

# SRRREN

ipcc

気候変動に関する政府間パネル  
第3作業部会 - 気候変動の緩和（策）

再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書  
最終版

直接的太陽エネルギー（仮訳）

---

# 直接的太陽エネルギー（仮訳）

---

**統括執筆責任者:**

Dan Arvizu (USA) and Palani Balaya (Singapore/India)

**執筆責任者:**

Luisa Cabeza (Spain), K.G. Terry Hollands (Canada), Arnulf Jäger - Waldau (Italy/Germany), Michio Kondo (Japan), Charles Konseibo (Burkina Faso), Valentin Meleshko (Russia), Wesley Stein (Australia), Yutaka Tamaura (Japan), Honghua Xu (China), Roberto Zilles (Brazil)

**執筆協力者:**

Armin Aberle (Singapore/Germany), Andreas Athienitis (Canada), Shannon Cowlin (USA), Don Gwinner (USA), Garvin Heath (USA), Thomas Huld (Italy/Denmark), Ted James (USA), Lawrence Kazmerski (USA), Margaret Mann (USA), Koji Matsubara (Japan), Anton Meier (Switzerland), Arun Mujumdar (Singapore), Takashi Oozeki (Japan), Oumar Sanogo (Burkina Faso), Matheos Santamouris (Greece), Michael Sterner (Germany), Paul Weyers (Netherlands)

**査読編集者:**

Eduardo Calvo (Peru) and Jurgen Schmid (Germany)

**本章の引用時の表記方法:**

Arvizu, D., P. Balaya, L. Cabeza, T. Hollands, A. Jäger - Waldau, M. Kondo, C. Konseibo, V. Meleshko, W. Stein, Y. Tamaura, H. Xu, R. Zilles, 2011: Direct Solar Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs - Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. v. Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

**注意**

本報告書は、IPCC「Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation」Final Release を翻訳したものです。この翻訳は、IPCC ホームページに掲載されている報告書

<http://srren.ipcc-wg3.de/>

を元に行っています。また、翻訳は 2011 年 5 月 9 日リリースの初版に基づいて行っており、その後 IPCC によって行われた修正、追加、削除等の変更には対応しておりませんので、ご注意ください。

本報告書「再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書」は上記報告書の仮訳であり、IPCC の公式訳ではありません。正本は英文のみで提供されており、本日本語仮訳を引用して問題が生じても責任を負いかねますのでご了承ください。

---

## 第3章:直接的太陽エネルギー

### 目次

目次	2
要約	3
3.1 序論	4
3.2 資源ポテンシャル	5
3.2.1 世界的な技術的ポテンシャル	6
3.2.2 地域の技術的ポテンシャル	7
3.2.3 太陽放射データの出典	7
3.2.4 気候変動が資源ポテンシャルに与える潜在的な影響	8
3.3 技術及び用途	9
3.3.1 パッシブ太陽利用技術及び採光技術	9
3.3.2 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却	11
3.3.2.1 太陽熱加熱	12
3.3.2.2 太陽熱利用冷却	14
3.3.2.3 蓄熱	15
3.3.2.4 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却の応用	15
3.3.3 太陽光発電	17
3.3.3.1 現在の太陽発電技術	17
3.3.3.2 新しい太陽光発電技術	18
3.3.3.3 新たな太陽光発電技術	19
3.3.3.4 太陽光発電システム	19
3.3.3.5 太陽光発電の応用	20
3.3.4 集光型太陽熱発電	22
3.3.5 太陽燃料の生成	25
3.4 市場及び工業発展の世界的、地域的状況	27
3.4.1 設備容量及びエネルギー生産量	27
3.4.2 生産能力とサプライチェーン	30
3.4.3 政策の影響	35
3.5 広範囲のエネルギーシステムへの統合	35
3.5.1 低用量電力需要	35
3.5.2 地域暖房及びその他の熱負荷	36
3.5.3 太陽光発電の特徴とならし効果	36
3.5.4 集光型太陽熱発電の特徴と系統安定化	37
3.6 環境及び社会への影響	38
3.6.1 環境への影響	38
3.6.2 社会への影響	42
3.7 技術の改良及びイノベーションの見通し	43
3.7.1 パッシブ太陽エネルギー及び採光技術	43
3.7.2 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却	44
3.7.3 太陽光発電	45
3.7.4 集光型太陽熱発電	47
3.7.5 太陽燃料の生産	47
3.7.6 その他の潜在的な将来の用途	48
3.8 コストの傾向	49
3.8.1 パッシブ太陽熱利用技術及び採光技術	49
3.8.2 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却	49
3.8.3 太陽光発電	51
3.8.4 集光型太陽熱発電	55
3.8.5 太陽燃料生産	57
3.9 普及のポテンシャル	58
3.9.1 短期的予想	58
3.9.2 二酸化炭素排出抑制からみた長期的な普及	59
3.9.3 普及に関する結論	63
REFERENCES	64

## 要約

太陽エネルギーは豊富で、短期的（2020年）及び長期的（2050年）な気候変動緩和に対して大幅なポテンシャルがある。幅広い太陽エネルギーの利用技術があるが、世界の大半の地域で一連のエネルギーのサービスに貢献出来る成熟度はまちまちである。太陽エネルギー発電は今のところ、エネルギー消費全体では小さい割合しか占めていないにもかかわらず、太陽エネルギー利用技術の市場は急速に成長している。太陽利用技術がなぜ望ましいかは、環境への負担が本質的に小さく、プラスの社会的影響を与える機会を有している点が大い。太陽利用技術のコストは過去30年間において大幅に低減され、技術的進歩及び支援する公共政策によってさらなるコスト低減のポテンシャルが提供されつづけている。潜在的な普及シナリオの変動幅は大きく、2050年に直接的太陽エネルギーがわずかしき役割を果たさないものからそれが主要なエネルギー供給源となっているものまでである。実際に普及が達成されるには、継続的なイノベーションコスト低減、及び公共政策の支援の程度に左右される。

太陽エネルギーは、すべてのエネルギー資源のなかで最も豊富にある。実際、地球が受け止める太陽エネルギーは、人類による消費エネルギーの約10,000倍である。すべての国が平等に太陽エネルギーに恵まれているわけではないが、ほぼすべての国で、直接的太陽エネルギーがエネルギーの組み合わせに大幅な貢献を果たし得る。現在、気候変動が地域の太陽エネルギー資源に実質的に与える影響を示す証拠はまったくない。

太陽エネルギーの転換はエネルギーサービスの多様なニーズに対応して、様々な可能な技術群に大きく分けられる。太陽利用技術は、熱、冷却、自然の照明、電力、及び多数の用途の燃料を提供出来る。太陽エネルギーの熱への転換（熱変換）は比較的単純である。日の当たるところに置かれた物質が、熱エネルギーを吸収するためである。しかしながら、その吸収エネルギーを最大化し、周囲に漏れないようにするには、真空の空間、光学コーティング、及び光学鏡など、特殊な技術と装置が必要になることがある。どのような技術を利用するかは、熱配送される用途と温度に左右される。その温度範囲は25°C（水泳プール加熱など）から1,000°C（ディッシュ・スターリング集光型太陽熱発電など）、最大で太陽炉の3,000°Cにまで至る可能性がある。

パッシブ太陽エネルギー暖房は、グレーディング（窓、日光浴室、温室）及びその他の透明な素材の使用を通じて建物への太陽放射射を活用し、ポンプやファンを集中的に使用せず建物内の熱取得と熱損失を管理して、建物内の快適な状況を維持する技術である。建物用の太陽熱冷房も、たとえば、太陽熱を使用して熱力学の冷凍吸収サイクルまたは吸収サイクルを稼働させることで達成出来る。照明用の太陽エネルギーは、窓を通じて自然に建物内で太陽光照明が行われるため、実際に転換することは一切不要である。しかしながら、利用効果を最大化するには、特殊な工学と建築設計が必要になる。

発電は2つの方法で可能である。第一に、太陽電池（PV）と呼ばれる装置で太陽エネルギーを直接電力に転換させる方法である。第二に、太陽熱エネルギーは集光型太陽熱発電（CSP）プラントで高温の発熱に使用され、それから熱機関及び発電機を経由して電力に転換される。現在、両方の方法が使用されている。さらに、太陽熱で稼働するシステムはプロセス加熱とプロセス冷却を提供出来る。水素燃料や炭化水素燃料などのエネルギーキャリア（いわゆるソーラー燃料）を供給する他の太陽利用技術は開発中である。

様々な太陽利用技術があるが、その成熟度はまちまちである。その適用可能性は、その適用を支援する地域事情と政府の政策に左右される。一部の技術は既に一定の場所で市場価格と競争力を有し、一般に、太陽利用技術の全体的な実行可能性は改善している。太陽熱は家庭用温水、建物の快適な暖房、及び製造プロセス熱といった幅広い用途に使用可能である。多くの国で年間エネルギー使用の最大3分の1が熱に消費されていることを考えると、これは大きい。家庭用、商業用の建物に対する温水暖房サービスは現在、年間約16%の成長を続け、世界の大半の国で展開されている成熟技術である。2009年末には、太陽熱システムの世界の設備容量は、180GW<sub>th</sub>と推定されている。

パッシブ太陽エネルギーと採光は、建物内のエネルギーをかなりの率で転換するが、実際の量は定量化が難しい。適切な設計がなされたパッシブ太陽エネルギーシステムでは、快適な暖房をさらに必要とするニーズが既存の建物で約15%、新しい建物で約40%削減される。

太陽光発電（PV）パネルを使用した発電も、世界的に見られる。価格支援政策に支えられ、2003年から2009年にかけての太陽光発電（PV）の生産における年平均成長率は50%を超え、パーセンテージで見た場合、最も早い成長を遂げるエネルギー技術の1つである。2009年末には、世界の太陽光発電（PV）の累積設備容量は約22GWだった。2010年の推定値では、約13GWの新規の追加容量が合意値である。これらの設備容量の大半は屋上設置と系統連系である。集光型太陽熱発電の設備による発電は、過去数年の計画容量で大きく増加しており、いくつかの国では新規設備が大幅に拡大しつつある。

太陽エネルギーをより幅広いエネルギーシステムに統合するには、課題と機会の双方がつきものである。太陽光発電（PV）パネルが提供するエネルギーと家庭用の太陽熱温水器は、エアコンディショナーに関連する夏季の日中のロードの場合のように、エネルギー生産が系統上のピークロードの時に行われることが多く、特に有益である。

太陽光発電 (PV) と家庭用の太陽熱温水器は、多くの国のニーズにうまく合致する。これらがモジュラー式であること、設置が簡単であること、費用のかかる送電システムの建設や拡張の必要性を先延ばし出来る場合があることが、その理由である。同時に、太陽エネルギーは典型的に、ある程度の予測不可能性を伴う変動的な生産プロフィールを持つため、管理が必要になる。また、集中発電所型の太陽熱発電プラントでは送電インフラが新たに必要になるだろう。集光型太陽熱発電 (CSP) は容易に蓄熱と併用出来るため、この生産プロフィールは、生産の変動性を限定し配送容量を可能にするため、制御可能である。

**太陽利用技術は社会的影響がポジティブで環境への負担は小さい。**太陽利用技術のライフサイクル温室効果ガス排出量は低く、外部コストの定量化でも化石燃料系のエネルギーに比べ好ましい値が出ている。潜在的に懸念される分野は、太陽電池(PV)製造における有毒物質のリサイクルと使用、集光型太陽熱発電(CSP)の水使用、そしてこの両方のエネルギー回収期間と土地の必要性などがある。太陽利用技術の重要な社会的便益は、世界最貧困層における多くの健康と生計の改善へのポテンシャルである。電力にアクセス出来ない約 14 億人、家庭内の調理及び暖房のニーズを伝統的バイオマスに依存する 27 億人にとっては、近代的なエネルギーサービスが使用出来るにはギャップがあるが、そのギャップの一部は解決することが出来る。不利な面は、一部の太陽プロジェクトでは、集中発電所型の集光型太陽熱発電(CSP)プラントと太陽光発電(PV)プラントの土地必要性に関する社会的な関心と視覚的影響に関する認知の課題に直面しており、また前者では冷却水の必要性が課題になっている。土地利用の影響は、人口密度と環境の感度が低い地域を選べば最小化出来る。同様に、集光型太陽熱発電(CSP)の水使用についても、乾式冷却の方法を用いれば、大幅に削減出来るだろう。これまでの研究では、これらの課題のいずれも、太陽熱技術の使用拡大に対する障壁にはならないことが示されている。

**過去 30 年にわたり、太陽利用技術のコストは非常に大きく低減された。**太陽利用技術によるエネルギーの均等化原価 (電力と熱) は現在、技術の前払いコスト、利用可能な太陽放射、適用される割引率によって、大きく異なる。割引率 7% の場合における太陽熱エネルギーの均等化原価は、中国で使用度の高い太陽熱温水システムで 10US ドル (2005 年) /GJ 以下から 20US ドル (2005 年) /GJ を若干上回る範囲であり、放射レベルが 800kWh/m<sup>2</sup>/年と比較的低い OECD 加盟国の空間暖房用途で 130US ドル (2005 年) /GJ 以上である。ヨーロッパとアメリカにおける太陽放射の高い地域では、実用規模の太陽光発電 (PV) の発電コストは、割引率 7% の場合おおよそ 1.5~4US セント (2005 年) /kWh の範囲であるが、使用可能な資源とその他の枠組みの条件によっては増減する場合がある。現在のコストデータは集光型太陽熱発電の場合限られており、貯蔵などのその他のシステム的な要因に大きく左右される。2009 年における 6 時間の蓄熱機能を持つ太陽熱トラフ型発電所のエネルギーの均等化原価は、20US セント (2005 年) /kW 以下~約 30US セント (2005 年) /kWh の幅だった。技術的な向上とコスト削減が予測されるが、太陽利用技術の学習曲線とそれによるコスト低減は、生産量、研究開発 (R&D)、資本へのアクセスなどその他の要因に左右され、時の経過にはほぼ影響を受けない。民間資本はすべての技術に流入しているが、政府の支援と安定的な政治状況が、民間投資のリスク軽減と普及の加速を確実なものとする。

**太陽エネルギーの潜在的な普及シナリオの変動幅は大きく、2050 年に直接的太陽エネルギーがわずかな役割しか果たさないものから主要なエネルギー供給源となるものまでである。**現在、直接的太陽エネルギーは世界のエネルギー供給のわずかな割合しか占めていないが、このエネルギー源の潜在的将来性は最も大きなものの 1 つであることは依然として明白である。技術の向上とその結果としてのコスト低減にあわせて、向こう数十年で使用は劇的に拡大するだろう。継続的なコスト低減の達成は、太陽エネルギーの将来の普及に影響を与える主な課題である。さらに、再生可能エネルギーのその他の一部の形態にも見られるように、変動性のある生産形態やエネルギー市場の統合、新規送電インフラが必要になる可能性という課題も、太陽エネルギー普及の規模、種類、及びコストに影響を与える。最終的に、現行の法規制枠組みによって直接的太陽エネルギーの利用の理解も促進または妨害されている。

### 3.1 序論

本章の目的は、直接的太陽エネルギーが気候変動緩和に対して持つポテンシャルを最大限実現するため、最先端かつ可能性のある将来のシナリオの概要を示すことにある。本章では、資源基盤の確立、多数の様々な技術の解説、現在の市場発展の評価、太陽エネルギーを他のエネルギーシステムに統合するいくつかの方法についての概説、その環境的な影響と社会的影響への対応、そして最後に将来の普及予測の評価を行う。

地球に吸収された太陽エネルギーの一部は、その後、風力エネルギー、波力エネルギー、海洋温度差エネルギー、水力エネルギー、余剰バイオマスエネルギーの形で現れる。本章では、これらの他の間接的な形態は対象にせず、太陽エネルギーの直接的な使用を取り扱う。

太陽利用技術の歴史については、様々な文献で扱われている (Butti and Perlin, 1980 など)。この歴史の始まりは、初期の文明で、寒冷な気候であっても日の当たる開口部のある建物は暖かく明るいということが分かったときだった。1800 年代後半の間、温水や他の液体用の太陽熱集熱器が開発され、家庭用の太陽熱温水と産業加熱の用途で実用化された (大規模な脱塩など)。後に、太陽熱機関が動力を作り出し、そこから電力を生み出せるよう、使用可能な液体の温度を上げるために鏡が使用された (1875 年の Augustin Mouchot など)。また、1800 年代後半には、

太陽光を直接電力に転換する装置が開発された。これは、太陽電池 (PV) と呼ばれ、熱機関へのニーズを飛び越えた装置だった。近代的なシリコン系太陽電池は、米国電話電信会社 (AT&T) のベル研究所で働く Russell Ohl のおかげで、1940 年頃に開発された。

現代の太陽エネルギー研究は 1950 年代の国際太陽エネルギー学会 (ISES) の設立で始まり、多くの産業で研究開発 (R&D) の取り組みが増えた。たとえば、イスラエルの Miromit などの企業による太陽熱温水器やエルサレムの National Physical Laboratory 所属の Harry Tabor の取り組みによって、イスラエルでは 1906 年代初めに太陽エネルギーが家庭用温水供給の標準的な方法になった。ほぼ同時に、太陽放射測定に関する全国的ネットワークと国際ネットワークの設立が始まった。1970 年代の石油危機に伴い、世界の大半の国が太陽エネルギーの研究開発プログラムを策定し、この動きには産学官の取り組みも関連した。これらの政策的な支援の取り組みは、ほぼ大部分が現在も継続され、成果を生んでいる。最も成長の早い再生可能エネルギー (RE) 技術の 1 つである太陽エネルギーは、世界のエネルギー段階でかなり大きな役割を果たす態勢が整っている。

太陽エネルギーは豊富なエネルギー資源である。実際、地球が受け止める太陽エネルギーは、わずか 1 時間で世界の年間エネルギー消費量を超える。太陽エネルギーの気候変動緩和ポテンシャルは、同様に素晴らしいものがある。変換素子製造で生ずる中程度の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量を除き (3.6.1 節参照)、太陽エネルギーの直接使用では温室効果ガスはほぼ生じない。また、多量の非再生可能エネルギー燃料を置換するポテンシャルも有する (Tsilingiridis et al., 2004)。

太陽エネルギーの転換は、幅広いエネルギーのサービスの用途を持つ技術群で実現する。これらには、照明、快適な暖房、建物用と産業用の温水、発電と産業用の高温太陽熱、電力用の太陽熱転換、ソーラー燃料の生産 (水素ガスまたは合成のガス (合成ガス) など) がある。本章では、これらの技術のすべてをさらに詳細に取り上げる。

家庭用の温水加熱やプール加熱など、いくつかの太陽利用技術は既に競争力があり、最小コストの選択肢を提供する場所で使用されている。政府が太陽エネルギーの積極的な支援策を実施している地域では、非常に大規模な太陽電力 (太陽光発電 (PV) 及び集光型太陽熱発電 (CSP) の双方で) が導入され、多数の屋上の太陽光発電 (PV) に加え、100MW 電力に到達しつつある。ソーラー燃料など他の用途では、適用への相当レベルに達するまでにはさらなる研究開発が必要となっている。

太陽エネルギーのいずれを追求するにあたり、太陽の変動性と周期性に対処する必要がある。1 つの選択肢として、回収した余剰エネルギーを必要時まで貯蔵する方法がある。これは、夜間に太陽光が無いことに対処する際に特に有効である。たとえば、住宅の床に厚さ 0.1m のコンクリート・スラブを設置すると、日中に吸収された太陽エネルギーの多くが貯蔵され、夜間に部屋に放出される。1 年間の長期的な時間や大陸などの大きい地理的地域を合計すると、太陽エネルギーはより大きなサービスを提供出来る。時間と空間というコンセプトの双方をエネルギー貯蔵と併用することで、より効率的な太陽利用システム設計が可能となる。しかし、太陽エネルギーが貢献し得るすべての値を回収するには、さらなる研究が必要である。

太陽エネルギーは本質的に変動することから、太陽エネルギーが利用出来ないときにも、エネルギーが使用出来るようにするためには、別のエネルギー源と統合することが最も有用である。過去、こうしたエネルギー源としては一般に非再生可能エネルギー源を利用された。しかし、直接的太陽エネルギー技術を他の再生可能エネルギー技術と統合することが、大きなポテンシャルになる。

本章の残りでは、以下のテーマを扱う。3.2 節では、この太陽エネルギー資源の特徴を示す研究について概要を示し、直接的太陽エネルギーの世界的、地域的な技術的ポテンシャルと太陽エネルギー資源に対する気候変動の潜在的な影響を議論する。3.3 節では、パッシブ太陽エネルギー暖房及び建物の照明 (3.3.1 節)、建物及び産業のアクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却(冷房) (3.3.2 節)、太陽光発電 (PV) (3.3.3 節)、集光型太陽熱発電 (CSP) (3.3.4 節)、ソーラー燃料生産 (3.3.5 節) の 5 つの異なる技術とその用途を説明する。3.4 節では、設備容量と現在生産中のエネルギーなどの市場発展の現状 (3.4.1 節)、産業の容量とサプライチェーン (3.4.2 節) を検討する。次の節では、その他のエネルギーシステムへの太陽熱技術の統合 (3.5 節)、環境及び社会的影響 (3.6 節)、及び将来のイノベーションの見通し (3.7 節) を扱う。最後の 2 節では、コスト傾向 (3.8 節) 及び普及目標の達成に必要な政策 (3.9 節) を取り上げる。3.3 節など、節の多くで小節を設け、5 つの太陽エネルギー技術のいずれかを扱っている。

## 3.2 資源ポテンシャル

太陽エネルギー資源は事実上枯渇することはなく、世界のすべての国と地域で使用可能である。しかし、太陽エネルギーの技術者が、適切なエネルギー転換システムを計画、設計するには、集光器器にどの程度放射があるかを把握しなければならない。

とりわけ Iqbal (1984) は、太陽から放出される電磁放射である太陽放射の特性について説明している。地球の大

気圏の外側では、地球と太陽の平均距離で太陽光と垂直な表面における太陽放射は、年間通じてほぼ一定である。その値は現在  $1,367\text{W/m}^2$  とされている (Bailey et al., 1997)。地球で晴天の場合、この値は地表で約  $1,000\text{W/m}^2$  になる。この光線は実は電磁波で、電界と磁界で波動を移動する。太陽の表面温度は  $5,800$  ケルビンに近く、太陽放射は  $0.25\sim 3.2$  の波長範囲で拡散される。太陽放射の約  $40\%$  は可視光で、さらに  $10\%$  は紫外線放射であり、 $50\%$  は赤外線放射である。しかしながら、地表では、大気との相互作用があるため、太陽放射の評価はより難しい。大気は、雲、粒子、水蒸気、微量ガスが含まれ、地理的にも時間的にも異なる。大気の状態により、一般に、太陽放射は晴天時と乾燥時に約  $35\%$ 、曇天日に約  $90\%$  減少し、平均的な太陽放射を低下させる。地表における太陽放射の平均は、地表面積に基づく  $198\text{W/m}^2$  (Solomon et al., 2007) である (Le Treut et al., 2007)。

地表に達した太陽放射 (図 3.1) は主に、2つの構成要素に分けられる。水平面の直達光 (beam solar irradiance) で、太陽面から直接放出される。もう1つは散乱光で、太陽面以外の空全体によるものである。「全天日射照度」とは直達光及び散乱光の照度の合計を指す。

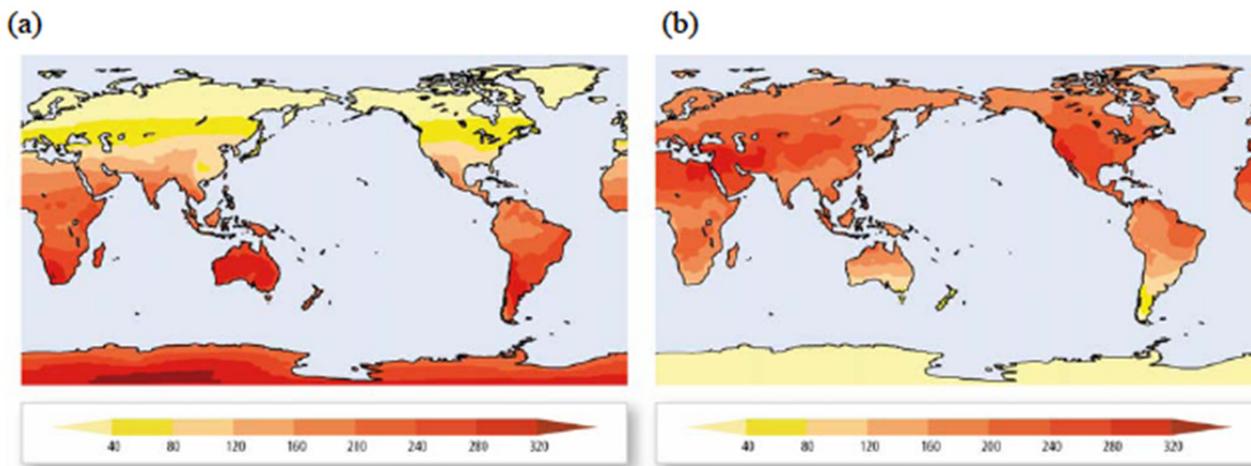


図 3.1: 衛星映像ラジオメータから得た地表における全天日射照度 ( $\text{W/m}^2$ )。1983~2006年の平均。(a) 12月、1月、2月、及び (b) 6月、7月、8月 (ISCCP Data Products, 2006)。

太陽エネルギーの世界的な資源ポテンシャルを評価する方法は、いくつかある。理論上の太陽エネルギー・ポテンシャル (エネルギーとして理論上利用可能な地表 (陸域と海洋) での放射量を示すもの) は、 $3.9 \times 10^6 \text{EJ/年}$  と推定されている (Rogner et al., 2000; その表 5.18)。理論上のポテンシャルは、実証開発の可能性の高い技術または慣行が全面的に普及した場合に得られる、太陽放射出力の量である (Annex I, 用語集参照)。

### 3.2.1 世界的な技術的ポテンシャル

人類が使用できそうな太陽エネルギーの量は、土地の使用可能性や地域の気象条件、エネルギーのサービスに対する需要など、地域の要因によって大幅に異なる。技術的ポテンシャルも、評価方法論と同じように、地球上の各地域によって異なる。ドイツ環境庁の比較文献研究 (Krewitt et al., 2009) で示されたように、太陽光発電 (PV) 及び集光型太陽熱発電 (CSP) の場合、太陽熱発電の技術的ポテンシャルは、使用可能な太陽放射、土地利用の排除要因、及び技術向上のさらなる発展に左右される。この研究は、太陽光発電 (PV) 及び集光型太陽熱発電 (CSP) の土地利用の要因に関して様々な想定を用いている点に留意を要する。太陽光発電 (PV) の場合であれば、技術的ポテンシャルの  $98\%$  は集中発電所型の太陽光発電 (PV) プラントであり、太陽光発電 (PV) 普及に適した土地面積は平均で世界全体の  $1.67\%$  と想定している。集光型太陽熱発電 (CSP) の場合、直達日照強度 (DNI) が高い土地面積すべて (最低直達日照強度  $2,000\text{kWh/m}^2/\text{年}$  ( $7,200\text{MJ/m}^2/\text{年}$ )) が適切として定義され、この土地のちょうど  $20\%$  がその他の使用として除外された。結果として生ずる 2050 年の技術的ポテンシャルは、太陽光発電 (PV) が  $1,689\text{EJ/年}$ 、集光型太陽熱発電 (CSP) が  $8,043\text{EJ/年}$  である。

Krewitt et al. (2009) が評価を行った太陽光発電 (PV) の研究 (Hofman et al., 2002; Hoogwijk, 2004; de Vries et al., 2007) 及び集光型太陽熱発電 (CSP) の研究 (Hofman et al., 2002; Trieb, 2005; Trieb et al., 2009a) を分析すると、技術的ポテンシャルはこれらの研究間で大幅に異なり、太陽光発電 (PV) の場合は  $1,338\sim 14,778\text{EJ/年}$ 、集光型太陽熱発電 (CSP) の場合は  $248\sim 10,791\text{EJ/年}$  である。研究間の主な相違は、割り当てた土地面積の使用可能性や、ある程度は使用される電力の転換効率の差異から生ずる。

加熱目的の太陽エネルギーの技術的ポテンシャルは莫大で評価が難しい。普及ポテンシャルは主に熱の需要で制限される。このため、技術的ポテンシャルは、Krewitt et al. (2009) が言及した REN21 (Hoogwijk and Graus, 2008)

を除いては、文献的に評価されていない。参考までに、REN21 は、Hoogwijk (2004) に基づき太陽光発電 (PV) 用途に使用可能な屋上面積を想定し、各地域の放射を採用することで、温水加熱の技術的ポテンシャルをおおまかに評価したものである。このため、REN21 の範囲は下限のみである。

### 3.2.2 地域の技術的ポテンシャル

表 3.1 は、異なる地域における太陽エネルギーの技術的ポテンシャル全体の推定範囲の最小値と最大値を示している。太陽放射が二次エネルギー形態に転換し得る方法は区別していない。最小値の推定の場合、晴天時、晴天度 (sky clearance)、及び太陽集光器を設置する使用可能な土地利用について、それぞれの最低年間放射が想定されている。最大値の場合、晴天時の照射と晴天度のそれぞれの最大年間放射が、最大の土地利用の想定とともに適用される。表 3.1 はまた、世界の太陽エネルギーの技術的ポテンシャルは、現在の一次エネルギー消費よりかなり大きいと示している。

**表 3.1: 世界の異なる地域における太陽エネルギーの年間の全体技術的ポテンシャル。変換技術は区別していない (Rogner et al., 2000; その表 5.19)。**

地域	推定値の範囲	
	最低値 (EJ)	最大値 (EJ)
北アメリカ	181	7,410
ラテンアメリカ及びカリブ海	113	3,385
西ヨーロッパ	25	914
中央ヨーロッパ及び東ヨーロッパ	4	154
旧ソビエト連邦	199	8,655
中東及び北アフリカ	412	11,060
サハラ以南のアフリカ	372	9,528
太平洋アジア	41	994
南アジア	39	1,339
中央計画経済アジア	116	4,135
太平洋 OECD	73	2,263
合計	<b>1,575</b>	<b>49,837</b>
2008 年の一次エネルギー供給 (492EJ) に対する技術的ポテンシャルの割合	3.2	101

注:太陽エネルギーの技術的ポテンシャルの最小値と最大値を評価する際に使用された基本的想定は、Rogner et al. (2000) による。

- ・ 晴天時の年間最低放射は、集光器の水平面 (horizontal collector plane) に関連し、晴天時の年間最大放射は二軸追尾式の集光器面 (two-axis-tracking collector plane) に関連する。WEC (1994) の表 2.2 参照。
- ・ 晴天度の年間最大値と年間最小値は、関連する緯度を対象に想定した。WEC (1994) の表 2.2 参照。

### 3.2.3 太陽放射データの出典

建物や発電プラントなど、太陽エネルギーシステムのエネルギー出力と経済的実現可能性を計算し最適化するには、太陽利用設備の場所で測定した詳細な太陽放射データが必要である。このため、世界全体で使用可能な太陽エネルギーだけでなく、雲を含む空からの直達光及び散乱光という 2 つの主要な要素の相対的な規模を把握することが不可欠である。さらに、地表やその他の表面からの反射により受け取った放射の量も計算しなければならない場合もある。太陽放射の測定方法と計算方法の詳細については、*Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (WMO, 2008) で確認可能である。季節による使用可能性のパターン、放射の変動性、オンサイトの日中の温度も重要である。世界の様々な部分で地域の気象状況は経年の変動性が大きいことから、こうした測定は、様々な用途で十分に統計的妥当性を提供出来るよう、数年かけて行われなければならない。

太陽放射の高密度な地表測定が適切に維持されている地域では、これらの高度な測定網で地域の太陽放射の正確な情報を提供すると予測出来る。しかしながら、世界の多くの場所では、地表測定地は不適切である (中央アジア、北アフリカ、メキシコ、ブラジル、中部南アメリカなど)。これらの地域では衛星による測定が主な情報源であるが、その正確性は、運転保守が良好で較正された地上での測定に比べ、本質的に劣る。このため、衛星による放射測定結果は、正確な地上の測定と比較し、妥当性を確認する必要がある (Baseline Surface Radiation Network など)。現在、地表の太陽放射は地域規模で約  $15\text{W/m}^2$  の正確さと推定されている (ISCCP Data Products, 2006)。Satellite Application Facility on Climate Monitoring プロジェクトは、ドイツ気象庁のリーダーシップのもと、フィンランド、ベルギー、オランダ、スウェーデン、及びスイスの各国気象庁のパートナーシップで、衛星測定で収集された放射

データの方法論を開発している。

様々な国際機関や国家機関が太陽エネルギー資源の情報を発信している。これらの機関には、World Radiation Data Centre (ロシア)、国立再生可能エネルギー研究所 (アメリカ)、航空宇宙局 (NASA, アメリカ)、Brasilian Spatial Institute (ブラジル)、ドイツ航空宇宙研究センター (ドイツ)、Bureau of Meteorology Research Centre (オーストラリア)、Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (スペイン)、各国の気象庁、及び一部の営利企業がある。表 3.2 で示された一部の国際プロジェクトや国家プロジェクトでは、地表の太陽放射資源に関する情報を収集、加工、及び保存し、その後、理解しやすい品質測定法で容易にアクセス出来る形式で配布している

**表 3.2: 地表の太陽放射資源に関する情報を収集、加工、及び保存している国際プロジェクトや国家プロジェクト**

使用可能なデータセット	対応機関
各国の気象庁が提供した 1964～2009 年の 1,280 か所の地表の太陽放射。	World Radiation Data Centre, ロシア連邦サンクト・ペテルブルク (wrdc.mgo.rssi.ru)
<i>National Solar Radiation Database</i> : 1991～2005 年の 1,454 か所の地表の観測地を含む。1998～2005 年の衛星モデルの太陽熱データ (測定範囲 10km)。集光器の太陽エネルギー資源を決定するため、1 時間ごとの太陽熱データの値を使用可能。	国立再生可能エネルギー研究所、アメリカ (www.nrel.gov)
<i>European Solar Radiation Database</i> : 太陽熱工学に必要なその他の気象データで補完した太陽放射測定を含む。METEOSAT が収集した衛星画像が、空間的補正の精度向上の一因に。標準年 (Test Reference Years) も含まれていた。	欧州委員会、ヨーロッパ諸国の気象庁と科学機関の支援
<i>Solar Radiation Atlas of Africa</i> : ヨーロッパ、小アジア、及びアフリカの地表放射の情報を含む。1985～1986 年のデータは METEOSAT 2 の測定より取得した。	欧州委員会の支援
<i>The solar data set for Africa</i> : METEOSAT が収集し Heliosat-2 の方法で加工した画像に基づく。期間は 1985～2004 年で、地表の太陽放射で補完されている。	パリ国立高等鉱業学校、フランス
標準年気象 (標準年) のデータセット。長期 (最長 30 年) のデータセットにおける個々の気象観測から取得された、1 時間ごとの太陽放射と気象パラメータからなる。1 時間ごとのデータの標準年を設定する。加熱、冷却システムや大規模な太陽熱発電プラントの設計者が使用。	国立再生可能エネルギー研究所、アメリカ。米国海洋大気庁の国立気候データセンター、アメリカ (www.ncdc.noaa.gov)。
太陽エネルギー用途向けの太陽放射データ。Task36 では、地表の太陽放射資源に関する情報を、理解しやすい品質測定法で容易にアクセス出来る形式を用いて、幅広いユーザに配布している。地表と衛星のプラットフォームから取得した太陽エネルギー資源の情報の開発、評価、及びアクセスに注力している。	国際エネルギー機関 (IEA) の Solar Heating and Cooling Programme (SHC) (swera.unep.net)。
<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)</i> プロジェクト。再生可能エネルギーの開発を刺激する情報ツールの開発を目的とする。SWERA は、ユーザが容易にアクセス出来る品質の高い再生可能エネルギー源の情報とデータを提供する。ラテンアメリカ、カリブ、アフリカ、及びアジアの開発途上国 13 か国の主要地域を対象とする。衛星と地表の観測で、以前使用可能だった解像度に比べてより優れた空間規模の解像度で、様々な太陽エネルギーのデータセットと地図を作成した。	地球環境ファシリティ後援プロジェクト。国連環境計画 (swera.unep.net)

### 3.2.4 気候変動が資源ポテンシャルに与える潜在的な影響

大気中の温室効果ガス (GHG) 増加による気候変動は、大気の水蒸気量、雲量、降雨、及び濁度に影響を与えるだろう。そして、これにより、世界の様々な地域で太陽エネルギーの資源ポテンシャルに影響が出る可能性がある。主な気候変数 (雲量や地表の太陽放射など) の変化は、気候モデルの使用や 21 世紀の人為的強制の考慮を行いつつ、評価されている (Meehl et al., 2007; Meleshko et al., 2008)。これらの研究では、月平均の世界の太陽放射の変動パターンは、世界の一部の地域では 1% を超えず、またモデル間で異なることが分かった。現在、世界規模の地球温暖化が地域の太陽エネルギー資源に大幅な影響を与えると示す証拠は、他にない。地球薄暮化 (global dimming) や地球明化 (global brightening) に関する一部の研究では、放射に影響を与える可能性が示されているが、現在のところ証拠は一切入手出来ない。パターン変化の不確実性は、地球の大規模な地域であっても、かなり大きいと思われる。

### 3.3 技術及び用途

本節では、様々な太陽利用技術の技術上の課題について、パッシブ太陽熱と採光、アクティブ加熱・冷却、太陽光発電 (PV)、集光型太陽熱発電 (CSP)、及びソーラー燃料生産のカテゴリ別に論じる。各節とも、これらの技術の用途も扱う。

#### 3.3.1 パッシブ太陽利用技術及び採光技術

パッシブ太陽利用エネルギー技術は太陽エネルギーを吸収、貯蔵し、機械的な要素 (ファンなど) を使用せずに自然な方法 (自然換気など) で分配する (Hernandez Gonzalez, 1996)。「パッシブ太陽利用建築物」という用語は、日射取得を大幅に活用する建物を定量化した言葉で、ここでは、放射、伝導、対流の自然なエネルギー・フローに基づき暖房のエネルギー消費を削減している建物を指す。「パッシブ建築物」という用語は、加熱と冷却の双方におけるパッシブなエネルギー・フローの使用 (吸収した直接的太陽熱の再分配と夜間冷却など) を強調するために使用されることが多い (Athienitis and Santamouris, 2002)。

採光技術は主にパッシブで、窓、天窗、日よけ、及び反射装置などがある。世界的な傾向として、特に技術的に進んだ地域では、パッシブなシステムとアクティブなシステムの併用が増えている。この例として、ソーラーハウスでパッシブな太陽利用を再分配する強制換気システム、オフィス建物の採光活用を最適化する自動制御の日よけなどがある (Tzempelikos et al., 2010)。

パッシブ太陽エネルギー設計の基本要素は、窓、温室と (太陽エネルギー取得と採光のための) その他のグレーズされた空間、サーマルマス、保護要素、及び反射鏡である (Ralegaonkar and Gupta, 2010)。これらの基本要素を組み合わせることで、様々なシステムが実現出来る。たとえば、直接取得 (direct-gain) システム (窓使用と壁を組み合わせたエネルギー貯蔵可能、ソーラーチムニー、風塔 (wind catcher))、間接取得 (indirect-gain) システム (トロンブ壁など)、混合取得システム (直接取得システムと間接取得システムの組み合わせ。温室、日光浴室、グリーンハウスなど)、及び個別取得システムである。パッシブ技術は建物と統合され、以下の要素を含む場合がある。

- ・ 窓の中でも、高い太陽透過率と熱耐力があり、太陽に可能な限り近く面するものは、直接日射取得を居住空間に最大限取り入れつつ、暖房シーズンの窓による熱損失と冷房シーズンの熱取得を低下させる。天窗も、オフィス建物やサンルーム・日光浴室で頻繁に使用される。
- ・ 建物一体型の蓄熱は一般にサーマルマス (熱質量) と呼ばれ、コンクリートやレンガ素材を使用した顕熱蓄熱、相変化物質を使用した潜熱蓄熱がある (Mehling and Cabeza, 2008)。蓄熱で最も普及しているのは、サーマルマスが居住空間に適切に分配され、直接日射取得を吸収する直接取得システムである。貯蔵は、2つの不可欠な機能を果たすことから、特に重要である。吸収した直接的太陽エネルギーの大部分を蓄熱し、ゆっくり放出する。作動する (有効な) 室温で最大限の上昇を制限することにより、快適な熱状況を維持する (ASHRAE, 2009)。もう1つの方法として、トロンブ壁と呼ばれる集光器兼蓄熱壁を使用する場合がある。この壁では、サーマルマスが直接グレーディングのそばに置かれ、壁の空洞と部屋の間で空気が循環出来る。しかしながら、トロンブ壁は、窓割りを通じて屋外の環境に対する美観を損なうことから、受容性があまりない。アクティブ・チャージとパッシブ熱放出を併用したハイブリッド型の蓄熱も、ソーラー建築物の一部で展開でき、直接取得の質量も使用される (EcoTerra 実証ハウス, 図 3.2a など参照。建物と一体型の太陽光・熱システムから換気されたコンクリート・スラブに、太陽で加熱した空気を使用する)。窓割りシステムまたは日光浴室とパッシブに併用した単独の蓄熱も、パッシブ設計の別の選択肢である。
- ・ 気候条件に適し、しっかり断熱された半透明の外皮も、屋外環境への熱伝達や屋外環境からの熱伝達を低下させるために使用出来る。大半の気候では、こうしたエネルギー効率化の側面をパッシブ設計に統合しなければならない。半透明の外皮と併用出来る太陽エネルギー技術は、サーマルマスと透明断熱材 (Hollands et al., 2001) を組み合わせる方法で、壁に日射取得を貯蔵し、エネルギー的にプラスな要素に変換する。
- ・ 採光技術と新型の太陽エネルギー制御システムには、自動制御日よけ (内部、外部) や固定の日よけ装置などがあり、特に職場の採光用途に適している (図 3.2b)。これらの技術には、エレクトロクロミック・コーティングやサーモクロミック・コーティング、パッシブな採光透過機能に加えて発電にも対応する透明太陽光など、より新しい技術がある。採光は、エネルギー貯蔵とパッシブ太陽エネルギー設計を組み合わせたものである。その目的は、利用可能な自然の採光を最大限活用することにある。既存技術として、すべての部屋と廊下に太陽光が入る奥行きが浅い設計 (shallow-plan design)、建物中央の光井、天窗、室内の奥まで光が達する背の高い窓、建物内部全体の照明ではなく職場で直接使用する作業照明、部屋の表面を明るくしてまぶしさを減らす出窓 (deep window) などがある (Everett, 1996)。
- ・ 日光浴室とも呼ばれるサンルームは、大半の表面が透明で窓割りからなる、直接取得パッシブ太陽エネルギー

ギーシステムの特異な事例である。サンルームは、既存の家屋の改良の選択肢としても、新しい建物の不可欠な部分としても、魅力が高まっている (Athienitis and Santamouris, 2002)。この成長の主な駆動要因は、エネルギー効率の良い新型のグレーディングの開発である。

建物でのパッシブ太陽エネルギー暖房使用の最適化にあたり、いくつかの基本原則がある。建物は全体的な熱損失を減らすために、しっかり断熱するべきであり、応答性と効率の良い暖房システムを備えるべきである。そして、赤道に面するべきである。これはつまり、グレーディングを赤道面に集中させ、主要な居室を、浴室などを反対側に配置するべきという意味である。真冬に必要な不可欠となる太陽のメリットを得るため、他の建物の陰にならないようにするべきで、夏季と冬季の一定の晴天日の過熱を防ぐために「熱的に質量 (thermally massive)」であるべきである (Everett, 1996)。

