

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—

PV Power Systems:

Quantitative Technology Scenarios, and Science and Technology Roadmap
based on Elemental Technology Structure

Strategy for Technology Development

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

独立行政法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

LCS-FY2013-PP-02

概要

太陽光発電システムが補助金や固定価格買取制度の支援なく普及を続けるために、製造コスト低減に向けた戦略的な技術開発が必要であり、個々の技術課題の影響と経時的な相互関係を定量的に評価することが求められる。

LCS では、構成材料の物性から製品の性能・形状に至る要素技術を階層的に整理し、コスト低減のための研究課題の経時的な効果と相互関係について構造化することにより、重要な技術開発課題を明らかにしている。また、将来の技術進展を考慮し、製造工程を詳細に分析した「定量的技術シナリオ」を構築することにより、技術開発の定量的な影響評価を可能とする。これらの分析結果に基づき、研究課題を階層的に整理し、達成目標と達成時期を明確にした「科学・技術ロードマップ」を描き、個々の技術開発とその影響を定量的に評価している。

定量的技術シナリオの分析結果から、太陽光発電システムのシステム原価が現状 163 円 /W から 2020 年に 97 円 /W (11 円 /kWh)、2030 年に 57 円 /W (5 円 /kWh) と低減する道筋が示された。2030 年に発電コスト 5 円 /kWh を達成し、さらに 2050 年にむけたコスト低減のための重要技術開発項目を明らかにし、将来のコスト低減可能性を示した。

本稿ではさらに、要素技術の構造化に基づく「科学・技術ロードマップ」を用いて 2030 年に向けたコスト低減の要素技術の達成目標と研究課題を経時的に示している。そのための推進政策が適切に実行されることにより、2030 年以降に太陽光発電システムの 100GW 単位の大規模利用が可能となる。また、2012 年時の LCS の技術評価との比較から、太陽光発電システムでは 1～2 年ごとに技術の進展を考慮した設計・評価を継続していくことの重要性を示している。

目次

概要

1. 諸言	1
1. 1. 背景	1
1. 2. 技術進展を考慮した太陽光発電システムの将来製造コストの評価	1
2. 定量的技術シナリオの構築手法	2
2. 1. 太陽光発電システムの定量的技術シナリオの構築手順	2
2. 2. 定量的技術シナリオを用いた現状および将来のコスト、環境負荷の計算結果	4
3. 技術進展を考慮した製造コストの将来展望	5
3. 1. 現在のシステム原価	6
3. 2. 2020 年に向けたシステム原価の展望	6
3. 3. 2030 年に向けたシステム原価の展望	7
3. 4. 周辺システム (BOS) のコスト低減	7
3. 5. 新 PV のシステム原価の評価	8
4. 定量的技術シナリオを用いた科学・技術ロードマップとその活用	9
4. 1. 太陽電池の科学・技術ロードマップの構築とコスト低減のための研究課題	9
4. 2. 技術進展を考慮した設計・評価の継続	10
5. 政策立案のための提案	11
参考文献	11

1. 諸言

1. 1. 背景

量産体制の確立や原材料価格の低下、固定価格買取制度の支援による市場拡大と多様な企業参入など、太陽光発電システムは様々な要因の下、急速な普及が進んでいる。しかし、未だ補助金や固定価格買取制度による支援なしの導入は困難であり、コスト低減の課題が大きい。将来のエネルギー需給および経済性の評価については、例えば、将来のエネルギー需給展望や発電技術の割引率・寿命・効率等に着眼した経済分析がある。しかし、これらは包含的・俯瞰的に描く一方で、詳細な技術や各地域の技術動向にまで踏み込んだ評価が難しい。他方、個々の技術においては、官民によるシナリオやロードマップが発表されているが、これらの展望、分析、シナリオは互いに独立し、技術変化から社会システムまでの関係性を精緻に示していない。このため、望ましい社会を多様な観点から評価するためには、詳細な技術評価と社会経済全体の評価を融合することが重要となる。

また、将来の技術開発の展望やコスト分析においては、有識者の知見をまとめた報告書、行政機関やシンクタンクなどが作成した技術調査に基づくコスト分析や、各企業による製造コスト試算などがある。有識者による検討委員会の例としては、2009年に改訂されたNEDOのPVロードマップなどがあり、技術の検討事項の指針として広く論じられている。技術調査は、現状技術動向がまとめられており、ハンドブックとしての役割を持つ。また、発電コスト算出について検討されている国家戦略室の「コスト等検証委員会」では、固定価格買取制度の価格をどの程度に設定するかが焦点となっている。これらはコストや技術に関しては論じてあるものの、将来の技術開発がもたらすコスト低減の影響を評価するには十分ではない。製造コストの分析では、原材料価格やシステムの違いによる評価を主眼としているケースが多く、将来技術開発のコスト削減効果に直結した技術開発の提言には至っていない。技術開発の課題は中長期エネルギー戦略における将来のコスト展望と併せて議論されるべき課題であり、具体的かつ定量的な議論に基づく戦略的な技術開発が必要である。

本分析では、コスト低減に結びつく要素技術とそれぞれの技術開発の影響を定量的に評価するために定量的技術シナリオを用いている。LCSでは、低炭素技術の経済性・環境負荷を定量的に評価するために、「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」として、評価手法とその支援基盤を構築しており、本分析に利用している。

