

審査の結果の要旨

氏 名 瀧 口 博 明

本論文は、太陽電池用の高純度 Si（多結晶 Si 及び単結晶 Si）を対象に、その循環利用の検討と評価手法の開発・適用を行ったものであり、全 6 章から構成される。

第 1 章では、序論として、低炭素化に対応しつつ循環利用を促進する高機能マテリアルの開発・導入の必要性や、太陽光発電導入の推移や高純度 Si の需給の状況を踏まえて、高純度 Si の希少資源としての有効利用、特に循環利用が検討すべき課題であることが示され、本研究の目的が述べられている。

第 2 章では、日本を対象に、高純度 Si の利用形態を定量的に把握し、供給上の課題とその対応策が論じられている。その手法として、空間と時間で定義されたシステム内で、物質の流れと収支バランスを定量的に明らかにするマテリアルフローが作成、分析されている。具体的には、日本における Si の 1996 年から 2007 年までのマテリアルフローが作られ、高純度 Si の製造から利用に至る収支のバランスが、その時系列的な変化とともに示されている。特に、多結晶 Si 及び単結晶 Si の製造工程における投入量と産出量から資源の有効利用の程度を定量的に測る指標として、資源有効利用指数（Resource Effective-use Index; REI）が開発・適用され、Si 供給の持続可能性について論じられている。

分析の結果、太陽電池用結晶 Si の需要が増加し、2000 年以降は半導体用 Si の製造工程での規格外品でカバーできず、エネルギー多消費型プロセスにより太陽電池用の多結晶 Si が生産され、供給形態の変化が認められた。また、多結晶 Si の資源有効利用指数の分析により、これまで多結晶 Si の有効利用が進んできたものの、近年は頭打ちの状況となり、単結晶 Si の有効利用の程度は減少する傾向にあることが明らかになった。

マテリアルフロー分析の結果を踏まえ、今後、高純度 Si、特に多結晶 Si を持続可能な形で確保していくための方策として、1) 太陽電池向け多結晶 Si の安価かつ低エネルギー消費の大量生産、2) 太陽電池出力あたりの Si 使用量の削減、3) 結晶 Si 以外の太陽電池の開発と導入、4) 使用済太陽電池のリユース・リサイクルの促進、が提示された。

第 3 章においても高純度 Si の循環利用に関する評価手法としてマテリアルフロー分析が採用され、世界を対象にした 1996 年から 2007 年までの高純度 Si のマテリアルフローの時

系列分析が行なわれている。さらに、多結晶 Si 生産量を投入量、太陽電池用の多結晶 Si 及び単結晶 Si と半導体用ウェーハを産出量とした資源有効利用指数を設定し、Si の有効利用がグローバルに進められた程度も分析されている。

分析の結果、多結晶 Si の生産量のみならず太陽電池用単結晶 Si の需要も世界的に増加していることが明らかになった。また、資源有効利用指数の分析からは、日本の場合と異なり、有効利用の程度が向上中であるが示されている。一方、高純度 Si の価格の上昇が有効利用の程度を高める傾向が見られるものの、生産量自体の大幅な増加が両者に影響を及ぼしている可能性が指摘されている。

第 4 章では、多結晶 Si 型太陽電池を用いた住宅用太陽光発電システムを対象に、多結晶 Si の循環利用を定量的に評価するために、エネルギー投入量・CO₂ 排出量の観点からライフサイクル分析 (LCA) が行われている。特に、使用済太陽電池をリサイクルする場合は、リサイクル工程においてエネルギーを消費することから、エネルギー投入量・CO₂ 排出量の定量的な削減効果が算出されている。

ライフサイクル分析の結果、太陽光発電システムのライフサイクルにおいて、エネルギー投入量・CO₂ 排出量は高純度 Si の製造工程、特に多結晶 Si 製造工程で大きく、基本ケースで全体の 49% を占めている。また、多結晶 Si の内部での循環利用により顕著な削減効果が推定される。さらに、ペイバックタイムの観点から、使用済太陽電池モジュールのリサイクルにより回収した Si は、多結晶 Si 製造工程の後の段階で再生利用原料として戻すことが望ましいことが明らかされている。

第 5 章では、高純度 Si の循環利用の評価手法として、太陽電池のリユース・リサイクルの評価モデルが構築されている。具体的には、住宅用太陽光発電システムにおける太陽電池モジュールの全体の価格を一定と仮定し、セル部分の 1m² あたりの価格が変換効率の一次関数で表されるモデルであり、実際に販売されている太陽電池モジュールのデータを用いた検証により±20%の誤差で適用可能であることが示されている。

次に、評価モデルを用いて 2020 年時点での変換効率と価格の関係を予測し、リユース・リサイクル製品に求められる要件が明らかにされている。また、当該モデルを用いた将来の変換効率と価格予測は、今後、各種の太陽電池の研究開発目標や、太陽電池用多結晶 Si の製造における目標コストの評価にも適用可能であることが示されている。

以上のように、本論文では太陽電池用の高純度 Si の循環利用について、マテリアルフロー分析やライフサイクル分析の方法と評価モデルを開発・適用することにより、課題を明らかにしその対応策を提示しており、今後太陽電池用高純度 Si の循環利用を進めるにあたり、技術的、政策的に非常に重要な知見を与えるものである。

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。