

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.5）

一定量の技術シナリオに基づく結晶系シリコン太陽電池と
ペロブスカイト型太陽電池のコスト低減技術評価－

平成 31 年 3 月

PV power systems (Vol.5):

Cost Estimates for Crystal Silicon Solar Cells and Perovskite 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

概要

低炭素社会戦略センター（LCS）では、これまで種々の太陽光発電システムのコスト構造を分析してきており、将来の技術水準に基づく製造コストを詳細に評価する手法を確立している。本稿では、近年の市場の拡大と技術進展を考慮して再評価し、将来に向けたコスト展望と技術開発課題を示した。また、主流である結晶系シリコン太陽電池と、高効率かつ廉価な太陽電池として近年注目されているペロブスカイト型太陽電池について、LCS の定量的技術評価手法を用いて現状および将来のコスト構造を分析した。その結果、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、ウェハの薄型化と高効率化により、さらにコストが半減することが見込まれた。ペロブスカイト型太陽電池では、高効率化・大面積化により、現状のシリコン太陽電池と同等の製造コストに低減するが、耐久性が低く、発電コストは 1.5 倍と高くなるため、シリコン太陽電池と同等の耐久性向上が重要であることが示された。それぞれの将来の技術開発を考慮し、異なる太陽電池技術を総合的に評価していくことが重要である。

Summary

The Center for Low Carbon Society Strategy (LCS) has been analyzing the manufacturing cost structure of various types of photovoltaic (PV) power systems. A methodology has been established to evaluate in detail of manufacturing costs based on estimated future technology levels. In this paper, we reevaluated PV technology and cost prospects in consideration of recent market expansion and technology development and have shown cost outlook and issues of technology development for the future. Using our quantitative technology evaluation method, we analyzed the current and future cost structures of crystal silicon solar cells, which are mainstream, and of perovskite solar cells which are recently attracting attention as high efficiency and inexpensive manufacturing technology. The result of this evaluation showed that the cost of silicon solar cells was expected to be reduced by half led by technology development such as lower raw material costs due to upsizing, thinner wafers and higher efficiency. Although manufacturing cost of perovskite solar modules is reduced to the almost same cost as silicon solar modules due to technological development for high efficiency and greater surface area, the power cost increases to 1.5 times due to its low efficiency compared to crystal silicon cells and low durability. Therefore, it is shown that improvement in durability is also important. Considering future technological development, it is important to comprehensively evaluate different solar cell technologies.

目次

概要

1. 緒言..... 1

2. 太陽光発電システムと将来展望..... 1

 2.1 太陽光発電システムのコスト展望（2018 年版）..... 1

 2.2 太陽光発電システムの将来技術と課題..... 3

3. 将来の単結晶シリコン太陽電池のコスト低下要因分析..... 4

4. ペロブスカイト型太陽電池のコスト展望..... 6

5. 政策立案のための提案..... 7

参考文献..... 8

1. 緒言

太陽光発電は世界的に普及拡大が進んでおり、コスト低減も進んでいる。低炭素電源システムの実現には、太陽光発電システムの大規模導入が不可欠であり、導入目標値をさらに高めた技術評価が必要となる。低炭素社会戦略センター（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て同一の基準で異なる技術と比較し、現状および将来に向けた製造コストを分析してきている[1-6]。この LCS の手法を用いることにより、総合的な評価から、コスト低減のために核となる技術課題を特定することが可能となる。これまで、2012 年技術[1]、2015 年技術[6]として評価してきた既存の各種太陽電池に加え、結晶系シリコン基板タンデム[2]と化合物系タンデム[3]のタンデム化技術による高効率化と経済性について評価してきた。本稿では、近年のコスト低下と市場拡大に伴う原材料費および製造機器価格の低下、最先端の技術開発状況なども考慮し、現状および将来の種々の太陽光発電システムの導入原価を再評価して、新たに 2018 年版コスト展望として改訂した。また、主流となっている単結晶シリコン太陽電池について、技術革新と市場拡大に伴う原材料費低減などから、さらなるコスト低減可能性を評価した。

