

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00239

研究課題名(和文) タンデム変調熱プラズマ高温反応場の時空間精緻制御と高純度ナノ材料の革新的量産技術

研究課題名(英文) Innovative large-scale synthesis technology of pure nanoparticles by spatio-temporally controlled field in tandem-type of induction thermal plasma

研究代表者

田中 康規 (Tanaka, Yasunori)

金沢大学・電子情報通信学系・教授

研究者番号：90303263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：金沢大学にて独自開発した「原料間歇同期投入+変調熱プラズマ法」をさらに発展させ「タンデム型変調熱プラズマ法」を新開発した。これにより超高温変動反応場の安定維持と精緻な時空間制御の両立を実現させた。この手法を用い機能性ナノ材料の大量生成法を試みた。本研究では、熱プラズマへの電力変調度、原料間歇投入位相、冷却ガス間歇導入による超高温・高密度ラジカル場の時空間的制御を行うとともに、それらのナノ粒子生成への寄与を実験的、数値解析的に検討した。その結果、原料蒸発とナノ材料生成過程を明確化でき、高純度金属ドーパド酸化物ナノ粒子を880 g/h、次世代電池負極材用Si系ナノ粒子を300 g/hで生成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は「タンデム型変調熱プラズマ」と、独自開発した「原料・反応ガスの同期間歇投入」を組み合わせ「機能性ナノ材料の大量生成法」を新開発したもので、本研究の独創的特色であるとともに、ナノテク分野に大きなインパクトを与える。これまで熱プラズマナノ粒子生成法は高純度ナノ粒子生成可能の特長を有するが低効率であった。しかし本研究での原料・ガス間歇投入型変調熱プラズマ法は、原料・反応ガスからのラジカル反応場と熱流場とを電磁場によりスマートに同時制御し、均一核生成・不均一凝縮過程を制御する、学術的にも新しいプロセスを提供している。本法は種々のナノ材料量産化に適用でき、社会的波及効果・意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new "tandem-type modulated thermal plasma method" by further developing the "intermittent synchronous feeding of feedstock + modulated thermal plasma method" originally developed at Kanazawa University. As a result, we achieved both stable maintenance of the high temperature modulated reaction field and precise spatio-temporal control. Using this technique, we attempted mass production of functional nanomaterials. In this study, we will spatio-temporally control the ultra-high temperature and high-density radical field by controlling the power modulation degree, the intermittent injection phase of the raw material, and the intermittent introduction of the cooling gas into the thermal plasma. As a result, we were able to clarify the raw material evaporation and nanomaterial formation processes, and were able to produce high-purity metal-doped oxide nanoparticles at 880 g/h and Si-based nanoparticles for next-generation battery anode materials at 300 g/h.

研究分野：熱プラズマ

キーワード：熱プラズマ ナノ粒子生成 大量生成 ナノワイヤ

1. 研究開始当初の背景

近年、ナノ粒子・ナノ材料は物理・化学・生物などの基礎研究や、電気電子・情報通信機器、化成品、医薬・化粧品などの産業応用で、技術ブレークスルー材として期待されている。ナノ粒子とは、直径が 100 nm 以下の超微粒子を指す。粒径が極端に小さく比表面積が著しく大きく表面反応が促進されるほか、バルク材にはない特有の化学的・光学的・電気磁気学的性質が発現する。そのためナノ粒子は化学・物理・生物などの基礎研究や、電気電子・情報通信機器、化成品、医薬・化粧品などの産業応用で、技術ブレークスルー材として期待される。特に Society5.0 実現にむけ、電子部品・環境・エネルギー・バイオ・医療分野におけるナノ粒子・ナノ材料のニーズが確実に高まっており、2020 年には金属ナノ粒子に限ってもその市場は 4000 億円程度との試算もある。ナノ粒子応用の社会普及のための技術課題の一つに、機能性ナノ粒子の大量生成・量産化がある。機能性ナノ材料を「大量に」、「高速に」かつ「高精度に」、「安価に」、「選択的に」「高純度に」生成する技術の確立が求められる。「ナノ粒子量産化技術の確立」は内閣府総合科学技術・イノベーション会議等に必ず列挙される課題であり、次世代社会の創成のため我が国/世界における喫緊の技術課題である。

