

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21550172

研究課題名（和文）ガスデポジション法によるリチウム二次電池用ケイ素-合金コンポジット厚膜電極の創製

研究課題名（英文）Synthesis of Silicon-Alloy Composite Thick-Film Anodes Using Gas-Deposition for Lithium Secondary Batteries

研究代表者

坂口 裕樹（SAKAGUCHI HIROKI）

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00202086

研究成果の概要（和文）：ケイ素は次世代のリチウム二次電池負極材料として期待されているが充放電サイクル寿命に乏しい等の問題がある。これらを克服するために、種々の遷移金属シリサイドとのコンポジット化を図ると共にガスデポジション法による厚膜電極化を行った。結果としてLaSi₂とのコンポジットが最も優れた負極特性を示すことがわかった。その理由が、LaSi₂が適度なリチウム貯蔵能を有していること、化合物として安定であり分解されにくいこと、電子伝導性が高いこと、ならびにSiの膨張-収縮の応力を緩和する機械的性質を有していることの協奏効果によることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Thick-film electrodes of composite active materials consisted of Si and various metal silicides were prepared by mechanical alloying followed by gas deposition for anodes of Li-ion batteries. We investigated a relationship between the performance of these electrodes and properties of the silicides, the electrical resistivity, the referential breaking strength, and the thermodynamic stability. The LaSi₂/Si composite electrode exhibited superb cycling performance. It is suggested that thermodynamically stable LaSi₂ in the composite electrode can improve the electrical conductivity of the electrode and can release the stress induced by a volumetric change of Si for a long period.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：電気化学，電池

科研費の分科・細目：材料化学・機能材料・デバイス

キーワード：リチウム二次電池，負極，ケイ素，合金，シリサイド，ガスデポジション，厚膜

1. 研究開始当初の背景

車載用電源への展開を視野に入れ、リチウム二次電池への高エネルギー密度化の要求が一層強くなっている。負極材料を見た場合、ここ数年は「リチウムを可逆的に吸蔵-脱離できる金属あるいは合金」に多大な関心が寄

せられており、最近では、これらを一部使用した電池が商品化されるようになってきている。

リチウム貯蔵金属・合金の主体となる元素はSi, GeおよびSnの14属元素であるが、これらの元素を用いた電極は、充放電初期の

不可逆容量が大きくサイクル安定性（寿命）に乏しいことが大きな難点である。金属系電極の乏しいサイクル特性は、リチウムが挿入-脱離する際の大きな体積変化により、活物質層が集電体から容易に崩壊・はく離してしまうことに起因する。

申請者は電極の崩壊を活物質の本質とはみしておらず、電極作製法の工夫で解決できると考え、「ガスデポジション(GD)法」の適用を着想した。GD法では、活物質粒子が高速で集電体基板に衝突するため、粒子-基板および粒子同士の密着性に極めて優れた電極となることが期待できる。さらに、得られる膜は粉体の凝集体であるので内部に適度に空隙を存在させることができることから、活物質の膨張-収縮に対し大きなじん性を有する電極となることが予測できる。実際、申請者らはこれまでに、14族単体ならびにそれらを基体とする種々の金属系材料をGD法により厚膜電極とし優れた電極特性が得られることを実証してきた。

負極の容量を飛躍的に高めるためには、黒鉛の10倍以上もの理論容量(4200 mA h g^{-1})を有するケイ素の活用が必定と目される。しかしながら、ケイ素は電子伝導性が低くリチウム拡散係数が小さいうえに、その硬度の高さゆえにリチウム挿入-脱離による体積変化により簡単に微粉化してしまい単体では大変扱いにくい。それらの欠点を改善するために化合物化や多元素化が行われているが、肝心の容量が激減してしまい現状では有効なものとはなっていない。様々な検討を行ってきた結果、ひとつの結論として申請者はケイ素を単体として用いることとした。そして、その欠点を補うことを念頭に置いて、ケイ素と充放電サイクル安定性に優れたケイ化合物（シリサイド）との共晶組成物質をメカニカルアロイングにより調製した。さらにこれを原料として、GD法を用いてコンポジット厚膜負極の創製を行った。