さらに、近年着目されているペロブスカイト型太陽電池を対象に、現状および将来のコスト構造を詳細に分析し、ペロブスカイト型太陽電池の可能性についても考察した。ペロブスカイト型太陽電池は近年、変換効率の上昇が見込まれており、発電層の塗布による製造が可能であることから、新型太陽電池としてコスト低減への期待が高まっている。一方で、新たな技術の経済性は既存技術の将来コストと比較し、その優位性を明らかにする必要がある。そこで、将来の単結晶シリコン太陽電池と比較し、技術開発による将来コストの競合可能性について評価し、技術開発課題を明らかにした。

2. 太陽光発電システムと将来展望

2.1 太陽光発電システムのコスト展望（2018 年版）

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。既報では 2009 年技術[6]、2012 年技術[1]、2015 年技術[4]を基軸に評価・改訂してきたが、近年の技術動向を基に、本稿では 2018 年技術を基軸に再評価した。システム導入原価は、各評価年に推定した技術水準に基づく製造技術から製造工程を設計して計算しており、「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」の手法を用いて計算した結果である。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を継続して評価している。既報と比較して、製造プロセスは同じであるが、急激な市場拡大と技術開発が加速しており、先端の開発動向に加えて、市場拡大に伴う原材料価格と製造機器価格の低下を考慮した。2015 年技術を評価軸とした 2016 年版コスト展望[4]では、大規模化に伴う原材料費の低下、発電効率や生産性の向上があり、製造コストを見直した。本稿の 2018 年版では、原材料費・製造機器の更なるコスト低下が顕著であった。また、生産規模、導入規模共に拡大が続いており、将来においても原材料費の低下が見込まれる。このため、本稿では技術開発の加速と原材料費の低下を考慮して、現状および将来の技術水準を見直した。2030 年の技術開発についてはタンデム構造にも着目している。ペロブスカイト太陽電池については、本稿で詳細なコスト構造を分析しており、2025 年および 2030 年以降の技術として図 1 に示した。

図 1 中の実線は、現状のコストおよび従来技術の改良から達成可能な技術水準であり、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。一方でコスト低減の可能性があり、実

研究室レベルでの研究が進んでいる未来開発品の製造コストを、点線および“○”で示している。シリコン系太陽電池は、市場規模の拡大に伴う原材料費の低下による影響が顕著であり、急激なコスト低減が進んでおり、主要かつ最も廉価な太陽電池となっている。原材料収率の向上、生産規模の拡大、生産性の向上、高効率化も進んでいる。薄膜化合物半導体太陽電池では、生産性と効率が向上しており、シリコン系太陽電池に匹敵するコスト低減が進んでいる。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が、実際にはシリコン系太陽電池の市場規模の方が大きく生産規模も異なることに留意する必要がある。

図 1 において点線および“○”で示した未来開発品については、結晶系シリコン太陽電池の薄型化とタンデム化、薄膜化合物 (CIGS) 太陽電池のタンデム化、新規薄膜太陽電池として有機系であるペロブスカイト型太陽電池を評価した。結晶系シリコン太陽電池では、シリコンウェハの薄型化と高効率化が進んでいる。また、単結晶シリコン太陽電池にヘテロ接合を用いた場合にはモジュール変換効率 23% が達成されている。ウェハ厚を薄くする技術開発として切削技術も進んでいるが、普及には時間を要している。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 年にむけた技術として評価している。さら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% として評価しているが、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。タンデム構造でも、基板となるシリコンウェハやモジュール部材等のコスト低減の影響により、既報[2,3]の評価時より製造コストは低下している。

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が III-V 族太陽電池は製造コストが極端に高く図には示していない。原材料費は低下しているが、さらなるコスト低減のためには、タンデム化による高効率化が必要である。CIGS 太陽電池のタンデム化では、積層技術による構造の違いも含めて評価してきた[3]が、ここでは 2 端子型の計算結果を示している。2 端子型では界面制御技術開発が困難である一方で、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、製造工程数や材料使用量が増えるため、実現可能性と追加費用等を評価して検討する必要がある。2030 年にモジュール変換効率 30% 達成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、コストが 1/10 以下となる製造技術の開発が必要条件である。