申請代表者のナノ粒子生成法は誘導熱プラズマ気相反応法に属す。この手法の利点は、(1)不純物のない高純度ナノ粒子生成が可能で医療用ナノ粒子生成に適す、(2)雰囲気ガスを選ばず、純金属・酸化物・窒化物などのナノ粒子生成が可、(3)プラズマの状態を外部電磁場で容易に制御可、(4)温度勾配が 105-106 K/s と非常に大きく準安定相や非平衡組成の機能性ナノ粒子の合成可、(5)2 段 3 段の処理が不要で単段でナノ粒子生成可、などがある。しかし従来の誘導熱プラズマ法(以下、従来法)では、(A)ナノ粒子の粒径制御が難、(B)生産エネルギー効率(kg/kW)が液相法より低く量産化がやや難、との課題があった。逆に(A)(B)を解決すれば液相法では原理的に解決困難な高純度ナノ粒子の大量生成法を開発・確立できる。

申請代表者は上記(A)(B)の解決法として、独自開発した「変調誘導熱プラズマ MITP」にさらに原料を同期間歇的に導入する新法(MITP+TCFF 法)を考案・開発してきた。MITP は従来一定であった誘導熱プラズマ電力に変調を加えることで熱プラズマ場に変動を加え、温度・ラジカル場を制御する新法(5 つの国際会議で招待講演)である。さらに TCFF 法は従来一定であった原料粉体供給をも時間制御し、MITP の電力周期の大電力時のみに断続的に大量供給する新法である。この「MITP+TCFF 法」により極めて高効率な原料蒸発とそれに続く蒸気急冷を実現し核生成を促進させ、ナノ粒子を気相法で革新的に大量生成することに成功した。本変調手法により変調度を大きくすることで平均粒径を小さくでき、粒径制御も実現できる。しかし①更なる高効率化、②粒径制御、③組成/相制御、④原料粉体導入時・分子性ガス導入時の不安定性の解消、⑤機能性付加(官能基付加など)、⑥各ナノ粒子特性に対する変調波形/変調度の効果などの課題もある。これらを克服すれば機能性ナノ材料の大量生成に繋がる。

ここでは、独自新手法「タンデム型 MITP システム」を開発することで高純度金属イオンドープ酸化物ナノ粒子、Si ナノ粒子/ナノワイヤの革新的大量生成に挑戦する。

2. 研究の目的

本研究では、独自新手法「MITP+原料間歇同期投入」に対し、さらに熱プラズマを新しくタンデム構成とし、上流に種火の熱プラズマを常に維持するとともに超高温反応場の時間空間的精緻かつ、より大きな変調制御を行う。これにより単一コイル変調プラズマと比べ、より大量原料の効率的蒸発と急冷による効率的核生成と、より高精度の粒径制御を同時に実現する。タンデム型変調誘導熱プラズマが維持できることを確認する。本手法により高純度金属イオンドープ酸化物ナノ粒子、Si 系ナノ粒子/ナノワイヤの革新的大量生成法の開発に挑戦した。

3. 研究の方法

タンデム型変調誘導熱プラズマ Tandem-PMITP は一つのプラズマトーチに二つのコイルにより、タンデム型 PMITP はプラズマトーチに対して直列に 2 つの独立したコイルを設け、軸方向に長い熱プラズマ空間を生成する。さらに、2 つのコイル電流を独立制御することで時空間制御した熱プラズマ空間の生成が可能である。我々はこれらの特性を利用した高効率ナノ粒子法を開発している(4)(5)。その手法の一つが「原料同期間歇導入+変調熱プラズマ法」である。本手法では、次のように動作させる。変調熱プラズマ(MITP)に対して、コイル電流が大きい期間(On-time)にだけ原料を導入し効率的に蒸発させる。一方コイル電流が小さい期間には原料を導入せず、熱プラズマ温度の低下により、蒸気からの核生成を促進させる。このタンデム MITP を新たに利用し、ナノ粒子のさらなる高効率生成が期待できる。