2. 研究の目的

上述のケイ素コンポジット電極において、シリサイドはマトリックスの働きを担っている。申請者が想定するそのマトリックスに必要な要素は、①ケイ素の膨張-収縮で生じる応力を緩和でき、②ケイ素より導電性が高く導電助剤として働き、③ある程度のリチウム貯蔵能を有しリチウムの拡散パスとして機能し、さらに④マトリックス自身が充放電中に分解されない安定な物質であることである。これらのことを踏まえてリチウム貯蔵能や熱力学的安定性の異なるいくつかの遷移金属シリサイドを選定し、マトリックスの性質が電極性能に与える影響を調査することを本研究の主目的とした。

3. 研究の方法

シリサイドとする遷移金属にはV, Fe, NiおよびLaを選択した。それらとSiとのコンポジット粉体は、Laシリサイド/Siコンポジットを例にすると、Laシリサイドの最もSiリッチな安定相である LaSi_2 の化学量論比よりもSiを過剰に、かつ LaSi_2 とSiの重量比が70:30となるようにLaチップとSi粉末をボールミル容器に仕込み、メカニカルアロイング(MA)処理を行うことにより調製した。 LaSi_2 とSiの重量比は、比率を変えた実験を行い最適化して決めたものである。

このようにして得られた試料粉末を原料として、GD法によりCu箔基板(厚さ $20 \mu\text{m}$)上に厚膜を形成させた。製膜は基本的に、キャリアーガスにAr(4 N)、圧力差 $7.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、ノズル径 0.8 mm 、ノズルと基板との距離 10 mm の条件で行った。

得られた厚膜電極を試験極とし、対極・参照極にリチウム板を、電解液に $1 \text{ M LiClO}_4/\text{PC}$ や種々のイオン液体（ビペリジニウム系カチオン*N*-methyl-*N*-propylpiperidinium [PP13⁺]、イミダゾリウム系カチオン1-ethyl-3-methylimidazolium [EMI⁺]およびアミド系アニオン(bis(trifluoromethanesulfonyl)amide [TFSA⁻]あるいはbis(fluoro-sulfonyl)amide[FSA⁻]))を用いて三極式セルを構築した。電気化学的測定として充放電測定(電流値 0.1 mA 、電位幅 $0.005 - 2.000 \text{ V}$)以外に、サイクリックボルタンメトリーおよび交流インピーダンス測定も行った。

4. 研究成果

(1) 負極特性

本研究で得られた種々のシリサイド/Siコンポジット電極の第1サイクル目の充放電曲線のみをみると、いずれのコンポジット電極においてもSi単独電極で見られる充電側 0.1 V 付近と放電側 0.4 V 付近の電位プラトーが観測されたことから、コンポジット電極における充放電容量は本質的に単体ケイ素の部分が担っていると考えられる。ただし、 LaSi_2/Si 電極は電位プラトーの平坦性が高かったのに対し、他のコンポジット電極のそれは傾いており、Si-Liの固溶領域が広がっていることが示唆された。

これらの電極の充放電サイクル数にともなう放電容量の推移をFig. 1に示す。Si単独電極の放電容量は、第1サイクルでは 2000 mA h g^{-1} 程度と大きいものの100サイクルまでの間に大きく減衰してしまう。これは、充放電時の体積変化によって生じる応力により電極が崩壊してしまうためである。他方、 NiSi_2/Si を除くシリサイド/Siコンポジット電極は、Si単独電極で観測された容量減衰が見られずサイクル安定性が向上しているこ

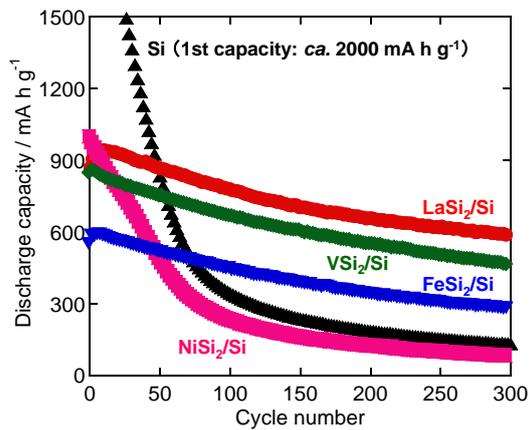


Fig. 1 Cycle performance of various silicides/Si composite electrodes.