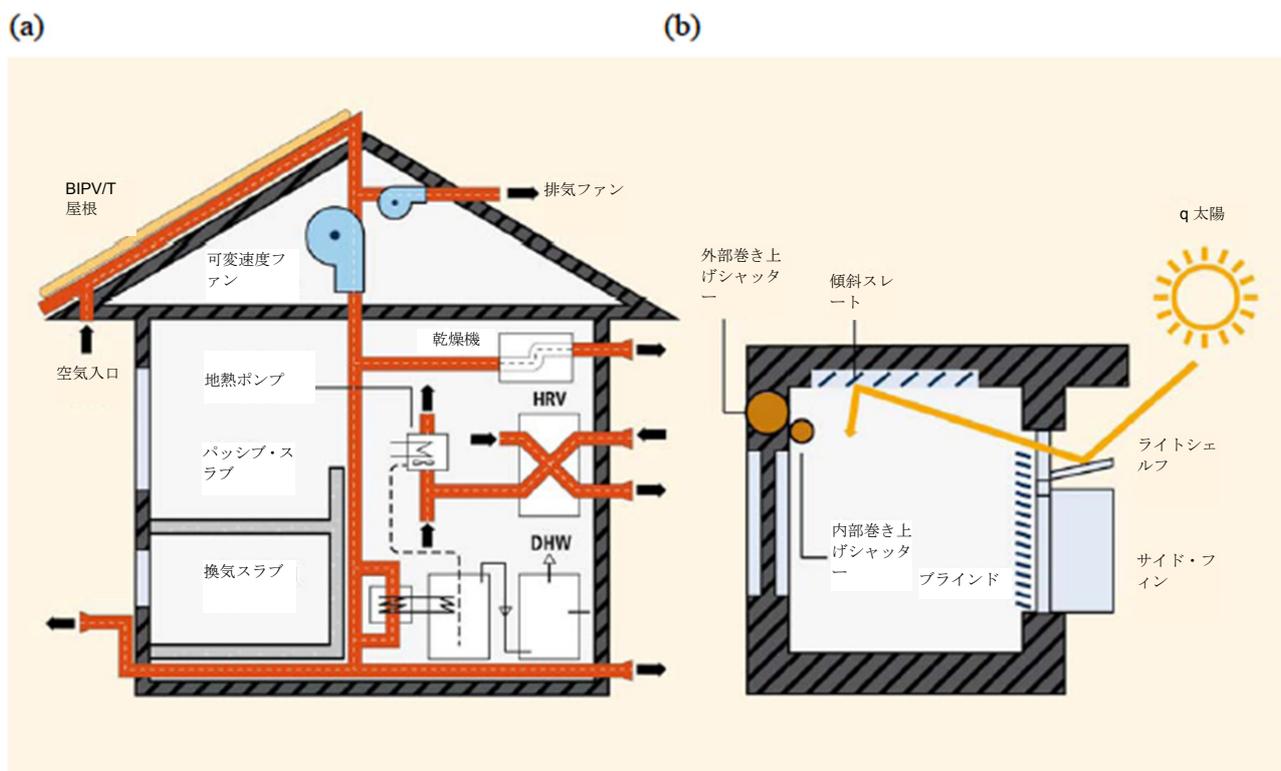


図 3.2: (a) 家屋に組み込まれたサーマルマス配置とパッシブ・アクティブ・システムの構造。太陽で加熱された空気は、建物と一体型の太陽光・熱 (BIPV/T) 屋根が、換気スラブか、または熱交換器を通じた家庭用温水 (DHW) を加熱する。HRV は熱回収換気装置である。(b) オフィス内部空間に採光を再分配するために設計された、いくつかの採光コンセプトの構造。

明らかに、パッシブ技術は建物自体と切り離せない。このため、パッシブ日射取得の貢献を推定するときは、以下を区別する必要がある。1) パッシブシステムを使用して直接日射取得を活かすために特殊な設計がなされた建物 (ここではソーラー建築物と定義)、及び 2) ほぼ太陽に面した窓を通じて日射取得を活かす建物。この方向性は設計によるよりも偶発の産物によることが多い。住居用建物へのパッシブ設計適用については、信頼出来る統計はほぼ入手不可能である。さらに、パッシブな日射取得の貢献は、既存の国家的統計で見逃されている。パッシブ太陽熱は、その需要は低下しつつあり、サプライチェーンの一部でもない。このため、エネルギー統計で検討される事柄である。

パッシブ太陽エネルギー設計のプロセス自体が急速な変化期に入っている。変化を牽引するのは、手頃になりつつある新たな技術である。これは、最近使用可能になった高効率な窓割りなどで、通常のグレーディングと同程度の価格である。たとえば、カナダでは現在、低放射率でアルゴン充填の二重グレーディング窓が主なグレーディング技術として使用されているが、数年前までは、このグレーディングは一般の二重グレーディングに比べ約 20~40%割高だった。これらの窓は現在、既存の住宅の改造にも使用されており、多くの住宅でも改造中にサンルームを増築している。新しいグレーディング技術と太陽エネルギー制御システムで、以前に比べ、より窓面積の広い設計が可能になっている。

大半の気候では、効率の良い日射取得制御が行われない限り、夏季には空間を冷却する必要があるだろう。しかしながら、機械的な冷却の必要性はパッシブ冷却の設計でなくなる場合も多いだろう。パッシブ冷却技術のベースは、熱と太陽エネルギーを遮る技術、サーマルマスへの蓄熱、及び熱放散技術である。パッシブ太陽エネルギーと

エネルギーの貯蔵技術による貢献は、気候に大幅に左右される (UNEP, 2007)。日射取得制御は特に、いくらかの暖房が必要になりそうな「ショルダー」シーズン中は重要である。広い窓面積を適用するにあたり、高い熱耐性で可能になるが、熱と外観の双方を考慮するうえで、アクティブな日射取得制御がソーラー建築物で重要になる。

二酸化炭素排出削減におけるパッシブ太陽エネルギー冷房のポテンシャルが、最近示された (Cabeza et al., 2010; Castell et al., 2010)。実験研究で、適切な断熱を行えば、暑い季節に建物の冷房需要が最大 50%低下することが実証されている。さらに、断熱済みの建物外皮の相変化物質など、こうした建物のエネルギー需要を最大でさらに 15%低下させることが出来る。つまり、相変化物質を使用しない断熱建物に比べてエネルギー消費が減少することから、二酸化炭素排出の約 1~1.5kg/年/m<sup>2</sup>がこれらの建物で削減される。

パッシブ太陽エネルギーシステムの用途は主に、直接取得の種別のものだが、さらに以下の主な用途カテゴリに細分化出来る。複数階の住居用建物と 2 階建てか一棟二軒のソーラー住宅 (図 3.2a 参照) で、赤道に面した広いファサードを作るため設計され、これにより太陽エネルギーの回収面積を広くするポテンシャルを与えられる (Athienitis, 2008)。オフィス建物のペリメーターゾーンとその窓割りシステムは、採光パフォーマンスに基づき事前に設計される。この用途の場合は通常、冷却負荷を低下させることに重点が置かれるが、パッシブな熱取得は暖房シーズンにも望ましいかもしれない (日よけ装置の構造を示した図 3.2b 参照)。

それに加え、住居用建物または商用建物は、年間を通じた採光と暖房シーズンの直接日射取得に使用する設計だけでなく、冷却か新鮮な空気供給のために、自然かハイブリッドの換気システムと技術を使用する設計になる場合がある。これらの建物は、機械と自然双方の換気プロセスを活用するハイブリッド換気技術を夜間使用することで、夏季の夜間の温度が低くなるだろう (Santamouris and Asimakopoulou, 1996; Voss et al., 2007)。

2010 年、パッシブ技術は、ゼロエネルギーのソーラー住宅の設計で顕著な役割を果たした。これは、平均的な年におけるエネルギー消費よりも多く電力と熱エネルギーを生産する住宅である。これらの住宅は主に、現在 Solar Heating and Cooling (SHC) Programme の IEA Task 40 が協力する数か国の実証プロジェクトである (IEA, 2009b)。このプログラムは、建築物及びコミュニティシステムにおける省エネルギー研究開発計画 Annex 52 であり、ゼロエネルギーのソーラー建築物に注力している。パッシブ技術は、手頃なゼロエネルギー住宅の開発には不可欠である。パッシブ住宅基準 (Passive House Standard) に基づく住宅のパッシブ日射取得は、加熱負荷を約 40%削減すると予測される。拡大解釈すると、断熱効果の高い建物群にコミュニティ規模で系統的にパッシブ太陽エネルギー設計を取り入れ、最適な方向と住居形態を選べば、同様に 40%のエネルギー削減が簡単に実現出来るはずである。ヨーロッパでは、建築物のエネルギー性能に関する指令 2010/31/EC (欧州議会及び欧州連合理事会, 2010) に従い、新たな建物はすべて 2020 年 12 月 31 日までに、ほぼゼロエネルギーにする義務がある一方、EU 加盟国は 2015 年の中間目標を設定するべきである。国家機関が入居、所有する新たな建物は、2018 年 12 月 31 日以降はほぼゼロエネルギーにする必要がある。必要なエネルギーをほぼゼロまたは非常に低量にするには、相当のレベルで再生可能エネルギー源 (コジェネレーションを使用したオンサイトのエネルギー生産、または地域暖房か地域冷房) を使用し、その需要の大半を満たすことになるはずである。建物をほぼゼロエネルギーに改修する動きを刺激するため、措置も実施されるべきである。

低エネルギーの建物は様々な名称で知られている。Concerted Action Energy Performance of Buildings (EPBD) の調査では、ヨーロッパ全体でこうした建物の名称が 17 個あることが分かった。これらには、たとえば、低エネルギー住宅、高性能住宅、パッシブ住宅 (「Passivhaus」)、炭素ゼロ住宅、エネルギーゼロ住宅、エネルギー節約住宅、エネルギー的にプラスな (energy-positive) 住宅、3 リッター住宅などがある。エネルギー需要以上のパラメータを考慮するコンセプトでも、エコ建物またはグリーン建物といった特殊な名称を使用する。

別の IEA Annex である、蓄熱実施協定を通じた省エネルギー (ECES IA) Annex 23 が 2009 年 11 月に発効した (IEA ECES, 2004)。この Annex の一般的な目的は、エネルギー貯蔵技術を超低エネルギーな建物とコミュニティに適切に適用するようにすることである。エネルギー貯蔵を適切に適用すれば、持続可能な建築技術の見込みが高まると予測される。

パッシブ太陽エネルギーの別の用途は自然乾燥である。穀物やその他の多くの農産物は、昆虫や菌類のために使用不可能にならないよう、貯蔵前に乾燥させなければならない。この例として、小麦、米、コーヒー、コブラ (ココナツ・フレッシュ)、一定の果物と樹木が挙げられる (Twidell and Weir, 2006)。太陽エネルギーの乾燥機は主に、太陽熱の使用やその主要要素の配列によって異なる。木材、金属、ガラス板で作られた太陽エネルギー乾燥機は、集中的に評価され、あらゆる熱帯作物の乾燥に非常に広く用いられている (Imre, 2007)。

### 3.3.2 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却

アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却技術は、太陽と機械的要素を利用して加熱または冷却のいずれかを行う。これらの様々な技術と蓄熱技術などについて説明する。

### 3.3.2.1 太陽熱加熱

太陽エネルギー加熱システムにおいて、太陽熱集熱器は太陽放射を熱に変換し、分散媒（水、空気など）を用いて、必要な際に利用出来るよう断熱性の高い保管容器に送る。適切な形式の集熱器の選択に、最も重要な要素が2つあり、1つはその太陽熱集熱器に付随するサービス、もう1つは熱の分散媒の温度が望ましい範囲内にあるかどうかである。非グレーズド型集光器ともいわれる、むき出しの太陽熱集熱器は低温熱生産に限定される可能性が高い（Duffie and Beckman, 2006）。

太陽熱集熱器は様々な材料を多数取り入れ、多数の技術を用いて製造されている。この設計は、稼働時のシステム及び設置場所の気候条件に影響を受ける。

平板太陽熱集熱器は、住宅用の太陽熱による温水システム及び暖房システムに最も広く使われる太陽熱集熱器である。これらは暖房システムにも用いられる。一般的な平板太陽熱集熱器は吸収材、ヘッダ管及び上昇管を組み合わせたものまたは単独の蛇状管、透明なカバー、骨組みと断熱材で構成されている（図 3.3a）。水泳プール加熱など、低温機器に対しては、単板のみが吸収材として使用される（図 3.3b）。平板太陽熱集熱器は、高いコストパフォーマンスを見せ、様々な場所（屋上、屋根そのものの中、または屋根から離れた状態での取り付けなど）に取り付けられる可能性を示している。

真空管型集熱器は、通常、吸収材を含む透明なガラス製の管を平行に並べた形であり、ヘッダ管とつながっている（図 3.3c）。対流によるフレーム内の熱損失を減らすため、ポンプで空気を集熱管の外へ排出し、真空状態にする。これにより、高温状態を達成でき、冷却や産業への応用に有用となる。多くの真空管集熱器では、管の中に直接液体を通すのではなく、中心にヒートパイプを用いている。真空ヒートパイプは複数の真空ガラス管から成り、それぞれにヒートパイプに結合した吸収板が含まれている。ヒートパイプの高温側からの熱は、内部温水または温水循環式暖房システムの伝導流体に伝わる。

温水を作るのに使用される太陽熱温水システムは、パッシブまたはアクティブ太陽エネルギー温水器に分類される（Duffie and Beckman, 2006）。アクティブ太陽エネルギー利用冷却システムもメリットがあり、これは太陽エネルギーにより生成された温水を冷水に変える。

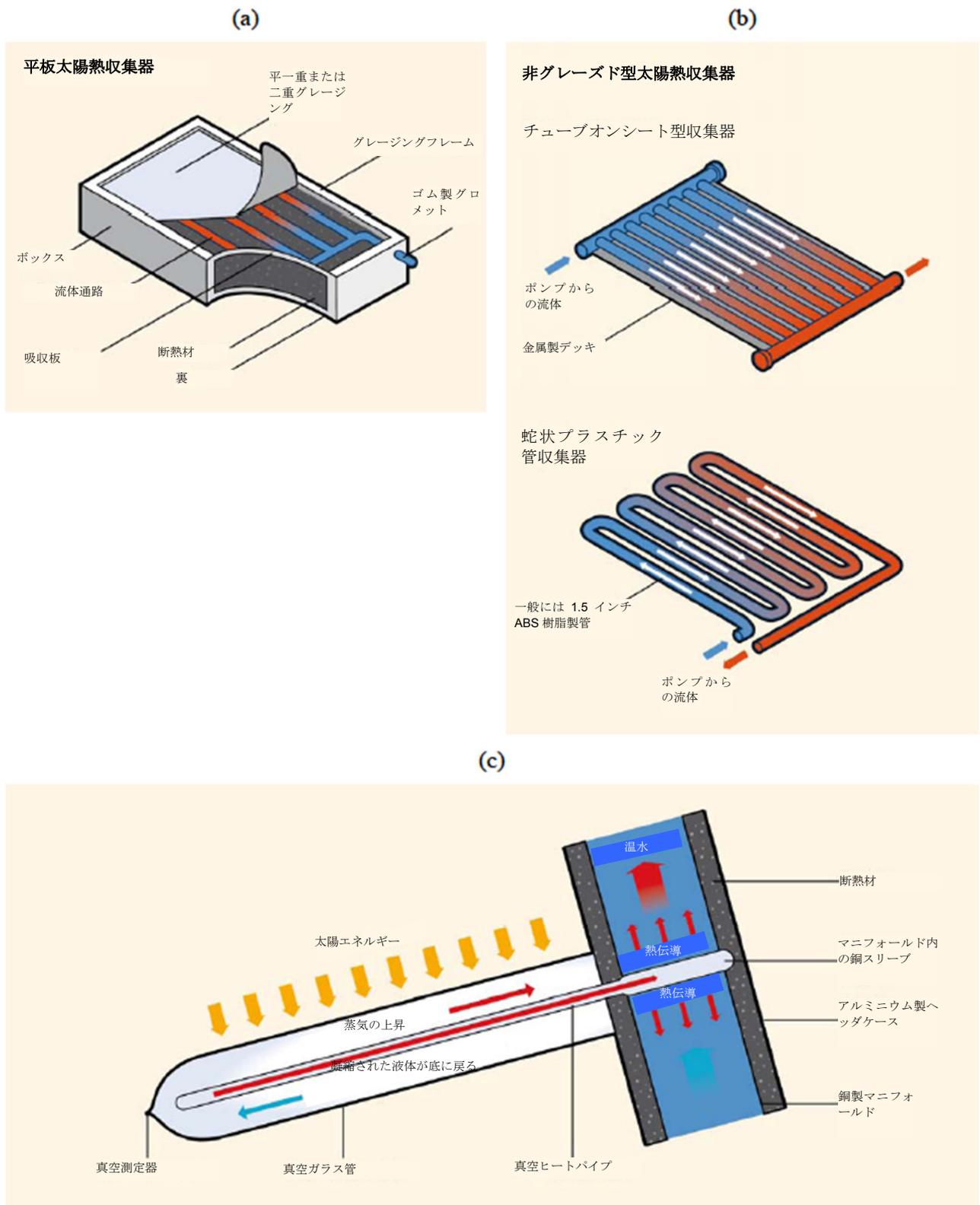


図 3.3: 太陽熱集熱器の概略図 (a) グレーズド型平板太陽熱集熱器、(b) 非グレーズド型のチューブオンシート型及び蛇状型プラスチック製管、及び (c) 真空管集熱器

パッシブ太陽温水器は2つの形式がある(図3.4)。統合集熱-蓄熱(ICS)、すなわち「バッチ」システムは断熱材を施したグレーズドボックス内に黒色容器または管を含む。冷水は太陽熱集熱器を通過する際に予熱され、同時に温水が標準のバックアップ温水器へと流れる。この温水は太陽集光器自体に貯蔵される。自然循環(TS)式において、個別の貯蔵容器は太陽熱集熱器の真上に位置している。直接(開放ループ)型自然循環式においては、温水は太陽熱集熱器から容器へと上昇し、容器からの冷水は太陽熱集熱器へと戻される。間接(密閉ループ)型自然循環式においては(図3.4a)、加熱された液体(通常はグリコール-水混合液)が外部容器へ上昇する。この外部容

器は太陽熱集熱器から水の貯蔵容器の周りにあり、飲料水と区別して、熱交換器（二重外壁熱交換器）として作用する。凍結温度になる可能性が低い気候においては、多くの太陽熱集熱器は太陽熱集熱器の上部に統合貯蔵容器を持つ。この設計は、個別に単独の熱交換器の容器を採用しているシステムと比べると、コスト的に、また使い勝手で多くのメリットがある。また、日中や夕方に大量の温水が必要となる家庭に適しているが、容器内の収集されたエネルギーの多くが一晩で失われてしまうことがあるので、主に早朝に汲み上げを行う家庭では、有効に機能しない。

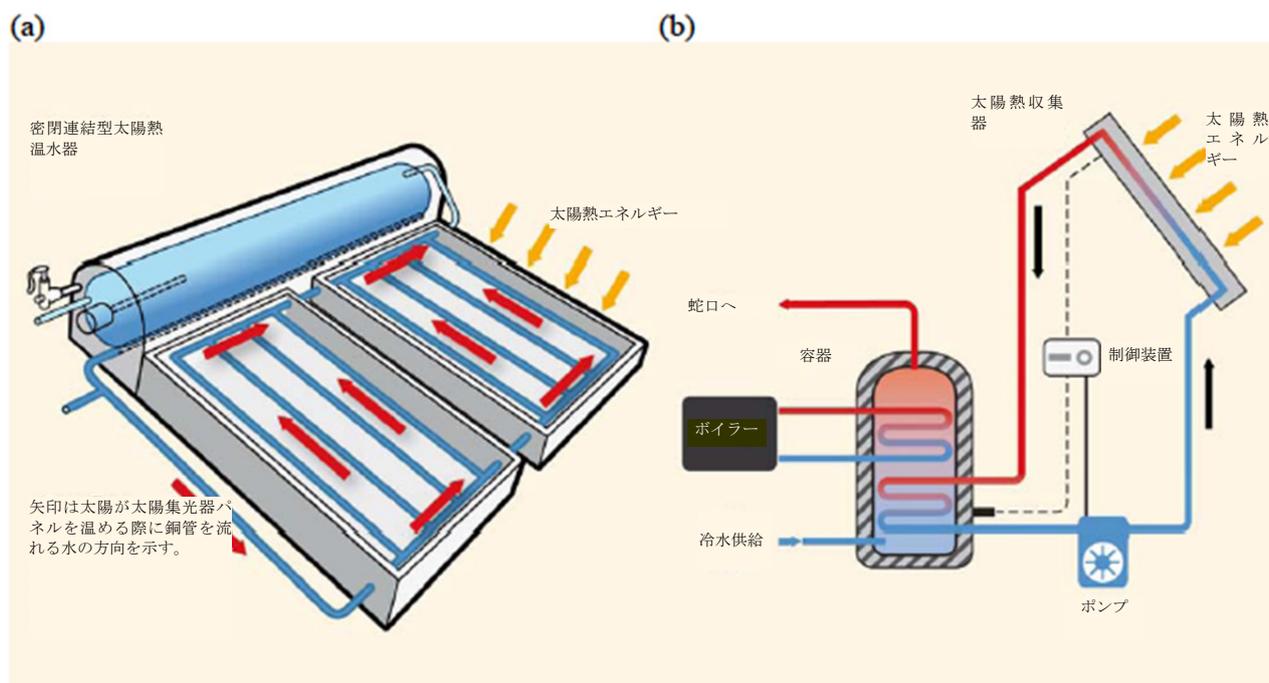


図 3.4: 一般的な太陽熱システムの概要図：(a) パッシブ式（自然循環式）、(b) アクティブ式

アクティブ太陽エネルギー温水器は、太陽熱集熱器を流れる分散媒を循環させる電気ポンプ及び制御装置に依存している。3種類のアクティブ太陽エネルギー温水システムが利用可能であり、直接循環システムは、太陽熱集熱器を直接通過する加圧飲料水を循環させるのにポンプを使用している。これらのシステムは長期にわたり凍結することがなく、硬水や酸性水ではない地域において適切である。凍結防止の間接循環式は熱伝達流体を、太陽熱集熱器を通して汲み上げる。この熱伝達流体は、通常グリコール-水混合液である。熱交換器は液体から使用する水へ熱を伝導させる（図 3.4b）。ドレインバック型間接循環式では、太陽熱集熱器にて水を循環させるのにポンプを使用している。寒冷期に凍結するリスクを排除するため、ポンプを停止する際には太陽熱集熱器や配管システムにたまった水を貯水容器へ排出する。このシステムは貯水容器への配管が常に下向きになるよう、注意深く設計・設置されなければならない。また、水容器の設計において、層別化が慎重に考慮されなければならない (Hadorn, 2005)。

太陽コンビスシステムは、普通の太陽熱集熱アレイより太陽熱による冷暖房及び温水の両方を提供するが、大抵は補助的な非太陽エネルギーの熱源をバックアップとして保有している (Weiss, 2003)。太陽コンビスシステムは個人不動産に設置されるものから、まとまった暖房・加熱システム (heating scheme) に数機を提供するものまで、様々な大きさのものがある。多種多様にわたる太陽コンビスシステムが生産されている。しかし、様々な国で様々なシステムが展開される傾向にあるため、特定の国の市場ではこのシステムは、より制限される可能性がある。設置されるコンビスシステムの大きさにより、年間暖房の貢献度は超低エネルギーのパッシブ住宅型建物において、10%から60%以上の範囲で変動し、大規模な季節蓄熱または集光型太陽熱暖房・加熱システム (concentrating solar thermal heat) を使用している場合は最大 100%までになる。

### 3.3.2.2 太陽熱利用冷却

太陽熱利用冷却は太陽熱発電による冷却、太陽熱を利用した冷却、及び太陽熱を利用したエアコンに大まかに分類出来る。1つ目の分類では、太陽熱発電による圧縮冷却は太陽光発電 (PV) パネルを利用し、従来型の冷却機に電力を送る (Fong et al., 2010)。2つ目の分類では、冷却効果は太陽熱を獲得することにより生み出され、一般的に、太陽熱を利用した機械的圧縮冷却、太陽熱を利用した吸収冷却、及び太陽熱を利用した吸着冷却の3つの選択肢が存在する。3つ目の分類では、調整空気は太陽熱を獲得し、乾式冷却を用いて直接提供される。シリカゲルなどの固体吸着材や塩化リチウムなどの液体吸着材が使用可能である。

太陽光発電 (PV) パネルからの給電による太陽発電エアコンは、非系統連系の機器がない場合において、システ

ム的な視点から少しの興味を持たれている (Henning, 2007)。これは整備された送電系統をもつ先進産業国において、公共送電網に発電した電力を供給することで、太陽光発電を最大まで利用出来るためである。

太陽熱エアコンは吸収式冷凍機に電力を送る太陽熱利用装置で構成され、それは建物の中で利用することが出来る (Henning, 2007)。このような技術の普及は低コスト・小規模電力の吸収式冷凍機の工業展開に大きく依存する。この技術は建物の太陽熱支援エアコンに関する IEA Task 25、太陽熱エアコンや冷却に関する SHC プログラム及び IEA Task 38、及び SHC プログラムにて研究されている。

これらのサイクルを用いる密閉型熱駆動冷却システムは何年も前から知られており、通常 100kW 以上の大規模発電に使用される。多くのシステムにて使用される物理的原理は吸着現象をもとにしている。2つの技術は温度制御された低温及び中温の冷却 (吸収及び吸着冷凍) を行うために確立されている。

開放型冷却サイクル (または乾燥冷却) システムは主に建物のエアコンにメリットがある。これらは固体または液体吸着剤を使用することが出来、開放型太陽熱支援冷却システムの核となる構成物は、脱湿装置である。そして、個体吸着材を使用するシステムの多くでは、この装置はデシカントホイールであり、シリカゲルや塩化リチウムなど様々な吸着素材が使用されている。他のシステム部品はすべて、空気処理装置を用いた標準的なエアコン機器の中で見られ、熱回収装置、熱交換器及び加湿器を含む。このように、液体吸着技術は明確に実証されている。

### 3.3.2.3 蓄熱

太陽熱システムにおける蓄熱は信頼性及び効率性を確保するのに重要な構成要素である。熱エネルギーの蓄熱技術は主に、(1) 顕熱蓄熱 (2) 潜熱蓄熱 (3) 吸着蓄熱 (4) 熱化学的蓄熱の 4つのタイプに区別される (Hadorn, 2005; Paksoy, 2007; Mehling and Cabeza, 2008; Dincer and Rosen, 2010)。

顕熱蓄熱システムは材料の加熱能力を利用する。市場に出回っているシステムの大部分は蓄熱に水を利用している。水蓄熱は数百ℓから数万立方メートルまでと、使用可能な容量の幅が広い。

潜熱蓄熱システムは、材料の相変化 (溶解または蒸発) の際に熱エネルギーを貯蔵する。温度範囲に依存するが、このタイプの蓄熱は水への蓄熱よりもコンパクトになる。溶解プロセスは、顕熱蓄熱の  $25 \text{ kWh/m}^3$  ( $90 \text{ MJ/m}^3$ ) と比較して、 $100 \text{ kWh/m}^3$  ( $360 \text{ MJ/m}^3$ ) 程度のエネルギー密度を持っている。現在の低温における潜熱蓄熱技術の多くは、熱性能を上げる建造物へ蓄熱、または冷蔵システムへ蓄熱する。中温の蓄熱では貯蔵素材に硝酸塩を用いる。100-kW 単位のパイロット蓄熱ユニットは現在、太陽熱により発生する蒸気を用いて稼働している。

吸着蓄熱システムは吸着材料に吸収される水蒸気を用いて材料に蓄熱する。この材料は固体 (吸着) または液体 (吸収) のいずれかである。この技術は、現在、その大部分が開発段階であるが、一部は市販されている。原則的に、吸着蓄熱の密度の高さは水中顕熱の 4 倍となっている。

熱化学蓄熱システムは吸熱化学反応にて蓄熱する。一部の化学物質では密度が水の 20 倍 ( $\Delta T \approx 100^\circ\text{C}$  の時) の熱を貯蔵するが、他の一般的化学物質では、蓄熱密度は 8 から 10 倍である。立証されている熱化学蓄熱システムは、ほとんどない。現在研究中の材料は無水及び水と形態で存在する塩である。T 熱化学システムはコンパクトな低温及び中温の蓄熱が可能である。蓄熱は 3.3.4 節により高温の集光型太陽熱発電の具体的な言及とともに説明されている。

地下の蓄熱システムは季節ごとの蓄熱のために使用され、以下に示す様々な技術を含む。地下利用を可能とする蓄熱技術で最も多く利用されているのは帯水層熱エネルギー蓄熱技術である。この技術は自然の地下層 (砂、砂岩、チョークなど) を熱または冷気を一時的に貯蔵する媒体として利用する。熱エネルギーの伝導はこの層から地下水を抽出し、付近の別の場所で水温を変えてその水を再注入することで実現する。多くの機器は巨大な事務所ビルの冷房及び工業工程の冷却に使用する冬季の冷気を蓄熱するのに使用される。帯水層蓄冷は、冷蔵に使用する電気料金を約 75%節約出来るので興味を引いており、多くの場合において、新たな投資への回収時期は 5 年未満である。この技術を応用するのに重要な条件は適切な地層が利用可能なことである。

### 3.3.2.4 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却の応用

アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却の応用において、生成される温水の量はシステムの型式及び大きさ、設置場所の日照の程度、季節ごとの温水必要量パターン、及びシステムの設置の特徴に依存する (Norton, 2001)。

工業過程に対する太陽熱加熱技術は 2010 年現在、開発のごく初期段階である (POSHIP, 2001)。世界では、100 例未満の稼働中のプロセス熱の太陽熱システムが報告されており、その能力合計は  $24 \text{ MW}_t$  ( $34,000 \text{ m}^2$ 、熱集熱器面積) である。その多くは実験段階であり、比較的小規模である。しかし、EU27 か国でのエネルギー需要全体の 28%は産業部門に由来し、その需要の多くは  $250^\circ\text{C}$  未満の熱に対するもののため、市場及び技術開発に大きなポテ

ンシャルが存在する。この技術の普及には、教育や知識の普及が必要である。

短期間においては、製造プロセスの太陽エネルギー利用加熱は主に 20°C から 100°C の範囲の低温過程に使用されるようになる。そして、技術開発により、市場での 250°C までの中温への応用数が増加していく。Werner (2006) によると、工業の熱需要のおよそ 30% が 100°C 未満の温度で必要とされており、現在の技術を用いた太陽熱加熱と理論的に一致するといえる。この需要の約 57% が 400°C 未満の温度で必要とされており、予知出来る将来において太陽熱により幅広く供給されると思われる。

食品、ワイン・飲料、輸送装置、機械、繊維製品、及びパルプ・紙などのいくつかの特有な工業部門において、低温及び中温 (250°C 未満) における熱需要の割合はおよそ 60% である (POSHIP, 2001)。太陽熱加熱を伴うこの低温及び中温における熱需要の活用により、工業エネルギーの要求に対し太陽熱が貢献出来る大きな機会が与えられるだろう。太陽エネルギーシステムが化学産業及び洗浄プロセスに貢献する十分な機会もある。

製造プロセスにおいて、脱塩及び水処理 (殺菌など) は特に太陽熱エネルギーの応用が期待出来るが、これはこれらのプロセスが中温熱を多量に必要とし、日射が強くエネルギーコストの高い地域においてしばしば必要となるからである。

一部のプロセス熱の応用は「普通の」低温 (30 から 80°C) 熱集熱器によりもたらされる温度により実現出来る。しかし、製造プロセス熱の需要の大部分は、80 から 250°C までの温度を必要とする。

プロセス熱集熱器は、太陽熱集熱器の別の可能性のある応用である。一般に、これらのシステムは高い能力 (つまり、広大な熱収集面積)、低コスト、及び高い信頼性と品質を必要とする。低温及び高温太陽熱集熱器はダイナミックに成長する市場に出回っているが、プロセス熱集熱器は開発のごく初期段階であり、工業規模にて使用出来る状態の製品はない。「集光」太陽熱集熱器に加え、二重及び三重グレージングを持つ改善された平板太陽熱集熱器は現在開発中である。これは、最大 120°C までの範囲のプロセス熱のニーズを満たすだろう。集光型太陽熱集熱器については 3.3.4 節にて詳しく説明する。

太陽エネルギー利用冷却はたとえば、ワクチンの冷蔵保存に使用される。このシステムは、送電系統のない発展途上国の地方コミュニティの地方医療センターに最も必要とされる。

太陽エネルギー冷却は限られた地域での太陽熱技術の応用である。高効率の平板、真空管または放物曲面型トラフ型太陽熱発電は、冷却を行う吸収サイクルを制御するのに使用することが出来る。より高い成績係数 (COP) を目指すため、低い集光レベルの太陽熱集熱器は二重効果の吸収サイクルで必要な温度 (約 250°C まで) を提供する。太陽熱エネルギーと冷却のニーズは自然に一致する。

主要源を熱とする太陽熱エネルギーを利用した、多数の熱駆動の密閉型冷却システムが製造されている。これらのシステムは、最大数百 kW の大規模な冷却能力を持っていることが多い。2000 年代初頭以降、多くのシステムが 100kW 未満、特に最小 4.5kW から 20kW 未満の小規模冷却能力の範囲で開発されている。小規模システムは単一効果を持つ様々な形式の機器であり、主に住宅や小規模な商業用途にて用いられている。

開放型冷却サイクルは一般に建物内のエアコンに使用されるが、熱駆動の密閉型冷却サイクルはエアコンと工業用冷却の両方に使用することが出来る。

その他の太陽熱の機器を以下に挙げる。太陽エネルギーを用いた飲用水の生成は遠隔地または隔てられた地域においてすすんで導入されてきた (Narayan et al., 2010)。太陽熱はまだ、世界の一部 (プエルトリコなど) にて 10 人までの家庭への水供給に広く使用されている (Khanna et al., 2008)。適切な隔離状態下において、太陽熱による解毒は低汚染廃棄物を低コストで処理出来る (Gumy et al., 2006)。多重効果加湿 (Multiple-effect humidification) (MEH) 脱塩装置は間接的に、熱を分離する気密コンテナ内部にて蒸発及び濃縮を引き起こす効率の高い太陽熱集熱器からの熱を利用している。多重効果加湿システムは現在、市場に出回り始めている。集光型太陽熱発電 (CSP) による塩水脱塩 (DLR, 2007) の報告書及び SolarPACES Task VI (SolarPACES, 2009b) の説明も参照すること。

太陽熱乾燥において、太陽エネルギーは必要な熱の単独源または補助源のどちらかとして利用され、気流は強制的または自由 (自然) 対流のいずれかにて生み出される (Fudholi et al., 2010)。太陽熱を利用した調理は、発展途上国で最も広く用いられている太陽熱の応用の 1 つであるが (Lahkar and Samdarshi, 2010)、他の調理法に比べ総合的な普及に限りがあるため、いまだ大量生産段階の初期にとどまっていると考えられている。太陽熱を利用した調理器具は、そのエネルギー源として太陽光を利用するため、燃料もいらず、運用コストもゼロである。また、信頼性の高い太陽熱を利用した調理器具は一般的な材料より素早く簡単に製造することが出来る。

### 3.3.3 太陽光発電

太陽光発電 (PV) 技術は太陽光の効果を十分に活用して発電する。シリコン (Si) などの半導体に照射すると、pn 接合として知られる接触面のどちらかの側面の半導体に特殊な不純物を取り入れることで発生する内部電界により、空間的に切り離される電子正孔対が発生する。その結果、接触面の片側に負電荷を、反対側に正電荷を発生させる (図 3.5)。その結果、接触面の片側に負電荷を、反対側に正電荷を発生させる。この結果生じる電荷分離によって電圧が発生する。そして、光照射された電池の両側が電気機器に接続されると、電流が装置の片側から電気機器を通して電池の反対側に流れ、電力が発生するその結果の電荷分離により、電圧が発生する。照射された太陽電池の両側に電気機器を接続した場合、電流が電気機器を経由して装置の片方から電池のもう一方へと流れる。太陽電池の変換効率は、入射太陽放射に対する単位面積 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) 当たりの太陽電池からの出力の比率と定義されている。太陽電池の最大の潜在的効率は吸収材の材料特性や装置設計によって決まる。太陽電池の効率を向上させる技術の 1 つは、多くの太陽スペクトルを集めることが出来る特別に選択された吸収材を積み重ねる多接合法を利用するものである。この吸収材はそれぞれ、異なる波長の太陽からの光を集めることが出来る。

太陽電池 (PV) は有機または無機物質にて構成される。無機電池はシリコンまたは非シリコン材をベースにしている。これらはウェハ・ベース電池または薄膜電池に分類される。ウェハ・ベースのシリコンは単結晶及び多結晶 (multi-crystalline) (“polycrystalline”と呼ばれる場合もある) の 2 つに分類される。

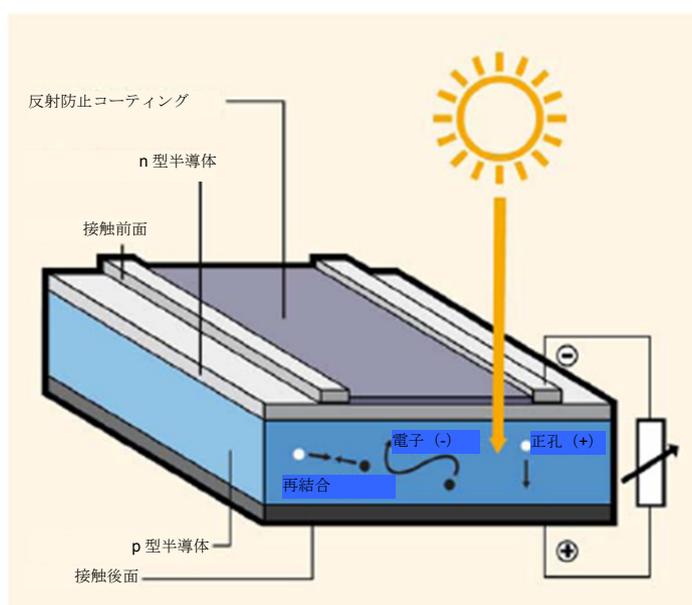


図 3.5: 照射された太陽電池の動きを示す一般的な断面図

#### 3.3.3.1 現在の太陽発電技術

現在の太陽光発電 (PV) 技術にはウェハ・ベース結晶シリコン (c-Si) 電池に加え、銅インジウム・硫化ガリウム・ジセレンド ( $\text{CuInGaSe}_2$ , CIGS) をベースとする薄膜電池、カドミウムテルル ( $\text{CdTe}$ ) をベースとする薄膜電池、薄膜シリコン (アモルフ単結晶・微結晶) をベースとする薄膜電池がある。単ないし多結晶シリコン・ウェハ太陽光発電 (PV) (リボン技術を含む) は、太陽光発電 (PV) 市場において主要な技術であり、2009 年の市場割合の約 80% を占めている。薄膜太陽光発電 (PV) (主としてカドミウムテルル及び薄膜シリコン) は残りの 20% を占めている。有機太陽光発電 (OPV) は有機吸収材で構成され、太陽電池では新しい部類となる。

ウェハ・ベースのシリコン技術は、現在の厚さが約  $200\mu\text{m}$  の単結晶または多結晶ウェハを原料とする太陽電池を含む。一方でこの厚さは  $150\mu\text{m}$  まで薄くなりつつある。単接合のウェハ・ベース結晶シリコンが、標準的な試験条件 (例/照射:  $1,000 \text{ W}/\text{m}^2$ 、気圧: 1.5、気温:  $25^\circ\text{C}$ ) において、単結晶シリコン電池に対しエネルギー変換効率 25.0%、多結晶シリコン電池 (Green et al., 2010b) に対し、20.3% のエネルギー変換効率を持つかどうかを個別に検証してきた。結晶シリコンのエネルギー・バンドギャップを持つ単接合電池の理論的 Shockley-Queisser 限界は 31% のエネルギー変換効率である (Shockley and Queisser, 1961)。

高効率のウェハ・ベースの結晶シリコン太陽光発電 (PV) のいくつかのバリエーションが開発されており、これには、たとえば、ヘテロ接合太陽電池や櫛型裏面電極 (IBC) 太陽電池がある。ヘテロ接合太陽電池は、不動態化及びエミッターのため、超薄膜アモルファス・シリコン層 ( $5\text{nm}$  未満) に挟まれた結晶シリコンのウェハの基盤から成り立っている。最も効率の良いヘテロ接合太陽電池は  $100.4\text{-cm}^2$  電池に対し、23.0% である (Taguchi et al., 2009)。

もう1つの強みは温度係数の低さである。従来のシリコン結晶太陽電池の効率は、気温が1度上がるにつれ0.45%ずつ減少する。一方、ヘテロ接合太陽電池では、より低い値で、0.25%ずつ減少する (Taguchi et al., 2009)。ベース及びエミッターが共に電池の裏側に接触している櫛形裏面電極太陽電池は、先端部電極が電池の前面に被さっていないという利点がある。このような最も効率の良い裏面シリコン・ウェハ電池は  $155.1 \text{ cm}^2$  に対し、24.2%である (Bunea et al., 2010)。ウェハ・ベースのシリコン系太陽光発電 (PV) の市販モジュールの効率は多結晶シリコンに対しては12~14%で、単結晶シリコンに対しては14~20%である。

市販の薄膜太陽光発電 (PV) はアモルファス・シリコン (a-Si)、アモルファス・シリコン-ゲルマニウム、多結晶シリコン、カドミウムテルル及びCIGSなど、多岐にわたる吸収材システムを含む。これらの薄膜電池は厚さ数 $\mu\text{m}$ 以下の吸収層を持ち、面積が最大 $5.7\text{m}^2$ のガラス製、金属製またはプラスチック製基板に設置される (Stein et al., 2009)。

初期の効率が1~2%の1976年に発表された (Carlson and Wronski, 1976) アモルファス・シリコン太陽電池は、商業的に成功した最初の薄膜太陽光発電 (PV) 技術である。アモルファス・シリコンはより光吸収係数が高いため、アモルファス・シリコン電池の厚さは $1\mu\text{m}$ 未満に出来る。つまり、結晶シリコン電池の厚さの100分の1未満である。アモルファス・シリコン電池の効率向上は固有の材料品質やステープラー-ロンスキー効果とされる光誘起劣化 (Staebler and Wronski, 1977) により制限される。しかし、研究活動により、薄膜のマイクロ構造を調整することでステープラー-ロンスキー効果の影響を約10%未満まで抑えることに成功している。最も高い安定効率 (光誘起劣化後の効率) は10.1%と報告されている (Benagli et al., 2009)。

低バンドギャップの半導体を形成するゲルマニウム及び炭素の合金系材料の多接合技術、または高バンドギャップの半導体を形成するマイクロ結晶シリコンの多接合技術を利用して効率化が達成され、より広い範囲の太陽スペクトルをカバーする (Yang and Guha, 1992; Yamamoto et al., 1994; Meier et al., 1997)。12~13%の安定効率は様々な実験装置にて評価されている (Green et al., 2010b)。

硫化カドミウム (CdS) とのヘテロ接合を用いたカドミウムテルル太陽電池は、高い光吸収係数を持つ1.45電子ボルト (eV) (0.232 aJ) の適切なエネルギー・バンドギャップを持つ。この電池の最高効率は16.7% (Green et al., 2010b) であり、市販が可能なモジュールでの効率の最高値は10~11%である。

金属カドミウムの毒性及びテルルの相対的希少性は、この技術に関連する一般的な問題である。この危険性 (Fthenakis and Kim, 2009; Zayed and Philippe, 2009) 及び希少性 (Green et al., 2009; Wadia et al., 2009) に対するそれぞれの評価は可能ではあるが、意見は一致していない。この潜在的危険性は、モジュールをガラスで挟む形的设计を用いることにより、またモジュール全体及び産業廃棄物をリサイクルすることにより、緩和することが出来ると報告されている。

CIGS材料系は今までの最高効率の薄膜太陽電池の基本となっている。銅インジウム・ジセレンド ( $\text{CuInSe}_2$ ) / 硫化カドミウムの太陽電池は1970年代初めにAT&Tベル研究所にて発明された (Wagner et al., 1974)。ガリウムや硫黄を組み込み、 $\text{CuInGa}(\text{Se,S})_2$  を生成することで、組成物に依存するバンドギャップ拡大の利益を得ることが出来る (Dimmler and Schock, 1996)。CIGSをベースとする太陽電池は20.1%の効率において有効とされてきた (Green et al., 2010b)。効率を高め、製造エネルギーの消費を抑えることにより、CIGS電池は、 $\text{CuInGaSe}_2$  に対し最大13.1% (Kushiya, 2009)、 $\text{CuInS}_2$  に対し8.6%の最も効率の良い商品化済みモジュールを持ち、現在工業化段階にある (Meeder et al., 2007)。インジウムの希少性が問題になる可能性は認識されているが、現在把握されている市場のインジウムの備蓄量により10TWを超えるCIGSをベースとした太陽光発電 (PV) システムの導入が可能であることが Wadia et al. (2009) により明らかになっている。

ヒ化ガリウム (GaAs) やリン化インジウムガリウム (gallium indium phosphide) ( $\text{GaInP}$ ) などのIII-V族半導体 (周期表のIII族及びV族にある元素をベースとするもの) を用いた多接合技術をベースとする高効率の太陽電池は効率が特に高い。これらの電池はもともと宇宙利用を目的として開発され、すでに商品化している。地上での経済的に可能な機器は、集光型太陽光発電 (CPV) システム内でのこれらの電池の使用である。ここでは、効率よく太陽電池に太陽光を集めるのに集光学 (concentrating optics) を利用する (Bosi and Pelosi, 2007)。最も一般的に使用されている電池は、格子整合 (lattice-matched) 電池に対し41.6%の記録的な効率 (Green et al., 2010b)、及び変形または非格子整合 (lattice-mismatched) 装置に対し41.1%の記録的な効率 (Bett et al., 2009) を持つ、リン化インジウムガリウム/ヒ素化ガリウム/ゲルマニウム (Ge) をベースとした三重接合装置 (triple-junction device) である。下位モジュールの効率は36.1%に達している (Green et al., 2010b)。集光器システムのもう1つの利点は、より高い照射の下では電池効率が向上すること (Bosi and Pelosi, 2007) であり、電池面積を集光レベルに合わせて減少させることが出来る。ただし、集光器を利用するには直達日照が必要なため、雲の比率の低い特定の気候条件に適している。

