

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) -

平成28年3月

PV power systems(vol.3):

Cost Estimates for High Efficiency Compound 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-FY2015-PP-01

概要

太陽光発電システムは広く普及し始めているが、大規模な導入に向けて更なるコスト低減が不可欠であることから、低炭素社会戦略センター（LCS）では、将来の技術開発を考慮したコスト削減技術の評価を行っている。既報では各種太陽電池を対象に分析し、2030年に太陽光発電システムの発電コストが5円/kWhに達成する道筋を示した。中でも低コスト実現可能となる薄膜化合物太陽電池では、高効率化技術が重要技術開発項目であることを示してきた。

本稿では、構造の異なる4端子型・タンデム型を含む高効率化合物系（CIGS・III-V族）太陽電池を対象とし、コスト低減技術の開発達成時期を明確にした定量的技術シナリオを構築し、将来の経済性を評価した。その結果、現状技術の単層CIGS太陽電池では、システム導入原価125円/Wから2020年に97円/Wへのコスト低減が見通された。2030年以降の技術水準として、タンデム型技術が達成されると、システム導入原価50～70円/Wと試算され、構造の違いによる技術水準を考慮した評価の必要性を示した。高効率化のためには、積層技術の抜本的な改良と結晶成長技術や界面制御技術などの加速が重要である。III-V族太陽電池については、高効率な一方でモジュール製造原価が高く、10倍以上の生産性の向上が必要である。集光型においても集光システムの抜本的な改良が求められる。

また、既報の評価との比較から、2009年から2015年にシステム導入原価が253円/Wから125円/Wへと半減してきたことを示した。このコスト低減の要因は、高効率化、市場拡大による原材料・周辺システム（BOS）のコスト低下、製造機器等のコスト低減、生産性の向上に関する技術であり、その影響を評価している。このように、技術進歩や市場拡大を考慮して設計・評価を継続することが必要である。

Summary

This paper evaluates the cost reduction potential of Photovoltaic (PV) systems which is now widely spreading and is expected to achieve further cost-reduction for the sake of larger-scale installation. In the previous paper, we analyzed the cost structure of various solar cell systems using quantitative technology scenarios and proposed a PV technology roadmap to achieve 5 yen/kWh power generation costs by 2030.

In this proposal, we proposed required technologies to reduce the PV system cost as a result of our analysis using the quantitative technique scenarios. We evaluate present and future technology scenarios of compound PV systems (based on CIGS and III-V semiconductor materials) considering achieving time of research and development. To analyze future PV technology costs, we designed manufacturing process of different types of compound semiconductor solar cells, such as monolayer and multi-junction types including 4-terminal type. According to our cost-structure analysis, monolayer CIGS PV system cost will decrease from 125 yen/W to 97 yen/W by 2020. The installation cost of new CIGS tandem solar systems is calculated to be 50-70 yen/W with more than 30% module efficiency after 2030. These results show an importance of comparison among different designed solar cells in estimation of future cost-structure and technology development. To achieve more than 30% module efficiency, it is important to control defects and interface of cell layers, crystallization and formation technology. Although III-V solar cells have achieved high efficiency, manufacturing cost needs to be decreased with more than ten times higher productivity. Concentrating PV system also needs drastic improvement.

We also compare the PV installation costs with a technological level in 2009, 2012, and 2015, respectively. PV installation cost in 2009 decrease from 253 yen/W to 125 yen/W by using technological level in 2015. It was confirmed that this type of cost reduction involves price reduction of raw materials and production equipment based on market expansion and improvement in module efficiency and productivity. It is important to continue cost evaluation analysis at intervals of one or two years with the consideration of technology development and market expansion.

