

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

## 太陽光発電システム (Vol.2)

一定量の技術シナリオを活用した高効率シリコン系太陽電池の  
経済性評価

平成27年3月

PV power systems(vol.2):

Cost Estimates for High Efficiency Si-based Tandem Solar Cells Using Quantitative  
Technology Scenarios

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構  
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2014-PP-03  
(平成27年4月印刷版)

## 概要

本稿は、高効率タンデム型結晶シリコン系太陽電池を対象に、LCS で分析してきた定量的技術シナリオの構築手法を活用し、コスト低減のための重要技術開発項目と達成目標時期について評価したものである。既報では、種々の太陽光発電システムを対象に、コスト構造を分析した定量的技術シナリオを構築し、2030年までの道筋を示してきた。本稿では、その定量的技術シナリオを活用し、コスト低減に必要な技術検討の結果を示した。

資源制約を考慮した場合に優位性の高い結晶シリコン系太陽電池を対象とし、高効率化によるコスト削減効果を評価する。コスト低減の技術として、シリコンウェハの薄型化と高効率化の技術を検討した。薄型化には切削技術の向上によるコスト低減の効果を示した。また、高効率化の実現のため、タンデム構造にした際のコスト削減効果について分析した。タンデム構造のトップ層の材料については、ペロブスカイト（ペロブスカイト構造を持つ有機無機ハイブリッドの結晶）、有機、カルコパイライト型化合物半導体（CIGS: Copper Indium Gallium Selenide）を想定し、製造コストの違いを明らかにした。さらに、トップ層については、低コストとなる製造技術（塗布など）と廉価な材料（有機系）を定量的に評価し、達成目標と課題を明確にした戦略技術開発の重要性を示した。

## Abstract

This paper evaluates the important technology development items of high-efficiency silicon based tandem solar cells using our method to construct the quantitative technology scenarios which make it possible to estimate cost reduction and target completion time of the technologies. In the previous report, we analyzed the cost structure of various solar cell systems using the quantitative technology scenarios and proposed roadmap toward 2030. In this proposal, we propose required technologies to reduce the PV system cost as a result of our analysis.

We estimate the effects of cost reduction of PV technology, focusing on high-efficiency silicon based tandem solar cells which have advantage over resource constraints. We investigate wafer cutting process to reduce silicon consumption and tandem solar cells to improve power generation efficiency. As the material of the top layer of the tandem structure, we analyze perovskite, organic, and CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), respectively. The cost reduction methods such as low-cost manufacturing process (coating, etc.) and selection of the inexpensive materials (organic etc.) are quantitatively evaluated. This paper proposes the importance of the setting up of the well-defined strategic technology target and its completion time.

## 目次

### 概要

1. 諸言	1
2. 定量的技術シナリオの構築手法	2
2.1. 手法	2
2.2. 高効率タンデム型結晶シリコン系太陽電池の設計	2
(1) シリコンウェハ基板	3
(2) タンデム構造とするトップ層	4
3. 高効率シリコン系太陽電池の経済性評価	5
4. 政策立案のための提案	7
参考文献	7

## 1. 諸言

太陽光発電システムは固定価格買取制度により大規模な導入期を迎えており、累積導入量 100GW という数字も現実的となってきた。一方、導入費用は制度に頼っており、コスト低減が不可欠である。加えて、将来の更なる大規模導入に向けては、系統連系のための追加費用なども考慮する必要がある。

LCS では、2030 年の発電コストを 5 円 /kWh に低減するための太陽光発電システムのコスト構造分析と、必要な重要技術開発項目を示してきた<sup>1)</sup>。既報では、年間生産量 1GW という量産体制のプラントにおける製造コストを算出した。その結果、製造コストに占める原材料の割合、BOS (Balance of System, 周辺システム) の割合が高いため、原材料の消費量を削減することと、高効率化によるメリットが大きいことが明らかとなっている。

