

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.4)

一定量の技術シナリオに基づく太陽電池モジュールの
製造コスト低下要因分析

平成29年3月

“PV power systems (vol.4):

PV Manufacturing Cost Reduction Factor Analysis 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-FY2016-PP-01

概要

LCS では、太陽光発電システムを対象に、独自の技術評価手法を用いて「定量的技術シナリオ」を構築し、コスト展望と技術水準を明示した科学・技術ロードマップを提示している。これまで、2030 年に向けた各種太陽電池のシステム導入原価の低減可能性と重要技術開発項目を示してきた。本稿では、2012～2015 年度の LCS 提案書で示した将来の技術水準を再評価してコスト展望を改めて示すとともに、近年の製造コスト低減要因を評価した。第一に、システムコスト展望の改訂では、特に近年の技術開発が加速していることが分かった。また、更なるコスト低減のためには各種太陽電池の高効率化に向けたタンデム化の技術開発も重要である。第二に、近年の製造コスト低減の要因について、2012 年技術水準と 2015 年技術水準のコスト構造の比較から、市場規模の拡大のみならず、製造技術の向上による各要素のコスト低下が示された。第三に、LCS の技術評価手法を評価するため、本分析手法の基礎とした 1991 年時の分析結果と比較した。その結果から、技術予測は継続して再評価する必要があるが、分析手法としての意義を示した。以上の分析結果から、定量的技術シナリオの活用に基づく技術評価を提案するものである。

Summary

We have developed quantitative technology scenarios using original methodology and have presented roadmaps with cost and technology perspectives. As results, we have shown important research and development issues and PV (photovoltaics) power system cost of each solar cell by 2030. This paper evaluates the manufacturing cost reduction factors for a PV system achieved in recent years. First, it is seen that technological development has greatly accelerated system cost reduction. In order to further reduce costs, it is important to develop tandem technologies to improve efficiency. Secondly, by comparing the cost structure in 2012 and 2015, a reduction in manufacturing cost is observed due to improvement in manufacturing technology. Thirdly, by comparing with the PV cost analysis of 1991, this methodology is proven to be able to estimate future technical levels. This paper thus proposes the methodology of technology assessment using quantitative technology scenarios.

目次

概要

1. 緒言	1
2. 太陽光発電システムのコスト展望	1
3. 2015 年技術水準の単結晶シリコン太陽電池のコスト低下要因分析	3
4. 分析手法の評価	5
4.1 過去の計算と現状の予測	5
4.2 今後の課題と展望	6
5. 政策立案のための提案	6
参考文献	7

1. 緒言

太陽光発電システムの大規模普及に伴い、発電コストは急激に低下してきている。国内の固定価格買取制度の買取価格も、家庭用電気料金水準を目標に段階的に引き下げられており、太陽光発電システムの自立した普及が見えてきている。世界では、数百 MW から GW クラスの大規模なメガソーラの普及も加速し、ドバイやチリなどの日射量の多い地域の入札価格では、限定的ではあるが 3cents/kWh を下回ったことが話題になっている。欧米でも、補助金を含むケースや一時的な最低入札価格という条件はつくが、発電コスト 10cents/kWh 以下という数値も公的な資料に示されるようになってきている。一方で、これらの発電コストは、実際には計算対象とする範囲や立地や市場の条件などが異なり、単純に数値を比較することはできない。一般にいう発電コストには、市場の需給、政策支援、貿易などの多様な要素が含まれてしまい、長期の経済性や技術開発の影響を評価することは難しい。そこで、LCS では、技術開発戦略の観点から、太陽光発電システムのシステム全体と製造技術の位置づけを明確にしたコスト構造を示すことにより、具体的なコスト低減に資する技術を評価している。

LCS では、種々の太陽光発電システムの製造原価を技術毎に積み上げて計算し、現状および将来に向けた製造コストを分析する手法を開発している。また、その結果を用い、イノベーション政策立案のための提案を、LCS 提案書¹⁾として示している[1]-[3]。LCS の手法を用いることで、同一の基準でそれらの技術を比較し、総合的な評価、およびコスト低減に寄与する核となる技術開発課題の特定が可能となる。これまで、現状および将来の技術水準を評価した各種太陽電池[1],[4]に加え、シリコンタンデム[2]、および化合物タンデム[3]等の新しいタンデム化技術による高効率化評価してきた。本稿では、近年のコスト低下の要因を分析するとともに、将来の技術開発において必要な論点を整理し、政策提案するものである。

