their transparent crystal films”, *Cryst Eng Comm*, **16** (2014), 10539 - 10546. DOI:10.1039/C4CE01336K. 査読有.

K. Sato, T. Naka, T. Nakane, D. Rangappa, S. Takami, S. Ohara and T. Adshici, “Inhomogeneous magnetic phase in Co-Al-O spinel nanocrystals”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **350** (2014), 161 - 166.

DOI:10.1016/j.mmm.2013.09.012. 査読有.

Takeshi Hashishin, Zhenquan Tan, Kazuhiro Yamamoto, Nan Qiu, Jungeum Kim, Chiya Numako, Takashi Naka, Jean Christophe Valmalette and Satoshi Ohara, “Quenching ilmenite with a high-temperature and high-pressure phase using super-high-energy ball milling”, *Scientific Reports*, **4** (2014) 4700, 1 - 6. DOI:10.1038/srep04700. 査読有.

[学会発表](計29)

田口実: “超臨界水で合成した CeO<sub>2</sub> ナノ結晶の機能評価” 8th バイオメディカルインターフェース・ワークショップ(2017年3月21 - 23日、平良港ターミナルビル(沖縄県・平良市)).

田口実: “ナノ触媒が叶える廃棄物資源循環型社会” 新技術説明会「ナノ・マイテクノロジー」(2016年9月15日、JST 東京本部別館ホール(埼玉県・川口市)).

Minori Taguchi: “Preparation of surface-modified metal oxide nanoparticles under hydrothermal conditions using subcritical or supercritical water” International Conference on Nanotechnology(ICNANO2016)(2016年4月21 - 23日、Visvesvaraya Technological University, Bangalore (India)).

M. Taguchi, T. Naka, T. Funazukuri: “The chemical recycling of polycarbonate using CeO<sub>2</sub> nanocatalysts” 18<sup>th</sup> Annual Conference YUCOMAT 2016 (2016年9月5 - 10日、Herceg Novi(Montenegro)).

中根茂行: “新機能の創出を目指した遷移金属酸化物の結晶構造制御” 鳩山サイエンスフォーラム(2016年5月26日、東京電機大学(埼玉県・比企郡鳩山町)).

石井聡・中根茂行・内田渉・田中優華・名嘉節: “水熱合成 ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> における前駆体の pH と触媒効果” 応用物理学会 第 77 回秋季

学術講演会(2016年9月13 - 16日、朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)).

Hiroya Abe, Kazuo Kuruma, Takashi Naka・Kazuyoshi Sato, Yoshikazu Suzuki: “Spherically Self-Assembled Magnetite Nanocrystals for Magnetorheological Fluid” International Symposium on Visualization in Joining & Welding (2016年10月17 - 18日、Hotel Hankyu Expo Park, Osaka(Japan)).

T. Hashishin: “Design of Sensing Materials for Gas Detection” 5th International Conference on BioSensors, BioElectronics, BioMedical Devices, BioMEMS/NEMS & Applications 2016 (2016年12月14 - 16日、Griffith University, Queensland(Australia)).

T. Hashishin・K. Jyufuku・K. Matsumoto・M. Nagano, S. Shibagaki, M. Matsuda, H. Kubota: “Hydrogen Detection Using Carbon Nanotubes Microsensor” 第33回「センサー・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(2016年10月24 - 26日、平戸市未来想像館(長崎県・平戸市)).

中根茂行・石井聡・中山美奈子・田口実・知京豊裕・名嘉節: “スピネル型酸化物 CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の Zn 添加による結晶構造変化と分光学的特徴” 第76回応用物理学会秋季学術講演会(2015年9月13 - 16日、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)).

Takashi Naka, Kouichi Sato, Satoshi Ishii, Takayuki Nakane, Noriki Terada, Minori Taguchi, Minako Nakayama, Yoshitaka Matsushita, Akiyuki Matsushita, Seiichi Takami: “Field induced phenomena in magnetically frustrated systems Co<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(M=Mg, Zn) International Conference on Magnetism(ICM2015) (2015年7月5 - 10日、Palau de Congressos Catalunya, Barcelona (Spain)).

M. Taguchi, T. Naka, T. Funazukuri: “Monocarboxylic acid-modified CeO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized under hydrothermal conditions using supercritical water” 17th Annual Conference YUCOMAT 2015 (2015年8月31日 - 9月4日、Herceg Novi (Montenegro)).