図 1 に太陽光発電システム原価と構成要素の展望として、各種太陽電池のコスト構造と 2030 年に向けた重要技術開発項目を示す。技術開発においては、達成目標とする時期と比較優位性を示すことが必要であり、このような定量的技術シナリオに基づいた技術比較が有効である。図 1 に示したように、薄膜化合物半導体太陽電池の製造コスト低減に優位性があり、システム原価が 2020 年に 97 円 /W、2030 年に 57 円 /W となることが示されている。例えば有機、ペロブスカイトなどの新規薄膜 (ガラス基板) が 2020 年市場に入るには、耐用年数 20 年、モジュール変換効率 15% を達成する必要があることも分かる。

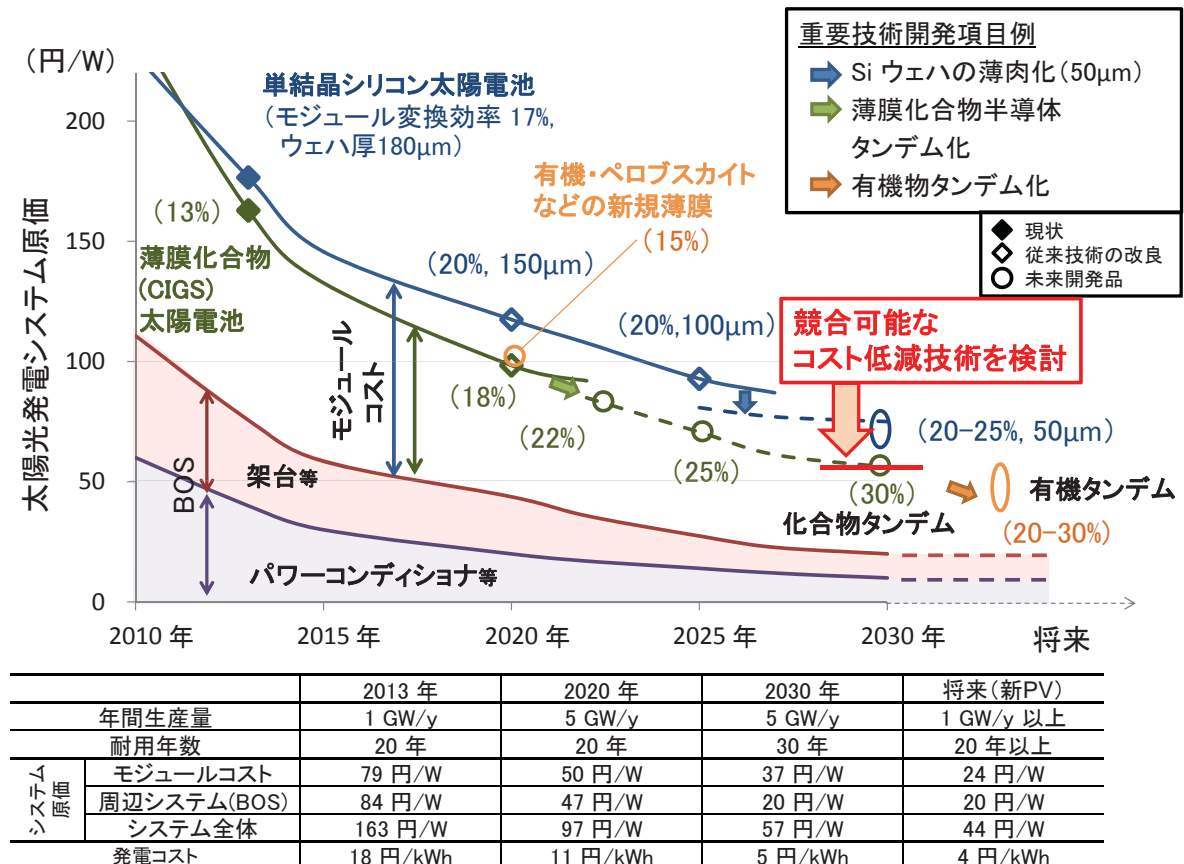


図 1 太陽光発電システム原価と構成要素の展望  
 (既報：文献 1 の図に加筆)

一方、シリコン系太陽電池は単層では高効率化に限界があるため、2030 年ではシステム原価 70～80 円/W までのコスト低減しか見通せていなかった。しかし、化合物系半導体太陽電池は資源制約や安定制約の問題があり、世界で年産 100GW を超えるような大規模導入を想定する場合、資源制約のない安定した技術が必要となる。