有機、ペロブスカイトなどの新規薄膜太陽電池では、特にペロブスカイト型太陽電池の変換効率が向上し、シリコンセルサイズと同等となる大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、さらなる大面積化と防水設計や耐用年数、鉛の材料代替などの課題も多い。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、耐久性の向上とタンデム構造によるモジュール変換効率 30% 以上への高効率化技術確立が不可欠となる。

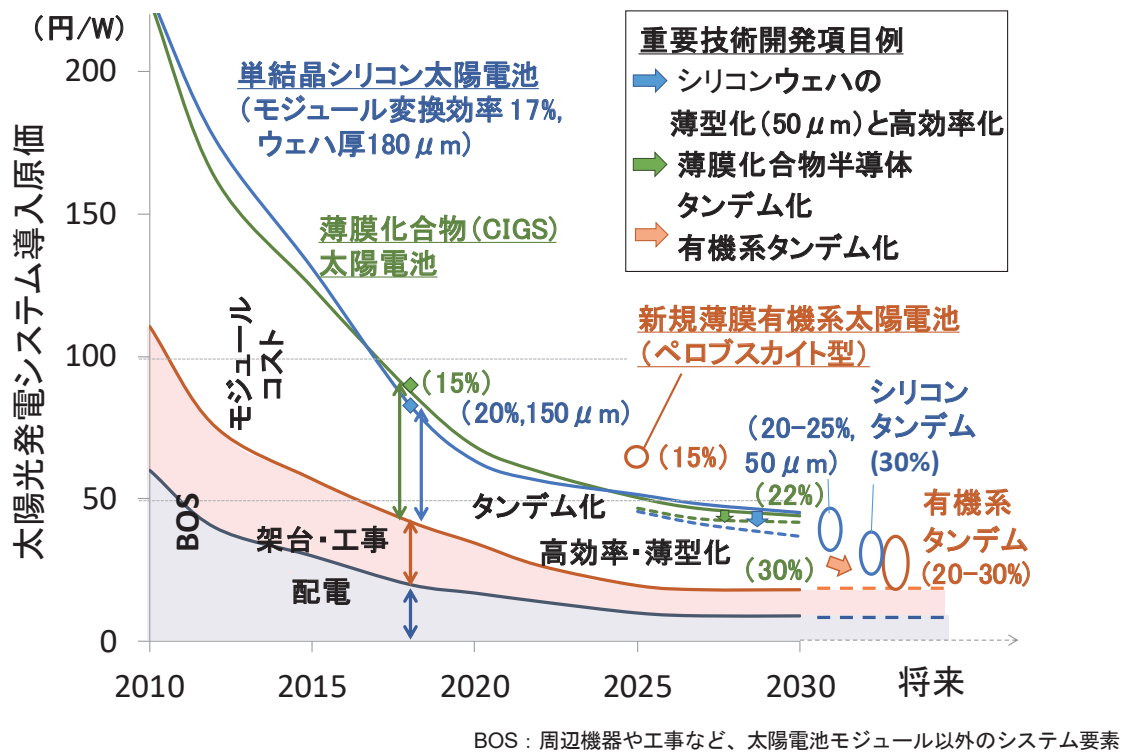


図 1 太陽光発電システムのコスト展望 2018 年改訂

2.2 太陽光発電システムの将来技術と課題

LCS では、電源構成モデルを用いて将来の低炭素電源システムを評価しており、技術水準、電力需要、系統技術などを推定し、CO₂ 排出量制約下における電源システム全体の総経費を最小化する各地域の電源導入量を推計している。2050 年の低炭素電源システムの実現のためには、電力需要や系統技術の条件によっては、太陽光発電システムの設備容量は 300~600GW 以上必要との結果もでている[7]。このモデルでは、異なる再生可能エネルギーの技術水準に対するシナリオを評価しており、対象地域ごとに想定された太陽光発電システムを設置可能な箇所とその面積、気象データに基づく日射量、系統安定度や需給調整の制約を計算して導入量を計算している。太陽電池のモジュール変換効率については、現状の 20% から、技術促進ケースではタンデム化により達成可能な 30% までの範囲に対して評価している。特に電源システムからの CO₂ 排出量を 2013 年比で 90% 以上削減するケースでは、現状のモジュール変換効率 20% のままでは、本分析において導入ポテンシャルとして想定されている国内の設置可能箇所の面積全てを利用しても電力供給が不足する地域が存在する計算となる。このため、設置可能箇所の拡大と、モジュール変換効率 30% 以上を目指した技術開発が重要となる。モジュール変換効率 30% 以上の実現には、タンデム型の開発が不可欠となるが、III-V 族太陽電池ではコストが高く、シリコン系、CIGS、有機系、複合型のいずれも実験室での小面積セルにおける検討段階である。それぞれの製造技術を検討した経済性評価と技術の実現可能性を含めて統合的に評価し、高効率かつ低コストの太陽光発電システムの実現に向けた評価が重要となる。

