

特別寄稿 2

明るい太陽光発電の未来を目指して

東京工業大学総合研究院 特任教授

くろかわ こうすけ
黒川 浩助



1. はじめに

第1次石油危機を契機として、1974年に当時の通商産業省サンシャイン計画が発足した。このとき多くの4大石油代替エネルギー分野のひとつとして、2000年までの太陽光発電研究開発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）の設立とともに、太陽光発電の技術開発は年間70～80億円程度の安定したナショナル・プロジェクトとして着実な技術発展を遂げてきた。¹⁾

太陽光発電は量的に莫大でかつ無公害なエネルギーとして期待され、わが国のエネルギー戦略でも太陽光発電を将来の最も重要なエネルギー源の一つに位置づけられている。これに対して現状の太陽光発電は、まだ経済性と社会インフラへの組み込みに課題があり、その解決のための技術開発が継続されている。太陽光エネルギーを現状でも10～15%の効率で電力に変換でき、エネルギー回収期間（EPT）は2年以下と、無公害エネルギー源としての地歩を固めつつある。

1990年代前半には、太陽光発電の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⁾ それもつかの間で、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、2005～2007年度は一転して停滞に苦しんだ。2006年以降の世界市場構造は日米欧の3極構造から、中・印・台が台頭しつつあり戦国時代さながら、日々にめまぐるしく変わっている。しかし最新ニュースによれば2008年度に至って再反撃に転じた模様である。

2008年7月に開催されたG8洞爺湖サミットでは、2050年には世界全体で50%のCO₂削減の国際合意が形成された。これに先立ち、G8サミットで議長を務めた福田前首相は、サミット直前に、いわゆる「福田ビジョン」を打ち出し、クールアース50（エネルギー革新技術計画）の設定をアナウンスした。このために、21種類のキー・エネルギー技術が抽出され、高効率天然ガス火力発電、高効率天然石炭火力発電、CCS、革新的太陽光発電、先進的原子力

の並びで、革新的太陽光発電が全体で4番目に位置している。

2. この1年間に起きたこと

2008年は1バレル100ドル超の原油価格で始まった。その後最高値147.27ドル（7月11日）を経て、年末には32.40ドル（12月19日）に戻るといふ乱高下を示し、エネルギー安定供給の面での世界の信頼感を著しく失うこととなった。年の後半に入って米国に端を発した世界景気落ち込みが連鎖反動的に拡大するなど、2008年はまさしく激動の年であった。しかし、わが国太陽光発電産業は2005～2007年度に横ばいで4000億円/年程度で停滞していた苦しい時期から再び成長に転ずる年となった。2008年度見込み値では、およそ25%増の5000億円に達したかもしれない。世界景気の低迷や欧州向け輸出の落ち込みなどまだ最終実績値について即断はできないが、健気にも数少ない成長産業として際だった存在になりつつある。

表1は2008年3月に見直された長期エネルギー需給見通し³⁾であるが、太陽光発電の占める位置は年代の進展とともに他の新エネルギーに比べてウエイトが高くなっており、社会的なニーズは高まりつつある。同表では2005年に比較して2030年太陽光発電導入量が40倍となっていて、これをベースに、先述の「福田ビジョン」において、首相自ら明確に「2030年に太陽光発電を40倍導入」と明言されたその意味は重い。

表1 2008年3月に見直された長期エネルギー需給見通し³⁾

年 度	2005	2020	2030
2008.3 見通し・総計	1160 万kℓ	2036 万kℓ	3202 万kℓ
うち太陽光発電 (太陽光発電容量)	35 万kℓ (1.42 GW)	350 万kℓ (14.32 GW)	1300 万kℓ (53.21 GW)
風力発電	44 万kℓ (1.08 GW)	200 万kℓ (4.91 GW)	269 万kℓ (6.61 GW)
廃棄物発電+ バイオマス発電	252 万kℓ (2.23 GW)	393 万kℓ (3.50 GW)	494 万kℓ (4.40 GW)

将来の太陽光発電などの新エネルギー導入が進むにつれてクローズアップされてきたのが、系統対策である。

2008年7月には「低炭素電力供給システムに関する研究会」が資源エネルギー庁に設置され、今後の新エネルギーの大量導入に伴って必要となる系統安定化対策及びコスト負担の在り方や、電力系統への影響やその影響に対する対策、さらにはそれらの対策を組み合わせた具体的シナリオの策定など、専門的な議論が開始された⁴⁾。

