

太陽電池のグローバルサプライチェーンにおける ライフサイクルコスト・環境負荷分析

野々山 洸¹, 河尻耕太郎²

¹早稲田大学 政治経済学部 政治学科

Email: kononoyama@gmail.com

²MIT/AIST, (77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139)

Email: kotaro-kawajiri@aist.go.jp

太陽電池のライフサイクルにおいて、各ステージの場所がコスト・環境負荷に及ぼす影響を明らかにした。機能単位を1kWの多結晶Si型太陽電池とし、システム境界で7つのステージを考慮した。全てのステージは同一国で行われると想定し、日本、アメリカ、中国でケース・スタディを行った。

モジュールのコストは、日本、アメリカ、中国でそれぞれ1541\$, 1439\$, 1475\$であり、温室効果ガス排出量はそれぞれ905kg, 915kg, 1205kgであった。日本、アメリカ、中国（上海）、中国（チベット）のコストペイバックタイムは19年、36年、49年、36年で、CO₂のペイバックタイムは3.9年、2.2年、1.9年、1.0年であった。コストと環境負荷はトレード・オフの関係にあることが明らかになった。

Key Words : Photovoltaic(PV), Global supply chain, Greenghouse gas, Cost, Paybacktime

1. はじめに

地球温暖化、エネルギー資源の枯渇リスク、エネルギー資源の価格高騰、福島原発問題等により、近年再生可能エネルギーに注目が集まりつつある。特に太陽電池は、価格の低下と、エネルギー変換効率の増加により、将来の再生可能エネルギー供給における有望な選択肢の一つとして期待を集めている。しかしながら、太陽電池の課題として、太陽電池の製造段階において、環境負荷が生じること¹⁾、また使用段階において、設置場所の気象条件等によって発電電力量が異なること²⁾、などがあげられる。したがって、今後、太陽電池の機能を効率的に活用し、環境負荷を減少させるためには、製造段階の環境負荷を減少させるとともに、使用段階の環境負荷低減効果を増加させることが求められる。

一方で、近年、太陽電池産業は、需要と供給の両側面において、サプライチェーンがグローバル化しつつある。各製造段階における素材・ユーティリティの単位量あたりの環境負荷・コストは地域によって大きく異なる。また、使用段階においては、設置場所の太陽電池の発電電力量や、電力あたりの環境負荷・コストは大きく異なる。そのため、グローバルな観点からサプライチェーンを最適化することで、環境負荷とコストを効率的に減少

できる可能性がある。既存研究において、グローバルな観点から、各ステージの立地を最適化することで、一次エネルギー消費、CO₂排出量を大幅に削減できることが明らかにされている³⁾。しかしながら、コストと環境負荷の両方の観点から、立地の影響を定量化した研究は存在しない。経済活動において、価格は最も重要な要素である。したがって、太陽光電池のさらなる普及を考えるためには、CO₂同様、グローバルな観点から、太陽電池のライフサイクルコストを最小化することが不可欠である。

本研究では、各ステージの立地が、太陽電池の製造コストと環境負荷に与える影響を定量的に明らかにすることを目的とする。また、立地の影響を分析する際に、日本、アメリカ、中国のそれぞれの国で製造・使用が行われた場合のケース・スタディを行う。

2. 方法

(1) 機能単位・システム境界

本研究では、現在世界で最も多く普及しつつある多結晶 Si (mc-Si) 太陽電池に着目して評価を行う。機能単位は、1kW の太陽電池を想定し、寿命を 20 年と想定する。

図-1 に、本研究のシステム境界を示す。本研究では Silica 製造 (Stage 1)、金属 Si 製造 (Stage 2)、poly-Si 製造 (Stage 3)、シリコンウェハー製造 (Stage 4)、太陽電池セル製造 (Stage 5)、太陽電池モジュール製造 (Stage 6)、使用 (Stage 7) までをシステム境界とする。