このタンデム型変調誘導熱プラズマにおいては、上段コイル電流と下段コイル電流を変調させミリ秒オーダーで低値と高値に繰り返し、それにより高温状態・低温状態の熱プラズマを繰り返し発生させることができる。この高温状態の熱プラズマにのみ、原料を投入させ、低温状態の場合に原料供給を停止させて、PMITP に原料供給を同期させることで、投入原料を完全蒸発させ、さらに急冷させる。この手法をタンデム PMITP+TCFF 法と呼んでいる。図 1 は、タンデム PMITP+TCFF 法の概念図を表している。誘導熱プラズマには、トーチヘッドから挿入した

水冷パイプから原料をトーチ軸に沿って導入する。熱プラズマをタンデム PMITP とし、かつ高温状態の熱プラズマに向けてのみ原料を投入する。変調熱プラズマにおいてはコイル電流が高値の場合、連続運転の熱プラズマに比較してコイル電流の実効値が大きくなっており、入力電力も大きくなる。そのため熱プラズマ温度も高くなっている。このときに原料を導入すれば、より多くの原料を確実に蒸発できると考えられる。さらに、原料の蒸発を生じさせた後、原料供給を止めコイル電流を低値に下げること、トーチ部分のミリ秒オーダーで熱プラズマは急激に減衰できる。本手法により Si ナノ粒子、ナノワイヤ、金属イオンドープ TiO₂ ナノ粒子生成を行い、これらのナノ材料が大量に生成可能であることを検討した。

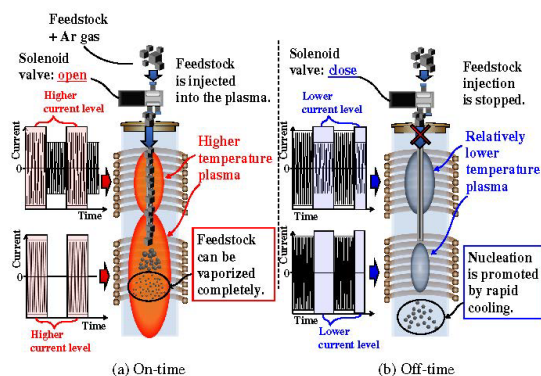


図 1 タンデム PMITP+TCFF 法の概念図

4. 研究成果

(1) タンデム型誘導熱プラズマの温度場・流れ場計算

<計算領域>計算対象は、タンデム型 PMITP の断面である。上段コイルおよび下段コイルそれぞれに個別の RF 電源が接続されており、互いに独立して制御をすることが可能である。これらのコイルへ互いに周波数の異なる高周波電流を流すことにより ICTP を発生させる。ここで周波数が互いに異なるように設定するのは、上下コイルの電磁結合による 2 つの RF 電源への影響を避けるためである。プラズマトーチの寸法は内径 70 mm、長さ 440 mm であり、反応チャンバの寸法は内径 130 mm、長さ 810 mm である。プラズマトーチ、チャンバの外壁および原料投入用チューブは水冷されている。本計算では最も基礎的な熱プラズマ挙動を検討するために、Ar 熱プラズマを対象とした。シースガスとして Ar をトーチ上部から、Axial 方向および Swirl 方向に流している。Ar キャリアガスをトーチヘッド中央から原料供給用の水冷チューブを通じてプラズマトーチに導入している。水冷チューブの挿入深さは 185 mm とした。Ar キャリアガスは、ナノ粒子生成の実験においては、原料粉体を導入する役割を持つ。下流部において蒸発蒸気の冷却促進のため、急冷ガス (QG) をプラズマトーチ下部から導入した。

