



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **11**

太陽光発電分野の 技術戦略策定に向けて

2016年6月

1 章 太陽光発電技術の概要	2
2 章 太陽光発電技術の置かれた状況	3
2-1 技術開発の動向	3
2-2 産業競争力(諸外国との比較)	4
3 章 太陽光発電分野の技術課題	8
3-1 太陽光発電技術の体系	8
3-2 技術課題	13
4 章 おわりに	18

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

1章 太陽光発電技術の概要

太陽光発電技術は、ほぼ無尽蔵の太陽エネルギー（地球に一日あたり降り注ぐ太陽光エネルギーの1%が地球全体の一日あたりのエネルギー消費量の100倍に相当する）を電気に変換する技術であり、最も大きなポテンシャルを持つ再生可能エネルギーとして、過去40年間にわたり、経済産業省とNEDOがその研究開発と普及拡大に注力してきた。これまで、結晶シリコン系（多結晶/単結晶）の太陽電池によって、研究室においては約25%、実運用においては20%弱のエネルギー変換効率を実現しており、住宅用の太陽光発電システムは現在23.5円/kWh^{*1}程度の発電コストで運用されている。また、太陽光発電は住宅用システムとしての利用のみならず、大規模電源としての利用（メガソーラー）も開始されている。

太陽光発電は、我が国のエネルギー・ミックスにおける再生可能エネルギーの利用目標の達成において重要な位置を占める。今後の太陽光発電の普及拡大のためには、普及に係る国民負担の抑制の観点からも発電コストの低減が必要であり、「2020年頃に業務用電力価格並の14円/kWhを実現し、2030年頃に基幹電源並の7円/kWhを実現する」^{*1}という、NEDOが掲げる発電コスト目標を達成することが重要である。

この目標を達成するためには、太陽電池モジュール及び付帯設備について、1) 変換効率の向上と製造コストの低減を図ること、2) 長寿命化等、その他の発電コスト低減につながる要素を解決すること、のそれぞれを最大限追求していく必要がある。現在発見されている主な太陽電池の種別は、①シリコン系（結晶シリコン系〔単結晶、多結晶〕、薄膜シリコン系）、②化合物系（CIS系、CdTe系、III-V族系）、③有機系（色素増感、有機薄膜）である。発電コスト低減のための方策は太陽電池種別毎に異なるが、どの種別の太陽電池においても、7円/kWhの実現には発電効率の向上、製造コスト低減、長寿命化等のあらゆる要素に対する技術的なブレークスルーが期待される。また、今後の太陽光発電の大量導入には、発電コストの低減以外にも、顕在化しつつある立地制約への対応、今後大量に発生すると考えられる使用済み太陽電池の廃棄への対応が必要であることも忘れてはならない。

加えて、太陽電池産業の興隆の観点では、諸外国を含めた太陽電池メーカー間のコスト競争が激化しており、収益を圧迫している状況となっていることから、このようなコスト競争から脱却し、各社

がより収益を上げていくための画期的な方策も期待される。例えば、これまでの系統接続を前提とした用途のみならず、太陽光発電技術の多用途利用や高付加価値化等、新たな手段を模索していくことが必要と考えられる。

^{*1} 太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）（NEDO, 2014）

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

2章

太陽光発電技術の置かれた状況

2-1

技術開発の動向

我が国ではサンシャイン計画以降、40年にわたり太陽光発電の実

用化に向けた技術開発が行われ、現在では大規模普及段階まで到達した。しかしながら、依然として従来型電源との価格差が存在するため、現在も変換効率の向上(図1)及び設備単価の低減等に向けた技術開発が精力的に行われている。

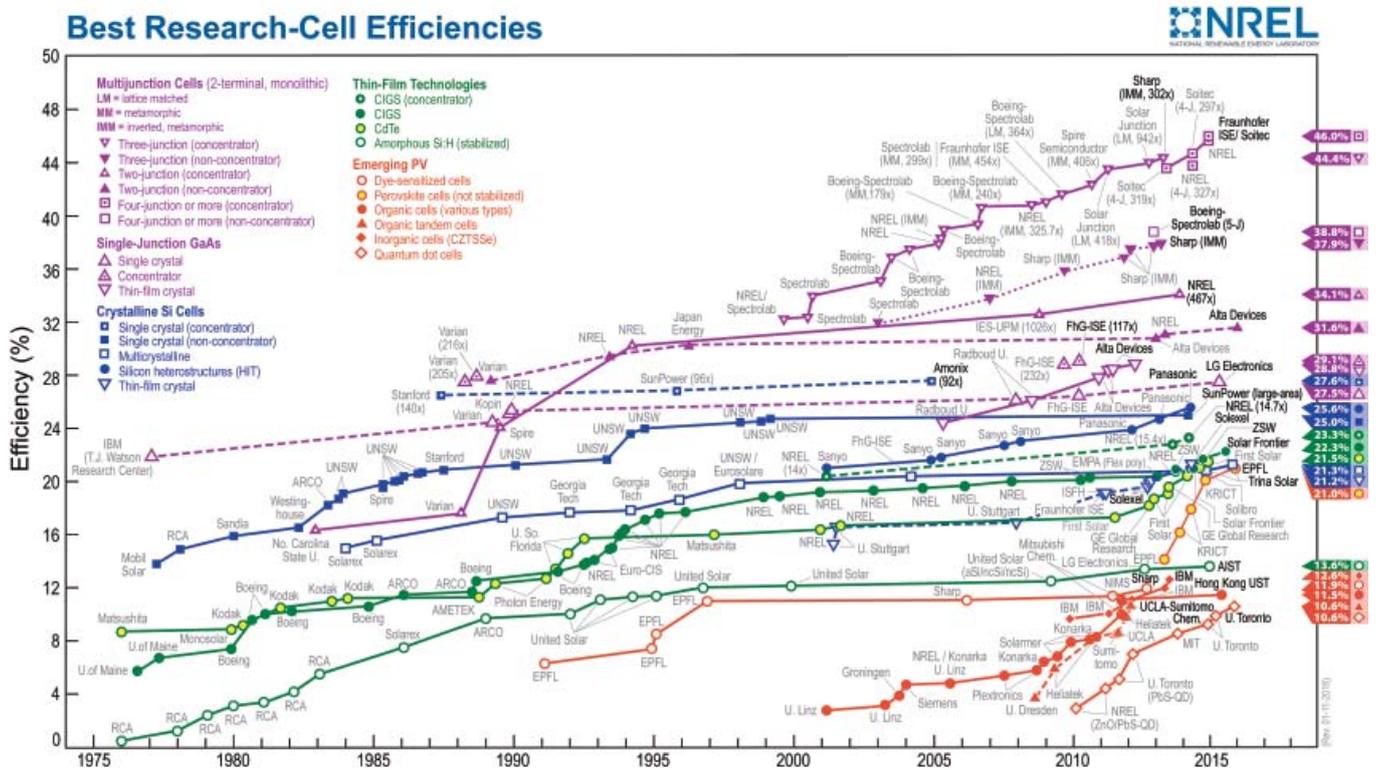


図1 太陽光発電セルの最高変換効率の推移
出所: Research Cell Efficiency Records (NREL Web サイト, 2016年2月16日閲覧)

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

2-2 産業競争力 (諸外国との比較)

(1) 太陽電池モジュールの世界規模・日本企業シェア

太陽光発電に関する産業には、発電事業、EPC^{※2}サービス、太陽電池製造（モジュールのみならず、ウェハ等の上流産業を含む）、パワーコンディショナ^{※3}（Power Conditioning System、以下「PCS」という。）製造、PCS以外の架台・配線等の付帯設備（Balance of System、以下「BOS」という。）製造、施工サービス、金融サービス等が存在する。ここでは、上述の太陽光発電産業に関係する製品・サービスのうち、太陽光発電システムの初期費用に占める割合が高い太陽電池モジュールを対象として、我が国の産業競争力に関する調査・分析を行った結果を示す。

図2に示すように、容量ベースでの太陽電池モジュールの世界市場は年々拡大している一方、金額ベースでの2013年までの市場規模の推移をみると、価格の急激な低下の影響等を反映して増減している。

図3に示すように2013年時点の日本企業の容量ベースでのシェアは10%程度である。日本企業のシェアは年々低下傾向にある（図4）ものの、売上高については着実に伸長している。更に、図3にバブルの大きさに相対的に示した太陽電池モジュールの売上高規模は、それ以外の再生可能エネルギー発電設備における日本企業の売上高規模と比べて圧倒的に大きいことから、再生可能エネルギーに係る産業政策の観点においても、太陽電池関連の技術は重要と考えられる。