とがわかった. 特に, LaSi_2/Si 電極は, 300 サイクルで約 600 mA h g^{-1} , 1000 サイクル後でさえ 400 mA h g^{-1} 以上の高容量を維持する非常に優れたサイクル特性を示した. 他のコンポジット電極については, VSi_2/Si 電極は LaSi_2/Si 電極に次ぐ性能を有しており, また, FeSi_2/Si 電極は初期の放電容量が小さくその性能は際立ったものではなかったが, Si 単独電極よりは優れた性能を示すことがわかった. ただし, NiSi_2/Si 電極に関しては, 初期放電容量こそ LaSi_2/Si 電極を上回るものの, サイクル安定性は Si 単独電極をしのぐものではなかった.

最も特性の良かった LaSi_2/Si 電極については, LaSi_2 と Si の混合比率を変化させて電極試験を行い, 結果として $\text{LaSi}_2 : \text{Si} = 70 : 30$ 辺りの重量比が最適であることを見出した.

このように, マトリックスとしてシリサイドを用いることでケイ素電極の性能を改善できること, またシリサイドの種類を変えることでコンポジット電極の性能に違いが生じることが明らかになった. これらの電極性能の向上や相違の要因についてシリサイドの様々な性質を基に以下に考察する.

(2) 電極性能向上の理由

遷移金属シリサイドの負極特性と熱力学的安定性

始めに, コンポジット電極においてマトリックスとなるシリサイドの単独電極としての性能を調べた. いずれのシリサイド電極も, ケイ素単体電極と比べて化合物になると初期充放電容量が極端に小さくなることがわかった. そこにはシリサイドの化合物としての熱力学的安定性とリチウムとの反応性との相関がある.

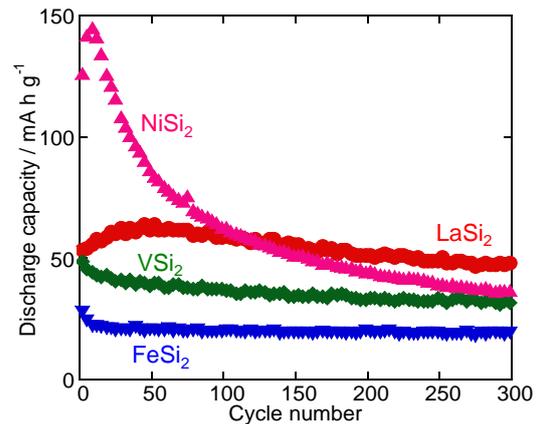
Table 1 には, 熱力学的安定性を示すパラメーターとして溶解エンタルピー変化の値を取り上げ, 種々の遷移金属シリサイドについてその値を示すとともに, 各々の電極の初

	Enthalpy of solution / kJ mol^{-1}			1st capacity / mA h g^{-1}
	La-Si	High	La-Li	
LaSi_2	-232	↑ Stability	+24	55
VSi_2	-125		+143	50
NiSi_2	-92		+3	120
FeSi_2	-71		+95	30
FeSn_2	+45		+95	500

discharge capacity for transition metal silicides.

Fig. 2 Discharge capacities of thick-film electrodes consisted of various silicides.

