

## 論文の内容の要旨

論文題目 低炭素社会における高純度シリコンの循環利用と評価手法の開発

氏名 瀧口 博明

二酸化炭素排出量を大幅に削減する低炭素社会の構築が国内外の課題となっており、太陽電池は低炭素技術の中核として位置づけられている。本研究では、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。本論文は、第 1 章から第 5 章と、これを総括した第 6 章から構成される。また、参考資料や計算の結果を Appendix A～D として掲載している。

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していく高機能マテリアルの開発・導入の必要性を述べた。そして、太陽光発電の導入の推移や高純度 Si の需給の状況を踏まえて、今後の太陽光発電の導入拡大を見据えると、高純度 Si が高機能マテリアルとして十分かつ持続可能な形で確保される必要があり、希少資源としての有効利用、特に循環利用を検討していくことが求められていることを述べた。

第 2 章では、日本を対象に、どの程度の量の高純度 Si がどのような形で利用されているかを把握し、供給上の課題とその対応策を論じた。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を作成し、その分析を行なった。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を作成し、高純度 Si の製造から利用に至る収支のバランスを、その時系列的な変化とともに明らかにした。特に、多結晶 Si 及び単結晶 Si の製造工程における投入量 (インプット) と産出量 (アウトプット) 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) を開発・適用し、Si 供給の持続可能性について論じた。

分析の結果、太陽電池用結晶 Si の需要が増加し、1999 年以前は半導体用 Si の製造工程での規格外品でカバーされていたが、2000 年以降は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 が生産されており、供給の形態が変化していることがわかった。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になっていることが明らかになった (Fig.1 参照)。単結晶 Si の有効利用も進んできたが、近年は有効利用の程度が減少する傾向にあることがわかった。また、高純度 Si の有効利用と価格の変動との関係について、多結晶 Si や単結晶 Si の生産

量を需要に合わせて弾力的に変更することが困難であることや、有効利用の技術が一旦組み込まれると価格の変動に左右されずに継続されることなどから、顕著な関係は見出せなかった。

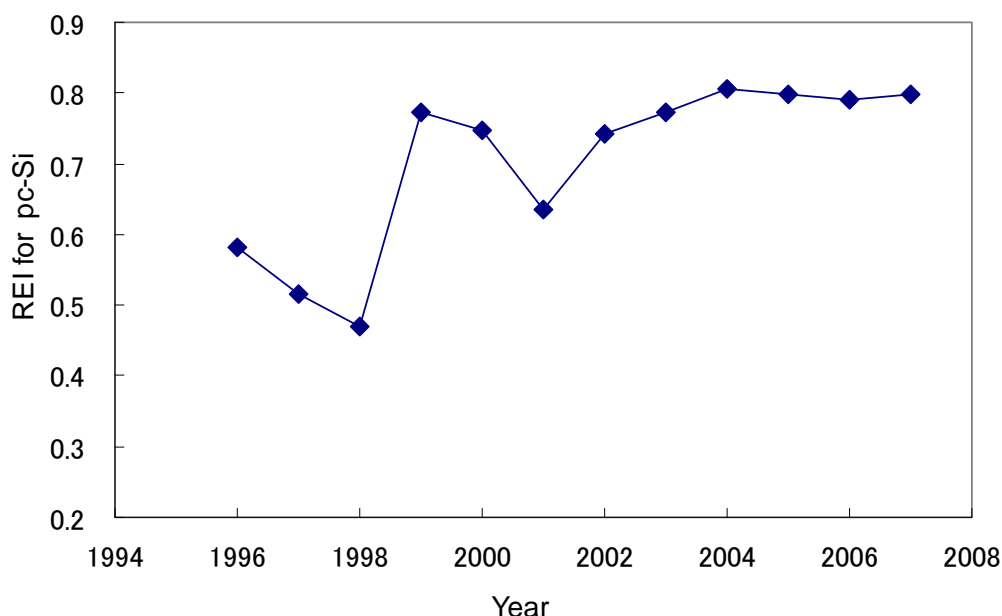


Fig. 1 Resource Effective-use Index for poly-crystalline Si (pc-Si).

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 を安価かつエネルギー消費が少ない形で大量に生産する、2) 太陽電池の出力あたりの Si 使用量を削減する、3) 結晶 Si 以外の太陽電池の開発や導入を進める、4) 使用済の太陽電池のリユース・リサイクルを進める、ことを提示した。

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を用い、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を行なった。高純度 Si の持続可能な利用は国際的な課題であり、これに対処するためには世界全体での Si の流れと収支バランスを定量的に明らかにしシステムの構成や全体像を把握することが望ましい。また、第 2 章で述べたように、日本を対象とした Si のマテリアルフローの時系列分析により、高純度 Si のフローにおいて、輸出入が近年大きな割合を占めることが明らかになったことによる。世界を対象にしたマテリアルフロー分析では、輸出入が相殺されるため、より簡素な形での分析が可能となる。加えて、多結晶 Si 生産量を投入量（インプット）、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（アウトプット）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どの