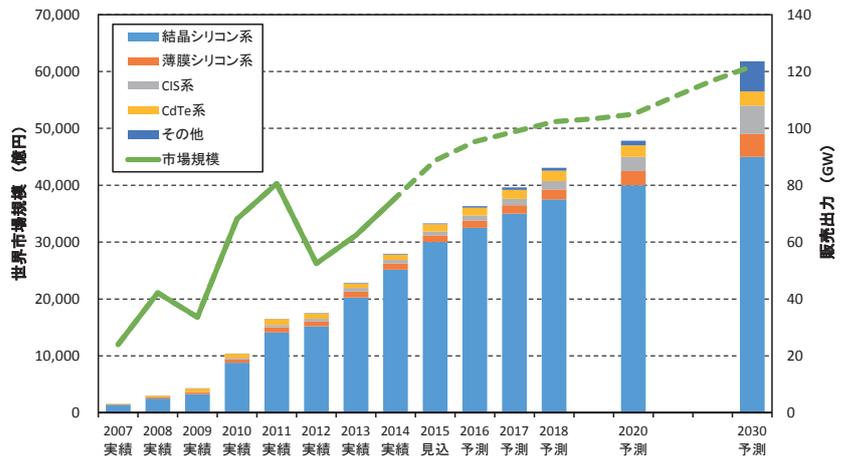


図2 太陽電池の世界市場規模の推移

出所：2015年版 太陽光発電ビジネスの最前線と将来展望（富士経済、2015）を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2016）

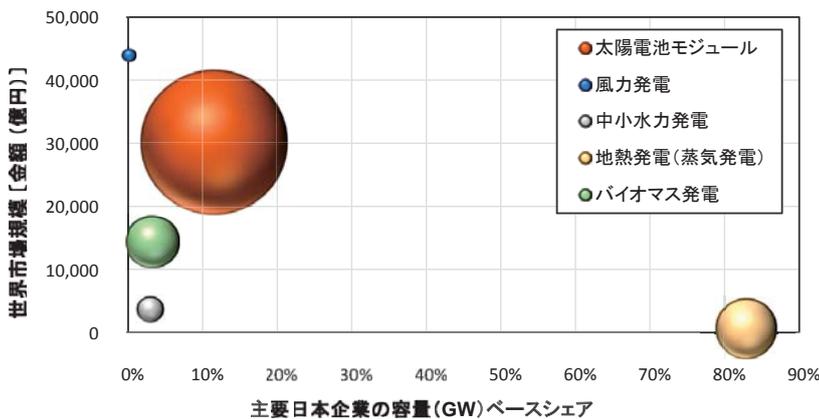


図3 再生可能エネルギー関連機器の世界市場規模及び主要日本企業の容量ベースシェア (2013年実績)

出所：2014 電力・エネルギーシステム新市場（富士経済、2014）を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2015）

※2 設計 (Engineering)、調達 (Procurement)、建設 (Construction) を含む一連の工程を請け負う事業形態。

※3 太陽光発電用 PCS は、太陽電池モジュールで得られた直流電力を交流電力に変換し、同時に太陽光発電を分散電源として電力系統に連系するための様々な機能を実現するインバータ設備。

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

なお、太陽電池種別の生産量の推移(図5)を見ると、結晶シリコン系が全数量の約9割を占めており、CdTe、薄膜シリコン系、CIS系が残りの約1割を占める。図6に示すように、日本企業は2014年実績において、結晶シリコン系で9.9%、薄膜シリコン系で2.2%、CIS系で70.2%のシェアを獲得している。

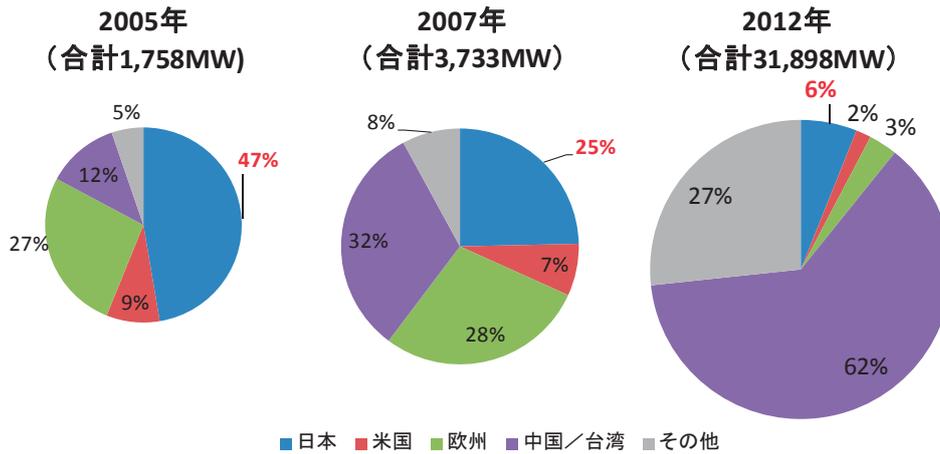


図4 世界における太陽電池セル生産量及び国別シェアの推移
出所：NEDO再生可能エネルギー技術白書 (NEDO, 2014) を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2015)

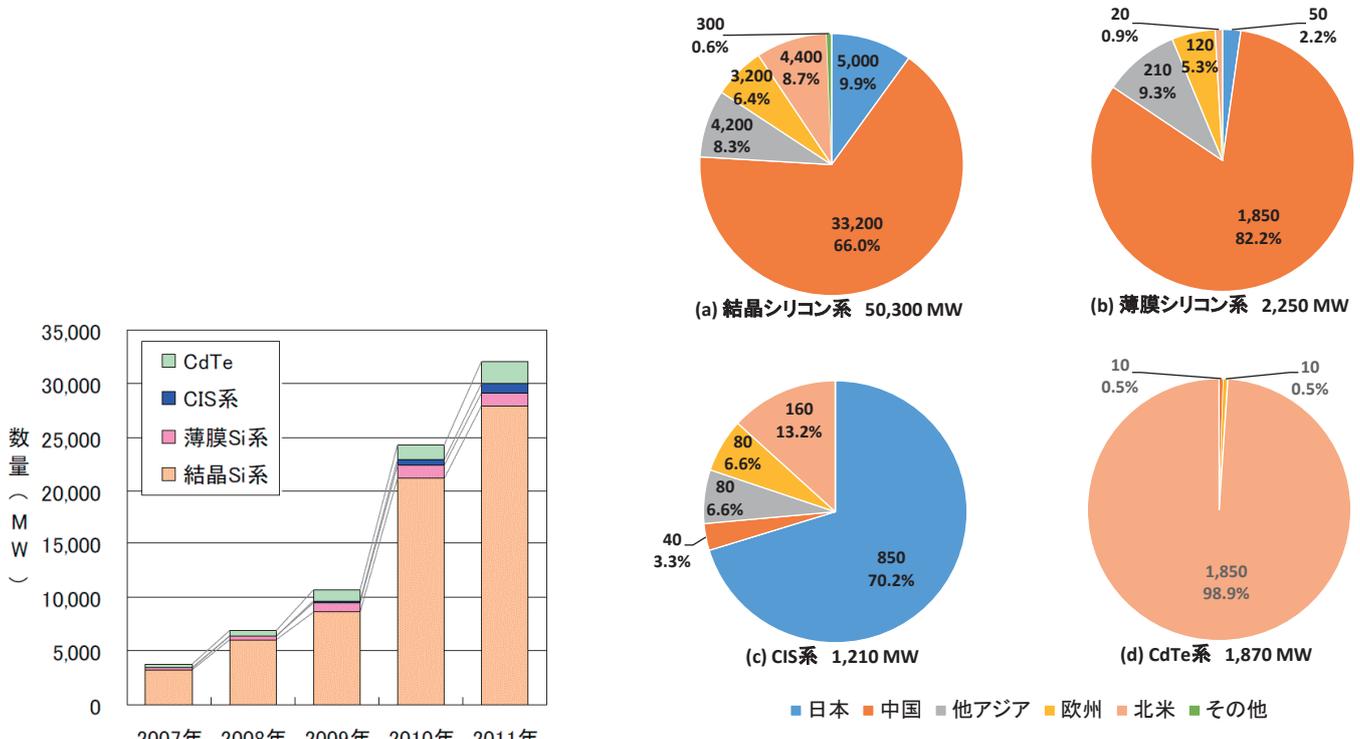


図5 世界における太陽電池種別生産量の推移
出所：平成24年度特許出願技術動向調査-太陽電池-(特許庁, 2013)

図6 太陽電池種別の世界市場規模及び国別シェア (2014年実績)
出所：2015年版 太陽光発電ビジネスの最前線と将来展望 (富士経済, 2015) を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

(2) 特許出願・論文発表の動向

①特許出願動向

太陽電池セル・モジュールに関する特許出願件数は、2004年には合計3,000件弱であったが、その後、急激に増加し、2008年には1万件を超えている。出願人国籍別に見ると、2004年から2010年までの合計特許件数において日本国籍が最多の32.7%を占めており、

次いで米国籍が20.0%、欧州国籍が19.0%と続いている。(図7)

太陽電池種別では、結晶シリコン系、薄膜シリコン系、有機薄膜、色素増感において日本の特許出願数が最も多い。一方、米国籍は化合物薄膜系に関する特許出願件数が、欧州国籍は結晶シリコン系に関する特許出願件数が最も多い。(図8)