<計算条件>

本計算の共通計算条件は次のようにした。熱プラズマへの変調一周あたりの時間平均投入電力として、コイル電流の振幅変調の有無にかかわらず上段コイルでは 10 kW、下段コイルでは 10kW とした。圧力を 300 Torr 一定とした。上段コイルおよび下段コイルのコイル電流周波数をそれぞれ 430 kHz および 300 kHz に設定した。キャリアガス Q1 として Ar を 4L/min 供給した。プラズマガス Q2 は未供給とし、シースガス Q3 として Ar を 90 L/min 導入し、クエンチングガス Q4 を 50 L/min 供給した。投入ガスの温度はいずれも 300K とした。今回の計算では下段コイル電流のみ振幅変調を加える。同図において、電流振幅の高値を HCL(Higher Current Level)、低値を LCL(Lower Current Level) と定義した。さらにこの HCL と LCL の比を SCL(Shimmer Current Level) と定義した。さらに、1 周期の中で、HCL をとる時間を On-time、LCL のとる時間を Off-time とし、変調周期に対する On-time の割合を DF(Duty Factor) と定義する。本計算では、上段および下段コイルの時間平均電力が 10kW 一定となるようにコイル電流振幅を 1 タイムステップごとに変更した。変調周期は 15 ms とし、下段コイル電流のデューティ比(DF)を変更した。下段コイル電流の DF を 100%DF, 75%DF, 50%DF の 3 通りに設定した。平均投入電力が 10kW 一定になるように変化させている。

<計算結果>

図 2 に、タンデム型誘導熱プラズマにおけるトーチおよびチャンバ内の温度場・流れ場を示す。同図(a) が時刻 $t=0\text{ms}$ における温度場・流れ場に対応し、同図(b) が時刻 $t=7.5\text{ms}$ における温度場・流れ場に対応している。図 2(a) の時刻 $t=0\text{ms}$ は On-time の最終段階の温度場・流れ場に対応しており、プラズマトーチ内で軸方向に長い高温場が形成されることがわかる。一方図 2(b) の $t=7.5\text{ms}$ は、図 2(a) から半周期分だけ経過したときの温度場・流れ場に対応している。Cond.(i) は無変調のため温度場・流れ場に変化がないが、Cond.(ii) および Cond.(iii) の

条件では下段コイル電流の変調により、温度場・流れ場が変化している。図 2(a) の Cond.(ii) および(iii) の結果から、下段コイル電流を変調することで、熱プラズマへの瞬時的な投入電力が上昇することにより下段コイル部 $200 < z < 400$ mm の温度が無変調の場合より高くなる。これにより、ナノ粒子の生成プロセスにおいて原料の確実な蒸発が可能である。図 2(b) では、無変調条件の Cond.(i) は温度に変化がない。一方、変調条件である Cond.(ii) および Cond.(iii) では、チャンバ上流部 $450 < z < 600$ mm においてチャンバ壁付近から冷たいガスが巻き込まれるようにチャンバ内に入り込む。これは、変調による下段コイル部 $200 < z < 400$ mm の温度低下により、Ar ガスの質量密度が増加しようとする際に、質量保存式を満たすように周りから質量を補償するため生じると考えられる。このガスの巻き込みは、下段コイル電流の DF が小さいほど大きくなる。DF が小さくなると、熱プラズマの Off-time が増加するため、下段コイル部 $200 < z < 400$ mm の温度がより低下することでガスの巻き込みが大きくなると考えられる。