本研究では、Stage1 から Stage7 までを全ての工程を同一国で行うものと想定し、日本、中国、アメリカでケース・スタディを行う。

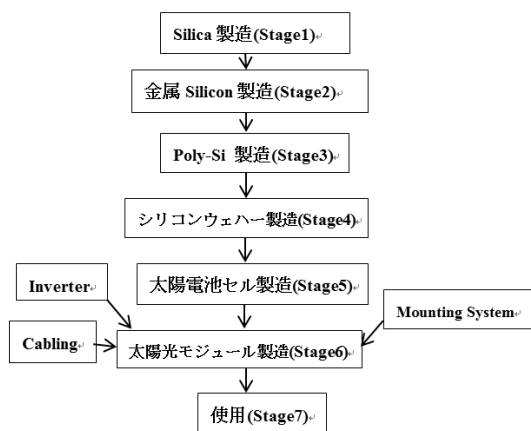


図-1. システム境界

(2) インベントリ

製造時の各ステージにおける太陽電池およびその素材の製造に必要なインベントリは、既存研究等の文献データから引用する⁴⁾。素材や部品の価格はウェブ等の文献データを引用する。各国の発電による環境負荷は、MilCA のデータを使用した利用する⁵⁾。なお、本研究では、同一国内でのサプライチェーンを想定し、輸送の影響は小さいものとして、考慮しないものとする。

本研究では、図-1 中の Stage 3～Stage 6 については、土地、工場建設、製造装置、人の労働について、コストを考慮した。また、環境負荷についても、工場建設と製造装置の CO₂ 排出量を考慮した。土地面積、工場建設、製造装置、労働時間に関するインベントリは、各文献値を参考に作成した^{6,9)}。ただし、Silica 製造 (Stage 1)、金属 Si 製造 (Stage 2) については、上記データが手に入らなかったため、投入された材料およびユーティリティについてのみコストと環境負荷を考慮した。また、インバーターやケーブル、設置台に関するコストと環境

は、一定とし、文献値の値を採用した⁹⁾。

各国でのケース・スタディを行う際の、電気代 (民生用、工業用)、土地代、建設費、人件費などのデータに関して、製造段階においては、日本については横浜のデータを、アメリカについてはサンフランシスコのデータを、中国については瀋陽のデータを採用する¹⁰⁾。また、使用段階の太陽電池の発電ポテンシャルについては、それぞれ各国の主要都市に太陽電池が設置されると想定し、日本については東京を、アメリカについてはワシントン、中国についてはチベットと上海のデータを採用する。なお、本ケース・スタディにおいてチベットを取り上げたのは、先行研究においてチベットの太陽電池発電ポテンシャルが世界最大であると明らかにされており、チベットに太陽電池が設置された場合のコスト・CO₂ ペイバックを別途推計するためである²⁾。

(3) インパクト

本研究では、環境負荷を評価するために、地球温暖化へのインパクトを評価した。インパクトの評価にあたっては、各インベントリについて、Ecoinvent データベース中の CML の GWP (100) の値を用いてインパクトを算出した¹¹⁾。

(4) コスト・CO₂ ペイバック

コスト・CO₂ ペイバックの算出においては、太陽電池システムのコスト・温室効果ガスを、各国に設置された太陽電池の発電電力量によって得られる電力料金、CO₂ 削減量で除して算出する。なお、各国の発電電力量の算出に当たっては、想定される設置地点の気象データを基に先行研究の手法に従って算出する²⁾。

コストペイバックタイムの推計においては、太陽電池から得られる発電量分の家庭用の電気料金が節約されると想定する。なお、本研究では、国ごとの政策の影響を控除するため、補助金等による影響は考慮しない。

コストペイバックの算出に当たって、インバーターや架台、工賃など、太陽電池システム導入に必要な追加的なコストについては、各国一律の金額を太陽電池モジュールのコストに加算する¹²⁾。また、CO₂ ペイバックタイムの算出に当たって、インバーターと架台の製造によって生じる CO₂ 排出量について、各国一律の値を太陽電池モジュールの温室効果ガスの排出量に加算する⁹⁾。

3. 結果

(1)コスト

図-2 から図-4 に、各ケースにおける太陽電池モジュール製造コストの内訳を示す。図中、電力等のユーティリティに関するコストについては、材料費に含められている。本結果で得られたモジュールのコストは、現在のモジュール価格よりも若干高かった¹³⁾。これは、インベントリ作成用のデータが2005年と若干古く⁴⁾、学習曲線によってよりコストが低下したことと、現在の製造ラインがより大規模化し、スケールメリットによってコストが低下したことが要因として考えられる。