本稿では高効率化を実現するタンデム構造とした結晶シリコン系太陽電池を対象とした分析結果<sup>[2]</sup>と、薄膜化合物系太陽電池の将来のシステム原価とを比較して、市場に入るために競合可能となるコストへと低減させるために必要な要素技術について、定量的技術シナリオを活用し検討する。

## 2. 定量的技術シナリオの構築手法

本稿では、資源制約を考慮した場合に優位性の高い、結晶シリコン系太陽電池を対象とした、高効率化によるコスト削減効果を評価する。基板とするシリコンウェハはウェハ厚が 50  $\mu\text{m}$  まで低減する切削技術を開発する必要がある。さらに、高効率化の実現のためには、タンデム構造にする必要がある。(1)ウェハ厚の低減と、(2)タンデム構造のトップ層の材料として、ペロブスカイト(ペロブスカイト構造を持つ有機無機ハイブリッドの結晶)、有機、化合物系半導体のカルコパイライトについて技術シナリオを構築した。

### 2.1. 手法

LCS では、プロセス設計の手法を用いて製造機器レベルから評価し、詳細な製造工程や製造技術に分解することにより、要素技術を特定したコスト構造を明らかにしている。計算手法は既報<sup>[1]</sup>でも示しているが、ここでも簡単に計算条件を示す。コスト構造分析においては、製造における固定費・変動費を積算している。製造固定費には設備(年経費率 0.2)と人員が含まれ、製造変動費には投入原材料と用役(電力・燃料・工業用水等)が含まれる。ウェハ基板とする結晶シリコン系太陽電池の製造工程は、主原材料であるシリコン製造からインゴット casting、ウェハ、セル、モジュールを製造する各工程が詳細に設計されている。設備費の算出には、製造機器の他、工程全体の用役供給のためのオフサイト設備なども含む工場建設に係る費用が積算されており、減価償却費、金利負担費、固定資産税、補修費等を含む。システム全体のコストは、周辺システム(架台、工事費、配電設備)の費用も別途計算しており、それぞれについて、各年の技術動向を推計したコスト評価をしている。

この手法を用いることにより、要素技術ごとの定量的な評価をすることが可能となる。さらに、定量的技術シナリオを用いることにより、重要技術開発項目を特定し、技術条件が異なる様々なケースにおいて比較検討することも可能である。

### 2.2. 高効率タンデム型結晶シリコン系太陽電池の設計

分析においては、シリコン基板のウェハ厚、トップ層の材料、モジュール変換効率、生産性などにおける技術指標を設計し、定量的技術シナリオを構築した。ウェハ厚は現状の 180  $\mu\text{m}$  から、ワイヤ線強度の向上による薄型化が可能であり、安定した材料であるシリコン太陽電池に対してタンデム化による高効率化が可能である。具体的には、ウェハ厚 50  $\mu\text{m}$  としたシリコンウェハにトップ層を製膜したモジュール変換効率 30% のタンデム構造の太陽電池を評価した。バンドギャップから、理論的に最適となる材料を想定し、トップ層に、ペロブスカイト、有機、化合物系半導体のカルコパイライトを対象として太陽電池を設計した。

### (1) シリコンウェハ基板

図 2 に結晶シリコン系太陽電池の製造工程を示す。シリコンウェハ基板を薄くするためのウェハスライス工程の技術向上と、トップ層を積層する工程を追加した工程が必要となる。また、シリコンウェハ基板については、ウェハ厚が現状の 180  $\mu\text{m}$  から 50  $\mu\text{m}$  まで薄型化による効果を検討する。

ウェハを切り出す際のカーフロス（切り代ロス）は、薄肉化するとワイヤの制御のためにウェハ厚と同程度である。また、ウェハ厚の薄型化は、ワイヤ強度向上（現状の 4GPa から 7GPa 程度）等により達成が可能である。