2008年度第一次補正予算から今後数年にわたって、個人住宅用太陽光発電システムへの補助金制度が復活することとなった。太陽光発電協会太陽光発電普及拡大センター(J-PEC)により、1月13日から募集が開始された⁵⁾。補助金額は太陽電池出力1kWあたり7万円とのことで、最大出力が10kW未満かつシステム価格が70万円(税抜)/kW以下であること、変換効率などに対する条件が付けられている。従前とほぼ同様の制度の復活により、2010年目標だった482万kWと23円/kWh(いわゆるグリッドパリティ)をできる限り早い時期に達成してほしいと思わざるを得ない。天は二度もチャンスを受けたもようた。

本稿完了が遅れているうちに、ビッグニュースが突然飛び込んできた。2月24日に二階経済産業大臣が日本版フィードインタリフの制度化を提案し、電気事業連合会森会長が協力を表明した。電力会社が約10年間、当初は従来の2倍程度の価格で買い取る仕組みについて制度設計を進めるといふ⁶⁾。これを盛り込む新法(エネルギー供給構造高度化法案)については、3月10日に閣議決定された⁷⁾。

このような状況から、太陽光発電は、世界の温暖化効果ガスCO₂発生量の半減に大きく貢献するよう求められており、2008年度より具体的な技術開発への取り組みが発足している。「太陽光発電のニーズ・価値」に対するより本質的な認識が社会に広まってきたと捉えてもよいのではないか。これからもさらなる大きなうねりの到来が予感される。

3. PV2030ロードマップおよび革新型太陽光発電技術計画

太陽光発電の利用拡大に関して、NEDO技術開発機構では2004年に技術開発ロードマップPV2030を策定した⁸⁾。これは、2030年までの期間を太陽光発電が地球環境問題や資源問題に対応した主要なエネルギー源の一つになるために、まず、ニーズ側から規定される目標発電コスト(2030年：汎用電力7円/kWh)を規定した。これを實現し得る目標となる太陽電池の性能仕様を定め、次に製造速度を考慮した生産技術および要求資源量を定義するために必要になる2030年の太陽光発電導入量：100GWを示している。これらを実現すべく、例えば50～100ミクロンの超薄型シリコン・ウェハ・ベース太陽電池でセル変換効率25%レベルの高性能化を目指した技術開発などを進めている。

これに加えて、クールアース50により、2050年に40%以上の超高効率を目指した革新的太陽電池が策定されたことから、「PV2030ロードマップ」は見直されつつあり、新しく「PV2030+ロードマップ(仮称)」が本年度末には

策定完了見込みである。

「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、段階的により大量生産に適したコスト低減を實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/戸を實現するための太陽電池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⁸⁾。

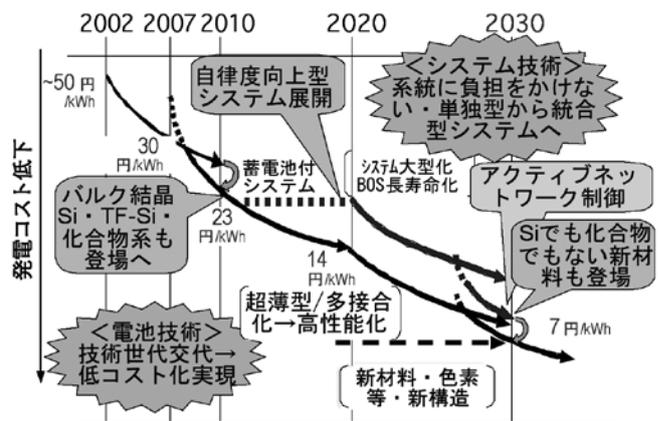


図1 PV2030ロードマップ・シナリオ⁸⁾

2008年7月に洞爺湖においてG8サミットが開催された。これに備えて、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 50-エネルギー革新技術計画」を策定した²⁾。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「革新的太陽光発電技術開発計画」を同サミットに合わせて開始した。同計画ではブレークスルーを必要とするが長期的な視点で40%以上の超高効率を7円/kWhを下回るコストで實現できる可能性が期待できるものとして定義し、図2中の第3世代技術として表している⁹⁾。一方、現状で商業化しているものを第1世代技術、現状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。