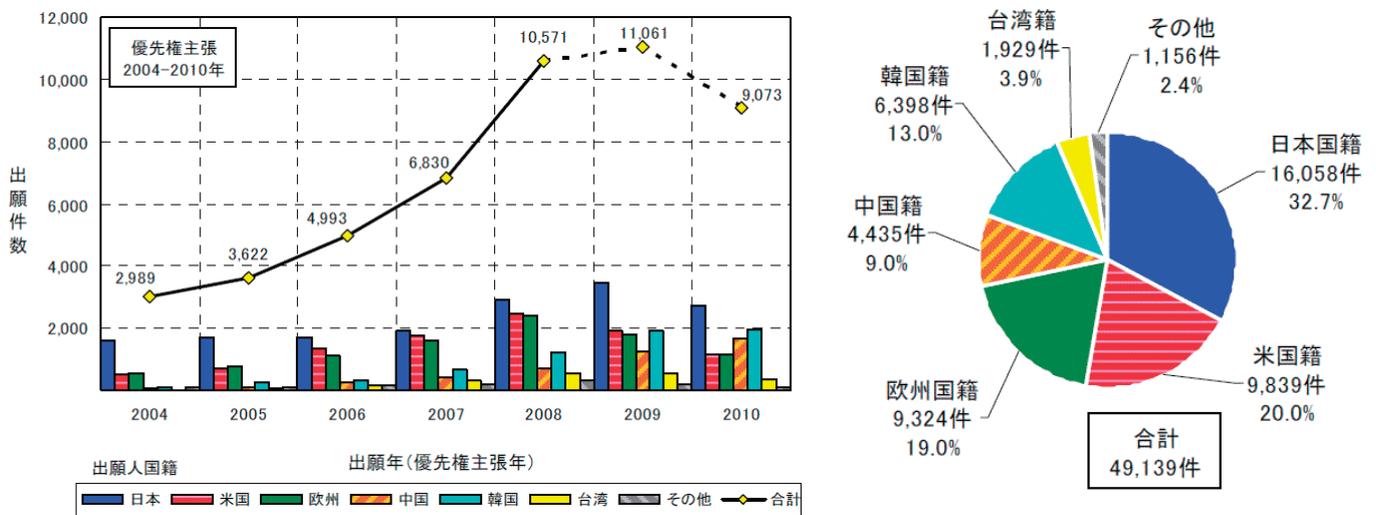


図7 太陽電池に関する特許出願件数の推移及び出願人国籍別の出願件数・比率

出所：平成24年度特許出願技術動向調査-太陽電池-(特許庁, 2013)

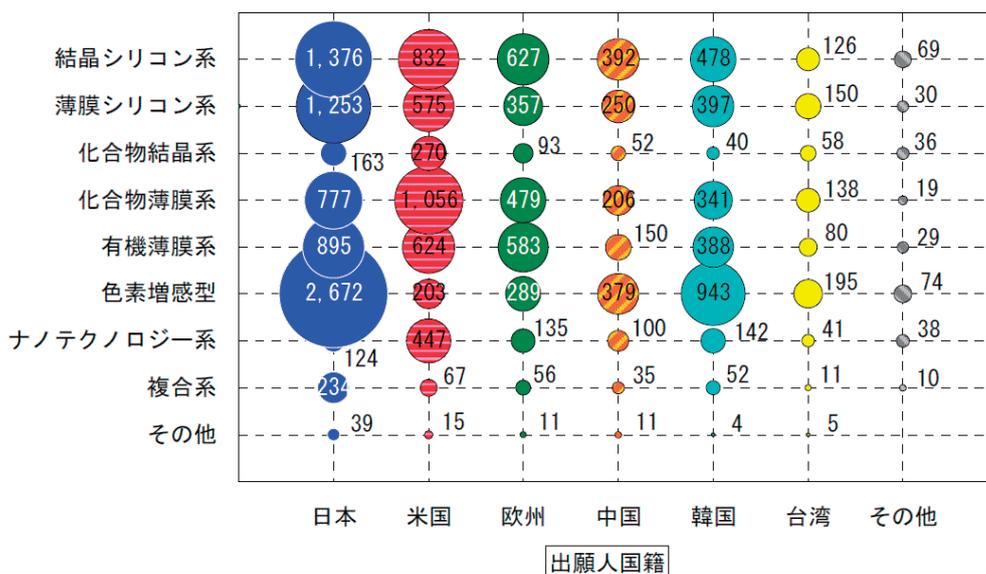


図8 太陽電池に関する出願人国籍別・太陽電池種別の出願件数 (2004-2010年)

出所：平成24年度特許出願技術動向調査-太陽電池-(特許庁, 2013)

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

②論文発表動向

太陽電池セル・モジュールに関する論文発表件数(国際的主要誌)は、2004年には684件であったが、2011年には2,790件と約4倍に増加している。研究者所属機関国籍別には、2004年から2011年までの合計論文数において欧州国籍の論文数が最多の31.0%を占めて

おり、次いで米国籍(13.3%)、中国籍(13.2%)と続く。日本国籍は10.1%と4番目であり、後塵を拝している状況にある。(図9)

太陽電池種別では、色素増感に関するものが全体の30.9%、有機薄膜に関するものが全体の24.9%となっており、有機系太陽電池に関する論文数が多い傾向にある。(図10)

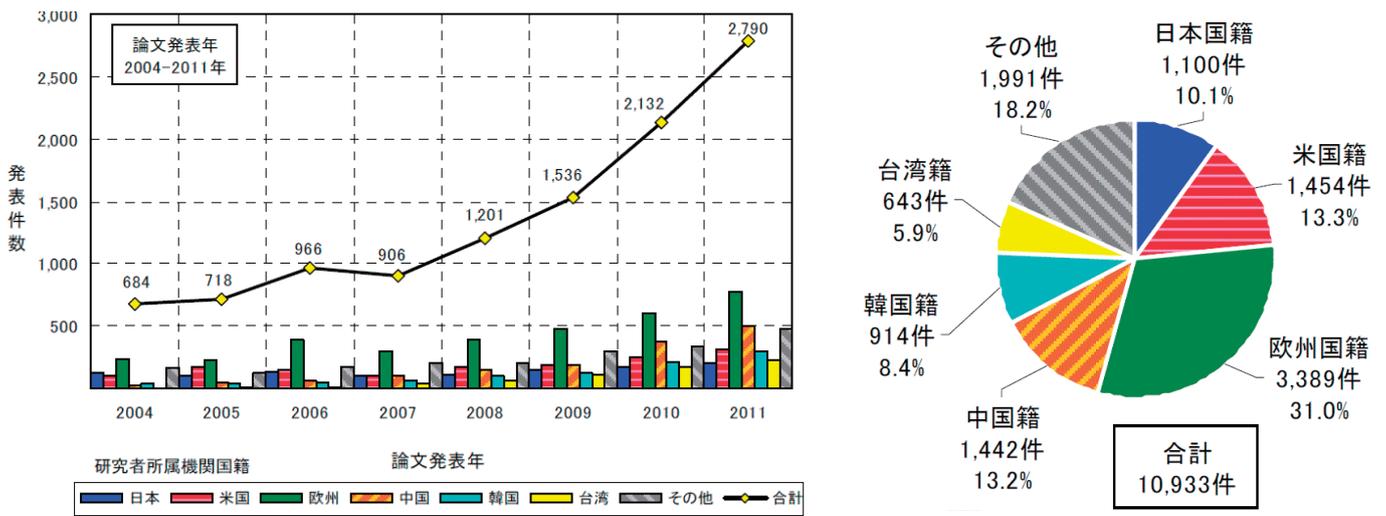


図9 太陽電池に関する論文数の推移及び発表者所属機関国籍別の論文数・比率(2004-2011年)

出所：平成24年度特許出願技術動向調査-太陽電池-(特許庁, 2013)

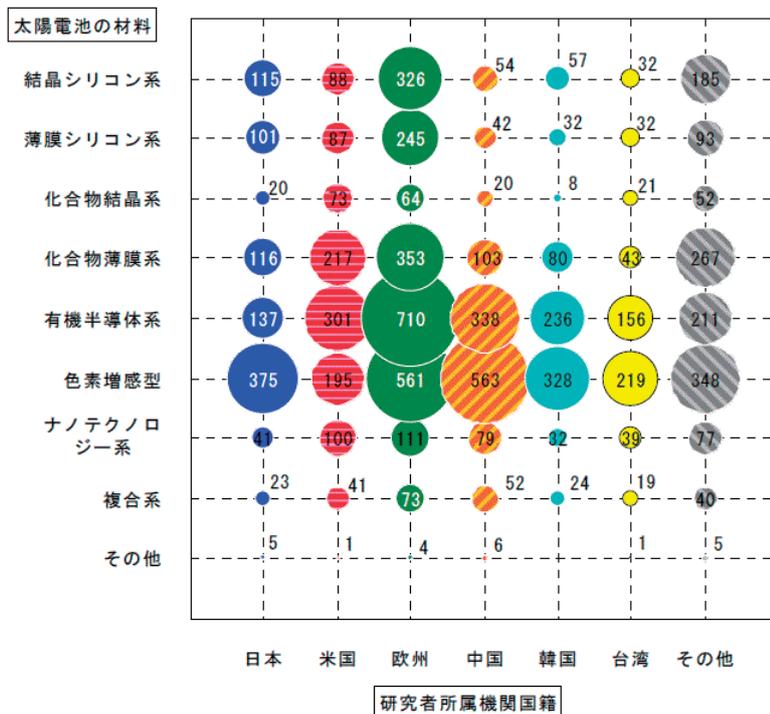


図10 太陽電池に関する発表者所属機関国籍別・太陽電池種別の論文数(2004-2011年)

出所：平成24年度特許出願技術動向調査-太陽電池-(特許庁, 2013)