期放電容量の値を対比して示す. 比較として Fe-Sn 合金の溶解エンタルピー変化と初期放電容量を示しているが, Sn は Fe との親和性よりも Li との親和性の方が高いために, Li が挿入されると Fe-Sn 合金は分解し Li_xSn 合金が形成されることになる. これが置換反応型



の合金系電極が大きな充放電容量を示す理由である. 一方, シリサイドに関しては, Si は Li との親和性よりも遷移金属との親和性が高いので充放電中に分解されにくい, このことは裏返せばシリサイドの低いリチウム貯蔵能を物語っている.

これらの電極のサイクル数にともなう放電容量の推移を見てみると (Fig. 2), シリサイドのなかでは比較的初期放電容量の大きい NiSi_2 電極については, 初期の 40 サイクルまでの間に急激な容量減衰が確認された. 一方, 初期放電容量の小さい V, Fe および La のシリサイド電極に関しては, そのような容量の減衰はなく極めて安定なサイクル特性を示した.

これらの結果から, 適度なリチウム貯蔵能を有しサイクル安定性に優れたシリサイドを用いることが, ケイ素系コンポジット電極において高い容量と優れたサイクル安定性を両立させたひとつの要因であると考えた.

シリサイドの導電助剤としての機能

ケイ素は電子伝導性が低いため, マトリックスとなるシリサイドには導電助剤としての働きが期待される. 独自に作製した粉体用電気抵抗測定容器とプレス機を用いて得られたシリサイド圧縮粉体の抵抗率はいずれも $6.5 \Omega \text{ cm}$ 以下であり, 単体ケイ素の約 $1.6 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ と比べて極端に低い値を示した. したがって, 期待通りシリサイドは導電助剤として機能しているものと推察した.

このことを裏付けるために, LaSi_2/Si に対

してサイクリックボルタンメトリー (CV) を行った。サイクル数が少ない間は両電極の間にプロファイルの違いはほとんど見られないが、Si 単独電極においては充放電を繰り返すにともないピークが高電位側へシフトし大きな過電圧が発生することがわかった。しかしながら、コンポジット電極は 500 サイクルを経てもプロファイルに大きな変化は現れないことから、シリサイドが良好な導電助剤としても作用していることが確認された。

シリサイドの応力緩和機能

コンポジット電極のサイクル寿命の向上は、マトリックスとしてのシリサイドの機械的性質よるものと考えられるのでその定量的評価を行った。その測定には、微小圧縮試験機と超微小硬度計の 2 つの装置が一体となったダイナミック超微小硬度計を用いた。微小圧縮試験機では、本研究で取り上げた種々のシリサイド粒子の変形のし易さを表す参考破壊強度が得られる。測定の結果、すべてのシリサイドはケイ素よりも破壊強度が小さく、したがって変形し易いことがわかった。

次に、超微小硬度計を用いてケイ素単独電極や種々のコンポジット電極の押し込み弾性率の測定を行った。サイクル特性の乏しかった Si 単独電極は弾性率が小さいが、コンポジット電極ではいずれも Si 単独電極と比較して 3 倍～数倍の大きな弾性率を有することが示された。このことは、ケイ素はシリサイドとコンポジット化されることで壊れにくくなっていることを明瞭に示すものである。

これらの測定により、シリサイド相は Si 相よりも軟らかく弾性的な性質を示すことがわかり、シリサイド相は Si 相の体積変化によって生じる応力を効果的に緩和し、電極の崩壊を抑制していることが強く裏付けられた。

4. 3 イオン液体電解液の適用によるケイ素電極の性能向上

Fig. 3 は 2 種類のイオン液体および PC を用いた電解液中における Si 厚膜電極の充放電特性を示す。イオン液体電解液を用いたときの Si 負極は有機電解液でみられるような急激な容量衰退が起きず、良好なサイクル性