2. 太陽光発電システムのコスト展望

図 1 に、2010 年から 2030 年に向けた各種太陽光発電システムのコスト展望を示す。システム原価は、「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」の手法[5],[6]を用いて計算した結果である。この手法では、対象とする太陽電池を設計し、各年の技術水準を推定し、製造技術に基づく製造工程を設計して計算する。技術水準とは、製品設計、製造に必要な要素技術の性能指標であり、変換効率、製品形状、生産速度、製造機器仕様などを、原理から開発実態までを精査して推定している。また、太陽光発電システムの市場規模から、工場の年間生産量や原材料費用を推定して算出しており、市場拡大や開発実態については継続して評価している。既報では 2009 年技術[7]、2012 年技術[1]を基軸に評価してきたが、近年の技術動向を基に、2015 年技術を基軸に再評価した結果を、図 1 に示している。

既報[1]-[4],[7]と比較して、対象とする製造プロセスは同じである。一方、急激に市場は拡大し、技術開発が加速しており、それら先端の技術開発動向を考慮した。化合物半導体（特に、CIGS 系）では発電効率の上昇と生産性の向上が著しい。結晶系シリコン太陽電池では、大規模化に伴う原材料費低下と、各製造技術の生産性向上によるコスト低下が進んでいる。このため、本稿では、特に 2015 年～2020 年の技術水準を見直すことにより、各社の技術開発の加速を考慮に入れた。2030 年の技術開発については既報[1]-[4],[7]に示した技術水準は変わらず、タンデム構造に着目している。更に、シリコン基板タンデム構造の分析結果[2]を追記した。

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、科学技術振興機構低炭素社会戦略センター（以下、LCS 提案書）。