### 3.3.3.2 新しい太陽光発電技術

新しい太陽光発電 (PV) 技術はいまだ開発中、研究中または (前) パイロット段階であるが、10 年以内には商品化が可能であると考えられる。これらは低コスト材料やプロセスをもとにしており、色素増感太陽電池、有機太陽電池及び現存する無機薄膜技術の低コスト (プリント) バージョンなどの技術を含む。

色素増感太陽電池 (DSSC) による発電は、ナノ多孔性酸化膜半導体電極 (通常は二酸化チタン) のきわめて広い表面範囲に付着する色素分子 (「増感剤」) における光吸収に基づいており、続いて、励起される電子が色素から酸化物に対し入射される。したがって、色素・酸化物の接触面は、他の装置の pn 接合のようにプラス電荷とマイナス電荷の分離帯として機能する。マイナスに帯電している電子はその後、半導体の電極を經由して移動し、電気機器を經由してもう 1 つの電極に到達することにより電気が発生する。色素分子からの入射電子は、半導体電極の孔を通過する液体電解質により供給される電子で補充され、もう一方の電極からの電気路をもたらす (Graetzel, 2001)。最新の色素増感太陽電池は最大変換効率が 10.4% に達している (Chiba et al., 2005)。1991 年の発明後 (O'Regan and Graetzel, 1991) も色素増感太陽電池は段階的に改良されているが、紫外線照射、電解質漏出及び高気温に対する長期安定性がこの太陽電池 (PV) の商品化における重要なポイントとなり続けている。

有機太陽電池 (OPV) は積層固体有機半導体と、重合体または小有機分子のいずれかを使用する。一般的な小分子有機太陽電池 (OPV) の構造は平面ヘテロ接合を形成する p 型及び n 型有機半導体の積層から成る。光吸収において形成されるしっかりと結合した電子正孔対 (励起子) の短寿命性は、使用する半導体層の厚さを制限し、結果としてその装置の効率を制限する。励起子は正電荷と負電荷が分離される接触面に、その電荷が再結合する前に移動する必要があることに注意すること。この移動距離が短い場合、材料の「アクティブな」厚みは薄いので、すべての光がその厚みに吸収されるわけではない。

単接合有機太陽電池 (OPV) により達成される効率は約 5% である (Li et al., 2005) が、予測ではその値の約 2 倍以上まで伸びるとされている (Forrest, 2005; Koster et al., 2006)。光学的厚さ (光吸収) から励起子の移動距離を切り離すため、いわゆるバルクヘテロ接合装置が開発されている。これらの装置では、p 型及び n 型材料のナノスケール混合物で吸収層を作成し、励起子はその寿命が尽きる前に接触面に到達出来るようにする。また、十分に肉眼で見える層の厚さも可能にする。バルクヘテロ接合構造は効率を向上させる重要な役割を担っており、2009 年に 7.9% の値を記録している (Green et al., 2010a)。材料のコスト及びプロセスの改善 (Brabec, 2004; Krebs, 2005) は有機太陽電池 (OPV) の研究をさらに進める要因となっている。また、開発の主要課題は妥当な効率とともに十分な安定性を確保することである。

### 3.3.3.3 新たな太陽光発電技術

新技術は新しい材料、装置及び変換コンセプトを利用した破壊的 (高リスク、有望) 可能性のある方法である。一般に、これらの事実上達成可能な変換効率及びコスト構造はいまだにはっきりしない。これらの方法の例として、中間帯域半導体、ホットキャリア装置、スペクトル変換器、プラズモン太陽電池及び量子ドットの様々な応用などがある (3.7.3 節)。前節で説明した新しい技術は、非常に高い効率及び安定性を達成する一方で、主として非常に低いコストを目標としている。しかし、新しい技術の多くは赤外線から紫外線までの太陽スペクトル全体をもっと上手に活用して、非常に高い効率を達成するのが目的である。

### 3.3.3.4 太陽光発電システム

太陽光発電システムは太陽光発電 (PV) モジュール及びバランス・オブ・システム (BOS) 要素からなる。これらは、インバータ、貯蔵器、充電制御器、システム構造、及びエネルギー・ネットワークを含む。システムは信頼性が高く、コスト効率がよく、魅力的で、将来の送電システムに適合しなければならない (US Photovoltaic Industry Roadmap Steering Committee, 2001; Navigant Consulting Inc., 2006; EU PV European Photovoltaic Technology Platform, 2007; Kroposki et al., 2008; NEDO, 2009)。

すべての構成要素のレベルにおいて、系統連系機器のバランス・オブ・システム要素は、まだ、太陽光発電 (PV) モジュールの耐用年数に沿った形で十分に開発されていない。さらに、バランス・オブ・システム要素及び設置コストを減らす必要がある。また、多量の電力 (1MWh 超、または 3,600MJ) を貯蔵する装置を、新たなエネルギー・ネットワークの大規模太陽光発電 (PV) システムへ対応させる。新たなモジュール技術が将来出現してきた時、バランス・オブ・システムに関する考えの一部を変更する必要がある。その上、システムの品質を保証し、決められた基準、方針及び手順に基づいて適切に維持する必要がある。システム品質を確保するためには、性能評価が重要であり、これには太陽光発電 (PV) システムのオンライン分析 (初期不良検出など) やオフライン分析が含まれる。集められた知識は将来のモジュールのエネルギー収量やシステム技術設計を予測するソフトウェアの実証の助けとなる。

エネルギー・ネットワークを普及させていくためには、太陽光発電 (PV) システムは送電システムとエネルギー供給及び需要に適合する技術を利用しなければならない。システム設計及び運用技術は、発電量を予測し蓄電機能を最適化する技術を開発し、需要パターンに応じた開発も行わなければならない。さらに、インバータは新たなエネル

ギー・ネットワークでの無効電力の制御または通信による高調波をフィルタリングすることで系統電力の品質を高めなければならない。このネットワークは安価で効率的な通信システムと技術、及びスマートメータを組み合わせで使用する（8.2.1 節を参照）。

### 3.3.3.5 太陽光発電の応用

太陽光発電の応用は次の主要な 2 タイプに分類される太陽光発電 (PV) システムを含む。(1) 従来の送電系統に接続されていないもの（すなわち非系統連系の機器）。(2) 接続されているもの（系統連系機器）。さらに非常に小規模だが、安定している民生用の市場区分がある。

非系統連系太陽光発電 (PV) システムには、発展途上国の電気が送られていない地域での大きな実用的応用の機会がある。図 3.6 に太陽光発電システム (PVPS) プログラム国における非系統連系型と系統連系システムの比率を示す。2009 年のこれらの国々にて導入された設備の総容量のうち、たった約 1.2%がオフグリッド・システムであったが、今は IEA の太陽光システムプログラム国の太陽光発電 (PV) の累積設備容量の 4.2%を占めるようになっている (IEA, 2010e)。

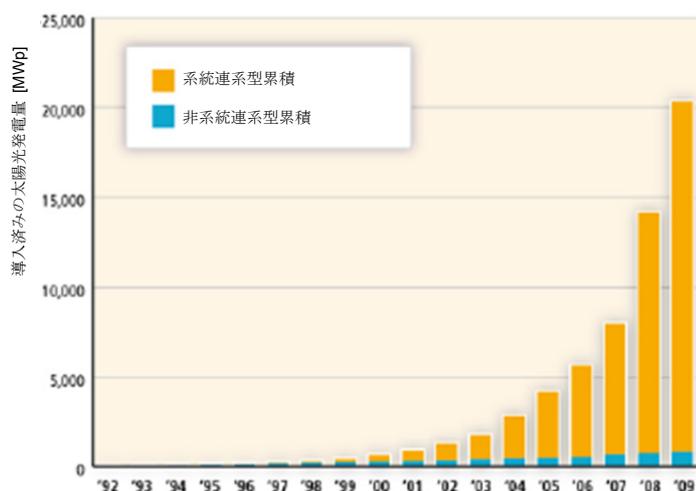


図 3.6: OECD 諸国における非系統連系型及び系統連系型システムの太陽光発電 (PV) の累積設備容量における過去の推移 (IEA, 2010e)。縦軸は最大値 (メガワット)。

非系統連系の集中型太陽光発電 (PV) 小規模系統システムは、ここ数年間で村の電化の信頼出来る選択肢となった。太陽光発電 (PV) 小規模系統システムでは、エネルギー配分が可能である。地方に位置する村や、住宅と住宅の間があまり離れていない村においては、電力は目に見えるほどの損失がない状態で、小規模系統を流れる。局所電力供給の集中型システムは、電気性能、蓄電ニーズの低減、エネルギーの可用性、及びダイナミック挙動に関して、様々な技術的利点を持つ。集中型の太陽光発電 (PV) 小規模系統システムはサービスの既存レベルに対する最も低コストの選択肢となりうる。また、これらは任意のバルンシング・システムとして設定されるディーゼル発電機を有するか、または太陽光発電 (PV) - 風力発電 - ディーゼルハイブリッドシステムとして運用される可能性がある。この種のシステムは地方におけるディーゼル発電機使用の低減及び回避に関する (Munoz et al., 2007; Sreeraj et al., 2010)。

系統連系型太陽光発電 (PV) システムは、インバータを用いて、太陽電池 (PV) アレイにより発電される直流 (DC) から交流 (AC) に電力を変換し、その後、電力ネットワークに発電した電力を供給する。オフグリッドの太陽光発電システムの設置と比較すると、システムコストは低い。これは一般にはエネルギー貯蔵が必要ないため、系統をバッファとして利用するからである。世界のいくつかの設置状況では、年間発電量の範囲は 300~2,000kWh/kW である (Clavadetscher and Nordmann, 2007, Gaiddon and Jedliczka, 2007, Kurokawa et al., 2007, Photovoltaic Geographic Information System, 2008)。年間性能比率の平均 (交流システムの効率の平均と標準的直流モジュールの効率の間の比率) の範囲は 0.7~0.8 であり (Clavadetscher and Nordmann, 2007)、特定の技術及び応用においては次第に上昇し、約 0.9 となっている。

系統連系型太陽光発電 (PV) システムは分散型と集中型の 2 タイプに分類される。分散型の系統連系型太陽光発電 (PV) は、系統連系型の顧客または電力ネットワークに直接電力を供給するよう設置されている。このシステムは、1) 顧客の建物に設置、または建物に統合されており、その多くは電力メーターの需要側にある、2) 公共及び商業施設に設置されている、または 3) 単純に高速道路の防音壁のような建築環境におかれている、のいずれかである。一般的な規模は、住宅に設置されたものにおいては 1~4kW で、公共建築物及び工業建築物の屋根に設置

されたものにおいては 10kW から数 MW である。

これらのシステムには以下のような多くの利点がある。(1) システムは利用するポイントごとに設置されるため、電力ネットワークにおける分散による損失が低減される。(2) 太陽光発電 (PV) システム用の特別な土地は不要であり、既存の構造にシステムを設置する場合でも、システム設置のコストを抑えることが出来る。(3) 太陽電池 (PV) アレイ自身を被膜材または屋根材として利用でき、建物に統合された太陽光発電 (PV) として利用出来る (Eiffert, 2002、Ecofys Netherlands BV, 2007、Elzinga, 2008)。

よく引き合いに出されるデメリットは、過電圧や予期せぬ孤立などの系統連系の問題に対するより大きな敏感さである (Kobayashi and Takasaki, 2006; Cobben et al., 2008; Ropp et al., 2008)。しかし、進歩するにつれ、これらの影響を緩和することができ、今日では米国電気電子学会 (IEEE) 及びアメリカ保険業者安全試験所規格 (IEEE 1547 (2008), UL 1741) により、すべてのインバータが孤立防止効果の機能を保有しなければならないとなっている。

集中型の系統連系型太陽光発電 (PV) システムは集中型発電所の機能を果たす。このようなシステムにより供給される電力は、特定の電力顧客に固定されない。このシステムは特に大電力の供給以外の電力ネットワークにおける機能を果たすために設置されているのではない。一般に、集中型システムは地面に設置され、1MW を超える発電能力を持つ。

これらのシステムの経済的利点は大量購入により設置及び運用コストが最適化されることと、大規模であるため太陽光発電 (PV) の部品のコスト効率やバランス・オブ・システムが優れていることである。さらに、集中型太陽光発電 (PV) システムの信頼性は分散型太陽光発電 (PV) システムの信頼性よりも高く出来る。これは、集中型システムには設備監視機能を持つ保守システムを含めることが出来るからである。この保守システムは、全システムコストのほんの一部である。

建築環境に既に導入されている太陽光発電 (PV) または太陽熱システムに関する多機能太陽光発電 (PV)、採光及び太陽熱の要素の例を以下に挙げる。太陽光発電 (PV) システムや太陽熱集熱器から成るシェーディングシステム、同じ「パネル/熱集熱器」から発電や熱の生成を行うハイブリッド太陽光発電/熱 (PV/T) システム、1つの面にて発電及び光の伝送を行う半透明太陽光発電窓、ファサードの太陽熱集熱器、太陽光発電 (PV) ルーフ、太陽熱エネルギールーフシステム、及び太陽熱収集ルーフリッジ。現在は、透明な太陽熱収集窓や、真空断熱材パネル、太陽光発電 (PV) パネル、ヒートポンプ、及び局所排気装置に接続した廃熱回収システムから成るファサード要素などのその他の製品開発と関連した基礎及び応用研究開発活動が進行中である。

太陽エネルギーシステムは建物外皮内に組み込むことができ、エネルギー節約法及びスマートビルディング運用戦略と一緒にすることが出来る。「ゼロ」エネルギービルを目指して、過去約 10 年にわたる多くの作業によりこの統合が開始されている。

初期に重視されていたものの多くは、太陽光発電 (PV) システムと熱及び採光システムの統合についてであった。Bazilian et al. (2001) 及び Tripanagnostopoulos (2007) はこれの実施方法をリスト化し、この方法が適用されるケーススタディを見直した。たとえば、太陽電池 (PV) は平板太陽熱集熱器の吸収板に設置することが出来る。太陽電池にて吸収される太陽エネルギーの約 6~20%が電力に変換され、残りの約 80%は流体を加熱するために伝導される低温熱として利用可能である。その結果、装置は熱と電力の両方を産み出す。また、その装置は熱と電力の2つの変換素子が並んで設置され、それぞれ独立して稼働している場合に使用される面積の半分より若干広い面積のみを必要とする。太陽電池 (PV) は採光とパッシブ日射取得を可能にする窓に設置出来るよう開発されている。この範囲の最近の研究の見直しが Chow (2010)、及び Arif Hasan と Sumathy (2010) により行われている。

建築物に太陽エネルギーシステムの要素を構造的に組み込むことについての研究も多く行われている。すべての新しいソーラー建築物は非常に高い断熱性を持ち、密閉度が高く、また、効率の良い窓と廃熱回収システムを備えていなければならない。多数の現存するソーラー建築物について検査した 170 名を超える建築家及びエンジニアの意見をまとめた Probst and Roecker (2007) は、次のように結論づけている。1) 太陽エネルギー要素を建築要素として組み込む際に最善の組み込みが達成される。2) 熱集熱器の色彩、向き及び接合を含む外観は全体の設計において性能より優先されなければならないことがある。太陽光発電システムを組み込んだ建築物の 16 のケーススタディの説明において、Eiffert and Kiss (2000) はファサード・システムとルーフ・システムを建築市場の2つの主要製品としている。ファサード・システムはカーテンウォール、スパンドレルパネル及びグレーディングを含み、ルーフ製品はタイル、屋根板、立ちはげ継製品及び天窗を含む。これらは要素として組み込むことが出来るか、全体構造の構成要素 (バス待合所の場合) となることが出来る。

ゼロエネルギーのソーラー建築物の構想は、最近、関心が高まっている。これらの建築物は、自身が年間を通して使用するエネルギーと同じくらいの太陽光発電 (PV) による余分な電力を系統へ送る。IEA Task ではいかにこの目標を達成するかを検討している (IEA NZEB, 2009)。カナダの気候における最近の例が Athienitis (2008) により報告されている。最高レベルの保温を満たす建築物をはじめ、これらの住宅は屋根の上にハイブリッド型の暖房/

太陽光発電 (PV) パネルを設置し、使用している。温められた空気は暖房またはヒートポンプの熱源として利用される。赤道に面した (equatorial-facing) 窓を通しての大規模なパッシブ日射取得を可能とする窓割りのような、太陽熱温水の熱集熱器 (Solar water-heating collectors) もこれに含まれる。主な機能は地中熱源ヒートポンプであり、これは小規模な冬季の暖房、夏季の冷房を提供する。

ソーラー建築物制御スマート戦略は、系統からの電力需要のピークを低減及びシフトするため、局所的に生成される太陽熱による電力及び熱の収集、貯蔵及び分配を管理するのに使用される。Candanedo and Athienitis (2010) がソーラー建築物のスマート設計の例を挙げている。これは、前もって行うある日の天気予報をもとにした予測制御や建築物の状態のリアルタイム予測を利用し、電力需要のピークを抑える一方でエネルギー性能を最適化するものである。

### 3.3.4 集光型太陽熱発電

集光型太陽熱発電 (CSP) 技術は直射の太陽放射を集光させることで発電を行い、発電の下流プロセスにて使用する液体、固体または気体を加熱するものである。今日の世界の電力 (石炭、ガス、原子力、石油またはバイオマスのいずれかで発電される) の大部分は、高温流体の生成に由来している。集光型太陽熱発電 (CSP) はこの熱源代替を容易に提供するものである。つまり、この技術の魅力は、今日の世界における最近の発電のノウハウの多くに基づいているということである。また、太陽集光技術が継続的に進歩しているというだけでなく、蒸気及びガスタービン・サイクルにおける継続的な改良においてもメリットがある集光型太陽エネルギーシステムはすべて、平板システムに対して地球的に水平方向とは反対方向の照射となる直接放射に左右される。そのため、設置場所をこれに従って選択しなければならず、北アフリカの砂漠のような赤道付近の雲のない地域が集光型太陽熱発電 (CSP) にとっての最適な場所である。太陽熱発電の設備利用率は太陽エネルギー資源の質に左右される。

集光太陽熱発電 (CSP) の主なメリットは以下のようなものである。1) 様々な応用対象及び状態に合わせて、数十 kW (ディッシュ式/スターリング・システム) から数 MW (タワー型及びトラフ型システム) までの発電能力の幅で設置出来る。2) ピークロード (1 時間未満) と中間負荷 (3~6 時間) の蓄熱を統合出来る。3) モジュール及び拡張可能な要素を持つ。4) 非標準的材料を必要としない。この節では様々な形式の集光太陽熱発電システム及びそのシステムの蓄熱について説明する。

大規模な集光太陽熱発電所 (CSP) は一般的に、レンズによる屈折ではなく、反射させて太陽光を集める。集光はトラフ型やフレネル・システムにおける線 (線焦点)、または集光タワーやディッシュ・システムにおける点 (点焦点) のいずれかである。集光型太陽熱発電 (CSP) システムの各形式の主な機能を図 3.7 に図示し、下記で説明する。

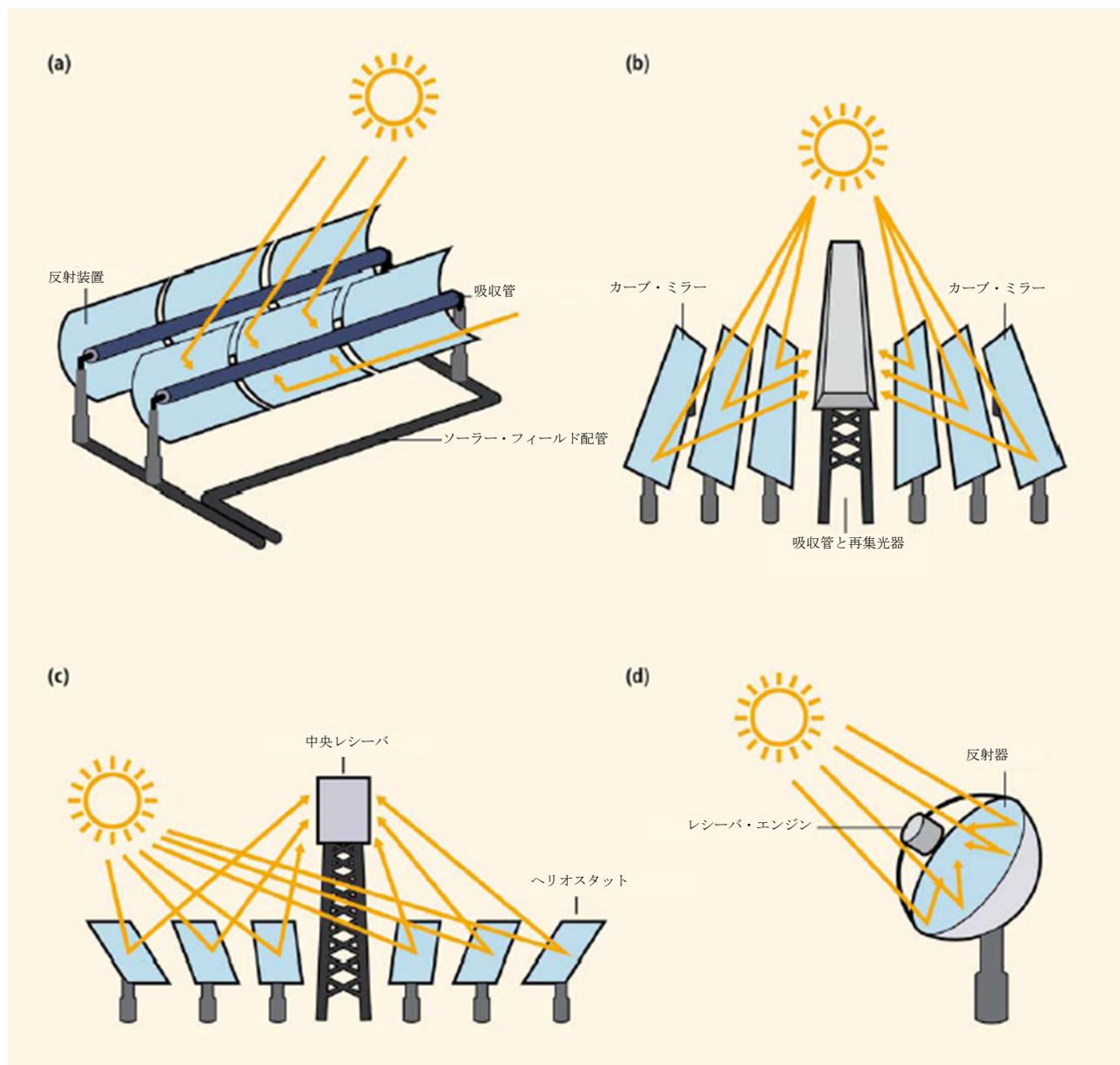


図 3.7: 4 つの基本的な集光太陽熱発電 (CSP) 構成の基本原理図 (a) 放物曲面型トラフ型、(b) 線形フレネル型反射装置、(c) 集光・発電タワー、及び (d) ディッシュ・システム (Richter et al., 2009)。

トラフ型集光装置では、太陽の移動を追跡するパラボラ型反射装置の長い列によって、反射装置の焦線に沿って取り付けられた集熱器 (HCE) に太陽放射が約 70~100 倍に集光される。集熱器は、黒色内部パイプ (選択性吸収表面) とガラス外管で構成され、両者の間の空間は真空となっている。現在の商業設計では、熱伝達油はそれが加熱される (400°C 近くまで) 鋼管を通して循環するが、熔融塩、直接蒸気やその他の熱伝達物質を用いた循環システムも現在実証中である。トラフの多くの列からくる熱せられた油は熱交換器を通過し、従来型蒸気タービン発電機への蒸気を生成する (ランキンサイクル)。土地面積の必要要件は 100MW<sub>e</sub> の発電所で 2km<sup>2</sup> 程度であり、これは集光技術に依存し、蓄熱は不要と仮定している。トラフ型集熱器で一般的に使われている合成油に対する熱伝達流体の代替物 (蒸気及び熔融塩) は、高温及び全体的な効率化、また熔融塩ケースでの総合的に蓄熱が可能となるよう現在開発が行われている。

線形フレネル型反射設備は平坦またはほぼ平坦なミラーを長くライン状に並べる。これにより、可動部分を地面により近い場所に設置出来るようになり、構造上、コストを低減することが出来る (対照的に、大規模なトラフ型反射設備は現在、反射ガラス面に必要な曲面が得られるように熱曲げをしている)。集熱器は真空管よりも単純な構造を持ち、大きさの変更がより自由出来る固定式倒立キャビティである。線形フレネル型反射設備は、1 平方メートルあたりの設置コストをトラフ型システムよりも低く抑えることが出来る。しかし、一年を通しての光学性能はトラフ型システムのそれよりも劣る。

集光タワー (またはタワー型発電) は、焦点集光設備の一形式であり、トラフ型や線形フレネル型反射設備に比

非常に高い温度を産み出すことが出来る。しかし、その方位及び高度を変えて移動する太陽を追尾するのに2つの軸が必要となる。発電に使用する熱力学サイクルが高温であるほど効果的であるため、高温の便益は大きい。この技術はミラーを並べて(ヘリオスタット)使用する。それぞれの鏡は太陽を追尾し、タワーの頂点に固定された集熱器に太陽光線を反射させる。温度は1000°Cを超えることがある。集光タワーは改良型の蒸気タービンに対して最大温度を容易に作り出すことができ、高温の熔融塩を熱伝達流体として使用することができ、また、ガスタービン(ブレイトン)サイクル発電に適用される。

ディッシュ・システムは、理想的な光反射を含むため、高温を必要とする応用に適している。ディッシュ型反射設備は放物面型で、焦点の位置に設置される集熱器上に太陽光を集光させる。この集熱器はディッシュとともに移動する。ディッシュはスターリング・エンジンによる900°Cでの発電電力に使用され、蒸気発生にも使用される。ディッシュ/スターリングエンジン・システムを利用した重要な運用実績があり、商品化の発表も企画されている。2010年において、各スターリング・エンジンの能力は10~25kW程度の電力で小さい。最も大規模な太陽ディッシュは485m<sup>2</sup>の開口部を持ち、研究施設または実証用発電所に設置されている。

蓄熱システムにおいて、ソーラー・フィールドから得た熱はタービンに到達する前に貯蔵される。蓄熱システムは顕熱蓄熱、潜熱蓄熱のいずれかの形式をとる(Gil et al., 2010; Medrano et al., 2010)。日中にタービンを稼働させ、並行して蓄熱も行える十分な熱が供給されるよう、ソーラー・フィールドには特大サイズが必要である。「ソーラー・マルチプル(solar multiple)」という言葉は、設計点で貯蔵を不要とするタービンを稼働させるのに必要なソーラー・フィールド・エリアに分割されて整備されるソーラー・フィールド・エリア全体のことを指す。集光太陽熱発電(CSP)システムの蓄熱には、タービンの作動流体に必要な温度より高い温度である必要がある。このように、システムの温度は一般に400から600°Cで、これはトラフ型の下限であり、タワー型の上限である。許容範囲の温度は、使用可能な媒体の限界からも影響を受ける。蓄熱媒体の例には、熔融塩(現在は個別の冷温水貯槽を構成)、蒸気貯蔵器(短期貯蔵目的のみ)、固体セラミック粒子、高温相変化物質、グラファイト、及び高温コンクリートがある。熱はその後、必要な場合に蓄熱から引き出すことができ、タービン用の蒸気を作る。高温の集光太陽熱発電(CSP)に関する別形式の蓄熱は熱化学蓄熱であり、太陽エネルギーを化学的に貯蔵する。これについてのさらに詳しい説明は3.3.5節と3.7.5節にて行う。

システムに熱エネルギー貯蔵を組み込むことは集光太陽熱発電(CSP)の重要な特性である。このことは、最近までは、主として発電所の稼働することが目的としており、満タン貯蔵状態で30分から1時間分の蓄熱であった。これは、発電所での曇り空などの熱変動の影響を軽減し、また起動及び停止が容易になるよう支援する。また、系統にとっても便益がある。トラフ型発電所は現在、6から7.5時間分の蓄熱となるよう設計されているが、これは、ピーク需要の時に電気代が高くなる夕方に合わせて運用が可能な十分な量である。スペインのトラフ型発電所は現在、熔融塩によって蓄熱して稼働している。アメリカでは、2013年までに稼働開始する計画になっているアベンゴア・ソーラー社の280-MW Solana トラフ計画にて、6時間分の蓄熱の一体化が計画されている。より高温を伴うタワー型は熔融塩の貯蔵及び蓄熱をより効率的に出来る。スペインで建設中の17-MW<sub>e</sub>太陽熱タワー計画であるヘマソラー発電所は75%の年間発電量をもたらす15時間分の蓄熱が可能なように設計されている(Arce et al., 2011)。

蓄熱は調整能力を提供する手段である。非再生可能燃料とのハイブリッド化は、集光太陽熱発電(CSP)が調整可能となるよう設計出来るもう1つの方法である。バックアップ用燃料自身は再生可能ではないが(バイオマス由来のものを除く)、タービンの運用に大きな便益をもたらす、太陽熱発電能力を上昇させる。

集光太陽熱発電(CSP)は、数十kWの小規模分散型システムから数百MWの集中型発電所まで応用されている。

集光太陽熱発電(CSP)におけるスターリング及びブレイトン・サイクル発電は、小規模分散型システムから中〜大規模な発電装置を形成する一連設備まで幅広い範囲に設置されている。ディッシュ/スターリング技術は何年にもわたり開発中であり、ディッシュ構造、高温集熱器、循環する作動流体としての水素を利用する方法を進歩させ、また液体金属を用いたいくつかの実験やスターリング・エンジンの改良を行ってきた。これらはすべて、技術を商品展開段階へと近づけている。個々の装置規模は数十kW<sub>e</sub>程度だが、多数のモジュールの集積により、最大800MW<sub>e</sub>の大きな能力を持つ発電所が提案されている。各ディッシュはスタンドアロン型の発電機である。また、発電機を分散させるという考え方により、設置されている装置の能力及び割合は非常に柔軟性の高いものになっている。しかし、ディッシュ技術は蓄熱を統合する可能性は低い。

スターリング・エンジンに対する代替手段は、ガスタービンで使用されるブレイトン・サイクルである。集光太陽熱発電(CSP)にとってのこのエンジンの魅力は、すでに大量生産の段階にあり、埋立地ガスや天然ガスを用いて燃焼させる分散型発電に使用されていることである。太陽熱発電バージョンにおいては、大気をタワーまたはディッシュによって集光照射させて、燃焼法に代わって、温める。バイオガスまたは天然ガスの燃焼器との一体化も可能で、これにより太陽熱システムをバックアップする。太陽熱タワーと小型タービンの組み合わせをベースとする、いくつかの開発が現在進められている。

集中型の集光太陽熱発電(CSP)は大規模発電装置がもたらす規模の経済性の便益性がある。従来の蒸気及びガ

スタービン・サイクルをベースとし、大規模発電装置の設計や運用の技術的ノウハウの多くはすでにそろっている。しかし、規模の拡大は大きなコスト便益をもたらすが、投資家からの一段と多くの投資契約が必要となるため、最近まで阻害要因となる傾向にあった。さらに、発電装置の大規模化は強力な基盤支援を必要とし、送電能力の強化が新たに必要となる可能性がある。

初期の商用集光太陽熱発電所 (CSP) は、1985 年から 1991 年にかけて展開されたカリフォルニア州の 354MW の太陽熱発電所である。この発電所は現在においても商用稼働を続けている。これらの初期の発電所から得た経験や教訓の結果、トラフ型システムは、今日、集光太陽熱発電 (CSP) 産業の成長において、最も適用される傾向にある技術である。スペインでは、今日、設置可能な装置で発電能力が最も大きいのは 50MW<sub>e</sub> という規制が敷かれており、産業競争への刺激を促進している。アメリカでは、このような規制はないが、トラフ型における 280MW<sub>e</sub> やタワー型をベースとする 400-MW<sub>e</sub> (4 つのモジュールから成る) の発電所など、より大きな発電所を整備する提案がなされている。現在は 10MW<sub>e</sub> 及び 20MW<sub>e</sub> の稼働用タワー型があり、すべてのタワー型の開発者は技術開発、規制及び投資資本に基づき、発電所の能力向上を目指している。また、分散発電型スターリングまたはブレイトン装置ではなく、複数のディッシュ型によって大きな熱源を供給することが提案されている。

集光太陽熱発電 (CSP) または太陽光発電 (PV) は脱塩のための逆浸透膜発電所にも利用されている。圧力及び温度に基づく専用の集光型太陽熱発電脱塩サイクルは、脱塩用としても開発中である (3.3.2 節を参照)。

### 3.3.5 太陽燃料の生成

太陽燃料技術は太陽エネルギーを化学燃料に変換し、太陽エネルギーの貯蔵及び輸送という望ましい方法になる。これらは、単に発電するサイクルよりも広範囲に高い効果で応用利用される。太陽燃料は液体の輸送燃料へと処理されるか、燃料電池による直接発電に利用される。これらは高効率のガスタービン・サイクルまたは内燃機関の燃料として採用することが出来る。また、太陽燃料は化石燃料のアップグレードや二酸化炭素合成、または産業や家庭での熱に利用される。課題は、コスト的に有利な方法で太陽光から直接、化学燃料を大量生産し、環境への悪影響を最低限にすることである (Steinfeld and Meier, 2004)。

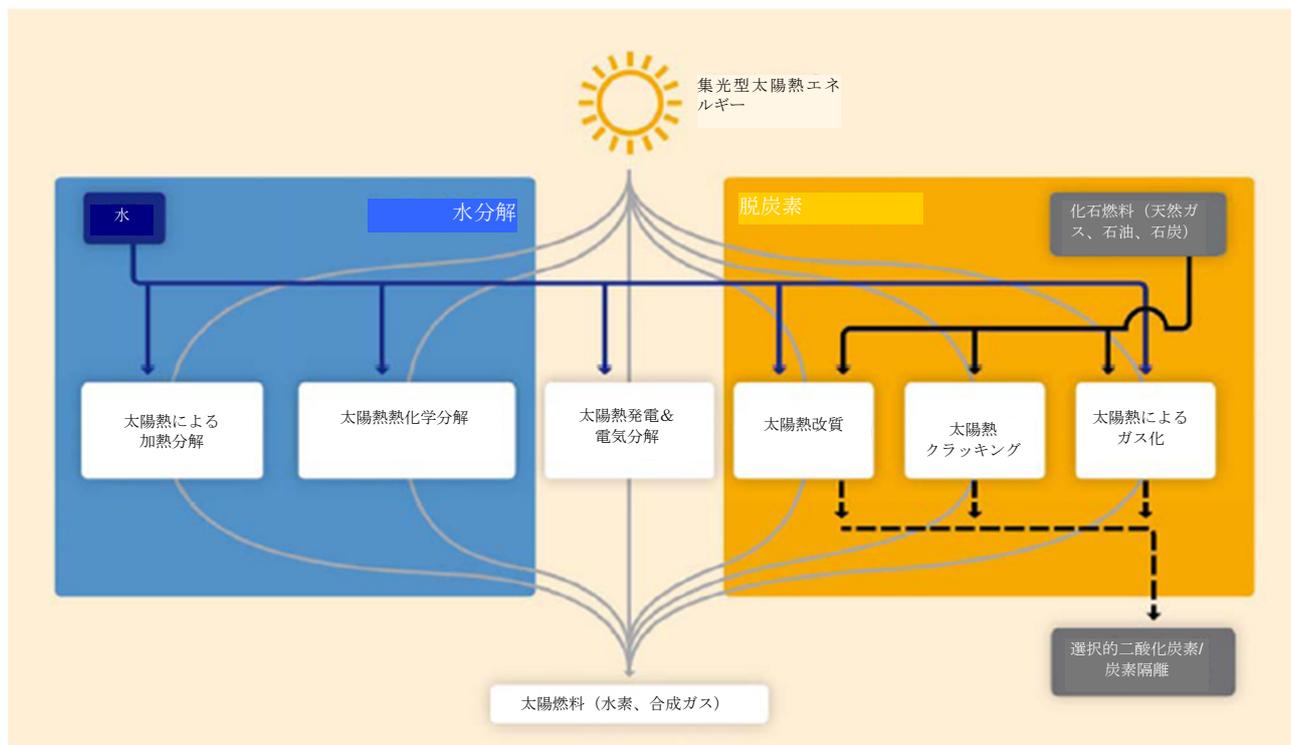
生成可能な太陽燃料は合成ガス (synthesis gas) (syngas ともいう。たとえば、一酸化炭素と水素の混合ガス)、純粋な水素 (H<sub>2</sub>) ガス、ジメチルエーテル (DME) 及びメタノールやディーゼルのような液体を含む。水素の高エネルギー密度 (質量基準) とクリーンなエネルギー変換は将来の燃料としての魅力的な水素の特性であり、また、水素は多くの製造プロセスの原材料としても使用される。水素はバッテリーよりもエネルギー密度が高いが、バッテリーは高いサイクル効率 (round-trip efficiency) を持つ。しかし、水素の体積を基準とした場合の非常に低いエネルギー密度は、水素の貯蔵及び輸送に関し経済的な課題をもたらす。これは大規模な新たな分散型インフラを必要とし、内燃機関を新しく設計するか、燃料電池への移行のいずれかを必要とする。さらに、水素と二酸化炭素の合成により炭化水素燃料を生成することが出来る。この燃料は、現行のインフラと互換性がある。ジメチルエーテルガスは液化石油ガス (LPG) と類似し、保管も容易である。メタノールは液体で、エンジンまたは燃料分配構造に重大な変化を与えることなくガソリンにとって代わることが出来る。メタノール及びジメチルエーテルは改質後に燃料電池として利用出来る。また、ジメチルエーテルは液化石油ガスの代わりに使用することも出来る。フィッシャー・トロプシュ法は炭化水素燃料を生成し、発電をすることが出来る (2.6 及び 8.2.4 節を参照)。

太陽エネルギーから生成される貯蔵及び輸送が可能な燃料には次に挙げる 3 つの基本経路があり、単独または組み合わせ燃料を生成する。1) 電気化学的経路は太陽光発電 (PV) または集光太陽熱発電 (CSP) システムからのソーラー電力を用い、次に電気分解プロセスを経る。2) 光化学/光生物学経路は光化学及び光生物学プロセスに対し太陽光エネルギーを直接利用する。3) 熱化学経路は中温や高温の太陽熱を利用し、その後、吸熱熱化学反応プロセスを経る (Steinfeld and Meier, 2004)。電気化学及び熱化学経路は太陽エネルギー技術に限らず、すべての再生可能エネルギー技術に応用されることに注意する。

高温プロセス熱の熱源として太陽エネルギーを集光させて利用し、水や化石燃料から水素または合成ガスを生成することが出来る経路について図 3.8 に図示する。原材料は水及び二酸化炭素などの無機化合物、石炭、バイオマス及び天然ガス (NG) などの有機資源を含む。バイオマス由来の合成ガスの類似点については第 2 章を参照のこと。

水の電気分解は従来の (アルカリ) 電解槽にて太陽光発電 (PV) または集光太陽熱発電 (CSP) により得られるソーラー電力を利用することが出来る。これは、太陽熱による水素生成のベンチマークとみなされる。電解槽の稼働効率が 70% で、ソーラー発電の年間効率が太陽光発電 (PV) で 15%、集光太陽熱発電 (CSP) で 20% と仮定した場合、現在の技術では、太陽熱-水素エネルギー変換の効率は、10~14% の範囲である。水の電気分解が固体電解質型電解槽を経由し高温 (800~1000°C) で進行する場合、電気分解に対する電力需要を大幅に減少させることが出来る (Jensen et al., 2007)。この場合、高温のプロセス熱及び高温電気分解に必要な電力の両方を提供するため、集光太陽エネルギーを利用する。

加熱分解及び熱化学サイクルは長期的に持続可能であり、水から水素を生成する上でカーボンニュートラルな方法である。この経路は、集光太陽照射を高温プロセス熱のエネルギー源として利用するエネルギー消費（吸熱）反応を含む（Abanades et al., 2006）。太陽熱による加熱分解は、 $2,200^{\circ}\text{C}$ を超える温度が必要であり、反応炉材料及びガス分離の困難な課題が浮上している。これに対して、水分解熱化学サイクルは低温での操作を可能にする。しかし、化学反応が数段階必要となり、また熱伝達に関する非効率性及び各段階の生成物分離のための課題がある。



**図 3.8:** 水素を化学原料として太陽燃料を生成する熱化学経路は以下の通り。太陽熱による加熱分解及び太陽熱熱化学サイクルへ水を投入し、水素のみを生成する。原材料として化石燃料またはバイオマス燃料を太陽熱クラッキングに投入し、水素及び炭素 (C) を生成する。または、化石燃料・バイオマス燃料と水・二酸化炭素を組み合わせさせてソーラー改質やガス化過程に投入し、合成ガス、水素及び一酸化炭素 (CO) を生成する。太陽熱による脱炭素プロセスとして、二酸化炭素/炭素の隔離が考えられる (Steinfeld and Meier, 2004、Steinfeld, 2005 より)。

化石燃料の脱炭素は、酸化金属の炭素熱還元 (Epstein et al., 2008) を含む短期から中期の太陽水素 (solar hydrogen) への変換経路である。また、太陽熱クラッキング (Spath and Amos, 2003; Rodat et al., 2009)、太陽熱改質 (Möller et al., 2006)、太陽熱によるガス化 (Z'Graggen and Steinfeld, 2008; Piatkowski et al., 2009) を経由する化石燃料の脱炭素を含む短期から中期の太陽水素 (solar hydrogen) への変換経路でもある。これらの経路はヨーロッパ、オーストラリア及びアメリカの学会、産業界の研究協会にて研究が進められている。この技術の実現可能性は、能力が  $100 \sim 500 \text{kW}_{\text{th}}$  の集光型太陽化学のパイロット工場にて実証されている。ハイブリッド太陽燃料は、メタン及びバイオマス改質の還元プロセスに集光太陽熱エネルギーを供給することで生成される。つまり、太陽熱はプロセス・エネルギーに使用されるだけであり、そこから化石燃料を投入する必要がある。国内のエネルギー市場は比較的小さいが、膨大な太陽資源、天然ガス資源をもつ一部の国（中東やオーストラリアなど）では、太陽エネルギーを生成、燃料を液体化して輸出する立場にある。

太陽水素及び二酸化炭素からの太陽燃料合成により、天然ガス網または現存する燃料供給構造のような現存するエネルギー・インフラと相性のいい炭化水素が生成される。再生可能メタンのプロセスは、ニッケル触媒を用いて、合成炉内で大気中の二酸化炭素または別の材料と太陽水素を組み合わせる。この方法で、貯蔵、輸送、及びガス発電所、加熱システム及びガソリン車にて使用可能な天然ガスの代替物が生成される (Sternner, 2009)。

太陽メタンは水、空気、太陽エネルギー及び二酸化炭素の源となるものを使用し生成される。二酸化炭素の源として考えられるものは、バイオマス、製造プロセスまたは大気である。二酸化炭素はこのエネルギーシステムでは、水素の運搬役とみなされる。太陽メタンの燃焼プロセスより二酸化炭素を分離することによって、二酸化炭素をエネルギーシステム内で再循環または永久貯蔵することが出来る。これにより、再生可能エネルギーによる炭素吸収源エネルギーシステムを産み出すことが出来る (Sternner, 2009)。大気中の二酸化炭素の吸収を行う kW 単位の最初のパイロット発電所はドイツに設置されており、技術の実現性も証明されている。次の数年で MW 規模まで設備を拡大する計画が持ち上がっている (Specht et al., 2010)。

別の変換方法として、長距離輸送用のフィッシャー・トロプシュ法によるディーゼル、ジメチルエーテル、メタノールまたはソーラー・ケロシン（ジェット燃料）などの液体燃料が太陽エネルギー及び二酸化炭素・水（ $H_2O$ ）より生成される。これらの太陽燃料の主な利点は、（電気自動車では一般的に低下するが）化石燃料と同じ走行可能距離を持つこと、地上での利用では競争相手がより少ないこと、バイオ燃料と比較してヘクタール当たりの生成量が多いことである。太陽エネルギーは、0.5%の効率のバイオ燃料の自然光合成、10%の効率の太陽光発電（PV）、太陽燃料変換（技術的光合成）（Sterner, 2009）、及び酸化金属の酸化還元反応を用いた太陽熱主導の二酸化炭素と水の熱化学分離により産出される。太陽エネルギーにより、20%に達する太陽-燃料変換効率にて一酸化炭素（CO）と水素を混合した合成ガスを産出出来る（Chueh et al., 2010）。この方法は、現在のバイオ燃料を取り巻く問題や議論の解決法を提供すると考えられるが、この技術の費用は制限される可能性がある。

### 3.4 市場及び工業発展の世界的、地域的状況

この節では主要な5つの太陽エネルギー技術について触れる。最初に設備容量と発電について述べ、続いて生産能力とサプライチェーン、最後にこれらの技術に特有な政策の影響について述べる。

#### 3.4.1 設備容量及びエネルギー生産量

この小節では、パッシブ太陽エネルギー、アクティブ太陽エネルギーによる加熱と冷却、太陽光発電（PV）、集光太陽熱発電（CSP）、及び太陽燃料生成の5つの技術における設備容量とエネルギー生産量について説明する。