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

3章 太陽光発電分野の技術課題

3-1 太陽光発電技術の体系

(1) 太陽光発電システムの概要及び発電コスト

太陽光発電の基本的なシステム (図11) は、太陽電池モジュール・

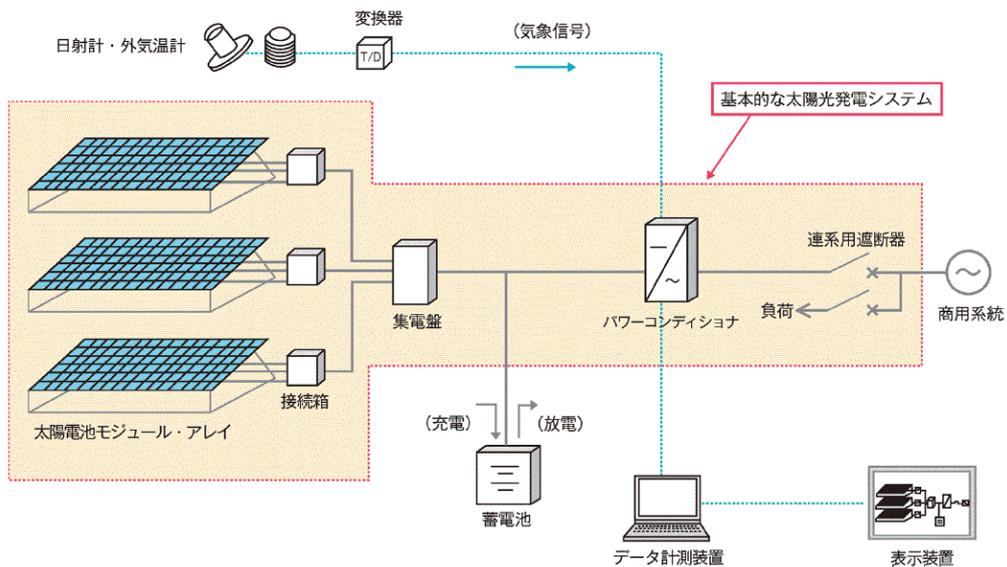


図11 太陽光発電システムの構成
出所：NEDO 再生可能エネルギー技術白書 (NEDO, 2014)

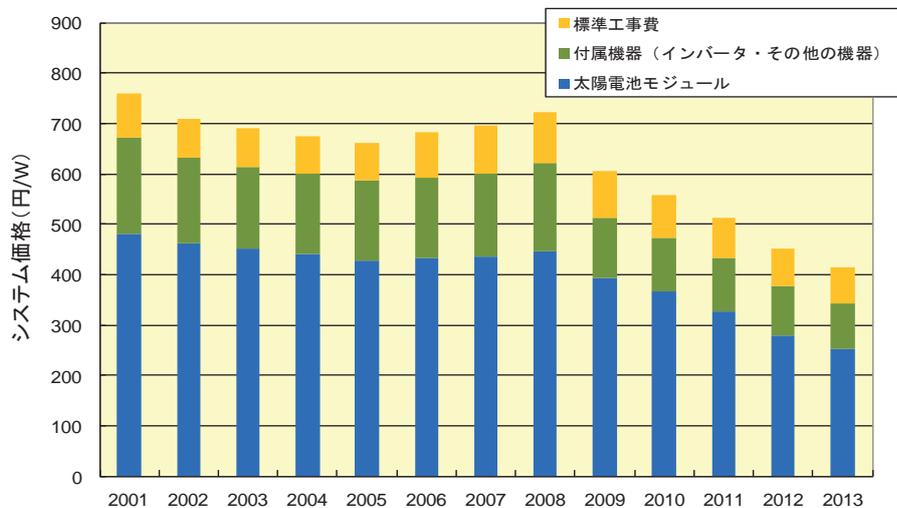


図12 日本における住宅用太陽光発電システム価格の推移 (単位：円/W)
出所：太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges) (NEDO, 2014)

PCSの他、架台・接続箱・集電盤等のBOSで構成されており、システム価格にはこれらの調達費、工事費等が初期費用として含まれる。

我が国における住宅用太陽光発電システム価格の推移、及び世界の非住宅用太陽光発電システム価格の推移をそれぞれ図12、図13に示す。両図から、近年は特に太陽電池モジュール、PCS及びBOSにかかる費用が低下傾向にあることがわかる。

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

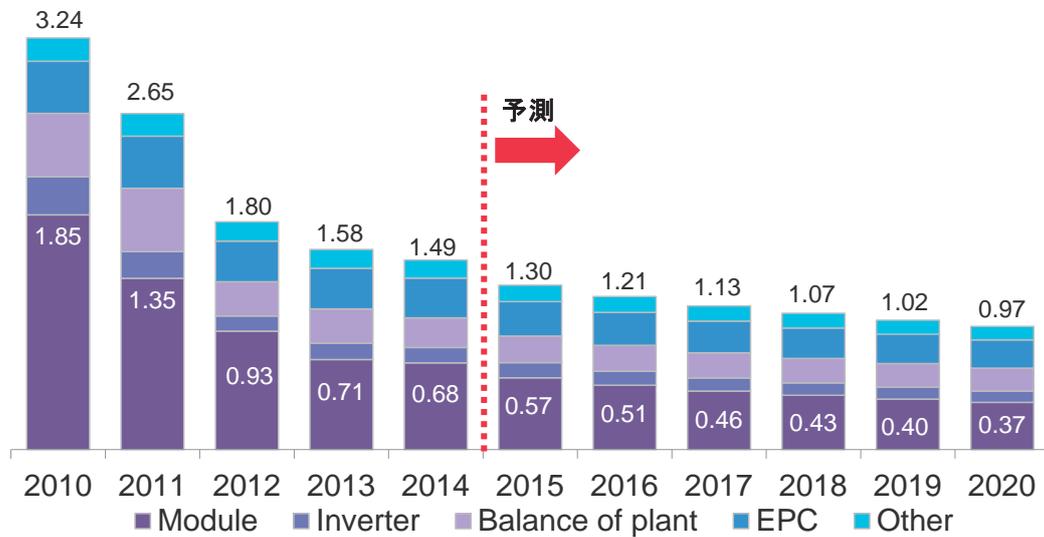


図13 世界の非住宅用太陽光発電システムの初期費用の推移 (単位: USドル/W)

出所: Q1 2016 PV MARKET OUTLOOK (Bloomberg New Energy Finance, 2016) に NEDO 技術戦略研究センター追記 (2016)

図14は、我が国における住宅用及び非住宅用の太陽光発電システムの発電コストを、下式(色は後出(図19)の発電コスト低減方策各項目の該当箇所を示す。)に基づいて一定の仮定のもとで算出し、コスト構造を分析した結果である。

$$\text{発電コスト} = \frac{\text{初期費用 [円]} + \text{運転維持費 [円]} + \text{廃棄処理費 [円]}}{\text{運転年数内総発電量 (kWh)}}$$

同図から、住宅用で23.5円/kWh程度、非住宅用で23.1円/kWh程度の発電コストとなっていることがわかる。

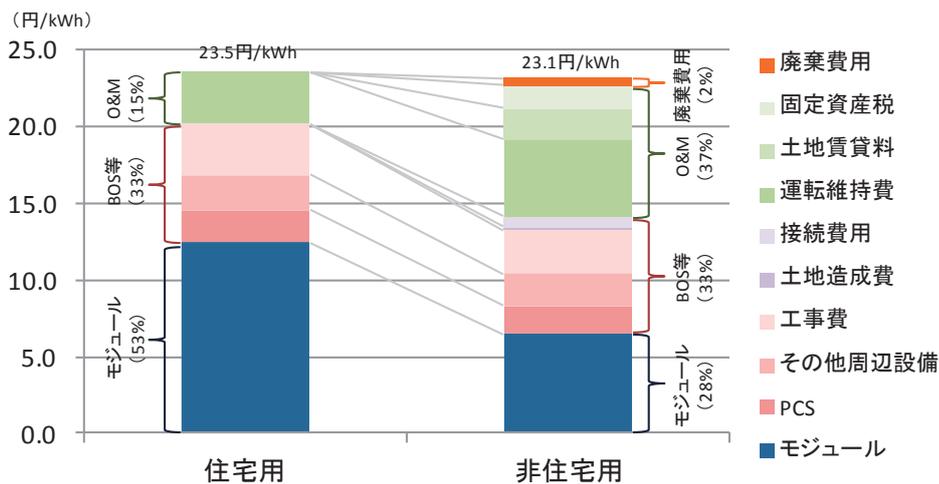


図14 日本における太陽光発電システムの発電コスト及びその内訳

出所: 太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges) (NEDO, 2014) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

なお、我が国の太陽光発電の発電コストは、他の先進国に比べて高い水準となっていることが示されている(図15)。この要因としては、システム設置に際しての初期費用が他国に比べて高いことなどが挙げられており、特に工事費、架台等にかかる費用が比較的高い