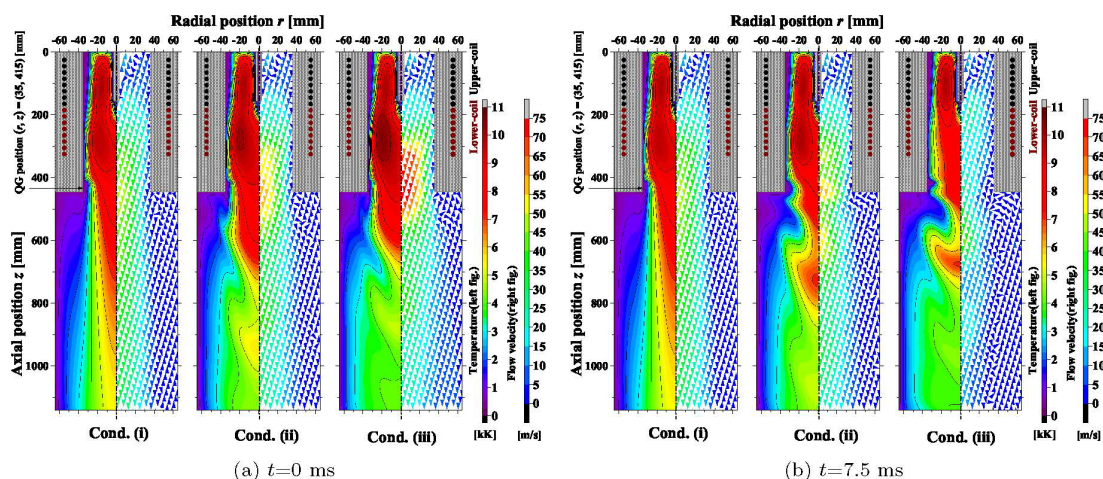


図 2 各条件におけるタンデム型変調誘導熱プラズマの温度分布および流れ場

(2) Fe^{3+} -doped TiO_2 NP の生成実験結果の例

<実験条件> 数値解析結果での DF 依存性に対する妥当性について検証のため、 Fe^{3+} -doped TiO_2 ナノ粒子生成実験を行い、下段コイル電流変調がナノ粒子生成へ与える影響の検討を行った。ここで生成するナノ粒子は、紫外光から可視光までに対して光触媒作用を示し、その酸化作用を利用して有害物質の分解に用いられる。上段コイル・下段コイルとして巻数をそれぞれ 4 巻、8 巻のものを用いた。チャンバ内圧力を 300 Torr とした。シースガスとして $\text{Ar}90$ slpm + O_2 10 slpm を、キャリアガスとして O_2 4 slpm を供給した。原料は、平均粒径 $27 \mu\text{m}$ (最大 $45 \mu\text{m}$) の Ti と Fe 混合粉体であり、その混合比を 5wt%Fe+95wt%Ti とした。原料粉体投入用の水冷チューブの先端位置は、下段コイル 4 巻目とした。今回行った実験は、下段コイル電流の変調条件として、DF を変更し、4 パターンの変調条件で行った。熱プラズマへの投入電力は、プラズマの安定性および電源仕様より、上段コイル 15kW、下段コイル 8 kW とし、下段コイルのみ電流変調を行った。上段コイル回路と下段コイル回路間で共振が生じないように、上段コイル電流は 475 kHz、下段コイル電流は 305 kHz と運転周波数をそれぞれ設定した。以上の条件で、下段コイル電流の DF を 100%DF, 80%, 73%, 66%として Fe^{3+} -doped TiO_2 ナノ粒子生成実験を行い、FE-SEM による生成ナノ粒子の分析を行った。生成粒子は、チャンバ下流のフィルタから回収した。

<実験結果> 生成粒子を FE-SEM で観察し、粒子 750 個を測長した。図 3 に、生成粒子の FE-SEM 像および粒径度数分布を示す。粒径度数分布には、平均粒径 d_{avg} 、中央値 d_{50} 、標準偏差 σ および 100 nm 以下の割合を示した。その結果、DF が 100%において平均粒径 d は 99.4 nm, 80%において平均粒径 61.6 nm, 73%において平均粒径 55.1 nm, 66%において平均粒径 42.1 nm であった。図 3(a) から DF が 100%の場合、粒径が 100 nm を超える粒子が多く確認できる。これは熱プラズマによる原料蒸発蒸気に対して冷却が十分になされずに粒子が成長したためと考えられる。それに対して、変調をした条件では、熱プラズマの Off-time が増加し、蒸発蒸気の冷却が十分になされたため、粒径成長が抑制されたと考えられる。また、DF が小さくなることで平均粒径がより小さくなり、粒子の分布も小粒径方向にシフトすることが読み取れる。これは、DF が小さくなることで熱プラズマの Off-time が長くなり、蒸発蒸気がより効果的に冷却されたためだと考えられる。以上から、下段コイル電流変調の DF の減少により、原料蒸発蒸気の冷却効果向上が見込め、粒子成長の抑制が可能である。これは、数値解析による検討と同じ傾向が得られたと言える。