3. 将来の単結晶シリコン太陽電池のコスト低下要因分析

LCS では、これまでに技術評価手法を用いて製造コストを計算し、定量的技術シナリオとして示してきた。近年の市場拡大に伴い、技術進展と市場拡大が躍進的に進んでいる。このため、まず、単結晶シリコン太陽電池の現状および将来の技術シナリオを再構築し、これらの技術シナリオに基づいたコスト低下要因を分析する。

表 1 に単結晶シリコンの太陽電池の技術シナリオの主な設定値を示す。既報[6]では、技術開発の向上によるコスト低下要因を示してきており、モジュール変換効率、ウェハ厚の削減、生産性の向上、などを評価してきた。本稿ではさらに、市場拡大における原材料費と製造機器コストの低下も考慮してコスト構造を再評価した。図 2 に、2018 年技術と 2012 年技術（既報[1]）とを比較したコスト低下要因分析の結果を、図 3 に、2018 年技術と 2030 年技術とを比較したコスト低下要因分析の結果を示す。図 2 および図 3 において、コスト構造は、設備費と人件費からなる固定費（■濃色）と原材料費と用役費からなる変動費（□薄色）を製造工程別に示す。

原材料費低減は、軽量化と市場拡大による原材料価格の低下による。特に、モジュール部材、ガラス、封止材、裏面シート、端子箱などの価格低下が影響している。シリコン製造コストの低下は、シリコン製造に必要な電力消費量の削減など製造プロセスの合理化の影響により、シリコン製造コストが低下している。また、モジュール変換効率も向上している。インゴット成長技術の向上と量産化の影響から、インゴット、ウェハの製造コストも急激に低下してきた。ウェハ切削基礎技術はウェハ厚 100 μm 以下の技術水準にまで向上しているが、廉価かつ汎用的技術となるには時間を要している。

分析の結果、2030 年に向けて、さらに製造コストは半減することが示された。そのためには、高効率化が重要であるとともに、生産性の向上、ウェハの薄型化、原材料費の低減などが寄与することが明らかとなった。

表 1 単結晶シリコン太陽電池の技術シナリオ

技術水準	2012 年[1]	2018 年	2030 年
モジュール変換効率	17%	20%	25%
モジュール面積	1.3m ²	1.3m ²	2.6m ²
セルサイズ	156mm	156mm	210mm
ウェハ厚	180 μm	150 μm	50 μm
年間生産規模	1GW	1GW	5GW

