太陽光発電に関する最近の状況と展望

正 員 黒川 浩助*

The State-of-the Art of Solar Photovoltaics and its Future Direction

Kosuke Kurokawa*, Member

The successful history of solar photovoltaic technology in Japan is reviewed quickly and then present photovoltaic implementations in Japan, US and Europe are summarized in short. Japan set up “PV2030 roadmap” in 2004, targeting 25% PV cell efficiency and 100 GW installation over Japan. “Cool Earth PV2050” has been being discussed to make innovative technologies clearly contribute to the post-Kyoto mechanism. Finally, the author is directing future solar photovoltaic technology capabilities towards one of possible major energy approach for 21st century.

キーワード：再生可能エネルギー，太陽光発電技術，PV2030，cool earth

Keywords: renewable energy, photovoltaic system, PV2030, cool earth

1. はじめに

第1次石油危機の直後の1974年に当時のサンシャイン計画が発足した。このときの4大分野のひとつとして太陽電池技術を含む太陽エネルギー開発計画の、2000年までの基本計画が設定された。1980年10月の新エネルギー総合技術開発機構（NEDO：現・新エネルギー・産業技術総合開発機構）の創立とともに、太陽光発電の技術開発は年間70～80億円程度の安定した国家プロジェクトとして着実な技術発展を遂げた⁽¹⁾。

1990年代前半には系統連系が可能になり、余剰電力購入メニューが適用される中、1994年に住宅用システムに対する設置補助金制度が創設された。以後、国内の太陽光発電市場は急速に拡大し、太陽電池モジュール出荷量は世界トップシェアを誇るようになった⁽¹⁾。

しかし、2005年度の住宅用補助金制度の終了、シリコン原料供給逼迫などが契機となり、今までの好調にかげりが生じている。このような厳しい状況にありながらも、より長期的な視点から新しいフェーズへと展開しつつある。以下ではこのような背景のもとに実施されている技術開発枠組みや、超長期な視点で今後望まれる技術の方向性などについて解説を試みる。

2. 日米欧の現状俯瞰

表1により、現状の日米欧の技術開発戦略、国内普及策および市場の概要を示した⁽²⁾。日本は、2004年に設定した「PV2030ロードマップ⁽³⁾⁽⁴⁾」に記載された長期目標に向かっ

て、NEDOにより技術開発が進められている。2030年には、モジュール効率22%により50円/Wを目標とし、7円/kWhが可能としている。また2006年5月には「新・国家エネルギー戦略⁽⁵⁾」に火力発電なみの発電コスト目標が記述されている。

米国では2006年にソーラー・アメリカ・イニシアチブ（SAI）⁽⁶⁾により長年の沈黙を破って積極的な目標を掲げた。また、10余州でも強力な施策が採用され、カルフォルニア州では顕著な導入実績を上げている。

欧州では、ドイツを始め各国のフィードインタリフ（FIT）⁽⁷⁾の制度導入により大幅に市場活性化されている。電気事業の太陽光発電電力の買い取り価格を、建設時点でたとえば20年間にわたり通常の電気価格の2～3倍を保証する制度で、早期導入を促す仕組みとなっている。

わが国では2005年度以降、前述した諸事情により、国内導入が一時的に停滞し、活発なドイツの国内導入量に抜き去られた。総年出荷量でも、ドイツや中国企業などに追い上げられている。まさに正念場といえる状況になっている。

3. PV2030 ロードマップおよびその他の見通し

「PV2030ロードマップ」による目標設定では、図1に示されるように、より大量生産に適しコスト低減を実現できるような太陽電池技術へ交代していくシナリオを想定している。その前提条件として、2030年には日本の電気の10%供給にあたる100GW導入をベースケースとして想定している。また例えば、個人住宅用太陽光発電でオール電化が可能な、7～8kW/戸を実現するためのモジュール変換効率を22%にするなど、ニーズ側からの目標設定アプローチが取られたのが特徴である⁽⁴⁾。

表2は、資源エネルギー庁による2005年の旧エネルギー

* 東京工業大学 統合研究院ソリューション研究機構
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1
Tokyo Institute of Technology
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

表 1 太陽光発電にかかわる日米欧の現状比較⁽²⁾

Table 1. Comparison of present status in photovoltaic implementations among Japan, US and Europe.