1. 2. 技術進展を考慮した太陽光発電システムの将来製造コストの評価

LCSでは、定量的技術シナリオを用いて太陽光発電システムのコスト低減を評価し、技術開発の推進すべき道筋を定量的に評価している^[1]。本稿では、結晶系シリコン、薄膜化合物系(CIGS)、有機等の新規薄膜、Ⅲ-V族の各種太陽電池モジュールの製造コスト構造を分析した結果から、将来のシステム原価と技術課題について解説している。また、ここで得られた知見に基づき、エネルギー政策立案のための技術開発の指針について提案する。

本稿で示す定量的技術シナリオを用いることにより、全体的な太陽光発電システムのコスト低減のための技術開発の指針、例えば各太陽電池種別のモジュール変換効率や、既存の発電システムと競合するための発電コストといった数値目標に対して、具体的な個々の技術目標、例えば製膜速度や原材料必要量・エネルギー消費量などと繋げて評価することが可能となる。

LCSでは、分析した結果から将来の技術進展を考慮したシステム原価と発電コストの展望を描いている(表1)。2030年までのコスト展望には、コスト低減の目標として示すため、各種太陽電池を比較した結果から低コストであった薄膜化合物半導体太陽電池(CIGS)の製造コストに基づいたケースを、新PVには有機等の新規薄膜を用いたケースのシステム原価を示している。2013年の現状技術としては、既に量産体制で普及している技術を対象とし、2020年では、従来

の技術の改良により達成可能な技術を、2030 年においては、さらに挑戦的な技術開発の達成により実現する技術を、それぞれ想定している。

具体的な計算方法について 2 章に、各種太陽電池の分析結果に基づく将来のコスト低減効果と技術課題について 3 章に、将来の研究課題と達成時期について 4 章に述べる。

表 1 太陽光発電システム原価と発電コストの展望

	単位	2013 年	2020 年	2030 年	新 PV
モジュール	円 /W	79	50	37	24
周辺システム (BOS)		84	47	20	20
システム全体		163	97	57	44
発電コスト	円 /kWh	18	11	5	4

2. 定量的技術シナリオの構築手法

2. 1. 太陽光発電システムの定量的技術シナリオの構築手順

LCS では、製造機器のレベルにまで分解した製造コストを算出し、コスト構造を示すことにより、製品製造のための要素技術に分解したコスト構造を評価することが可能となっている。

定量的技術シナリオ構築の手順としては、第一に、基礎研究、実験や技術開発の結果からの新しい知見をとりいれてコスト低減に資する要素技術を階層的に整理し、構造化する。各要素技術に対して、理論値と実際の値との比較から、避けられないロスなどを考慮して将来達成可能な技術水準を推定する。第二に、推定した各要素技術の技術水準に対してその製造プロセスを設計し、製造コストを算出する。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製造コスト低減への効果を分析する。技術の進展を考慮した定量的技術シナリオにより、各要素技術の性能指標の達成目標を明確にして、コスト構造への影響を評価することが可能となる。

製造コストは、製造工程毎に製造変動費と製造固定費から算出される。製造変動費は、投入する原材料と用役（電力、燃料、工業用水等）に係る費用である。原材料費は、現在の実勢価格を基準とし、将来価格には製品の普及に伴い低減する市場価格を用いた。製造固定費は、設備と人員からなる。主要な製造機器の仕様に基づき工場を設計し、工場建設費に係る費用を設備費として計算した。設備費の算出には、減価償却費、金利負担費、固定資産税、補修費等を含み、年経費率 0.2 を設定している。人員に関する費用は製造工場の運転人員を工程ごとに機器数と実績値から推定している。

太陽電池モジュールの製造において検討する製造工程はウェハ基板とガラス基板に大別している。製造工程は CVD 製膜、ウェハスライス、スパッタリングといった単位工程に分解する。主要となる製造機器の仕様を各ケースの技術水準により設計し、各工程の変動費・固定費および工場全体のオフサイト設備を算出し、製造コストおよび環境負荷 (CO₂ 排出量) を評価する。

ウェハ基板太陽電池モジュールの例として、図 1 に結晶系シリコン太陽電池の製造工程を示す。ここでは、主原材料であるシリコンをシーメンス法により精製し、インゴット casting、ウェハスライス、セル製造、モジュール組立の工程を経て、太陽電池モジュールを製造する。多結晶・単結晶シリコンや III - V 族に用いる Ge、GaAs のウェハ製造も同様の製造工程をとり、機器仕様を設計し製造コストを算出している。ガラス基板太陽電池モジュールの例として、図 2 に CIGS 太陽電池の製造工程を示す。ここでは、ガラス基板に透明導電膜、光吸収層、裏面電極を形成し、それぞれの膜をパターニングによりセル化し、モジュール組立工程を経て、太陽電池モジュールを製造する。薄膜シリコン、薄膜化合物系、有機薄膜などはガラス基板の製造工程となる。

発電コストは太陽光発電システムの耐用年数に応じて減価償却費と運用・補修費を考慮した年経費率から算出する。年経費率は耐用年数 20 年のとき 0.1、耐用年数 30 年のとき 0.08 とし、発電量は年間日射量を 1kWh/W とする。太陽光発電システムの耐用年数は現状 20 年、2030 年に 30 年とし、パワーコンディショナの耐用年数は 10 年とした。販売費および一般管理費、発電システムの土地の費用、立地箇所による発電量の違い、太陽光発電システムの廃棄とリサイクルにおける費用などは、事例や運用状態により大きく異なるため、技術開発の観点からはこれらを除く製造原価のみを対象とした比較をしている。