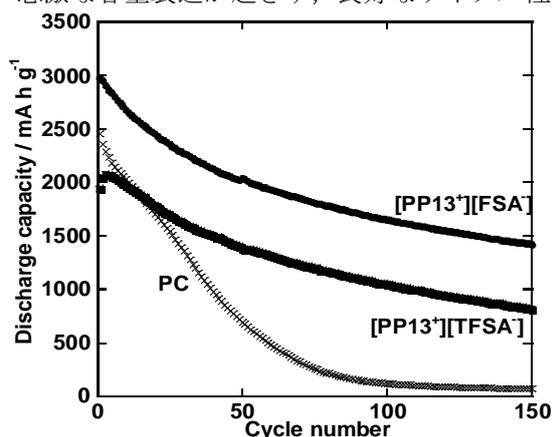


Fig. 3 Cycle performance of Si thick-film electrodes in ionic liquids of [PP13⁺][TFSA] and [PP13⁺][FSA], and in commercial organic solvent of PC.

能を示した。特に、[PP13⁺]と[FSA⁻]との組み合わせからなるイオン液体では、Si負極の初期放電容量は 2980 mA h g⁻¹と最も高い値を示し、150 サイクルまで約 1500 mA h g⁻¹に近い容量を維持することができた。交流インピーダンス測定の結果から、その理由は、LiのSi電極への挿入-脱離の際にイオン液体電解液中のアニオンの溶媒和-脱溶媒和がよりスムーズに行われるようになったためであることが示唆された。

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 H. Usui, H. Sakaguchi, Li-insertion/extraction properties of Si thick-film anodes in ionic liquid electrolytes based on bis(fluorosulfonyl)amide and bis(trifluoromethanesulfonyl)amide anions, *Chem Lett.*, **5**, 2012, 521-522. 査読有
- ② H. Usui, H. Sakaguchi, Anode Properties of Composite Thick-Film Electrodes Consisted of Si and Various Metal Silicides, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **6**, 2011, 2246-2254. 査読有
- ③ H. Usui, H. Sakaguchi, Application of electrolyte using novel ionic liquid to Si thick film anode of Li-ion battery, *J. Power Sources*, **196**, 2011, 3911-3915. 査読有
- ④ H. Usui, H. Sakaguchi, Anode properties of Ru-coated Si thick film electrodes prepared by gas-deposition, *J. Power Sources*, **195**, 2010, 3649-3654. 査読有
- ⑤ H. Sakaguchi, Anode Properties of LaSi₂/Si Composite Thick-Film Electrodes for Lithium Secondary Batteries, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, **1**, 2009, 012030-1-5. 査読有

[学会発表] (計 31 件)

- ① 坂口裕樹, 二次電池の現状と将来, 日本機械学会中国四国支部 第 114 回講習会, 平成 24 年 1 月 20 日, 鳥取大学広報センター

②坂口裕樹, 薄井洋行, 種々のイオン液体電解液が LaSi₂/Siコンポジット厚膜電極のリチウム二次電池負極性能に与える影響, 第3回関西電気化学研究会, 平成23年12月10日, 関西大学 千里山キャンパス

③坂口裕樹, 薄井洋行, 種々のイオン液体電解液に対するSi系ガスデポジション厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 第52回電池討論会, 平成23年10月18日, タワーホール船堀

④坂口裕樹, 薄井洋行, Si系厚膜負極を用いたリチウムイオン電池の性能, 第52回電池討論会, 平成23年10月18日, タワーホール船堀

⑤坂口裕樹, 薄井洋行, イオン液体中におけるLaSi₂/Siコンポジット厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 第52回電池討論会, 平成23年10月18日, タワーホール船堀

⑥坂口裕樹, 薄井洋行, 遷移金属シリサイド-ケイ素系コンポジット厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 第52回電池討論会, 平成23年10月18日, タワーホール船堀

⑦ H. Usui, H. Sakaguchi, Thick-Film Electrodes Consisted of Si and Transition Metal Silicides Prepared by Gas-Deposition for Anodes of Li-Ion Batteries, 220th ECS Meeting and Electrochemical Energy Summit, 平成23年10月12日, ウェスティン ボストン

