

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04152

研究課題名(和文) 次世代Liイオン電池負極用高次複合ナノ粒子創製

研究課題名(英文) Development of composite nanoparticles for negative electrode of next generation lithium ion batteries

研究代表者

神原 淳 (Kambara, Makoto)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：80359661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,450,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、プラズマスプレー物理蒸着(PS-PVD)によるナノ粒子の特徴的な構造を積極的に利用した独自の複合電極を開発し、リチウムイオン電池の高容量化と充放電サイクル安定性の向上両立を目指した。主要な成果は、Sn担持Siナノ粒子を利用した活物質ネットワークを有する負極によって飛躍的なサイクル特性の向上を見出すと共に、SiO<sub>2</sub>負極の高効率還元によって高容量化と高サイクル性を実現し、ナノ粒子化に伴う不均化反応の高速化を初めて明らかにした。また、Siナノ粒子の1kg/hrの高スループット製造を実証し高速生成時の構造変調機構を明らかにして目的構造と高速製造の両立のための要件を明示した。

研究成果の概要(英文)：This project aims at the simultaneous attainment of increased capacity and enhanced cyclability of lithium-ion batteries by using the best of the characteristic composite nanoparticles designed by plasma spray PVD. As the major achievements, we have demonstrated significantly high capacity maintained after longer cycles with the active-material-network in the anode by using the best of the characteristic structure of Si:Sn nanoparticle produced by PS-PVD. The higher cycle capacities with SiO<sub>2</sub> nanoparticles is also attained by the effective reduction during PS-PVD of SiO<sub>2</sub>, along with the new finding that the disproportionation reaction can be accelerated in nanosized SiO<sub>2</sub>. Furthermore, we have also achieved Si nanoparticle production as high as 1 kg/hr. The effect of throughput on the co-condensation process in PS-PVD is clarified and the optimal conditions to produce the optimal composite particles at greater throughputs are proposed.

研究分野：プラズマ材料工学

キーワード：リチウムイオン電池 ナノ粒子 プラズマスプレー

## 1. 研究開始当初の背景

次世代移動体の蓄電技術として Li イオン電池(LiB)には更なる容量増加が求められており、この要請に対して電極材料の構造化が有効な手段であることから精力的な研究が進められている。特に負極材料に注目すれば、Si 系負極は、現行の C(黒鉛)系負極に対して 10 倍以上の電池容量を有することから、次世代高密度電池の有力材料と目される。しかし、充放電の電気化学反応である Li-Si 合金化過程において、合金相の結晶構造の差異に起因して 400%近い体積膨張が生じ、その結果、複数回の充放電で Si 粉末自体が微粉化し電気伝導パスを失い、最終的に数サイクルで C 電極を利用した場合の電気容量を下回る。Si の高い理想容量を生かす有効な手段として、材料のナノ構造化が有効であることが世界的な研究の結果として判明し、特に(1)ナノサイズ化 (150nm 以下)により耐割れ強度が向上、(2)ポーラス構造化による膨張吸収、更に(3)C など第 2 相のコート/担持構造化による導電性付与、等が主要な目標構造として挙げられる。但し重要な点は、上述の複合化技術が低圧 CVD 等の多段階低速プロセスであり、巨大な Li イオン電池市場より求められる低コスト・高スループット技術化するには未だ大きな技術の壁があると言わざるを得ない点である。ナノロッド・薄膜化も電池特性維持に効果的ではあるが、極度の多孔体構造化も含め、絶対的な電池容量増加が本質的に困難なアプローチであり、実用に際しての Si 利用のメリットが顕れない。以上より、ナノ構造化と高速粒子製造を両立しうるプロセスが LIB 市場より強く要請されている。