橋新剛・譚振権・山本和広・裘南・金延恩・沼子千弥・名嘉節・大原智: “高速遊星ボールミルによる高温高圧物質の凍結” ナノ学会第12回大会(2014年5月22 - 24日、京都大学化学研究所(京都府・京都市)).

Minori Taguchi, Naomi Yamamoto, Daisuke Hojo, Seiichi Takami, Tadafumi Adschiri, Toshitaka Funazukuri, Takashi Naka: “Synthesis of monocarboxylic acids-modified CeO<sub>2</sub> nanoparticles using supercritical hydrothermal method” 4<sup>TH</sup> INTERNATIONAL SOLVOTHERMAL AND HYDROTHERMAL ASSOCIATION CONFERENCE (2014

年 10 月 26 - 29 日、University of Bordeaux, Bordeaux (France)).

T. Naka, A. Nikitin, Y. Pan・M. Taguchi, T. Nakane, K. Sato, A. de Visser, A. Matsushita: "Quantum phase transitions in the Heusler-type Fe-V-Al system" International Conference on Strongly Correlated Electron System (2014 年 7 月 7 - 11 日、University Campus Saint Martin d'Herès, Grenoble(France)).

田口実・山本直美・船造俊孝・名嘉節: "高圧高温水熱場における表面修飾剤を利用した CeO<sub>2</sub> ナノ粒子の結晶性制御" 日本セラミックス協会秋季大会 (2014 年 9 月 9 - 11 日、鹿児島大学 (鹿児島県・鹿児島市)).

Takeshi Hashishin, Zhenquan Tan, Kazuhiro Yamamoto・Nan Qiu・Chiya Numako・Takashi Naka・Satoshi Ohara: "Quenching of High-Temperature and High-Pressure Phase of Ilmenite Formed by a Super High-Energy Planetary Ball-Milling Process" Workshop of Advanced Nanocrystals and Processing towards Low Carbon Society (2014 年 2 月 19 - 20 日、JWRI, Osaka University, Osaka(Japan)).

Takashi Naka, Minoru Taguchi, Takayuki Nakane, Koichi Sato, Akiyuki Matsushita, "Thermoelectric enhancement in ferromagnetic granular Fe-V-Al system" Workshop of Advanced Nanocrystals and Processing towards Low Carbon Society (2014 年 2 月 19 - 20 日、JWRI, Osaka University, Osaka(Japan)).

名嘉節・山本直美・田口実・船造俊孝・阿尻雅文・中根茂行・松下明行: "コバルト酸化物ナノ結晶の超・亜臨界水熱合成 - in-situ 表面修飾と結晶相制御 -" 第 54 回高圧討論会 (2013 年 11 月 14 - 16 日、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県・新潟市)).

〔図書〕(計 1 件)

蟹江 澄志, 山田 保治, 鈴木 昇, 田口実 他 (共著, 308-318) 『ナノ粒子の表面修飾と分析評価技術』(2016 年 1 月 16 日刊、情報機構)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 金属酸化物からなる発砲体、その製造方法、および、その用途

発明者: 名嘉節, 中根茂行, 中山 美奈子, 田口実

権利者: 物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2016-186804

出願年月日: 2016 年 09 月 26 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等: 構築中

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

名嘉節 (NAKA Takashi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

研究者番号: 30344089

### (2) 研究分担者

田口実 (TAGUCHI Minori)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号: 00455859

橋新剛 (HASHISHIN Takeshi)

国立大学法人熊本大学・大学院先端科学研究部 (工)・准教授

研究者番号: 20336184

上床美也 (UWATOKO Yoshiya)

国立大学法人東京大学・物性研究所・教授

研究者番号: 40213524

高見誠一 (TAKAMI Seiichi)

国立大学法人東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号: 40311550

中根茂行 (NAKANE Takayuki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主任研究員

研究者番号: 40354302

富樫貴成 (TOGASHI Takanari)

国立大学法人山形大学・理学部・助教

研究者番号: 80510122

### (3) 連携研究者

大原智 (OHARA Satoshi)

国立大学法人大阪大学・接合科学研究所・特任准教授

研究者番号: 00396532

阿尻雅文 (ADSCHIRI Tadafumi)

国立大学法人東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号: 60182995

### (4) 研究協力者

張静 (ZHANG Jing)

中国科学院・放射厚施設・准教授