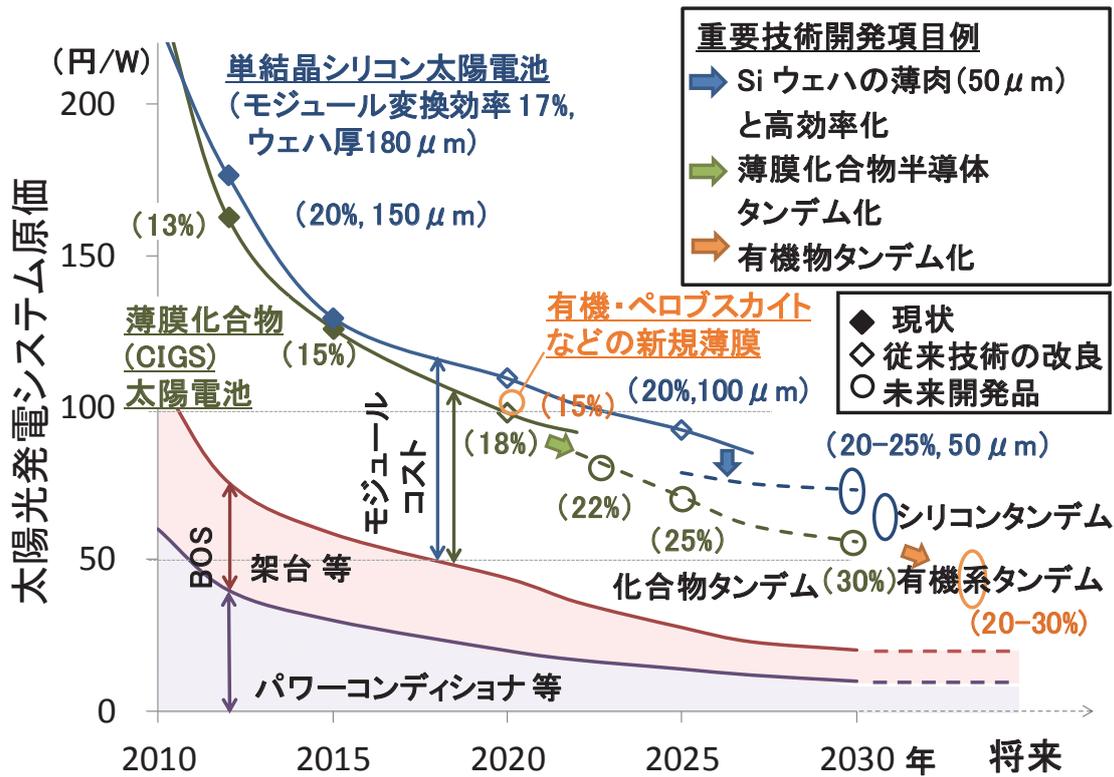


図 1 太陽光発電システムのコスト展望 2016 年改訂

図中の“◆”は現状のコスト、“◇”は従来技術の改良から達成可能な技術水準である。一方で実験室レベルでの研究が進んでいる未来開発品を“○”で示している。従来技術とその改良による技術水準は、先進的な製造機器や企業の掲げる目標値などから推計している。シリコン系太陽電池では、原材料収率の向上、生産規模の拡大などに加え、生産性も向上している。薄膜化合物半導体太陽電池では、主に生産性と効率が向上しており、シリコン系太陽電池と比較して、依然として製造コストは低い。ただし、本分析では同水準の生産規模における製造コストを計算した結果である。実際には、市場規模によってモジュール価格は異なるため、シリコン系太陽電池の市場規模の方が大きいことなども留意する必要がある。

“○”で示した未来開発品については、それぞれ想定範囲の技術開発が進んでおり、2012 年時に推定した技術水準から改訂はしていない。シリコン太陽電池では、シリコンウェハの薄肉化と高効率化が進んでいる。ヘテロ接合ではあるが、モジュール変換効率 23%も達成されており[8]、ウェハ厚を薄くする技術開発も進んでいる。市場規模が拡大してしばらくは、収率向上と個々の製造技術の置き換えなどが主であるため、新たな技術開発は 2025~2030 年に向けた技術として評価している。更に高効率を目指したタンデム構造の技術開発も進んでおり、モジュール変換効率 30%とした評価結果[2]を追記している。タンデム化には、界面制御技術などの課題も多く、これらの技術開発に注力することが必要である。

薄膜化合物太陽電池では、CIGS および III-V 族太陽電池を対象に分析している[3]。高効率化のためにはタンデム化が必要である。CIGS のタンデム化では、積層技術による太陽電池の構造の違いも含めて評価した[3]。4 端子型やメカニカルスタックなどの技術開発が進んでいるが、製造工程や材料も増えるため、追加費用も検討しておく必要がある。2030 年にモジュール変換効率

30%に向けた技術開発の促進により、更なるコスト低下が期待できる。III-V 族太陽電池では高効率化が実現しているが、原材料費が高く生産性が低いため、10 倍以上の生産性を向上する製造技術が必要条件である。

有機、ペロブスカイトなどの新規薄膜では、特にペロブスカイト太陽電池の効率の向上と、シリコンセルサイズと同等の面積化も進んでおり、モジュール変換効率 15%は実現可能である。一方で、更なる面積化と、防水設計、耐用年数の向上、鉛代替となる材料開発などの課題も多く、大規模に普及する見通しはたっていない。将来的には、塗布型の量産技術によるコスト低下が必要となるが、他の太陽電池のコストも低下していることを鑑みると、タンデム構造による高効率化の技術が不可欠となる。