	日本	アメリカ	ヨーロッパ
技術開発戦略	PV2030ロードマップによる 太陽光発電技術開発 ・2010年 23 ¥/kWh ・2020年 14 ¥/kWh ・2030年 7 ¥/kWh	ソーラーアメリカイニシアチブ ・2015年 住宅 8-10 ¢/kWh 商用 6-8 ¢/kWh (日本の目標を上回る)	EU太陽光発電技術開発 プラットフォーム (WG3) ・2015年 2.5 €/kW 0.15 €/kWh (現実的な目標を設定)
国内普及策	・住宅用太陽光発電支援は、 2005年で終了 ・公共産業用FIT事業 ・余剰電力購入メニュー (電力会社の自主メニュー)	・各州による導入支援プログラム ・RPSの導入による促進 ・ネット・メーティング ・税額控除 (Ca州では独自の導入計画)	・FIT方式(20年間固定買取) 2007年(ドイツの例) 30 kW> 48.21 ¢/kWh 30-100kW 46.32 ¢/kWh 100 kW< 46.30 ¢/kWh
市場	・2006年需要 287MW ・住宅用途が、85% ・年間伸率-3%, 2007低迷 (国内市場閉塞・輸出7割以上)	・2006年需要 145MW ・系統連系分散が 60% ・年間伸率 40%程度 (西海岸地区が多い)	・2006年需要953MW(ドイツ) 61MW(スペイン) ・住宅40%/大型50%/発電10% ・EU年間伸率 12.7%
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">日本の国際競争力？</div> <div style="font-size: 2em; margin-right: 10px;">⇄</div> <div style="background-color: black; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">新しい動向</div> <div style="font-size: 2em; margin-right: 10px;">⇄</div> <div> <ul style="list-style-type: none"> ・台湾・インドによる、フルターンキー新規生産投資 ・中国生産量の異常な拡大・ドイツの中国投資 ・海外半導体産業からの太陽光発電への新規参入 </div> </div>

図 1 PV2030 ロードマップ・シナリオ⁽³⁾⁽⁴⁾

Fig. 1. R&D scenario by NEDO's "PV2030 Roadmap".

需給見通しと 2008 年 3 月の新見通しにおける新エネルギーの導入推計の比較である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。後者における地球温暖化対策のための「最大導入ケース」では、2005 年度の電力供給比率 21%の原子力を 2020 年度 44%, 2030 年度 49%に増強することを主体として、2020 年までに約 52 兆円の社会的負担が必要としている⁽¹⁰⁾。

この場合のエネルギー起源 CO₂ 排出量は、1990 年比で、2010 年+1.3%, 2020 年度 -3%, 2030 年度 -13%としており、一方で打ち出されている洞爺湖サミットの議長国方針との違和感が議論も呼んでいる⁽¹¹⁾。新エネルギー導入についても過去の見通しに比べ後退していることは否めない。新エネルギー全体の伸び率は 3 倍 (2005 年度対 2030 年度)と見ており、この中で太陽光発電について伸び率 37 倍と高い成長可能性を認めている。2005 年度現在で戸建て約 32 万戸に太陽光発電は導入されているが、2020 年度には、新築持家住宅の約 7 割に導入し、約 320 万戸と現状の約 10 倍に達するとしている。

表 2 エネルギー需給見通しにおける新エネルギー供給

Table 2. New energy outlook by METI.

(単位: 原油換算 kℓ)

年 度	2010	2020	2030
2005.3 見通し・総計*	1910 万 kℓ		3947 万 kℓ
うち太陽光発電分	118 万 kℓ		2024 万 kℓ
太陽光発電容量	4.82 GW		(83 GW)
2008.3 見通し・総計**	1910 万 kℓ	2036 万 kℓ	3202 万 kℓ
うち太陽光発電分	118 万 kℓ	350 万 kℓ	1300 万 kℓ
太陽光発電容量	(4.82 GW)	(14.3 GW)	(53 GW)

注*) 総合資源エネ調査会需給部会:「2030 年のエネルギー需給展望」, 新エネ進展ケース, p.108 (2005-3)

注**) 総合資源エネ調査会需給部会: 2010 年度分: p.63, 「追加対策シナリオ上位ケース」; 2030 年度分: p.31, 「最大導入ケース」, 長期エネルギー需給見通し (2008-3)

