

審査の結果の要旨

氏名 高橋 克則

本論文は、「Template-based growth of vanadium oxide nanorod arrays and their composites: synthesis by electrochemical and electrophoretic deposition and utilization for resource recovery from steelmaking slag (酸化バナジウムおよびコンポジットのナノロッドのテンプレートを用いた成長:電気化学法および電気泳動法による合成と製鋼スラグからの資源回収への利用)」と題し、主に、水溶液からの電気化学法、電気泳動法とテンプレート法とを組み合わせた酸化バナジウムのナノロッドの合成と応用に関する研究成果をまとめたものであり、全7章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、既往の研究および論文の構成とその概要が述べられている。はじめに、鉄鋼スラグの特徴と最近の利用状況をまとめ、今後の方向性として高付加価値物質をスラグから抽出する技術を挙げ、対象として酸化バナジウムを提示している。既往の研究について、水溶液を介した抽出技術、酸化バナジウムのナノ構造物の研究を中心に概観した上で、経済的なナノ構造物製造技術として、テンプレート法と電気化学法、電気泳動法の組み合わせによる酸化バナジウムナノロッドの製造を提案し、その可能性を述べている。

第2章では、テンプレート法に、電気化学法、電気泳動法を組み合わせることによる、酸化バナジウムのナノロッドの形成に関する研究結果についてまとめている。2種類の電気化学法、およびゾルの電気泳動法の計3種類の反応経路を検討した結果、いずれからもナノロッドが形成可能な条件があることを見出し、提案した合成プロセスの有効性を示している。得られたナノロッドは、成長方向が $\langle 010 \rangle$ の単結晶であることを示し、成長メカニズムについて、電気化学法では、テンプレート壁面との相互作用および成長に伴う選択配向の複合効果、電気泳動法では、外部場の影響などによるエピタキシャルな凝集機構によるものと考察している。

第3章では、酸化バナジウムナノロッドの電気化学特性、エレクトロクロミック特性について検討している。酸化バナジウムナノロッドは速い充放電特性を持ち、薄膜と比較して5倍程度の電流密度が得られることを実験的に示している。エレクトロクロミック特性においても、光透過率変化応答が速いこと、飽和到達時間が短いことを見出している。この理由として、ナノロッドが単結晶であり、リチウムイオンの拡散ルートとなるレイヤーが電極に対して垂直に分布している、という微構造的特徴と結び付けて説明している。

第4章では、リチウムの拡散を容易にするため、酸化バナジウムに酸化チタンを添加することを提案し、評価している。テンプレート中で酸化バナジウムと酸化チタンの複合ナノロッドを形成できることを示し、酸化チタン添加量には最適値があり、25%を超えて添加すると、電気容量が低下することを実験的に示している。

第5章では、電気化学キャパシタとしての応用を想定し、電気容量の改善と電荷授受の高速化のために、導電体と酸化バナジウムの複合構造化を検討している。ニッケルのロッド上に酸化バナジウム水和物をコーティングしたナノケーブルの形成を2段階反応により実現している。酸化バナジウムの単位重量あたりの電気容量は、通常のナノロッドに比べて最大 10 倍程度に増加することを示している。

第6章では、実際の製鋼スラグからのバナジウム抽出を検討し、抽出液からのナノロッドの形成を検討している。pH<1.5 の硫酸により効率的に抽出が可能で、抽出液から酸化バナジウムを主相とするロッドが形成できることを示している。製造条件の最適化に課題は残されるが、天然原料に競合しようと試算している。

第7章では、第2章から第6章に記載した内容を総括するとともに、実用化のために残された課題について述べている。

以上のように、本論文では酸化バナジウムのナノ構造物の新規合成方法として、テンプレート法と電気化学法、電気泳動法を組み合わせた方法を提案し、その有効性を検討したものである。ナノロッドが合成できる条件を明確にし、本プロセスにより得られたロッドの微細構造を明らかにし、更に電気化学的特性を示した。応用技術として、複合酸化物ロッド、金属との複合構造の提案と評価を行い、さらに、実際の鉄鋼スラグでの適用可能性を示した。本論文の内容は、提案プロセスがナノロッドを効率的かつ均質に作製するために有効であることを立証したものであり、化学システム工学、材料工学への貢献は大きいものと考えられる。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。