3. 2015 年技術水準の単結晶シリコン太陽電池のコスト低下要因分析

図 2 に、2015 年技術の単結晶シリコン太陽電池モジュールのコスト構造と、既報[1]の 2012 年技術と比較したコスト低下要因の分析結果を示す。

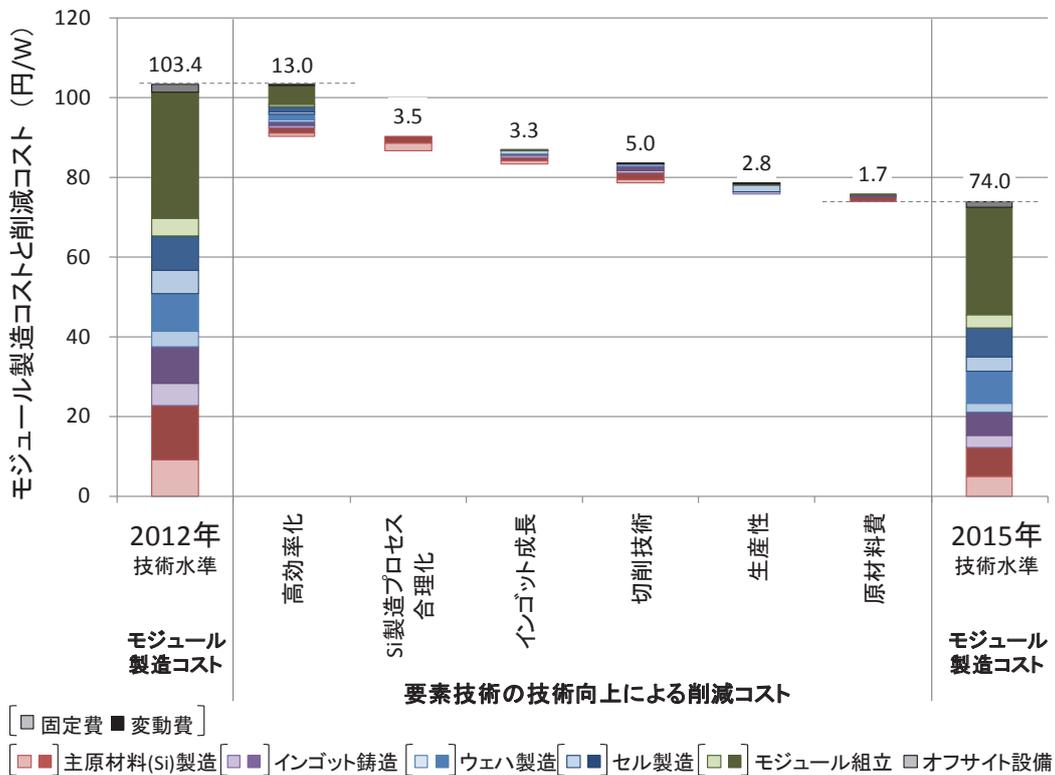


図 2 単結晶シリコン太陽電池モジュール製造コストとコスト削減技術
 (製造工程別、固定費・変動費によるコスト構造)

コスト構造は製造工程別に設備費と人件費からなる固定費 (□ 薄色) と原材料費と用役費からなる変動費 (■ 濃色) で示している。既報[1]と同様に LCS 低炭素技術・評価プラットフォームを用いて同じ製造プロセスを対象として計算しており、技術水準の向上と市場拡大による原材料費低減を評価している。既報[1]で比較したように 2009 年技術から 2012 年技術では、主に原材料費の低下と大規模化によるコスト低下の影響が大きかった。一方で、図 2 に示した 2012 年技術

から 2015 年技術では、高効率化をはじめとする技術開発によるコスト低下が大きいのが特徴であり、モジュール製造コストは 103 円/W から 74 円/W へと、約 28%低減した。評価した技術水準では、ともに年間生産量 1GW とする製造工場で生産可能な技術を対象としている。分析結果から、以下の要因によるコスト低下が示された。

(1) 高効率化

シリコン系太陽電池では高効率化が進んでおり、トップ値ではヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池で、セル変換効率 26%、モジュール変換効率 23%に到達している。性能指標として推計したモジュール変換効率は、量産体制の平均効率という観点から設定しており、2012 年 17%から 2015 年 20%へと向上している。その結果、製造コストは 13 円/W低下しており、最も大きなコスト低下の要因となっている。

(2) シリコン製造プロセスの合理化

シリコン製造（シーメンズ法）では、用役費の割合が大きく、大型化などから約 1.5 倍の生産性向上と製造電力消費量を 30~50%削減する省エネルギー技術により、設備費と用役費のコスト低減が進んでいる。本分析では、シリコン製造に用いる電力単価は日本国内の 12 円/kWh を用いたが、中国、米国ではそれぞれ 6 円/kWh、8 円/kWh 程度であり、海外生産によるコスト比較は今後の検討課題である。

(3) インゴット結晶成長技術

主原材料となるシリコンからインゴットを鋳造するプロセスでは、結晶成長技術の向上により、インゴットの大型化から約 1.4 倍の生産性向上が進んでおり、設備費と用役費の相対的な費用も下がっている。単結晶シリコンでは、不純物や添加剤の濃度分布の制御技術の向上により、高効率化に寄与するインゴット結晶成長技術が進んでいる。

(4) 切削技術

太陽電池基板となるウェハをインゴットからマルチワイヤソーにより切り出す。このプロセスでは、マルチワイヤソーに遊離砥粒式の数倍の生産速度がある固定砥粒式を用いて生産性を向上させ、ウェハ厚およびカーフロス（欠損）の低減によりシリコンの消費量を削減させている。ウェハ厚は 180~200 μm から 150~180 μm へと切削技術も向上しており、ハンドリング技術やエッチング等の周辺技術も向上している。セル構造や電極などの条件はあるが、ウェハ厚 100 μm の生産技術も実現している。また、ウェハ切削の切り代の低減のため、ワイヤの細径化も進んでおり、線径 120~150 μm から 80~120 μm へと低下している。先端技術では、40~60 μm のワイヤ径の実現や、引張強度も 1.2 倍程度向上させた事例もある。ウェハ厚の薄肉化には製造工程を総合的に評価した技術開発が必要であり、実際の工場における技術向上には期間を有するため、想定している技術水準と一般普及品の数値が異なることは留意する必要がある。