## 2. 研究の目的

我々は、高速度ナノ粒子製造に秀でたプラズマプレー-PVD 法の原料粉末の蒸発、凝縮・凝集過程によるナノ粒子構造制御に着目してきた。先行研究の成果として、【1】数 10nm の nc-Si 粒子から構成される高次複合構造を有するナノ粒子を、内部にナノ細孔を含む構造となり上述(1)と(3)を両立する構造となり、サイクル特性を大幅に向上し得た。更に、【2】Ni 添加 Si 混合粉末原料を用いることで、導電性の第 2 相が 1 次 Si 粒子上に直接エピタキシャル整合を有して生成し、ナノレベルで導電パスが網羅された複合 Si 構造を造り出すことに成功した。その電池特性は、粉末をベースとする負極の中でも極めて高いサイクル特性を実現している。特筆すべきは、これら構造化を超高速度かつ実験室でも >360g/min の処理速度で実現しており、他のナノ構造粒子製造法に比べ桁違いで高速の処理速度であることから、他には無い新たな技術として産業界より注目を浴びている。以上を踏まえ、本研究では、PS-PVD の共凝縮過程で創製される特徴的な複合構造ナノ粒子の形成過程の理解を進め、そのナノ粒子を要素に利用した新たな複合負極構造化を

じて、高容量と高サイクル性を両立する次世代 LiB の負極開発を目指した。

## 3. 研究の方法

PS-PVD による複合構造 Si ナノ粒子生成には、高効率原料加熱による高スループットでのナノ粒子製造を実証してきた直流と高周波プラズマを重畳するハイブリッドプラズマシステムを利用する。ナノ粒子は、先行研究で設計した水冷式粉末捕集器を利用して回収する。得られたナノ粒子は、X 線回折とリードベルト解析による相同定、結晶子径、相割合等の平均的粒子性状の定量評価、並びにレーザー散乱と SEM 観察による凝集体構造解析、XPS 及び TEM-EELS を利用した複合構造粒子の化学的結合状態を主な分析法として進める。また、従来通りの手順に従い負極を形成した上で、特定の多元系に対しては、負極の複合構造化を進めるポスト処理を施す。これら負極を、Li 箔を対局とするハーフセルとして組み込み充放電試験を行い、初期容量、サイクル維持性等、充放電特性を評価する。電池特性と材料特性との対比より、理想的な負極開発の指針を得る。また、PS-PVD における急速共凝縮過程に対して、熱流体計算と核生成、エアロゾル成長モデルを錬成して、複合構造の形成過程の特徴解明を進めると共に、分子動力学を利用して直接担持する第二粒子の特徴を原子移動のスケールで解明し、多元系混合ガスの共凝縮・成長・凝集機構の理解に基づいた粒子複合構造化制御の指針提示を目指す。

## 4. 研究成果

### 4-1. Si:Ni 系ナノ粒子

所定の濃度に混合した Si と Ni 粉末原料を典型的な PS-PVD 条件のプラズマに投入した場合、30-40nm 程度の一次粒子が数 100nm 程度の凝集体を構成するナノ粒子の形成が確認された。図 1 に示す典型的な Si:Ni ナノ粒子の STEM-HAADF 像からも Ni が直接平滑な界面を介して Si ナノ粒子に担持する様子が確認され、界面近傍での格子像から NiSi<sub>2</sub> 相を介して結合していることが確認された。

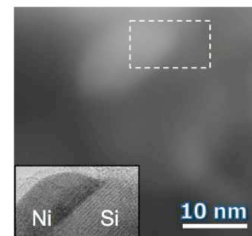


図 1 Si:Ni ナノ粒子の STEM-HAADF 像

この PS-PVD 条件下での Si の均質核生成は 2200K 程度と古典論より算出されることから、水冷式捕集器内におけるプラズマジェット内の温度・ガス線速分布の熱流体計算より得られる典型的なガス流線に従ったナノ粒子成長をエアロゾルモデルにより計算した。図 2 に示す核生成温度後の冷却曲線に従って Si

粒子は 30-40nm 程度成長することが予測され、実測されるナノ粒子も大凡捕集器内の凝縮冷却過程で形成されたものと言える。一方、Ni の均質核生成温度は 1450K 程度であるが、成長途中にある Si ナノ粒子上への不均質核生成を想定すると、Si の核生成後 10ms 程度経過した後の 15nm 程度の Si 粒子上に 1750K で Ni が安定的に付着するものと推測される。一方、TEM 像から確認される 10nm 強の Ni 粒子の融点は Gibbs-Thomson 効果より凡そ 1300K と見積もられる。従って、Ni は Si 粒子上に凡そ 40ms 溶融状態を維持することから、Si-Ni の拡散反応が進行することが予想され、NiSi<sub>2</sub>等シリサイド相の界面が形成されたものと出来る。