図より、日本は、産業用電気量、土地代、人件費等のコストが最も高かったため、最も製造コストが高かった。次に中国、アメリカの順にコストが高かった。通常、労務費等の物価を考慮すると、本来はアメリカよりも中国の方がコストが安くなることが期待されるが、本研究では逆の結果となった。この理由として、以下の2点があげられる。

第一の理由として、産業用の電気代のコストが、アメリカが最も安く、日本と中国はほぼ同額であったことがあげられる。太陽電池は、部材の製造において多くの電力を使用するため、電気代が大きく影響した。

第二の理由として、材料費以外のコストが、比較的小さく、土地代や労働費の影響が相対的に低下したことがあげられる。先行研究の結果では、材料費以外のコストの割合が、全体の約50%程度を占めており、人件費と設備費がそれぞれ25%程度ずつ占めている⁶⁷⁾。本研究の結果は、それらの先行研究よりも、人件費や設備費の割合が比較的小さい⁶⁷⁾。その理由の一つに、設備設置のコスト・環境負荷を、設備の寿命(25年を想定)中に製造される生産物の総量で割って算出したため、設備のインベントリが非常に小さくなってしまったことがあげられる。通常、設備については、より短い期間での減価償却を行うため、本研究よりも大きくなることが予想される。もう一つの理由として、先行文献に基づいて工場や設備のインベントリを作製したが、文献に記載されていない様々なコストについては考慮されていないことがあげられる。特に工場全体に必要な人数や、製造設備以外の設備についてはその推定が困難である。したがって、それらの文献に記載されていないコストの分だけ、過小評価となっている可能性がある。

各図において、後段のステージの材料費には、その前段のステージの総コストが反映されている。そこで、前段のステージのコストを、後段のステージの材料費から控除して、各ステージのコストの割合を算出する。モジュールコストに占める各ステージのコストの割合は、平均でモジュールが約47%、セルが約29%、ウェハー

15%, poly-Si が9%, それ以外が1%以下という割合になった。

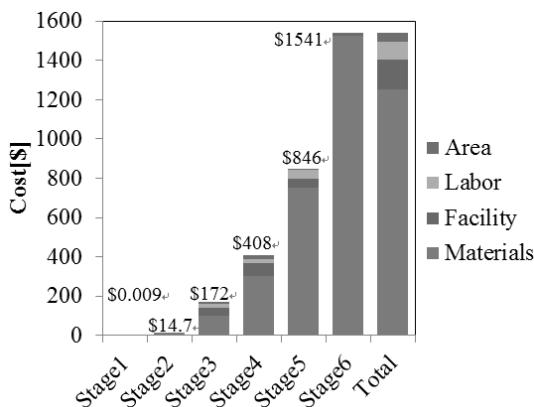


図-2 日本における太陽電池モジュールの製造コスト

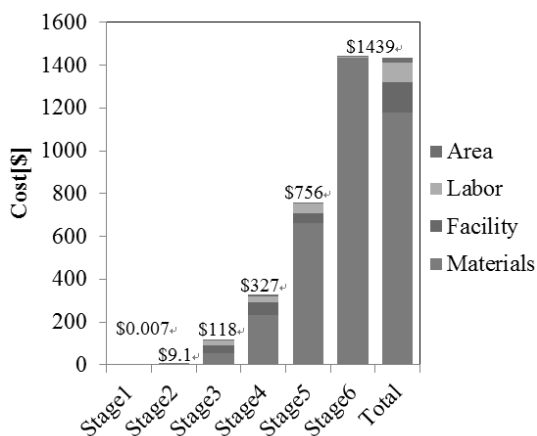
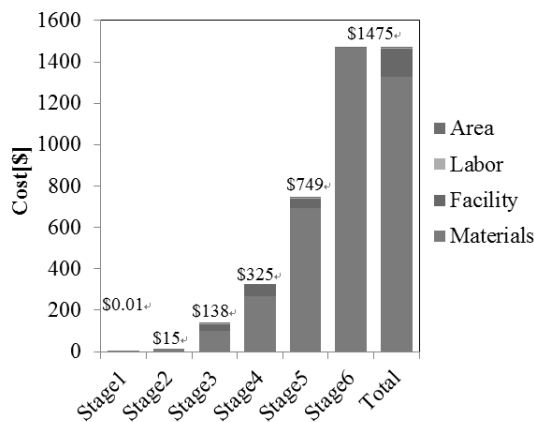