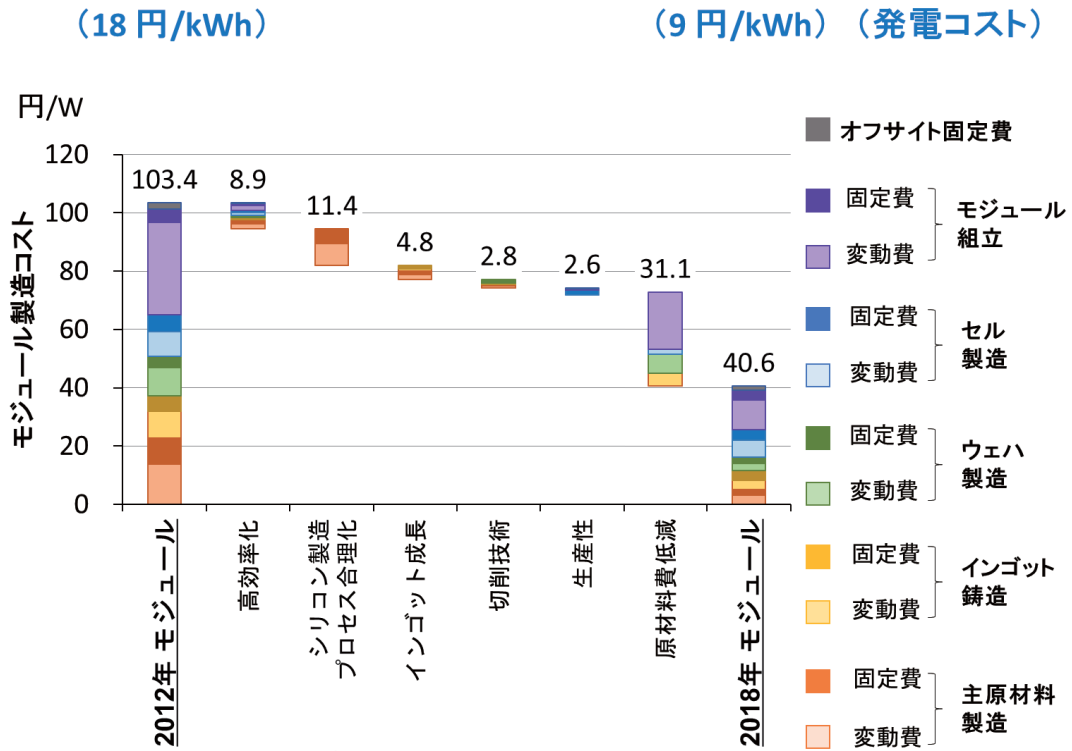


図 2 単結晶シリコン太陽電池のコスト低減技術 (現状)

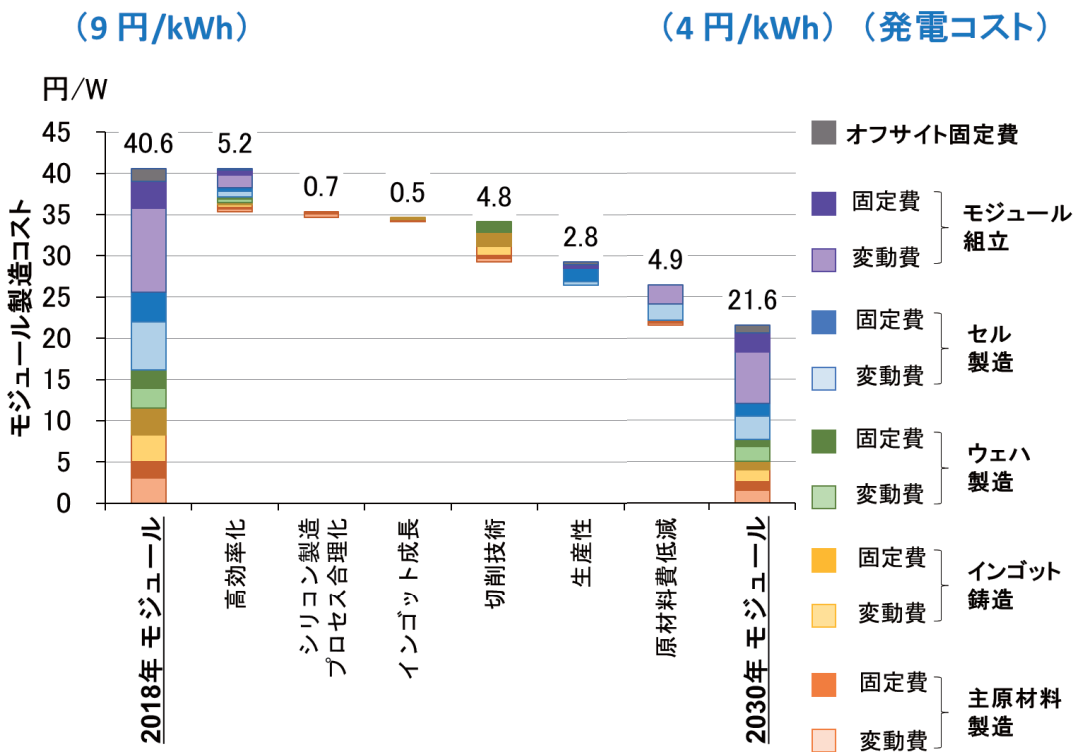


図 3 単結晶シリコン太陽電池のコスト低減技術 (将来)