目次

概要

1. 緒言	1
2. 高効率化合物系太陽電池の経済性評価	2
2.1 分析手法	2
2.2 構造の異なる CIGS 化合物半導体太陽電池の設計	2
2.3 高効率 CIGS 化合物太陽電池の経済性評価	4
3. III-V 族タンデム型太陽電池の経済性評価	6
4. 技術進展を考慮した経済性評価の継続	7
5. 政策立案のための提案	8
参考文献	8

1. 緒言

低炭素社会戦略センター (LCS) では、太陽光発電システムの定量的技術シナリオを構築している。これまで、2030 年にむけた各種太陽電池を対象としてシステム導入原価の低減可能性を示してきた^[1-3]。既報^[2]では 2030 年に発電コスト 5 円 /kWh を達成する道筋を示し、特に高効率化のためのタンデム構造の技術開発が重要であることを示した。一方、高効率であっても、製造工程、原材料の単価によってシステム導入原価が異なるため、将来の技術開発も踏まえたコスト評価をしていく必要がある。本稿では、構造の異なる化合物系 (CIGS・III-V 族) 太陽電池を対象とした定量的技術シナリオを用い、技術開発の達成時期とコスト低減への影響を評価する。

本稿ではまず、既報^[1-3]のデータや技術水準を更新し、2015 年技術水準の太陽電池のモジュールの製造原価を計算し、化合物系半導体薄膜太陽光発電システムでは、2030 年にむけて更なる高効率化が不可欠であり、多層のタンデム構造が重要技術開発項目となることを示す。次に、単層、多接合 (タンデム)、2 端子、4 端子という構造の異なる CIGS (Cu, In, Ga, Se の元素を原料として生成された化合物) 薄膜太陽電池モジュールを対象として製造原価を評価し、将来のコスト低減効果を評価する。また高効率を実現している III-V 族の薄膜太陽電池の経済性も評価する。

LCS では、定量的技術シナリオ構築にあたり「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」^[4]として評価手法とその支援基盤を構築してきており、本分析にも利用している。さらに、市場変化や技術開発の現状を再評価し、設計・評価を継続しており、過去の変遷も踏まえて評価することにより、時間軸を考慮した技術開発戦略のための項目を提案する。

2. 高効率化合物系太陽電池の経済性評価

本提案書では、コスト優位性の高い化合物半導体太陽電池を対象として、将来のコスト低減効果を評価する。化合物半導体は CIGS、III-V 族太陽電池を対象として評価し、高効率化と技術の成熟度、設計の際に使用する部材の量などによる違いも含めて評価する。高効率化のためには異なる光吸収層を積層させるタンデム化が不可欠であるが、積層させる際の構造により、変換効率、技術水準、使用する部材の消費原単位も異なる。このため、本稿では構造の異なる太陽電池を比較評価している。

2.1 分析手法

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、詳細な製造工程は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^[1-3,5,6]。これにより、将来の新しい技術の評価することが可能になる。計算手法の詳細は既報^[2]に記しているが、ここでも簡単に計算手順を示す。第一に、対象とする太陽電池のデザインを設計し、将来達成可能な技術水準を推定する。推定した技術水準に基づき、製品の原材料と重量、製品性能などの製品仕様を定める。本稿では CIGS 太陽電池については構造の異なる太陽電池を設計した。第二に、推定した各要素技術の技術水準に基づき製造プロセスを設計し、モジュール製造原価を算出する。太陽電池の構造により製造工程や技術水準も異なるため、目標とする技術水準と照らし合わせて評価することが必要である。第三に、得られた結果を基に定量的技術シナリオを構築し、各要素技術の性能指標の達成目標を明確にし、コスト構造への影響を評価する。

モジュール製造原価については、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。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ライン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いる。それぞれ、各年の技術動向を推計したコストを評価している。

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、さまざまな技術シナリオを構築することにより、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となる。

