

## 学位論文審査結果の概要

氏名	Benioub Rabie (ビニョブ ラビ)
学位論文審査委員氏名	主査 伊高 健治
	副査 佐藤 裕之
	副査 藤崎 和弘
	副査 久保田 健
	副査 小島 秀和
論文題目	Study of SiO Gas Behavior during Carbothermal Reduction of Silica via Real-Time Weight Monitoring (実時間重量モニタリングによるシリカの炭素熱還元時における SiO ガス挙動の研究)
審査結果の概要（2,000字以内）	
審査結果	合格
審査の概要（2,000字以内）	<p>当該学位論文は、太陽電池用シリコンの新しい低コスト・省エネルギー製造プロセスである炭素熱還元法に関する研究をまとめた論文であり、申請者が新たに実時間重量モニタリングシステムを開発し、それをを用いて反応中に発生する SiO ガスの振る舞いについて議論している。SiO ガスは、シリコンの炭素熱還元プロセスにおいて重要な中間物質であるが、室温近傍では凝縮してしまうために質量分析装置などによる測定が困難であり、反応中の正確な挙動を把握するのが難しいという問題がある。そのため、反応坩堝の重量を実時間で測定することによって、SiO ガスの挙動を理解し、反応坩堝内部の現象を解明することが可能になる。</p> <p>開発した実時間重量モニタリングシステムは、基本的には熱天秤と同様のデータが得られるが、反応器の大きさとして、実際にシリコンまで還元出来るような坩堝のサイズ及び温度領域における実時間重量測定が可能である。市販の熱天秤では、1500℃以上での温度領域の測定が難しく、また反応容器の大きさが小さく、炭素熱還元によってシリコンを実際に得ることができないために、シリカの炭素熱還元プロセスの解明には不十分である。</p> <p>第一章は、本論文の背景として、シリコン材料の重要性、および異なる生産方式およびそれらのエネルギーのコストを論じており、今後の世界市場の動向についても論じている。</p> <p>第二章は、理論的背景として、シリコンの還元について熱力学的に論じており、ギブスエネルギー</p>

一から作成された熱力学的相図から、シリコン還元に必要な条件を論じている。また様々なシリコン製造方法について長所・短所について比較しながら論じている。

第三章は、実験手法として、実時間重量モニタリングシステムの開発と使用した分析機器の機構について論じられている。歪みゲージをベースとした重量測定装置において、輻射熱と電磁干渉 (EMI) の影響が深刻な問題であることが論じられている。装置の構造を改良することによって、重量測定にかかる誤差を大きな抑制に成功したことについて論じられている。

第四章は、実験結果とその考察として、実際に SiO ガスが発生する条件で、実時間重量モニタリングシステムを使って、重量変化を実時間で測定した結果について論じられている。重量変化と雰囲気中の一酸化炭素の測定データから、SiO ガスの挙動について論じられている。

結論の章では、前章までの結果を総合的に論じるとともに、本研究の課題と将来について論じている。

このように、本研究では、低コスト太陽電池用シリコン製造プロセスである炭素熱還元法において、反応中に重要な役割を果たす SiO ガスの挙動を実時間で把握することが重要であると考え、坩堝の実時間重量モニタリングシステムの開発を行った。特に、実際にシリコンを還元反応できるシステムで、重量測定を実時間で測定できる装置開発はこれまでになく、反応プロセスの新しい理解につながると思われる点は高く評価でき、合格と判定する。

#### 学位論文の基礎となる参考論文

- (1) R. Benioub, A. Boucetta, A. Chahtou, S. M. Heddadj, M. Adnane, Y. Furuya, K. Itaka, "Development of Real-Time Weight Monitoring System for the Carbothermic Reduction Process of Silica", *Materials Transactions*, **57**(11), 1930-1935, 2016.
- (2) A. Boucetta, R. Benioub, A. Chahtou, S. M. Heddadj, T. Ogasawara, Y. Furuya, S. Hamzaoui, K. Itaka, "Optimization of the Granulation Binders of High-Purity Carbothermic Reduction for Solar-Grade Silicon", *Materials Transactions*, **57**(11), 1936-1944, 2016.
- (3) K. Itaka, T. Ogasawara, A. Boucetta, R. Benioub, M. Sumiya, T. Hashimoto, H. Koinuma, Y. Furuya, "Direct Carbothermic Silica Reduction from Purified Silica to Solar-Grade Silicon", *Journal of Physics: Conference Series*, **596**, 012015, 2015.