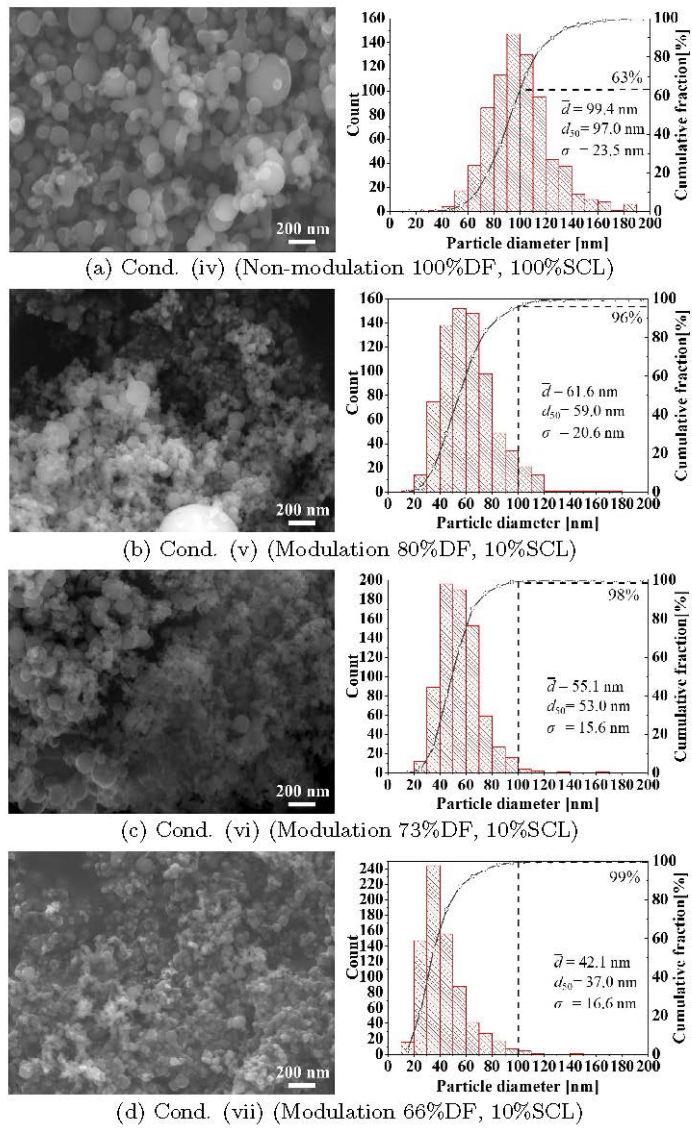


図3 回収した生成 Fe^{3+} -doped TiO_2 粒子の SEM 画像および粒径度数分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Furukawa Ryudai, Tanaka Yasunori, Nakano Y, Nagase Y, Ishijima T, Sueyasu S, Watanabe S, Nakamura K	4. 巻 55
2. 論文標題 Numerical study of nanoparticle formation in two-coil tandem-type modulated induction thermal plasmas with simultaneous modulation of upper- and lower-coil currents	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 044001 ~ 044001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac2cee	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 Furukawa Ryudai, Tanaka Yasunori, Nakano Yusuke, Akashi Keita, Ishijima Tatsuo, Watanabe Shu, Sueyasu Shiori, Nakamura Keitaro	4. 巻 389
2. 論文標題 Nanoparticle synthesis using two-coil tandem-type modulated induction thermal plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 460 ~ 470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2021.05.057	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 Akashi Keita, Tanaka Yasunori, Nakano Y., Furukawa R., Ishijima T., Sueyasu S., Watanabe S., Nakamura K.	4. 巻 41
2. 論文標題 Effect of Intermittent Injection of Ar/CH4 Quenching Gas on Particle Composition and Size of Si/C Nanoparticles Synthesized by Modulated Induction Thermal Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Chemistry and Plasma Processing	6. 最初と最後の頁 1121 ~ 1147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11090-021-10169-4	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 Onda Kazuki, Tanaka Yasunori, Akashi K, Furukawa R, Nakano Y, Ishijima T, Uesugi Y, Sueyasu S, Watanabe S, Nakamura K	4. 巻 53
2. 論文標題 Numerical study on the evaporation process of feedstock powder under transient states in pulse-modulated induction thermal plasmas for nanoparticle synthesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 325201 ~ 325201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab8419	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 Tanaka Yasunori, Shimizu Kotaro, Akashi Keita, Onda Kazuki, Uesugi Yoshihiko, Ishijima Tatsuo, Watanabe Shu, Sueyasu Shiori, Nakamura Keitaro	4. 巻 59
2. 論文標題 High rate synthesis of graphene-encapsulated silicon nanoparticles using pulse-modulated induction thermal plasmas with intermittent feedstock feeding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SHHE07 ~ SHHE07
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab71db	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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yasunori Tanaka, K.Akashi, R.Furukawa, Y.Nagase, Y.Nakano, T.Ishijima, S.Sueyasu, S.Watanabe, K.Nakamura
2. 発表標題 Influence of Timing of Alternating Gas Injection on Temperature Field in Reaction Chamber for Nanoparticle Synthesis using Pulse-Modulated Induction Thermal Plasmas
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryudai Furukawa, Yurina Nagase, Tomoya Fuwa, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2. 発表標題 Simultaneous Modulation of Two Coil Currents on Tandem Induction Thermal Plasmas for Silicon Nanoparticle Synthesis
