

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01256

研究課題名(和文) 高次に時空間制御した変調熱プラズマ法による高純度ナノ材料の革新的量産技術

研究課題名(英文) Nanoparticle synthesis by tempo-spatial controlled induction thermal plasmas

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) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、独自開発の「原料間歇同期投入+変調熱プラズマ法」により、高純度金属ドーパド酸化物ナノ粒子、次世代電池負極材に期待されるSi粒子/Siナノワイヤの大量生成法を開発することである。本研究では、熱プラズマへの電力変調度、変調波形、原料間歇投入位相、冷却ガス導入により超高温・高密度ラジカル場を時空間的に制御し、ナノ粒子生成への寄与を検討し、酸化物ナノ粒子の生成レート800 g/h@20kWを達成した。また2次元分光観測・ナノ材料の気相抽出等を駆使した実験とプラズマ熱流体数値解析から、原料蒸発とナノ材料生成過程の一部を明確化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本申請研究は独自開発した、「変調型誘導熱プラズマ」と「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」を開発したものである。ナノ粒子大量生成法が確立できれば、電子材料、環境・エネルギーなどのナノテク分野において大きなインパクトを与える。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。本法は、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するものである。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)：The purpose of this research is to develop mass production method for high-purity metal-doped oxide nanoparticles and Si particles / Si nanowires expected for the negative electrode material of next-generation batteries, by the originally developed "synchronous injection of raw materials + modulated thermal plasma method". In this study, we investigated the contribution to nanoparticle formation by controlling the high temperature and high density radical field spatio-temporally by the power modulation degree, the modulation waveform, the intermittent feeding phase of the feedstock, and the introduction of cooling gas to the thermal plasma. The production rate of nano-particles was 800 g/h@20kW. The process of feedstock evaporation and nanomaterial formation was in part clarified by experiments using two-dimensional spectroscopic observation, nanophase vapor phase extraction, and plasma thermofluid numerical analysis.

研究分野：熱プラズマ理工学

キーワード：熱プラズマ ナノ粒子 量産化 2次元分光 ナノワイヤ

1. 研究開始当初の背景

近年、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いため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。そのため特に、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。すなわち機能性ナノ材料を「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。

ナノ粒子生成法は様々にあり、申請者らの手法は誘導熱プラズマ気相反応法に属す。誘導熱プラズマ法の利点は、(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 10^5 - 10^6 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、という課題があった。逆に(A)(B)を解決すれば、高純度ナノ粒子の大量生成法を開発・確立できる。

申請代表者らは上記(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。これにより準安定アナターゼ相を含む高純度 TiO₂ ナノ粒子を入力 20 kW で 500 g/h の収率で大量生成できた。準安定アナターゼ相 TiO₂ ナノ粒子は色素増感太陽電池材料等に使用される。さらに最近、本手法を Si ナノ粒子生成に応用した際、ある条件で Si ナノワイヤが大量に生成された。これは MITP+TCFF のナノ材料製造への高い潜在力を意味する。しかしまだ課題がある：①更なる高効率化、②粒径制御、③組成/相制御、④分子性ガス導入時の不安定性、⑤機能性付加(官能基付加など)、⑦各ナノ粒子特性に対する変調波形、変調度の効果、など。

ここでは、独自新手法「MITP+原料間歇同期投入」により、高純度金属イオンドーパド酸化物ナノ粒子)、さらには Si ナノ粒子/ナノワイヤの革新的大量生成法の開発に挑戦する。