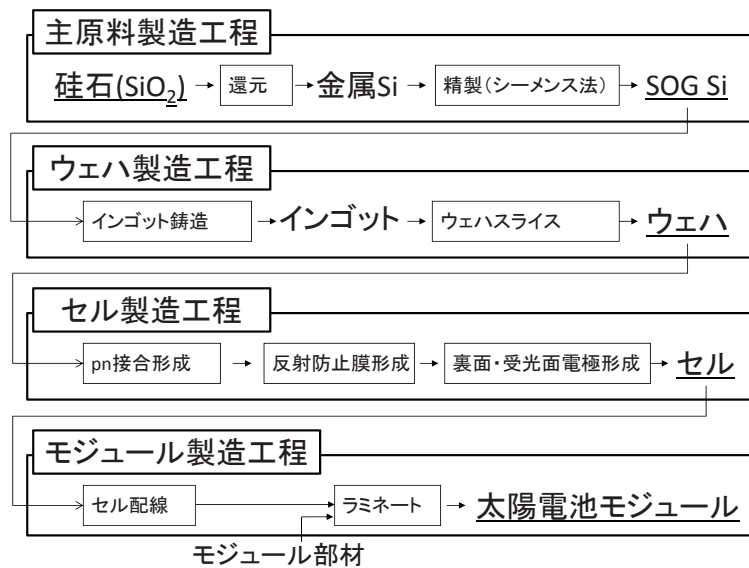


図 1 ウェハ基板太陽電池モジュールの製造工程例（結晶系シリコン太陽電池の例）

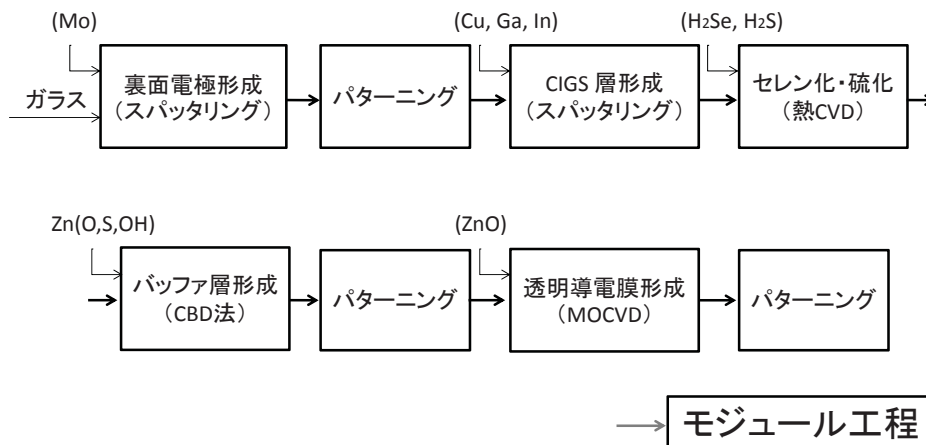


図 2 ガラス基板太陽電池モジュールの製造工程例（CIGS 太陽電池の例）

2. 2. 定量的技術シナリオを用いた現状および将来のコスト、環境負荷の計算結果

現状、2020 年、2030 年について、推定する技術水準を設定した定量的技術シナリオを構築し、システム原価と CO₂ 負荷量を計算した。表 2 に、代表的なケースの計算結果を示す。現状ケースの分析結果では、変動費と固定費の割合が 80% 程度と 20% 程度であり、固定費の割合は低い。このため、変動費、特に原材料のコスト削減が肝要となる。原材料費のコスト削減のためには、収率の向上、軽量化、高効率化、市場拡大による価格低減の効果が期待される。将来のケースについて、コスト低減のために必要な技術開発課題を整理し、各企業や研究機関の開発状況を調査した結果から推定して各要素技術を定量評価した数値を設定している。2020 年のケースでは、従来技術の改良から既に実現が見込まれている技術水準を、2030 年のケースでは、原理的には証明されているがまだ実現していない挑戦的な技術課題の達成した技術水準としている。定量的技術シナリオでは、モジュール変換効率の向上、生産規模の拡大、原材料必要量の低減、生産性の向上を評価するため、製品設計、製造機器の技術指標を評価している。これらの指標に基づき、技術条件の異なる様々なケースについて製造コストの計算を行い、将来のコスト低減のための技術課題の特定につなげている。

表 2 には推定する技術水準のうち、特に製造コストおよび設計基準への影響が大きい変数である、モジュール変換効率、モジュール製造工程の年間生産量、結晶系シリコンではウェハの厚さを示している。次章では、将来の技術水準と製造コストの関係について述べ、技術開発とコスト低減の効果について明らかにする。