2.2 構造の異なる CIGS 化合物半導体太陽電池の設計

本稿ではガラス基板に電極、発電層、透明電極を積層したサブストレート型の太陽電池を設計した。図 1 に、対象とした CIGS 太陽電池の構造を示す。基準ケースとして、①発電層を単層とし、電極、バッファ層等の各層は現状技術水準に基づき設計した。更なる高効率化のため、幅広い波長を吸収できるタンデム構造として②4 端子型と③2 端子型を対象にモジュール製造原価を比較した^[5]。発電層では太陽光の波長に対して材料の特性に応じた範囲の波長を吸収できる。このため、タンデム構造では、特性の異なる材料の発電層を積層することにより、より幅広い波長を吸収することが可能となる。②4 端子型は、発電層にそれぞれ電極をつけ、それらを重ねてセルとする。ボトムとトップの発電層それぞれを、独立に設計・製造することが比較的容易であるため、既に製品化が進行している。一方、③2 端子型では、発電層を直接積層する。発電層の電流を同一にする設計や界面制御が難しいため、実験段階である。

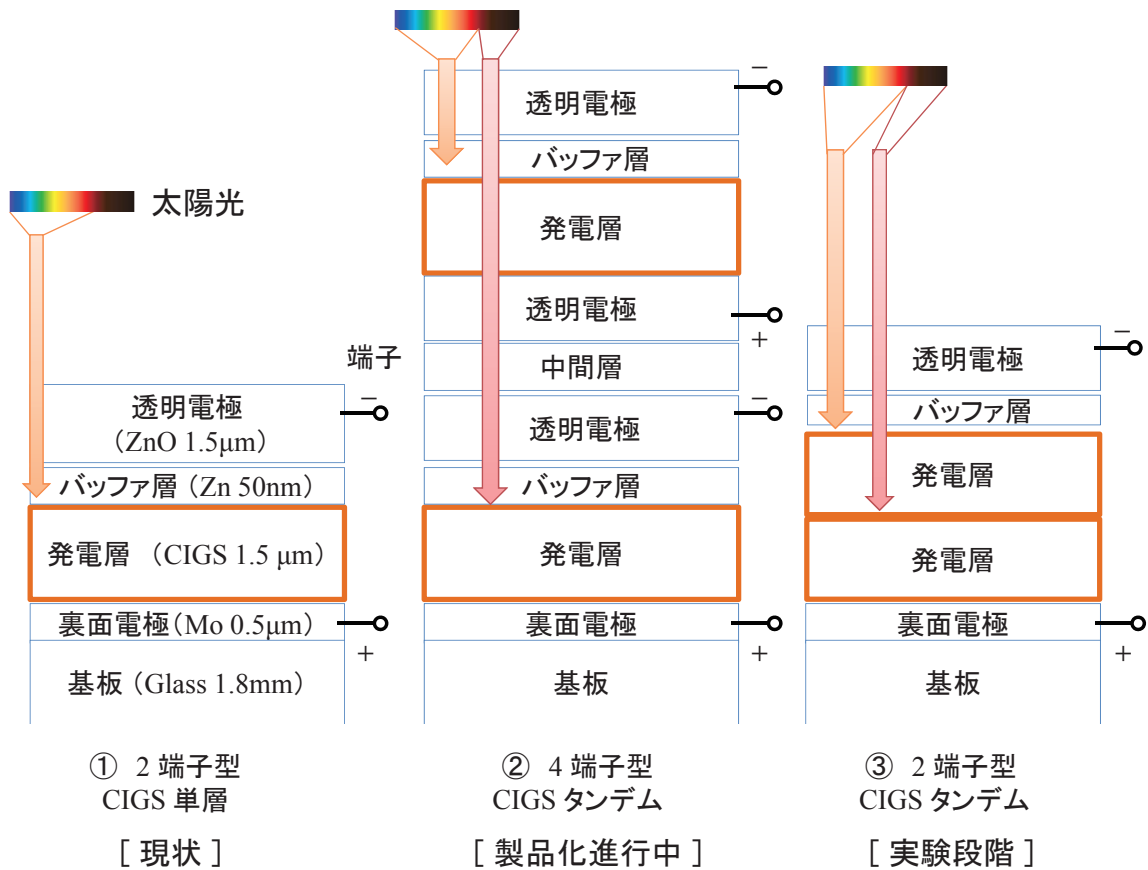


図 1 CIGS 薄膜太陽電池の構造

ガラス基板とする薄膜太陽電池の製造工程は、ガラス基板に裏面電極、発電層、透明導電膜を順に積層する。図 2 に、単層の CIGS 太陽電池の製造工程を示す。それぞれの工程で、膜をパターニングによりセル化している。モジュール工程を経て、太陽電池モジュールを製造する。タンデム型の場合は、必要とする層の工程がそれぞれ追加される。