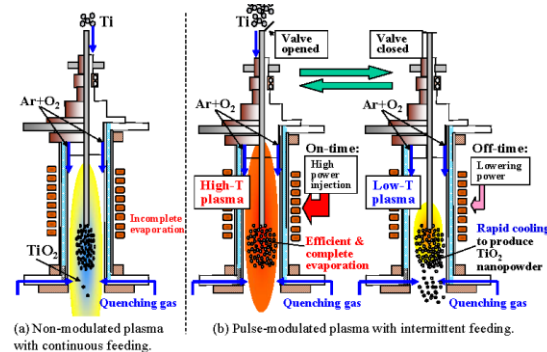


Fig.1 PMITP+TCFF 法によるナノ粒子生成の概念図

2. 研究の目的

本申請研究の大きな目的は独自開発の「原料間歇同期投入+変調熱プラズマ法」により、高純度金属ドーパド酸化物ナノ粒子、次世代電池負極材に期待される Si 粒子/Si ナノワイヤの大量生成法を開発する：(1)熱プラズマへの電力変調度(ピーク電力増強)、変調波形、原料間歇投入位相、冷却ガス導入により超高温・高密度ラジカル場を時空間的に制御し、ナノ粒子/ナノワイヤ生成への寄与を解明し大量生成(800 g/h@20kW 目標)を達成する。(2)2次元分光観測・ナノ材料の気相抽出等を駆使した実験とプラズマ熱流体数値解析から、原料蒸発とナノ材料生成過程を明確化する。

3. 研究の方法

パルス変調誘導熱プラズマ PMITP においては、コイル電流を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 PMITP+TCFF 法と呼んでいる。Fig.1 は、原料を連続・間歇的に供給する際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。同図(a)に示すように、通常連続運転する誘導熱プラズマに原料を連続供給させる場合には、導入した粒子が熱プラズマのトーチ軸上で蒸発する。一方同図(b)は、熱プラズマに変調を加え、かつそれに同期して原料を間歇的に導入する PMITP+TCFF 法の概念図である。熱プラズマを 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で、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かを検討した。ここでは特に Si 系ナノ粒子の成果を紹介する。

4. 研究成果

(1) Si NW/Si NPs の大量生成実験条件

PMITP+TCFF 法を用いた 2 通りの条件で Si ナノ材料の大量生成実験を行った。PMITP+TCFF 法に加えて、「QG 供給」を行った場合と「QG 無供給および Si 原料の大量供給」とした場合の二条件で Si ナノ材料生成実験を行った。後述するようにこの 2 つがそれぞれ典型的な Si NPs 生成条件および Si NW の生成条件となっている。熱プラズマへの平均入力電力を 20 kW 一定とした。変調条件は 80%SCL-80%DF とした。シースガスとして Ar を 90 slpm、プラズマガスとして H₂ を 1 slpm 供給した。キャリアガスとして Ar を 4slpm 供給した。反応容器内圧力は 300 torr 一定とした。原料として、平均粒径 19.2 μm の冶金級(mg-)Si 粉体を用いた。原料を投入する水冷プローブの先端位置を誘導コイル 7, 8 ターン目の間に固定した。Si 原料粉体を電磁バルブの開閉により間歇的に供給した。電磁バルブの応答時間およびプローブ先端までの輸送時間を考慮し、コイル電流の変調信号に対して遅延時間 $t_d=6$ ms をもって電磁バルブの開閉信号を与えた。Tab. 2 に Si NPs の生成条件を示す。トーチ下流に QG として Ar を 50 slpm の流量で連続的に供給した。QG は径方向に投入している。原料供給量は 3.9 g/min であった。Tab. 3 に Si NW の生成条件を示す。QG は無供給とした。原料供給量は 6.9 g/min であった。Si NPs 生成条件における生成粒子は捕集フィルターから回収した。Si NW 生成条件における生成物質は反応容器壁に付着した綿状物質および層状物質を回収した。

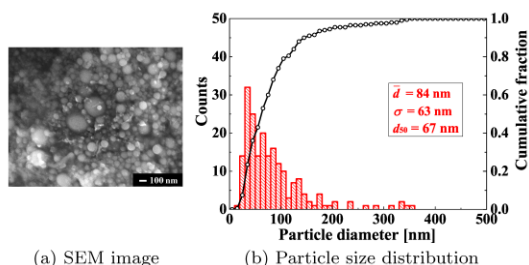


Fig.2 生成した Si ナノ粒子の SEM 写真(a)と粒子度数分布(b)