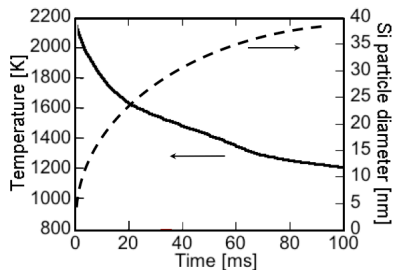


図 2 Si 核生成後の冷却曲線と Si 粒成長予測

この特徴的な Ni 担持 Si 粒子を負極として利用した場合の電池サイクル特性を図 3 に示す。Ni 添加の無い Si 粒子のみ[N-0]に対して、Ni を 1at%だけ添加しただけでも、高い容量を 100 サイクル維持出来ることが確認される。容量の減少傾向は Ni 添加有無に対して大凡類似であることから、初期段階での容量低下の抑制が高容量維持の一因と考えられる。即ち、結晶性 Si の大きな割れ抑制に担持 Ni が寄与しているものと思われる。実際、複数サイクル途中の電池の完全放電状態で分解した負極の XRD 結果より、50 回を超えても結晶性 Si が脱 Li 反応で確認されることから、エピタキシャル NiSi<sub>2</sub>相界面が結晶性 Si の核生成サイト或いは耐割れ性を高める様に機能しているものと予想される。

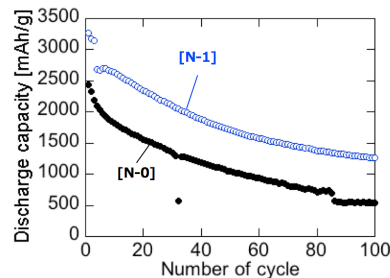


図 3 放電容量のサイクル依存性

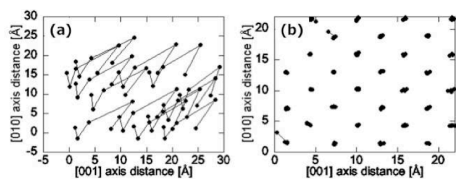


図 4 MD による Si-Li 合金化過程：(a)NiSi<sub>2</sub> 界面無し、(b)NiSi<sub>2</sub> 界面有り

図 4 に LAMMPS を利用した分子動力学計算による Si:Li 合金化仮定における、Li/Si=0.1 の領域での Si 原子の動きを示しているが、Ni 添加の無い場合、Si は Li 合金化に伴い 110 方向に原子移動するが、電池反応には殆ど寄与しない NiSi<sub>2</sub>相がある場合、Si は大きくは原子位置を変えずに Li を取り込む様子が確認された。従って、エピタキシャル NiSi<sub>2</sub>相は機械的にも電池反応に伴う Si の膨張を抑制させる効果もあり、これも高容量維持に貢献するものと示唆された。

#### 4-2.Si:Sn 系複合ナノ粒子

濡れ性の悪い Si-Sn 系共凝縮でも、90°を超える接触角ではあるものの、Sn の Si 粒子への直接担持構造が核生成モデルより想定される。従って、低融点 Sn をナノサイズで均質分散した負極前駆体を、バインダー除去の低温焼成にて Sn が溶融シリガメントとして Si ナノ粒子間を接続させた活物質のネットワーク構造化が期待される。さらに Sn 並びに SnO<sub>x</sub> も活物質であり導電性を有することから大気暴露後にも著しい特性劣化は無いものと想定した。

実際、急冷条件下での PS-PVD によって、30nm 程度の Si ナノ粒子に数 nm 程度の Sn ナノ粒子が担持した構造、且つ数 nm 厚の SnO<sub>x</sub> が Si 粒子表面をコーティングしている様子も TEM により確認された。これら粒子の XPS 測定からも金属 Sn と共に SnO<sub>2</sub> の存在が見受けられた。これら粒子を活物質として負極を形成した後に、Ar フロー中で 300°C 程度で数分アニールを施した結果、比較的高温で短時間のアニールを施した場合、特に負極表面で SnO<sub>2</sub>が増加する様子が確認された。