パッシブ太陽エネルギー技術において、現時点では、パッシブ太陽エネルギーの設備容量またはこの技術によって生産または保存されるエネルギー量の見積もりは出来ない。

アクティブ太陽エネルギー利用による加熱では、世界の設備容量の総量は2008年で $149GW_{th}$ 、2009年で $180GW_{th}$ であった（Weiss and Mauthner, 2010; REN21, 2010）。

2008年には太陽熱集熱器の $4,150$ 万 $m^2$ に対応する $29.1GW_{th}$ の新しい設備容量が全世界で導入された（Weiss and Mauthner, 2010）。2008年には、中国はグレースド型太陽熱集熱器導入数の約79%を占め、EUが14.5%とそれに続いた。

2007年と比較すると新規導入は全体で34.9%伸びていた。なお、2006年から2007年の成長率は18.8%であった。この成長の主な理由は、中国、ヨーロッパ及びアメリカでグレースド型太陽熱温水器（glazed water collector）の高い成長率を示したことである。

2008年は、2007年に比べ、世界市場は真空管太陽熱集熱器及び平板太陽熱集熱器が高い伸びを示した。非グレースド型太陽熱集熱器（unglazed air collectors）の市場も大幅に成長しており、この理由は主にカナダにおいて $23.9MW_{th}$ の新しいシステムが導入されたことである。

2007年と比較して、2008年の新たな非グレースド型、グレースド型平板、及び真空管熱集熱器の導入率は、ヨルダン、キプロス、カナダ、アイルランド、ドイツ、スロベニア、マケドニア（旧ユーゴ・マケドニア共和国）、チェルニジア、ポーランド、ベルギー及び南アフリカにて大幅に上昇している。

世界最大の市場である中国における新規導入は、2007年と比較して2008年にも大幅に上昇し、 $21.7GW_{th}$ に達した。日本では2007年に市場が縮小したが、2008年には成長率が再びプラスに転じた。

イスラエル、スロバキア共和国、及び台湾では2007年と比較して市場が縮小した。

非グレースド型太陽熱温水器の主な市場は、アメリカ（ $0.8GW_{th}$ ）、オーストラリア（ $0.4GW_{th}$ ）、ブラジル（ $0.08GW_{th}$ ）に見られる。注目すべき市場は、オーストリア、カナダ、メキシコ、オランダ、南アフリカ、スペイン、スウェーデン及びスイスで、2008年において、 $0.07\sim 0.01GW_{th}$ の非グレースド型太陽熱温水器の新規導入が行われた。

各国の市場比較は、気候及び需要条件が異なり採用する設計にも幅があるため、困難である。スカンジナビア半島やドイツでは、太陽熱加熱システムは一般に、太陽熱コンビシステムと呼ばれる温水及び暖房システムが組み合わさったものであり、このシステムの集熱器の面積は $10\sim 20m^2$ である。日本では、太陽熱室内温水システムが多く普及しているが、多くは単純な一体化予熱システムである。イスラエルの市場は気候が好ましく、太陽熱温水器の導入を命じる規則があるため、規模が大きい。最大の市場は中国で、ここでは、高度な真空管太陽熱集熱器が広く採用されている。一人当たりの利用となると、キプロスが世界で最も大きく、住民1000人当たり $527kW_{th}$ の設備容量を持つ。

太陽熱エネルギーの応用形式は国ごとに大きく変わる（Weiss and Mauthner, 2010）。中国（ $88.7GW_{th}$ ）、ヨーロッ

パ (20.9GW<sub>th</sub>)、及び日本 (4.4GW<sub>th</sub>) では、平面及び真空管太陽熱集熱器により主に温水が生成され、暖房に使われる。しかし、アメリカやカナダでは、12.9GW<sub>th</sub> の設備容量の非グレースド型のプラスチック製太陽熱温水器による水泳プール加熱への応用が依然優勢となっている。

製造プロセスに対する太陽熱システムで最も多く報告されているのは、2007 年の中国での導入である。9MW<sub>th</sub> のプラントが繊維企業への熱を生成する。総容量が 160MW<sub>th</sub> の約 150 の大規模プラント (500m<sup>2</sup> 超、350kW<sub>th</sub> 超)<sup>1</sup> がヨーロッパにて稼働中である。太陽熱による地域暖房の最大プラントはデンマーク (13MW<sub>th</sub>) 及びスウェーデン (7MW<sub>th</sub>) に設置されている。

ヨーロッパにおいて、市場規模は 2002 年から 2008 年の間で 3 倍を超えるまでに増加している。しかし、オーストリア、ギリシャ、ドイツというヨーロッパの太陽熱市場の先進国でさえ、太陽熱を利用する住宅はほんの一部である。たとえば、ドイツでは、1 世帯及び 2 世帯住宅の約 5% が太陽熱エネルギーを利用しているだけである。

ヨーロッパの市場は、太陽熱の応用の種類が最も多い地域である。これには温水生成システム、一戸建て・集合住宅及びホテルの暖房設備、地域暖房の大規模設備、及びエアコン、冷却、産業用途のシステムの増加などが含まれる。

太陽熱冷却やエアコン (Henning, 2004, 2007)、産業用途 (POSHIP, 2001)、脱塩/水処理などの高度な応用は開発の初期段階である。数百の第一世代のシステムのみが稼働中である。

太陽光発電 (PV) において、2009 年の新たな設備容量は約 7.5GW で、7.9GW の市場においては最初の出荷の段階であった (Jäger-Waldau, 2010a; Mints, 2010)。この追加により、世界における太陽光発電 (PV) の累積設備容量は約 22GW で、これは年間最大 26TWh (93,600TJ) を発電出来る容量である。この容量の 90% 超が、EU27 各国 (16GW、全体の 73%)、日本 (2.6GW、12%)、アメリカ (1.7GW、8%) の 3 つの主要市場に導入されている (Jäger-Waldau, 2010b)。これらの市場では、系統連系型太陽光発電 (PV) システムが優勢であり、太陽光発電 (PV) 市場における成長は、世界中の様々な国のプログラムによって促進されている。これらの例として、ドイツやスペインにおける固定価格買い取り制度、アメリカにおける頭金式返済インセンティブ、投資税額控除、業績ベースのインセンティブ及び再生可能エネルギー割り当て制度などの様々なプログラムがある。2010 年には、市場は新たに 9~24GW の太陽光発電 (PV) 設備容量が追加されたと推定されているが、追加容量は 13GW で意見が一致している (Jäger-Waldau, 2010a)。

図 3.9 に、ドイツ (9,800 MW)、スペイン (3,500 MW)、日本 (2,630 MW)、アメリカ (1,650 MW)、イタリア (1,140 MW)、韓国 (460 MW)、フランス (370 MW)、及び中国 (300 MW など、2009 年一年間での太陽光発電市場 (PV) の上位 8 各国とその累積設備容量を示す。スペインとドイツでは、圧倒的に太陽光発電 (PV) 設備容量の目覚ましい成長がみられる。スペインでは 2008 年に大きく伸び、ドイツでは過去 5 年間にわたり着実に伸びてきている。

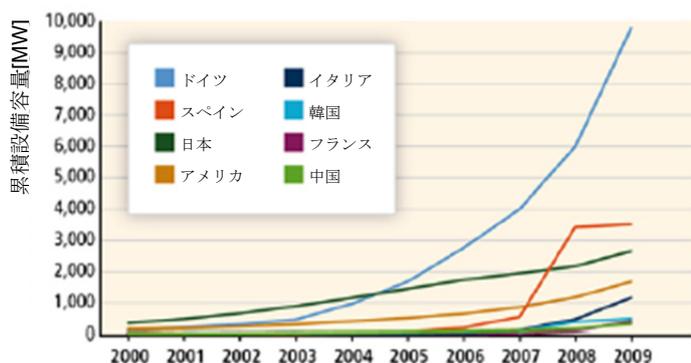


図 3.9: 8 各国の市場における太陽光発電 (PV) の設備容量。出典: EurObserv'ER (2009) ; IEA (2009c) ; REN21 (2009) ; and Jäger-Waldau (2010b)

集光型太陽光発電 (CPV) は、2008 年の終わりごろに約 17MW の累積設備容量を持っていた新興市場である。主に、高程度集光の太陽光発電 (PV) (300 倍または太陽 300 個分を超える) と、2 倍から 300 倍 (太陽 2 個から 300 個分まで) の集光係数を持つ低~中程度集光の 2 つの流れがある。集光型太陽光発電 (CPV) の便益を最大限にするためには、技術は高い直接放射を必要とし、設置する範囲は地球の「サンベルト (Sun Belt)」と地理的に制限

<sup>1</sup> 比較が出来るようにするため、欧州太陽熱産業連盟及びその他の主要太陽熱取引協会とともに、IEA は太陽熱による加熱及び冷却プログラムにて、kWth(キロワットサーマル) 単位の統計データを公表し、0.7 kWth/m<sup>2</sup> の係数を用いて太陽熱の設備容量 (kWth) へ熱収集器の面積 (平方メートル) を変換する。

される。太陽光発電 (PV) の市場占有率はいまだに小さいが、集光型太陽光発電 (CPV) に注目する企業は増えてきている。2008 年には 10MW の集光型太陽光発電 (CPV) が導入され、2009 年の市場は 20~30MW の範囲になると推定され、2010 年には約 100MW となることが期待されている。

集光型太陽熱発電 (CSP) に関して、2009 年の初めには、700MW<sub>e</sub> を超える系統接続された集光型太陽熱発電所 (CSP) が世界的に導入され、またこれとは別に 1,500MW<sub>e</sub> の発電所が建設中である (Torres et al., 2010)。導入済み発電所の多数は放物曲面型トラフ型を利用している。点集光型は建設中及び発表されている発電所の増加する割合を含む。稼働中の設備の大部分はスペイン及びアメリカ南西部に導入されている。

2007 年には、15 年を超える中断の後、最初の大規模な集光型太陽熱発電所 (CSP) が Nevada Solar One (64MW<sub>e</sub>、アメリカ) 及び PS10 (11MW<sub>e</sub>、スペイン) に出現した。スペインでは、一連の勅令が 2004 年以降発せられ、この国の集光型太陽熱発電 (CSP) を促進している。2007 年の勅令 661/2007 は、集光型太陽熱発電所 (CSP) 建設及び計画の拡張の主な原動力になっている。2009 年 11 月に、2,340MW<sub>e</sub> 規模の集光型太陽熱発電 (CSP) プロジェクトが勅令の電気料金規定に事前登録された。アメリカにおいては、4,500MW<sub>e</sub> の規模を超える規模の集光型太陽熱発電 (CSP) が、現在電力販売契約段階にある。様々な契約には、プロジェクトが 2010 年から 2015 年の間で送電を開始しなければならない時期が明記されている (Bloem et al., 2010)。10,000MW<sub>e</sub> を超える規模の新しい集光型太陽熱発電所 (CSP) がアメリカ内で提案されている。50 を超える集光型太陽熱発電 (CSP) プロジェクトが現在、主に北アフリカ、スペイン及びアメリカにて計画段階にある。オーストラリアでは、連邦政府により、Solar Flagships programme のもと集光型太陽熱発電 (CSP) 及び太陽光発電 (PV) の両方をカバーする 1,000MW<sub>e</sub> 規模の新しい太陽熱発電所が提唱されている。図 3.10 にて、現在展開中、及び近い将来に展開計画のある集光型太陽熱発電 (CSP) 能力の追加について示す。

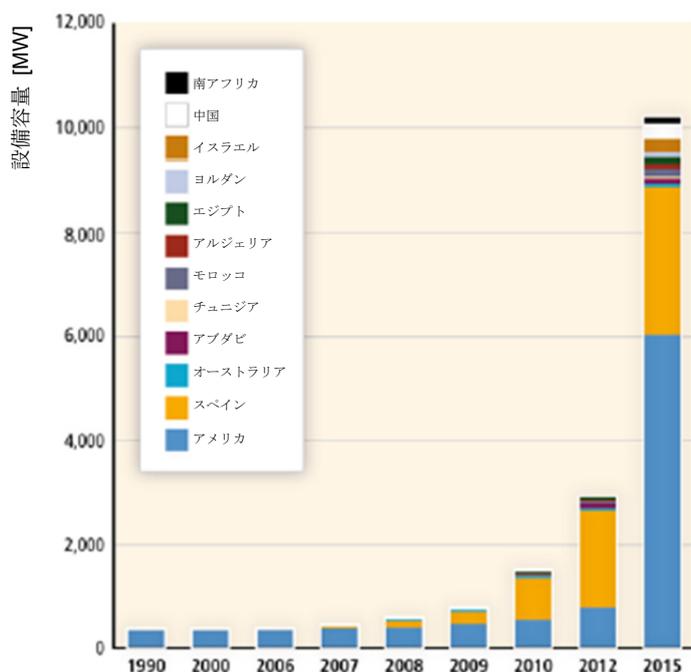


図 3.10: 国別の導入済み及び計画中の集光型太陽熱発電所 (Bloem et al., 2010)

ハイブリット型ソーラー/化石燃料発電所は、ここ数年で次第に注目されるようになってきており、いくつかの太陽熱複合発電 (integrated solar combined-cycle) (ISCC) 計画が地中海地方及びアメリカにて指示または建設中である。モロッコの最初の発電所 (Ain Beni Mathar 発電所。全体で 470 MW、太陽熱で 22 MW) は、2010 年 6 月に稼働開始し、アルジェリアの 2 基の新規発電設備 (Hassi R'Mel 発電所。全体で 150 MW、太陽熱で 30 MW) 及びエジプトの発電所 (Al Kuraymat 発電所。全体で 140 MW、太陽熱で 20 MW) は建設中である。イタリアには、太陽熱複合発電計画の別の例としてアルキメーデ (Archimede) 発電所があるが、発電所の 31,000m<sup>2</sup> 規模の放物曲面型トラフ型のソーラー・フィールドは熱伝達流体として溶融塩を利用する最初の設備となる (SolarPACES, 2009a)。

太陽燃料生産技術は開発の初期段階にある。高温太陽熱反応炉技術は一般的に 1kW<sub>th</sub> の研究所規模から 10kW<sub>th</sub> 規模の太陽熱電力入力にて開発中である。水素生成の熱化学プロセスの 100kW<sub>th</sub> 出力規模までの拡大が中温の混合酸化鉄サイクル (800~1,200°C) (Roeb et al., 2006, 2009)、及び 1,700°C を超える高温の酸化亜鉛 (ZnO) 解離反応 (Schunk et al., 2008, 2009) に関して報告されている。300~500kW<sub>th</sub> の出力幅を持つパイロット・プラントが ZnO の炭素熱還元 (Epstein et al., 2008)、蒸気メタン改質 (Möller et al., 2006)、及び石油コークスの蒸気ガス化目的で建設され

ている (Z'Graggen and Steinfeld, 2008)。ニッケル触媒を投入する太陽熱からガスへの変換が 30kW 規模において実証され、商用天然ガス自動車の走行が行われている (Specht et al., 2010)。MW 規模での実証は、燃料生産を目的とする商用の太陽熱化学プラントを建設する前に行う必要がある。これは、2020 年以降での運用開始が期待されている (Pregger et al., 2009)。

燃料への太陽エネルギーの直接変換はまだ、広範囲への実証や商品化はなされていない。しかし、短期から中期において次の 2 つの内容の商品化が実現出来ることが明らかになっている。1) ソーラー・ハイブリッド燃料生産システム (太陽熱メタン改質及び太陽熱バイオマス改質を含む)。2) 太陽光発電 (PV) または集光型太陽熱発電 (CSP) の電気分解。

オーストラリア連邦科学産業研究機構では、250kW<sub>th</sub> 反応炉を稼働中で、太陽熱蒸気改質技術を用いる MW 規模の実証プラントを建設する計画を立てている。より高い性能を引き出し、水の利用をより抑えるため、最終的には二酸化炭素改質へ移行する。このシステムを用いて、液体太陽燃料はオーストラリアなどのサンベルトにて生産することができ、商業ベースで太陽エネルギーをアジアやその他の地域へ出荷することが出来る。

太陽 (太陽光発電または集光型太陽熱発電) 水電解にて生成される気体酸素は、石炭のガス化や天然ガスの部分酸化に利用することが出来る。太陽水電解及び石炭またはメタンの部分酸化の複合プロセスにより、論理的には太陽エネルギーの 10~15% がメタノールまたはジメチルエーテルに組み込まれる。また、ハイブリッド太陽燃料の生産コストを、太陽水電解プロセスのみで生成される太陽水素の生産コストよりも低く抑えることが出来る。

### 3.4.2 生産能力とサプライチェーン

この小節では、パッシブ太陽エネルギー、アクティブ太陽エネルギー利用による加熱と冷却、太陽光発電 (PV)、集光型太陽熱発電 (CSP)、及び太陽燃料生産の 5 つの技術範囲における生産能力とサプライチェーンについて説明する。

パッシブ太陽技術において、協調してパッシブ暖房の建築物を設計・建設する、いわゆる技術者及び建築家という人々が生産能力及びサプライチェーンの一部となる。過去には、この 2 つの領域間の密接な協調は欠けていたが、様々な国が発表する体系的な設計方法の浸透によって設計能力が向上してきた (Athienitis and Santamouris, 2002)。

建築物の設計及び運用段階の両方におけるパッシブ太陽エネルギーシステムとアクティブ冷暖房空調 (heating/cooling air-conditioning) システムの統合は、エネルギーを節約し快適な環境を実現するには欠かせないのである。しかし、建築家と技術者との間の統合建築物設計に対する協調が不十分なため、これは見過ごされてきた。したがって、建築家はパッシブ太陽エネルギー設計の質的原則のみを基に建物外皮を設計することが多く、技術者は日射取得や自然の冷却による便益を要因としない、極端な設計条件を基に暖房・換気・空調システムを設計することが多い。この結果、特大サイズのシステムができ上がり、パッシブ・システムにそぐわない不適切な制御となる可能性がある。また、これは、過度な暖房を行うことになり、不快感を与えかねない (Athienitis and Santamouris, 2002)。建築設計に関係する分野間の協調は総合分析及び設計に対するコンピュータ・ツールの採用により改善しつつある。

ほぼ赤道に面した窓の面積が多い高度大衆建築物 (high-mass buildings) の設計は、南ヨーロッパなど世界の一部の地域でよく見られる。しかし、このような建物の設計の系統的方法は、まだ広く採用されていない。この方法はドイツやその他の国々におけるパッシブ住宅基準 (PHPP, 2004)、欧州指令、及びドイツのものを手本にした中国の基準など新規法律の導入により変化している。

グレーディング及び窓の技術は、ここ 20 年で十分に発展してきている (Hollands et al., 2001)。新世代の窓は低エネルギー損失、高い採光効率、日射遮蔽及び防音という結果をもたらす。半透明太陽光発電窓、エレクトロクロミック窓、サーモクロミック窓などの新技術は十分な採光が可能なソーラー住宅及び事務所の設計に大きな可能性をもたらす。一般的な二重窓から低放射率アルゴン二重窓への変更は、現在カナダで行われており、これらの窓の価格の急速な下落により加速している。

パッシブ太陽エネルギーシステムにおける低音蓄熱の主要材料はコンクリート、レンガ及び水である。IEA SHC Task32 の下、Hadorn (2008) による様々な技術の比較に注目した蓄熱材料のレビューが行われている。相変化物質 (PCM) 蓄熱 (Mehling and Cabeza, 2008) は特にソーラー建築物の設計、管理及び負荷管理について、将来有望である。これは、コンクリート型建築において、多量の顕熱蓄熱に必要とされる従来の構造的補強ニーズを減少させるためである。統合を促進する最近の開発は、漆喰との混合が可能で、内面に塗ることが出来るマイクロカプセル化相変化材料を含む (Schossig et al., 2005)。マイクロカプセル化ポリマー内の相変化材料は、現在市場に出回っており、漆喰、石膏またはコンクリートに混ぜて、部屋の熱容量を高めることが出来る。改装の際に、この材料は、構造的な補強が必要な新しく重量がある壁に対する適切な代替品を提供する (Hadorn, 2008)。

相変化材料が改善されていても、コンクリートは多くの地中海諸国における事例のとおり、大規模な建築物設計方

法を採る際の蓄熱に一定の効果を持っている。この方法においては、コンクリートが建築構造としても供給されており、上記の新たな機能を持たない蓄熱と比較してもコスト効率が高い可能性が高い。

アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却について、多数の異なる熱集熱器技術及びシステム・アプローチが、家庭内温水、暖房、予熱及び複合システムなどの様々な用途及び気候条件の変化により発展してきている。

選択被膜のような製造プロセスの一部において、大規模産業生産レベルが達成されている。銅、アルミ、ステンレスなどの多くの材料が用いられ、様々な溶接技術と組み合わせて、熱集熱器において効率の良い熱変換プロセスを実現している。カバー・ガラスに利用される材料は構造化されているか、平坦な低鉄ガラスである。最初の反射防止被膜は産業規模にて市場に出る予定であり、効率を約 5%向上させる。

一般的に、真空管集熱器は高温の用途に適している。真空管集熱器の生産は、現在中国の Dewar 管が多数を占めている。これには金属製の熱変換器が組み込まれており、従来の温水システムと接続されている。また、金属製の集熱装置を持つ、いくつかの標準的な真空管集熱器が市場に出回っている。

太陽熱温水システムの主要な輸出国は、オーストラリア、ギリシャ、アメリカである。ギリシャからの輸出の大半はキプロス及び地中海近隣諸国へのものである。フランスも、自身の海外領土へ大量のシステムを出荷している。アメリカの輸出の大半はカリブ海地域に対するものである。オーストラリアの企業は製品の約 50% (主に外部水平容器を持つ自然循環式システム) を世界の大半の地域に輸出しているが、この地域は硬氷結がない地域である。

太陽光発電 (PV) はすべての太陽電池生産、薄膜モジュール生産及びポリシリコンの生産範囲において検討されている。太陽光発電 (PV) 部門の開発特性は、年間成長率が 40~50%で高い学習率を持つため、従来の電力部門とは大きく異なり、半導体市場の方により類似している。そのため、統計時間の遅延の性質とデータの統合整理により、審査のある科学論文は実際の市場展開に数年間の遅れをとる可能性がある。この活力に満ちた市場を追跡し続ける唯一の方法は、商業的市場データを利用することである。2009 年には、世界的な太陽電池 (PV) 生産<sup>2</sup>は 11.5GW を超えるまでになった。図 3.11 は 2000 年から 2009 年までの生産量の増加をグラフ化したもので、地域ごとの寄与分を示している (Jäger-Waldau, 2010a)。2003 年から 2009 年にかけての太陽光製造生産における年平均成長率は 50%を超える。

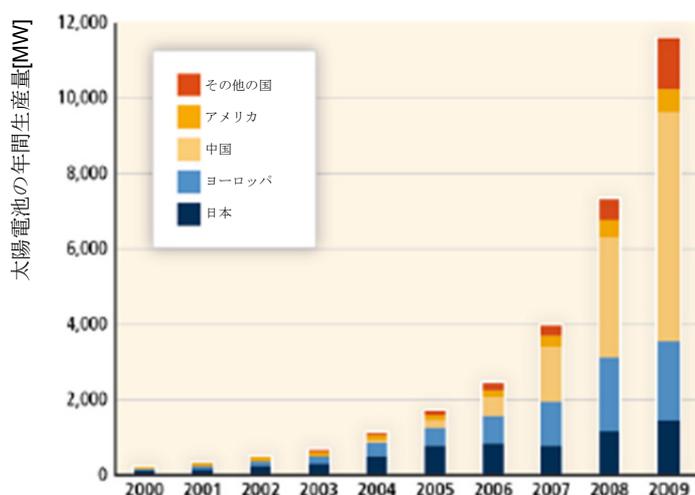


図 3.11: 2000 年から 2009 年までの世界の太陽電池 (PV) 生産量 (Jäger-Waldau, 2010b)

世界の 300 社を超える調査に基づく、公表された生産能力は、2009 年の非常に厳しい経済状況の中でも増加している (図 3.12) (Jäger-Waldau, 2010b)。サードパーティ企業の情報ではなく、代表的な企業から公開された情報のみを使用している。2010 年 4 月が、この含まれる情報の締切日であった。この方法には、すべての企業が事前に自身の生産能力の増加を発表するわけではないという欠点がある。また、経済的な逼迫時には、混乱防止のため拡張計画における縮小の発表が遅延する。つまり、生産能力は動向を生み出すが、最終的な数値を表しているわけではない。

<sup>2</sup> 太陽電池生産能力とは以下のとおりである。ウェハ・シリコンをベースとした太陽電池においては、電池のみを指す。薄膜においては一体化されたモジュール全体を指す。実際にアクティブ回路 (太陽電池) を生産している企業のみをカウントしている。これらの回路を購入しモジュール化している企業は含まない。

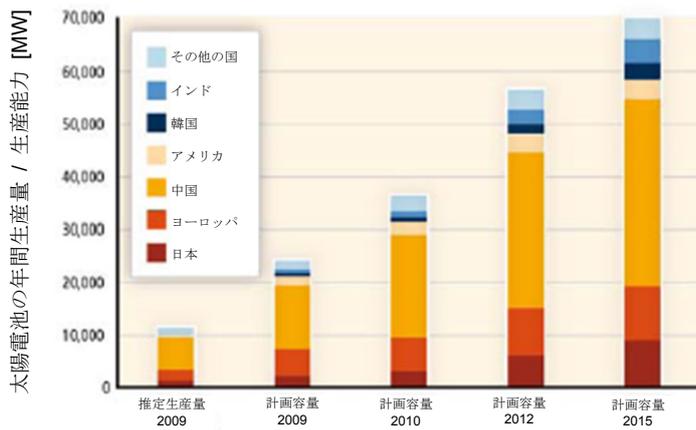


図 3.12: 公表された生産能力と比較した 2009 年の世界の年間太陽電池 (PV) 生産量 (Jäger-Waldau, 2010a)

2008 年及び 2009 年において、中国の生産能力は過度に増加している。生産実績では、中国はすべての国を追い越し、2009 年は 5.4~6.1GW (台湾の生産量 1.5~1.7GW を含む) と計算されている。ヨーロッパは 2.0~2.2GW、続いて日本が 1.5~1.7GW となっている (Jäger-Waldau, 2010b)。生産では、ファースト・ソーラー社 (アメリカ・ドイツ・フランス・マレーシア) が 1 位であり (1,082 MW)、750MW のサンテック社 (中国)、580MW のシャープ (日本) と続く。

これらすべての意欲的計画が 2015 年までに実現出来るとすると、中国は、世界の生産能力 70GW の約 51% (台湾の 16%を含む) を占めることになり、ヨーロッパ (15%)、日本 (13%) と続く。

世界では 300 を超える企業が太陽電池を生産している。2009 年には、シリコン・ベースの太陽電池及びモジュールが世界市場の約 80%を占めていた (図 3.13)。生産能力が大幅に増えたことに加え、現在の開発は薄膜太陽電池の市場占有率は 2012 年までに 30%を超えると予測している。

2005 年には、薄膜太陽光発電 (PV) モジュール の生産は年間 100MW まで成長した。その後、薄膜太陽光発電 (PV) モジュール生産の年平均成長率は業界成長率を超えて上昇した。そのため、薄膜製品の市場占有率は 2005 年の 6% から 2009 年の約 20%にまで上昇し、薄膜製品の割合の大部分を、最大の太陽電池 (PV) 企業が占めている。

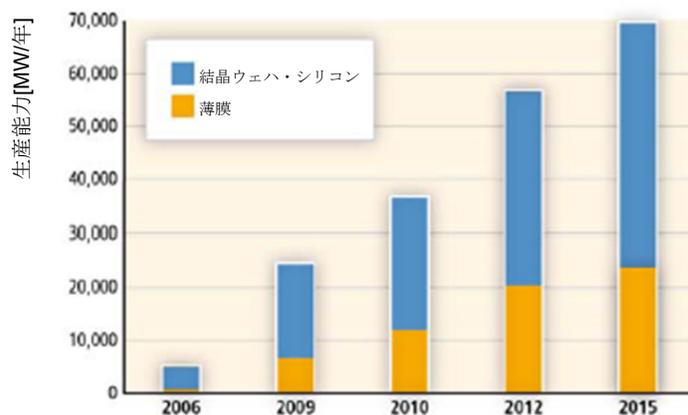


図 3.13: 薄膜及び結晶シリコンをベースとした太陽電池の生産能力。実績 (2006 年) と発表された計画値 (2009 年から 2015 年まで) (Jäger-Waldau, 2010b)

150 を超える企業が、研究開発から主要製造工場までの薄膜太陽電池の生産プロセスに携わっている。2007 年に最初の 100MW 規模の薄膜太陽電池工場が稼働し、2008 年には新たな生産能力の発表が再び相次いで行われた。すべての拡張計画が計画通りに実現された場合、薄膜太陽電池の生産能力は 2012 年には 20.0GW、すなわち全体 (56.7GW) の 35%を占めるようになり、2015 年には 23.5GW で全体 (70GW) の 34%を占めるようになると思われる (Jäger-Waldau, 2009, 2010b)。GW レベルの生産能力を持つ最初の薄膜太陽電池工場では、様々な薄膜技術に対するものが既に建設段階に入っている。

2000 年以降の太陽光発電 (PV) 産業の急速な成長は 2004 年から 2008 年初めの状況を変化させ、ポリシリコンの

需要が半導体産業からの供給を追い越すまでになった。これによりシリコン不足が発生し、その結果、シリコン現物市場の価格は、2003年の25.5USドル(2005年)/kg(2005年のUSドル。2008年をベースに想定)と比較して、2008年には450USドル(2005年)/kgにまで高騰し、太陽光発電(PV)モジュールの価格も連動して上昇した。この大幅な価格上昇は、大幅な生産能力の拡大を引き起こし、会社設立だけではなく、多くの新規参入者を呼び込む結果となった。

Semiconductor Equipment and Materials Internationalの報告(SEMI, 2009a)によると、出荷数を報告した6社は、2008年に合計で約43,900トンのポリシリコンを供給した。2008年には、これらの企業は48,200トンのポリシリコンの生産能力を持っていた(Service, 2009)。しかし、最新及び代替技術を持つ新規参入者を含むすべてのポリシリコンの生産者が、2008年には90,000トンを超えるポリシリコンの生産能力を持っていた。新規生産能力のすべてが、実際にポリシリコンを2008年の表示能力で生産したわけではないと考えられ、62,000トンのポリシリコンが生産されたと推定された。半導体産業のニーズを減少させ、リサイクル及び過剰生産を増やしたため、太陽光発電(PV)産業向けに利用可能なシリコンの量はポリシリコン46,000トンと推定されている。材料ニーズの平均値は $8.7\text{g}/W_p$ ( $p$ はピークを表す)であり、これは、5.3GWの結晶シリコン太陽電池(PV)を生産するのに十分な量であると思われる。

コスト削減と主要市場の安全確保の制御により、2つの興味深い傾向がみられるようになった。1つは大規模な独自設計の生産装置への移行で、半導体産業における開発に類似することである。2つ目は末端市場に近いモジュール生産の一部に移行する太陽熱産業が増加し、潜在的な地方の雇用創出が明らかになり、現行政策を確実に支援することである。これは、低コストまたは補助を受けた市場の産業への移行でもある。

ポリシリコンの生産能力の地域の寄与は以下のとおりである。中国:20,000トン、ヨーロッパ:17,500トン、日本:12,000トン、アメリカ:37,000トン(Service, 2009)。

2009年、ソーラー用のシリコン生産は約88,000トンであると報告され、これは材料必要量の平均値を仮に $8\text{g}/W_p$ とする約11GWの太陽光発電(PV)にとって十分な量である(Displaybank, 2010)。中国は世界の需要の20%を占める約18,000トンを生産しており、中国の国内需要の約半分を占める(Baoshan, 2010)。

2012年のソーラー用途シリコンの生産能力の予測は、既存のポリシリコン生産者からの140,000トンから、新規生産者を含めた250,000トン(最大)までの範囲となる(Bernreuther and Haugwitz, 2010, Ruhl et al., 2010など)。太陽電池の生産可能量は $W_p$ 当たりの材料使用量にもよる。材料消費は現在の $8\text{g}/W_p$ から $7\text{g}/W_p$ 、またはさらに $6\text{g}/W_p$ まで減るだろう(送電される太陽光発電(PV)量がそれぞれ31GW、36GW、42GWへ増加すると思われる)。しかし、この材料消費の減少はすべての製造者が達成出来るわけではない。

将来の必須材料のコスト予測は、注目すべき歴史を持っており、薄膜電池生産に使用される一部の(半)金属(インジウムやテルルなど)に関する材料不足の可能性と競争について公開討論が続けられている。最近の研究では、Wadia et al. (2009)が、アクティブ光生成材料として最も有望な半導体の1ワット当たりの材料供給と最低コストという二重制約を調べ、太陽光発電(PV)の拡張に対する材料的限界を研究した。一般に予測されるインジウム及びテルルの不足に反し、この研究は、現在知られているこれらの材料の経済的埋蔵量により、約10TWのカドミウムテルルまたは銅インジウムジサルファイド太陽電池(PV)が設置可能であると考えられると結論付けている。

集光型太陽熱発電(CSP)において、太陽熱集熱器分野は容易に拡張可能であり、電力ブロックは、蒸気及びガスタービンのような既存の電力産業から得た知識をもとにしている。集熱器は、それ自身、機械技術者、構造技術者及び総括技術者や冶金技術者などの既存のスキル群の範囲から便益を得る。ガラス・ミラーなどの熱集熱器に使用される材料または構成物はすでに大量生産されていることが多い。

2010年の終わりには、競争が激化し、ガラス・ミラーなどの材料や生産した構成物を供給する生産レベルの能力を開拓した企業が増えてきた。それにもかかわらず、特に発電用のトラフ型/石油システムでの使用を想定して設計された大型の真空管は、専用の構成物のままであり、2社(Schott社とSolel社)のみが管の大量注文に対応してきた。しかし、サードパーティ企業(アルキメデス)が現在、現れつつある。トラフ型集光型太陽熱発電自身は構造と熱でたわんだガラス・ミラーの両方のノウハウを取り込んでいる。より多くの企業が新しいトラフ型設計を提供し、従来の背面が銀のガラスの代案(ポリマーをベースとした反射膜など)を検討しているが、集光の基幹技術は変更されないままである。トラフ型における直接蒸気発生(Direct steam generation)は、熔融塩の直接加熱のとおり実証段階にあるが、この設計はまだ商業使用に至っていない。この設備の運用が成功した結果を受け、トラフ型/石油技術は2010年において集光型太陽熱発電(CSP)の設備容量の大部分を占めていた。

線形フレネル型及び点集光型システムは高レベルのノウハウを持つが、基幹産業は、多様な新規産業参入者にとって可能性を含むものである。過去においては2社のみが集光タワーに関与してきたが、ここ数年、市場へ新規に参入する企業が出てきている。実証レベルの技術開発者及び計画も存在する(中国、アメリカ、イスラエル、オーストラリア、スペイン)。集光タワーの開発者はより高温の、一部の事例では、熔融塩のような熱伝達流体の代替品

を目標としている。今日の標準であると認められたものは大規模なヘリオスタットの利用であるが、多くの新規参入者はより小規模なヘリオスタットを追求し、大量生産にてコスト削減を行っている。ヘリオスタット開発に興味を持つ企業は現在、光学分野の企業から、多角化を目指す自動車産業まで多岐にわたる。高温蒸気集熱器はボイラー業界の既知の知識から便益を得ている。同じく、線形フレネル型によって幅広い新規開発が生み出されているが、点集光型と同程度ではない。

ディッシュ技術は非常に専門的で、現在は多くの試みが商品としてのディッシュ/スターリング構想の開発に向けられている。繰り返すが、この技術は、自動車産業において大量生産されているスターリング・エンジンなどの特別な工業ノウハウを用いる特化した部品として開発されている。

2010年以前の10年未満の間に、集光型太陽熱発電 (CSP) 産業はほんの小さな活動から、発注済みまたは建設段階となり、2,400MW<sub>e</sub>を超えるまでに至った。新規集光型太陽熱発電所 (CSP) とその特徴のリストは IEA SolarPACES のサイトで見ることが出来る<sup>3</sup>。3年前には商業規模の発電所を建設する状況にあった企業はおそらく2、3企業のみであったが、現在では10を超える企業が商業規模の発電所を建設または準備活動を行っている。これらの企業は、国際建設や特殊技術の既得権を持つプロジェクト管理の専門知識を有する大規模な組織から、社内で開発した自社技術を基にする新興企業まで様々である。さらに、主要な独立系発電事業者及びエネルギー公益事業は、集光型太陽熱発電 (CSP) 市場における役割を担っている。

サプライチェーンは原料から制約を受けない傾向にある。これは、必要な材料の大半がガラス、鋼鉄やアルミ、及びコンクリートのような一括売買品 (bulk commodity) であるためである。熔融塩を貯蔵するための天日塩混合材料の突然の新規要望は、供給に影響を与えてきたといわれる。現在、トラフ型プラント用の真空管が、一年あたり数百 MW を提供するのに十分な割合で生産が可能である。しかし、18ヶ月のリードタイムを持って、新しい工場に容易に容量を拡大することが出来る。

太陽燃料技術はまだ新興のものであり、したがって、現在、商業用途向けに機能しているサプライチェーンは存在しない。太陽燃料は、他の高温集光型太陽熱発電 (CSP) システムで普及しているものと同じソーラー・フィールド技術の大部分で構成される。しかし、太陽燃料は焦点に異なる集熱器/反応炉、及び様々な下流プロセスと制御を必要とする。フィッシャー・トロプシュ液体燃料工場のような下流技術の多くは、石油産業の既存の専門知識からもたらされるものである。太陽燃料実証工場の規模は、産業の信頼性を築くために大きくなりつつあり、最終的には事業を拡大する。

水素はその多用途性、無公害な最終利用及び貯蔵能力により将来の輸送用燃料とうたわれている。カギは持続可能性、太陽熱のような二酸化炭素ゼロの水素源、コスト効率のいい貯蔵、及び適切な分配インフラである。太陽水素の生成は、それ自体は、チェーン内に多くの因子が必要であるため、水素経済を作り出さない。提案されている太陽水素までの経路は、既存の蒸気改質プロセスの太陽熱強化、太陽熱電力及び高度な電気分解を含む2つめの発電及び熱分解または高度な熱化学サイクルを用いた3つ目の発電とともに開始する。その際、多くの研究者は集光型太陽熱エネルギー、水及び二酸化炭素から燃料を生成することを目標とする。転換期の観点より、太陽水素は天然ガスと混合され、既存のパイプラインや顧客への分配ネットワークにて天然ガスとともに輸送されることにより、世界的なエネルギーの組み合わせのなかで太陽エネルギーの占める割合が増強されて行くこととなる。

水素生成のための天然ガスの蒸気改質は、今日では、世界の水素の大部分を生成する従来型工業規模プロセスであるが、化石燃料原材料の燃焼から発生するプロセスの熱をかなりの割合で用いる。代わりに熱源として集光太陽熱を用いれば、燃料に太陽熱エネルギーを統合させ得る。太陽熱による天然ガスとその他の炭化水素の蒸気改質、石炭とその他の炭素質材料の蒸気ガス化は、高品質な合成ガスを生成する。これは、フィッシャー・トロプシュ型の化学物質、水素、アンモニア、及びメタノールを含む多種多様な合成燃料の構成要素である (Steinfeld and Meier, 2004)。

太陽熱クラッキング経路は天然ガスなどの炭化水素の熱分解を指す。水素と炭素に限らず、反応速度論に応じて、原材料内の不純物の存在に左右されるが、その他の合成物も形成される。熱分解は炭素に富んだ凝縮相及び水素に富んだ気相を生み出す。炭素質の固体生成物は、二酸化炭素の放出がないように隔離されるか、比較的軽度の二酸化炭素の制約のもと商品材料 (カーボン・ブラック) として使用される。これは、冶金プロセスにおける還元剤としても使用することが出来る。水素に富んだ気体混合物は、一酸化炭素に汚染されていない純度の高い水素へとさらに処理することが出来る。それにより、プラチナ電極を阻害することなく固体高分子形燃料電池にて使用することが出来る。炭素隔離の観点からみると、ガス状の二酸化炭素よりも固体炭素の方が分離、処理、輸送及び保存がしやすい。さらに、熱クラッキングは、一段階で炭素の除去や分離を行う。熱クラッキングの主な欠点は、炭素隔離に関連するエネルギー損失である。そのため、太陽熱クラッキングには、高い水素/炭素比を持つ天然ガスなどの炭化水素を選択することが推奨される (Steinfeld and Meier, 2004)。

<sup>3</sup> [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org) を参照

### 3.4.3 政策の影響<sup>4</sup>

直接的太陽エネルギー技術は幅広い用途に対応し、その普及は第1章に記述した多くの障壁に直面している。太陽エネルギー利用技術の成熟度はそれぞれ異なり、地域市場ではすでに競争力のある用途もあるが、それらは一般的にコスト削減の必要性という1つの共通の障壁に直面している(3.8節を参照)。実用規模の集光型太陽熱発電(CSP)及び太陽光発電(PV)システムには、分散型太陽光及び太陽熱を利用した加熱・冷却技術とは異なる障壁がある。重大な障壁としては以下のようなものが挙げられる。1) 発電所規模のプロジェクトに好都合な太陽資源をもつ土地開発における立地・認可・財務上の課題。2) 電力需要地から離れた大規模なプロジェクトのための送電線へのアクセスの欠如。3) 小規模なプロジェクトの場合の複雑なアクセス規制・認可の手順・料金。4) 分散型発電による電力の価値を捕捉する一貫した連系基準と時間変動使用料金体系の欠如。5) 一貫性のない基準・認可とこれらの発行。6) 技術をまたいで環境・リスク緩和の便益を得る規定体系の欠如(Denholt et al., 2009)。

適切な政策設計を通して(第11章参照)、政府は研究開発に資金提供し、経済的障壁を乗り越えるインセンティブを提供することで太陽技術を支援出来ることを示してきた。たとえば、固定価格買い取り制度(FIT)政策がドイツ及びスペインにおける太陽光の普及レベルを上昇させた後、価格を要因とする手段(11.5.2節を参照)が一般化した。2009年、様々な形の固定価格買い取り制度政策が50を超える国で実施された(REN21, 2010)。また、建築物埋め込み型太陽光発電に対する割増料金を提供する案もある。再生可能エネルギー利用割合基準(RPS)、政府競売などの割り当て主導の枠組みは、それぞれアメリカと中国で一般的である(IEA, 2009a)。従来のRPSの枠組みは、技術的に中立となるよう設計されている。このことは、風力のような代替手段に比べコストが高い多くの太陽技術の応用事例を不利なものにしている。それに応じて、RPSの枠組みの機能(セットアサイド及びクレジット)は太陽熱特有の政策を次第に含むようになり、これらのプログラムは太陽利用設備のレベルを上昇させてきた(Wiser et al., 2010)。これらの規制枠組みに加え、財政政策及び資金調達メカニズム(税額免除、ソフトローン、助成金など)は、太陽熱製品の製造の支援及び消費者需要の増加のためによく使用される(Rickerson et al., 2009)。太陽プロジェクトの資金供給確保の取り組みは、重大な障壁、特に短期の取引と計画が多くを占める市場構造における技術開発に対する障壁となる。

最も有効なソーラー関連政策は、特定の用途によって課される障壁に合わせて調整されている。技術全体では、比較的高額な事前投資コストを相殺する必要がある(Denholt et al., 2009)。また、発電所規模の集光型太陽熱発電(CSP)と太陽光発電(PV)プロジェクトの場合、分散型市場における太陽エネルギーの応用を超えるレベルでの、十分かつ長期にわたる投資が必要である。太陽熱による加熱・冷却技術は多くの政策に含まれているが、その応用の特徴は発電技術とは異なる。集熱器の表面面積よりもエネルギー生産量に基づく政策は、一般に様々な形式の太陽熱集熱器にとって望ましい(IEA, 2007)。詳細説明は1.5節を参照のこと。

他の再生可能資源と同様に、コスト効率のよい方法を用いてイノベーションを促し、普及を加速させる、現行の太陽エネルギーに関する政策の長所について、継続して議論が行われている。一般に、また、11章で述べたとおり、市場に明確で長期的かつ一貫したシグナルを送るものが最も有効な政策である。対象の経済的政策に加え、教育をベースとする方法(ワークショップ、社員研修プログラムやセミナー)を用いた政府の活動及び規制機関の関与は、この節にて挙げた数多くの障壁を乗り越える手助けをしている。

## 3.5 広範囲のエネルギーシステムへの統合<sup>5</sup>

この節では、直接的太陽エネルギー技術が、どのように広範囲のエネルギーの枠組みへ統合されているかを、特に以下の点に焦点を当てて説明する；低容量エネルギーの需要、地域暖房及びその他の熱負荷、太陽光発電(PV)の特徴とならし効果、及び集光型太陽熱発電(CSP)の特徴と系統安定化。第8章では、太陽エネルギー及びこの統合に伴う現状の出来事と統合コストに関する研究を含む、一部の再生可能エネルギー技術に特有の特徴の利用、製品のばらつき、予測可能性の限界、及び配置依存について、広範囲にわたる技術的、制度的選択肢について取り上げる。