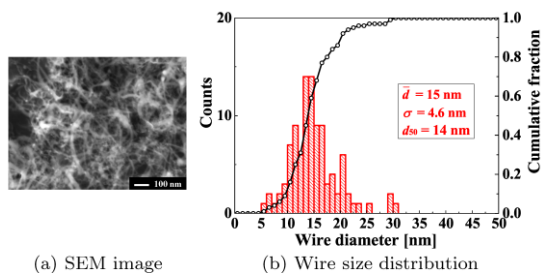


Fig.3 生成した Si ナノワイヤの SEM 像(a)とワイヤ径度数分布(b)

(2) Si NP の生成実験結果

生成粒子の FE-SEM 画像を、Fig. 2(a) に示す。同図に示すように、球状をした直径 100 nm 以下の NPs を多数生成できていることが確認できる。この FE-SEM 画像から、200 個の粒子を無作為に抽出し、粒径を測長することで粒径度数分布を求めた。Fig. 2(b) は、その測長結果である。同図には、平均粒径、標準偏差および粒径の中央値を示している。生成粒子の平均粒径は 84 nm であり、生成粒子の多くが NPs と考えられる。また同図から、生成粒子の内約 80% が粒径 100 nm 以下の粒径をもつことが確認できる。このときの粒子回収量から Si NPs の生成レートを算出したところ、120 g/h という高い生成レートであった。この生成レートは、従来法と比較すると約 10 倍という高い生成レートである。生成粒子の比表面積を BET 法から求め、さらに生成粒子の等価粒径を算出した。なお、BET 法では試料粉体表面への分子ガスの吸着量を評価するため、粒子表面の凹凸、亀裂を含めた比表面積が決定される。ここでは、生成粒子表面に穴や凹凸が無く、すべて同一粒子径の球形であると仮定することで等価粒径を推定した。その結果、生成粒子の等価粒径は 99 nm と算出された。このことから本条件では、平均粒径 100 nm 程度の Si NPs が大量に生成されていることが示唆される。

(3) Si NW 生成実験結果

通常、Si NPs 生成実験における生成物は粉体として回収される。一方で、Si NW 生成実験後、綿状物質の生成が確認された。この綿状物質の FE-SEM 画像を Fig. 3(a) に示す。同図から、綿状物質中において多数の NW が確認できる。この FE-SEM 画像から 100 本のワイヤを無作為に抽出し、ワイヤ径を測長することで生成 NW の直径分布を求めた。その結果を Fig. 3(b) に示す。同図に示すように、NW の平均直径は 15 nm であり、最大直径は 30 nm であった。したがって、綿状物質は狭い直径分布の NW で構成される。また、綿状物質の回収量から NW の生成レートを算出したところ、少なくとも 1 g/h という高い生成レートであった。また、綿状物質の他に、NW と NPs が同程度混合した層状の物質も回収された。この層状物質の比表面積を BET 法により測定した。その結果、層状物質の比表面積は NPs よりも約 5 倍大きいことがわかった。層状物質中には NW を多く含むため、生成 NPs と比較して比表面積が著しく増大したと考えられる。

BF-TEM/EDX を用いて、綿状物質の元素マッピング分析を行った。その結果を Fig. 4 に示す。同図から、NW 全体に Si 元素および O 元素が一様に分布している様子が確認できる。なお、EDX による定量分析結果から、Si と O の元素比は Si:O=86.5:13.5 であった。以上から、生成された綿状物質は Si/SiO_xNW であると推定できる。O 元素は、大気暴露により NW 表面が酸化したため混入したと考えられる。また、不純物と見られる元素は検出されなかったため、生成ナノワイヤ中への不純物混入はほとんど無いと考えられる。一般的な Si NW 生成法である VLS 法は、融解した金属触媒内に溶解した原料蒸気の過飽和現象を用いる手法である。今回、金属触媒を意図的に投入していないことから、PMITP+TCFF 法を用いて生成された Si NW は VLS 法とは異なったメカニズムで形成されたのではないかと考えられる。NW が生成された要因は、PMITP 内に Si 原料粉末を大量に間歇供給し、かつ QG を使用せずに緩慢に冷却させたことで NW 生成に適した熱流束場が生成されたことと考えている。綿状物質(NW) の結晶構造を XRD を用いて分析した。その結果、Si 結晶ピークのみが観測できた。このことから、不純物の混入が少ない Si NW を生成できたと考えられる。また、ナノワイヤ中に酸化されていない Si 結晶相が存在していると考えられる。さらに、同図において特定の配向性だけが著しく強いという特徴は見られないため、今回生成した NW は一次元的な結晶成長をもって成長したものではないと言える。