これらの負極を使用したハーフセルでのサイクル特性を図 5 に示すが、熱処理を施さない場合には、50 サイクルで 1500mAh/g 程度の容量が、比較的高温短時間のポストアニールを施した場合には 3000mAh/g を維持する極めて良好な電池特性が確認された。Sn 添加量、アニール温度・時間により増加の幅は変化するものの、明確に Sn 添加で熱処理を施すことで特性が向上した。ポリイミドバインダーのイミド反応量には有意な変化は確認されなかったことから、Sn がリガメントとして、また負極表面 SnO<sub>2</sub>が高 Li 濃度領域で良好な中間層として、充放電反応に伴う不可逆容量形成を効果的に抑制する働きがあることが判明した。

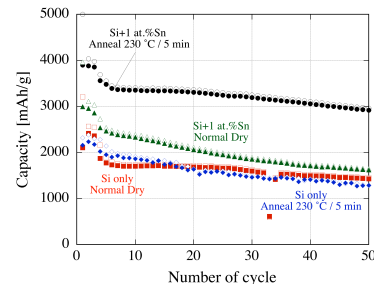


図 5 Si:Sn 系負極電池のサイクル特性

### 4-3. SiO 系ナノ粒状負極

Si 系負極材料として SiO を検討する場合、Si 単体に対して容量維持性の高さに優れるものの含有酸素に起因した不可相の形成のために初期効率が 50%程度となり容量が小さい。そのため還元による含有酸素量の低減が期待されるが、従来法では固体 SiO 表面の還元が進行し、容量維持性を劣化させるだけとなる。この点、PS-PVD 時の CH<sub>4</sub> 添加による還元法では、高効率還元と中心まで含めた還元が可能となり、容量増加が可能となる。加えて、凝縮後の SiO ナノ粒子がプラズマフレームの低温領域に晒されることで自発的な不均化反応に伴うコアシェル構造化が可能となり、容量増加とサイクル維持性が期待される。実際、図 6 に示す通り、特定の条件では容量増加とクーロン効率の増加が可能である事が確認された。また興味深い点は、高々数 ms のナノ粒子成長、10 分程度のプロセス時間で不均化反応が進行、完了する。そこで、実際の粒子構造を踏まえ、Si 拡散に基づく不均化反応モデルと連続冷却変態ダイアグラム(CCT)により構造化過程を解析し、ナノ粒子における不均化反応時の拡散係数を算出した結果、ナノ粒子化によって 2 桁程度拡散係数が大きくなること、還元が進んだ SiO<sub>x</sub> ほど更に促進されることが明らかとなった。また、ナノ SiO 粒子成長後の急速冷却の結果、アモルファス Si をコアとする不均化反応も可能となる更なる複合構造化が可能である事を明らかとした。

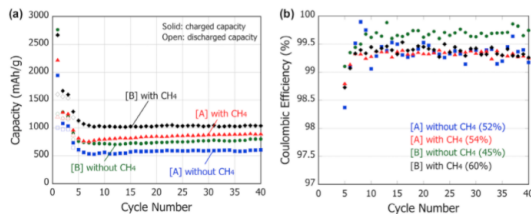


図 6 PS-PVD SiO<sub>x</sub> 負極の(a)容量と(b)クーロン効率のサイクル依存性

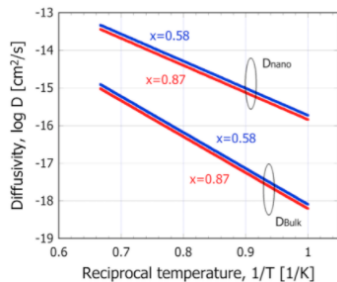


図 7 SiO 不均化反応時の Si 拡散係数の SiO<sub>x</sub> サイズ及び含有酸素量依存性

### 4-4. 高スループット製造

PS-PVD によるナノ粒子形成技術の産業移転を検討する場合には、原料粉末の大量投入が想定される。その場合、Si 分圧の増加に伴う粒子サイズの増加と共に、特に多元素混合原料を利用した共凝縮過程では、複合構造の形成過程も変調されると考えられる。そこで、実際に実験系プラズマスプレー装置を利用