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-12) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yurina Nagase, Ryudai Furukawa, Tomoya Fuwa, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2. 発表標題 Influence of H ₂ Injection into Operating Gas on Size of Si Nanoparticles Synthesized in Tandem-PMITP
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-12) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasunori Tanaka*, R. Furukawa, Y. Nagase, T. Fuwa, Y. Nakano, T. Ishijima, S. Sueyasu, S. Watanabe, K. Nakamura
2. 発表標題 Numerical Study on Modulation Induced Entrainment Gas Flow and its Promotion of Nanopowder Synthesis in Pulse-Modulated Induction Thermal Plasmas
3. 学会等名 The 74th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryudai Furukawa, Yurina Nagase, Yasunori Tanaka*, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2. 発表標題 High-rate synthesis of Fe ³⁺ -doped TiO ₂ nanoparticles using two-coil tandem-type modulated induction thermal plasmas
3. 学会等名 The 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics(AAPPS-DPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yurina Nagase, Ryudai Furukawa, Yasunori Tanaka*, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2. 発表標題 Numerical Study for Influence of Feedstock Feeding Duration on Nanoparticles Synthesis by Modulated Induction Thermal Plasma with Intermittent Feeding Method
3. 学会等名 The 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics(AAPPS-DPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasunori Tanaka
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF A TRANSIENT MODEL ON EVAPORATION PROCESS OF FEEDSTOCK PARTICLES INJECTED IN MODULATED INDUCTION THERMAL PLASMAS FOR NANOPARTICLE SYNTHESIS
3. 学会等名 International conference on Plasma Science ICOPS2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryudai Furukawa, Keita Akashi, Yurina Nagase, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima
2. 発表標題 Imaging of Feedstock Particle Dynamics in Thermal Plasma for Nanoparticle Synthesis by Laser Strobe Measurement
3. 学会等名 International conference on Plasma Science ICOPS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keita Akashi, Ryudai Furukawa, Yurina Nagase, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima
2. 発表標題 Effect of Intermittent Injection Timing of Quenching Gas on Composition and Particle Size of Si/C Nanoparticles Synthesized by Modulated Induction Thermal Plasma
3. 学会等名 International conference on Plasma Science ICOPS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 組成物	発明者 田中康規, 古川颯大, 長瀬有理奈, 渡邊周, 末安志織,	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-194762	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 組成物	発明者 田中康規, 古川颯大, 長瀬有理奈, 渡邊周, 末安志織,	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-194765	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究分担者	石島 達夫 (Ishijima Tatsuo) (00324450)	金沢大学・電子情報通信学系・教授 (13301)	

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
研究分担者	瀬戸 章文 (Seto Takafumi) (40344155)	金沢大学・フロンティア工学系・教授 (13301)	
研究分担者	中野 裕介 (Nakano Yusuke) (60840668)	金沢大学・電子情報通信学系・助教 (13301)	

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