⑧薄井洋行, 坂口裕樹, ケイ素とガスデポジション法を用いた次世代リチウム二次電池用負極の創製, 2011年度 電気化学会 関西支部 鳥取地区講演会, 平成23年9月22日, 鳥取大学 工学部 大講義室

⑨H. Usui, H. Sakaguchi, Thick-film anodes of Si-based materials in ionic liquids for Li-ion batteries, The 62nd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, 平成23年9月10日, 朱鷺メッセ

⑩坂口裕樹, 薄井洋行, リチウム二次電池用Si厚膜負極へのイオン液体電解液の適応性, 2011年電気化学秋季大会, 平成23年9月10日, 朱鷺メッセ

⑪坂口裕樹, 薄井洋行, 遷移金属シリサイドがケイ素系電極のリチウム二次電池負極特性におよぼす影響, 2011年電気化学秋季大会, 平成23年9月10日, 朱鷺メッセ

⑫薄井洋行, 坂口裕樹, 希土類金属シリサイドとケイ素からなるリチウム二次電池厚膜負極の評価, 第28回希土類討論会, 平成23年5月13日, タワーホール船堀

⑬坂口裕樹, 薄井洋行, 種々のイオン液体電解液に対するSi厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 電気化学会第78回大会, 平成22年3月29日, 横浜国立大学

⑭坂口裕樹, 薄井洋行, ケイ素負極の性能に

およぼす種々のシリサイドの影響, 電気化学会第78回大会, 平成22年3月29日, 横浜国立大学

⑮薄井洋行, 坂口裕樹, イオン液体のカチオン構造が Si 厚膜電極のリチウム二次電池負極特性におよぼす影響, 第1回イオン液体討論会, 平成23年1月17日, とりぎん文化会館

⑯坂口裕樹, 薄井洋行, ケイ素系コンポジット厚膜負極を用いたリチウム二次電池の性能, 第51回電池討論会, 平成22年11月9日, 愛知県産業労働センター

⑰坂口裕樹, 薄井洋行, 種々のシリサイドとSiとのコンポジット厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 第51回電池討論会, 平成22年11月9日, 愛知県産業労働センター

⑱坂口裕樹, 次世代車載用リチウム二次電池のための金属・合金系負極の創製, 第108回金属物性研究会, 平成22年10月18日, 鳥取大学工学部

⑲坂口裕樹, 薄井洋行, リチウム二次電池負極のためのLa-Ge系金属間化合物の創製とその電極特性, 2010年電気化学秋季大会, 平成22年9月2日, 神奈川工科大学

⑳坂口裕樹, 薄井洋行, ガスデポジション法により作製した La-Si/Si 複合厚膜電極の負極特性, 2010年電気化学秋季大会, 平成22年9月2日, 神奈川工科大学

㉑薄井洋行, 坂口裕樹, 軽希土類金属を用いて作製したリチウム二次電池用厚膜電極の負極特性, 第27回希土類討論会, 平成22年5月28日, 北九州国際会議場

㉒坂口裕樹, 次世代金属負極材料の開発～ケイ素系コンポジット厚膜電極の創製とその負極特性～, サイエンス&テクノロジー・セミナー, 平成21年12月18日, 東京・千代田区駿河台 総評会館

㉓坂口裕樹, 薄井洋行, 遷移金属シリサイドとケイ素とのコンポジット厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 第50回電池討論会, 平成21年12月2日, 京都国際会館

㉔坂口裕樹, 薄井洋行, ガスデポジション法によって作製した希土類金属-ケイ素合金負極の電気化学的特性, 第50回電池討論会, 平成21年12月2日, 京都国際会館

㉕坂口裕樹, 薄井洋行, ガスデポジション法を用いたリチウム二次電池用電極の作製, 第3回関西電気化学研究会, 平成21年11月28日, 神戸大学 六甲ホール

㉖坂口裕樹, 研究・開発のための電気化学測定, 次世代負極材料の開発・評価, 電気化学会電気化学セミナー4 (2009), 平成21年10月16日, 東京理科大学森戸記念館