して、産業移転の指標とされる 1kg/hr 相当のスループットでのナノ粒子生成の実証と、高スループットに起因する構造化の特徴を調査した。その結果、図 8 に示すナノ粒子サイズのモデル計算結果とほぼ同程度の粒子が形成されており、エアロゾルの粒成長モデルは、今回の処理量程度ではそのまま適用して予測に利用できることが確認された。一方、第 2 元素 Ni の不均質核生成温度は、分圧の増加に伴い 1831K から 2100K からまで増加することが予想された。この時の Si ナノ粒子サイズも 2.6nm から 11.2nm 程度の大きな Si 粒子への付着とすることが予想された。全粒子が同一サイズで初期 1%Ni で核生成すると仮定すれば、異なる粒子径上での Ni 核の形状から、同一 Ni 添加量ではあっても Si/Ni 界面積が 4.3 倍大きくなると推算された。これらの結果は、熔融状態で Si に担持する Ni と Si との合金化反応に関して、より高温領域に、より長い反応時間で、より広い界面積で進行する、ことを意味する。即ち、同一 PS-PVD 条件では、電池反応に見掛け不活性な SiNi 合金を多量に形成し不可逆容量を増加することに繋がる。実際、同一プラズマ条件下で 1kg/h で生成したナノ粒子には多量の Si-Ni 合金相の混在が確認された。これに伴って、これら粒子を負極活物質とした電池のサイクル特性は、図 10 に示す通り、合金相の多い条件では容量が大きく低下した。従って、4-1 で顕在化した Ni エピタキシャル担持の容量向上効果を引き出すためには、Ni 分圧を減少させた濃度で、Si ナノ粒子の粗大化を抑制する急速冷却条件を導入する必要があることが判明した。

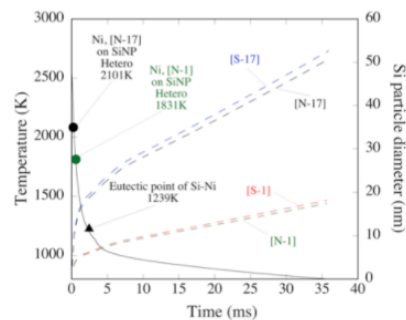


図 8 典型的な冷却履歴に従う Si ナノ粒子成長予測の原料供給量依存性。Ni 不均質核生成温度を●で示している。

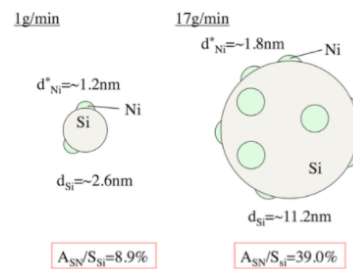


図 9 Ni 不均質核生成時の Si:Si ナノ構造予測。全粒子が同一サイズ、初期 Ni 濃度を仮定。

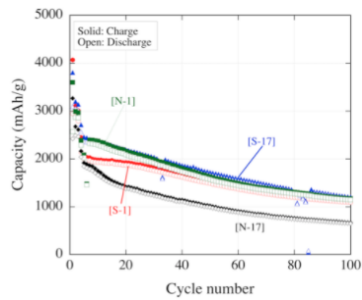


図 10 異なる原料処理量で作成した Si-Ni ナノ粒子を活性物質としたハーフセルのサイクル特性比較

一方で、Si 原料単体の場合には、高スループット処理によって一次粒子サイズは大きくなるものの耐割れ性の臨界サイズと報告される 150nm よりも十分に小さな 50nm 程度であり、かつ高次凝集体の形成が抑制されていた。その結果、充放電時の特に初期段階での容量減少が抑えられて、低スループット時と同程度か若干高い容量を維持しうる事が明らかとなった。

以上、本研究を通じて、PS-PVD による Si-M 系の急速共凝縮を利用する事により、特徴的な複合構造を有するナノ粒子の形成が可能で、電池サイクル特性の向上に有効であることを示した。とりわけ、負極形成後の更なるポストプロセスを導入すれば、飛躍的な特性向上も見出したことから、今後の条件の最適化により更に特性を引き上げることが出来るものと期待される。また、これらナノ粒子を産業移転の第 1 指標としての 1kg/hr で生成しうる事を示したことは本 PS-PVD の実産業での有用性を更に支持するものといえる。