### 3.5.1 低用量電力需要

多くの発展途上国においては、非再生可能燃料ではなく太陽エネルギーを使用することで、相対的な利点を受ける。国内では、この利点は都市部に比べ、電化されていない地方の方が恩恵を受けることが出来る。実際に、太陽エネルギーはモジュール化することで、小規模な分散型供給が可能で、大規模集中型の供給も可能というメリットがある。太陽エネルギー技術組み込み型建築物及び住居の詳細については、8.3.2節を参照のこと。

<sup>4</sup> 非技術特有の政策問題は本報告書の第11章にて取り扱う。

<sup>5</sup> 現在及び将来のエネルギーシステムにおける再生可能エネルギー統合に関する非技術特有の問題は本報告書の第8章にて取り上げる。

世界の様々な国で、特に非産油国で、太陽エネルギー及びその他の形式の再生可能エネルギーは最適なエネルギー源となりうる。電力需要が供給を超える場合、電力不足により多数の経済部門の発展が妨げられる可能性がある。持続可能な太陽エネルギーの高い開発能力を持つ国でさえ、再生可能エネルギーは工業部門などの高電力要件を満たすとは考えられていないことが多い。しかし、集光型太陽熱発電 (CSP) のような大規模な技術は、資源の状態や適切な土地利用が可能かどうかなどを理由に、利用出来ないこともある。このような場合においては、工業のニーズを満たすための大量の電力を供給するため、発生源付近で発電を行い続けるのが妥当なのである。

地方の照明など電力消費の低い用途は、この地域の電化事業計画にて系統連系の方がより利益になることを示したとしても、主としてオンサイトで太陽光発電を用いることで実現出来る。さらに、地方の電化にとってどの選択肢が技術的に最適かを判断する基準は、地方の経済発展、天然資源の開発、雇用創出、国の輸入依存度の低減、及び環境保護などの便益を含まなければならない。

### 3.5.2 地域暖房及びその他の熱負荷

断熱性の高い建築物は比較的低温の地域暖房システムにて容易に温められる。ここで、太陽エネルギーは理想である、つまり再生可能発電がごく少量で済む (Boyle, 1996)。地域冷暖房システム (DCS) は建物群に冷房及び暖房の両方を提供出来る。地域暖房システムではすでに室外配管網が利用可能になっているため、地域冷房も建築物の冷房の要望に対する実現可能な解決策となる。アメリカ、ヨーロッパ、日本及びその他のアジア各国において、多くの地域冷暖房システムが既に設置されている。これは、分散型冷房システムに比べ、多くの利点があるからである。たとえば、地域冷暖房システムは、異なる建築物の冷房要望の規模や多様性による経済的利点を最大限活用し、騒音や構造的不可を軽減し、大規模な設備規模を低減する。また、屋上の冷却塔や、建築物及び屋根の上の冷却プラントを撤去することで、より柔軟性のある建築設計が可能となる。また、寒冷地において専門家チームから、より信頼性や柔軟性の高いサービスを受けることが出来る (Shu et al., 2010)。地域冷暖房網における再生可能エネルギー統合についての詳細は、8.2.2.3 節を参照のこと。

中国、ギリシャ、キプロス及びイスラエルでは、太陽熱による温水器は住宅エネルギー需要を満たすという大きな貢献を果たす。また、太陽熱温水システムは、オーストラリア及びアメリカにて水泳プールの加熱にも広く使用されている。電力が温水システムの主要な資源である国 (オーストラリア、カナダ及びアメリカなど) では、稼働する送電システムのもとにある多数の家庭用太陽熱温水器の影響は、設備負荷管理戦略に基づく。電気による水加熱負荷の管理に集中型負荷切り替えを利用する設備の場合、その影響は燃料の節約に限られる。負荷切り替えがない場合、多くの太陽熱温水器はシステムのピーク需要の削減という新たな便益を得る可能性がある。夏季にピークを迎える設備の場合、太陽熱温水器の最大出力時間は電力需要ピークに対応し、電気温水器の満載排水量から容量の便益が得られる。太陽熱温水システムの大規模な普及は顧客及び設備の両方に便益を与える。設備に対する他の便益は排出量削減である。これは、ピークロード電力を生み出すのに使用される隣接する公害発生プラントを太陽熱温水システムに置き換えることが出来るからである。

バイオマスと低温太陽熱エネルギーの組み合わせは、頻度の少ない直接太陽放射のある地域に対し、排出ゼロ及び高設備利用率をもたらす。短期では、曇り空や雨天候が多いため、バイオマスの可用性が上がり、その範囲で局所的相殺が行われる。しかし、太陽熱技術はエネルギー生産にとって土地効率がよく、バイオマスの栽培面積地域やバイオマスの輸送コストの必要性を大幅に削減する。集光型太陽熱発電 (CSP) とバイオマス供給の最適比率は、敷地ごとにいくつか存在する可能性が高い。バイオマスの太陽熱主導型ガス化など、再生可能資源同士を最適に組み合わせる技術を開発するためのタワー及びディッシュ・システムの研究が行われている。より長期においては、様々な気候の大きな相互関連性により、より安定した送電システム全体としての供給が実現する。この状況は、個々の集光型太陽熱発電 (CSP) システムに対する臨時的燃料供給の必要性を低減する。

### 3.5.3 太陽光発電の特徴とならし効果

ある特定の場所における太陽光発電 (PV) システムの場合、発電量は日々、及び一年を通しての規則正しい変動だけでなく、気候条件による不規則な変動もある。この太陽光発電 (PV) の変動は、たとえば、普及の初期段階から局所的送電/配電システムにおける電圧や電力潮流に対して、また高普及率段階の全電力システム運用時の需給バランスに対して大きく影響する (ソーラー電力特性の詳しい説明や、電力市場計画、運用及びインフラに対するソーラー電力の影響については 8.2.1 節を参照のこと)。

太陽光発電 (PV) の統合に対する重大な制約を有する電力システムの需給バランスの影響について、様々な研究が発表されている (Lee and Yamayee, 1981; Chalmers et al., 1985; Chowdhury and Rahman, 1988; Jewell and Unruh, 1990; Bouzguenda and Rahman, 1993; Asano et al., 1996)。これらの研究は概して、太陽光発電 (PV) システムの普及率が増加しても、太陽光発電 (PV) の高い変動性により太陽光発電 (PV) システムの経済的価値が大幅に減少してしまうと結論付けている。今日のベースロード発電は、太陽光発電 (PV) システムの実現可能な普及を制限する限定的な温度変化速度 (ramp rate) を持つ。この速度は発電機が自身の出力を変更出来る時のものである。しかし、

これらの研究は概して、複数の敷地から得られる高い分解能を持つ太陽光発電 (PV) 出力データが欠けている。広い範囲における多数の太陽光発電 (PV) システムの全発電は不規則性が低く、また早い変化が少なくなければならない。これは、多数の太陽光発電 (PV) の発電出力の変化は相互関係が低く、「ならし効果」において互いに打ち消しあうからである。電力の需給バランスへの重大な影響は、電力システム内の太陽光発電 (PV) システムの全発電からくるものである (Piwko et al., 2007, 2010; Ogimoto et al., 2010)。

ならし効果の分析手法の一部では、モデル及び世界から得た測定データを利用する。10~100,00km<sup>2</sup> (Jewell and Ramakumar, 1987) まで、また 0.2km<sup>2</sup>まで (Kern and Russell, 1988) の大きさの地域を考慮して、地域的多様性のならし効果を評価するためにクラウド・モデルが開発されてきた。測定データを使用し、Kitamura (1999) は、大きさ、晴天及び曇りの間の移行時間、及び大きさと移行時間の比率と定義されている移行速度の 3 つのパラメータを考慮し、変化を類型化するための一連の仕様を提案した。Kitamura (1999) は 0.1km×0.1km の小領域におけるならし効果を評価した。同様の方法の「傾斜波 (ramp) 分析」が Beyer et al. (1991) と Scheffler (2002) により提唱された。

統計的手法において、Otani et al. (1997) はハイパスフィルタをかけた太陽放射の時系列を用いる変動値により放射照度データの特徴を示した。Woyte et al. (2001, 2007) はウェーブレット変換により、瞬間的な晴天指数の変動を分析した。Otani et al. (1998) は 4km×4km の小領域内でも 1 時間未満の放射光の変動が地理的多様性により減少する可能性があることを示し、ならし効果を示した。彼らは、いくつかの空間分散型太陽光発電 (PV) システム/土地の、照射/発電の非相関特性について分析した。

Wiemken et al. (2001) はドイツにおける実際の太陽光発電 (PV) システムのデータを用い、1 か所での太陽光発電 (PV) の正規化電気出力において 5 分間の傾斜波 (ramp) は±50%を超える可能性があるが、国内に広く設置している 100 基の太陽光発電 (PV) システムからの太陽光発電 (PV) の正規化出力における 5 分間の傾斜波は±5%を超えないことを示した。Ramachandran et al. (2004) は空間分散型太陽光発電 (PV) システム及びさまざまな時間に対する電力出力変動の減少を分析し、非常に多数の小規模な地理的に分散型太陽光発電 (PV) システムであるクラスター・モデルを提唱した。アリゾナ州の 3 基の太陽光発電 (PV) システムにおける Curtright and Apt (2008) の結果は、出力における 10 分間の段階変化が、個別では太陽光発電 (PV) 容量の 60%を超える可能性があるが、3 か所の集計の最大値は減少することを示している。Kawasaki et al. (2006) は同様に、小規模 (4km×4km) の放射照度センサーのネットワークでのならし効果を分析し、放射光の変動が最も大きくなる、特に一時的に曇る日においてならし効果の効率が最大になると結論付けた。

Murata et al. (2009) は広い範囲に分散している太陽光発電所 (PV) からの電気出力の変動を評価する方法を開発、検証した。この方法は、Ilex Energy Consulting Ltd et al. (2004) 及び Holttinen (2005) による風力発電用の方法に酷似している。Mills and Wiser (2010) はアメリカ内 23 か所にて太陽日射を 1 分間測定し、太陽光発電 (PV) の変動を同様に設置された風力発電の変動と比較して、様々な段階の地理的多様性を用いて太陽光発電 (PV) の変動を特徴づけた。彼らは、20km 間隔で、縦横 10 配列の高密度に設置された太陽光発電所 (PV) の相対的な変動の集計は、15 分未満のタイムスケールでの 1 か所における変動の 6 分の 1 未満であると判断した。また、50 km 間隔の 5×5 のグリッド上に同じように設置した太陽光発電所 (PV) と風力発電所について、5 分から 15 分のタイムスケールは太陽光発電 (PV) の変動は風力発電の変動をわずかに上回るだけであることも発見した。

Oozeki et al. (2010) は日本の負荷配分制御地域におけるならし効果を定量的に評価し、データ蓄積及び分析が重要だと判断した。この研究では、ボロノイ分割を用いて、限定された数の測定データから太陽光発電 (PV) 出力の合計を計算する手順についても提案した。Marcos et al. (2010) は、1~9.5MW<sub>p</sub> の範囲、合計で 18MW となる、スペインにある 6 基の太陽光発電 (PV) システムから年間を通して収集した 1 秒間データを分析した。この研究では、短いタイムスケール及び長いタイムスケールにおいての変動の程度はほぼ同じであり、これは広範囲に設置されている太陽光発電 (PV) システムの変動集計が、太陽光発電 (PV) システム同士での変動の相関関係に依存しているためと結論付けた。変動の相関関係とは、結果的に、太陽光発電 (PV) システム間のタイムスケールと距離の関数である。変動性は、大きく離されて設置されている太陽光発電 (PV) システムとは関連性は低く、短いタイムスケールでの変動性との関連性も低い。

しかし、現在、ならし効果の評価のための発電の特徴に関するデータは十分ではない。長期間にわたる十分な時間分解能 (1 分以内) を備えての非常に多くの箇所 (1000 か所超で距離は 2~200km) からのデータ収集が、世界中のいくつかの地点で 2010 年半ばから開始された。範囲や複数箇所を考慮した太陽光発電 (PV) 普及の平滑化された発電特徴は、十分な時間分解能と時刻同期を備えた信頼性のある測定データの収集後に正確に分析される。その結果は、エネルギーシステムへの太陽光発電 (PV) の経済的で信頼性の高い統合に貢献する。

### 3.5.4 集光型太陽熱発電の特徴と系統安定化

集光型太陽熱発電所 (CSP) では、一体型蓄熱設備がない場合でも、集熱器システムの内在するヒートマス及びタ

ービンにおける回転数は、電気出力に対する太陽光強度の急速な変動の影響を大幅に減少させる傾向があるため、系統に対する影響が低減される（8.2.1 節も参照）。一体型蓄熱システムを含めることで、ベースロード設備利用率を実現出来る。この設備利用率とピーク時の需要に対する送電容量は、スペインをはじめとして、適合した固定価格買い取り制度によりこの技術の大規模な普及の支援を開始する地中海地方の規制者を刺激してきた主要な特徴である。集光型太陽熱発電（CSP）は、非再生可能熱の発電容量の代わりとなる大規模な 10～300MW<sub>e</sub> の発電所に適している。蓄熱またはオンサイトでの熱のバックアップ（化石燃料またはバイオガス）により、集光型太陽熱発電所（CSP）は夜間または太陽照射が少ない時間にも発電が可能である。集光型太陽熱発電所は、系統が安定している間は企業に確実に計画的な電力を送ることが出来る。

集光型太陽熱発電所（CSP）はまた、化石燃料火力発電設備と統合することも可能である。たとえば、石炭火力発電所の石炭との置き換えや、ガス火力太陽熱複合発電（ISCC）システムへの寄与などである。ガス火力太陽熱複合発電設備では、放物曲面型トラフ型太陽熱発電フィールドは最新のガス・蒸気発電設備と統合されている。また、太陽熱蒸気発生器から蒸気を追加するため、廃熱ボイラーを改良し、蒸気タービンを拡大した。燃料の燃焼効率の向上、稼働時間の延長により、集光型太陽熱発電所（CSP）とコンバインドサイクル発電設備が分離して存在する場合のコスト効率よりも、複合型太陽熱火力発電設備のコスト効率が上回った。しかし、蓄熱設備を持たない場合、太陽熱蒸気は 1 年あたりの 6,000 から 8,000 時間のコンバインドサイクル設備稼働時間のうち約 2,000 時間程度しか供給されない。さらに太陽熱蒸気はコンバインドサイクルのタービンに供給されるのみ（その出力の 3 分の 1 しか供給しない）のため、獲得可能な太陽熱エネルギーの割合は最大でも 10% を下回る。しかし、この複合設備のコンセプトはサンベルト上に位置する石油及びガスを産出する国々にとっては特に興味深い。化石燃料をベースとする発電システム市場に太陽熱発電技術を導入出来るためである（SolarPACES, 2008）。

### 3.6 環境及び社会への影響<sup>6</sup>

この節では、最初に直接的太陽エネルギー技術の環境影響について、続いて潜在的な社会への影響について述べる。ただし、最初に認識される全般的な問題は、論文審査対象となっている影響についての研究が少数であるということであり、この分野における非常に多くの作業の必要性を示唆している。

#### 3.6.1 環境への影響

よりクリーンなエネルギーに社会が支払わなければならない保険料のようなものがあつたとしても、そのようなコンセンサスは存在しない。しかし、ここ数年において、環境被害のコスト分析が進展しており、いくつかの主要なプロジェクトのおかげで、アメリカ及びヨーロッパにおけるエネルギーの外部性が評価されている（Gordon, 2001; Bickel and Friedrich, 2005; NEEDS, 2009; NRC, 2010）。太陽エネルギーは、エネルギーの非再生可能資源よりも環境への負荷がかなり小さいことを示しているため、価値が高いと考えられてきた。このテーマはほぼ常時、質的要請より正当化されてきたが、変わりつつある。

Gordon (2001) によると、汚染物質 1kg 当たり及び 1kWh 当たりの被害コストの結果は、国際太陽エネルギー協会により示されてきた。NEEDS (2009) のような研究結果（太陽光発電（PV）については表 3.3 に、集光型太陽熱発電（CSP）については表 3.4 にまとめた）により、再生可能エネルギーは大抵、比較的有益であるが、依然として影響は存在することが確認されている。太陽光発電（PV）及び集光型太陽熱発電（CSP）についてここで示した数値を比較すると、化石燃料による発電の選択に関連する外部コストは、10.6 節にまとめたとおり、特に石炭火力発電については、非常に高額である。

<sup>6</sup> 本報告書で取り上げるすべての再生可能エネルギー源の社会的及び環境影響の総合的評価については、第 9 章に記述する。

**表 3.3:** 太陽光発電、傾斜ルーフ、単結晶シリコン、改造、ヨーロッパにおける平均的状況の定量化可能な外部コスト。単位：US セント（2005 年）/kWh（NEEDS, 2009）

	2005	2025	2050
健康への影響	0.17	0.14	0.10
生物多様性	0.01	0.01	0.01
収穫量損害	0.00	0.00	0.00
物質的損害	0.00	0.00	0.00
土地利用	なし	0.01	0.01
合計	<b>0.18</b>	<b>0.17</b>	<b>0.12</b>

**表 3.4:** 集光型太陽熱発電の定量化可能な外部コスト。単位：US セント（2005 年）/kWh（NEEDS, 2009）

	2005	2025	2050
健康への影響	0.65	0.10	0.06
生物多様性	0.03	0.00	0.00
収穫量損害	0.00	0.00	0.00
物質的損害	0.01	0.00	0.00
土地利用	なし	なし	なし
合計	<b>0.69</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>

パッシブ太陽エネルギー技術を考えると、断熱性がより高いことで、加熱負荷や関連するコストの減少の他、多くの便益を受ける (Harvey, 2006)。内部サーマルマスの大きさと組み合わせると、高い断熱性による熱損失の割合の低さで、気温がより均一となり、より快適な住居となる。これは、熱供給を行う装置のより高い効率を間接的に引き出すことが出来る。また、他で実行可能ではない代替的加熱システムも利用出来るが、様々な点において従来の加熱システムよりも優れている。断熱性のよい住居は、たとえば熱の逃げ道や湿度の高い地下室などの湿気問題を解消する。屋根の断熱性を向上させることにより、飛行機などの外部の騒音も和らげることが出来る。

アクティブ太陽エネルギーによる加熱・冷却について、英国における太陽熱温水システムの環境影響は Boyle (1996) によると非常に小さいと考えられる。たとえば、英国では、使用する材料はありふれた建築物や配管の材料である。太陽熱集熱器は、通常の屋根の光と見た目には区別出来ないように設置される。地中海地方の国では、平坦な屋根の上で独立型自然循環式を使用しており、視覚的に煩わしさを感じる。しかし、集熱器は問題ではなく、むしろ、その上の貯蔵容器が問題である。電気及びガスによる温水システムと比較した、自然循環式家庭用太陽熱温水システムのライフサイクル環境影響の研究は、電気温水器でのライフサイクル評価指標を改善してきているが、主要なエネルギー源が電気ではなく天然ガスの場合に 4 分の 1 まで純粋な獲得量が減少することを示している (Tsilingiridis et al., 2004)。

完全な家庭用太陽熱温水システムに関しては、エネルギー回収期間は、非太陽エネルギーシステムと比較した温水貯蔵容器の大きさの差と容器の製造に使用されるエネルギーを考慮することを求める (Harvey, 2006)。オーストラリア南部の太陽熱/ガスシステムにおけるエネルギー回収期間は、総エネルギーが容器を持たないシステムのエネルギーの 12 倍であるにもかかわらず、2~2.5 年と報告されている。イタリアのパレルモで稼働中の統合型自然循環式平板太陽熱集熱器及び貯蔵装置では、回収期間は 1.3~4.0 年と報告されている (Harvey, 2006)。

太陽光発電 (PV) システムは発電時に、固体、液体または気体状のいずれの副産物も一切生み出さない。また、このシステムは騒音を出さず、稼働中に非再生可能資源を使うこともない。しかし、次の 2 点が頻繁に考慮される。1) 太陽光発電 (PV) の製造、設置、運用保守 (O&M) 及び撤去というライフサイクル全体における汚染物質の排出やエネルギー利用。2) システム廃止時の太陽光発電 (PV) モジュール材料のリサイクルの可能性。

後者の懸念事項だけではなく、太陽光発電 (PV) 産業は、いくつかの毒物、爆発性ガス、温室効果ガス及び腐食性液体をその製造ラインで使用する。これらの材料の有無及び量は電池の種類に大きく依存する (3.3.3 節を参照)。しかし、太陽光発電 (PV) 産業の生産過程の本質的な必要性によって、モジュール生産中における潜在的に危険性のある成分の放出を最小化するかなり厳密な管理方法が強く求められている。

太陽光発電 (PV) モジュールの材料のリサイクルは、主に集光型や大規模な用途にてすでに経済的に実現されている。計画では、ガラス、エチレン酢酸ビニル及び金属 (テルル、セレン及び鉛) の 80~96% がリサイクルされる。カドミウム、テルル、スズ、ニッケル、アルミニウム及び銅などの他の金属は確保されるか、別の方法でリサイクルされなければならない。たとえば、カドミウムについては、Sinha et al. (2008)、Zayed and Philippe (2009) 及び Wadia et al. (2009) を参照のこと。

特定の場所においては、必要な水は無視出来ない量のある可能性があるが、性能を維持するために太陽光発電 (PV) パネルの定期的な清掃が必要であることに注意すること。

ライフサイクル温室効果ガス排出について、図 3.14 は国立再生可能エネルギー研究所により行われ、1980 年から発行されている太陽光発電 (PV) 関連のライフサイクル評価 (LCA) 研究の総合的文献レビューの結果を示している。ライフサイクル温室効果ガス排出の大半は、30 から 80g CO<sub>2</sub>eq/kWh の間で固まっており、大きな値において重要な異常値が隠れていると推定する (図 3.14)。図 3.14 に示された分布は可能性を評価したものではないということ、この図は質及び関連性についての一時的な調査を評価する、現在公表されている文献の分布を単純に報告していることに注意すること。文献検索法及び完全参考リストを記述した Annex II とライフサイクル評価のデータ解釈についてより詳しく説明した 9.3.4.1 節を参照すること。推定値の変動は研究の背景 (太陽資源、技術の成熟度など)、技術的性能 (効率、シリコンの厚さなど) 及び方法 (ライフサイクル評価システムの限界) における差異から発生する。上位四分位点の評価をより理解し、中心傾向及び変動性のより正確な評価が実現出来るように、これらの研究の方法及び前提の調和への取り組みが推奨される。ライフサイクル評価をより詳しく研究するには、一部の技術 (カドミウムテルルなど) の評価数を増やす必要がある。

太陽光発電 (PV) のエネルギー回収期間に関して (Box 9.3 も参照のこと)、Perpinan et al. (2009) は、太陽照射のレベルが約 1,700kWh/m<sup>2</sup>/年 (6,120MJ/m<sup>2</sup>/年) と中程度である場所での使用を考慮して、微結晶シリコン太陽光発電 (PV) 及び単結晶シリコン太陽光発電の回収期間はそれぞれ 2.0 年及び 2.5 年であると報告している。Fthenakis and Kim (2010) は、世界の太陽照射の範囲が 1,900~1,400kWh/m<sup>2</sup>/年 (6,840MJ/m<sup>2</sup>/年) である場所での、系統連系型太陽光発電 (PV) システムの回収期間は 2 年から 5 年の間であることを示している。

太陽光発電技術のライフサイクル温室効果ガス排出量

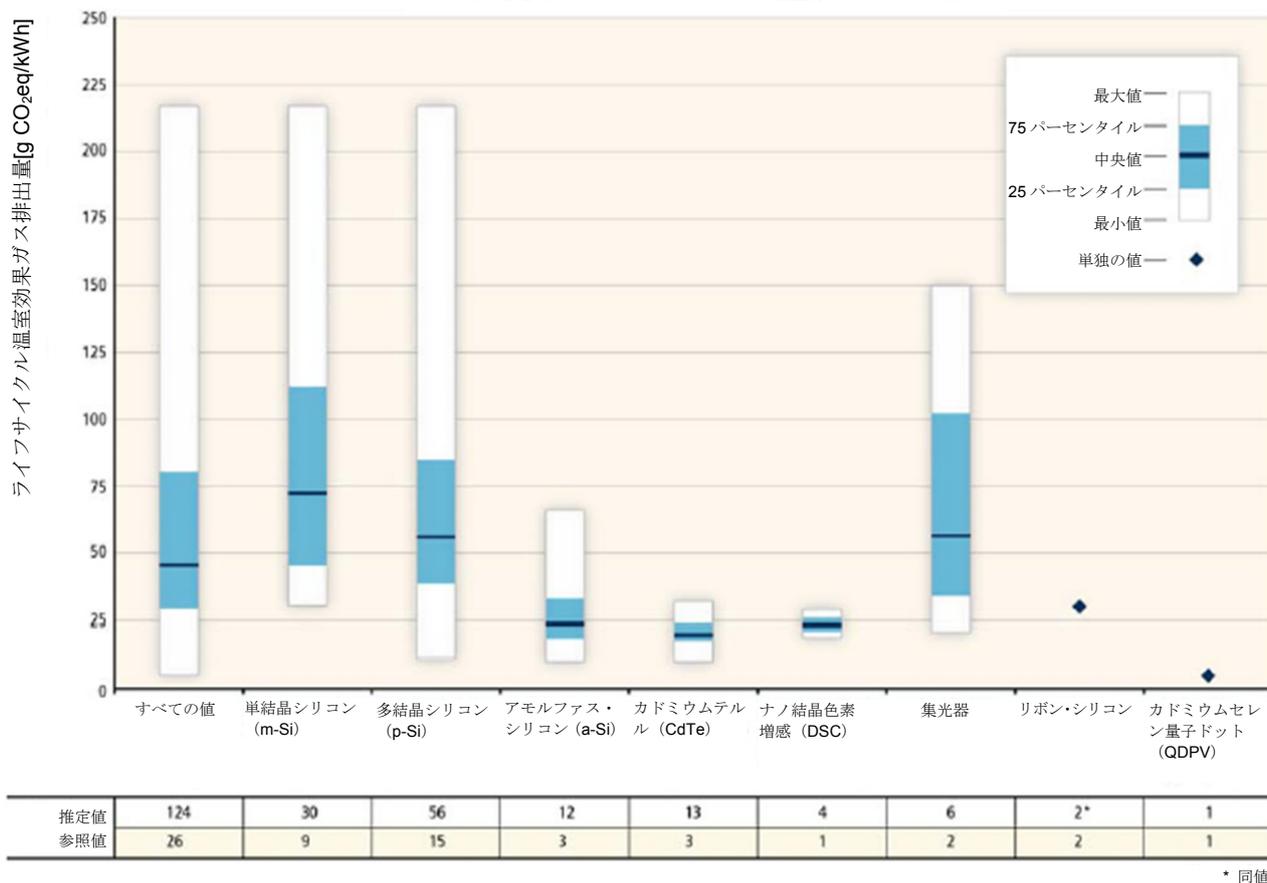


図 3.14: 太陽光発電 (PV) 技術のライフサイクル温室効果ガス排出量 (未修正の文献値、品質調査後)。表示されている推定値に関係している文献の引用及び文献調査の詳細については Annex II を参照のこと。

集光型太陽熱発電所 (CSP) では、環境影響が技術によって変化する。一般には、温室効果ガス排出及びその他の汚染物質は、環境リスクをこれ以上負わないよう削減される。集光型太陽熱発電 (CSP) 集光器表面 1 平方メートルあたり、年間 0.25~0.4t の二酸化炭素の生産を抑えることが出来る。集光型太陽熱発電 (CSP) システムのエネルギー回収期間を 5 か月に抑えることができ、これは、約 25~30 年の寿命と比べてもとても好ましい値である (より詳しい説明については Box 9.3 を参照)。多くの集光型太陽熱発電 (CSP) の太陽フィールドの材料は、新規設備でのリサイクル及び再利用が可能である (SolarPACES, 2008)。

土地利用とヘリオスタット・フィールドとその他施設の建設時に局所的な植物相及び野生生物への影響は、集光型太陽熱発電 (CSP) システムにとっての主要な環境問題である (Pregger et al., 2009)。その他の影響は、鋼鉄を多く用いた太陽エネルギー収集用施設の建設に関係し、鉱物及び化石資源の消費、及び今日の鋼鉄生産技術に関連する汚染物質の排出が原因である (Felder and Meier, 2008)。

土地にかかるコストは、一般には、設備全体のコストに占める割合としては非常に小さいものである。1基に複数の太陽熱装置をもつ 100MW の集光型太陽熱発電所 (CSP) (3.3.4 節を参照) では、2km<sup>2</sup>の土地が必要となると思われる。しかし、土地は比較的平坦で (特に、線形トラフ型及びフレネル・システムにおいて)、理想としては伝送線や工事車両用道路の近くにあり、環境の影響を受けやすい土地ではないことが必要となる。ミラー自身の面積は、使用される土地の面積の約 25~30%となるのが一般的であるが、太陽熱発電所の場所は大抵、乾燥地帯である。そのため、この土地は他の農業の追求には適さないが、保護される種または影響を受けやすい種が存在する。この種類のシステムにおいては、電気施設に近い日当たりのよい砂漠が理想である。しかし、集光型太陽熱発電 (CSP) 設備容量が増加するにつれて、長い送電距離の経済性も改良される。よって、より遠方への設置が、伝送設備の必要性の上昇と一致し、期待される可能性がある。南ヨーロッパ、南北アフリカ諸国、中東、中央アジア諸国、中国 (チベット、新疆ウイグル自治区)、インド (ラジャスタン及びグジャラート州)、オーストラリア、チリ、ペルー、メキシコ及びアメリカ南西部など、世界の多くの地域に魅力的な土地が多く存在する。

短期においては、水が使用出来ることが、ランキンサイクルをベースとする集光型太陽熱発電 (CSP) システムのコストを最小化するのに重要となる。水は、蒸気サイクルの生成やミラーの洗浄にも必要であるが、この2つの用途は、湿式冷却を利用する場合の必要量の数パーセントに過ぎない。しかし、冷却に水を使用できなくても、非常に好ましい場所が存在する。この場合、乾燥またはハイブリッド冷却を使用するなら水の使用量を大幅に削減出来るが、コストがかさむ。乾燥冷却設備からの電力のコストは 2~10% 上乗せされるが (US DOE, 2009)、これは、周囲の状況や技術などの多くの因子に左右される。たとえば、高温でのタワー型発電設備の運用は、トラフ型に比べて MWh 当たりの冷却が少なく済む。タワー型、ディッシュ・ブレイトン/スターリング・システムは、冷却水がなくても効率的に運用出来るよう開発中である。

太陽光発電 (PV) と類似した方法で、国立再生可能エネルギー研究所は集光型太陽熱 (CSP) 発電ライフサイクル評価の研究を実施した。図 3.15 はライフサイクル温室効果ガス排出の発表されている通りの推定値分布を示している。推定値の大部分は、トラフ型、タワー型、スターリング及びフレネル・システムに対し、14~32g CO<sub>2</sub>eq/kWh の間に低下する。また、技術同士に大きな差がないことが、入手可能な文献から明らかになっている。集光型太陽熱発電 (CSP) システムの評価に使用可能な文献は、いくつかの太陽光発電 (CSP) 設計に対する文献に比べ少ない。しかし、これらの技術に対するライフサイクル温室効果ガス排出の情報の現状は、きわめて一貫性があるように見えるが、新たなライフサイクル評価による文献の増加が推奨されている。

技術ごとの集光型太陽熱発電のライフサイクル温室効果ガス排出量

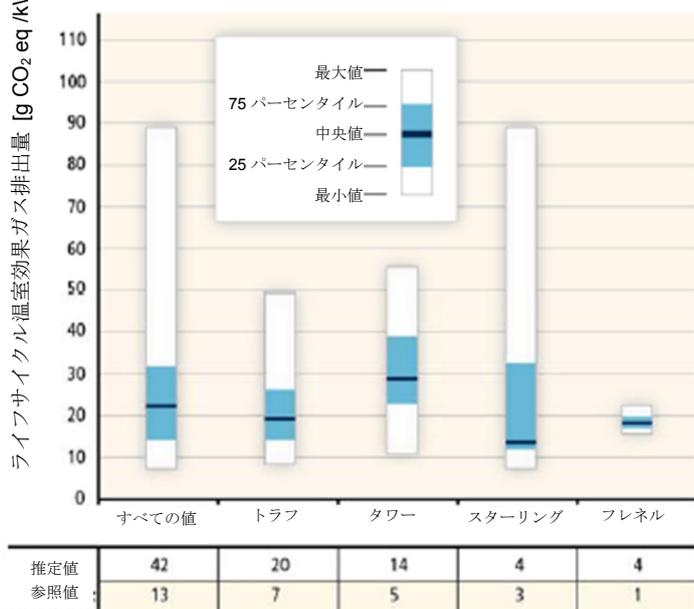


図 3.15: 集光型太陽熱発電 (CSP) 技術のライフサイクル温室効果ガス排出量 (未修正の文献値、品質調査後)。表示されている推定値に関する文献の引用及び文献調査の詳細については Annex II を参照のこと

太陽燃料生産において、太陽熱プロセスは集光太陽照射を、主要または単独の高温プロセス熱源として利用する。このような設備は、タワーに設置された集熱器へ直接太陽放射を集光させるヘリオスタット・フィールドから成る点集光システムで構成される。この集熱器は化学反応装置または熱交換装置で構成される。熱化学プロセスにより放出される直接的二酸化炭素排出量はごくわずかであるか、現在のプロセスからの排出量より大幅に少ない (Pregger et al., 2009)。その他の考えられる影響はすべて、従来のプロセスからの影響と同程度であるか、または化学産業において一般的である安全な方法及び装置により阻止することが可能である。

### 3.6.2 社会への影響

太陽エネルギーは増加するエネルギー需要を満足させ、温室効果ガスを減少させるポテンシャルを持つが、太陽エネルギー技術については一部のグループの人々が抱く懸案事項による抵抗に直面してきた。集中型の集光型太陽熱発電 (CSP) 及び太陽光発電所 (PV) に対する土地面積の要件は、視覚的影響についての懸案事項が浮上している。これは、人口密度の低い地域に設置すると決めれば、立地決定段階において最小化に出来る。しかし、いずれにしても、これは通常は適切な太陽エネルギー用敷地の場合の話である。視覚的な懸案事項は建物密集地における分散型太陽システムにも存在し、現代建築と比べると、歴史的または文化的建築物ではその上に設置することに対して、より強い抵抗感がみられる。保護地域を避けて建築物設計に太陽エネルギー技術を組み込めば、これらの衝突は最小化される。騒音の影響は、建設段階に懸案事項となりうるが、影響は立地決定段階や作業を適切に行うようにすることで緩和出来る (Tsoutsos et al., 2005)。再生可能プロジェクトの計画プロセスにおいてコミュニティが関与することにより、プロジェクトに対する人々の支持が高められる (Zoellner et al., 2008)。

消費者購入システムについては、コストやわかりにくい助成金構造、及び信頼性や保守の要望について誤解が、いまだに消費者購入の普及拡大の障壁になっている。従来の発電設備の影響、環境便益及び安全なエネルギー供給への寄与の公開などは、太陽エネルギー技術を効果的にマーケティングすることになり、社会的支持が加速でき、支払意欲が高められることに繋がる (Batley et al., 2001)。政府が公的資金の援助と研究開発について太陽エネルギー技術に出資することによってこれらのプログラムに関する経済的効果がさらに定量化され、それが公的に広められれば、公的支援の獲得を拡大出来るであろう。エネルギー技術にまたがる雇用への影響について比較した最近の研究では、太陽光発電 (PV) が平均で GWh 当たり約 0.87 年間の雇用という最大の雇用創出ポテンシャルのあることが示された。集光型太陽熱発電 (CSP) は平均で GWh 当たり 0.23 年間の雇用をもたらした。これらはともに、化石燃料技術の推定雇用創出数を超えた (Wei et al., 2010)。9.3.1 節にて、再生可能エネルギーの雇用市場への影響評価の定量化と限界について説明する。

太陽エネルギー技術は世界の多くの貧困層に対して健康と生計の機会を改善することも可能である。電力が使用できない約 14 億人及び必要な家庭での料理及び暖房を従来のバイオマスに頼っている 27 億を超える人々に対し、最新のエネルギーサービスを受ける上に存在するいくつかの格差に取り組むポテンシャルが太陽エネルギー技術にはある (IEA, 2010d; 9.3.2 節を参照)。

自立型住宅用太陽エネルギー設備及び太陽光電力の地域系統は、遠隔地、山岳地、三角州地帯などの主な系統への接続が非現実的となっている多くの地域に対して、経済的にメリットの多い電力提供が出来る。電気照明は、電化された家庭において所持率・稼働率が最も高い家庭用電化製品である。また、電化プログラムの主な便益は、電気照明の利用が広く受け入れられていることである (Barnes, 1988)。電気照明は、一般に低品質な照明と家庭での高価な燃料出費とに関連しており、火災や中毒のリスクを発生させる灯油ランプが供給する照明を置き換えることが出来る。照明の質を上げることで、家族の読書時間の増加、子どもの勉強、そして暗くなってからの家での家内工業活動が可能になり、その結果、家庭において教育や収入を得る機会が増える。太陽ランタンによっても高品質の照明を提供することが出来る。このランプは住宅用太陽光設備発電照明により達成されるのと同じ便益を提供する。太陽ランタン・モデルは独立型にでき、または集中型ステーション充電を必要とすることが出来る。製造、分配、保守プログラムにより、小規模企業の機会がもたらされる。太陽照明を利用することは、灯油との比較で、技術が有効に利用される期間、家庭での費用が大幅に削減し、さらに化石燃料をベースとした照明により、推定年間二酸化炭素排出量のうちの 190Mt を削減出来る (Mills, 2005)。ソーラー式街灯及びコミュニティ建築物の照明は安全性を高めるので、学級やコミュニティの会合のため夜間に集まる場所を提供出来る。太陽光発電システムは、アメリカ及びカリブ海諸国において、災害時の被災者の安全と治療及び快適さの提供をすることが効果的に展開されている。また、危険除去のため、これは全世界に同様に展開されるものと思われる (Young, 1996)。

家庭用太陽システムはテレビ、ラジオ及び携帯電話に電力を送ることもでき、その結果、ニュース、情報を入手し、遠隔地教育を利用する機会が増えている。バングラディッシュの地方電化プログラム (Rural Electrification Program) の研究により、電化された住居の住人はすべて、公衆衛生問題についての知識が豊富で、女性は家族計画や男女平等に関する問題に関する知識をより多く持っており、成人の識字率に対する収入や性別による格差が低く、子どもへの予防接種ガイドラインが非電化の家庭と比較してより定期的に着実に実施されている (Barkat et al., 2002)。電化された家庭では、扇風機、アイロン、グラインダー、食器洗浄機及び冷蔵庫などの電化製品を購入し、快適性を向上させ、家庭内の作業などの単純作業を減らすことも可能である (ESMAP, 2004)。

固体燃料からの屋内の煙は年間 160 万人を超える死亡数、世界疾病負担の 3.6%の原因となっている。この死亡率は劣悪な衛生状態による年間 170 万人の死者と規模がほぼ同じであり、都市部の大気汚染による年間 80 万人の推定死者数の 2 倍を超えている (Ezzati et al., 2002; 9.3.2 及び 9.3.4.3 節を参照)。太陽熱調理機で満足のいくように食事を作れる地域においては、これらの調理器によって、調理及び暖房に使用する従来の固定燃料より発生する高い濃度の粒子物質にさらされる不健康な事態、呼吸器官などの疾病の合併症罹患率やそれを原因とする死亡率を減少させることが出来る。薪の消費の減少は、それに応じて、女性が薪を集めるのにかける時間を減らすことにつながる。インド及びアフリカにおける調査結果には、この薪を集める時間は合計で週 2~15 時間で、薪の供給が減少している地域が増えていることを示す収集データが載っている (Brouwer et al., 1997; ESMAP, 2004)。女性の薪集めに対するリスクには、けが、蛇にかまれること、地雷、及び性的暴行が含まれる (Manuel, 2003; Patrick, 2007)。子どもがこの作業を手伝われる場合、彼らは教育を受ける時間を使って作業をしている可能性がある (Nankhuni and Findeis, 2004)。難民の場合、燃料を集める天然資源システムへの要望が大きく、満足出来る生活が高いリスクにさらされる可能性がある (Lynch, 2002)。太陽熱調理機は、伝統的な食事を調理するための技術的要求や調理が出来ないため、一般には家庭での料理に対する要望をすべて満たすことはない。しかし、太陽熱調理機を部分的に使用することで、薪の削減、屋内空気汚染の減少を実現出来る (Wentzel and Pouris, 2007)。

太陽エネルギー技術は、貧しい地方の罹患率及び死亡率の原因と広く認められているその他の要素と対抗するポテンシャルも持っている。太陽脱塩及び水浄化技術によって、飲用水供給を利用出来ないことによりもたらされる下痢の高い罹患率に対抗出来るよう支援することが可能となる。診療所における太陽光発電 (PV) システムはワクチンの冷却、及び昼夜を問わない医療措置の実施や患者の診察のための照明を提供出来、さらに地方の医療労働者の作業環境を改善すれば、都市部の医療センターへの優秀なスタッフの流出も抑制することが出来る。

太陽エネルギー技術は貧しい地方の人々の経済的機会や作業環境を改善することが出来る。太陽熱乾燥機は年中消費出来るように食品やハーブを保存すること、及び収入を得られるような輸出品質の製品の生産に用いられる。太陽熱揚水設備は穀物の灌漑のための水の長距離運搬の必要性を最小限にすることが出来る。これは乾季及び干ばつの年に非常に重要で影響力の強いものである。水の入手がもたらす負担及びリスクは燃料集めのそれらと類似しており、この作業にかける時間を減らすことで、この作業に大きな役割を果たしている女性の健康や福祉を増進することも出来る。

### 3.7 技術の改良及びイノベーションの見通し<sup>7</sup>

この節では、将来において可能となる太陽エネルギー技術分野のイノベーションを以下の項目において考察する。パッシブ太陽熱及び採光技術、アクティブ太陽エネルギーによる加熱及び冷却、太陽光発電 (PV)、集光型太陽光発電 (CSP)、太陽燃料生産、その他の考えられる用途。

#### 3.7.1 パッシブ太陽エネルギー及び採光技術

パッシブ太陽エネルギー技術、特に直接取得システムでは、収集したエネルギーを貯蔵したり、負荷に向けてエネルギーを移動させたりする必要がないため、本質的に効率がよい。熱収集、貯蔵及び使用はすべて一体化されている。放射率の低いコーティングなどの技術的進歩、及びグレージングにおけるアルゴンなどのガスの使用により、ほぼ赤道に面した窓は非常に手ごろな価格で高性能になってきた。しかし、暖房が支配的な気候においては、以下のようなさらなる進歩が可能である。1) 動的な外部の夜間用断熱材 (夜間用シャッター) を用いる熱伝導の減少。2) 真空グレージング装置の使用。3) 温度 (可能な相変化を含む) により日射透過率/可視透過率を変更する材料を使用し、不透明な状態では断熱性が向上する透光性グレージング・システム

窓面積が大きくなるにつれて、効率の高い低放射率アルゴン充填の二重窓及び三重窓の価格が下落し、利用可能で手頃なものになってきている (3.4.1 及び 3.4.2 節を参照)。窓面積が増加したことにより、温暖な気候条件における体系的な日射取得調整が必要となるが、冬季に寒くなり夏季には暑くなる傾向のある陸域においても必要となる。日射取得調整技術は、日射取得が必要な場合、または居住空間の過熱が検出または予測されている時にそれを避ける場合の、自動制御のブラインド/日よけや、日射取得を可能にするエレクトロクロミック、サーモクロミック及びガスクロミック・コーティングなどのアクティブシステムをベースとするものが増えている。日射取得調整、蓄熱設計及び冷暖房システム制御はパッシブ太陽エネルギー設計及び制御の面と強く関係する 3 要素である。

直接取得層の内部に組み込まれた蓄熱物質の改良は現在も可能であり、石こう、レンガまたはタイルを組み込んだ相変化物質及びコンクリートなどがある。目標は、材料の単位体積/質量当たりのエネルギー貯蔵を最大化することであり、それによりこの材料が寒冷地で一般的な軽量木製フレームに組み込むことが出来る。このような材料の課題は、10,000 サイクル以上過ぎた後でも、熱を効果的に確保し、また放出し続けるようにし、その一方で、耐火

<sup>7</sup> 10.5 にて、再生可能エネルギー全般のドライバー及び技術進展の傾向についての補足的見通しを述べる。

性のようなその他の性能要件を満たすようにすることである。相変化材料は漆喰にも系統的に使用されており、夏季における高い室内温度を下げる事が出来る。

ソーラー建築物における冷却負荷の低減を考えると、以下のような範囲で改良が可能である。1) 日射反射率及び放射率の高い材料を含むクール・ルーフの技術、2) ヒート・シンクとして地面や水を使用するなどの熱放散技術のより系統的な活用、3) 建築物周辺の微気候を改善し、都市部周囲の気温を下げる改良型の歩道及び屋外建築物、4) 熱エネルギーではない、日射の通過を可能にする新型の日射調整装置。