(5) セル化・モジュール化の生産性と原材料費

セル化・モジュール化では生産速度が工程によって 1.5~2 倍程度向上しており、また、セルやモジュール部材も市場拡大に伴い低下している。特にセル電極は線幅の低減による消費量も削減し、また電極材も価格低下が進んでいる。

4. 分析手法の評価

4.1 過去の計算と現状の予測

本手法とこれまでの技術の流れを評価するため、本手法の基礎とした文献 9 の計算結果と本稿で示した計算結果を比較する。文献 9 は 1991 年に将来技術を予測して計算されているため、生産規模とモジュール発電効率、製品設計、製造技術などの技術水準を 1991 年当時から 2009 年までの時系列に揃える。図 3 に、文献 9 の計算値を用いた計算結果を“1991 年計算値”として“○”と青線で示し、本稿で示した計算結果を“◇”と黒線で示す。実線はモジュール製造コスト、点線は周辺システムを含むシステムコストである。また、日本と中国のモジュール価格を“×”にて示して比較する。“1991 年計算値”をみると、技術予測が推計できれば 25 年前の計算でも現在の計算手法と同等の精度で計算できていることが分かる。LCS では、この計算手法を発展させ、多種多様な電源システムを対象に分析する手法を開発してきた。一方で、技術水準の予測は難しく、常に技術動向から継続した評価が必要なことは、留意すべき点である。

日本のモジュール価格の推移をみると、市場の拡大に伴い、“×”で示したモジュールの実勢価格が低下するとともに、実線で示したモジュール製造コスト試算値との差は縮んできている。このことから、技術開発により製造コストが低下するとともに、近年は市場の拡大により、モジュール出力あたりのその他のコスト（販売経費や一般管理費、利潤、ファイナンス等）の割合は低下していることも分かる。また、モジュール製造コストと中国のモジュール価格を比較すると、拡大する市場と量産体制の流れから原価割れしていることが分かる。その傾向は各社の有価証券報告書やアニュアルレポートからも確認でき、生産規模の大きな企業もいくつか経営破綻に追い込まれている。2012 年頃から欧米で反ダンピング・反補助金課税が課せられ、また、輸入価格および輸入量の制約などもかかるようになったが、この計算結果からもその論拠が窺える。一方で、生き残った企業では、更なる大規模生産と、収率改善や発電効率向上などの技術開発と経営努力を続けており、継続してコスト低下が進んでいくことも予測される。今後の技術開発の動向と共に注視していく必要がある。本分析は日本における生産を基準としているため、詳細な国際比較などは今後の課題である。

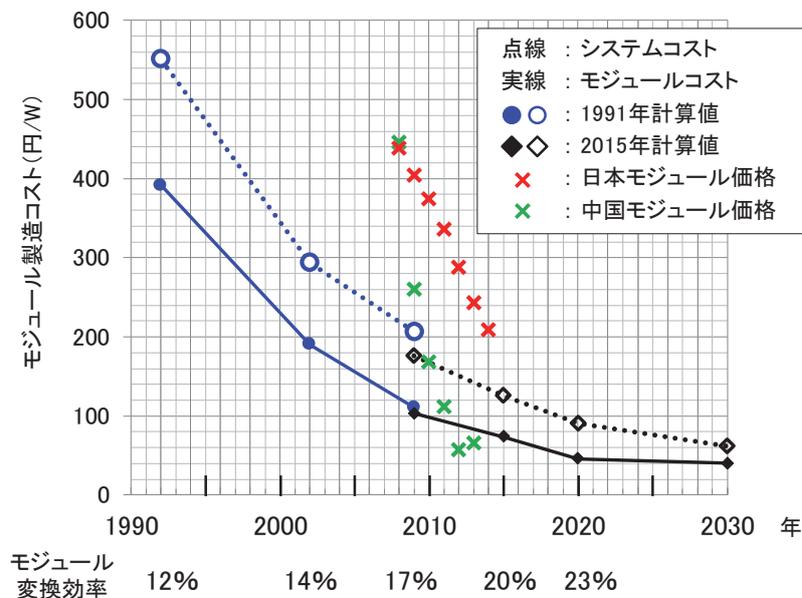


図 3 モジュール製造コストの計算値と実勢価格の比較

データ元：「●○：1991 年計算値」は文献 7、「◆◇：2015 年計算値」は本稿計算値、「×：日本／中国モジュール価格」は IEA PVPS の Trends in photovoltaic applications 2010～2015 より作成