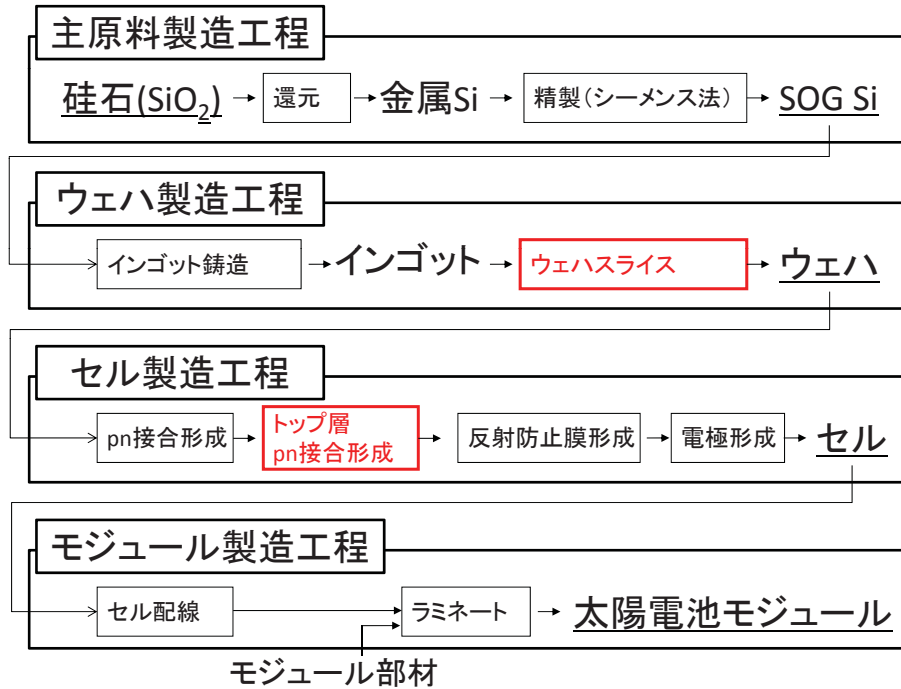


図 2 高効率タンデム型結晶シリコン系太陽電池パネルの製造工程

シリコン消費量については、最終的に製品の受光面積となるモジュール面積に対し、投入原材料のシリコン消費量が原材料費として影響するため、モジュール面積当りのシリコン原材料の必要量 ( $\text{g-Si}/\text{m}^2\text{-module}$ ) を比較した。本稿で用いたシリコンウェハ基板のウェハ厚とカーフロス、シリコン消費量のシナリオ比較を表 1 に示す。ここでは、2030 年以降の技術はウェハ厚 50  $\mu\text{m}$ （シリコン必要量 110  $\text{g-Si}/\text{m}^2\text{-module}$ ）とし、さらにトップ層を積層したタンデム構造を対象とした分析結果について説明する。

表 1 シリコンウェハ基板の技術シナリオ（ウェハ厚、カーフロスとシリコン消費量）

	単位	ウェハ基板 ケース A	ウェハ基板 ケース B	ウェハ基板 ケース C	ウェハ基板 ケース D
ウェハ厚	$\mu\text{m}$	180	100	75	50
カーフロス	$\mu\text{m}$	150	100	75	50
シリコン必要量*	$\text{g-Si}/\text{m}^2\text{-module}$	380	210	160	110

\*シリコン必要量とは、モジュール面積当りのシリコン原材料の必要量（ロス分を含む）を示す

## (2) タンデム構造とするトップ層

トップ層としては、ペロブスカイト、有機、化合物系半導体のカルコパイライトを対象とする。本稿では、カルコパイライトとして、CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) 系を想定する。開放電圧 ( $V_{oc}$ ) の限界を考慮すると、ボトム層/トップ層のバンドギャップが 1.12eV/1.7eV の時、曲線因子 (FF) を 0.8 とした時、セル変換効率は約 50% であると試算される。CIGS は In と Ga の比によりバンドギャップが調整可能であり、効率が最適となる 1.7eV とする。光吸収層はスパッタにより積層する。有機は高効率の達成に課題が多いが、塗布型であれば廉価に製造できるメリットがある。ペロブスカイトでは、バンドギャップは 1.55eV 程度である。この系では、材料の組み合わせにより、さらに広いバンドギャップの材料も研究が進んでおり、将来、1.55 ~ 1.7eV を目指すことが可能である。また、開放電圧が高いことなどから高効率化が近年急激に進んでいる物質である。ここでは、ペロブスカイトは、MOCVD および塗布の 2 種の製造工程、有機は、塗布の製造工程について分析する (図 3 参照)。トップ層として製膜するペロブスカイトは文献 3、有機は文献 4 の構造を採用した。