## 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 5 件)

- (1) R.Ohta, K. Fukada, T. Tashiro, M. Dogakiuchi, M. Kambara, Effect of PS-PVD production throughput on Si nanoparticles for negative electrode of lithium ion batteries, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 51 (2018)105501.  
Doi:10.1088/1361-6463/aaab37
- (2) T. Tashiro, M. Dogakiuchi, M. Kambara, Instantaneous formation of SiOx nanocomposite for high capacity lithium ion batteries by enhanced disproportionation reaction during plasma spray physical vapor deposition, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 17 (2016) 744-752.  
Doi:10.1080/14686996.2016.1240574
- (3) K. Fukada, R. Ohta, M. Kambara, Enhanced cycle capacity of lithium ion batteries with nanocomposite Si anodes produced by rapid co-condensation in plasma spray PVD, *ECS*

*Trans.*, 77 (2017) 41-47.

Doi:10.1149/07703.0041ecst

- (4) 神原淳, シリコンのナノクラスター支援メゾプラズマ高速エピタキシー, 日本学術振興会第 131 委員会第 279 回研究会紀要, 279(2016)1-6.
- (5) 神原淳, プラズマスプレーPVD による次世代高密度リチウム 2 次電池向け Si 系ナノ複合負極開発, 日本学術振興会第 153 委員会第 129 回研究会紀要, 129(2016)1-6.

[学会発表] (計 28 件)

- (1) 本間啓一郎, 神原淳, プラズマスプレーPVD によるリチウムイオン電池用 SiO 系ナノ複合負極創製, 第 76 回応用物理学会秋季講演会, 2015 年 9 月 13-16 日
- (2) R. Ohta, Y. Ohta, T. Tashiro, M. Kambara, Production of composite Si nanoparticles by plasma spray PVD and CH<sup>4</sup> annealing for negative electrode of lithium ion batteries, 68<sup>th</sup> GEC, 2015/10/12-16.
- (3) (招待講演) 神原淳, プラズマスプレーPVD によるリチウムイオン電池向け Si 系ナノ複合ナノ粒子製造, 第 33 回次世代マイクロ化学チップ研究会, 2015 年 10 月 19 日
- (4) (招待講演) T. Tashiro, M. Kambara, Nanocomposite Si/SiOx particle formation through enhanced disproportionation reaction during plasma spray PVD, MRS-J, 2015/12/8-10.
- (5) (招待講演) 神原淳, プラズマスプレーPVD によるリチウムイオン電池向け Si 系複合ナノ粒子の開発, 技術情報協会セミナー, 2015 年 12 月 4 日
- (6) (招待講演) 神原淳, プラズマスプレーPVD によるリチウム 2 時電池負極用 Si 系ナノ複合粒子開発, 神奈川大オープンラボ第 17 回講演会, 2016 年 1 月 21 日
- (7) (招待講演) 神原淳, プラズマスプレーPVD によるリチウム 2 次電池負極向け Si 系ナノ粒子の高速複合化, 第 158 回日本金属学会, 2016 年 3 月 23-25 日
- (8) 深田航平, 太田遼至, 神原淳, プラズマスプレーPVD による Li イオン二次電池用 Si-Ni 複合ナノ負極の特性向上, 第 63 回応用物理学会春季講演会, 2016 年 3 月 19-22 日
- (9) (招待講演) 神原淳, シリコンのメゾプラズマ超高速エピタキシー, 日本学術振興会第 131 委員会第 279 回研究会, 2016 年 4 月 22 日
- (10) M. Kambara, et al., Nanocomposite Si-M particles produced by plasma spray PVD for high-density lithium ion batteries, ICMCTF 2016, 2016/4/25-29.
- (11) 神原淳, プラズマスプレー技術による高速・高品質ナノ粒子製造, ナノ粒子製造システム研究会, 2016 年 7 月 4 日
- (12) 神原淳, ナノクラスター支援メゾプラ