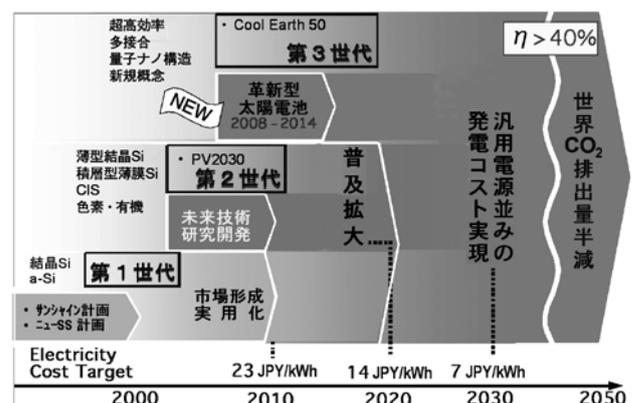


図2 革新的太陽光発電技術研究開発の従来技術に対する位置づけ⁹⁾

表2に示す3つの研究グループが2008年7月に採択された¹⁰⁾。この3月はじめに3グループ初のワークショップが開催され、欧米の研究協力者を含む300人超の基礎研究者が集まった。少なくともこのうちの200人は新しく太陽電池を目指す新世代と思われる。優秀な人材の集合はこれからの太陽光発電技術の未来にとって大変心強い。また本枠組みは、欧米との緊密な国際協力をも意識しており、すでに欧州委員会とは実質的な協議に入っている。双方の専門家によるワークショップはすでに2回開催され、この3月には具体的な方向付けの合意ができた段階にある。なお、在来のPV2030ロードマップと革新的太陽光発電計画を統合し、開発計画を加速化させる意図も加えて、新しい「PV2030 + ロードマップ (仮称)」が近々発表されようとしている。

表2 革新的太陽光発電技術研究開発¹⁰⁾

研究開発テーマ名	研究グループ
超高効率太陽光発電 国際研究拠点 (Solar Quest)	東京大学 大阪大学, 電気通信大学, 兵庫県立大学, 豊田工業大学, 名城大学, シャープ, 新日本石油, リコー
高度秩序構造を有する 薄膜多接合太陽 電池の研究開発	産業総合技術研究所 大阪大学, 九州大学, 東京工業大学, 東京農工大学, 東北大学, 豊橋技術科学大学, 東海大学, 物質・材料研究機構, 理化学研究所, 京セラ, コーニングホールディ ングジャパン, パナソニック電工, 三菱重工
薄膜フルスペクトル 太陽電池の研究開発 -低倍率集光	東京工業大学 岐阜大学, 青山学院大学, 立命館大学, 龍谷大学, 木更津工業高等専門学校, 旭硝子, カネカ, 三洋電機, シャープ, 富士電機アドバンステクノロジー, 三菱電機

4. 超長期太陽光発電市場展望

図3は、西暦2100年までの世界一次エネルギー供給量 (TPES)として、よく参照されるドイツ政府の環境諮問会議 WBGU シナリオ¹¹⁾である。その前提は、地球環境問題解決とエネルギー貧困救済をベースにしたシナリオで、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をすると想定、とくに太陽電気がTPESの2/3を供給するとした。もし仮に、TPESを100%太陽光発電で供給するとすれば、400 TWの太陽電池が必要となる (1 TWの太陽電池が1000 TWh/年発電するものと仮定)。

2100年に太陽電気の半分を太陽光発電が分担する (他方は太陽熱発電)とすれば、 $400 \div 3 = 133$ TW規模の太陽光発電導入が必要となる。図4の上部に2100年133 TWへ向かっての累積導入量マイルストーンを示した。なお、同図は、国際エネルギー機関太陽光発電国際研究協力実施協定タスク8 (IEA PVPS/Task8 大規模太陽光発

電システム)により大規模太陽光発電システム (VLS-PV)の2100年へ向けての導入ロードマップとして作成されたものである¹²⁾。さらに同図中央部には、2100年頃には太陽光発電産業がほぼ一定レベルで生産を続ける成熟状態に達するという前提で、生産された太陽電池のほぼ全量が耐用年数 (30年) に達した太陽電池モジュールを更新することに振り向けられるから、 $133 \div 30 = 4.52$ TW/年の年市場規模に向かって成長から安定へ移行するという想定をした太陽光発電世界市場ロードマップを描いた。