すべてのソーラー建築物には、通常は、強い日射を受け取得する一部の直接取得ゾーンと、冬季には一般的により冷たくなる背面となるその他のゾーンがある。したがって、暖房が必要ではない場合でも、ソーラー住宅では直接取得ゾーンと背面となるゾーンの間を空気が循環することが有益なのである。北アメリカで一般に使用されている強制換気システムにより、空気循環は次第に可能になっており、暖房が不要な時はシステム・ファンを低い流量で回すことが可能である。これにより、住宅全体に吸収した直接日射取得を再分配出来る (Athienitis, 2008)。

夏季には、ハイブリッド型換気システム及び技術が、新鮮な空気を提供し室温を下げることに利用されている (Heiselberg, 2002)。様々な形式のハイブリッド型換気システムが設計、試験され、多くの方式が建築物に適用されている。性能試験により、自然換気では夏季における快適状態を適切に維持することは出来ないが、ハイブリッド型換気システムの使用は最善策となることが示された。このシステムは、純粋な全機械システムに比べて少なくとも 20% のエネルギー削減で使用出来る。

最後になるが、設計ツールが、ソーラー建築物の設計の各段階において、パッシブ設計、日射、アクティブ日射取得調整、暖房・換気・空調 (HVAC) システム制御、及びハイブリッド型換気を同時に検討出来るように開発されることが期待されている。これらの技術と最適統合とを系統的に採用することは、年間のエネルギー純使用量がゼロとなるようなコスト的に効率の良いソーラー建築物を目標としていく上には真に欠かすことができない (IEA, 2009b)。パッシブ及びアクティブ技術の最適統合は、最適にエネルギーを生産し使用するスマートビルで必要となる (Candanedo and Athienitis, 2010)。スマート・ソーラー住宅では、気象予測に依存して、最適な日射取得及びその貯蔵を調整して快適な気温にすると共に、さらに安価で効果的な通信システムを技術と組み合わせて使用し、送電系統との相互作用を最適化出来ると考えられる (8.2.1 節を参照)。

### 3.7.2 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却

太陽熱加熱及び冷却システムの設計を改良して、耐用年数の延長、設置コストの低減、そして温度上昇に取り組むことが期待される。以下のような設計におけるいくつかの選択肢がある。1) 住宅用太陽熱温水システムにおけるプラスチックの使用、2) 太陽エネルギーシステムを利用してのエアコン・システムへの送電。特に複合型放物曲面集光器に重点をいたシステム、3) 住宅用及び商用温水システムでの平板集熱器の使用、4) 工業段階の温水及び熱駆動冷却の集光型真空管集熱器 (concentrating and evacuated-tube collectors) (3.3.4 節を参照)

蓄熱は、自身の暖房 (及び、あるならば冷房も) 需要を太陽エネルギーにより 100% カバー出来るアクティブ・ソーラー建築物が幅広く普及出来るので、季節ごとの蓄熱に対してコスト的に効率の良い実践的な解決策を開発する上で、技術的に取り組むべき重要なものとして注目される (Hadorn, 2005; Dincer and Rosen, 2010)。欧州太陽熱技術プラットフォームの構想は、2030 年までに蓄熱システムを、水の 8 倍を超えるエネルギー密度を持つ蓄熱が季節ごとに出来るようにするとしている (ESTTP, 2006)。

将来において、集熱器、太陽光発電 (PV) パネル、太陽光発電 (PV) - 熱変換システムなどのアクティブ太陽エネルギーシステムは、明らかに屋根やファサードの一部となり、建築計画の初期段階で建設プロセスへ一体化されていく。壁は改良材料 (相変化材料など) が利用されることにより熱エネルギー貯蔵が助長され、アクティブ太陽エネルギー加熱及び冷却システムの構成物として機能するようになるであろう。中央制御システムを 1 つにすることで、ユーザが設定した快適パラメータの範囲内で太陽エネルギーを最大にして、暖房・換気・空調システム全体を最適化する調整が可能となる。熱と冷気の貯蔵システムは、建築物の熱の要求量に見合うべく太陽熱の寄与を最大にする上で重要な役割を次第に担うようになる。

太陽熱駆動のエアコン技術は開発の初期段階にある (Henning, 2007)。しかし、技術開発の取り組みが増大しつつあり、将来のこの技術の競争力は高まっている。その主な傾向は以下のとおりである。

- ・ 冷却電力が低い範囲 (20kW 未満) で、熱駆動型冷却装置を提供する研究
- ・ 低い運転温度で上昇する消費効率をもつ単一効果サイクルの開発
- ・ 吸着式冷凍機の出力密度及び熱性能を向上させるための吸着材料を含む部分の熱伝達を高める新手法の研究
- ・ 水蒸気噴流サイクルの新しいシステムと新しい作動流体、及び冷水を生産する閉鎖型サイクルの有望な候補の開発

- ・ 固体及び液体吸着材の冷却開放型吸着サイクルについての研究活動

### 3.7.3 太陽光発電

この小節では、太陽電池と太陽光発電 (PV) システム全体の範囲の太陽光技術の改良とイノベーションについて説明する。太陽電池モジュールは平板太陽光発電 (PV) システムの基本構成要素である。さらに技術的取り組みを行うことで、コスト削減、性能の向上及び環境プロファイルの改善につながる可能性が高い。これは、特別な研究開発手法を必要とする技術カテゴリー間で区別するのに有用である。

過去 40 年にわたる太陽光発電 (PV) の研究開発に対する基金が、太陽電池 (PV) の品質、効率及び価格におけるイノベーションと進歩を支援してきた。2008 年には、IEA Photovoltaic Power Systems Programme 参加国研究開発プログラムに対する公的予算が、合計で約 3 億 9000 万 US ドル (2005 年) (2008 年をベースに想定) に達し、2007 年と比較して 30%の増加だが、2009 年には頭打ちとなった (IEA, 2009c, 2010e)。

ウェハ・ベースの結晶シリコン、現在の薄膜技術、及び新興技術や新技術 (最初の 2 つの項目に対する「ブラスター」を含む) において、以下のパラグラフに優先順位の高い研究開発テーマを挙げる。Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology などの様々な太陽光発電 (PV) ロードマップにてより詳しい情報を見ることが出来る (US Photovoltaic Industry Roadmap Steering Committee, 2001; European Commission, 2007; NEDO, 2009)。

- ・ **効率、エネルギー収量、安定性及び耐用年数。** 研究はこれらのパラメータを最大にするのではなく、最適化することを目指すことが多く、これは追加コストと研究の結果得られるものが批判的に比較されることを意味する。研究は、まず発電コストの削減を目的とするため、イニシャルコスト (US ドル/W<sub>p</sub>) だけに焦点を当てるのではなく、生涯利益、つまり実際のエネルギー収量 (kWh/W<sub>p</sub> または経済的または技術的耐用年数全体での kJ/W<sub>p</sub>) にも焦点を当てるのが重要である。
- ・ **生産過程の監視及び制御を含む生産性の高い製造。** スループット及び生産量は低コスト製造において重要なパラメータであり、コスト目標を達成するのに不可欠である。製造過程の監視及び制御は製品の品質を向上させ、生産量を増やすために極めて重要なツールである。集中的取り組みが太陽光発電 (PV) 産業を成熟させるのに必要である。
- ・ **環境持続可能性。** 製造におけるエネルギー及び材料要件、及びリサイクルの可能性は製品の環境品質全体で重要なパラメータである。エネルギー回収期間の短縮、リサイクル設計、及び地球上に豊富には存在しない材料の使用を避けることは、理想的には取り組むべき最も重要な問題である。
- ・ **適用可能性。** バランス・オブ・システム及びシステムについてのパラグラフでより詳しく説明したとおり、標準化及び協調は太陽光発電 (PV) の投資コストを下げるのに重要である。いくつかの関連する局面はモジュール・レベルで取り組まれる。さらに、設置しやすくすることは、モジュール機能に部分的に関係する。また、モジュール (及びシステム) の外観品質は、建築環境における大規模利用にとって重要な特徴である。

改良技術はいくつかの概念実証フェーズを通過したもの、または 3.3.3 節にて説明した太陽光発電 (PV) 方法の 10 ~ 20 年間の開発候補として検討出来るものを含む (Green, 2001, 2003; Nelson, 2003)。これらの新しい太陽光発電 (PV) のコンセプトは中から高程度リスクであり、高性能の極めて低いコストの材料及びプロセスをベースとする。たとえば、4 から 6 接合の集光器 (Marti and Luque, 2004; Dimroth et al., 2005)、多接合の多結晶薄膜 (Coutts et al., 2003)、厚さが 100µm 以下の形式 (sub-100-µm-thick regime) の結晶シリコン (Brendel, 2003)、多接合有機太陽光発電 (PV) (Yakimov and Forrest, 2002; Sun and Sariciftci, 2005)、及びハイブリッド型太陽電池 (Günes and Sariciftci, 2008) がある。

スケジュールからさらに大きく外れたコンセプトは、非常に優れた性能や極めて低いコストを提案するが、いくつかの準備段階を超えて実証されていないコンセプトである。これらの技術は、本当に高リスクだが、新材料、新装置構造及び新しい変換コンセプトをも含む、桁外れの技術ポテンシャルを持っている (Green, 2001, 2003; Nelson, 2003)。これらは、標準の Shockley-Queisser limit (Shockley and Queisser, 1961) を超越しており、生態模倣装置 (Bar-Cohen, 2006)、量子ドット型 (Conibeer et al., 2010)、多重励起子生成 (Schaller and Klimov, 2004; Ellingson et al., 2005)、及びプラズモン太陽電池 (Catchpole and Polman, 2008) を含む。

太陽光発電 (PV) 集光器システムは、研究開発問題が平板技術と比較して根本的に異なるため、別の項目と考えられている。3.3.3 節にて述べたとおり、集光型太陽熱発電 (CSP) はシステムレベルで提供される様々な技術的解決策を提案している。研究論点は以下の活動に分類される。1) 集光式太陽電池の製造、2) 光学システム、3) モジュール組立及び集光モジュールやシステムの製造方法、及び 4) 追跡、インバータ及び設置の問題などのシステムの論点。

しかし、繰り返しはつきりと述べておかなければならない。集光型太陽熱発電 (CSP) はシステム的手法である。システム全体は、構成物間の連系のすべてが検討される場合にのみ最適化される。最適化された構成物が、最適な集光型太陽熱発電 (CSP) システムにとって必ずしも最善の選択ではないというのは、当然の結果である。すなわち、各研究グループ同士の強い連携が必要なのである。

太陽光発電システムは太陽電池 (PV) モジュール、及びバランス・オブ・システムの構成物やシステムで構成される。これには、インバータ、貯蔵装置、充電制御器、システム構造、及びエネルギー・ネットワークが含まれる。消費者がシステムレベルの太陽光発電 (PV) 技術を知ると、彼らは信頼できて、コスト効率の良い、彼らのエネルギー供給の要望に対する魅力的な解決策に関心を持つ。この研究の課題は、以下の1つ以上を達成するテーマに注目している。1) 構成物やシステムレベルでのコストの削減、2) システム全体の性能の向上。構成物の耐用年数の延長及び調整、システムの耐用年数全体での性能劣化の抑制と性能レベルの維持、及び、3) システムの機能とシステムが提供するサービスの向上。つまり、生産される電力に対する価値の付加 (US Photovoltaic Industry Roadmap Steering Committee, 2001; Navigant Consulting Inc., 2006; EU PV European Photovoltaic Technology Platform, 2007; Kroposki et al., 2008; NEDO, 2009)。

構成物のレベルにおいて、バランス・オブ・システム開発の主要目的は、系統連系型用途のバランス・オブ・システム構成物の耐用年数をそのモジュールの耐用年数まで伸ばすことにある。一般的には20~30年である。

非系統連系システムでは、構成物の耐用年数は約10年まで伸びなければならない。また、これらのシステムの構成物は保守がほとんど不要、または全く不要となるよう設計する必要がある。貯蔵装置は非系統連系太陽光発電 (PV) システムにとって必要なものであり、少量の電力 (1~10kWh または 3,600~36,000kJ) を短時間貯蔵するための革新的な手法が必要となる。また、非系統連系及び遠隔用途にて使用しやすい単一の効率化された製品 (貯蔵部品をモジュールへ統合するなど) を提供するためでもある。

系統連系システムについて、分散型太陽光発電 (PV) の高い普及率は、系統の安定性及び運用に対する潜在的影響に関する懸念をもたらし、この懸念は将来の拡張に対する障壁を作る可能性がある (8.2.1 節も参照)。よく引き合いに出されるデメリットは、低電圧及び中電圧ネットワークにおける過電圧や予期せぬ孤立などの連系の問題に対するより大きな敏感さである (Kobayashi and Takasaki, 2006; Cobben et al., 2008; Ropp et al., 2008)。さらに、需要と供給間の不均衡は、太陽光発電 (PV) システムの出力の変化に関して頻繁に検討される (Braun et al., 2008; NEDO, 2009; Piwko et al., 2010)。太陽光発電 (PV) システムの設計及び運用技術は、技術的解決策、及びより正確な太陽エネルギーの予測を通して、ある程度、これらの問題を処理することが出来る。さらに、太陽光発電 (PV) インバータは、スマートメータを含む安価で効率的な通信システムと技術を組み合わせて利用する、新しいエネルギー・ネットワークにおける無効電力の調整または通信による高調波のフィルタリングにより、系統電力の品質を高める支援をすることが出来る (8.2.1 節を参照)。

新規のモジュール化技術が将来出現してきた時、マイクロコンバータ (microconverter) などのバランス・オブ・システムに関する考えの一部を変更する必要がある。さらに、システムの品質を保証し、決められた基準、方針及び手順に基づいて適切に維持する必要がある。システム品質を確保するためには、性能評価が重要であり、これには太陽光発電 (PV) システムのオンライン分析 (初期不良検出など) やオフライン分析が含まれる。集められた知識は将来のモジュールのエネルギー収量の予測やシステム技術設計のソフトウェアの実証の助けとなる。

また、数 MW から GW の範囲の容量を持つ非常に大規模な太陽光発電 (PV) システムの、普及に向けての計画が作成され始めている (Komoto et al., 2009)。長期においては、これらのシステムは世界的なエネルギー・ネットワークの重要な役割を担う可能性があるが (DESERTEC Foundation, 2007)、新しい送電用インフラ、及び電力システムの連系や運用管理の新技术及び新制度が必要となる可能性がある。

基準、品質保証、及び安全性と環境的側面は、その他の重要な論点である。国、特に地方機関及び公共事業は、太陽光発電 (PV) システムが同意済みの基準 (耐火性及び電気保安要件を含む、建築基準など) を満たしていることを求める。多くの場合、太陽光発電 (PV) 市場の発展は以下のいずれかにより妨げられている。1) 現行の基準、2) 地方ごとの基準の差異 (インバータ要件及び設置など)、または、3) 基準の不足 (適切な基準がないことにより、建築要素として認証されない太陽電池 (PV) モジュールや太陽光発電 (PV) 要素など)。基準やガイドラインはバリュー・チェーン全体で必要となる。多くの場合、新規及び適合した基準やガイドラインの作成は、専門の研究開発が必要であることを意味する。

品質保証は、太陽光発電 (PV) システムの個々の構成物、及び太陽光発電 (PV) システムの全体の機能が効果的であることを保証する重要なツールである。基準及びガイドラインは品質保証にとって重要な原則である。インライン生産調整手順及びガイドラインも作成しなければならない。システムレベルでは、監視技術も初期欠陥検出のため、開発する必要がある。

リサイクルは太陽光発電 (PV) 産業を確実に持続可能なものにするための重要な構成要素である。2010 年は年間

を通して、リサイクルの結晶シリコン及びカドミウムテルルの太陽モジュールに多くの注目が集まっている。その他の薄膜モジュールやバランス・オブ・システムの構成物（リサイクル手順が存在しないもの）のリサイクルの方法は、将来取り組んでいかなければならない。ライフサイクル評価研究は、様々な再生可能エネルギー資源の環境的プロファイル評価のための重要なツールである。信頼出来るライフサイクル評価データは、その他の電力源に対しての太陽光発電（PV）の地位保証を必要とする。これらのデータから、電力 1kWh または 1kJ 当たりの二酸化炭素排出量やエネルギー回収期間などの特性を算出することが出来る。また、ライフサイクル評価分析の結果は、太陽電池及びモジュールの生産ラインの新しいプロセス及び装置の設計段階で使用されることがある。

### 3.7.4 集光型太陽熱発電

現在、集光型太陽熱発電（CSP）は発電所規模で実証済みの技術である。構成部品は 20 年を超える耐用年数が確立され、運転保守面についても理解されており、運転保守コストの低減研究においては、構成部品の改良を提言するだけでなく、その検証を可能とする上での運用実績も十分にある。また、フィールドでの実績は製造と研究機関とにフィードバックされ、構成部品の改良及びより改善されたプロセスをもたらしている。さらに、研究者及び開発者に性能の限界またはコスト低減に対して、適切なポテンシャル、もしくはその両方をより理解させる上で、十分に実績がある。ある研究グループ（Sargent and Lundy LLC Consulting Group, 2003）は、技術の発展と規模の経済性、及び大量生産によりコスト低減出来ると結論付けている。その他の発電サイクル及び集光器に関する革新的なところについては、以下に説明する。

集光型太陽熱発電（CSP）は主に熱力学によって駆動するシステムである。したがって、熱エネルギー変換サイクルが性能及びコスト全体の決定に重要な役割を担う。一般に、熱力学サイクルの温度が高くなるほど、より効率的になる。もちろん、高温の熱エネルギーをプロセスへ提供する太陽熱集熱器は、より高温で効率的に運用することができなければならず、今日では、相当な数の研究開発が集光型太陽熱発電（CSP）システムを運用する温度を上昇させることに注目している。集光型太陽熱発電（CSP）は化石燃料業界が使用するタービン・サイクルと連動しているが、太陽エネルギーが入力されて作動する熱サイクルにおいて、負荷をより調整してタービンを改良することが出来る。

太陽熱集熱器と高温熱力学サイクルの関係を最適化するため、多くの開発が行われている。現在、最も一般的に利用されている発電ブロックは蒸気タービン（ランキン・サイクル）である。蒸気タービンは大容量において最も効率的でコスト的な効率も最も良い。熱伝達流体として石油を利用する現在のトラフ型プラントは、蒸気タービンの温度が 370°C までであり、タービン・サイクル効率は約 37% である。これにより 18% 規模の設計点の太陽熱から電気への変換効率と 14% の年間平均効率もたらされる。効率を高めるため、熱伝達流体に石油を使用することの代替案（集熱器にて直接蒸気を生成する、または熔融塩を利用するなど）がトラフ型のため開発されている。

これらの流体とその他の流体はすでに集光タワーに望ましい形になっている。集光タワー型及びディッシュ型集光系では、改良された蒸気タービン・サイクルが、亜臨界または臨界超過状態の流体の温度上限（現在の熔融塩で約 600°C）に到達する。また、集熱器型とディッシュ型では、ガスタービン（ブレイトン・サイクル）やスターリング・エンジンなどの高効率サイクルに必要な温度を提供することも出来る。このような高温サイクルは設計点の太陽熱から電力への変換効率を 35% まで、年間平均効率を 25% まで上昇させる能力がある。乾式冷却の不利益性が減少でき、しかも高温に出来るので、蓄熱がより効率的になる。

集光器は集光型太陽熱発電所（CSP）のコスト低減での潜在性に関わる最大の面積を持つ唯一のものである。集光型太陽熱発電（CSP）の集光器は、より高温のサイクルで発電する上に必要となるように高い光学効率を達成しつつコストをも低減することが、その目的である。トラフ型は、太陽熱発電用の選択吸収膜が継続的に改良されたことにより便益が得られ、また集光タワー型及びディッシュ型では、非常に高い集光太陽ビームの収集を可能にする集熱器が改善されるように設計されることによって便益もたらされる。線形フレネル型はある部分において魅力的であるが、それは年間の光学性能が低減するとしても、倒立キャビティの設計がトラフ型の集熱部に関連するいくつかの課題を減らすことが出来るためである。

全体の効率が上昇すれば、フィールドで必要なミラーの面積が相当分削減でき、それにより集熱器のコストと運転保守コストが低減出来る。投資コストの削減については、主に、太陽エネルギー産業特有の主要構成部品が大量生産されることの便益、そして規模の経済性ととの面から実現性が見込まれる。これは製造工具（manufacturing tooling）と設置に関連する固定価格が、ますます拡大する設備容量に対して広く適用されるからである。また、「実践して学ぶ」ことの便益が非常に大きい。集光型太陽熱発電（CSP）が便益を受ける将来の技術進歩に関するさらに詳しい評価については、ドイツ航空宇宙センターにより作成された欧州プロジェクト報告書（European project report）の ECOSTAR（2005）で見ることが出来る。

### 3.7.5 太陽燃料の生産

燃料の形で太陽エネルギーを貯蔵することは、運輸産業だけではなく、今日の複合サイクル、ガスタービンの進歩技術を利用した改良型複合サイクル、及び燃料電池を使用する高効率発電にとっても価値がある可能性がある。また、太陽燃料は集光型太陽熱発電用の貯蔵の形式としても利用出来る。

将来の太陽燃料プロセスは、高温の太陽熱取熱器が継続的に開発されることから便益を受けるが、電気化学及びバイオケミストリなどの他の科学分野からも受ける。多くの研究者は将来に向けて多くの関心を引く水素を検討しているが、中間期の暫定的提案も開発中である。水素は、この節で検討し、その他の太陽燃料は前節にて取り上げている。

太陽水電解の将来のイノベーションは、光電気化学 (PEC) 電池である。これは、太陽放射を水素などの化学エネルギーに変換するものである。光電気化学セルは太陽光を吸収する電極、2つの触媒薄膜、水素と酸素 ( $O_2$ ) を分離する膜を用いて製造される。半導体素材は、光電気化学セル内で、太光吸収陰極として使用される (Bolton, 1996; Park and Holt, 2010)。

将来の「クリーンな」水素の大量生産の将来有望な熱化学プロセスを網羅すると、ハイブリッド硫黄サイクル (hybrid-sulphur cycle) 及び酸化鉄ベースのサイクルがある。ハイブリッド硫黄サイクルは、2段階のうち1つに対して電気化学反応(熱化学の代わり)を用いる2段階の水分解サイクルである。このプロセスでは、二酸化硫黄は電気分解装置の陰極を脱極する。その結果、可逆電池のポテンシャルが大幅に減少し、電気化学反応段階の電力の必要量が減少する。太陽熱化学の酸化鉄をベースにしたサイクルに適用出来る多くの太陽炉が開発されている。これらには、欧州研究開発プロジェクト *HYDROSOL-2* にて実証されている酸化鉄混合物サイクルの  $100kW_{th}$  のモノリシック二室太陽炉 (Roeb et al., 2009)、 $ZnO/Zn$  プロセスに対する  $100kW_{th}$  まで拡大するロータリー式太陽反応炉 (Schunk et al., 2009)、東工大のロータリー式太陽反応炉 (Kaneko et al., 2007)、及び2段階の熱化学プロセスにおいて水素を効率的に生産するために顕熱の回収を利用する装置である逆回転リング集光炉復熱器が含まれる (Miller et al., 2008)。

熱化学プロセスの熱力学的に必要とされる高温においては、多くの材料の課題があり、また反応炉からの再放射が大きくなり、その結果、吸収効率が下がる (Steinfeld and Meier, 2004)。エネルギー変換の全体効率は、改良されたミラー光学とキャビティ-集熱器設計によって、高温における熱損失を抑制したり、熱化学プロセスにおける顕熱を一部回復するなどにより改善出来る。

高温熱化学プロセスには、熱的及び化学的に安定した反応炉壁の材料が必要であり、この材料によって様々な太陽燃料生産プロセスの最高の運転条件を引き出すことが出来る。多くの低温プロセス (硫黄ベースの熱化学サイクルなど) においては、主要な課題は腐食の問題である。非常に高温の酸化鉄サイクルにおける課題はセラミック壁の材料の熱衝撃抵抗性である。短期的な解決策としては、グラファイト及び炭化ケイ素などの熱適合性のある耐火素材の表面改質が含まれる。長期的な解決策には、バルク材の改質が含まれる。新規反応炉設計は壁反応を防ぐ可能性がある。

重要な側面は化学プロセスを太陽集光システムと統合することである。ヘリオスタット及び補助的集光器 (複合型放物曲面集光器) からなる集光系は、さらに開発を進める必要があり、特に、燃料生産用の太陽化学反応炉において高い太陽ビーム密度及び高温を獲得するために最適化する必要がある。

光化学及び光生物学 プロセスは太陽燃料へ変換するための別の強力な技術候補である。革新的な技術として、変異光合成微生物からのバイオ燃料と光触媒電池による燃料生産が開発中である。いずれも、農作物ベースよりもはるかに高い太陽エネルギー変換効率で燃料供給出来るポテンシャルを有する (Turner et al., 2008)。太陽駆動の燃料生産には、生体模倣ナノテクノロジーが必要であり、光化学要素に連結した多電子酸化還元触媒に関して、一連の基礎的及び技術的な改良が科学者によって行われた。これらの規模に応じた方法での水素生産は、膨大な技術的ポテンシャルがあり、有望な方法が精力的に追及されている。

これらすべての3つの形式を組み合わせたものがバイオガスの合成に見ることができ、そのガスはメタンと二酸化炭素、及び太陽由来の水素(太陽水素)の混合物である。太陽水素は電気化学水分解により供給される。バイオ二酸化炭素 (Bio- $CO_2$ ) は熱化学プロセス内で水素と反応し、合成天然ガスなどの炭化水素または液体太陽燃料を生産する (Sterner, 2009)。これらの手法は、まだ開発されたばかりであるが、エネルギー市場の相場が上昇し、太陽エネルギー発電コストが減少し続けるため、将来的に発展していくものと思われる。

### 3.7.6 その他の潜在的な将来の用途

中間的な熱力学的サイクルを用いない太陽熱技術を使用した発電方法があり、これらは研究段階であるが、熱電・熱電子・電磁流体力学・アルカリ金属を用いる方法が含まれている。熱電コンセプトは今日まで最も研究されている。その魅力は熱機関がないのでより静かで、理論上、効率のよい発電方法であるはずで、さらに分散型発電に適するという点である。特殊な用途として軍事及び宇宙電力がある。

宇宙太陽光発電 (SSP) は、地球の軌道上の巨大な衛星を用いて宇宙における膨大な量の太陽光電力を収集し、その後、その電力を受け手のアンテナ (レクテナ) にマイクロ波電力ビームで送るというコンセプトである。このコンセプトは 1968 年に Peter Glaser により初めて導入された。NASA とアメリカ合衆国エネルギー省 (US DOE) は 1970 年代に宇宙太陽光発電について、当時のエネルギー危機に対する可能性のある解決策として幅広く研究した。科学者たちは、GW 規模の電力を地球に送るのに十分な規模の衛星についてシステム・コンセプトを研究し、そのコンセプトは技術的に実現可能で、環境的にも安全であるが、実現技術の状態が宇宙太陽光発電を経済的に競争力がある状態にするには不十分であると思われると結論付けた。しかし、1970 年代以降、効率の良い太陽電池 (PV)、効率の良い固体マイクロ波発電電気工学、及びより低コストのロケット (space launch vehicle) などこれらの技術は大きく発展してきている (Mankins, 1997, 2002, 2009; Kaya et al., 2001; Hoffert et al., 2002)。今後さらに、コスト競争のある地球上のベースロード電力を達成するため、大きなブレークスルーが必要となるだろう (NAS, 2004)。

### 3.8 コストの傾向<sup>8</sup>

#### 3.8.1 パッシブ太陽熱利用技術及び採光技術

高性能な建物外皮を導入すると当初の建設費は高くなるが、建物の耐用年数内におけるエネルギー関連コストは低く抑えられる (Harvey, 2006)。高性能な建物外皮を導入したことで全体的にどの程度冷暖房システムを小型化、簡素化または除去できたかによって、建物の総投資コストは高くなる場合も、ならない場合もある。建物の耐用年数にわたってエネルギーコストが減ることで、あらゆる追加投資コストはある程度は相殺される。

非常に良質な熱外皮の導入によって削減出来る暖房炉費やボイラー費は通常、そうした熱外皮の導入にかかる追加コストに比べるとほんのわずかである。しかし、温風誘導ダクトやラジエータなど、暖房システム内の他の要素を小型化または除去することで、大幅にコストを削減出来る可能性がある (Harvey, 2006)。高性能な窓を採用すれば、ペリメータ暖房が不要となる。非常に高性能な外皮は暖房負荷を減らし、換気による通気のみで暖房負荷に適合出来るようになる。また、高性能な外皮を導入することでピーク冷房要件が軽減するため、冷房装置のサイズ決定コストも減少し、様々なパッシブかつ低エネルギーの冷房技術を用いることが可能になる。

完全に統合的な設計を行い、高性能な外皮がもたらすコスト削減の機会を余すことなく利用すれば、機械系のコスト節減分により、高性能外皮の追加コストの全部または大部分が相殺される可能性がある。

採光に関しては、大部分の商業建築物において、太陽光線を豊富に取り入れることで経済的メリットが高まる。採光によって人工照明用の電力需要が減少するためである。電気需要に日内ピークが生じる傾向にある場合にも採光の経済的メリットは高い (Harvey, 2006)。複数の研究者が、時間帯及び場所次第で年間 50~80%の節電になるとの計測及びシミュレーションを報告している。太陽熱取得を管理し、建物の熱・採光の統合的な設計に従う場合、採光は冷房負荷の削減につながる可能性がある (Tzempelikos et al., 2010)。これは、人工照明を必要な量の天然光に置き換えると、内部発熱が減ることを意味する。照明と冷房におけるエネルギー使用量は、それぞれ 22~86%減少すると報告されている (Duffie and Beckman, 2006)。

建物に採光とパッシブ太陽熱利用の機能を備えることで、標準的なライフサイクル分析や投資回収期間分析では算出が難しい大きな経済的メリットを享受することが出来る。こうした機能は概して建物に価値を付加し、オフィスビルにおいては生産性向上に寄与する (Nicol et al., 2006)。

#### 3.8.2 アクティブ太陽エネルギー利用による加熱・冷却

作物及び木材の天日乾燥は、自然作用を利用して、または特別に設計した貯蔵庫内に熱を集中させる方法で、世界中で一般的に行われている。しかし、利用可能な市場データはない。

太陽熱を利用した冷房や空調、淡水化脱塩処理及び水処理、太陽熱の産業利用などの高度な応用は発展の初期段階にあり、第 1 世代システムがほんの数百年のみ稼働中である。今後数年で研究開発が進めば、相当なコスト削減が見込まれる。

太陽熱温水システムは初期コスト投資が高く運転保守 (O&M) 費が低いのが特徴である。太陽熱加熱の機器の中には補助エネルギー源を必要とするものもあり、複数のエネルギー源を組み合わせることで年間負荷を達成している。太陽熱温水 (SWH) システムは一般的に日当たりの良い地域においてコスト競争力が高いが、空間暖房の場合は通常、全体の加熱負荷がより高いため状況が異なる。寒冷地では、長めの暖房期間に資本コストを分散出来るため、太陽熱の競争力がさらに高くなる可能性がある (IEA, 2007)。

<sup>8</sup> 本節におけるコストの説明は、民間投資家の観点に限定したものである。1 章、及び 8~11 章には、統合のコストや外部のコストと便益、経済全体のコストや政策コストなど、コストの問題について補足的な観点で説明している。

太陽熱暖房システムの投資コストは、使用される技術の複雑性に加え、稼働する国の市場条件によって大きく異なる。設置されたシステムのコストは、安いものでは中国の太陽熱温水 (SWH) システムの 83US ドル/m<sup>2</sup> (2005 年) から、高いものでは暖房システムの 1,200US ドル/m<sup>2</sup> (2005 年) まで幅広い。これは Annex III で用いられている 120~1,800US ドル(2005年)/kW<sub>p</sub><sup>9</sup>、及びそこから算出される 1 章、10 章及び本章に記載した熱の均等化原価 (LCOH) と一致する。出力した熱のコストに関しては、このほかにも、利用可能な太陽放射光や暖房度日数に関する地理的変数が存在する (Mills and Schleich, 2009)。

図 3.16 は、Annex III に記すデータ及び前提と Annex II に記した手法に基づいて、投資コストに対する熱の均等化原価の感度を設備利用率の関数として表にしたものである。

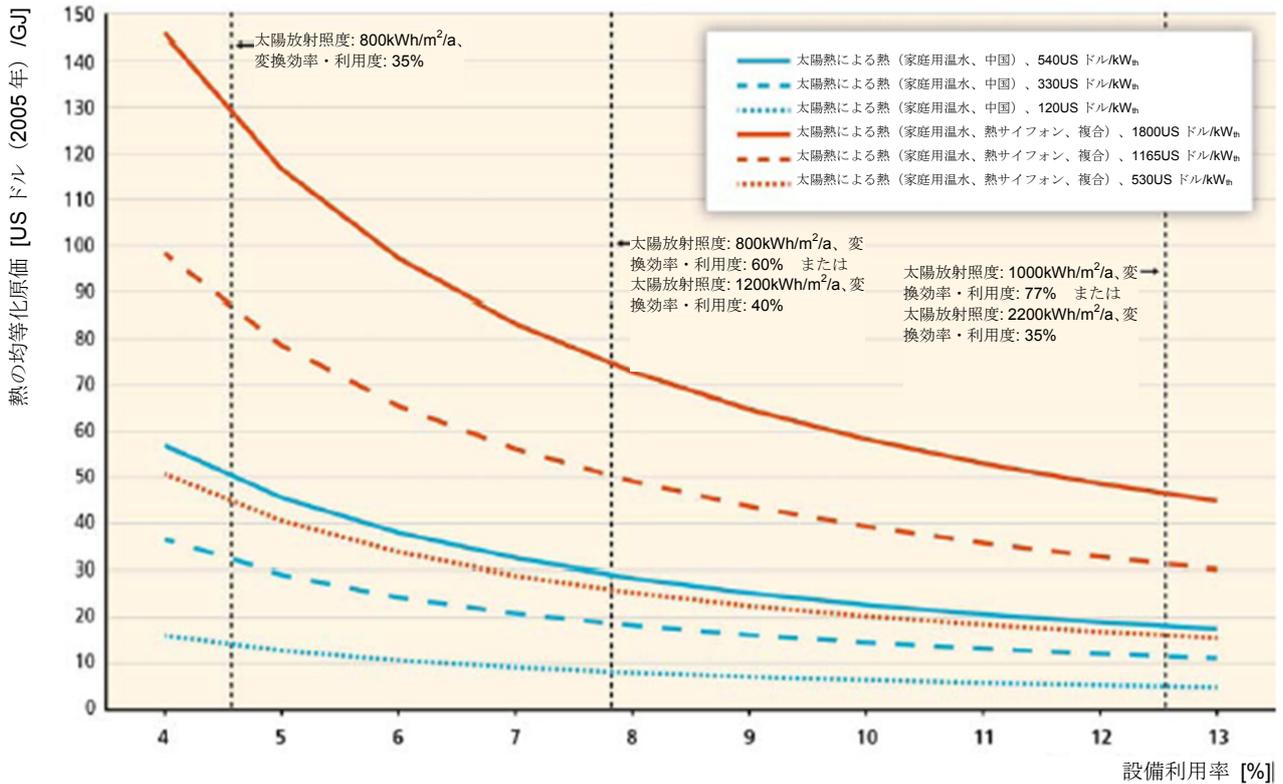


図 3.16: 設備利用率の関数としての投資コストに対する熱の均等化原価の感度 (出典: Annex III)

<sup>9</sup> 収集器の面積 1m<sup>2</sup> を設備容量 0.7kWth に換算 (3.4.1 参照)。

太陽熱温水システムのコスト削減に向けた研究は、主として温和な気候向けの低コストで重合体ベースの次世代システム開発志向であり、素材の耐久性試験にも重点が置かれている。これまでの研究には、負荷側の水中熱交換器と直接熱サイフォン・システムを用いる非加圧重合体統合熱収集・貯蔵システムも含まれる。

過去 10 年間にわたってヨーロッパでは、太陽熱温水器の設備容量が 50%増加すると、投資コストは 20%下落している。IEA によると (2010a)、OECD 諸国では、より安価な材料の使用、製造プロセスの改善、大量生産を行い、また集光器を多機能な建築部材かつモジュール方式の簡易設置システムとして建築物に直接的に組み込むことで、コストを削減出来るとしている。IEA は、OECD 諸国で投入されるエネルギーコストは最終的には 70~75%程度下落すると予想している。こうしたコスト削減を実現するために IEA が提案する対策の 1 つは、研究開発と実証 (RD&D) への投資の増強である。もっとも注目すべき分野には、新しい平板太陽熱集熱器が含まれる。これは建物ファサードと屋根により簡単に組み込める、とりわけ多機能な建築部材である。

個別のシステム要素のコスト下落が続き、最適化が進んで設計も改良すれば、エネルギーコストは下がるはずである。一例として、Furbo et al. (2005) によると、改良型設計の家庭用太陽熱温水貯蔵タンクを補助エネルギー源と併用した場合、太陽エネルギーの利用率が 5~35%増加する。これにより、より面積の小さい集熱器で同等の太陽熱取得量を得られるようになる。

### 3.8.3 太陽光発電

太陽光発電 (PV) 価格は過去 30 年間で 10 分の 1 以下に下がったが、一般的に現在の太陽光発電 (PV) の均等化発電原価 (LCOE) はまだ電力の卸売市場価格よりも高い<sup>10</sup>。他の市場における競争力は、様々な地域の状況に左右される。

太陽光発電 (PV) の均等化発電原価は、一般的に個別のシステム要素のコスト、場所、及びシステム全体の性能に影響するその他の要因に大きく依存している。太陽光発電 (PV) システムの投資コストのうち、もっとも大きい割合を占めているのが太陽光発電 (PV) モジュールである。均等化発電原価に影響するその他の要因には、バランス・オブ・システム要素、設置にかかる人件費、運転保守 (O&M) コストなどがある。太陽光発電 (PV) システムのコストに関しては、常に動向が変動しているため、当節では現在のコストよりもコストの傾向に重点を置いて説明する。なお、現在のコストについては、下記に個別のコスト要因とその結果の均等化発電原価を説明する際に示す。

太陽光発電 (PV) モジュールの工場渡し価格の世界平均額は、1980 年には約 22US ドル (2005 年) /W だったものが 2010 年には 1.5US ドル (2005 年) /w 未満に下落した (Bloomberg, 2010)<sup>11</sup>。太陽光発電 (PV) モジュールは、太陽光発電 (PV) システムで最大の単価項目であるため、太陽光発電の学習曲線の習熟度に関する研究のほとんどが、太陽光発電 (PV) モジュールに重点を置いている (Yang, 2010)。太陽光発電 (PV) モジュールの過去の学習率は 11~26%の範囲内 (Maycock, 2002, Parente et al., 2002, Neij, 2008, IEA, 2010c) で、進歩指数の中央値は 80%であるため、したがって過去の学習率 (価格経験係数) の中央値は 20%となる。これは、累積売り上げが倍増するごとに、価格が 20%下落したことを意味する (Hoffmann, 2009, Hoffmann et al., 2009)。図 3.17 は、過去 35 年間における結晶シリコン・モジュールの価格動向を表したものである。2003 年以降の大幅な需要の拡大によって市場が供給困難に陥り、価格が高騰したが、後に市場が需要増大に転じた結果、モジュールの生産能力が過剰となり、価格が大幅に下落した (Jäger-Waldau, 2010a)。

<sup>10</sup> 均等化発電原価は、価格決定及び経済競争力の唯一の決定要因ではない (関連する環境影響や社会的影響、及びピーク電力需要などの特定のエネルギーのサービスを行う上での、または統合コストにおける技術の貢献度を考慮する必要がある)。

<sup>11</sup> (訳注) 2005 年為替換算率

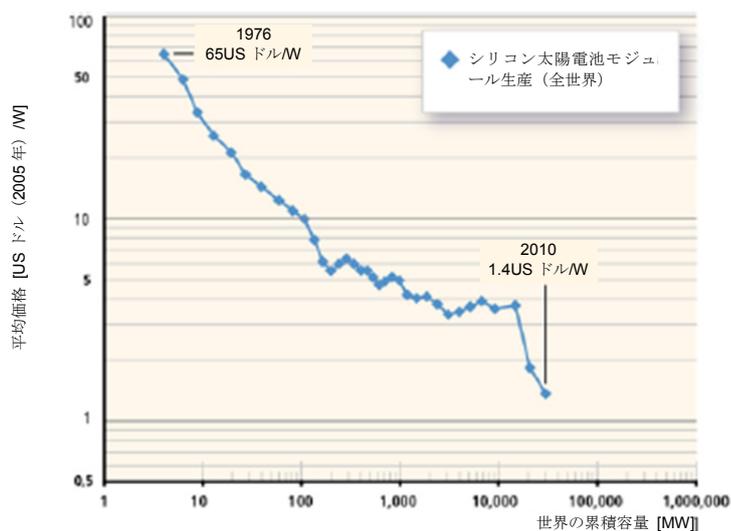


図 3.17: シリコン太陽電池モジュールに関する太陽光発電 (PV) 価格の経験曲線または学習曲線。グラフのデータは供給と需要の変動を追従して上下している。出典: Maycock (1976-2003)、Bloomberg (2010)。

技術関連コストで2番目に大きいのがバランス・オブ・システム要素で、その中でもっとも大きな割合を占めるのがインバータである。バランス・オブ・システム全体の経験曲線は78~81%、つまり学習率は19~22%でモジュールの率とほぼ同じであるが、インバータの学習率はちょうど10% (Schaeffer et al., 2004) である。アメリカでの太陽光発電 (PV) システム設置における人件費の削減に関しても同様の傾向が見られた (Hoff et al., 2010)。

太陽光発電 (PV) システムの平均投資コスト、つまり、太陽電池モジュールとバランス・オブ・システム要素のコスト及び設置にかかる人件費の合計額についても、過去20年ほどの間に大幅に下落しており、今後も太陽光発電 (PV) の技術と市場が成熟するに従って、急速に下落を続けるものと思われる。しかし、システムの価格下落幅<sup>12</sup>は、地域によって大きく異なり、実行中の支援策や市場成熟度に多分に左右される (Wiser et al., 2009)。図 3.18 は、ヨーロッパ、日本、アメリカにおけるシステムの価格動向を表す。

アメリカに設置された太陽光発電 (PV) システムの投資コストの設備容量による加重平均は、1998年の9.7USドル (2005年) /W から2008年には6.8USドル (2005年) /W まで下がった。値下がり の主な要因は、非モジュール (バランス・オブ・システム) コストの下落である。図 3.18 からは、太陽光発電 (PV) システムの価格が2008年の下半期から大幅に下落し続けていることもわかる。こうした値下がり の原因は、生産設備の著しい増加と生産能力の過剰、及びその結果として過熱した太陽光発電 (PV) 会社間の競争であると考えられる (LBBW, 2009, Barbose et al., 2010, Mints, 2011)。より広い視点で図 3.18 を見ると、2005年までは世界の各地域間、及び各地域内において太陽光発電 (PV) システムの価格または投資コストの格差が狭まってきたことがわかる。しかし、2006年から2008年にかけて、少なくとも一時的に価格差が広がっている。ドイツでは、100 kW<sub>p</sub> 未満の太陽光発電 (PV) システムの2010年第1四半期の平均価格が€2,864/kW<sub>p</sub> (3,315USドル (2005年) /kW<sub>p</sub>) に下落した (Bundesverband Solarwirtschaft e.V., 2010)。2009年には、発電所規模の薄膜プロジェクトで2.72USドル (2005年) /W<sub>p</sub> の低コストを実現した (Bloomberg, 2010)。

太陽光発電 (PV) システムの運転保守コストは低く、1年あたり初期投資コストの0.5~1.5%である (Breyer et al., 2009, IEA, 2010c)。

<sup>12</sup> 独立系のプロジェクト開発者に対する投資コストはシステム価格によって決まる。価格には利幅が含まれるため、独立系のプロジェクト開発者に対する投資コストは、太陽光発電 (PV) システムやそのコンポーネントを製造する垂直的に統合された会社に対する投資コストよりも高くなるだろう。