こと(図16)、また、日照条件にあまり恵まれない日本では設備利用率が各国の平均を下回ること(図17)などが影響していると考えられている。

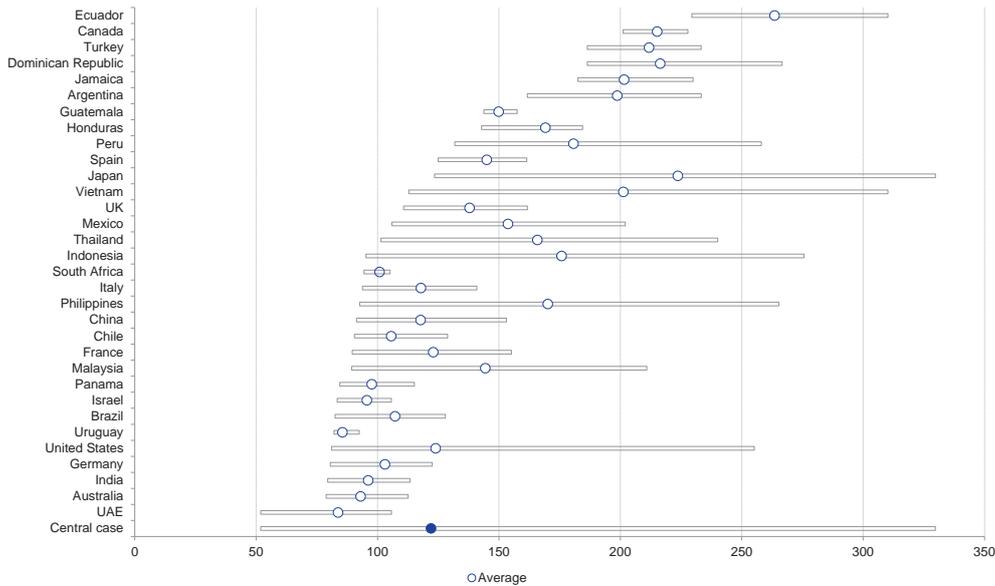


図15 太陽光発電の発電コスト(LCOE^{※4})の国際比較(単位:USドル/MWh)
出所:H2 2015 PV LCOE OUTLOOK (Bloomberg New Energy Finance, 2015)

※4 Levelized Cost of Electricity

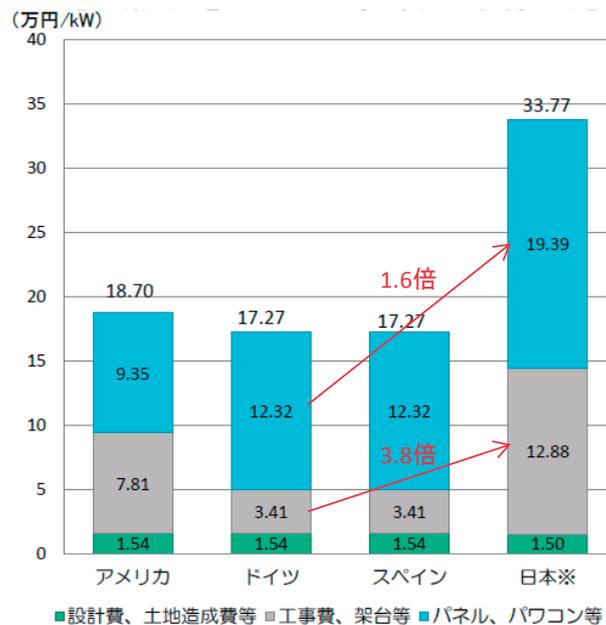


図16 太陽光発電システム初期費用の国際比較(単位:万円/kW)
出所:総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会(第7回)配付資料(経済産業省,2014)にNEDO技術戦略研究センター追記(2015)
※日本の費用の割合については資源エネルギー庁推定

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

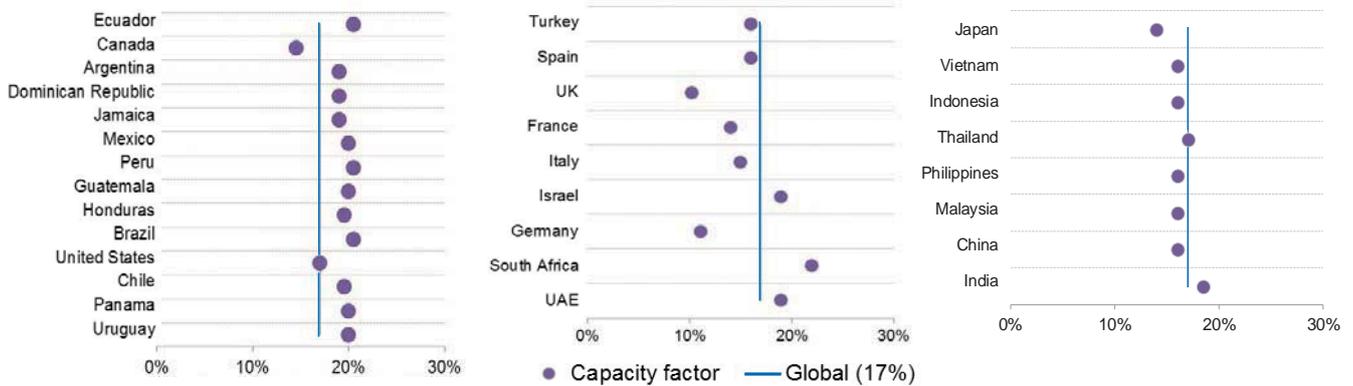


図17 太陽光発電システム設備利用率の国際比較
出所：H2 2015 PV LCOE OUTLOOK (Bloomberg New Energy Finance, 2015) より抜粋

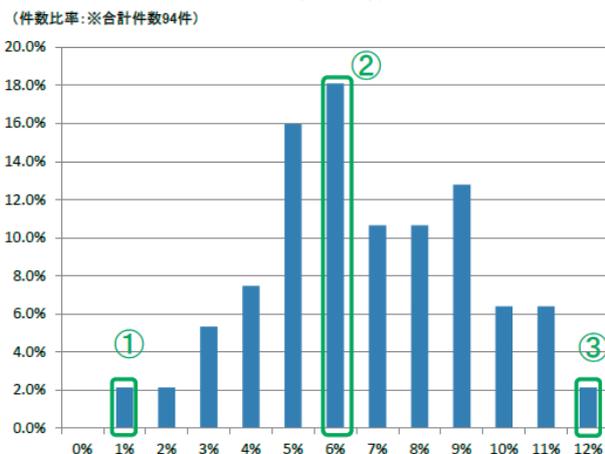
ただし、この要因の考察にあたっては、我が国の太陽光発電システムの費用が案件によって幅があることを考慮する必要がある。図18 (左図) は、94件の非住宅用システムの設置・運転費用年報に基づいて推算したIRR^{*5}別の件数比率である。図18 (右図) は、左図に示した各案件のうち、IRRが低い(すなわち、収益性が低い)案件(図中①)、平均的な案件(図中②)、高い案件(図中③)それぞれの初期費用の平均値を比較したものである。この図から、我が国の非住宅用太陽光発電のシステムの初期費用はIRRが高い案件ほど低い傾向がみとれる。また、収益性が高いと推定される事業者(図中③)の初期費用(20.9万円/kW)は、図16に示したドイツにおける

平均的な初期費用の約17.3万円/kWに近い金額となる。

日本の初期費用が高い理由としては、台風や地震といった因子に対する日本の設計要件が機器や部材の価格上重要因子となっている側面もあるが、我が国においては未だ市場が成熟しておらず、製造や設置に係る工数の削減に向けた改善等が十分に進んでいないことが影響していると考えられる。

*5 Internal Rate of Returnの略であり、内部収益率と訳される。投資額の現在価値と、投資によって生みだされる将来のキャッシュフローの現在価値が等しくなるときの割引率であり、一般に、高いIRR値が見込まれる投資案件ほど収益性が高い。

【1,000kW以上の運転開始設備のIRRの分布】
(平成25年10月-12月期運転開始設備のコスト、昨年度調達価格36円/kWh(税抜)で計算)



【1,000kW以上の運転開始設備における平均システムコストの比較】

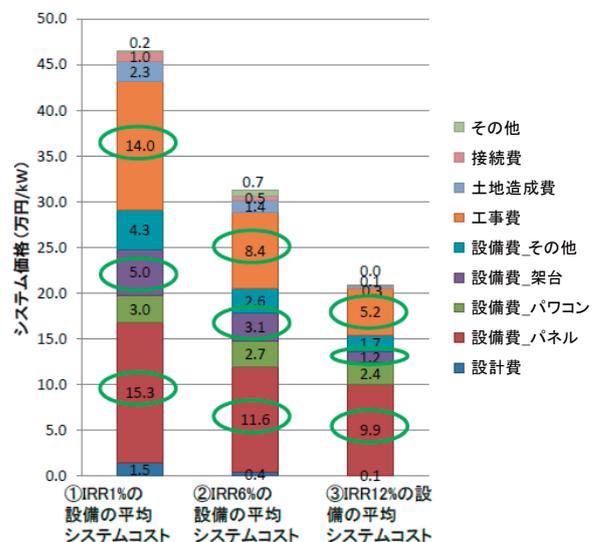


図18 日本の非住宅用太陽光発電システム(1000kW以上)各案件のIRR推算値及びシステム初期費用の比較
出所：総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会(第7回)配付資料(経済産業省, 2014)

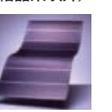
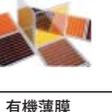
太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