表 2 太陽光発電システム原価の内訳

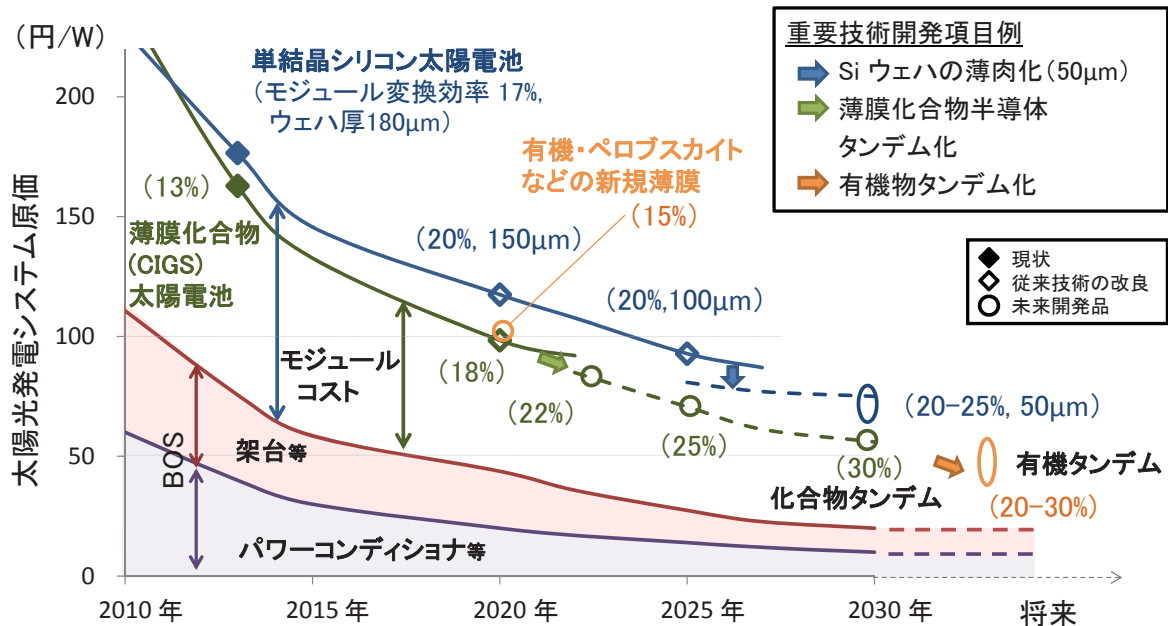
技術水準	現状		2020 年		2030 年		新 PV	
	単 Si 180μm 厚	CIGS	CIGS	新規薄膜	単 Si 50μm 厚	新 CIGS タンデム	有機 タンデム	
モジュール変換効率	17%	13%	18%	15%	23%	30%	(20 ~) 30%	
年間生産量 (GW/年)	1	1	5	1	5	5	1	
モジュール 単価 (円/W)	変動費 (原材料費)	76	59	40	34	39	29	17
	変動費 (用役費)	5	2	1	2	1	1	1
	固定費 (設備費・人件費)	22	18	9	12	6	7	6
	モジュール小計	103	79	50	48	46	37	24
BOS 単価 (円/W)	架台・設置費	33	44	27	32	13	10	10
	配電設備	40	40	20	20	10	10	10
	BOS 小計	73	84	47	52	23	20	20
システム原価 (円/W)	176	163	97	100	69	57	44	
重量当たり (円/kg)	1540	660	590	600	980	720	300	
CO ₂ 負荷量 (g-CO ₂ /W)	1210	590	410	-	550	260	-	
CO ₂ ペイバックタイム (年*)	2.5	1.2	0.9	-	1.1	0.5	-	

※年間発電量を 1kWh/W、電力源排出量 479g-CO₂/kWh とする

3. 技術進展を考慮した製造コストの将来展望

LCS 分析による現状技術から 2030 年までの技術の進展を考慮したシステム原価の展望と各太陽電池の重要技術開発項目を図 3 に示す。2013 年のシステム原価 (◆) は市場の平均的な性能の太陽電池モジュールを設計して算出している。将来のシステム原価については、現在見通すことのできる技術の組み合わせによるシステム原価を算出した結果を (◇) 及び実線で示す。実線で示したシステム原価は従来技術の改良として各企業の努力によるコスト低減の範囲であり、2030 年に向けて、矢印で示している、ボトルネックを解消するための重要技術開発によるコスト低減が必要となる。コスト低減のための挑戦的な技術開発を想定し、それを達成したケースのシステム原価を (○) 及び点線で示している。更なるコスト低減について、有機物等の新規薄膜太陽電池について評価し、2030 年以降に達成可能なケースとしてシステム原価を示している。

システム原価は太陽電池モジュールの製造コストと周辺システム (BOS) のコストからなる。本章では 2020 年、2030 年に向けたシステム原価について、まず、各種太陽電池の推定した技術水準と太陽電池モジュールの製造コスト、主要となるコスト低減の効果について述べる。次に BOS のコストについて述べる。最後に、さらにコスト低減するためにまだ普及していない新 PV のコスト低減について述べる。



	2013 年	2020 年	2030 年	将来 (新PV)	
年間生産量	1 GW/y	5 GW/y	5 GW/y	1 GW/y 以上	
耐用年数	20 年	20 年	30 年	20 年以上	
システム原価	モジュールコスト	79 円/W	50 円/W	37 円/W	24 円/W
	周辺システム(BOS)	84 円/W	47 円/W	20 円/W	20 円/W
	システム全体	163 円/W	97 円/W	57 円/W	44 円/W
発電コスト	18 円/kWh	11 円/kWh	5 円/kWh	4 円/kWh	