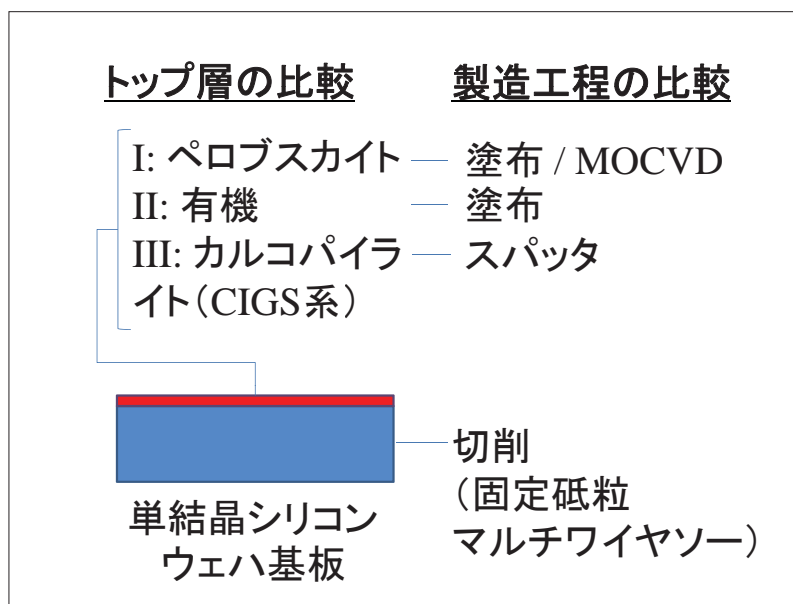


図 3 タンデム型のトップ層の技術シナリオ

### 3. 高効率シリコン系太陽電池の経済性評価

分析結果から、トップ層について、低コストとなる製造技術（塗布など）と廉価な材料（有機）の優位性を考察する。また、2030 年に向けた技術開発の必要性和目標とすべき指標について述べる。

2030 年以降にモジュール変換効率 30% を達成すると仮定したときの製造原価のコスト構造を分析した結果を図 4 に示す。トップ層に想定したペロブスカイト及び有機の新規薄膜は、原材料費が廉価で、塗布による製造が可能であるため、低コスト化の期待が高いが、高効率化の実現が困難である。

高効率化により、シリコンの消費量は 1 g-Si/W 以下となる。単層では、2030 年に 78 円/W であったが、タンデム型にすることにより、60 円/W 以下を見込めることが分かった。

トップ層をペロブスカイトとしたケースでは、MOCVD による製膜では生産性が低く、設備費、用役費が非常に大きく、また原材料も高い。一方、塗布型である場合には、ペロブスカイト、有機、共に、それぞれ 58 円/W、56 円/W と、60 円/W を以下となった。カルコパイライトとして、CIGS の製造工程を基準に算出した例では、66 円/W と、塗布型ペロブスカイト及び有機よりは高い。