4. 超長期世界太陽光発電市場展望

図 2 は超長期の市場規模推移シナリオの想定例である⁽¹²⁾⁽¹³⁾。その前提は世界エネルギー供給にどれ程寄与できるかに置かれている。ここで、西暦 2100 年までの世界一次エネルギー供給量 (TPES) として、ドイツの環境諮問会議 WBGU シナリオと、気候変動に関する政府間パネル IPCC の A1T シナリオを参照した。前者は、地球環境問題解決をベースにしたシナリオ⁽¹⁴⁾で、2100 年の TPES は 1600 EJ/Y (EJ = 10¹⁸ J) に達すると予測、太陽電気が TPES の 2/3 を供給するとした。後者では 2100 年に 2000 EJ/Y を想定、バイオマスを含む再生可能エネルギーが全供給の 4/5 になっている⁽¹⁵⁾。

図 2 最上部では A1T シナリオの世界全量を太陽光発電でまかったと仮定した太陽光発電換算単位 (TW) で表示した (等価稼働時間を 1000 時間/年とし、1 TW は 1000 TWh に相当)。太陽光発電導入量は最終的に、太陽熱発電も同量

と見て、WBGU 太陽電気の 1/2 の 133 TW となる。この値に対して現状導入量から飽和曲線を描くと上部 2 番目の曲線となる。さらに、世紀後半のモジュール寿命を 30 年として割り算すると、2100 年 4.4 TW/Y が持続的な年生産量となる。年市場規模カーブ（3 番目の曲線）を引くと、2030 年には 100 GW/年、2050 年 1 TW/年、2100 年 4.4 TW/年と概観できる。

2100 年に生産された太陽電池全量が、耐用年数に達した既設設備を更新、2020 年頃では現状寿命 20 年のモジュールの更新需要が立ち上がる。2030 年頃には 30 年に延びるので、更新カーブ（4 番目の曲線）を作成すれば、2040 年 10 GW/年、2060 年 100 GW/年、2080 年 1 TW/年、2100 年 4.4 TW/年となる。これはリサイクル産業の規模を示している。

さらに市場規模カーブから、1 ライン当たりの規模を推測した。現在は 100 MW/年/ライン規模と言われる。世界を 100 ラインで供給すると見れば、2030 年には 1 GW/年/ラインが必要になり、2050 年 10 GW/ライン、2100 年 40 GW/ラインが要求される。これは目指すべき製造速度の指標である。

例えば、生産能力 1 GW/Y のラインに要求される製造速度は、PV2030 の目標のモジュール効率 22% として、20 cm 角の超薄型セルの場合、毎秒 4.4 枚の接合形成速度が必要である。仮に 1.8 m 角のモジュールを製造するとすれば、毎分 3.3 パネルをアSEMBルしなければならない⁽¹⁶⁾。

また、モジュール生産量の半分を住宅用に利用した場合には、5 kW インバータ換算で、月産 8350 台の生産ラインが必要となる。残り半分を 700 W インバータ付き AC モジュールとした場合には、月産 59000 個の産業が必要である⁽¹⁶⁾。また、上流のシリコン原料や下流の板ガラスなどの関連産業規模についても検討が加えられている。

5. Cool Earth—革新型太陽光発電技術開発

2008 年 7 月に洞爺湖において G8 サミットが開催される。2007 年ドイツ G8 サミットでは安倍前首相が、2050 年に世

図 2 超長期の世界太陽光発電市場規模推定⁽¹²⁾

Fig. 2. Ultra long term projection of photovoltaic world market.

界の CO₂ 排出半減を訴えた。福田政権はクールアース 50 有識者会議を設定し、21 技術からなる「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」を策定した⁽¹⁷⁾。太陽光発電は 4 番目の技術として選定されている。この具体化のために NEDO では「革新型太陽光発電技術開発計画」が検討され、2008 年 3 月時点で公募中である⁽¹⁸⁾。

同計画では図 3 の第 3 世代技術を、ブレークスルーを必要とするが長期的な視点で可能性が期待できるものとして、表 3 で例示している。一方、現状で商業化しているものを第 1 世代技術、PV2030 ロードマップが目指すものを第 2 世代技術として性格付けした。第 3 世代 (3G) という考え方は、オーストラリアのグリーン教授が提唱⁽¹⁹⁾ し、欧米⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ でも基礎的な検討をすでに開始している。