4.2 今後の課題と展望

これまで、メガソーラ・住宅用を対象とした、日本における太陽光発電システムの製造コストを評価してきた。大量生産による大規模普及が進む一方で、補助金や制度の支援がなくなり、更に系統安定化のための追加費用も増加してくる。このため、更なる低コスト化が求められている。技術としては、量子ドットによる高効率化の実現、ペロブスカイト等の有機系太陽電池による簡易な塗布工程などが低コスト化に寄与することが期待されている。量子ドットでは、理論効率が 50%を超えるため高効率化が期待される一方で、技術の実現の時期と製造工程も含み低コスト化にどの程度寄与するか、といった評価が必要である。ペロブスカイトでは、印刷技術を用いた低コスト化が期待される一方で、耐久性や大面積化などの課題もある。更に、直達光が多い地域では集光型を用いた低コスト化への期待もある。以上のような集光型などの異なる形状、量子ドット、ペロブスカイトを含む有機系などの新規太陽電池についても、本手法を用いたコスト構造および技術課題について分析を進めていく。

また、特に中国やアジア地域では太陽電池モジュール製造コストが下がりつづけており、生産工程の地域による影響、原材料費低下や製造プラントの大規模化による影響評価も含めて評価を進めていく。

5. 政策立案のための提案

本稿では定量的技術シナリオを用いて、技術水準の向上に伴う各種太陽電池の製造コストを分析し、近年の技術開発によるコスト低下要因を評価した。太陽電池モジュールの製造コストは、2012 年技術水準の 103 円/W から 2015 年技術水準の 74 円/W へと約 28%コスト低減があり、高効率化、生産性等の技術開発の効果が示された。

また、LCS では、種々の太陽光発電システムの製造原価を技術毎に積み上げて計算し、現状および将来に向けた製造コストを分析する手法を開発してきた。その結果を用い、イノベーション政策立案のための提案を、LCS 提案書として示している[1]-[3]。LCS の手法を用いることで、同一の基準でそれらの技術を比較し、総合的な評価、およびコスト低減に寄与する核となる技術開発課題の特定が可能となる。この手法について過去の計算値とも比較し、将来技術の評価手法としての有用性も示した。これらの結果から以下を提案する。

- 分析結果から、市場の拡大のみではなく技術開発によるコスト低減が進んでいることが示されており、継続した定量的な技術評価が必要である。
- 将来のコスト低減には高効率化が不可欠であり、これまでに、トップ層と製造工程を比較したシリコン系タンデムの評価[2]、セル構造の異なる CIGS および III-V 族の化合物系タンデムの評価[3]から、モジュール変換効率 30%を実現するタンデム型太陽電池が有望であることを示した。タンデム化のための界面制御技術などの技術開発を進めることが重要である。
- コスト低減に寄与する技術開発の影響を定量的に評価するため、定量的技術シナリオを用いた将来技術評価が有用である。

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—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—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2014 年 3 月.
- [2] 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) —定量的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—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2015 年 3 月.
- [3] 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.3) —定量的技術シナリオに基づくコスト低減技術評価 (タンデム型を含む高効率化合物系太陽電池) —”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2016 年 3 月.
- [4] 井上智弘, 山田興一, “単結晶シリコン太陽光発電システムの経済性・環境性評価,” 日本エネルギー学会, 96 卷 3 号, 2017 予定.
- [5] 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, “「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」の構築”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2014 年 3 月.
- [6] 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, “「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」の構築 (Vol.2) ”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2015 年 3 月.
- [7] 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, “低炭素社会作りのための総合戦略とシナリオ”, 第 2 章, 2012 年 7 月.
- [8] M.A.Green et al., “Solar cell efficiency tables (version 49)”, progress in Photovoltaics: Research and applications, 25, 3-13, 2017.
- [9] 山田興一, 小宮山宏, “太陽光発電工学”, 日経 BP, pp254, 2002.

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.4)
—定量的技術シナリオに基づく太陽電池モジュールの
製造コスト低下要因分析—

平成 29 年 3 月

“PV power systems (vol.4):

PV Manufacturing Cost Reduction Factor Analysis 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,
2017.3

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

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
<http://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2017 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。