一方、ペロブスカイト及び有機においては、安定性・大面積化の課題があり、これらの課題を克服しつつ、高効率化のための研究を進めることが必要である。

生産性の高い製造技術を確立することが、低コスト化及び高効率化のための技術開発を進め、重要であることが分かった。

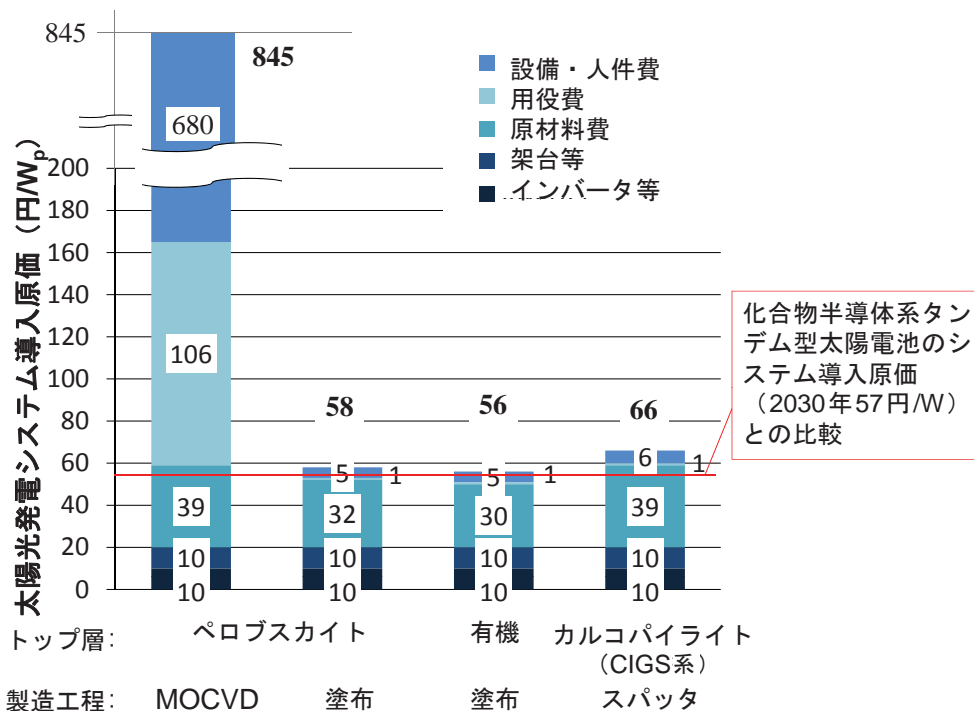


図 4 高効率タンデム型シリコン系太陽電池のシステムコスト構造分析  
 (モジュール変換効率 30%、年産 1GW 規模、2030 年以降の技術水準を想定)



図 5 に、結晶シリコン太陽電池のモジュール変換効率とモジュール製造原価の比較を示す。現状の単層 Si 技術水準の延長では、モジュール変換効率の向上により、103 円 /W から 86 円 /W となり、さらに薄膜化により Si 必要量を低減することにより、55 円 /W が達成できる。一方、トップ層に有機系（塗布型）を用いてタンデム化による高効率化を達成すれば、40 円 /W にむけたコスト低減が見えてくる。