- ズマ高速沿面エピタキシャルオーバー成長, 第 74 回マテリアルズテラリング研究会, 2016 年 8 月 5 日
- (13) 深田航平, 太田遼至, 神原淳, プラズマスプレーPVD による Li イオン二次電池用 Si-Ni 複合ナノ負極の特性向上, 第 77 回応用物理学会秋期講演会, 2016 年 9 月 13-16 日
- (14) M. Kambara, et al., (4 authors), Lateral epitaxial overgrowth of silicon thick films during nanocluster assisted mesoplasma CVD, 69<sup>th</sup> GEC, 2016/10/10-16
- (15) (招待講演) M. Kambara, Plasma spray PVD for nanoparticulate Si composite anodes of high density lithium ion batteries, NTI-UT Joint Conference, 2016/11/30-12/1
- (16) (招待講演) 神原淳, プラズマスプレーPVD による次世代高密度リチウム 2 次電池向け Si 系ナノ複合負極開発, 日本学術振興会第 153 委員会第 129 回研究会, 2016 年 12 月 9 日
- (17) M. Kambara, Enhanced cycle capacity of lithium ion batteries with Ni-epitaxially-attached Si nanoparticles as anode produced by plasma spray physical vapor deposition, 26<sup>th</sup> MRS-J, 2016/12/19-22
- (18) S. Hamazaki et al., (6 authors, 7th), Production of SiO nanoparticles with reduced oxygen content by pulse-modulated plasma spray PVD for an increase in capacity of LiBs, (poster) 26<sup>th</sup> MRS-J, 2016/19-22
- (19) 神原淳, 田代亘, 熱プラズマスプレーPVD による Li イオン電池負極向け Si 系ナノ複合粒子開発, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 27-29 日
- (20) 太田遼至, 道垣内将司, 神原淳, 高スループット PS-PVD による Si ナノ粒子の構造変調と Li イオン電池特性, 第 65 回応用物理学会, 2018 年
- (21) 東原智秋, 太田遼至, 神原淳, PS-PVD ナノ Si:Sn 粒子を用いた負極複合化による LiB 特性向上, 第 65 回応用物理学会, 2018 年
- (22) (招待講演) M. Kambara, T. Tohara, R. Ohta, Enhancement in capacity of lithium ion batteries with composite Si:Sn nanoparticulate anode produced through co-condensation in PS-PVD, MRS-J, 2017 年
- (23) 神原淳, メゾプラズマナノクラスターを利用したエピタキシャルブリッジング, Plasma Conference 2018, 2017 年
- (24) (招待講演) M. Kambara, T. Tohara, R. Ohta, Enhanced cyclability with plasma sprayed Si-M nanocomposite anodes for lithium ion batteries, AEPSE2017, 2017.
- (25) (招待講演) 神原淳, 新たな材料プロセスングに向けた熱プラズマスプレー

の挑戦, 日本学術振興会第 153 委員会 30 周年記念講演会, 2017 年

- (26) M. Kambara, K. Fukada, R. Ohta, T. Tohara, N. Gerile, Enhanced cycle capacity of lithium ion batteries with nanocomposite Si anodes produced by rapid co-condensation in plasma spray PVD, ECS 2017, 2017.
- (27) (招待講演) M. Kambara, Nanocomposite Si particle production by plasma spray PVD for next generation high energy density lithium ion batteries, 22<sup>nd</sup> Korea-Japan Workshop, 2017.
- (28) M. Kambara, R. Yamada, S. Wu, Nanocluster assisted mesoplasma epitaxial bridging, ICMCTF 2017, 2017.

[図書] (計 1 件)

- (1) M. Kambara, H. Hideshima, M. Kaga, T. Yoshida, Plasma spray PVD: High throughput production of nanoparticles, Encyclopedia Plasma Technol., Taylor & Francis, (2017) 1176-1190.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: リチウムイオン二次電池用負極の製造方法, 負極, 及び負極活物質  
 発明者: 神原淳, 東原智秋, 太田遼至  
 権利者: 神原淳, 東原智秋, 太田遼至  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2017-106031  
 出願年月日: 2017 年 5 月 29 日  
 国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ: [www.plasma.t.u-tokyo.ac.jp](http://www.plasma.t.u-tokyo.ac.jp)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神原 淳 (**Kambara, Makoto**)  
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
 研究者番号: 80359661