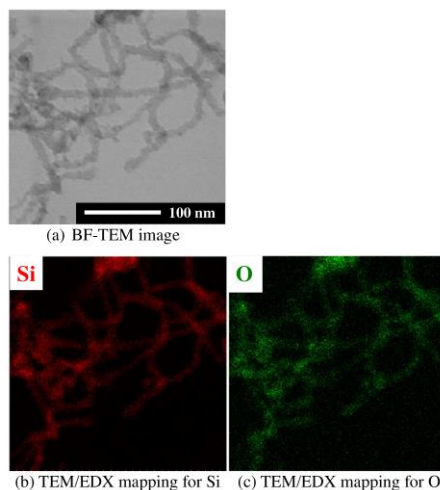


Fig.4 Si ナノワイヤの TEM-EDX マッピング像

(4) Si 生成時の放射強度分布

Fig. 5 に放射強度二次元分布の時間変化を示す。同図には、変調信号および電磁バルブ開閉信号を併記している。同図より、Ar I および H α の放射強度がコイル電流の変調信号に同期して時間的に変化していることがわかる。これは、トーチ内の温度がコイル電流の変調信号に依存していることを示唆しており、電力変調により熱プラズマの温度が高・低温領域を形成していると考えられる。また、Si 原子および SiH 分子のスペクトルが確認できる。この結果は、プラズマトーチ内部で Si 原料が蒸発して原子化し、さらに H 原子と結合することで SiH も生成されていることを示唆している。