実線：現在見通されている、量産可能な技術の組み合わせによるコスト低減
 点線：技術開発により実現を考慮したコスト低減

図 3 太陽光発電システム原価と各太陽電池の重要技術開発項目

3. 1. 現在のシステム原価

現在のシステム原価は、現在普及している技術を調査し、年間生産規模 1GW の製造工場を設計して各種太陽電池についてシステム原価を計算した。現状技術から算出したシステム原価は 160 ～ 200 円 /W 程度であり、年間 1GW 生産プラントにおいては CIGS の導入原価が最も低い。システム原価は、設備の償却年数、セル設計、プラント規模、原材料費の算定基準などにより異なるため、コストの前提条件については注意する必要がある。また、技術開発の観点から太陽電池モジュールは製造コストのみを対象としている。

実勢価格については、例えば調達価格等算定委員会で用いられている基礎資料^[2]にシステム単価（H24 年末までのデータを参照）がまとめられており、住宅用（10kW 未満）の新築設置で 427 円 /W、10kW 以上では 280 円 /W が基礎とする価格とされている。実際の導入では、10kW 以上 1000kW 未満の太陽光発電設備のシステム価格は平均値 434 円 /W に対し標準偏差 131 円 /W であり、事例による価格差が大きい。同資料では土地造成費 15 円 /W、年間の土地貸借料 150 円 /m² が想定されており、仮にこのデータを考慮すると、モジュール変換効率や土地造成費により異なるが、2030 年のケースのシステム原価約 60 ～ 70 円 /W への影響は 1 ～ 12 円 /W（0.08 ～ 0.96 円 /kWh）である。

3. 2. 2020 年に向けたシステム原価の展望

従来技術の改良を考慮して、2020 年に達成可能と推定される各種太陽電池の生産プラントを設計してシステム原価を計算した。システム原価の展望としては、CIGS 太陽電池のシステム原価 97 円 /W、発電コスト 11 円 /kWh を用いている。

結晶シリコン系太陽電池では、原材料に占めるシリコンの割合が高いため、シリコン必要量（g-Si/W）を削減する必要がある。高効率化と原材料消費量の削減が有効となる。単結晶シリコン太陽電池では、モジュール変換効率 20% が既に市場に出ているが、単層でのセル変換効率の理論値が約 30% であるため、今後大幅に効率上昇させることは困難である。シリコン必要量については、ウェハの薄肉化と、インゴット casting 工程、ウェハスライス工程での収率向上、特に、インゴットの切捨て部分の再利用、ウェハスライスの切り代（カーフロス）を削減させる必要がある。ウェハの薄肉化により現状のウェハ厚 180 μm（カーフロス 146 μm）から、ウェハ厚 100 μm（カーフロス 100 μm）への技術開発が進んでおり、100 μm 厚のウェハ量産ラインを想定した。結晶系シリコン太陽電池では、ウェハの薄肉化（モジュール変換効率 20%、ウェハ厚 100 μm）により、2025 年頃に 86 円 /W のシステム原価を達成することができる。

CIGS 太陽電池の現状のモジュール変換効率は 13% 程度であり、モジュール変換効率 15% が既に開発されている。さらに、実験レベルではセル変換効率で 24% が達成されており^[3]、モジュール変換効率 18% を見据えることが可能である。CIGS 太陽電池の製造工程においては、スパッタ・MOCVD などの工程において生産性が高くなってきている。CIGS 太陽電池については、高効率化（モジュール変換効率 18%）、高速成膜、大面積化（モジュール面積 2.3m²）などにより、年間生産量 5GW/年のプラントでは 2020 年頃に 97 円 /W の達成が見込まれる。

有機・ペロブスカイト等の有機薄膜太陽電池は、現在、有機でセル変換効率 12%、有機・無機のハイブリット構造であるペロブスカイト構造でセル変換効率 15% が達成されており、さらに長寿命化、高効率化のための材料開発が必要である。現在普及が進んでいないため量産体制が整う必要があるが、耐用年数 20 年、モジュール変換効率 15% が達成されると、年間生産量 1GW/年の生産体制において、システム原価 100 円 /W が達成される。薄膜形成は塗布工程を想定して計算している。

3. 3. 2030 年に向けたシステム原価の展望

2030 年には、従来技術の延長ではなく、ボトルネックとなる研究開発課題を解決した技術水準を想定した。この技術水準を達成するためには、効率よく選択的に技術開発への投資が行われていることが必要である。システム原価の展望としては、CIGS 太陽電池のシステム原価 57 円 /W、発電コスト 5 円 /kWh を用いている。

単結晶シリコン太陽電池について、薄肉化によるコスト低減効果を得るためには、ウェハ厚とカーブスの合計が 100 μm 以下を目指す必要がある。モジュール変換効率 20% 以上の向上は容易ではないが、単結晶シリコンウェハ 50 μm において、モジュール変換効率 23 ~ 25% が実現した際には、システム原価は 69 ~ 64 円 /W (6.2 ~ 5.8 円 /kWh) となる。

CIGS 太陽電池では原理的に高効率化が期待できるため、将来のコスト低減のポテンシャルが大きい。モジュール部材や BOS のコスト比率が高いため、モジュール変換効率 30% 程度が必要であり、光吸収層をタンデム構造とする必要がある。この光吸収層を厚く成膜するための設備費と原材料費のコスト高よりも、高効率化によるコスト低減の効果の方が大きく、システム導入原価 57 円 /W (5 円 /kWh) が見込まれる。

有機・ペロブスカイト等の新規薄膜については、光吸収層の原材料が量産体制では廉価にできる一方で、変換効率の向上が不可欠である。材料開発の時期を予測することは難しいが、2030 年以降に他の太陽電池との競合を考慮すると発電コスト 5 円 /kWh となる必要があり、耐用年数 20 年以上、モジュール変換効率 25% 以上を目指す必要がある。