図-3 アメリカにおける太陽電池モジュールの製造コスト



中国における太陽電池モジュールの製造コスト

(2)CO₂排出量

図-5に、各ケースにおける、CO₂換算した温室効果ガス排出量の内訳を示す。図のとおり、温室効果ガスについては、日本で製造した場合が最も小さくなり、次にアメリカ、中国の順に大きくなる。本研究においては、国による温室効果ガスが生じる要因として、単位電力量当たりの温室効果ガスしか考慮していない。したがって、国による温室効果ガス排出量の差は、各国の電力量当たりの温室効果ガスの大きさによるものである。中国は、現在火力発電所の割合が比較的高いため、上記のような結果となった。

温室効果ガス排出量の各ステージごとの内訳としては、Stage 6が30%程度、Stage 5が10%程度、Stage 4が20%程度、Stage 3が30%程度、Stage 2と1が残りの1%程度を占めている。Poly-Si 製造 (Stage 3) における温室効果ガスの排出の原因は、主に電力消費であるが、モジュール製造における原因は、モジュールのパッケージングに使用されるアルミとガラスであり、各ステージによって温室効果ガスが排出される原因が異なる。したがって、今後、太陽電池モジュール製造によって起因される温室効果ガスを削減するためには、ステージごとに、何が最も温室効果ガスの排出に寄与しているのかを見極め、対策を講じることが求められる。

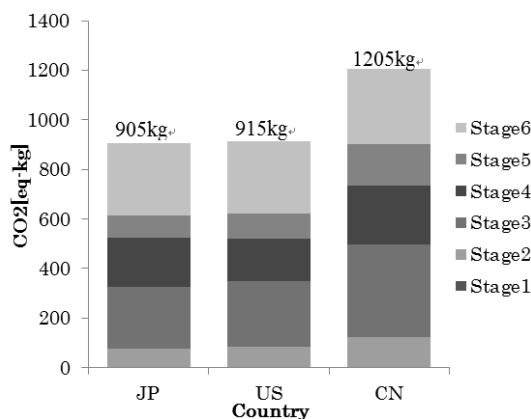


図-5 太陽電池モジュールの製造における温室効果ガス排出量

(3)コスト/CO₂ペイバックタイム

表-1に、各ケースにおけるコスト・CO₂に関するペイバックタイムを示す。

コストペイバックタイムでは、東京に設置したときのペイバックタイムが最も短い。これは、電気代の高さが主な原因である。CO₂ペイバックタイムでは、チベットが1.03年と最も短い。これは、チベットが4か所の中で最も発電ポテンシャルが高いことと、中国の発電電力量当たりの地球温暖化へのインパクトが、日本とアメ

の約2倍であることが要因として挙げられる²³⁾。

本4ケースにおいて、コストペイバックに関して東京は最も短い、CO₂ペイバックタイムは最も長い。太陽電池を導入することで、最もCO₂を最も多く減らすことが出来るのは中国であるが、コスト面だけを考慮した場合は、中国の消費者にとって太陽電池を購入するメリットは小さい。したがって、コストと環境負荷がトレード・オフの関係にあり、少なくとも本4ケースの中で同時に最小化することは難しいことが明らかになった。

表-1 コスト・CO₂ペイバックタイム

	[Year]	
	Cost payback	CO2 payback
JP	19.23	3.88
US	36.19	2.19
CN(Shanghai)	48.93	1.89
CN(Tibet)	36.47	1.03

4. まとめ

本研究では立地の影響を考慮した上で、太陽電池のコストと環境負荷をライフサイクル全体で評価した。

- ・太陽電池の製造段階では電力を多く使用する部材があるため、コスト分析の結果、電気代が最終的なモジュール価格に大きく反映されることが明らかになった。地域ごとに異なる電気代を考慮した結果、日本、中国、アメリカの順でコストが高くなり、それぞれ 1541\$, 1439\$, 1475\$となった。