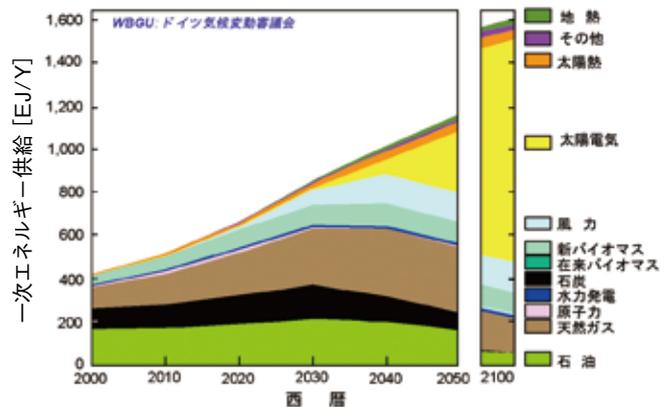


図3 超長期の世界一次エネルギー供給量 (WBGU シナリオ)¹¹⁾

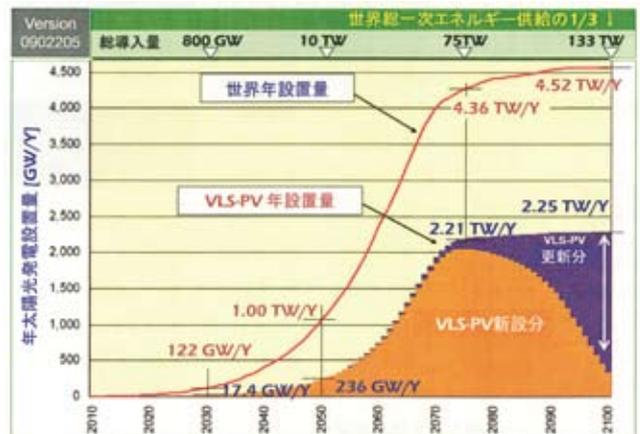


図4 世界太陽光発電市場動向および大規模太陽光発電システム市場推移¹²⁾

世界市場規模は同図中央部実線のように、122 GW/年 (2030年)、1.00 TW/年 (2050年)、4.36 TW/年 (2075年)、4.52 TW/年 (2100年) のように推移すると見ている。この間、VLS-PVのシェアが徐々に立ち上がると考え、おおよそ、15% (2030年)、25% (2050年)、50% (2075年)、50% (2100年) のように想定したので、VLS-PV市場規模は、17.4 GW/年 (2030年)、236 GW/年 (2050年)、2.21 TW/年 (2075年)、2.25 TW/年 (2100年) と見積もった。

これらの市場動向を金額ベースに換算するために、2010年のシステム価格を4.5 US \$、生産量倍増に対するコスト習熟率を0.8 (~2030年)、0.9 (~2050年)、0.95 (~

2100年)と見た場合には、世界市場は、1620億ドル/年(2030年)、9080億ドル/年(2050年)、3.41兆ドル/年(2075年)、3.39兆ドル/年(2100年)と推定される。また同様にVLS-PV市場は、232億ドル/年(2030年)、2140億ドル/年(2050年)、1.73兆ドル/年(2075年)、1.69兆ドル/年(2100年)となる。

つまり、太陽光発電産業は、2050年には100兆円/年に迫り、21世紀後半には300兆円/年を越えると思われる。現状、世界の自動車産業あるいはIT産業が300兆円あるいはそれ以上といわれるから、日本の将来を支える一大世界産業となることが期待される。

ここで、2050年1TW/年の世界市場を100ラインにより供給するとすれば、10GW/年/ラインの生産速度を持つ太陽電池技術が必要となり、2100年には40GW/ラインの高速技術が要求される。例えば、生産能力10GW/年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、20cm角の超薄型セルの場合、毎秒44枚の接合形成速度が必要である。仮に1.8m角のモジュールを製造するとすれば、毎分33パネルをアセンブルしなければならない¹³⁾。下流側のインバータの生産も全自動ラインが欲しい。上流側の必要なシリコン原料や板ガラスなどの関連産業規模についても供給量の確保を確実にするための産業戦略が不可欠である。図3に、現状技術に沿った太陽光発電産業の平均的な構造を掲げた。

なお、上記試算例をシリコンについて見ると、モジュール効率22%を厚さ100ミクロン(PV2030-2004の2倍厚として)のシリコンウェハで達成すると考えると、太陽電池1W当たり、シリコン所要量が2gとなる。つまり、2050年には、世界の太陽電池用シリコン所要量(切り代なし)は、2030年には24万トン/年、2050年には200万トン/年のオーダーに達すると考えられる。太陽光発電は一度設置すると燃料なしで20~30年にわたって発電し続ける、一種のエネルギー備蓄であるとともに、シリコン資源の備蓄ともいえる。長期のエネルギー資源戦略に沿って、今後日本の産業体系を整備・投資していく必要があると考える。

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雄である。たとえば、50年のタイムスパンに限って最適化された低炭素システムが、果たして本当に持続可能システムなのか?さらにそれが100年単位で生き残れるか?100年持続するといえても、1000年の持続性を保証できるのか?