以上で考慮していない将来の技術開発については、新しい製造技術を導入による追加の製造コストを考慮して評価する必要がある。例えば単結晶シリコン太陽電池のさらなる高効率化を目指して、シリコンウェハの高効率化のためのタンデム構造、ヘテロ接合などの技術開発が検討されている。この時、目標とするモジュール変換効率による削減コストと、製膜に必要な追加コストとを比較し、達成目標とする他の太陽電池の製造コストと比較したコスト競争力について検討することになる。このように、新しい技術構想を議論する際には、図 3 に示した将来のシステム原価を新しい技術構想の達成時期におけるシステム原価と比較し、追加コストと削減コストを十分に検討して技術開発を進めていくことが重要である。

3. 4. 周辺システム (BOS) のコスト低減

システム原価における周辺システム (BOS: Balance of systems) のコストはシステム原価の半分程度を占めており、コスト低減の効果も大きい。BOS は、架台および設置のコストと、パワーコンディショナ等の配電システムのコストに区分して算出している。

架台のコストは設置面積に比例するため、モジュール発電効率により相対的に低減する。モジュール変換効率の異なる太陽電池では BOS コストは異なるが、図 3 にはシステム原価の低い CIGS 太陽電池の BOS コストを示している。架台のコストは大規模化、モジュール高効率化により低減する。設置コストは、架台の軽量化、設置時間の短縮によるコスト削減が見込まれ、市場の導入規模によるコスト削減も期待できる。また、戸建住宅より産業用 (メガソーラ) の方が設置コストは廉価となるため、産業用の割合が増えると平均設置コストは低減する。

一方、パワーコンディショナなどの配電システムは出力に比例するため、モジュール変換効率が上がっても出力当りのコストは一定である。このため、パワーコンディショナはシステム導入量拡大によるコスト低減を考慮している。パワーコンディショナのコストについては、インバータ、配線、制御システム等と、配電工事を含めて、現状の 40 円 /W から 2020 年に 20 円 /W、2030 年に 10 円 /W 削減するとした。

以上を考慮した分析の結果、モジュール変換効率により異なるが、BOS のコストは 2020 年までに 33 ~ 40 円 /W のコスト削減が見込まれる。

3. 5. 新 PV のシステム原価の評価

2030 年に向けて、発電コスト 5 円 /kWh へのコスト低減の道筋を示したが、送電網整備や蓄電システムのコストによる追加費用も考えると、さらなるコスト低減を検討しておく必要がある。現在十分に普及していない太陽電池種については、高効率かつ生産性の高い太陽光発電システムを評価する必要がある。

III - V 族太陽電池はセル変換効率 38% (集光なし) が実現されており、さらに積層してセル変換効率 50% を超えることが原理的に可能である。しかし、有機金属を用いた MOCVD の製膜速度が遅く、また有機金属も高価であるため、ガラス基板の製造工程として量産体制を想定しても、セル製造コストが 3000 円 /W を超える。現状では、セルの使用量を減らすため、500 ~ 1000 倍に集光した集光型太陽光発電システムが導入されている。集光型太陽光発電システムはレンズを用いて直達光のみを利用するため、BOS にトラッキングシステムのコストを考慮する必要がある。セル製造コストは集光型にすることにより下がるが、BOS のコストが大きく上がるため、システム全体の原価は 150 ~ 300 円 /W であり、日照量が多い箇所に設置箇所は限定される。高効率化により、原材料費、BOS のコスト割合を下げるといった目的に対しては、BOS コスト高が相反するため、BOS を十分に下げる技術開発を検討し、表 1 のコスト展望と照らし合わせた技術の検討が必要である。

有機・ペロブスカイト等の新規薄膜は、10 ~ 15% のセル変換効率が報告されている。しかし、モジュール部材、BOS のコストの割合が大きく、高効率化が不可欠である。新規薄膜は高寿命化、高効率化における課題が多く、まず材料開発が進められている。しかし、モジュール変換効率 20 ~ 30%、耐用年数 20 ~ 30 年を実現するためにはタンデム構造とする必要があり、材料開発のみではなく、接合技術も重要な研究課題となる。これらの技術開発は 2030 年以降となるため、システム原価の展望に示す 57 円 /W を下回る製造コストとなる技術を検討する必要がある。

量子ドットの太陽電池は、例えばシリコン量子ドットによりモジュール変換効率 30% を達成するとき、CVD 製膜を用いてシステム原価 120 円 /W 程度となる。実現時期を考慮すると、新規薄膜と同じく 2030 年のシステム原価 57 円 /W 以下を目指す必要がある、目標とする膜厚や製膜速度を十分に検討して技術開発を進めていく必要がある。

技術は常に進展しており、このような評価を普及している技術と技術開発の動向を踏まえて、随時更新していくことが必要である。次章では、将来のコスト低減に必要な要素技術とその達成時期を明記した要素技術の構造化に基づく科学・技術ロードマップとその活用について述べる。

4. 定量的技術シナリオを用いた科学・技術ロードマップとその活用

定量的技術シナリオに基づき、LCS が示している 2020 年、2030 年のシステム原価（表 1）を達成するために必要な研究課題を対象スケールによって階層的に整理し、時間軸に沿って示した要素技術の構造化に基づく「太陽電池の科学・技術ロードマップ」を作成した（図 4）。