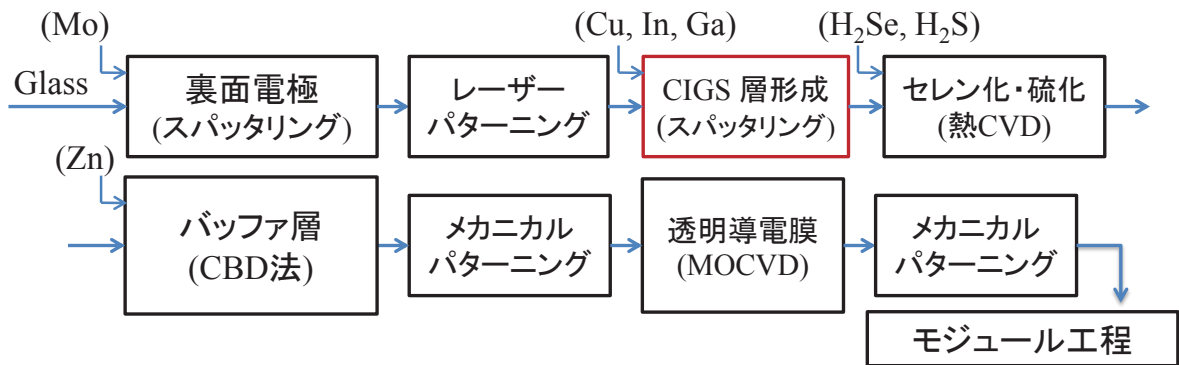
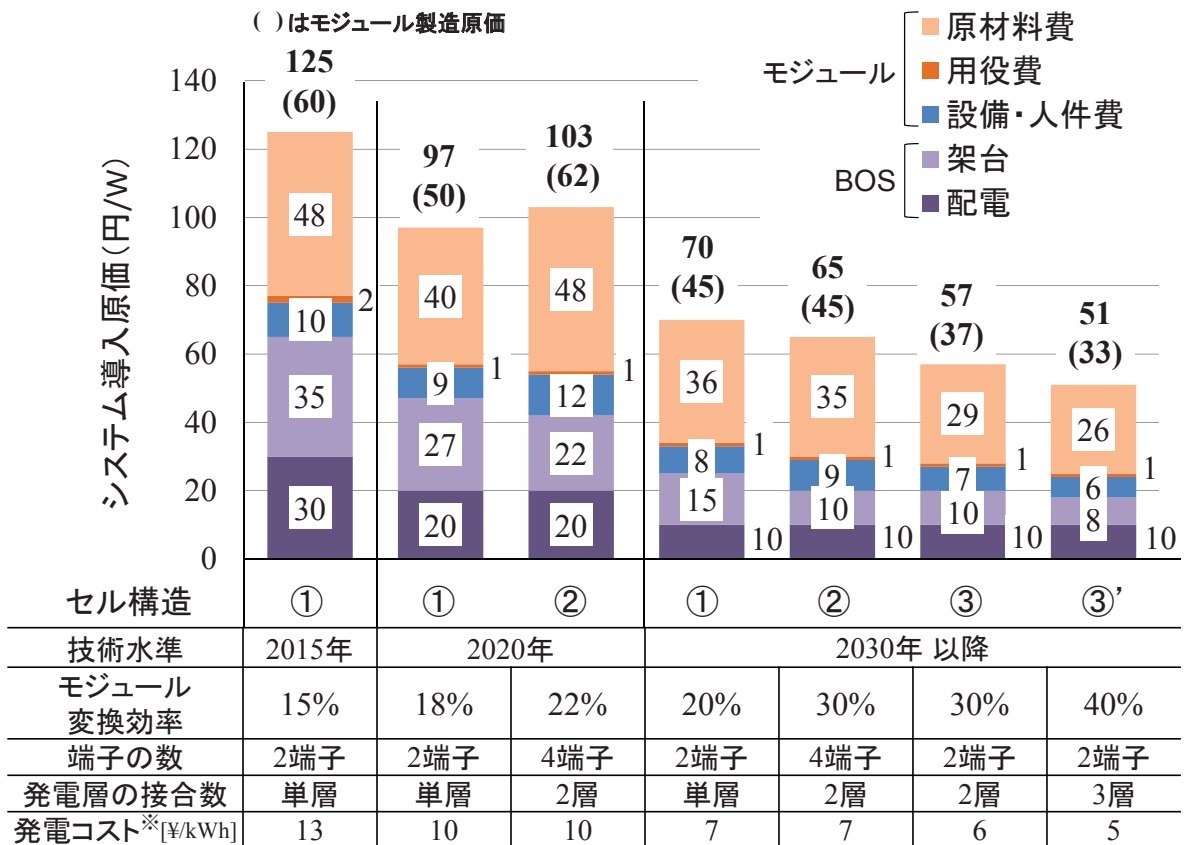