6. 超長期の太陽光発電技術の方向性

以上のような背景を考慮し、筆者は図 4 のようにシステム分野をも含めた将来技術の方向性を提示した⁽²²⁾。第 1～第 3 世代技術およびリサイクル技術⁽²³⁾を順次展開し、应用技术面で、開発途上地域、都市型のコミュニティ、大規模システム・地球規模システムへの展開の 3 大分野を描いた。

図 3 Cool Earth 50 に貢献する 2050 年に向けた技術開発

Fig. 3. R&D toward 2050 to contribute “Cool Earth 50 Program”.

表 3 第 3 世代で実現すべき技術レベルの例示⁽¹⁸⁾

Table 3. Desirable level examples of third generation technologies.

技術分野	取組みテーマ	到達の目安 (7年後)
多接合型太陽電池	高倍率集光対応多接合太陽電池	非集光 η : 35 % 集光 η : 45 %
	薄膜系大面積型多接合	η : 25%
	量子ドット型多接合	η : 15%
量子ナノ構造太陽電池	中間バンド構造, ホットキャリア型, マルチエキシトン効果	η : 10%
デバイス周辺光マネジメント	光調整技術高性能化 波長変換技術の適用	太陽電池適用の可能性実証
その他の新規概念セル	TPV 技術, プラズモン型, 非半導体 p n 接合型等	η : 10%

図4 超長期の太陽光発電技術の方向性⁽²²⁾

Fig.4. Ultra long term direction of photovoltaic technologies.

途上地域では、数100W程度までの個別ソーラーホームシステム（SHS）から村落電化のためのミニグリッド、都市型コミュニティのルーフトップシステム集合⁽²⁴⁾からマイクログリッド型システム概念⁽²⁵⁾へ展開するとした。住宅太陽光発電と負荷が混在融合した自立度向上型地域システム⁽²⁶⁾の提案もある。広域での電力供給アプローチとしては未利用地・砂漠などを対象とした、メガソーラー^{(27)~(29)}や大規模太陽光発電（VLS-PV）⁽³⁰⁾⁽³¹⁾から、多国間連系や地球規模の広域運営インフラシステム⁽³¹⁾⁽³²⁾への接続を例示している。

7. まとめ

超長期展望において、太陽光発電は再生可能エネルギーの最有力という見方は少なくはない。50年のタイムスパンで見た持続可能システムが、100年単位で持続可能か？1000年の持続性を保証できるか？このような命題では太陽エネルギーに支えられた生態系に対して、人間社会が与える負荷の大きさを、前者のキャパシティを超えない範囲に止めなければならない。それに対し、生態系の制約を超えた屋根上や砂漠などに立地した太陽光発電はこの限界を拡張できそうである⁽²²⁾。技術による持続的サイクルとは、このようなトータルシステムを実現することではないかと思しつつ、本稿を終えたい。

(平成20年4月8日受付)

文 献

- (1) NEDO BOOKS 編集委員会編：なぜ、日本が太陽光発電で世界一になったのか、NEDO (2007)
- (2) 黒川浩助：「基調講演（最新の課題）」、太陽光発電協会セミナー、RE2007、幕張メッセ (2007-10)
- (3) 2030年に向けた太陽光発電ロードマップ（PV2030）検討委員会報告書、NEDO (2004)
- (4) 「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ（PV2030）」、NEDO/PV2030検討委員会：
http://www.nedo.go.jp/informations/other/161005_1/gaiyou_j.pdf
- (5) 資源エネルギー庁：新・国家エネルギー戦略 (2006-5)
<http://www.meti.go.jp/press/20060531004/20060531004.html>
- (6) 例えば、「米国の太陽光エネルギー・イニシアティブの現状」、NEDO海外レポート、No.995 (2007-2)