(2) 太陽電池の種類

太陽電池には様々な種類があり、その特性も異なる。太陽光発電セルの理論上のエネルギー変換効率は個々の材料の性質に依存しており、単一の材料を用いた太陽電池(単接合型)では30%程度が上限といわれている。現在発見されている太陽電池の種類毎の主な特徴を表1に示す。

また、表中の太陽電池のうち、主に結晶系の太陽電池においては、ナノスケールレベルの微細加工技術を用いて量子ドット構造を半導体内に形成する「量子ドット技術」の適用も検討されている。量子ドット構造の形成により、広い波長範囲の光を吸収することができるようになるため、単接合型太陽電池の理論上のエネルギー変換効率(30%程度)を超えられる可能性があるが、現時点では実用化していない。

表1 太陽電池の種類と主な特徴

種類及び外観イメージ		主な特徴	実用化状況
シリコン系	 <p>単結晶</p>	<ul style="list-style-type: none"> 単結晶のシリコンインゴット(シリコンの塊)をスライスして製造する。 高効率(普及しているものでは最も効率が高い)であり、<u>耐久性・信頼性</u>ともに優れる。 製造コストが高い。 	実用化
	 <p>多結晶</p>	<ul style="list-style-type: none"> 小さい結晶が集まった多結晶のシリコンインゴットをスライスして製造する。 単結晶型より低効率であるものの比較的安価であり、性能とコストのバランスが良い。 現在最も広く普及している。 	実用化
	 <p>薄膜系 (結晶系以外)</p>	<ul style="list-style-type: none"> アモルファス(非晶質)シリコンや微結晶シリコン薄膜を基板上に形成して作製するため、大面積での量産が可能である。 結晶系に比べて省資源、安価、軽量であるが、発電効率が低い。 高温時の出力低下が少ない。 	実用化
化合物系	 <p>CIS系</p>	<ul style="list-style-type: none"> 銅・インジウム・セレン等を原料とする薄膜型。 レアメタルを使用しているため、資源制約の影響を受ける可能性がある。 シリコンを使用しないため、シリコン価格変動の影響を受けにくい。 結晶系に比べて省資源であり、かつ量産性に優れる。 今後、より一層の高効率化の可能性がある。 高温時の出力低下が少ない。 	実用化
	 <p>CdTe系</p>	<ul style="list-style-type: none"> カドミウム・テルルを原料とするため、シリコン価格変動の影響を受けにくい。 比較的量が容易であり、製造コストが低い。 有毒のカドミウムを使用することに対する配慮が必要。 	実用化
	 <p>III-V族系</p>	<ul style="list-style-type: none"> III族元素(ガリウム等)とV族元素(ヒ素等)からなる化合物セルに多接合化して作成するため、単接合型太陽電池の理論効率を超えることができる。 超高効率であるが、現状では高コストであるため、集光技術と組み合わせて利用されることが多い。 	研究段階 (一部、実用化)
有機系	 <p>色素増感</p>	<ul style="list-style-type: none"> 酸化チタンに吸着した色素が光を吸収して発電する、他の種別とは異なる原理からなる太陽電池。 色素の種類を変えることによって色彩の付与が可能。 製造が容易であり、材料も安価なことから大幅な低コスト化の可能性があるが、現状では効率・耐久性ともに低い。 	研究段階
	 <p>有機薄膜</p>	<ul style="list-style-type: none"> 有機半導体を用いた太陽電池であり、塗布工程のみで製造可能。 極めて容易な製造方法で作製可能なため、大幅な低コスト化の可能性があるが、現状では効率・耐久性ともに低い。 	研究段階
ペロブスカイト系		<ul style="list-style-type: none"> 2009年の原理発見以降、急速に研究開発が進められている。 色素増感と有機薄膜の利点を引き継ぎつつ、高効率な発電が可能な技術として注目を集めている。 	研究段階

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成(2014) [写真出所：NEDO再生可能エネルギー技術白書(NEDO, 2014)]

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

3-2 技術課題

(1) 発電コストの低減

① 技術開発の着眼点

太陽光発電システムの発電コストは前節に示したとおり以下の計
算式によって算出できる。

$$\text{発電コスト} = \frac{\text{初期費用 [円]} + \text{運転維持費 [円]} + \text{廃棄処理費 [円]}}{\text{運転年数内総発電量 (kWh)}}$$

したがって、発電コスト低減のためには、初期費用、運転維持費及び廃棄処理費といった費用を削減すること、並びに運転年数内総発電量を増加させることが必要となる。これらを実現するための方策を整理した結果を図19に示す。同図に示すように発電コスト低減に結びつく方策は数多く存在することから、複数の低減策を優先順位を考慮しながら検討していくことが重要である。

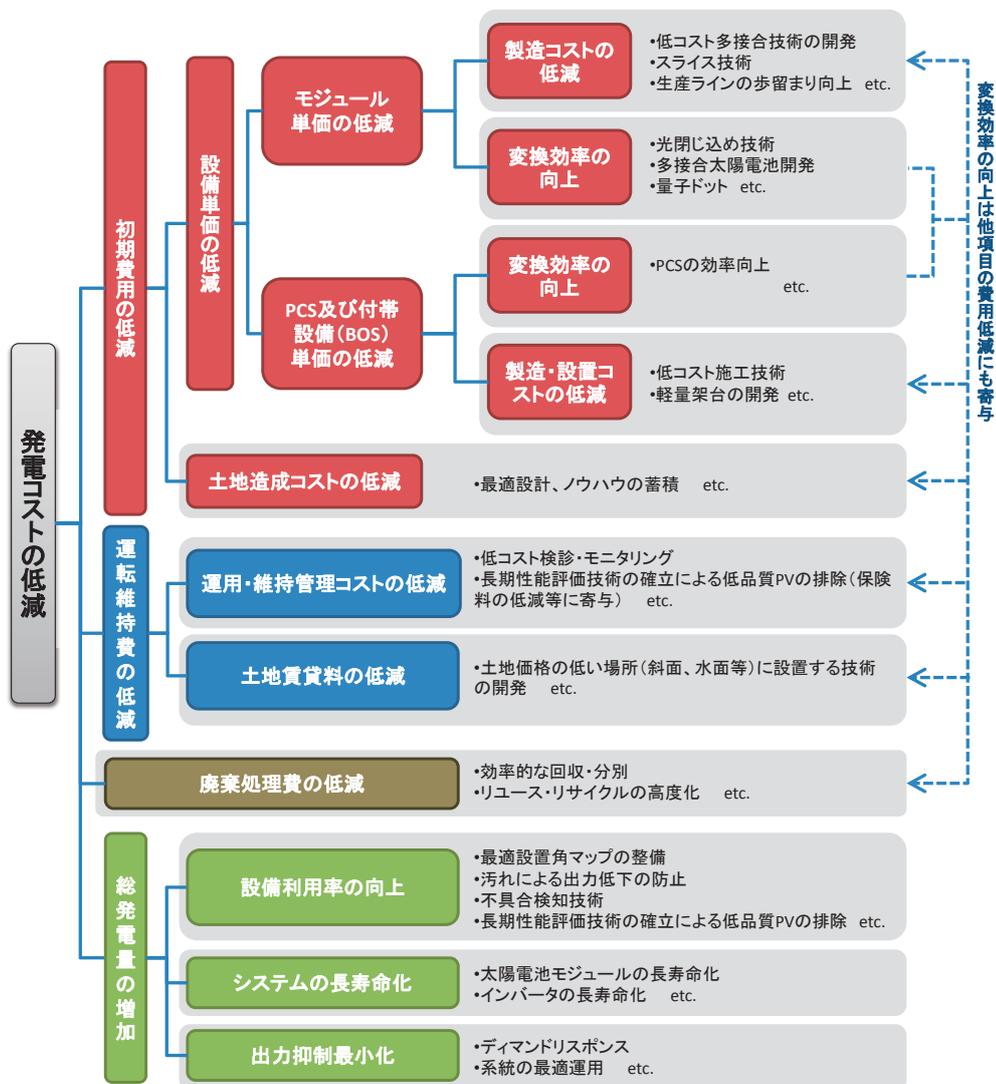


図19 太陽光発電システムにおける発電コストの低減方策
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

図14に示した発電コストの内訳をみると、住宅用、非住宅用ともに太陽電池モジュールの占める比率が最も高い。次いで、工事費、その他周辺設備（架台等のBOS）、PCSが続いている。ただし、工事費、その他周辺設備については、スケールメリットやラーニング効果による工期の短縮等、自由市場における競争によってコスト低減が進む可能性が高く、技術開発が費用低減に貢献する余地は相対的に低いと考えられる。したがって、費用削減のための方策としては、まず、未だ技術開発による改善余地があり、かつ初期費用に占める比率が高い太陽電池モジュール及びPCSの改善を目指す取組が望まれる。太陽電池モジュールについては、変換効率の向上、製造コストの低減、及び長寿命化を目指すこと、PCSについては、太陽電池モジュールよりも耐用年数が短いために運転維持費を増加させる要因ともなっているため、この改善を主に目指すことが期待される。