図 2 単層 CIGS 太陽電池モジュールの製造工程

2.3 高効率 CIGS 化合物太陽電池の経済性評価

現状および将来の CIGS 太陽光発電システムのコスト構造を図 3 に示す。現状の技術水準においては、セル構造を①単層 2 端子型太陽電池とし、モジュール変換効率を量産体制で実現している 15% とした。モジュール製造原価 60 円 /W に占める原材料費が 48 円 /W と大きく、また、周辺システム (BOS) の費用が 65 円 /W とモジュール製造原価と同等である。このため、将来のコスト低減のためには、モジュール変換効率を向上させることにより原材料費および BOS の架台等のコストを相対的に下げることが重要な技術開発項目となることわかる。なお、ここでのシステム導入原価とは、技術開発の効果を評価するために素のコスト構造を評価することを目的としているため、立地条件が影響する土地造成費用等と企業の運営による販売費および一般管理費等を除く製造原価のみを対象としている。①単層 2 端子型太陽電池が既に技術として確立しており、将来の見通しも立っているため、①単層 2 端子型太陽電池と比較して、② 2 層 4 端子型太陽電池と③ 2 層 2 端子型太陽電池、③' 3 層 2 端子型太陽電池を製品化するにあたり、目標とする達成時期について考察する。



※太陽光発電システムの発電コストは年経費率を 0.1、年間発電量を 1,000Wh/年/W とした。

図 3 現状および将来の CIGS 太陽光発電システムのコスト構造

将来の技術水準においては、2020 年には既に実現見通しのある技術開発項目を考慮して種々の技術進歩を考慮した。主なコスト低減の要素はモジュール変換効率の向上、生産性の向上に関する項目である。①単層 2 端子型太陽電池では、モジュール変換効率 18%が見込まれており、モジュール製造原価が 50 円 /W、システム導入原価が 97 円 /W である。一方、② 2 層 4 端子型太陽電池では、モジュール変換効率 22%が見込まれるものの、材料が多種必要となるためにモジュール

ル製造原価が 62 円 /W、システム導入原価が 103 円 /W と試算された。② 2 層 4 端子型の太陽電池は製品化が進行中であるが、2020 年までに、モジュール変換効率 22%以上に到達することが競合可能な水準となることがわかる。