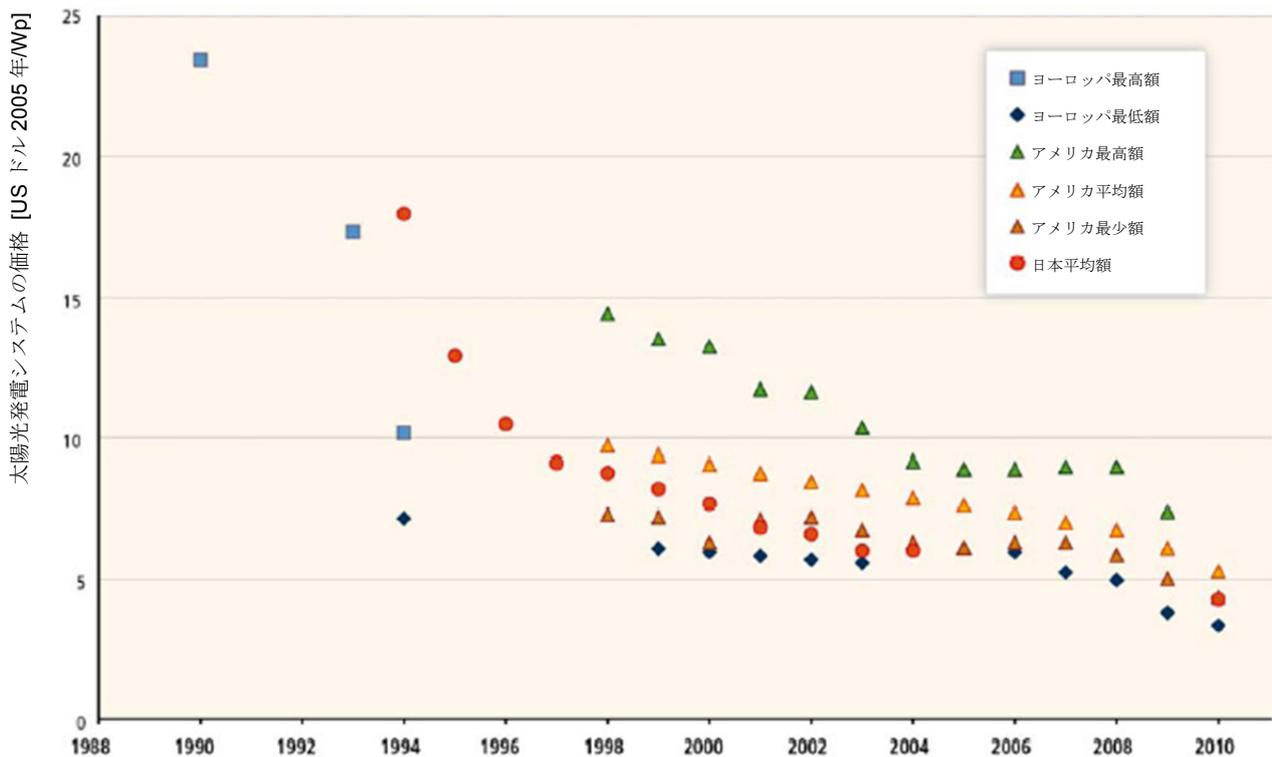


図 3.18: ヨーロッパ、日本、アメリカにおける 100kW<sub>p</sub> 未満の太陽光発電 (PV) システムの設置コスト。出典: Urbschat et al. (2002), Jäger-Waldau (2005), Wiser et al. (2009), Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2010), SEIA (2010a,b)。

太陽光発電 (PV) システムの設備利用率に影響する主なパラメータは、特定の立地における実際の年間の放射量で、kWh/m<sup>2</sup>/年で示す。太陽光発電 (PV) システムの設備利用率は、11~24%の範囲であり (Sharma, 2011)、これは、大半の家庭用太陽光発電 (PV) システムの設備利用率が 11~19%であるとした IEA の太陽光発電システム (PVPS) 研究実施プログラムでの調査結果 (IEA, 2007) と一致する。現在建設中又は計画段階にある発電所規模のシステムの設備利用率は、20~30%となる予定である (Sharma, 2011)。

以下の 2 図は、上述した 2008 年前後の世界的な投資コストを表す最近のデータ、本報告書の Annex III に記載の前提、及び Annex II に記した手法に基づいて、投資コスト (図 3.19a) 及び割引率 (図 3.19b) に対する様々な種類の太陽光発電システムの均等化発電原価の感度を、設備容量係数の関数としてグラフ化したものである。

実用規模の 1 軸追尾型太陽光発電 (PV) システムの場合、実用規模の固定型太陽光発電 (PV) システムに比べて 15~20%の範囲で投資コストが増えることに注意が必要である。c-Si のモデル化研究によると、1 軸追尾型の場合、発電所規模の固定型太陽光発電 (PV) システムに比べて 16%増しとなる (Goodrich et al., 2011)。2008 年及び 2009 年における 20~500kW の商用屋上太陽光発電 (PV) システムの投資コストは、4~10kW の家庭用太陽光発電 (PV) システムより約 5%少ないことが報告されている (NREL, 2011)。

これらの数字から、個々のプロジェクトの均等化発電原価は、投資コスト、割引率及び設備利用率の組み合わせ、及びプロジェクトのタイプ (家庭用、商用、実用規模) に大きく依存していることがわかる。

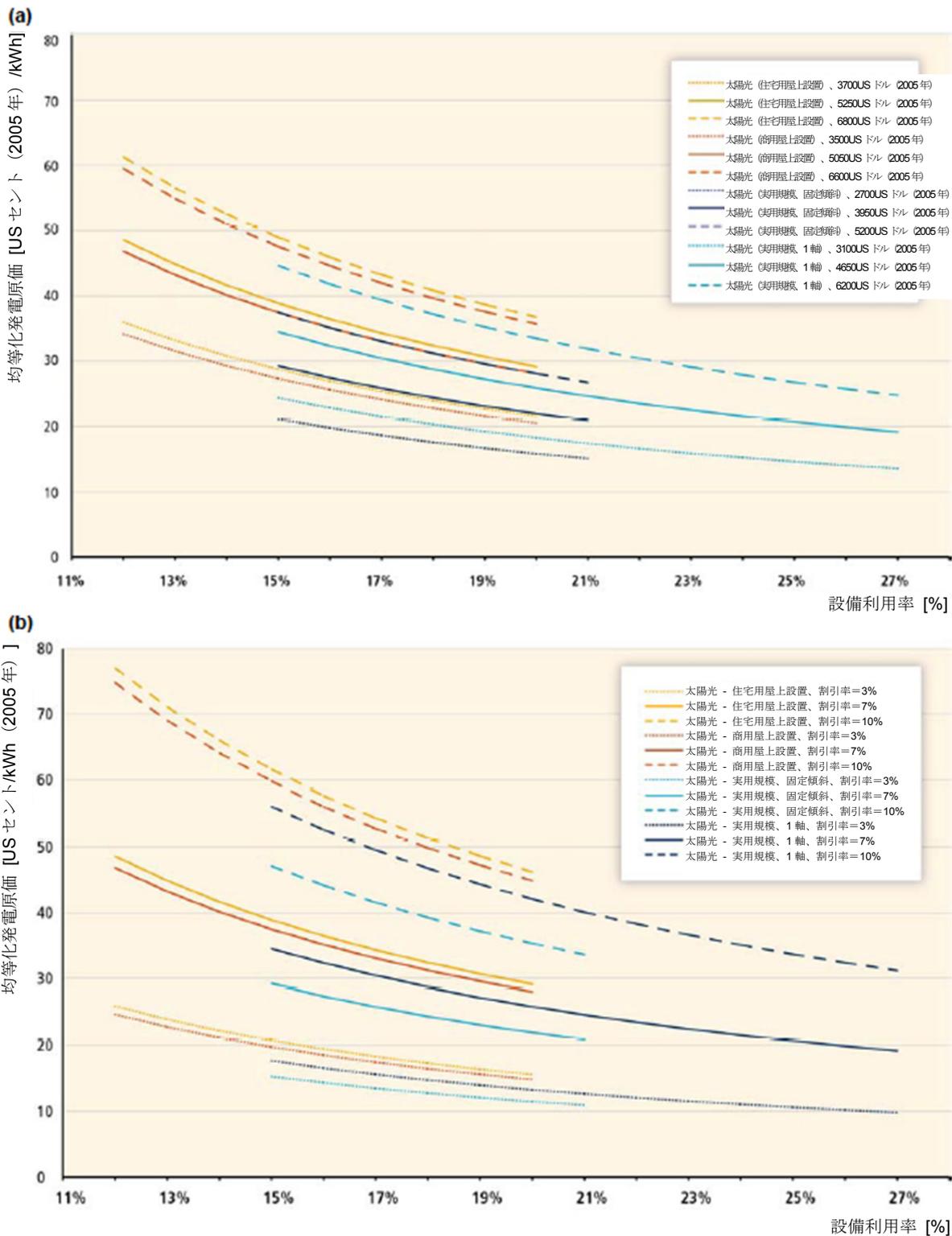


図 3.19: (a) 設備利用率と投資コストの関数(※、※※※)としての、また b) 設備利用率と割引率の関数(※※、※※※)としての太陽光発電 (PV) の均等化発電原価 (2008~2009 年)。出典: Annex III

注:

※割引率は 7%と仮定。

※※投資コストは、住宅用屋上設置システムの場合は 5,500US ドル US/kW、商業用屋上設置システムの場合は 5,150US ドル、発電所規模の傾斜固定プロジェクトの場合は 3,650US ドル/kW、発電所規模の一軸プロジェクトの場合は 4,050US ドル/kW と仮定。

※※※年間運用・保守コストは、寿命を 25 年間として、41~64US ドル/kW と仮定。

太陽光発電 (PV) の均等化発電原価については、様々な前提と手法に基づいた複数の研究結果が発表されている。Bloomberg (2010) は、2009 年の 2.72US ドル (2005 年) / $W_p$  の薄膜プロジェクトにおける投資コスト及びその他の前提より、均等化発電原価は 14.5~36.3US セント (2005 年) /kWh であるとした。Breyer et al. (2009) は、ヨーロッパ及びアメリカの太陽照射光が高い ( $>1,800\text{kWh/m}^2/\text{年}$ ) 地域における 2009 年の均等化発電原価は 19.2~22.6US セント (2005 年) /kWh であるとしている。図 3.19 及び Annex III に記載の均等化発電原価の価格帯から判断すると、上記の研究結果で示された価格帯はいずれも、無理なく達成出来ると思われる。

太陽光発電 (PV) マーケットが年間 35%以上の成長率を持続すると仮定すると、コストは 2020 年までに 50%以上下落し、約 7.3US セント (2005 年) /kWh になることが見込まれる (Breyer et al., 2009)。表 3.5 は、2010 年の IEA の太陽光発電 (PV) ロードマップの予測である。あまり意欲的な数値ではないものの、大幅な下落が見込まれている (IEA, 2010c)。予測のベースとなっているのは、2050 年までに太陽光発電 (PV) 設備容量が累積 3,155GW となるという普及シナリオである。

**表 3.5:** IEA による 2020 年及び 2050 年の価格予測。2,000 kWh/ $kW_p$  及び 1,000 kWh/ $kW_p$  の価格 (IEA, 2010c)

	2020 年 (US セント (2005 年))		2050 年 (US セント (2005 年))	
	2000	1000	2000	1000
エネルギー収量 (kWh/ $kW_p$ ) 設備利用率換算	22.8%	11.4%	22.8%	11.4%
家庭用太陽光発電 (PV)	14.5	28.6	5.9	12.2
実用規模の太陽光発電 (PV)	9.5	19.0	4.1	8.2

アメリカエネルギー省ソーラー・プログラムの技術計画は、太陽光発電 (PV) による電力がアメリカ国内で 2015 年までに市場価格に対して価格競争力を持つことを目標としている。各市場セクターに関するエネルギーコストの意欲的な目標額は、住居用で 8~10US セント (2005 年) /kWh、商用で 6~8US セント (2005 年) /kWh、公共事業用で 5~7US セント (2005 年) /kWh である (US DOE, 2008)。これらのコスト目標は全て、非常に楽観的な条件下ではあるものの 2008 年頃に実現した同タイププロジェクトにおいて達成可能と思われる額をほんの少し下回っただけの額である (図 3.19、図 3.20、及び Annex III を参照)。コスト削減が当面の間続けば、有利な条件下で行われるプロジェクトにおいてこれらのコスト目標は十分に達成可能であると思われる。しかし、こうしたコスト削減をより幅広い規模で達成するには、さらなる技術発展が必要である。

### 3.8.4 集光型太陽熱発電

集光型太陽熱発電 (CSP) システムは、複雑な資源環境、財政環境の元で運用される複雑な技術であるため、均等化発電原価に影響する係数は多い (Gordon, 2001)。世界銀行の研究 (World Bank Global Environment Facility Program, 2006) は、集光型太陽熱発電 (CSP) 技術に関するコスト削減の 4 段階を提案し、2025 年までにはコスト競争力が非再生可能燃料に追いつき得ると予測した。図 3.20 は、発電所の規模の経済、素材の改良と大量生産による部品コストの削減、及び効率の良いプロセスや技術の導入により、集光型太陽熱発電 (CSP) 技術のコスト削減が見込まれることを示している。

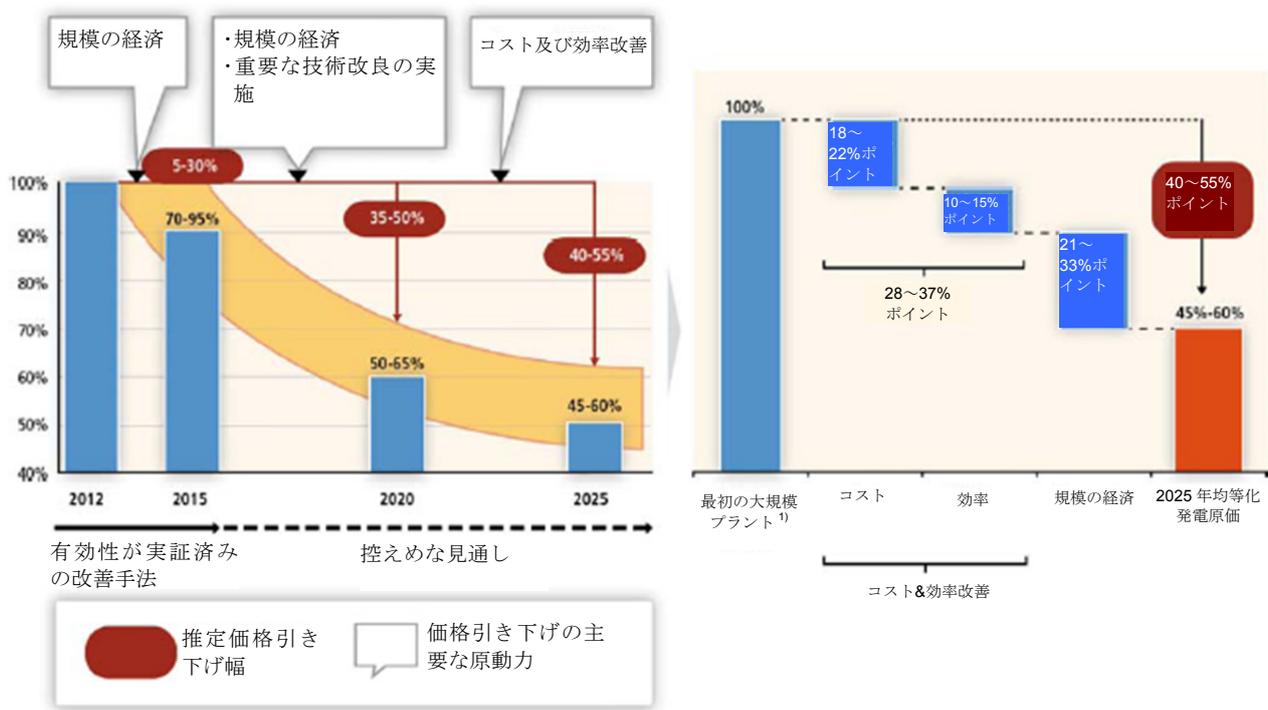


図 3.20: 集光型太陽熱発電所 (CSP) における 2012~2025 年のコスト減少の推測。コストには、発電所のコストと資金調達コストが含まれる (A.T. Kearney, 2010)。右図において、コスト、効率、及び規模の経済による減少幅は互いに重複しているため、これら 3 要素が 2025 年のコストにもたらす減少効果は、3 要素による減少幅の合計より少なくなる。

注:

- 1) 各技術 (参照プラント) の商用開始予定日が 2010~2013 年であるものを示す。
- 2) 価格は最低要求価格、2012 年の価格との比較による。

9 つの太陽熱発電プラントから成るカリフォルニアの Solar Electric Generating Station (SEGS) への総投資額は 11 億 8000 万 US ドル (2005 年)、ネバダ・ソーラー・ワンの建設及び関連コストは 2 億 4500 万 (US ドル (2005 年)。2007 年ベースでの推計) に達する。

公表されている集光型太陽熱発電所 (CSP) への投資コストは、他の再生可能エネルギー源と比べて分かりにくいことが多い。というのも、様々なレベルの統合蓄熱を行うことで投資額は増加するものの、発電所の年間出力と設備利用率も向上するためである。

集光型太陽熱発電所 (CSP) の太陽熱設備利用率に影響を与える主なパラメータは、カリフォルニアの SEGS プラントを例に挙げると、太陽放射、及び補助加熱器であるガス燃焼ボイラーの貯蔵量または利用可能度の 2 つである (Fernández-García et al., 2010)。太陽熱のみを利用する集光型太陽熱発電所 (CSP) の場合、利用可能な太陽放射が設備利用率に直結する。理論上は、貯蔵装置を使って設備利用率を 100% まで上げることが出来るが、採算が取れないため実用的ではない。現在のトラフ型発電所は 6~7.5 時間の貯蔵が出来るよう設計されており、設備利用率は 36~41% である (3.3.4 節参照)。タワー型発電所はトラフ型発電所より温度が高く、熔融塩をより効率良く充填、貯蔵出来る。最大 15 時間貯蔵可能で年間設備利用率が 75% となるよう設計されたタワー型プロジェクトが建設中である。

SEGS プラント以外の新しい集光型太陽熱発電所 (CSP) は 2007 年以降の新しい発電所しか稼働していないため、利用可能な実際の性能データがほとんどない。SEGS プラントについては、設備利用率は 12.5~28% の間であることが報告されている (Sharma, 2011)。ヨーロッパで稼働中または建設完了目前の集光型太陽熱発電所 (CSP) における年間平均設備利用率の予想値は、貯蔵装置がない場合は 22~29%、貯蔵装置がある場合は 27~75% である (Arce et al., 2011)。これらの数値は IEA の集光型太陽熱発電 (CSP) ロードマップ (IEA, 2010b) 及び US Solar Vision Study (US DOE, 2011) 上の設備利用率値とはほぼ一致しているが、蓄熱機能の状況に関する利用可能な性能データはほとんどないので注意が必要である。

<PDF542P 3 章 72>

大規模な最先端のトラフ型発電所の場合、現在の投資コストは、人件費、土地代、技術、直達日射の量と分散、そ

して何より貯蔵量とソーラー・フィールドの大きさに左右されるが、3.82US ドル (2005 年) (貯蔵装置なし) ~ 7.65US ドル (2005 年) (貯蔵装置あり) /W であると報告されている (IEA, 2010b)。貯蔵装置がある場合、貯蔵装置そのものに投資コストがかかる上に、貯蔵装置の充填用として熱集熱器の面積を増やす必要が生じるため投資コストが高くなる。しかし、市場価格がピークに達している時や、電力のバランスを取る必要がある場合には、貯蔵装置によって給電能力も向上する。このように、貯蔵に対する戦略的アプローチによって、プロジェクトの内部収益率を改善出来る可能性がある。

IEA (2010b) は、大規模トラフ型太陽熱発電所の 2009 年における均等化発電原価について、蓄熱量及び太陽放射レベルの異なる複数のシステムにおいて 0.18~0.27US ドル (2005 年) /kWh であると推定している。これは 6 時間貯蔵可能なシステムの均等化発電原価に 10%の割引率 (IEA による) を適用した場合とほぼ一致するが、異なる割引率を適用すると、均等化発電原価の範囲は広がる (Annex III 参照)。下記の 2 つのグラフは、本報告書の Annex III に記載のデータ及び前提と Annex II に記した手法に基づいて、投資コスト (図 3.21a) 及び割引率 (図 3.21b) に対する、6 時間の蓄熱機能を持つ集光型太陽熱発電所 (CSP) の均等化発電原価の感度を設備利用率の関数として表にしたものである。

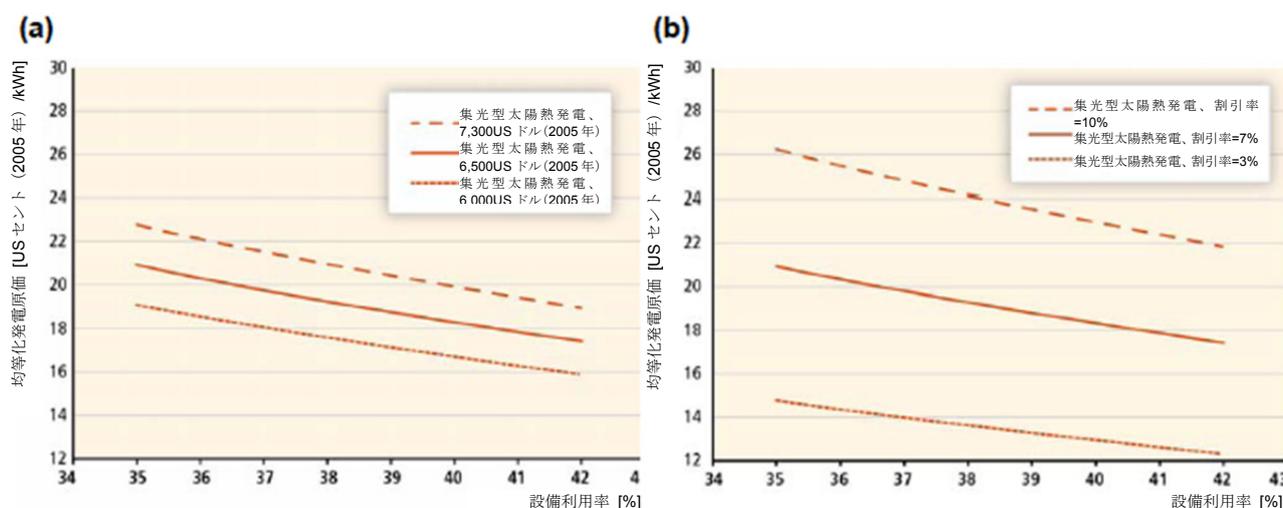


図 3.21: (a) 設備利用率と投資コストの関数 (※、※※※)としての、また (b) 設備利用率と割引率の関数(※※、※※※)としての集光型太陽熱発電 (CSP) の均等化発電原価 (2009 年) :。出典: Annex III

注:

※割引率は 7%と仮定。

※※ 6 時間の蓄熱機能を持つ集光型太陽熱発電所 (CSP) の投資コストは、6,650US ドル (2005 年) /kW と仮定。

※※※年間運転・保守コストは 71US ドル (2005 年) /kW、耐用年数は 25 年と仮定。

集光型太陽熱発電 (CSP) の学習率は、発電ブロックを除くと 10±5%であると Neij が算出している (2008, IEA, 2010b)。その他にも、集光型太陽熱発電 (CSP) の部品別に学習率を算出した研究があり、Trieb et al. (2009b) によると、ソーラー・フィールドは 10%、貯蔵装置は 8%、発電ブロックは 2%である。また、NEEDS (2009) と Viebahn et al. (2010) は、ソーラー・フィールドは 12%、貯蔵装置は 12%、発電ブロックは 5%としている。

トラフ型発電所のコストは、今後 10 年以内に 30~40%程度削減可能であると思われる。商用の点集光型は、トラフ型に比べて成熟しておらず、現時点でトラフ型よりは投資コストが若干高くなっている。しかし、点集光型のコストは、40~75%削減すると予測されている (IEA, 2010b)。

アメリカエネルギー省 (2011) は、アメリカの集光型太陽熱発電 (CSP) 目標を US ドル/W ではなく US ドル/kWh で設定している。なぜなら、Solar Energy Technologies Program は均等化発電原価に影響を与えるように策定されており、莫大な貯蔵能力を盛り込んでいるからである。具体的な集光型太陽熱発電 (CSP) の目標は、2010 年までに 9~11US セント (2005 年) /kWh、2015 年までに 6~8US セント (2005 年) /kWh (6 時間の蓄熱機能あり)、2020 年までに 5~6US セント (2005 年) /kWh (12~17 時間の蓄熱機能あり) (US ドル (2005 年)、2009 年ベースでの推定) である。EU は、包括的な研究開発実証プログラムを通じて、同様の目標達成に努めている。

### 3.8.5 太陽燃料生産

太陽エネルギーの燃料への直接変換に関する幅広い実証や商用化はまだ行われていない。熱化学サイクルとそれに伴う水の電気分解は、未来の「クリーン」な水素生産プロセスとして、もっとも有望視されている。太陽熱タワー

技術を用いてハイブリッド硫黄サイクルと金属酸化物ベースのサイクルを稼働し、多段階水分解を行った比較研究がある (Graf et al., 2008)。アルカリ電気分解に必要な電力は放物曲面型トラフ型太陽熱発電所で生産し、各プロセスにおける投資コスト、稼働コスト及び水素生産コストは 50-MW<sub>th</sub> スケールで計算した。研究は、太陽エネルギーと熱化学サイクルを用いた持続可能な水素生産の市場ポテンシャルを、商用電気分解と比較して提示している。控えめ、標準、楽観的の3つの異なるコスト・シナリオについて感度分析が行われた (表 3.6)。

表 3.6: 感度のパラメータの概要 (Graf et al., 2008)

	コスト・シナリオ		
	控えめ	標準	楽観的
ヘリオスタットのコスト (US ドル (2005 年) /m <sup>2</sup> )	159	136	114
耐用年数 (年)	20	25	30
酸化還元システムのコスト (US ドル (2005 年) /kg)	1,700	170	17
電気コスト (US ドル (2005 年) /kWh <sub>e</sub> )	0.14	0.11	0.05
電気分解装置 (減少率, %)	0	-10	-20
化学的応用 (減少率, %)	0	-10	-20
窒素のリサイクル (減少率, %)	0	-20	-40

その結果、上記のパラメータの値が変動しても、ハイブリッド硫黄プロセスにおける水素生産コストにはほとんど影響が出ず、4.4~6.4US ドル (2005 年) /kg の範囲である (Graf et al., 2008)。電気分解の主なコスト要因は電力である。電力コストが変動するだけで水素コストは 2.4~7.7US ドル (2005 年) /kg となる。水素コストが最高になるのは、金属酸化物ベースのプロセスを用いる場合の 4.0~14.5US ドル (2005 年) /kg である。金属酸化物ベースのサイクルのコストにもっとも大きい影響を及ぼすのは酸化還元システムのコストである。窒素のリサイクルは大きな電気エネルギーを必要とし、これが結果に大きく影響している。

熱化学合成において、太陽水素と二酸化炭素の化合により代替天然ガスが生産出来る。コストは 12~14US セント (2005 年) /kWh<sub>th</sub>、再生可能エネルギーコストは 2~6US セント (2005 年) /kWh<sub>e</sub> である (Sterner, 2009)。これらのコストは、プラントの稼働モードに大きく左右されるため、効率を改善し電力コストを削減することで削減出来る。

現在の経済アセスメントの弱点は主に、様々な太陽エネルギーシステム要素における成功につながる効率性と投資コストの水準の不確実性に関連している。こうした不確実性は、開発及び規模の経済が初期段階にあること、ならびに利用可能な文献データが乏しいことに起因する。

### 3.9 普及のポテンシャル<sup>13</sup>

直接的太陽エネルギーに関する将来の普及予想は、過小評価されていると思われる。なぜなら、直接的太陽エネルギーは幅広い技術に関わり、用途も広いが、それらの全てがエネルギー・シナリオを記した文献に適切に盛り込まれている訳ではないからだ。当節では、短期的 (2020 年) 及び長期的 (2030 年~2050 年) な太陽エネルギー普及予想を紹介する。その後、長期シナリオにおける太陽エネルギー普及の展望と障壁について、また、温室効果ガス濃度安定化の様々なレベルを達成する上で太陽エネルギー普及が果たす役割について述べる。ここでの考察は、最近の文献で発表されたエネルギー市場予想、及び炭素とエネルギーのシナリオに基づいている。

#### 3.9.1 短期的予想

2010 年におけるマーケット・ドライバーは、太陽熱による発電システムまたは低温太陽熱システムの設置に対する、国からの様々な支援プログラムである。こうしたプログラムは、システムの設置または生産した電力のいずれかを支援するものである。様々な太陽エネルギー技術に対する市場の支援は技術ごとに大きく異なり、また、同じ技術においても地域によって異なるため、既存の技術に対する競争力を持つ上での閾値や障壁は実に多様である。こうした現状にもかかわらず、太陽エネルギー技術の将来的な普及は公的な市場開発への支援に大きく依存しており、市場開発の後に学習効果によってコストの低減が起り得る。注意しなければならないのは、学習に関連したコスト低減は、時間の経過だけに依存するのではなく、少なくとも一部は実際の生産量及び普及量に依存することである。また、研究開発などの他の要素もコストの低減に寄与する (10.5 節を参照)。

表 3.7 は、2020 年までの短期間における、シナリオごとの太陽エネルギー普及力の伸びを表わしている。パッシブ太陽熱取得技術がこの統計に含まれていないことを強調する必要がある。なぜなら、この技術は需要を減少させる

<sup>13</sup> 普及のポテンシャルに関する補完的な展望については、エネルギーシステムに関する、モデルベースの数多くのシナリオの包括的評価に基づいて、10.2 と 10.3 で述べる。

ものの、それゆえにエネルギー統計の対象となるサプライチェーンに含まれていないためである。同じ太陽光発電 (PV) 技術は、系統連系しない地方のスタンドアロン、小規模系統、またはハイブリッドのシステムに、そして分散型、集中型いずれの系統連系システムにも利用可能である。集光型太陽熱発電 (CSP) 技術を導入可能な地域は、2,000kWh/m<sup>2</sup> (7,200MJ/m<sup>2</sup>) 以上の良質な直達日照を利用できる地球上のサンベルト地帯に限られる。表 3.7 に示すように、太陽エネルギー容量は、参照シナリオやベースラインのシナリオでも拡大が見込まれているが、全世界のエネルギー部門が炭素排出量の低減に向かってより劇的な転換を目指す代替的なシナリオにおいては、太陽エネルギー容量の増加が劇的に加速することが期待される。

**表 3.7: 欧州再生エネルギー評議会 (EREC) ・グリーンピース (Teske et al., 2010) 報告の複数のシナリオ、及び IEA のロードマップ (IEA, 2010b,c) に基づいた累積太陽エネルギー容量の進化**

現在の累積設備容量	低温太陽エネルギー暖房 (GW <sub>th</sub> )			太陽光発電 (PV) による電力 (GW)			集光型太陽熱発電 (CSP) による電力 (GW)		
	2009	2015	2020	2009	2015	2020	2009	2015	2020
現在の値	180			22			0.7		
欧州再生エネルギー評議会・グリーンピース (基準 (reference) シナリオ)		180	230		44	80		5	12
欧州再生エネルギー評議会・グリーンピース (参考 ([r] evolution) シナリオ)		715	1,875		98	335		25	105
欧州再生エネルギー評議会・グリーンピース (自然エネルギー革命 (advanced) シナリオ)		780	2,210		108	439		30	225
IEA ロードマップ		該当なし			95 <sup>a</sup>	210		該当なし	148

注: <sup>a</sup>2010~2020年の平均成長率からの推定

2009 年末時点における太陽光発電市場の 2013 年までの短期的な予想では、年間成長率 10~50%以上 (UBS, 2009、EPIA, 2010、Fawer and Magyar, 2010) の着実な成長を示している。太陽エネルギー技術普及の加速に関して複数の国が意欲的な目標を検討、作成している。以下の政策が全て実施されれば、2020 年までの期間における世界市場の成長要因となり得る。

- ・ 中国国家発展改革委員会 (NDRC) は、2020 年までに中国のエネルギー総需要の 15%を非化石エネルギーで賄うことを見込んでいる。特に、太陽エネルギー設備容量に関しては、2007 年の NDRC の「Medium and Long-Term Development Plan for Renewable Energy in China」において、2020 年までに 1,800MW とすることを目標にしている。しかし、これらの目標は低すぎるとの議論があり、設備容量は 20GW 以上に達する可能性が高いと思われる。
- ・ ヨーロッパは、2009 年の European Directive on the Promotion of Renewable Energy において 2020 年の再生可能エネルギー割合を 20%とする目標を設定し (The European Parliament and the Council of the European Union, 2010)、戦略的エネルギー技術計画 (SET Plan) では、ヨーロッパにおける太陽光発電 (PV) による電力を 2020 年までに 12%に引き上げるとしている (European Commission, 2007)。
- ・ 2009 年のインドの太陽エネルギー計画 (「India Solar Mission」) では、2022 年の太陽エネルギーによる電力目標を 20GW としている。内訳は、地上設置型の太陽光発電所 (PV) 及び集光型太陽熱発電所 (CSP) から 12GW、屋上設置型太陽光発電 (PV) システムから 3GW、村落の非系統連系太陽電池 (PV) アレイからも 3GW、そして電気通信塔などのその他の太陽光発電 (PV) プロジェクトから 2GW としている (Ministry of New and Renewable Energy, 2009)。
- ・ 2030 年までのアメリカの累積設備容量に関して、アメリカエネルギー省が後援する Solar Vision Study (US DOE, 2011) では、次の 2 つのシナリオについて考察している。  
太陽エネルギー目標 10%: 太陽光発電 180GW (集中型 120GW、分散型 60GW)  
太陽エネルギー目標 20%: 太陽光発電 300GW (集中型 200GW、分散型 100GW)

### 3.9.2 二酸化炭素排出抑制から見た長期的な普及

IPCC 第 4 次評価報告書は、利用可能な (技術的) 太陽エネルギー資源について、太陽光発電 (PV) は 1,600EJ/年、

集光型太陽熱発電 (CSP) は 50EJ/年と推定している。しかし、これらの推定値の出典資料では報告値の桁が高く、非常に不確実である (Sims et al., 2007)。一方、IPCC 第 4 次評価報告書の直接的太陽エネルギーの普及予想において、2030 年までに直接的太陽エネルギーが世界の電力供給に対して経済的に寄与するポテンシャルは 633TWh (2.3EJ/年) (Sims et al., 2007) としている。

第 10 章では、温室効果ガス濃度安定化シナリオの範囲において、再生可能エネルギー供給が将来的に世界のエネルギーニーズの充足に貢献する可能性について文献の概要を述べるが、ここでは、そのうち太陽エネルギーに注目する。図 3.22 (a) に太陽エネルギーの世界的供給をモデル化した結果を示す。また、図 3.22 (b) に太陽熱発熱、図 3.22 (c) と (d) にそれぞれ太陽光発電 (PV) 及び集光型太陽熱発電 (CSP) を、全て世界規模で示す。これらの値は様々なモデル化チームが数多くの長期シナリオを基礎に算出したもので、そのシナリオ数は値によって異なるが 44~約 156 である。また、前提とする変動要素は、エネルギー需要の拡大、競合低炭素技術のコストと利用可能性、再生可能エネルギー (太陽エネルギーを含む) のコストと利用可能性など多岐に渡る。第 10 章では、こうした変動要素の変動が再生可能エネルギーの普及結果にどう影響を与えるのかについて説明し、10.2.2 節ではシナリオの引用元である文献について述べる。図 3.22 (a) ~3.22 (d) は、2020 年、2030 年、2050 年の各時点での IPCC 第 4 次評価報告書に基づく温室効果ガス濃度安定化の 3 つの範囲、つまり 2100 年までに達成する二酸化炭素濃度が 600ppm 超 (ベースライン)、440~600ppm (カテゴリ III と IV)、及び 440ppm 未満 (カテゴリ I と II) の各シナリオにおける太陽エネルギーの普及結果を示す。結果については、シナリオ中央値、シナリオの 25~75 パーセンタイルの範囲、及びシナリオの最低値と最高値を表示する。<sup>14</sup>

ベースラインシナリオ、つまり、いかなる気候政策も前提としない場合において、2050 年までの間の太陽エネルギーの普及レベル中央値は、今日の太陽一次エネルギー供給量の範囲内である 1EJ/年未満という非常に低い値に留まる。ここで、太陽熱発熱に関する圧倒的に少ないシナリオ (太陽一次エネルギーの 156 に対し 44) において、太陽熱発熱の 2050 年までの普及レベル中央値がベースライン事例においてでさえ約 12EJ/年であり、太陽一次エネルギーよりはるかに高いことは注目に値する。対照的に、太陽光発電 (PV) 及び集光型太陽熱発電 (CSP) による電力は、非常に低いレベルに留まることが予想されている。

こうした様相は、温室効果ガス濃度安定化レベルが低くなるにつれ変化する。温室効果ガス濃度安定化レベルが低くなると、太陽エネルギーの寄与の中央値がベースラインシナリオに比べて非常に大きくなる。2100 年までに大気中の二酸化炭素濃度を 440-600ppm に引き下げる中間的な安定化カテゴリ III と IV において、2030 年及び 2050 年までの太陽エネルギー普及レベルの中央値はそれぞれ 1.6EJ/年、12.2EJ/年となる。2100 年までの大気中の二酸化炭素濃度を 440ppm 未満とする、もっとも意欲的な安定化シナリオカテゴリにおいては、太陽エネルギーの一次エネルギー供給に対する寄与の中央値は、2030 年及び 2050 年までにそれぞれ 5.9EJ/年、39EJ/年に達する。

このシナリオ結果から、太陽エネルギーの普及は気候安定化レベルに大きく依存しており、中央値に関しては 2030 年までの間に、もっとも意欲的な気候安定化シナリオにおいては 2050 年までの間に大幅な伸びが見込まれることがわかる。こうした発展について技術ごとに見ていくと、高い普及レベルに達するまでもっとも気候政策に依存するのが太陽光発電 (PV) であると思われる一方、集光型太陽熱発電 (CSP) の気候政策依存度は低く、太陽熱発熱はさらに低いことがわかる。しかし、集光型太陽熱発電 (CSP) と太陽熱発熱については、発表されたシナリオの数が太陽光発電 (PV) に比べて大幅に少ないため、こうした解釈を適用する際は注意が必要である。

世界規模での太陽エネルギー普及率の範囲は、他の再生可能エネルギー資源と比べても非常に広く (10.2.2.5 節参照)、これは考察したシナリオにおいて、太陽エネルギー技術の将来的な発展に関して非常に多様な前提が存在することを意味する。ほとんどのベースラインシナリオでは、2030 年までの間太陽エネルギーの普及率は低いままで、75 パーセントが 3EJ/年程度に到達し、非常に高いレベルを示すシナリオはほとんどない。こうしたベースラインにおける比較的狭い普及率の範囲は 2050 年までには消滅し、75 パーセントはベースライン事例中央値に比べて約 30 倍の増加を遂げて 15EJ/年に達し、最上四分位群はさらに高いレベルとなる。化石燃料の相対的価格の上昇と太陽エネルギー技術のコスト低下に関する楽観的な前提との組み合わせが、ベースラインの普及レベルを押し上げている要因である可能性が高い。

<sup>14</sup> 数値の基礎となるレビューのようなシナリオアンサンブル分析では、シナリオは本当の意味でランダムサンプルではないという事実と、むしろシナリオ間にはばらつきがあることで、将来に関する集合知または知識の欠如について現実的に、かつ多くの場合は明確に洞察を行うことが出来るという意義との間に一定の葛藤が存在する (詳しい説明については 10.2.1.2 を参照)。

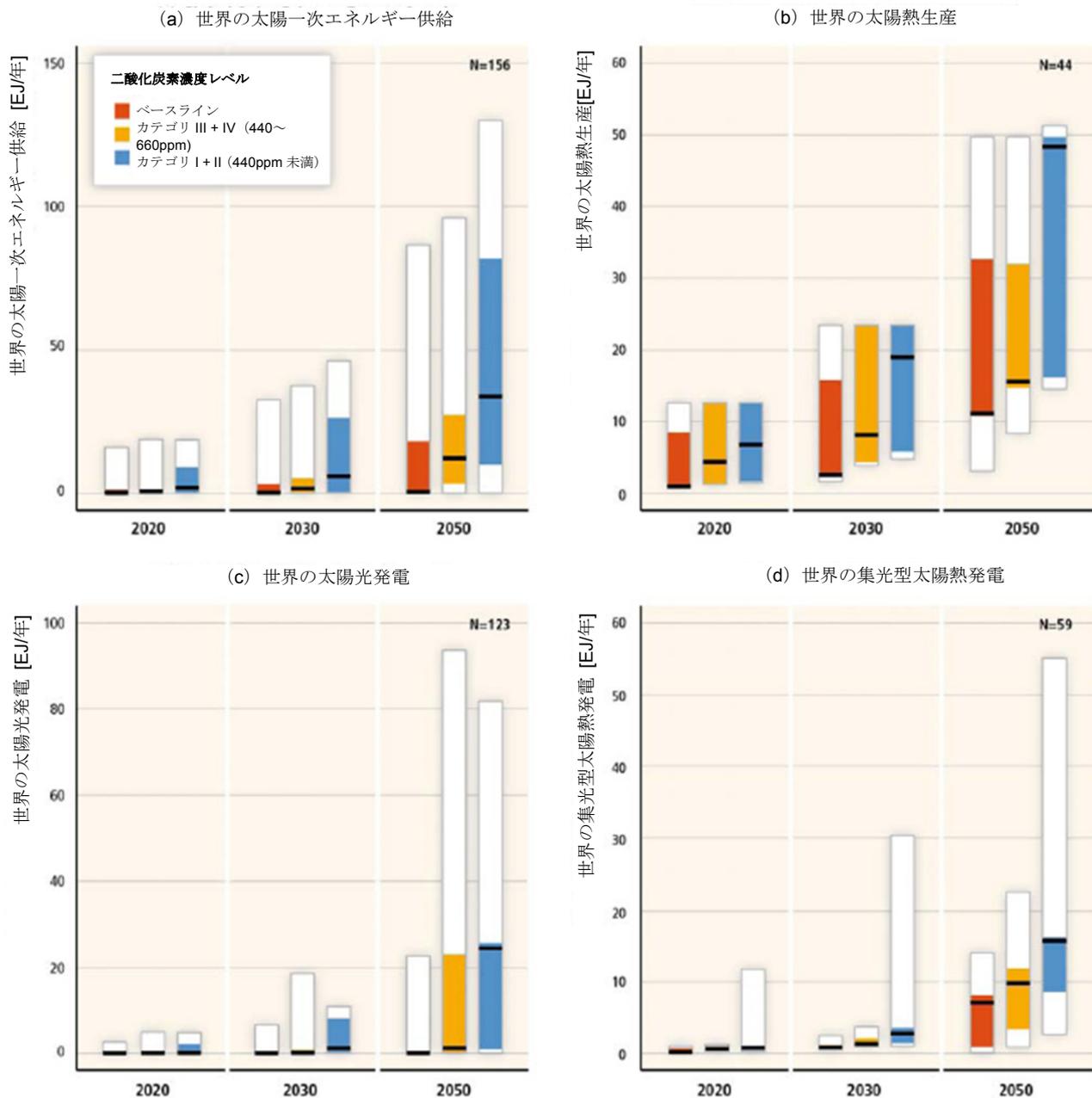


図 3.22: 長期的シナリオにおける世界の太陽エネルギーの供給と生産（中央値、25～75 パーセントイルの範囲、及びシナリオの結果の全範囲。色分けは 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。数値の基礎となるシナリオの具体的な数を右上の角に示す）。(a) 世界の太陽一次エネルギー供給、(b) 世界の太陽熱生産、(c) 世界の太陽光発電 (PV)、及び (d) 世界の集光型太陽熱発電 (CSP) (Krey and Clarke, 2011 より作成。第 10 章も参照のこと。)

もっとも意欲的な気候安定化シナリオにおいて、2030 年までに太陽一次エネルギー供給の 75 パーセントイルは 26EJ/年に達する。これは、同カテゴリの中央値に比べて 5 倍の伸びであり、推定値の最高は 50EJ/年に達する。2050 年の同数値は、82EJ/年 (75 パーセントイル)、130EJ/年 (最高レベル) で、こうした伸びは太陽光発電 (PV) によるところが大きいだらう。太陽光発電 (PV) は 2050 年までに 80EJ/年以上の普及レベルに達するが、太陽エネルギーの非常に高い普及レベルには、集光型太陽熱発電 (CSP) による電力及び太陽熱発熱の普及も大きく寄与している。世界の発電における太陽光発電のシェアは、もっとも極端なシナリオでは 2030 年までに約 12%に達し、2050 年までには 3 分の 1 に達するとしているが、大多数のシナリオでは 10%未満のままであるとしている。

いくつかのシナリオが描く高レベルの普及率を達成するには、温室効果ガス排出量削減や再生可能エネルギー供給増加のための政策が必要となる可能性が高く、こうした政策は、多額の民間投資を引き出すよう経済的な魅力と予測可能性を十分に備える必要があるだろう (第 11 章参照)。太陽エネルギーの迅速な成長に関するその他の様々な潜在的課題、及びそうした成長に寄与し得る要因についても議論する価値がある。

**資源ポテンシャル:** 太陽資源は実質的に無尽蔵であり、世界中のほとんどの国や地域で入手、利用可能である。世界の太陽エネルギーに関する技術ポテンシャルは、現在の一次エネルギー消費よりも相当大きく (IEA, 2008)、先に要約した文献上のシナリオにおける意欲的な普及の道筋においても大きな障壁にはならない。