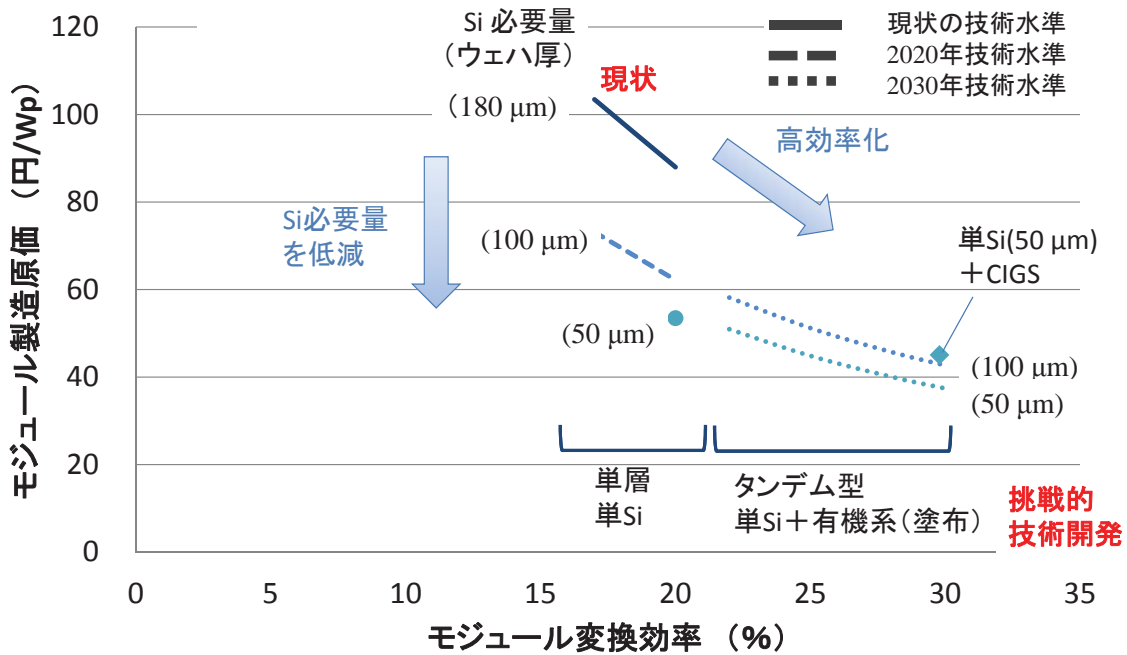


図 5 結晶シリコン太陽電池のタンデム化とモジュール変換効率による製造原価の比較

高効率化を達成しても、製造工程（MOCVD と塗布など）によって、製造コストが一桁異なる。また、大面積化や安定性の技術開発によって、製造コストが異なるため、種々の要素技術の製造コストに与える影響を評価した定量的技術シナリオを構築して評価することが重要である。

このように、将来の技術開発の達成目標時期を実現するために、技術進歩とコストの関係の明確にすることが重要である。LCS では継続して種々の太陽電池技術の定量的技術シナリオを構築し、評価を進めていく。

#### 4. 政策立案のための提案

既報<sup>[1]</sup>では、2030年にむけた各種太陽電池システム導入原価の低減可能性を示し、本稿では、資源制約を考慮した場合に優位性の高い結晶シリコン系太陽電池を対象とした、高効率化によるコスト削減効果を評価した。高効率化の実現のため、タンデム構造にした際のコスト削減効果について分析し、タンデム構造のトップ層の材料として、ペロブスカイト、有機、カルコパイライト型化合物半導体(CIGS)を想定し、製造コストの違いを明らかにした。シリコン基板のウェハ厚、トップ層の材料、モジュール変換効率、生産性などにおける技術指標を設計し、技術シナリオを構築した分析の結果、単層では、2030年に78円/Wであったが、タンデム型にすることにより、60円/W以下を見込めることが明らかとなった。大規模な太陽光発電システムの導入には、以下の4点を実現することを提案する。

- ・シリコン基板のコスト低減のため、ウェハ厚を低減させる（シリコン必要量1g-Si/W以下）ため、理論値に向かったワイヤ線強化技術向上が必要である。
- ・タンデム構造による高効率化によるコスト低減の可能性を示した。製造工程、耐久性なども考慮した技術開発を進めることが重要である。
- ・定量的技術シナリオに基づいた将来の技術開発の達成目標時期を定めることが重要である。
- ・継続的な技術と経済の関係を明確にする評価が必要である。

#### 参考文献

- [1] 「低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書 技術開発編 太陽光発電システムー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ」, LCS 発行, FY2013-PP-02, 2014.
- [2] T. Inoue, K. Waki, K. Yamada, “Cost estimates for PV manufacturing through 2030 - Potential for reducing costs using high-efficiency Si-based tandem solar cells”, PVSEC, 2014.
- [3] M. Liu, MB. Johnston, HJ. Snaith, “Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition”, Nature 501, 395-398, 2012.
- [4] M. Hosoya et al. “Development of organic thin film photovoltaic modules”, the 73th fall meeting of Japan Society of Applied Physics, 2012.

---

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

**太陽光発電システム (Vol.2)**  
一定量の技術シナリオを活用した高効率シリコン系太陽電池の  
経済性評価

平成 27 年 3 月

**PV power systems (vol.2):**  
Cost Estimates for High Efficiency Si-based Tandem Solar Cells Using Quantitative  
Technology Scenarios  
Strategy for Technology Development,  
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies,  
Center for Low Carbon Society Strategy,  
Japan Science and Technology Agency,  
2015.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

(平成 27 年 4 月印刷版)

---

**本提案書に関するお問い合わせ先**

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 研究員 井上 智弘 (Toshihiro INOUE)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階  
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp  
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2015 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

---