このように本質的な命題では、再生可能エネルギーの源である太陽エネルギーに支えられた全社会システムの構築が不可欠である。生態系が持続できる範囲内で、人間社会が反映していける地球規模システムを構築していかなければ

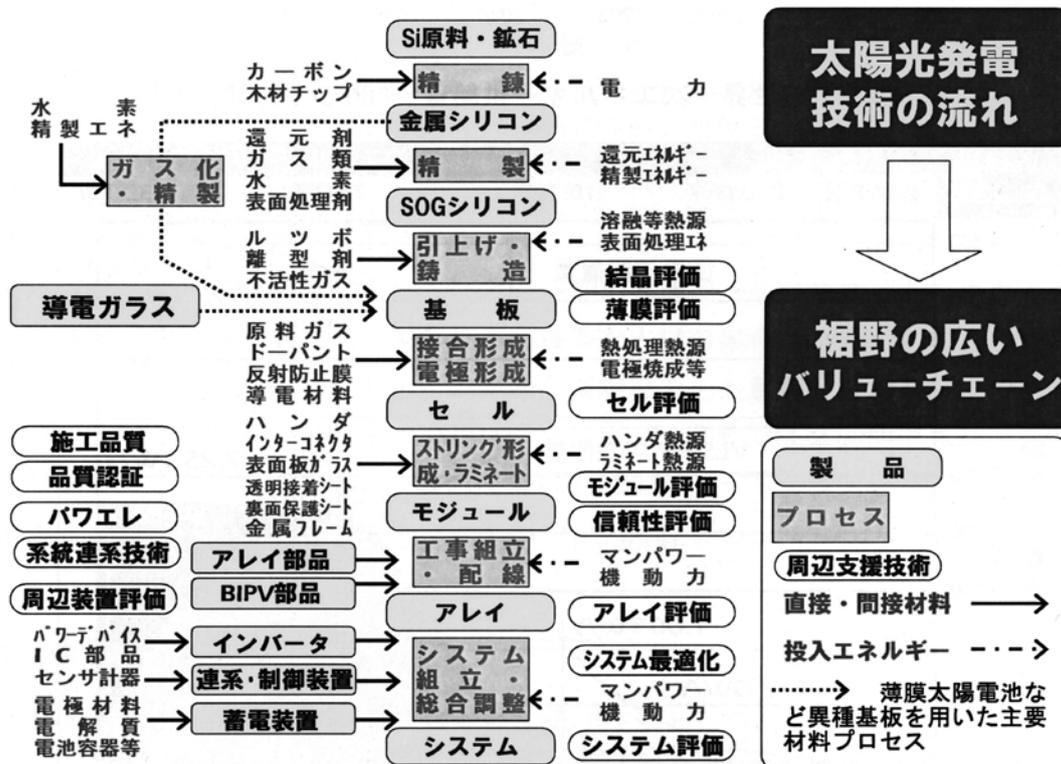


図5 太陽光発電バリューチェーン

ればならない。生態系持続という制約条件に大きなインパクトを与えない屋根上や砂漠に立地した太陽光発電は、21世紀以降の人類にとってエネルギー供給のオンリー・ワン・ソリューションであるという思いを強くしつつある。これこそが「技術によって真の持続的サイクルを実現する」ということの実践であり、未来にわたって持続・生存可能なトータルシステムを地球上に実現することに他ならないと思考しつつ、本稿を終わりたい。

この原稿は「エネルギーシステム特集号 50 巻 4 号」に執筆をお願いしたものです。

(NENEOS Technical Review 編集事務局)

－ 参考文献 －

- 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れたのか」、NEDO (2007)
- 2) 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」、2008.3.5, <http://www.meti.go.jp/press/20080305001/20080305001.html>
- 3) 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.
- 4) 例えば、今後の新エネルギーの大量導入に伴って必要となる系統安定化対策及びコスト負担の在り方について(案)、低炭素電力供給システムに関する研究会新エネルギー大量導入に伴う系統安定化対策・コスト負担検討小委員会、2009.1.
- 5) 平成 20 年度住宅用太陽光発電導入支援対策費補助金募集説明、<http://www.jpea.gr.jp/meeting0901.html>
- 6) 太陽光発電に関する新たな買取制度の創設、二階経済産業大臣の閣議後大臣記者会見の概要、http://www.meti.go.jp/speeches/data_ed/ed090224j.html /
- 7) エネルギー新法案を閣議決定、NHK ニュース、2009.3.10
- 8) 「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
- 9) Cool Earth 50 エネルギー革新技術シート及び解説、エネルギー総合工学研究所、2008.12
- 10) 平成 20 年度「新エネルギー技術研究開発 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)」に係る委託先の決定について、<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/koubo/FF/nedokoubo.2008-06-26.3772651112/>
- 11) 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
- 12) K. Komoto, et al ed.: Energy from the desert, EA PVPS/Task8, Earth Scan (UK), to be published, Sept. 2009.