程度進んできたかの分析も行なった。

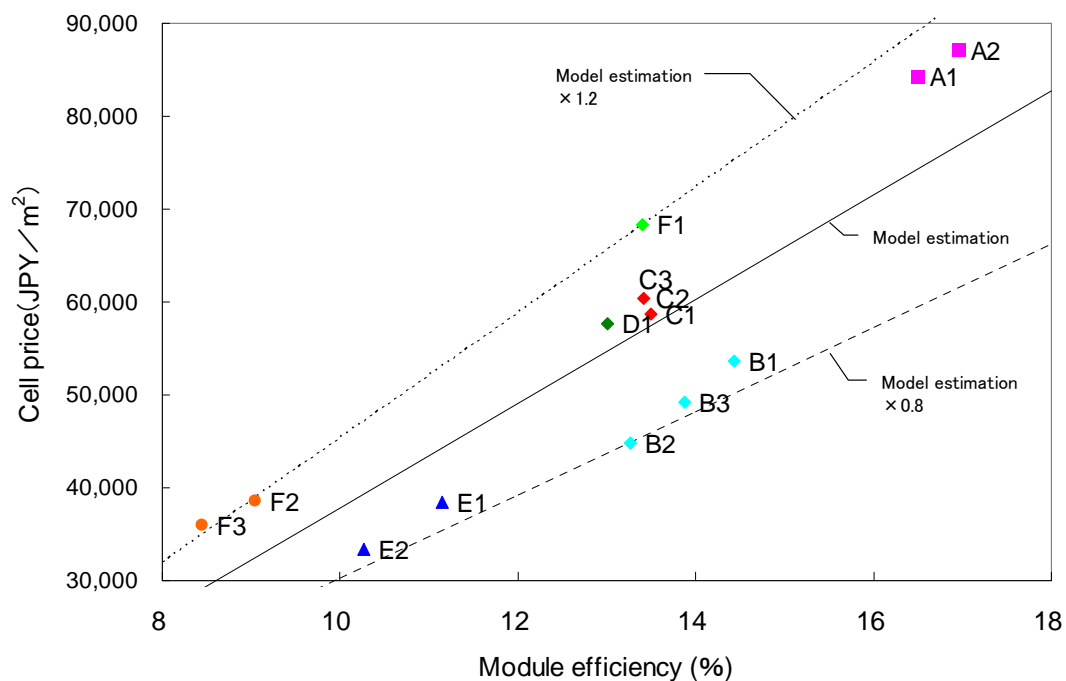
分析の結果として、多結晶 Si の生産量は太陽電池用の需要に対応して世界的に増加し、太陽電池用の単結晶 Si の需要も増加していることが明らかになった。また、資源有効利用指数の分析からは、日本の場合と異なり、有効利用の程度が今なお進んでいる段階にあることがわかった。これは、日本では省資源化技術の導入がほぼ行き渡ったことが原因の一つとして考えられる。高純度 Si の有効利用と価格の変動について近年は価格の上昇が有効利用の程度を高める傾向が見られたが、生産量自体の大幅な増加が両者に影響を及ぼしている可能性を指摘した。こうした分析結果を踏まえ、今後、高純度 Si を持続可能な形で確保していくためには、高次元での 3Rs をグローバルのレベルで進めていく必要があることを述べた。

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・CO<sub>2</sub> 排出量の観点からライフサイクル分析 (LCA) を行なった。特に、使用済の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・CO<sub>2</sub> 排出量の定量的な削減効果を算出した。

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・CO<sub>2</sub> 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% を占めた。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た。さらに、使用済太陽光発電システムのリサイクルに関し、エネルギーペイバックタイムの値で比較すると、リサイクルをしない場合の 1.6 年に比べて、アルミニウムや銅の金属類のみのリサイクルを行なう場合が 1.5 年、使用済太陽電池モジュールから Si を回収し多結晶 Si 製造工程の後に回収 Si を投入する場合は 1.2 年、回収 Si を多結晶 Si 製造工程の前に投入する場合は 1.5 年となり、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を明らかにした。

第 5 章では、高純度 Si の循環利用の評価手法として、変換効率と価格に着目した、太陽電池のリユース・リサイクルの評価モデルを構築した。この評価モデルは、使用済太陽電池のリユース・リサイクルを行なう場合、リユース・リサイクルされる製品が最新型の太陽電池と変換効率や価格の面で競争にさらされることに対応したものである。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が一定と仮定し、セル部分の 1m<sup>2</sup> あたりの価格が変換効率の一次関数で表されるモデルを構築した。このモデルは、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た (Fig.2 参照、各プロットは太陽電池モジュールのデータ)。



**Fig. 2 Comparison between model estimation and actual data.**

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を明らかにした。具体的には、2000 年時点の新品の太陽電池モジュールの変換効率を 12%として、このモジュールを 20 年後にリユース・リサイクルするには変換効率の低下分を考慮して、セル部分の価格で 27,000 円/m<sup>2</sup>以下、モジュール価格で 38,900 円/m<sup>2</sup>以下に設定することが市場競争力を有するために必要であることを示した。太陽電池の需要増により高純度 Si の需要も増加する場合には、使用済太陽電池のリユース・リサイクルがより競争力を持つことになり、高純度 Si の循環利用により需要増への対応が可能となる。当該モデルを用いた将来の変換効率と価格の予測は、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を評価することにも適用可能である。

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、評価手法とし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することができた。