要素技術の構造化のために、基礎科学から製品化の流れと、対象のスケールがナノメートル以下の現象解明から製品サイズとなるメートルオーダーを対象とした部材やデザインといった課題について階層的に捉え、各要素技術と相互の影響を定量的に評価する。要素技術の構造化に基づく「科学・技術ロードマップ」では、システム原価の展望において 2020 年、2030 年に提示したシステム原価を達成するために必要な研究課題について整理し、経時的に示す。

4. 1. 太陽電池の科学・技術ロードマップの構築とコスト低減のための研究課題

まず、システム原価 100 円 /W を 2020 年までに達成するための技術課題について検討する。

2020 年に向けた結晶系シリコン太陽電池では、発電効率 20% 以上、かつウェハの薄肉化とシリコン収率の向上により 3g-Si/W 以下にする必要がある。このための技術開発として、インゴット切り代を少なくかつ効率を高めるための結晶化制御技術の向上、カーフロスの少ない薄肉のウェハをスライスするための切削技術を高め、安価な高速プロセス技術を確立する必要がある。原材料であるシリコン製造においては、用役費、主に還元の電力費が大きいため、省エネルギー化技術が必要となる。これらはいずれも製造機器の工夫によるものが多く、市場拡大に伴う企業努力に期待するところが大きい。単結晶シリコン太陽電池でシステム原価 100 円 /W を達成するための要素技術は、個別には開発が進んでいるが、これらを組み合わせたモジュール製造方法を確立し、量産させる必要があり、達成する時期を 2025 年と推定している。これをさらに早める必要がある場合には、要素技術を組み合わせた技術開発の促進が必要である。

薄膜化合物系太陽電池では単層の高効率化により、モジュール変換効率で 18% 以上の達成に向けた技術開発が必要となる。効率の向上においては、結晶・界面制御や光閉じ込め効果などにより、18% 以上の効率達成が見通されている。さらに、製膜工程における高速化も必要である。

次に 2030 年に 60 円 /W（5 円 /kWh）に向けたコスト低減のための技術課題について検討する。単層の単結晶シリコン太陽電池では、ウェハの薄肉化（ウェハ厚+カーフロスが 100 μm 以下）を進めることにより 70 円 /W（6 円 /kWh）以下となるが、さらに高効率化にむけたタンデム構造の開発が必要となる。化合物系では、モジュール変換効率 30% 以上の高効率タンデム構造の開発が必須であり、光閉じ込め技術、欠陥・界面の制御の技術開発と、タンデム構造のための接合技術を 2030 年に向けて進めていく必要がある。また、現状の耐用年数 20 年から、耐用年数 30 年以上に向けた試みが不可欠であるため、光吸収層のみではなく、封止材等のモジュール部材も含めた劣化機構の解明と解決が必要となる。

2030 年以降のさらなるコスト低減に向けては、システム原価 40 円 /W を目指した新 PV の開発が必要である。有機薄膜、ペロブスカイト接合などの新規薄膜太陽電池では、光吸収層の原材料が廉価であり、塗布型による製造が可能とされているため、低コスト化が期待できるが、短期の開発は困難である。このため、2030 年以降の普及を考慮すると、モジュール変換効率 30%、耐用年数 20 年以上、システム原価 40 円 /W を見据えた技術開発が不可欠であることがわかる。現状では光吸収層の材料開発や材料評価、タンデム構造化の接合技術、劣化メカニズムなどの基礎研究を進めることが必要である。

以上のようなコスト低減を達成するための技術開発の重要項目を考慮し、推進政策を実行していく必要がある。それと同時に、技術開発に際しては、効率や寿命を何年までにどの程度向上させることを目指した開発を考えるのかといった、達成目標と達成時期を明確に検討していくことが重要である。