さらに、実験段階で試みられている挑戦的な技術課題を達成した技術水準（③ 2 層 2 端子型太陽電池、③' 3 層 2 端子型太陽電池）を想定したケースについても試算し、ここでは 2030 年以降として記している。長期の技術シナリオを考察するには、理論変換効率から検討する必要がある。CIGS 太陽電池はインジウムとガリウムの組成比により、バンドギャップが 1.0 ~ 1.7eV の範囲にある。現状のバンドギャップ 1.2eV の単層のセル理論変換効率は 27%であるが、バンドギャップ 1.4eV では 39%となる。さらに、2 接合のバンドギャップ (1.1eV/1.64eV) を積層するとセル理論変換効率は 51%に達する⁶⁾。3 接合のタンデムでは、バンドギャップ (1.0eV/1.4eV/1.8eV) または (0.7eV/1.2eV/1.7eV) といった組み合わせによりさらなる高効率化が必要であるが、バンドギャップの異なる他の光吸収材料との組み合わせが必要となる⁷⁾。また、積層においては光を透過できるバッファ層などの開発も不可欠となる。以上のように各構造の理論変換効率と技術開発の現状から各シナリオの技術水準を定める。①単層太陽電池では、モジュール変換効率 20%を比較水準とした。CIGS 太陽電池セルの実験室段階でのセル変換効率は、既に 21%に到達しているが、この比較水準とはセル変換効率 25%を超える技術開発が必要な技術水準である。2 層、3 層については基礎研究が必要な段階ではあるが、理論変換効率を元に、モジュール変換効率を 2 層で 30%、3 層で 40%を基準としてモジュール製造原価を試算した。

試算の結果、①単層太陽電池のモジュール製造原価 45 円 /W、システム導入原価 70 円 /W に対し、② 2 層 4 端子型太陽電池ではモジュール製造原価 45 円 /W と同等であるが、変換効率が高いためシステム導入原価は 65 円 /W と安くなることがわかる。さらに③ 2 層 2 端子型太陽電池、③' 3 層 2 端子型太陽電池のシステム導入原価はそれぞれ 57 円 /W、51 円 /W であり、コスト削減ポテンシャルが高いことがわかる。また、図 3 に太陽光発電システムの耐用年数を 20 年として年経費率は 0.1、設備容量 1W 当たりの年間発電量を 1,000Wh/年（日本の平均的な日射量）とした場合の発電コストを記している。将来太陽光発電システムのための変動制対策にかかる追加費用なども考慮すると、さらなるコスト低減が必要であるため、発電コスト 5 円 /kWh を目指したこのような技術開発が必要となる。

このように、② 2 層 4 端子型は製造が容易である一方、材料が多種必要となる。③ 2 層 2 端子型は積層技術などの開発課題が多い。コスト低減には、結晶成長技術の加速、柔軟な積層技術の改良、界面制御技術や光閉じ込め技術など、高効率化に寄与する技術開発が必要である。また、将来のために並行して資源量の多い化合物元素を用いた新しい技術開発も必要となる。

3. III-V族タンデム太陽電池の経済性評価

III-V族太陽電池は、30%以上のセル変換効率が達成されており、高効率な太陽電池と知られている。一方で、原材料費や製造プロセスが高コストである。ここでは、単層はGaAs、2層、3層ではGe基板としてInGaAs, InGaPを積層した太陽電池を設計した。図4に、III-V族3接合タンデム太陽電池の製造工程を示す。

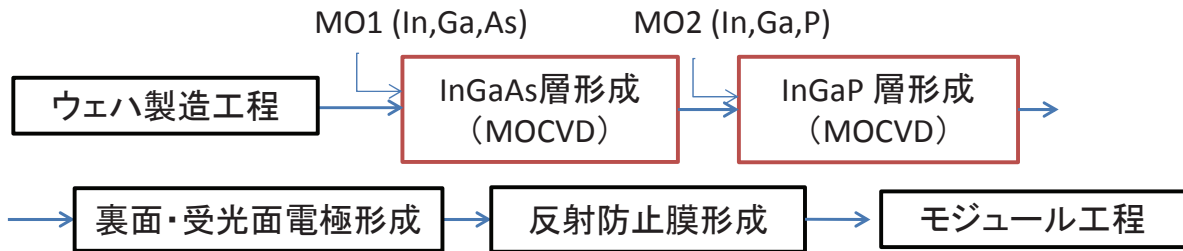


図4 III-V族3接合タンデム太陽電池の製造工程

III-V族タンデム太陽電池では、図5の結果に示すように原材料費が非常に高い。また、タンデム化により高効率化する一方で、積層するためのモジュール製造原価が増加してしまう。原材料費、設備費ともに高く、10倍以上の生産性の向上が必要である。