㉗坂口裕樹, 薄井洋行, FeSi₂/Siコンポジット厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 2009年電気化学秋季大会, 平成21年9月10日, 東京農工大学 小金井キャンパス

⑳坂口裕樹, 薄井洋行, 種々のガスを用いて作製した合金系ガスデポジション厚膜電極のリチウム二次電池負極特性, 2009年電気化学秋季大会, 平成21年9月10日, 東京農工大学 小金井キャンパス

㉑坂口裕樹, 車載用リチウム二次電池のための金属系負極の創製, 平成21年度岡山大学次世代研究者・異分野研究連携育成支援事業第2交流シンポジウム 大型化と高出力化を指向したリチウムイオン二次電池の設計と開発, 平成21年8月29日, 岡山大学理学部

㉒坂口裕樹, 大型リチウムイオン電池用負極材料の最新動向と展望, メガトレンド・セミナー, 平成21年7月14日, 東京・御茶ノ水・総評会館

㉓坂口裕樹, Li電池用負極材料の開発～車載用を意識した次世代金属系負極の創製～, サイエンス&テクノロジー・セミナー, 平成21年4月23日, 東京流通センター

[図書] (計12件)

①坂口裕樹他, 丸善, レアメタル便覧 第20章 第2節 第4項 リチウムイオン二次電池, 2011, pp. 293-300.

②薄井洋行, 坂口裕樹, シーエムシー出版, 粉体技術と次世代電池開発 第7章 第4節 ガスデポジション法による金属・合金系/ケイ素コンポジット負極の開発, 2011, pp. 186-192.

③薄井洋行, 坂口裕樹, 情報機構, EV/HEV用電池と周辺機器・給電システムの最適化・高効率化技術 第3章 第4節 第3項 負極材料の最新事例, 2011, pp. 121-132.

④薄井洋行, 坂口裕樹, 化学工業社, 化学工業<特集>リチウムイオン二次電池の新展開, 2011, pp. 47-51.

⑤坂口裕樹, 薄井洋行, 電気化学会, 電気化学および工業物理化学 (Electrochemistry) 次世代リチウム二次電池用ケイ素系コンポジット厚膜負極の創製, 2012, pp.45-50.

⑥薄井洋行, 坂口裕樹, 工業通信, 化学装置 次世代リチウムイオン電池用 Si 系負極の作製および評価装置, 2012, pp.32-33.

⑦薄井洋行, 坂口裕樹, 工業調査会, 電子材料 4月号 特集1 ビギナーのための「よくわかる2次電池」リチウムイオン電池用負極材料の最新動向, 2011, pp24-28.

⑧坂口裕樹, 薄井洋行, 情報機構, リチウムイオン二次電池の電極・電池材料 第3章 第2節 ケイ素系コンポジット厚膜負極の新展開, 2011, pp.91-97.

⑨薄井洋行, 坂口裕樹, サイエンス&テクノロジー, 剥離対策と接着・密着性の向上, 第1章 第10節 リチウムイオン電池用電極活物質の集電体からの剥離対策, 2011, pp.128-139.

⑩薄井洋行, 坂口裕樹, シーエムシー出版, リチウムイオン電池の開発と市場, 第3章 負極材料, 2010, pp.28-45.

⑪薄井洋行, 坂口裕樹, 技術情報協会, Li二次電池電極材料のスラリー調整, 3.3.1 金属系負極活物質の創製とサイクル特性向上技術, 2009, pp.339-351.

⑫坂口裕樹, エヌティーエス, 高性能蓄電池, 1.5.1 電極作製にガスデポジション法を利用したリチウム二次電池の開発, 2009, pp.137-148.

[その他]

http://www.chem.tottori-u.ac.jp/~sakaguchi/research_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂口 裕樹 (SAKAGUCHI HIROKI)
鳥取大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00202086

(2) 研究分担者

薄井 洋行 (USUI HIROYUKI)
鳥取大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60423240