4. ペロブスカイト型太陽電池のコスト展望

より低コストな製造工程である塗布型でかつ高効率な太陽電池として、ペロブスカイト型太陽電池が注目を集めている。実験室水準では 0.07cm^2 の小面積セルでセル変換効率は 23.7%を達成しており[8]、シリコン太陽電池の理論効率を超えるポテンシャルを有しているとされる。大面積化、耐久性の課題があるが、海外では、10cm 角のセルでも、10%を超えるモジュールが開発されている。表 2 に、本稿で評価したペロブスカイト型太陽電池の将来の技術水準を示す。10cm 角のセルサイズの太陽電池は実現しており、ガラス基板に大面積化して製膜し、大規模生産することを想定した。2020 年では量産技術が確立しないため、年間生産規模は 10MW と小さくし、2025 年には年間生産規模を 100MW とした。

計算の結果を図 4 に示す。2020 年技術では、モジュールサイズが小さく、また封止のための特殊設計によりモジュール部材のコストが高くなる。2025 年技術では、大面積化と生産性の向上により、製造コストは 39 円/W となるが、耐用年数の課題から発電コストは 16 円/kWh と、単結晶シリコン太陽電池と比較して、3 倍程度高い。年間生産規模 10MW と 100MW では、製造機器の大型化などにより約 30 円/W の差が生じるが、200MW 以上とする際の製造コストは 1～2 円/W の差となる。ただし、ここでは一括受注などによる原材料費のコスト低減は含まれていない。2030 年以降に、モジュール変換効率 20%が実現すると、モジュール製造コストは 22 円/W と、定格出力あたりでは単結晶シリコン太陽電池と同等の製造コストになるが、耐久性の課題から、発電コストは 1.5 倍程度である。

経済性評価については、時間軸を考慮して、異なる技術に対して総合的に評価することが重要である。ペロブスカイトは塗布型を用いることから、将来の低コスト化が有望視されているが、単結晶シリコン太陽電池のコスト低下の展望と比較すると、さらにコストを低下させることが必要であり、高効率化と大面積化に加え、結晶系シリコン太陽電池と同等となる耐久性の向上が必要となる。

先に示したように、モジュール変換効率の向上は、日本において重要な技術開発項目となるため、ペロブスカイト型太陽電池についてもタンデム化の技術開発を検討することが重要となる。今後は、そのほかにも、封止技術、耐久性、フレキシブル太陽電池としての新しい産業における有用性などの可能性についても分析を進めていく。

表 2 ペロブスカイト太陽電池の技術シナリオ

技術シナリオ	2020 年	2025 年	2030 年以降
モジュール変換効率	10%	15%	20%
モジュール面積	0.13m^2	0.8m^2	1.3m^2
年間生産規模（ライン）	10MW	100MW	200MW
耐用年数	5 年	7 年	10 年