- ・本研究においては、設備費や人件費の影響は小さく、先行研究と比較して過小評価になっている。そのため、より精度の高いデータを入手することが今後の課題である。

- ・各国によって電力量当たりの環境負荷が異なるため、各国での太陽電池製造における温室効果ガス排出量に差が生じた。モジュール製造での温室効果ガスの排出量は日本が最も小さく 905kg であり、次いでアメリカが 915kg、中国が 1205kg となった。

- ・コストペイバックタイムは、日本で 19 年、アメリカで 36 年、中国の上海で 49 年、チベットで 36 年となった。CO₂ペイバックタイムは日本、アメリカ、中国の上海とチベットがそれぞれ 3.9 年、2.2 年、1.9 年 1.0 年であった。

- ・最終的に、本4ケースにおいては、コストと環境負荷の両方ですぐれた国はなく、コストと環境負荷がジレンマの関係にあることが示された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23681008 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Pthenakis, V. M. Kim, H. C. and Alsema, E. : Emissions from Photovoltaic Life Cycles, *Environmental Science and Technology*, Vol. 42, 2008, pp.2168-2174.
- 2) Kawajiri, K. Oozeki, T. and Genchi. Y. : Effect of Temperature on PV Potential in the World, *Environmental Science and Technology*, Vol. 45, No. 20, 2011, pp.9030-9035.
- 3) Kawajiri, K. Genchi. Y. : The Right Place for the Right Job in the Photovoltaic Life Cycle, *Environmental Science and Technology*, Vol. 46, No. 13, pp 7415-7421.
- 4) Pthenakis, V. Kim, H. C. Frischknecht, R. Rauei, M. Sinha, P. and Stucki. M. : Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, *IEA PVPS Task 12*, IEA-PVPS T12-02, 2011.
- 5) 産業環境管理協会, MilCA, <http://www.milca-milca.net/>
- 6) 山田興一, 小宮山宏 : 太陽光発電工学, 日経 BP, 2002.
- 7) 資源総合システム : 太陽電池製造装置産業レポート 2011, 資源総合システム, 2011.
- 8) 富士経済, 2008World Wide 半導体製造・電子部品実装関連市場実態総調査, 富士経済, 2008.
- 9) NEDO : 太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究, 2008.
- 10) JETRO : J-FILE, <http://www.jetro.go.jp/world/search/cost/>
- 11) Ecoinvent, Swiss Center for Life Cycle Inventories.
- 12) Luque, A. Hegedus, S. : Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Inc., 2011
- 13) PV insight: Solar PV Module Weekly Spot Price, <http://pvinsights.com/>

(2012.7.18 受付)

Life Cycle Analysis of Cost and Environment Impact for the Photovoltaic Global Supply Chain

Ko NONOYAMA and Kotaro Kwajiri

The objective of this study is to clarify the effect of geological locations at each stage in the photovoltaic supply chain on its life cycle cost and CO₂ emission. The functional unit is 1kW multi crystalline silicon photovoltaic cell. The system boundary consists of 6 manufacturing stages (metal grade silicon, polycrystalline silicon, multi-Si wafer, multi-Si cell, and module) and usage stage. It is assumed that the all stages are conducted in a same country. Japan, United States, and China are employed for the locations in the case studies.

According to the result, the embodied costs in 1kW module are 1541\$, 1439\$, and 1475\$ in the case studies for Japan, United States, and China, respectively. The average percentages of each manufacturing cost in the total are 47% for module, 29% for cell, 15% for wafer, 9% for poly-Si, and others. The total amounts of embodied green house gases are 905 kg-CO₂eq, 915 kg-CO₂eq, and 1205 kg-CO₂eq in the case studies for Japan, United State and China, respectively. The cost payback times are 19 years, 36 years, 49 years, and 36 years in the case studies for Japan, United States, Shanghai in China, and Tibet in China, respectively. The CO₂ payback times are 3.9 years, 2.2 years, 1.9 years, and 1.0 year for those case studies, respectively.

Based on our results, it is clarified that the cost and the environmental burden are in trade-off. Then, it is difficult to reduce the both outputs simultaneously in our case studies.