太陽電池のコストが高い一方、変換効率が高い利点を生かして、面積や重量当たりの出力が重要となる宇宙太陽電池や、集光型などの特殊な状況下での用途もある。集光型については、500倍以上の集光となればセルコストが1/500の6円/W程度となるが、集光および太陽光追従システムのコストが高く、経済性が成り立つのは日射量の多い国地域に限定される。集光システムを抜本的に見直し、低廉なシステム開発を含めた総合評価が今後の検討課題となる。

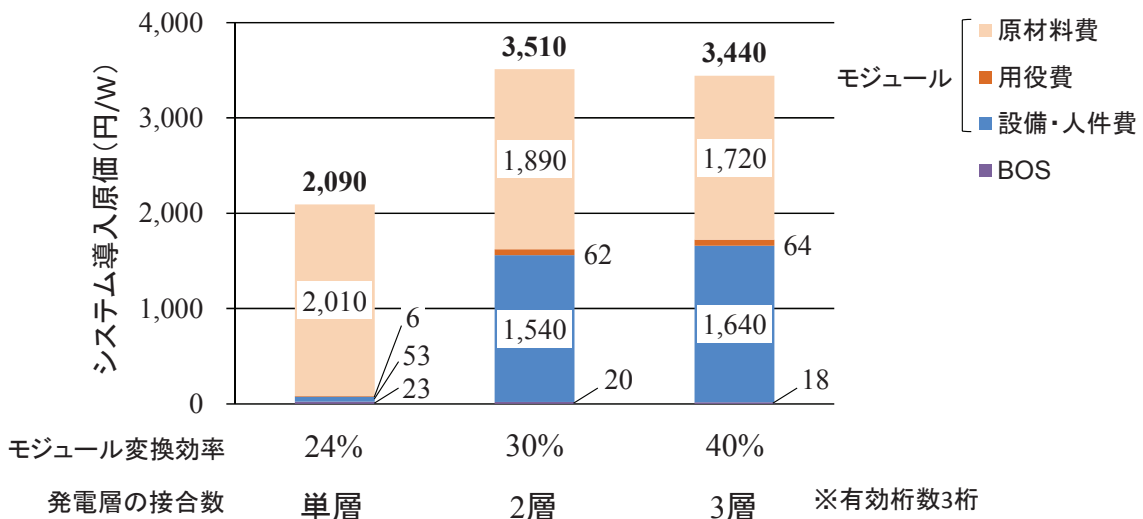


図5 将来のIII-V族タンデム型太陽電池のコスト構造比較 (2030年技術水準)

4. 技術進展を考慮した経済性評価の継続

太陽光発電システムは市場の変化が激しく、急激なコスト低減が続いている。LCS では、技術開発の観点から、量産可能な製造技術を精査して対象年における性能・製造技術等の技術水準を定め、システム導入原価を計算してきた。既報で示してきた技術水準 2009 年^[1]、2012 年^[2]と、本稿で示す 2015 年のコスト評価を表 1 に示す。表 1 からシステム導入原価の低減要因等を読み取ることができる。2009 年技術から 2012 年技術へのコスト低減においては、市場の拡大による原材料費、および BOS 費用の低減の影響が大きい。一方、2012 年技術から 2015 年技術への減少においては、モジュール発電効率向上や生産性向上を含めた技術水準の向上が大きな要因となる。前節まで示してきた 2030 年以降に及ぶ長期の将来の技術シナリオの評価と共に、表 1 に示す様な 1～2 年ごとに技術開発の現状や市場拡大を再評価し、設計・評価を継続していくことが重要である。