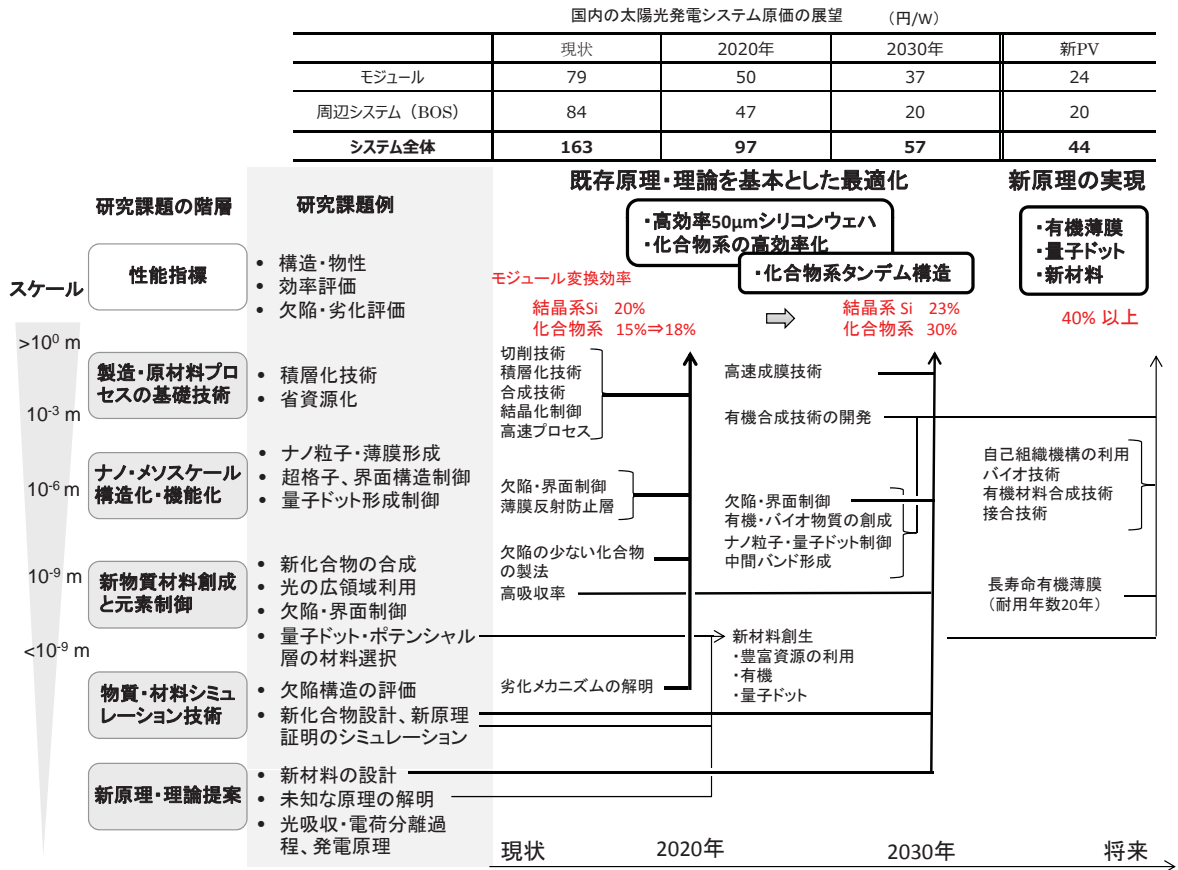


図 4 太陽電池の科学・技術ロードマップ

4. 2. 技術進展を考慮した設計・評価の継続

最後に、技術水準や見通しの変化がもたらす影響について解説する。2012年に評価したLCSの定量的技術シナリオ^[1]の結果を現評価と比較すると、評価したシステム原価は約35%低減している(表3)。これは、2012年前期の評価時からの1年半ほどで市場が大きく変化しており、原材料とBOSの価格の急激な低下が主な要因である。また、市場拡大に伴い、製造機器費も低下し、製造機器の大型化、省エネルギー化などの技術水準の向上も寄与している。2012年時の評価では市場に出ている先端的な製造技術を収集して評価したが、現状ではこれらの技術は汎用的な技術として定着しており、技術水準の向上が確認された。

定量的技術シナリオは、各要素技術の評価について透明性を高め、広く議論され、また技術向上に合わせて再評価していくことにより、より確実性の高い定量的技術シナリオとして構築することができる。このため、1～2年ごとに設計・評価を継続することが重要である。

表 3 2012年評価と現評価のシステム原価の比較 (円/W)

	2012年の評価	現評価
モジュール	103	79
周辺システム (BOS)	150	84
システム全体	253	163

5. 政策立案のための提案

太陽光発電システムを対象に、要素技術の構造化に基づく「定量的技術シナリオ」を構築し、製造コストを詳細に分析し、システム原価の展望とその技術課題を示した。また、将来の技術開発について階層的に整理し、各要素技術のコスト影響を明確にした「科学・技術ロードマップ」を構築した。

太陽光発電システムのシステム原価は、現状 163 円 /W から 2020 年に 97 円 /W (11 円 /kWh)、2030 年に 57 円 /W (5 円 /kWh) と低減するために、2020 年までは現状技術の組み合わせにより達成可能であるが、2030 年のコスト低減に向けて、以下の技術開発が重要技術開発項目として必要であることが明らかになった。

- ・結晶系シリコン、薄膜化合物系太陽電池では、生産性が向上してきているため、特に原材料費の削減が必要であり、高効率化と原材料必要量の低減のための技術開発が重要項目となる。
- ・結晶系シリコン太陽電池では特に主原材料のシリコン必要量を低減 (1g-Si/W 以下) する必要であり、特にウェハの薄肉化とカーフロスの低減が重要項目となる。
- ・薄膜化合物系太陽電池では高効率化の余地が大きいいため、資源制約、安全制約を考慮しつつ、高効率化のための技術開発が必要である。
- ・まだ十分に普及していない有機・ペロブスカイト等の新規薄膜やⅢ - V 族などについては、長寿命かつ高効率となる材料及び接合法の開発に加え、膜厚や収率、生産性を考慮した技術開発が必要である。

以上の技術開発を進めるための推進政策の実行により、2030 年以降は太陽光発電システムの大規模利用が可能となる。

また、太陽光発電システムでは技術開発や市場の発展に伴い、1～2 年ごとに設計・評価を継続していくことが重要である。

参考文献

- [1] 「低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ」, pp. 134, 2012 年 7 月, 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター
- [2] 「平成 25 年度調達価格検討用基礎資料」, 2013 年 1 月, 資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部
- [3] M. A. Green et al.; “Solar cell efficiency tables (version 43)”, progress in Photovoltaics: Research and applications 2014, 22, 1-9.

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—

PV Power Systems:
Quantitative Technology Scenarios, and Science and Technology Roadmap
based on Elemental Technology Structure
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,
2014.3

独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

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/>

© 2014 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。