- (7) 例えば、一木 修：「太陽光発電産業について」、総合資源エネ調査会第15回新エネ部会、資料2, p.19 (2006-3)
- (8) 総合資源エネ調査会需給部会：「2030年のエネルギー需給展望」、新エネ進展ケース (2005-3)
- (9) 総合資源エネ調査会需給部会：長期エネルギー需給見通し (2008-3)
- (10) 「2020年の最大導入ケース実現の姿」経産省プレスリリース、
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80319b04j.pdf>
- (11) 「経産省の不可解な排出予測」、日経社説 (2008-3.21)
- (12) K. Kurokawa: "Future direction of PV system technologies around 2030 and beyond", PVSEC-17, Fukuoka, 3-7 Dec. 2007, PL7-1. PVSEC-17, Fukuoka (2007-12)
- (13) 黒川浩助：「寄稿：太陽光発電時代の節目」、太陽光発電協会機関誌、pp.29-37 (2008-3)
- (14) WBGU: German Advisory Council on Global Change: "World in Transition—Towards Sustainable Energy Systems", Summary p.3 (2003)
http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_engl.html
- (15) IEA: Energy to 2050 scenarios for a sustainable future, p.198 (2003)
- (16) K. Kurokawa: "Mass Production Scale of PV Modules and Components in 2030s and beyond", PVSEC15, PV0926-05i, Shanghai (2005-10)
- (17) 経済産業省：Cool Earth-エネルギー革新技術計画の策定について (2008-3)
<http://www.meti.go.jp/press/20080305001/20080305001.html>
- (18) NEDO：「革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」の公募について (2008-3)
<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/koubo/FF/nedokouboplace.2008-03-13.7286783756/nedokoubo.2008-03-17.2664727467/>
- (19) M. Green: Third generation photovoltaics, Springer (2003)
- (20) http://www.fullspectrum-eu.org/downloads_external/Publicable_executive_summary_year3.pdf
- (21) http://www.pv-tech.org/r-and-d/article/energy_focus_wins_1_million_contract_for_high_efficiency_solar_cell_project/
- (22) K. Kurokawa: "Future direction of PV system technologies around 2030 and beyond", PVSEC-17 Digest, PL7-1, Fukuoka (2007-7)
- (23) 例えば、黒川浩助：「世界の太陽電池開発動向ならびにPVリサイクルの動向とグリーン電力証書の課題」、太陽光発電協会セミナー、pp.6-8、幕張メッセ (2007-10)
http://www.jpcea.gr.jp/1/1_keynote_address.pdf
- (24) 例えば、S. Nishikawa and K. Kato: "Demonstrative research on grid-interconnection of clustered photovoltaic power generation systems", 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 8LN-C-03 (2003)
- (25) 例えば、「需要地系統における電圧適正化方式の開発—分散形電源の無効電力を活用した新しい電圧上昇抑制法—」、電中研 2007 研究年報、pp.62-63 (2007)
<http://criepi.denken.or.jp/jp/pub/annual/2007/07bunya42.pdf>
- (26) K. Kurokawa: "Further considerations on solar PV community concept consisting of massive roof-top PVs and domestic loads", EUPVSEC-22, Milan, 5BP.2.5 (2007-9)
- (27) S. Miwa, et al.: "Introduction of Wakkanai Mega-Solar Project", PVSEC-17 Digest, 5O-C6-04, Fukuoka (2007-12)
- (28) H. Konishi, R. Tanaka, and T. Shiraki: "Introduction of Hokuto Mega-Solar Project", PVSEC-17 Digest, 5O-C6-04, Fukuoka (2007-12)
- (29) "Large-scale photovoltaic power plants",
<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>
- (30) K. Kurokawa, Ed: Energy from the desert—Feasibility of very large scale photovoltaic power generation (VLS-PV) systems, James&James (2003-5)
- (31) K. Kurokawa, K. Komoto, P. van der Vleuten, and D. Faiman, Ed: Energy from the desert—Practical proposals for Very Large Photovoltaic Systems, EarthScan (2007-1)
- (32) "Euro-Supergrid with a EU-MENA-Connection", www.trec-eumena.net

黒川 浩 助（正員） 1965年3月早稲田大学第一理工学部電気工学科卒業。同年4月通商産業省工業技術院電気試験所入所後、高電圧直流送電の研究に従事。1974年よりサンシャイン計画などで太陽エネルギー・太陽光発電の研究。1996年5月東京農工大学教授に転任。2008年4月より東京工業大学統合研究院特任教授および東京農工大学特任教授。早稲田大学工学博士。再生可能エネルギー協議会代表、国際太陽エネルギー学会理事。IEEE 会員。