中でも、変換効率の向上は、太陽電池モジュールにおいては単位出力あたりの面積を小さくできることからモジュール価格の低減につながるなど、初期費用の低減をもたらすと同時に、架台、土地造成、土地賃貸等に係る費用の低減にも寄与する（図19中の破線参照）^{※6}。また、図20は、太陽光発電システムにおけるエネルギー損失・利得の要因を太陽光エネルギーが電気になるまでの過程に分解して整理した結果である。これを踏まえれば、技術開発においては、同図に示された各段階における損失を減らし、発電電力量の増加を目指す

ことが重要である。

運転年数内総発電量を増加させるための方策としては、設備利用率の向上及び運転年数の長期化（長寿命化）を目指した取組が効果的といえる。太陽光発電システムについては、大量導入に係る激しい価格競争の結果、製造コストを下げるために製品の品質低下を招いているのではないかと指摘もある。長期間にわたって運用されることが前提となっている太陽光発電システムにとって、PID^{※7}に代表される機器の経年劣化による出力低下は運転年数内総発電量を極度に低減させるとともに、メンテナンスに係る運転維持費を増加させる重要な課題である。また、このような出力低下リスクはファイナンスコストの上昇をもたらすことから、発電コストの低減に向けた技術開発においては単なる長寿命化を目指すのみならず、こうした出力低下の防止にも着目することが期待される。

なお、気象条件等の周辺環境の影響を受けやすい設備利用率の向上については、全国規模の取組に固執することなく、設置場所に合わせた、きめ細やかで多様な施策の検討が必要と考えられる。

※6 例えば変換効率が10%から20%に向上すると、単位出力あたりの面積が小さくなるため、同じ発電量で比較すると架台・工事費、土地造成費等のコストはおおよそ半分となる

※7 PID：Potential Induced Degradationの略。特定の条件下において、太陽電池モジュールに高電圧がかかり、出力が大幅に低下する現象。

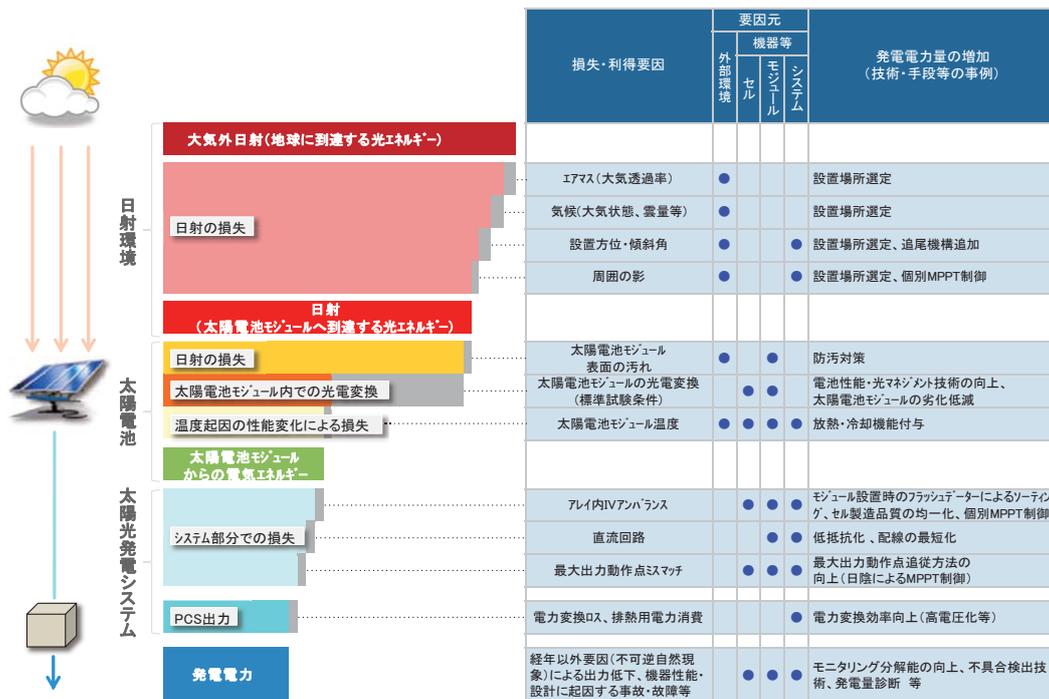


図20 太陽光発電システムにおけるエネルギー損失の構造と損失低減の方策例

出所：太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）（NEDO, 2014）

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

②発電コスト低減シナリオの多様性

表1に示したように太陽電池には様々な種類が存在し、現在最も普及している結晶シリコン系以外の太陽電池についても、今後の技術的なブレークスルーによっては大規模に普及する可能性を秘めている。これらの太陽電池は種別ごとにそれぞれ性能や特徴、製造方法が異なり、高効率な太陽電池のみならず、やや効率は低くとも製造コストが低い太陽電池や寿命が長い太陽電池なども存在する。また、同じ種別の太陽電池であっても、メーカーごとに適用される製

造技術が異なる場合もあることから、発電コスト目標7円/kWhの達成に向けたシナリオや最適な性能目標・価格目標についても、太陽電池の種別及び各社の製造技術ごとに異なる。

図21は、太陽電池モジュールについて、14円/kWh及び7円/kWhのNEDOが掲げる発電コスト目標を達成するためのモジュール変換効率とシステム単価の領域を示したイメージ図である。同図から、目標とする発電コストが達成されるための条件は複数存在することがわかる。

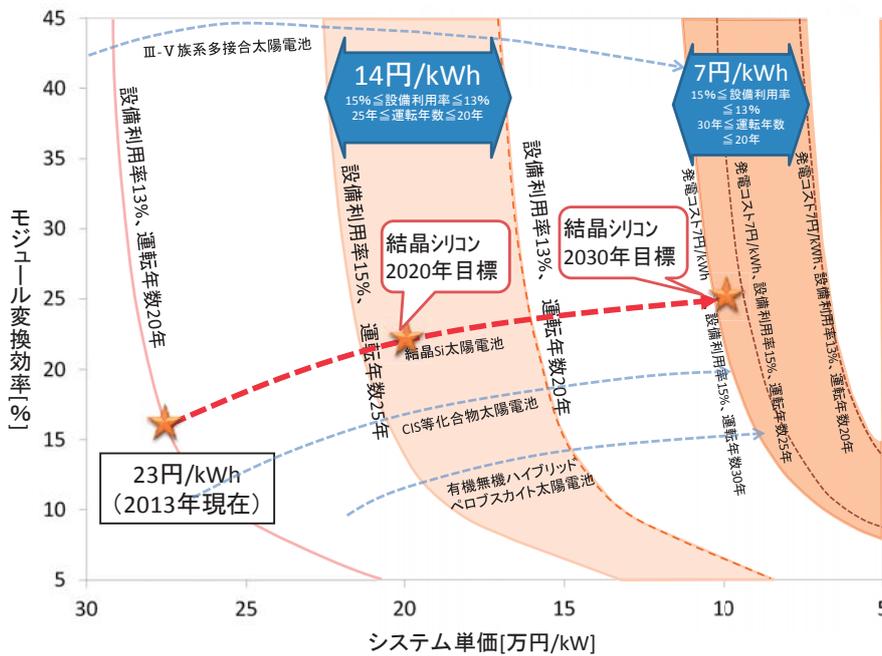


図21 発電コスト目標の達成条件 (イメージ)
出所：太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges) (NEDO, 2014)

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

③太陽電池モジュールの技術課題

太陽電池モジュールは、図14に示したように住宅用システムの発電コストにおいて53%、非住宅用システムにおいて28%を占めている。また、太陽光発電システム全体における技術開発の余地という観点からも、太陽電池モジュールには多くの改善余地を残していることから、技術開発の中心に位置づけるべき対象と考えられる。

太陽電池モジュールの技術開発にあたっては、変換効率の向上と製造コストの低減を最大限追求していく必要がある。そのボトルネックと改善手段は太陽電池種別毎に異なるが、どの太陽電池においても7円/kWhの実現には高効率化と製造コスト低減のどちらか、又はその両方に技術的なブレークスルーが必要である。特に、変換効率の向上はBOS等にかかる費用の低減にも寄与する(図19中の破線参照)ため、重要な改善項目である。また、これらの改善と長寿命化を両立させていくことも必要である。

太陽電池種別毎の技術課題は以下のとおりである。

a) 結晶シリコン系

現在普及している太陽電池の主流となっている結晶シリコン系では、薄膜シリコン系の太陽電池に比べて膜厚が厚い(薄膜シリコン系の1 μ m程度に対して、結晶シリコン系は100 μ m程度以上)ことから、ウェハの薄型化やカーフ(切りしろ)の低減等の省資源化による低コスト化が課題である。また、これと併せて、電極を裏面に配置することによって受光面積を増すことができるバックコンタクト技術の適用や表面構造の高度化等を通じた高効率化を実現していくことが求められる。これらの低コスト化と高効率化との両方を極限まで突き詰めることによって、目標とする発電コスト7円/kWhへの到達がようやく見通される。また、並行して、従来技術の延長線上にない技術開発を進めることも重要であり、ペロブスカイト等との多接合化技術や量子ドット技術を適用した高効率太陽電池の開発等が考えられる。

b) CIS系

結晶シリコン系に次いで普及しているCIS系等の化合物薄膜系太陽電池は、膜厚を薄くできる(1~2 μ m)ことから原材料は少量で済む一方、資源制約のあるインジウム等のレアメタルを活用している、現時点では相対的に結晶シリコン系よりも効率が低いといった課題を有する。したがって、目標とする発電コスト7円/kWhを達成するためにはインジウム等のレアメタルの代替材料の開発等を通