表 1 CIGS 太陽光発電システム導入原価 (円/W)

技術シナリオ*		A [文献 1]	B [文献 2]	C [本稿]
技術水準		2009 年技術	2012 年技術	2015 年技術
薄膜 CIGS 太陽電池 モジュール変換効率		13%	13%	15%
システム導入原価 [円/W]	モジュール	103	79	60
	周辺システム(BOS)	150	84	65
	システム全体	253	163	125

*技術シナリオ A [文献 1] 2012 年の評価、技術シナリオ B [文献 2] 2013 年の評価、
 技術シナリオ C [本稿] 2015 年の評価。

5. 政策立案のための提案

既報では 2030 年に発電コスト 5 円 /kWh への道筋を示し、そのために薄膜化合物太陽電池のタンデム化による変換効率の向上が重要技術開発項目であることを示した。本稿では、構造の異なる高効率化合物太陽電池を対象に、定量的技術シナリオに基づきコスト低減技術を評価した。その結果、薄膜 CIGS 太陽電池では、現状技術でシステム導入原価 125 円 /W (13 円 /kWh) であり、単層でモジュール変換効率 2020 年に 97 円 /W (10 円 /kWh)、2030 年に 70 円 /W (7 円 /kWh) が達成可能であることを示した。さらに、タンデム化により 2030 年技術水準に基づくシステム導入原価は 51 ～ 65 円 /W (5 ～ 7 円 /kWh) に達するが、構造により幅があることを示した。太陽光発電システムの大規模な導入に向けた技術開発戦略のために、以下の項目を実現することを提案する。

- コスト低減には、高効率化に寄与する技術開発が必要であり、結晶成長技術の加速、柔軟な積層技術の改良、界面制御技術や光閉じ込め技術、などに注力する必要がある。
- 高効率化のためにタンデム化が不可欠であり、この単層太陽電池のコスト展望と比較し、達成時期と達成目標を明確にした技術開発戦略が必要である。
- CIGS 太陽電池では、タンデム型の太陽電池構造によりコスト構造は異なり、4 端子型は製造が容易である一方、材料が多種必要となる。2 端子型は積層技術などの開発課題が多い。このような構造の違いと経済性、および技術の達成時期の見込みを考慮した技術開発戦略が重要となる。
- CIGS の希少元素である Ga、In を置き換えるため、大規模導入が実現する将来のために並行して資源量の豊富な化合物元素を用いた新しい技術開発も必要となる。
- III-V 族タンデム型太陽電池では、タンデム化により高効率化する一方で、発電層を積層する工程の製造原価が増加してしまう。原材料費、設備費ともに高く、10 倍以上の生産性の向上が必要である。

また、太陽電池の世界市場の拡大に伴い、原料や製造機器、周辺システムの価格も大きく変動する。技術開発の進展と市場の動向も考慮し、継続して設計・評価をしていくことが重要である。

参考文献

- [1] 低炭素社会作りのための総合戦略とシナリオ, LCS, 2012.
- [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—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, FY2013-PP-02, 2014.
- [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.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—, LCS, FY2014-PP-03, 2015.
- [4] 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, LCS, FY2013-PP-07, 2014.
- [5] Inoue T, Yamada K, “Economic analysis of future thin film solar cells —Cost estimates for high-efficiency compound thin film tandem solar cells based on process design”, EU-PVSEC, 2016.
- [6] Yamada K, Inoue T, Waki K, “Future Prospects of Photovoltaic Systems for Mitigating Global Warming”, World Engineers’ Convention 2011 in Geneva, 2011.
- [7] 山田興一, 太陽光発電の大規模普及に向けた開発, Nature photonics technology conference, 2010.

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) —

平成 28 年 3 月

PV power systems (vol.3):
Cost Estimates for High Efficiency Compound 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,
2016.3

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/>

© 2016 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。