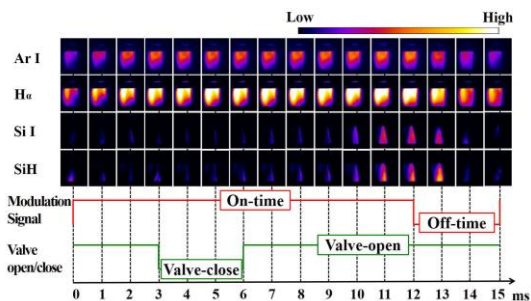


Fig.5 Si ナノ粒子生成中のスペクトル観測放射強度分布の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y.Siregar, Yasunori Tanaka*, Y.Uesugi, T.Ishijima	4. 巻 15
2. 論文標題 Numerical parametric investigation on temperature distribution in Ar/O ₂ induction thermal plasmas with Ti powder injection - inclusion of particle evaporation-	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 12-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI:10.1002/tee.23022	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 Y.Siregar, Y.Nakano, Yasunori Tanaka*, Y.Uesugi, T.Ishijima	4. 巻 52
2. 論文標題 Numerical study of temperature and gas flow fields in Ar-O ₂ tandem-type inductively coupled thermal plasma with Ti feedstock powder injection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics,	6. 最初と最後の頁 414004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab314e	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 Y.Siregar, Yasunori Tanaka, Y.Uesugi, T.Ishijima	4. 巻 17
2. 論文標題 Influence of input power in Ar/H ₂ thermal plasma with silicon powder by numerical simulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Telkommnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)	6. 最初と最後の頁 1047-1054
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12928/TELKOMNIKA.V17I2.10533	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 Naoto Kodama, Yasunori Tanaka, Yosuke Ishisaka, Kotaro Shimizu, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shu Watanabe, Shiori Sueyasu, Keitaro Nakamura	4. 巻 57
2. 論文標題 Spatial Distribution of Ti vapor Admixture Ratio in Ar Induction Thermal Plasma Torch during Ti Feedstock Injection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 36101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Yosuke Ishisaka, Naoto Kodama, Kentaro Kita, Yasunori Tanaka, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura	4. 巻 10
2. 論文標題 High-rate synthesis of Si nanowires using modulated induction thermal plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 96201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kodama Naoto, Tanaka Yasunori, Kita K, Ishisaka Y, Uesugi Y, Ishijima T, Sueyasu S, Nakamura K	4. 巻 26
2. 論文標題 Spatiotemporal distribution of thermal plasma temperature and precursor formation in a torch during TiO ₂ nanopowder synthesis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 075008 ~ 075008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/aa73ca	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21件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Keita Akashi*, Kazuki Onda, Ryudai Furukawa, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2. 発表標題 Nucleation Frequency Distribution of Si Nanoparticles in the Chamber downstream of Modulated Induction Thermal Plasmas with Modulated Quenching Gas Injection
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Onda Kazuki*, Tanaka Yasunori, Nakano Yusuke, Ishijima Tatsuo, Uesugi Yoshihiko, Akashi Keita, Furukawa Ryudai, Sueyasu Shiori, Watanabe Shu, Nakamura Keitaro
2. 発表標題 Modeling of Transient Interaction between Ar Thermal Plasma and Si Solid Powder Being Injected into Induction Thermal Plasmas
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yasunori Tanaka*, Kentaro Shimizu, Kazuki Onda, Keita Akashi, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2 . 発表標題 High Rate Synthesis of Graphene-Encapsulated Silicon Nanoparticles using Pulse-Modulated Induction Thermal Plasmas with Intermittent Feedstock Feeding
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yulianta Siregar*, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima, Yoshihiko Uesugi
2 . 発表標題 Modelling on tandem type of inductively coupled thermal plasma with thermal interaction from powder feeding
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Keita Akashi*, Kotaro Shimizu, Kazuki Onda, Yusuke Nakano, Yasunori Tanaka, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro
2 . 発表標題 Electromagnetic thermofluid simulation on tandem type of Ar/O ₂ inductively coupled thermal plasmas driven by upper and lower coils
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kazuki Onda*, Kotaro Shimizu, Keita Akashi, Yasunori Tanaka, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2 . 発表標題 Pure Silicon Nanoparticle Synthesis using Tandem Type of Induction Thermal Plasmas with Simultaneous Controlled Modulation of Upper- and Lower-Coil Current
3 . 学会等名 24th International Symposium on Plasma Chemistry, ISPC-24 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunori Tanaka*, K.Shimizu, K.Onda, K.Akashi, Y.Uesugi, T.Ishijima, S.Sueyasu, S.Watanabe, K. Nakamura
2. 発表標題 Effect of Alternating Gas Injection on Temperature Fields in Reaction Chamber using Inductively Coupled Thermal Plasmas for Nanoparticle Synthesis
3. 学会等名 24th International Symposium on Plasma Chemistry, ISPC-24 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Onda, Kotaro Shimizu, Keita Akashi, Yasunori Tanaka, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu, Watanabe and Keitaro Nakamura