じた抜本的な製造コストの低減が必要となる。また、現時点では困難であるが、新技術により多接合化が可能となれば、高効率化のブレークスルーとなる可能性がある。

c) III-V族系

III-V族化合物を中心とした化合物結晶系太陽電池は、多接合化によって単一半導体の理論変換効率を超えることが可能であり、40%を超える効率を実現している。現時点では宇宙用太陽電池として実用化している。ただし、製造コストが極めて高いため、直達光が多い地域で集光システムを併用することによりモジュール面積を小さくするといった工夫を行い、採算性を高める方策が検討されている。III-V族系には、多接合技術の高度化による高効率化の余地が残されており、また、より低コストとなる材料や製造方法の開発により発電コストを低減できる可能性がある。また、前述した量子ドット技術の適用にも、更なる高効率化を実現できる可能性がある。

d) 有機系

色素増感太陽電池や有機薄膜太陽電池は、どちらも基板上への塗布等の比較的簡易な製造プロセスを選択可能であり、これを広い樹脂基板上に作成することによって曲げることができるシート状の太陽電池も製造可能となるという特徴を有する。しかしながら、現段階では変換効率は最高でも10%程度と低く、加えて、水蒸気や大気等により変質しやすいため耐久性に課題がある。変換効率向上のためには、吸収波長帯を拡大する技術又は異なる吸収帯を持つ太陽電池セルを多層化する技術の開発や電池内部の電子受け渡し(ドナー/アクセプター)の効率向上のための新材料探索等が、また、耐久性向上のためには全固体化等の高耐久材料の開発や封止技術の開発等が必要となる。

④パワーコンディショナ(PCS)の技術課題

PCSの初期費用は、図14に示したように、住宅用システム及び非住宅用システムの発電コストにおいて、ともに約8%を占めている。加えて、現行のPCSは耐用年数が10~15年程度であるため、20~30年間の太陽光発電システムの運用期間中に一度の交換及び定期メンテナンスの費用がかかっている^{※8}。また、摩耗する内部部品については定期的な交換が望ましいとされており、これらの費用は運転

※8 平成26年度調達価格及び調達期間に関する意見(経済産業省, 2014)によると、住宅用太陽光発電システムにおいては、運用・維持管理コスト(運転維持費)の全てが、PCSの交換及びメンテナンスに係る費用となっている

太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて

維持費に計上されることから、PCSの改善が発電コストの低減に及ぼす効果は大きい。

PCSの改善において技術開発が貢献しうる要素としては、変換効率の向上と運転年数の長期化(長寿命化)が考えられる。PCSの変換効率は現時点で95%程度となっており、太陽電池モジュールに比べて効率改善の余地は小さい。ただし、SiC系やGaN系といった次世代パワーエレクトロニクスに関する技術開発成果の導入により、数%の範囲内での効率改善が見込まれる。また、長寿命化にあたっては、現在、PCSの耐用年数のボトルネックとなっている(a)ファン、(b)電解コンデンサ、(c)パワーリレーの劣化等に関する課題解決に取り組む必要がある。

なお、ファンはPCS内部の熱を逃がすための部材であるが、ファンのような機械部品の寿命を30年(太陽電池モジュールと同等)に延伸することは困難であるため、ファンレス化(ファンをなくす)を目指すことが望ましい。そのためにはPCS内で発生する熱量を低減する必要があり、熱量の低減は変換効率の向上などによって達成されることから、長寿命化の観点からも高効率化に向けた取組が重要となる。

(2) 系統連系制約の低減

太陽光発電の大量導入に伴い、系統連系の制約が発生する。系統連系上の課題には、主に(a)配電網の電圧上昇による逆潮流の困難化、(b)余剰電力の発生、(c)周波数調整量の不足、の3つが挙げられている^{※9}。「次世代送配電ネットワーク研究会報告書(2010年4月)」によると、太陽光発電の導入量が10GWを超えた時点で、周波数変動や余剰電力問題が発生するとされており、太陽光発電の導入量が14GWに達した現在、これらの問題は既に顕在化しつつある。

太陽光発電の大量導入時代を迎えるにあたり、太陽光発電用PCSには、(i)配電網の電圧上昇対策機能及び(ii)余剰電力の発生防止のための出力抑制機能などが求められることとなる。また、太陽光発電設備に蓄電設備を併設する場合には、(iii)周波数調整量不足への対応機能が追加される場合もある。

これらの課題については、技術開発というよりも適切な連系要件の設定等の標準化や制度設計が重要となる。欧米では、電力系統との連系のためのコードの整備等、PCSに求める要件の標準化が進んでおり、PCS設計の基礎となっている。

(3) 立地制約への対応、及び廃棄物への対応

このほか、太陽光発電システムの持続的な導入促進には設置適地の拡大に向けた技術開発が期待される。また、今後大量に発生すると考えられる廃棄物への対応も課題であり、リサイクルシステムの確立等の課題解決に向けた取組を進めることが重要である。

(4) 多用途化・高付加価値化

太陽電池の生産が世界中で行われるようになり、太陽電池メーカー間の競争は、一層激しいものになりつつある。また、現在主流となっている結晶シリコン系太陽電池については、シリコン・ウェハ製造等の川上、セル・モジュール生産の川中、太陽光発電システムのEPCサービスや運用・保守サービスといった川下というように産業の多層化が進み、更には各階層における競争が激化したことにより、各製造事業者の収益は圧迫される傾向にある。

このような状況の中、First Solar(米国)やCanadian Solar(カナダ)等の太陽電池メーカーは、近年、比較的安定した収益を上げている。これらの企業は、川下の領域にまでバリューチェーンを広げてシステム化し、発電事業に関連するサービスを顧客に提供することで、汎用品化しつつある太陽電池セル・モジュールのみの価格競争から脱却した例と考えられる。

一方、太陽電池の用途を変え、系統電力の代替ではなく、異なる用途を開拓することによって発電コスト競争から脱却し、より高付加価値な製品として販売していくモデルも考えられる。例えば、今後拡大が見込まれる電気自動車(EV)の車体に太陽電池を搭載することで「充電ステーションが不要なEV」として、新たな価値を持つ可能性もある。しかし、ソーラーカーの実現には、曲面に合わせた太陽電池の設計や、限られた面積で十分な電力を得るために高い発電効率が必要となるなどの従来用途にはない開発課題が存在すると考えられる。したがって、このような新用途の太陽光発電システムの実用化のためには、用途先毎の技術開発が必要となる。

※9 低炭素電力供給システムに関する研究会報告書(経済産業省, 2009年)

4章 おわりに

我が国ではサンシャイン計画以降、経済産業省とNEDOが過去40年にわたり太陽光発電に関する研究開発と普及拡大を進め、現在では大規模普及段階にまで到達した。しかしながら、依然として従来型電力との価格差が存在するため、より一層の発電コスト低減が求められている。

今後、我が国の太陽光発電システムが2020年頃に業務用電力価格並の発電コスト(14円/kWh)を実現し、2030年頃に基幹電源並の発電コスト(7円/kWh)を実現するためには、変換効率の向上と製造費用の低減、及び長寿命化等、その他の発電コスト低減につながる要素の改善を、それぞれ最大限追求していく必要がある。例えば、現在主流となっているシリコン系太陽電池の徹底的な高効率化、低コスト化及び長寿命化に加え、ポストシリコンと目される化合物系(CIS系やⅢ-V族系多接合型)、ペロブスカイト等の各種別の太陽電池について、更には主に結晶系の太陽電池においては量子ドット技術の適用も見据えながら、高効率化、低コスト化及び長寿命化に取り組んでいくことが重要である。また、未だ発見されていない新材料・新原理による太陽電池の探求も重要である。

太陽光発電の基本的なシステムは、上記の太陽電池モジュールのほかに、架台・接続箱・集電盤・PCS等で構成されている。また、初期費用には設備費用のほかにも工事費や土地造成費等が含まれ、これらは初期費用全体の約半分を占める。したがって、発電コスト7円/kWhを実現するためには、太陽電池モジュールはもちろんのこと、PCSをはじめとする太陽電池モジュール以外の設備の初期費用の低減、運転維持費の低減、長寿命化等にも取り組んでいく必要がある。

加えて、今後の太陽光発電の更なる導入拡大を見据えると、発電コストの低減以外にも顕在化しつつある立地制約への対応、今後大量に発生すると考えられる使用済み太陽電池への対応等も課題である。

上記のような発電コストを極限まで低減させるなどの取組は、我が国のエネルギー政策において重要であるのみならず、国際競争力の強化にも直結する。また、太陽光発電産業が高い収益を上げていくためには、これまでの系統連系を前提とした用途のみならず、太陽光発電技術の多用途利用や高付加価値化等、新たな用途先を模索していくことも必要である。このような取組を通じ、我が国における

太陽光発電の着実な導入拡大を進めることで、エネルギーセキュリティの向上に貢献するとともに、発電コストをはじめとした太陽光発電システムに関する種々の課題解決を我が国がリードし、また、いち早くソリューションを提供していくことで、国際市場を牽引していくことが重要である。