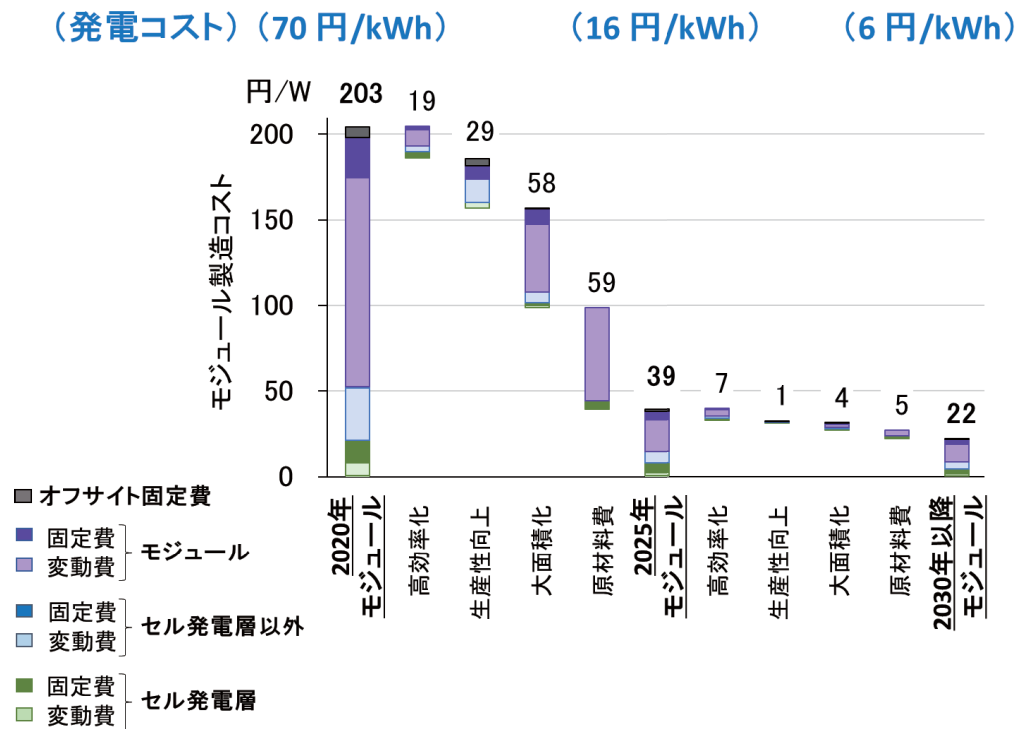


図 4 ペロブスカイト太陽電池の発電コストとコスト低減要素技術

5. 政策立案のための提案

LCS では、常に技術開発の進展を取り込み、市場拡大時期も考慮した最新の技術予測に基づいて分析している。本手法を用いることにより、具体的な技術開発目標が明らかになった。

分析の結果、2018 年技術では単結晶シリコン太陽電池の製造コストは 41 円/W に低減しており、2030 年に向けて、さらに製造コストは 22 円/W へと半減することが示された。そのためには、高効率化が重要であり、さらに、生産性の向上、ウェハの薄型化、原材料費の低減などが寄与することが明らかとなった。

ペロブスカイト太陽電池は、モジュール変換効率 20%と大面積化によって、モジュール製造コスト 22 円/W へと低減する可能性が示されたが、耐久性の問題などから、発電コストは単結晶シリコン太陽電池と比較して 1.5 倍程度高くなる。高効率化、大面積化とともに、耐久性の課題解決が重要となる。

種々の太陽電池の経済性評価の結果、太陽光発電システムには主要電力源として大規模に普及する経済性の見通しが立っている。将来も結晶系シリコン太陽電池が主流であり、他の太陽電池は将来コストに競合可能となる技術開発が必要である。

電源構成モデルを用いた分析からは、2050 年の低炭素電源システムの実現には、電力需要や系統技術の条件によっては太陽光発電システムの設備容量は 600GW 以上必要との結果がでている。これらは将来の技術促進ケースの分析結果であり、現状のモジュール変換効率のまま技術停滞すると、本分析にて想定した国内の設置可能とされる面積全てを利用しても電力供給が不足する地域が存在する計算となる。このため、設置可能箇所の拡大と、モジュール変換効率の向上が必要であり、具体的には変換効率 30%以上を目指したタンデム型太陽電池の技術開発が重要となる。

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・技術ロードマップー”, 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) 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ー”, 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) 一定量の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) ー”, 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誌, 96 巻 3 号, p. 58-67, 2017 年 3 月.
- [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, “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.
- [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, “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ー”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2017 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, 技術開発編, “低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol. 2) ーゼロエミッション電源システム構築に向けた技術開発課題ー”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2018 年 3 月.
- [8] M.A. Green et al., “Solar cell efficiency tables (version 53)”, Progress in Photovoltaics: Research and applications, 27, 3-12, 2018 Dec.

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.5）
一定量の技術シナリオに基づく結晶系シリコン太陽電池と
ペロブスカイト型太陽電池のコスト低減技術評価－

平成 31 年 3 月

PV power systems (Vol.5):
Cost Estimates for Crystal Silicon Solar Cells and Perovskite 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,
2019.3

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

© 2019 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。