2. 発表標題 Numerical Study on Temperature Variation in Tandem Ar Induction Thermal Plasmas with Lower-Coil Current Modulation; Influence of Off-Time
3. 学会等名 ISPlasma2019/IC-PLANTS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Tanaka, K.Shimizu, K.Onda, K.Akashi, Y.Uesugi, T.Ishijima, S.Sueyasu, S.Watanabe, K. Nakamura
2. 発表標題 Influence of Alternating Gas Injection on the Temperature Field in Reaction Chamber for Nanoparticle Synthesis using Inductively Coupled Thermal Plasmas
3. 学会等名 Material Research Society of Japan (MRS-J) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.Siregar, Y.Tanaka, T.Ishijima, Y.Uesugi
2. 発表標題 Influence of sheath gas flow rate in Ar induction thermal plasma with Ti powder injection on the plasma temperature by numerical calculation
3. 学会等名 1st International Conference on Industrial, Electrical and Electronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yulianta Siregar, Yasunori Tanaka, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima
2. 発表標題 Influence of Input Power in Ar/H ₂ Thermal Plasma with Silicon Powder Injection by Numerical Simulation Study,
3. 学会等名 TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasunori Tanaka
2. 発表標題 Advanced Controlled Induction Thermal Plasmas for Materials Processing
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Conference on Plasma and Terahertz Science (APOPST-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuki Onda, Kotaro Shimizu, Yasunori Tanaka, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, and Keitaro Nakamura
2. 発表標題 Numerical Study on Tempo-Spatially Varying Thermofluid Field in Tandem Type of Modulated Induction Thermal Plasmas-Effect of Lower Coil Current Modulation
3. 学会等名 The 7th Int. Conf. Microelectronics & Plasma Technol.(ICMAP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuki Onda, Naoto Kodama, Yosuke Ishisaka, Kotaro Shimizu, Yasunori Tanaka, Uesugi Yoshihiko, Tatsuo Ishijima, Shiori Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2. 発表標題 Trial Synthesis of Silicon Nanoparticles using a Newly Developed Tandem Type of Modulated Induction Thermal Plasma with Lower Coil Current Modulation
3. 学会等名 High-Tech Plasma Processes (HTPP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Naoto Kodama, Yasunori Tanaka, Kazuki Onda, Kotaro Shimizu, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, Sueyasu Sueyasu, Shu Watanabe, Keitaro Nakamura
2 . 発表標題 Two-dimensional estimation of number density distribution of precursor molecules during TiO ₂ nanopowder synthesis using induction thermal plasmas
3 . 学会等名 High-Tech Plasma Processes (HTPP2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K.Onda, N. Kodama, Y. Ishisaka, K.Shimizu Yasunori Tanaka, Y. Uesugi, T. Ishijima, S. Sueyasu, S. Watanabe, K. Nakamura
2 . 発表標題 A Numerical Study on Tandem Type of Ar Induction Thermal Plasmas -Influence of the Gap Length between Upper and Lower Coils-
3 . 学会等名 ISPlasma2018/IC-PLANTS2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, N. Kodama, Y. Ishisaka, Y. Uesugi, T.Ishijima, S. Watanabe, K. Nakamura, T. Kooka, T. Seto
2 . 発表標題 Influence of current modulation on the size distribution of nanoparticles synthesized in gas phase in induction thermal plasmas
3 . 学会等名 Asia-Pacific Int. Symp.on the Basics & Appl. Plasma Technol. (APSPT-10) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 N.Kodama, Y. Ishisaka, K. Shimizu, Y. Tanaka, Y. Uesugi, T. Ishijima, S. Sueyasu, S. Watanabe, K. Nakamura
2 . 発表標題 Estimation of Ti excitation temperature and power density distribution in the Ar induction thermal plasma during Ti feedstock injection
3 . 学会等名 Asia-Pacific Int. Symp.on the Basics & Appl. Plasma Technol. (APSPT-10) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Ishiska, N. Kodama, Y. Tanaka, Y. Uesugi, T. Ishijima, S. Sueyasu, S. Watanabe, K. Nakamura
2. 発表標題 Large Amount Synthesis of Si Nanopowder/Nanowires using Pulse-Modulated Induction Thermal Plasmas
3. 学会等名 Int. Symp. Plasma Chem. (ISPC-23) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Kodama, Y. Ishisaka, K. Shimizu, Y. Tanaka, Y. Uesugi, T. Ishijima, S. Sueyasu, S. Watanabe, K. Nakamura
2. 発表標題 Two-dimensional distribution of Ti vapor admixture ratio and Ti atomic density in the Ar ICTP torch during Ti feedstock injection
3. 学会等名 Int. Symp. Plasma Chem. (ISPC-23) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasunori Tanaka
2. 発表標題 Modulated Induction Thermal Plasmas and their Application to High-Throughput Nanopowder Synthesis
3. 学会等名 Int. Symp. Plasma Chem. (ISPC-23) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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・サステナブルエネルギー研究センター・教授 (13301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	上杉 喜彦 (Uesugi Yoshihiko) (90213339)	金沢大学・電子情報通信学系・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)	