**地域的な普及:** 再生可能エネルギーの供給量を 2050 年までに 100%に引き上げる地域的ビジョンを掲げた業界主導のシナリオが世界のあちこちで作られており、その多くは太陽エネルギーの普及レベルを非常に高く設定している。

国際半導体製造装置材料協会 (SEMI) は、中国及びインドにおける太陽光発電 (PV) ロードマップを策定し、当国政府の目標よりはるかに高い目標値を設定している (SEMI, 2009b,c)。その目標とは、中国における発電量が 2020 年までに約 20GW、2050 年までに 100GW、インドにおいてはそれぞれ、20GW、200GW である (太陽光発電 (PV) と集光型太陽熱発電 (CSP) の両方で) (Ministry of New and Renewable Energy, 2009、Zhang et al., 2010)。

ヨーロッパでは、ヨーロッパの様々な業界団体から得たデータに基づいて欧州再生エネルギー評議会 (EREC) が 100%再生可能エネルギー・ビジョンを策定した (Zervos et al., 2010)。2020 年の最終的な電力、暖房、冷房、及び輸送需要の想定は欧州委員会が作成した新エネルギー政策 (NEP) シナリオに基づいたもので、第 2 次戦略的エネルギーレビューに記載の適価環境及び高値環境を前提としている (European Commission, 2008)。2030 年及び 2050 年のシナリオでは、エネルギー効率が大きく改善し、再生可能エネルギー目標 100%を実現すると想定している。このシナリオでは、ヨーロッパにおいて太陽エネルギーが 2030 年、2050 年にそれぞれ、557TWh (2,005PJ)、1415TWh (5,094PJ) の暖房と冷房に寄与するとしている。発電については、2030 年には太陽光発電からの電力 556TWh (2,002PJ)、集光型太陽熱発電 (CSP) からの電力 141TWh (508PJ) が、2050 年にはそれぞれ 1,347TWh (4,849PJ)、385TWh (1,386PJ) が見込まれている。

日本では、2004 年に経済産業省の新エネルギー・産業技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization)、太陽光発電技術研究組合 (PVTEC)、及び太陽光発電協会 (JPEA) が「2030 年に向けた太陽光発電 (PV) ロードマップ (PV2030)」を立案した (Kurokawa and Aratani, 2004)。2009 年にこのロードマップの改訂が行われ、目標年度が 2030 年から 2050 年に延長となり、2050 年に国内の一次エネルギー需要の 5~10%を太陽光発電 (PV) で賄うよう目標が設定された。2050 年における太陽光発電 (PV) システムからの電力目標は、参照シナリオの 35TWh (126PJ) から発展的シナリオの 89TWh (320PJ) の範囲である (Komiyama et al., 2009)。

アメリカでは、業界団体である太陽光発電電力事業協会 (SEPA) と太陽エネルギー産業協会 (SEIA) がアメリカエネルギー省及びその他のステークホルダー (関係者) の協力のもと太陽資源 (太陽光発電 (PV) 及び集光型太陽熱発電 (CSP)) からの電力についてのシナリオを策定し、2030 年に 10~20%とした。2011 年には、Solar Vision Study (USDOE, 2011) の結果の発表が見込まれる。

太陽エネルギーに関する世界規模のシナリオにおいて高レベルの結果を達成するには、世界中の全ての地域に相当量の太陽エネルギーを普及させる必要があることは明確だろう。ここで紹介した地域的なシナリオからは、地域的な普及の道筋の存在が世界規模の結果達成の助けとなるであろうことがわかる。とはいえ、太陽エネルギーを初めて導入する地域において上記の国々のような成長を実現するには、コスト面及び制度面で積極的な対処が必要な課題が生じる可能性がある。太陽エネルギーに関してすでに数多くの経験を積んでいる地域から、太陽エネルギーの導入を始めた地域に対して制度や技術に関する知識を継承する必要があるだろう。

**サプライチェーンの問題:** パッシブ太陽熱利用エネルギーの市場及び業界は、建築市場自体が地域的な市場であるため、これまで地域内において大きく成長を遂げてきた。将来的に太陽エネルギーの浸透率を高めるには、少なくともパッシブ太陽熱利用技術に関する知識をグローバル化し、より幅広い市場参入を可能にする必要があるだろう。低温太陽熱は世界中の地域市場で地元供給者によって実現されているが、世界市場の開拓は始まったばかりである。太陽光発電 (PV) 業界はすでに世界規模のサプライチェーンを構築し、全世界を対象としているが、一方、集光型太陽熱発電 (CSP) は、2010 年に世界規模のサプライチェーンを構築し始めたところである。集光型太陽熱発電 (CSP) 市場は、スペインとアメリカが主導してきたが、現在はドイツやインドなど他の国も市場の拡大に一役買っている。一般的に、サプライチェーン及び素材の制約によって、特定地域における特定時期の太陽エネルギー普及のスピードと範囲が影響を受けることがあるが、そうした要因によって、先に述べた強気のシナリオに描かれている高い浸透率を実現する太陽エネルギー技術の能力が影響を受ける可能性は低い。実際、太陽エネルギー技術の中には製造、使用の双方に関してモジュール化出来る性質のものが多く、また太陽エネルギーには様々な用途があることから、サプライチェーンの問題が成長を抑制する可能性は低い。

**技術と経済:** 太陽エネルギー技術の技術的成熟度と経済的競争力は様々である。パッシブ太陽熱技術は、まだ向上の余地はあるものの十分に確立されている。しかし、建設部門の意識は、必ずしも実用レベルではない。経済性についての理解は得ているが、経済性は地域の太陽資源と地域の支援及び建築法規に左右される。低温太陽熱も十分に確立された技術であるが、経済性は太陽資源、用途、及び競合技術のコストに左右される。市場を創出し、成長を可能にする支援プログラムが必要な地域もあるだろうし、太陽熱がすでに競争力を持っている地域もある。

太陽光発電 (PV) はすでに確立された技術であるが、継続的なコスト削減という面ではさらなる大幅な技術的進歩が可能である。しかし、これまで太陽光発電 (PV) 技術の普及は、ほとんどの市場において地域の支援プログラムに大きく依存してきた。同様に、集光型太陽熱発電 (CSP) 技術も向上の余地は多く、現時点での集光型太陽熱発電 (CSP) のコストは市場のエネルギー価格を上回っている。

したがって、先に述べた世界規模シナリオにおいて太陽エネルギーに関して高レベルの結果を達成するには、継続的なコスト削減が必要である。求められるコスト削減を達成するには、太陽エネルギー普及促進の支援プログラムと研究開発の両方が重要な役割を果たすだろう。

**系統連系と送電:** 系統連系と送電は、パンプ太陽熱利用については主要な問題ではない。一方、低温太陽熱において、とりわけ大規模システムにおいては、当該地域の暖房システムとの系統連系が必要であり、また太陽放射量の一時的な不安定性を他の供給源で補って顧客の需要を満たす必要があるため、系統連系の問題は重要である (第 8 章参照)。資源を利用可能なのが日中のみであることや、雲の通過に伴って短時間不安定な状態になるため、太陽光発電 (PV) を大規模に浸透させるには、稼働中の系統連系に関する懸念に対して、技術面及び制度面で予防的な対策を行う必要がある。集光型太陽熱発電 (CSP) については、蓄熱機能があればこうした対策は不要である。また、高い浸透率を目標とし、大規模な発展を伴う太陽光発電 (PV) や集光型太陽熱発電 (CSP) のシナリオでは、最高質の太陽エネルギーが得られる場所に接続するための特別な伝送インフラが必要となる可能性がある。8.2.1 節では、不安定な発電源の普及に伴って生じる様々な技術的及び制度的な課題を挙げるとともに、こうした課題に対処する様々な解決策を紹介している。第 8 章では、変動性のある再生可能エネルギー供給の増加に関して克服不可能な技術的障壁はないとしているが、太陽エネルギーの普及が進むにつれ、配電拡大のコストや保守の統合のコストも増加が見込まれ、経済的な面で成長が阻害される可能性がある。こうした課題に予防的に対処することが、先に述べた高浸透率を目指す太陽エネルギーのシナリオを達成する上で重要となる可能性がある。

**社会的及び環境的懸念:** 直接的太陽エネルギーは、社会的、環境的な懸念が比較的少ないように思われる。むしろ、パンプ太陽熱利用の主な便益は、建物のエネルギー需要を減らすことにある。同様に、低温太陽熱利用は比較的環境にやさしい。太陽光発電 (PV) 技術に関する懸念の 1 つは、太陽光発電 (PV) 産業が生産ラインにおいて有毒物質及び腐食性液体を使用していることである。これらの材料の存在及び量は電池の種類に大きく依存しているが、偶発的な放出のリスクを最小化する厳密な管理方法が用いられている。太陽光発電 (PV) 素材のリサイクルも、普及が続くに従って一般的になるだろう。水資源の利用可能性と消費量は集光型太陽熱発電 (CSP) における環境上の最大の懸念であるが、乾式冷却技術により、水の使用量を大幅に削減出来る。最後に、とりわけ集中発電所型の太陽光発電 (PV) と集光型太陽熱発電 (CSP) の設置にあたって発電所のインフラに関係する生態学的、社会的、及び景観上の影響が懸念されるだろう。太陽エネルギーの普及に合わせて自然への理解を深め、こうした影響の大きさを把握するよう努めるとともに、影響を最小化し緩和するよう努力することが必要であると思われる。

### 3.9.3 普及に関する結論

普及ポテンシャルのシナリオは、2050 年において直接的太陽エネルギーの果たす役割はほんのわずかであるというものから、主要なエネルギー供給源になるというものまで、様々である。直接的太陽エネルギーが 2011 年の世界的なエネルギー供給量に占める割合はほんのわずかであるが、全てのエネルギー源の中でもっとも大きな技術的なポテンシャルがあり、技術の向上及びそれに伴うコスト削減によって、今後 10 年の間に劇的な普及を遂げ得る。

太陽エネルギーの将来的な普及に影響を与える最重要課題は、継続的なコスト削減の達成である。一方、学習曲線に従って太陽エネルギー技術のコストが下がれば、コスト削減は達成出来る。こうしたコスト削減は、ある程度太陽エネルギー普及のレベルに依存する。加えて、学習曲線の傾斜が早く平坦にならないようにするためには、継続的な研究開発の取り組みも必要である。

現在存在する主な普及シナリオは単一の技術のみを考慮しているため、太陽エネルギー普及の実際のコストはまだ不明である。さらに、再生可能エネルギーや持続可能なエネルギー供給の相乗便益を考慮に入れていないシナリオがほとんどである (しかし、9.4 節では相乗便益の研究をいくつか紹介している)。同時に、他の形の再生可能エネルギーと同様に、可変的な生産プロファイルの発行、エネルギー市場の統合、及び新しい送電インフラの潜在的な必要性が、太陽エネルギー普及の規模、タイプ、及びコストに影響を与える。

最後に、法規制の枠組みを置くことで、直接的太陽エネルギー利用の理解を促進することも、阻害することも出来る。建築物の向きや断熱に関する建築の最低基準を設けることで建築物のエネルギー需要を大幅に減らし、全体的な需要を増やすことなく再生可能エネルギー供給の割合を増加させることが出来る。また、建築基準や技術基準によって、屋上ソーラーシステムの設置を支援することも、阻害することも出来る。透明で効率化された管理手順を用いて太陽エネルギー源の立地決定、認可、設置、接続を行うことで、直接的太陽エネルギーの普及をさらに促進することが可能となる。

## REFERENCES

- A.T. Kearney (2010).** *Solar Thermal Electricity 2025--Clean Electricity On Demand: Attractive STE Cost Stabilize Energy Production.* A.T. Kearney GmbH, Duesseldorf, Germany, 52 pp.
- Abanades, S., P. Charvin, G. Flamant, and P. Neveu (2006).** Screening of water-splitting thermochemical cycles potentially attractive for hydrogen production by concentrated solar energy. *Energy*, **31**(14), pp. 2805-2822.
- Arce, P., M. Medrano, A. Gil, E. Oró, and L.F. Cabeza (2011).** Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe. *Applied Energy*. **88**(8), pp.2764-2774.
- Arif Hasan, M., and K. Sumathy (2010).** Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1845- 1859.
- Asano, H., K. Yajima, and Y. Kaya (1996).** Influence of photovoltaic power generation on required capacity for load frequency control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **11**(1), pp. 188-193.
- ASHRAE (2009).** *ASHRAE Handbook – Fundamentals.* American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA.
- Athienitis, A.K. (2008).** Design of advanced solar homes aimed at net-zero annual energy consumption in Canada. In: *ISES-AP – 3rd International Solar Energy Society Conference – Asia Pacific Region. Incorporating the 46th ANZSES Conference*, Sydney, Australia, 25-28 Nov. 2008, pp. 14.
- Athienitis, A.K., and M. Santamouris (2002).** *Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings.* James & James, London, UK, 288 pp.
- Bailey, S., D. Brinker, H. Curtis, P. Jenkins, and D. Scheiman (1997).** *NASA Technical Memorandum 113155 – Solar Cell Calibration and Measurement Techniques.* IECEC-97534, NASA, Cleveland, OH, USA.
- Baoshan, L. (2010).** Research on the progress of silicon materials in China. In: *6th China SoG Silicon and PV Conference (CSPV) 2010*, Shanghai, PR China, 16-18 March 2010.
- Bar-Cohen, Y. (ed.) (2006).** *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies.* Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- Barbose, G., N. Darghouth, and R. Wiser (2010).** *The Installed Cost of Photovoltaics in the U.S. from 1998-2009.* Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.
- Barkat, A., S.H. Khan, M. Rahman, S. Zaman, A. Poddar, S. Halim, N.N. Ratna, M. Majid, A.K.M. Maksud, A. Karim, and S. Islam (2002).** Economic and social impact evaluation study of the rural electrification program in Bangladesh. In: *Electric Cooperatives in Bangladesh.* National Rural Electric Cooperative Association (NRECA) International, Dhaka, Bangladesh, pp. 41.
- Barnes, D.F. (1988).** *Electric Power for Rural Growth: How Electricity Affects Rural Life in Developing Countries.* Westview Press, Boulder, CO, USA, 236 pp.
- Batley, S.L., D. Colbourne, P.D. Fleming, and P. Urwin (2001).** Citizen versus consumer: challenges in the UK green power market. *Energy Policy*, **29**, pp. 479-487.
- Bazilian, M.D., F. Leenders, B.G.C. Van der Ree, and D. Prasad (2001).** Photovoltaic cogeneration in the built environment. *Solar Energy*, **71**(1), pp. 57-69.
- Benagli, S., D. Borrello, E. Vallat-Sauvain, J. Meier, U. Kroll, J. Hoetzel, J. Bailat, J. Steinhäuser, M. Marmelo, and L. Castens (2009).** High-efficiency amorphous silicon devices

- on LPCVD-ZnO-TCO prepared in industrial KaiTM-M R&D reactor. In: *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 21-25 September 2009, pp. 2293-2298.
- Bernreuther, J., and F. Haugwitz (2010).** *The Who's Who of Silicon Production*. Bernreuther Consulting, Wuerzburg, Germany.
- Bett, A.W., F. Dimroth, W. Gultler, R. Hoheisel, E. Oliva, S.P. Philips, J. Schone, G. Siefer, M. Steiner, A. Wekkeli, E. Welser, M. Meusel, W. Kostler, and G. Strobl (2009).** Highest efficiency multi-junction solar cell for terrestrial and space applications. In: *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 21-25 September 2009, pp. 1-6.
- Beyer, H.G., B. Decker, J. Luther, and R. Steinberger-Willms (1991).** Spatial and temporal characteristics of short term fluctuations in solar radiation for PV-plant applications. In: *Proceedings of the 10th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Lisbon, Portugal, 8-12 Apr 1991, pp. 453-456.
- Bickel, P., and R. Friedrich (eds.) (2005).** *ExternE--Externalities of Energy: Methodology 2005 Update*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 270 pp.
- Bloem, H., F. Monforti-Ferrario, M. Szabo, and A. Jäger-Waldau (2010).** *Renewable Energy Snapshots 2010*. EUR 24440 EN, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Ispra, Italy, 52 pp.
- Bloomberg (2010).** *Bloomberg New Energy Finance – Renewable Energy Data*. Subscriber info at: [bnef.com/bnef/markets/renewable-energy/solar/](http://bnef.com/bnef/markets/renewable-energy/solar/).
- Bolton, J.R. (1996).** Solar photoproduction of hydrogen: A review. *Solar Energy*, **57**(1), pp. 37-50.
- Bosi, M., and C. Pelosi (2007).** The potential of III-V semiconductors as terrestrial photovoltaic devices. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **15**(1), pp. 51-68.
- Bouzgunda, M., and S. Rahman (1993).** Value analysis of intermittent generation sources from the system operations perspective. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **8**(3), pp. 484-490.
- Boyle, G. (1996).** *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press in association with the Open University, Oxford, UK, 479 pp.
- Brabec, C.J. (2004).** Organic photovoltaics: technology and market. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **83**(2-3), pp. 273-292.
- Braun, M., Y.-M. Saint-Drenan, T. Glotzbach, T. Degner, and S. Bofinger (2008).** Value of PV energy in Germany – Benefit from the substitution of conventional power plants and local power generation. In: *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, 1-5 September 2008, pp. 3645-3652.
- Brendel, R. (2003).** *Thin Film Crystalline Silicon Solar Cells*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
- Breyer, C., A. Gerlach, J. Mueller, H. Behacker, and A. Milner (2009).** Grid-parity analysis for EU and US regions and market segments – Dynamics of grid-parity and dependence on solar irradiance, local electricity prices and PV progress ratio. In: *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 21-25 September 2009, pp. 4492-4500 (ISBN: 3-936338-25-6).
- Brouwer, I.D., J.C. Hoorweg, and M.J. van Liere (1997).** When households run out of fuel: responses of rural households to decreasing fuelwood availability, Ntcheu District, Malawi. *World Development*, **25**(2), pp. 255-266.
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2010).** *Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (photovoltaik)*. Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW Solar), Berlin, Germany, 4 pp.

- Bunea, M.M., K. Johnston, C.M. Bonner, P. Cousins, D.D. Smith, D.H. Rose, W.P. Mulligan, and R.M. Swanson (2010).** Simulation and characterization of high efficiency back contact solar cells for low concentration photovoltaics. In: *Proceedings of the 35th Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, Hawaii, 20-25 June 2010, pp. 823-826 (ISSN: 0160-8371).
- Butti, K., and J. Perlin (1980).** *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*. Cheshire Books, Frodsham, UK, 289 pp.
- Cabeza, L., A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, and I. Fernández (2010).** Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*, **42**(5), pp. 630-636.
- Candanedo, J., and A.K. Athienitis (2010).** A simulation study of anticipatory control strategies in a net zero energy solar-optimized house. *ASHRAE Transactions*, **116**(1), pp. 246-260.
- Carlson, D.E., and C.R. Wronski (1976).** Amorphous silicon solar cell. *Applied Physics Letters*, **28**(11), pp. 671-673.
- Castell, A., I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L.F. Cabeza (2010).** Experimental study using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, **42**(4), pp. 534-540.
- Catchpole, K.R., and A. Polman (2008).** Plasmonic solar cells. *Optics Express*, **16**(26), pp. 21793-21800.
- Chalmers, S., M. Hitt, J. Underhill, P. Anderson, P. Vogt, and R. Ingersoll (1985).** The effect of photovoltaic power generation on utility operation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **104**(3), pp. 524-530.
- Chang, K.C., W.M. Lin, T.S. Lee, and K.M. Chung (2009).** Local market of solar water heaters in Taiwan: Review and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(9), pp. 2605-2612.
- Chiba, Y., A. Islam, K. Kakutani, R. Komiya, N. Koide, and L. Han (2005).** High efficiency dye sensitized solar cells. In: *Technical Digest, 15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Shanghai, China, 10-15 October 2005, pp. 665-666.
- Chow, T.T. (2010).** A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, **87**, pp. 365-379.
- Chowdhury, B., and S. Rahman (1988).** Is central station photovoltaic power dispatchable? *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **3**(4), pp. 747-754.
- Chueh, W.C., C. Falter, M. Abbott, D. Scipio, P. Furler, S.M. Haile, and A. Steinfeld (2010).** High-flux solar-driven thermochemical dissociation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O using nonstoichiometric ceria. *Science*, **330**, pp. 1797-1801.
- Clavadetscher, L., and T. Nordmann (2007).** *Cost and Performance Trends in Grid-Connected Photovoltaic System and Case Studies*. IEA Photovoltaic Power Systems Program (PVPS). Task 2, Report IEA-PVPS T2-06:2007, IEA PVPS Pool Switzerland for the IEA Photovoltaic Power Systems Program, 54 pp. Available at: [www.iea-pvps-task2.org/public/download/T2\\_Cost\\_and\\_Performance.pdf](http://www.iea-pvps-task2.org/public/download/T2_Cost_and_Performance.pdf).
- Cobben, S., B. Gaiddon, and H. Laukamp (2008).** *Impact of Photovoltaic Generation on Power Quality in Urban areas with High PV Population: Results from Monitoring Campaigns*. PVupscale, WP4 - Deliverable 4.3, Contract EIE/05/171/SI2.420208, Intelligent Energy Europe, PVupscale project, 53 pp. Available at: [www.pvupscale.org/IMG/pdf/WP4\\_D4-3\\_public\\_v1c.pdf](http://www.pvupscale.org/IMG/pdf/WP4_D4-3_public_v1c.pdf)

- Conibeer, G., M.A. Green, D. König, I. Perez-Wurfl, S. Huang, X. Hao, D. Di, L. Shi, S. Shrestha, B. Puthen-Veetil, Y. So, B. Zhang, and Z. Wan (2010).** Silicon quantum dot based solar cells: addressing the issues of doping, voltage and current transport. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, doi:10.1002/pip.1045.
- Coutts, T.J., J.S. Ward, D.L. Young, K.A. Emery, T.A. Gessert, and R. Noufi (2003).** Critical issues in the design of polycrystalline, thin-film tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **11**(6), pp. 359-375.
- Curtright, A., and J. Apt (2008).** The character of power output from utility-scale photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **16**(3), pp. 241-247.
- de Vries, B., D. van Vuuren, and M.M. Hoogwijk (2007).** Renewable energy sources: Their global potential for the first half of the 21st century at a global level: An integrated approach. *Energy Policy*, **35**(4), pp. 2590-2610.
- Denholm, P., E. Drury, R. Margolis, and M. Mehos (2009).** *Solar Energy: The Largest Energy Resource, Generating Electricity in a Carbon Constrained World*. Elsevier, Paris, France.
- DESERTEC Foundation (2007).** *Clean Power from Deserts - The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security*. 4th ed. WhiteBook, Protext Verlag, Bonn, Germany.
- Dimmler, B., and H.W. Schock (1996).** Scaling-up of CIS technology for thin-film solar modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **4**(6), pp. 425-433.
- Dimroth, F., C. Baur, A.W. Bett, M. Meusel, and G. Strobl (2005).** 3-6 junction photovoltaic cells for space and terrestrial concentrator. In: *31st Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photovoltaic Specialists Conference*, Lake Buena Vista, Florida, 3-7 January 2005, pp. 525-529.
- Dincer, I., and M. Rosen (2010).** *Thermal Energy Storage. Systems and Applications*. 2nd ed. Wiley-Blackwell, Bogner Regis, UK.
- Displaybank (2010).** *Displaybank Briefing*. January 28, 2010. Displaybank Consulting and Research, San Jose, CA, USA. Available for subscribers at: [www.displaybank.com/eng/info/sread.php?id=5724](http://www.displaybank.com/eng/info/sread.php?id=5724).
- DLR (2007).** *AQUA-CSP. Concentrating Solar Power for Seawater Desalination. Final Report*. Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment, German Aerospace Center (DLR), Stuttgart, Germany, 279 pp.
- Duffie, J.A., and W.A. Beckman (2006).** *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd ed. Wiley, New York, NY, USA, 928 pp.
- Ecofys Netherlands BV (2007).** *Current State-of-the-Art and Best Practices of BIPV. D6.1.1. European Commission Sixth Framework Programme*. Contract No. 019718, Ecofys Netherlands BV, Utrecht, The Netherlands.
- ECOSTAR (2005).** *European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping*. German Aerospace Centre (DLR), Stuttgart, Germany.
- Eiffert, P. (2002).** *Guidelines for Economic Evaluation of Building Integrated Photovoltaic Power Systems*. IEA Photovoltaic Power Systems Program (PVPS), Task 7, NREL/TP-550-31977, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 52 pp. Available at: [www.nrel.gov/docs/fy03osti/31977.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/31977.pdf).
- Eiffert, P., and G.K. Kiss (2000).** *Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures: A Source Book for Architects*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 90 pp.
- Ellingson, R.J., M.C. Beard, J.C. Johnson, P. Yu, O.I. Micic, A.J. Nozik, A. Shabaev, and A.L.**

- Efros (2005).** Highly efficient multiple exciton generation in colloidal PbSe and PbS quantum dots. *Nano Letters*, **5**(5), pp. 865-871.
- Elzinga, D. (2008).** *Urban BIPV in the New Residential Construction Industry*. IEA Photovoltaic Power Systems Program (PVPS), Task 10, Activity 3.1, Report IEA-PVPS-T10-03:2008, Natural Resources Canada for the International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program, Ottawa, Canada, 58 pp. Available at: [www.iea-pvps-task10.org/IMG/pdf/IEA-PVPS\\_T10-03-2006\\_\\_\\_Urban\\_BIPV\\_in\\_the\\_New\\_Residential\\_Construction\\_Industry.pdf](http://www.iea-pvps-task10.org/IMG/pdf/IEA-PVPS_T10-03-2006___Urban_BIPV_in_the_New_Residential_Construction_Industry.pdf).
- EPIA (2010).** *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2014*. European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Brussels, Belgium, 28 pp.
- Epstein, M., G. Olalde, S. Santen, A. Steinfeld, and C. Wieckert (2008).** Towards the industrial solar carbothermic production of zinc. *Journal of Solar Energy Engineering*, **130**(1), 014505.
- ESMAP (2004).** *The Impact of Energy on Women's Lives in Rural India*. Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP) Paper No. ESM276, Joint UNDP/World Bank ESMAP, Washington, DC, 96 pp.
- ESTTP (2006).** *Solar Thermal Vision 2030. Vision of the Usage and Status of Solar Thermal Energy Technology in Europe and the Corresponding Research Topics to Make the Vision a Reality*. European Solar Thermal Technology Platform (ESTTP) Secretariat, Brussels, Belgium, 123 pp.
- ESTTP (2008).** *Solar Heating and Cooling for a Sustainable Energy Future in Europe – Strategic Research Agenda*. European Solar Thermal Technology Platform (ESTTP) Secretariat, Brussels, Belgium, 123pp.
- EU PV European Photovoltaic Technology Platform (2007).** *A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology*. European Communities, Sixth European Framework Programme for Research and Technological Development, Luxembourg, 76 pp.
- EurObserv'ER (2009).** *Photovoltaic Energy Barometer*. EurObserv'ER, Observatoire des Energies Renouvelables, Paris, France.
- European Commission (2007).** *A European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) - Technology Map*. European Commission, Brussels, Belgium.
- European Commission (2008).** *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Second Strategic Energy Review. An EU Energy Security and Solidarity Action Plan*. European Commission, Brussels, Belgium, 781 pp.
- Everett, B. (1996).** Solar Thermal Energy. In: *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. G. Boyle (ed.), Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 41-88.
- Ezzati, M., A.D. Lopez, A. Rodgers, S. Vander Hoorn, and C.J.L. Murray (2002).** Selected major risk factors and global and regional burden of disease. *Lancet*, **360**(9343), pp. 1347-1360.
- Faiers, A., and C. Neame (2006).** Consumer attitudes towards domestic solar power systems. *Energy Policy*, **34**, pp. 1797-1806.
- Fawer, M., and B. Magyar (2010).** *Solar Industry – Entering New Dimensions: Comparison of Technologies, Markets and Industries. Solar Energy 2010*. Sustainable Investment Division, Bank Sarasin, Basel, Switzerland, 56 pp. Available at: [www.esocialsciences.com/data/articles/Document110122010400.3811609.pdf](http://www.esocialsciences.com/data/articles/Document110122010400.3811609.pdf).
- Felder, R., and A. Meier (2008).** Well-to-wheel analysis of solar hydrogen production and utilization for passenger car transportation. *Journal of Solar Energy Engineering*, **130**(1), 011017.
- Fernández-García, A., E. Zarza, L. Valenzuela, and M. Pérez (2010).** Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1695- 1721.

- Fong, K.F., T.T. Chow, C.K. Lee, Z. Lin, and L.S. Chan (2010).** Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. *Solar Energy*, **84**, pp. 227-244.
- Forrest, S.R. (2005).** The limits to organic photovoltaic cell efficiency. *Materials Research Society (MRS) Bulletin*, **30**(1), pp. 28-32.
- Fthenakis, V., and H.C. Kim (2009).** Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(6-7), pp. 1465-1474.
- Fthenakis, V.M., and H.C. Kim (2010).** Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, doi:10.1016/j.solener.2009.10.002.
- Fudholi, A., K. Sopian, M.H. Ruslan, M.A. Alghoul, and M.Y. Sulaiman (2010).** Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), pp. 1-30.
- Furbo, S., E. Andersen, S. Knudsen, N.K. Vejen, and L.J. Shah (2005).** Smart solar tanks for small solar domestic hot water systems. *Solar Energy*, **78**(2), pp. 269-279.
- Gaiddon, B., and M. Jedliczka (2007).** *Compared Assessment of Selected Environmental Indicators of Photovoltaic Electricity in OECD Cities*. IEA Photovoltaic Power Systems Program (PVPS), Task 10, Activity 4.4, Report IEA-PVPS-T10-01:2006, French Agency for Environment and Energy Management for the International Energy Agency, Hespou, Villeurbanne, France, 44 pp. Available at: [www2.epia.org/documents/NL\\_0606\\_002.pdf](http://www2.epia.org/documents/NL_0606_002.pdf).
- Gil, A., M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba, and L.F. Cabeza (2010).** State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1- Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), pp. 31-55.
- Goodrich, A. C., M. Woodhouse, and T. James (2011).** Solar PV manufacturing cost model group: Installed solar PV system prices. Presentation to *SEGIS\_ADEPT Power Electronic in Photovoltaic Systems Workshop*, Arlington, Virginia, 8 February 2001. NREL/PR-6A20-50955. Available at: [arpa-e.energy.gov/LinkClick.aspx?fileticket=2WF9d-ukumA%3D&tabid=408](http://arpa-e.energy.gov/LinkClick.aspx?fileticket=2WF9d-ukumA%3D&tabid=408).
- Gordon, J.M. (ed.) (2001).** *Solar Energy: The State of the Art. ISES Position Papers*. James & James London, UK, 706 pp.
- Graf, D., N. Monnerie, M. Roeb, M. Schmitz, and C. Sattler (2008).** Economic comparison of solar hydrogen generation by means of thermochemical cycles and electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**(17), pp. 4511-4519.
- Graetzel, M. (2001).** Photoelectrochemical cells. *Nature*, **414**(6861), pp. 338-344.
- Green, M.A. (2001).** Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **9**(2), pp. 123-135.
- Green, M.A. (2003).** *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer, Berlin, Germany.
- Green, M.A., K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta (2009).** Solar cell efficiency tables (version 34). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **17**(5), pp. 320-326.
- Green, M.A., K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta (2010a).** Solar cell efficiency tables (version 35). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **18**(2), pp. 144-150.
- Green, M.A., K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta (2010b).** Solar efficiency tables (version 36). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **18**(5), pp. 346-352.
- Gumy, D., A.G. Rincon, R. Hajdu, and C. Pulgarin (2006).** Solar photocatalysis for detoxification and disinfection of water: Different types of suspended and fixed TiO<sub>2</sub> catalysts study. *Solar Energy*, **80**, pp. 1376-1381.

- Günes, S., and N.S. Sariciftci (2008).** Hybrid solar cells. *Inorganica Chimica Acta*, **361**, pp. 581-588.
- Hadorn, J.C. (ed.) (2005).** *Thermal Energy Storage for Solar and Low Energy Buildings: State of the Art*. IEA Solar Heating and Cooling Task 32, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Servei de Publicacions Universidad Lleida, Lleida, Spain, 170 pp.
- Hadorn, J.C. (2008).** Thermal energy storage – Overview of technologies and status for solar heat. In: *EuroSun 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings*, International Solar Energy Society, Lisbon, Portugal, 7-10 October 2008, pp.1-8.
- Han, J., A.P.J. Mol, and Y. Lu (2010).** Solar water heaters in China: A new day dawning. *Energy Policy*, **38**(1), pp. 383-391.
- Harvey, L.D.D. (2006).** *A Handbook on Low-Energy Buildings and District-Energy Systems: Fundamentals, Techniques and Examples*. Earthscan, Sterling, VA, USA, 701 pp.
- Heiselberg, P. (ed.) (2002).** *Principles of Hybrid Ventilation*. IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annex 35, Hybrid Ventilation and New and Retrofitted Office Buildings, IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Birmingham, UK, 73 pp.
- Henning, H.-M. (2004).** *Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings: A Handbook for Planners*. Springer, New York, NY, USA, 136 pp.
- Henning, H.-M. (2007).** Solar assisted air conditioning of buildings – an overview. *Applied Thermal Engineering*, **27**, pp. 1734-1749.
- Hernandez Gonzalez, C. (1996).** *Manual de Energía Solar Térmica*. Instituto para la Diversificación de la Energía (IDAE), Madrid, Spain, 123 pp.
- Hoff, T.E., B.J. Pasquier, and J.M. Peterson (2010).** Market transformation benefits of a PV incentive program. In: *SOLAR 2010 Conference Proceedings*, American Solar Energy Society, Phoenix, Arizona, 17-22 May 2010.
- Hoffert, M.I., K. Caldeira, G. Benford, D.R. Criswell, C. Green, H. Herzog, A.K. Jain, H.S. Khesghi, K.S. Lackner, J.S. Lewis, H.D. Lightfoot, W. Manheimer, J.C. Mankins, M.E. Mauel, L.J. Perkins, M.E. Schlesinger, T. Volk, and T.M.L. Wigley (2002).** Advanced technology paths to global climate stability: Energy for a greenhouse planet. *Science*, **298**, pp. 981-987.
- Hoffmann, W. (2009).** The role of PV solar electricity to power the 21st century's global prime energy demand. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, **8**, 012007.
- Hoffmann, W., S. Wieder, and T. Pellkofer (2009).** Differentiated price experience curves as evaluation tool for judging the further development of crystalline silicon and thin film PV solar electricity products. In: *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 21-25 September 2009, pp. 4387-4394 (ISBN: 3-936338-25- 6).
- Hofman, Y., D. de Jager, E. Molenbroek, F. Schilig, and M. Voogt (2002).** *The Potential of Solar Electricity to reduce CO<sub>2</sub> Emissions*. Ecofys, Utrecht, The Netherlands, 106 pp. **Hollands, K.G.T., J.L. Wright, and C.G. Granqvist (2001).** Glazing and coatings. In: *Solar Energy: The State of the Art. ISES Position Papers*. J.M. Gordon (ed.), James & James, London, UK, pp. 24-107.
- Holtinen, H. (2005).** Hourly wind power variations in the Nordic countries. *Wind Energy*, **8**(2), pp. 173-195.
- Hoogwijk, M. (2004).** *On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources*. Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands.

- Hoogwijk, M., and W. Graus (2008).** *Global Potential of Renewable Energy Sources: A Literature Assessment*. Ecofys, Utrecht, The Netherlands, 45 pp. **IEA (2007).** *Renewables for Heating and Cooling – Untapped Potential*. International Energy Agency, Paris, 205 pp.
- IEA (2008).** *World Energy Outlook 2008*. International Energy Agency, Paris, France, 578 pp.
- IEA (2009a).** *Global Renewable Energy Policies and Measures Database*. International Energy Agency, Paris, France. Available at: [www.iea.org/textbase/pm/?mode=re](http://www.iea.org/textbase/pm/?mode=re).
- IEA (2009b).** *Towards Net Zero Energy Solar Buildings*. IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) Programme, Solar Heating and Cooling Programme, SHC Task 40, ECBCS Annex 52, International Energy Agency, Paris, France. Available at: [www.iea-shc.org/task40/](http://www.iea-shc.org/task40/).
- IEA (2009c).** *Trends in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2008*. IEA Photovoltaic Power Systems Program (PVPS), Task 1, Report IEA-PVPS T1-18:2009, International Energy Agency, Paris, France, 44 pp. Available at: [www.iea-pvps.org/index.php?id=32](http://www.iea-pvps.org/index.php?id=32).
- IEA (2010a).** *Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios & Strategies to 2050*. International Energy Agency, Paris, France, 708 pp.
- IEA (2010b).** *Technology Roadmap, Concentrating Solar Power*. International Energy Agency, Paris, France, 48 pp.
- IEA (2010c).** *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*. International Energy Agency, Paris, France, 48 pp.
- IEA (2010d).** *World Energy Outlook 2010*. International Energy Agency, Paris, France, 736 pp.
- IEA (2010e).** *Trends in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2009*. IEA Photovoltaic Power Systems Program (PVPS), Task 1, Report IEA-PVPS T1-10-2010, International Energy Agency, Paris, France, 44 pp. Available at: [www.iea-pvps.org/index.php?id=32](http://www.iea-pvps.org/index.php?id=32).
- IEA ECES (2004).** *Energy Conservation through Energy Storage (ECES) Implementing Agreement*, International Energy Agency, Paris, France, 24 pp. Available at: [www.iea-eces.org/files/iaeces\\_2004.pdf](http://www.iea-eces.org/files/iaeces_2004.pdf).
- IEA NZEB (2009).** *IEA Joint Project: Towards Net Zero Energy Solar Buildings (NZEBs)*. SHC Task 40, ECBCS Annex 52, Revised 25 February 2009, IEA Solar Heating and Cooling Programme. Available at: [www.iea-shc.org/publications/downloads/task40-Net\\_Zero\\_Energy\\_Solar\\_Buildings.pdf](http://www.iea-shc.org/publications/downloads/task40-Net_Zero_Energy_Solar_Buildings.pdf).
- Weiss, W., and F. Mauthner (2010).** *Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2008*. AEE - Institute for Sustainable Technologies, Gleisdorf, Austria for the International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme, 52 pp. Available at: [www.iea-shc.org/publications/downloads/Solar\\_Heat\\_Worldwide-2010.pdf](http://www.iea-shc.org/publications/downloads/Solar_Heat_Worldwide-2010.pdf).
- Ilex Energy Consulting Ltd., Electricity Research Centre, Electric Power and Energy Systems Research Group, and Manchester Centre for Electrical Energy (2004).** *Operating Reserve Requirements as Wind Power Penetration Increases in the Irish Electricity System*. Report No. 04-RERDD-011-R-01, Sustainable Energy Ireland, Dublin, Ireland. Available at: [www.seai.ie/uploadedfiles/InfoCentre/IlexWindReserrev2FSFinal.pdf](http://www.seai.ie/uploadedfiles/InfoCentre/IlexWindReserrev2FSFinal.pdf).
- Imre, L. (2007).** Solar drying. In: *Handbook of Industrial Drying*. 3rd ed. A.S. Mujumdar (ed.), Taylor & Francis, Philadelphia, PA, USA, pp. 307-361.
- Iqbal, M. (1984).** *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York, 390 pp.
- ISCCP Data Products (2006).** International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP). Available

at: [isccp.giss.nasa.gov/projects/flux.html](http://isccp.giss.nasa.gov/projects/flux.html).

- Jäger-Waldau, A. (2005).** *Photovoltaics Status Report 2005: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics*. Euro-Report EUR 21836 EN, European Commission, Joint Research Centre, Renewable Energies Unit, Luxembourg.
- Jäger-Waldau, A. (2009).** *Photovoltaics Status Report 2009: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics*. Euro-Report EUR 24027 EN. Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg.
- Jäger-Waldau, A. (2010a).** *Photovoltaics Status Report 2010: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics*. Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg.
- Jäger-Waldau, A. (2010b).** Status and perspectives of thin film photovoltaics. In: *Thin Film Solar Cells: Current Status and Future Trends*. A. Bosio and A. Romeo (eds.), Nova Publishers, New York, NY, USA, pp. 1-24.
- Jensen, S.H., P.H. Larsen, and M. Mogensen (2007).** Hydrogen and synthetic fuel production from renewable energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**(15), pp. 3253- 3257.
- Jewell, W., and R. Ramakumar (1987).** The effect of moving clouds on electric utilities with dispersed photovoltaic generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **2**(4), pp. 570-576.
- Jewell, W., and T. Unruh (1990).** Limits on cloud-induced fluctuation in photovoltaic generation. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **5**(1), pp. 8-14.
- Kaneko, H., T. Miura, A. Fuse, H. Ishihara, S. Taku, H. Fukuzumi, Y. Naganuma, and Y. Tamaura (2007).** Rotary-type solar reactor for solar hydrogen production with two-step water splitting process. *Energy Fuels*, **21**(4), pp. 2287-2293.
- Kawasaki, N., T. Oozeki, K. Otani, and K. Kurokawa (2006).** An evaluation method of the fluctuation characteristics of photovoltaic systems by using frequency analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **90**(18-19), pp. 3356-3363.
- Kaya, N., J.C. Mankins, B. Erb, D. Vassaux, G. Pignolet, D. Kassing, and P. Collins (2001).** Report of workshop on clean and inexhaustible space solar power at Unispace III Conference. *Acta Astronautica*, **49**(11), pp. 627-630.
- Kern, E.J., and M. Russell (1988).** Spatial and temporal irradiance variations over large array fields. In: *Conference Record of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Las Vegas, NV, 26-30 September 2008, **2**, pp. 1043-1050.
- Khanna, R.K., R.S. Rathore, and C. Sharma (2008).** Solar still an appropriate technology for potable water need of remote villages of desert state of India - Rajasthan. *Desalination*, **220**, pp. 645-653.
- Kitamura, A. (1999).** *Demonstration Test Results for Grid Interconnected Photovoltaic Power Systems*. Report IEA-PVPS T5-02:1999, International Energy Agency, Paris, France.
- Kobayashi, H., and M. Takasaki (2006).** Demonstration study of autonomous demand area power system. In: *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2005/2006*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Power Engineering Society, Dallas, TX, 21-24 May 2006, pp. 548-555.
- Komiyama, R., C. Marnay, M. Stadler, J. Lai, S. Borgeson, B. Coffey, and I. Lima Azevedo (2009).** *Japan's Long-term Energy Demand and Supply Scenario to 2050 – Estimation for the Potential of Massive CO<sub>2</sub> Mitigation*. The Institute for Energy Economics, Tokyo, Japan.
- Komoto, K., M. Ito, P. van der Vleuten, D. Faiman, and K. Kurokawa (eds.) (2009).** *Energy from the Desert: Very Large Scale Photovoltaic Systems: Socio-economic, Financial, Technical*

*and Environmental Aspects*. Earthscan Publishers, London, UK.

- Koster, L.J.A., V.D. Mihailetschi, and P.W.M. Blom (2006)**. Ultimate efficiency of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells. *Applied Physics Letters*, **88**(9), 093511, doi:10.1063/1.2181635.
- Krebs, F.C. (2005)**. Alternative PV: Large scale organic photovoltaics. *REfocus*, **6**(3), pp. 38-39.
- Krewitt, W., K. Nienhaus, C. Kleßmann, C. Capone, E. Stricker, W. Graus, M. Hoogwijk, N. Supersberger, U. von Winterfeld, and S. Samadi (2009)**. *Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply*. Climate Change 18/2009, ISSN 1862-4359, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Germany, 336 pp.
- Krey, V., and L. Clarke (2011)**. Role of renewable energy in climate change mitigation: a synthesis of recent scenarios. *Climate Policy*, in press.
- Kroposki, B., R. Margolis, G. Kuswa, J. Torres, W. Bower, T. Key, and D. Ton (2008)**. *Renewable Systems Interconnection*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 23 pp.
- Kurokawa, K., and F. Aratani (2004)**. Perceived technical issues accompanying large PV development and Japanese “PV2030”. In: *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Paris, France, 7-11 June 2004.
- Kurokawa, K., K. Komoto, P. van der Vleuten, and D. Faiman (eds.) (2007)**. *Energy from the Desert: Practical Proposals for Very Large Scale Photovoltaic Systems*. Earthscan, London, UK.
- Kushiya, K. (2009)**. Key near-term R&D issues for continuous improvement in CIS-based thin-film PV modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **93**, pp. 1037-1041.
- Lahkar, P.J., and S.K. Samdarshi (2010)**. A review of the thermal performance parameters of box type solar cookers and identification of their correlations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1615-1621.
- LBBW (2009)**. *Branchenanalyse Photovoltaik*. Landesbank Baden-Württemberg (LBBW), Stuttgart, Germany.
- Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson, and M. Prather (2007)**. Historical overview of climate change science. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, pp. 93-127.
- Lee, S., and Z. Yamayee (1981)**. Load-following and spinning-reserve penalties for intermittent generation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **100**(3), pp. 1203-1211.
- Li, G., V. Shrotriya, J.S. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery, and Y. Yang (2005)**. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends. *Nature Materials*, **4**(11), pp. 864-868.
- Lynch, M. (2002)**. Reducing environmental damage caused by the collection of cooking fuel by refugees. *Refugee*, **21**(1), pp. 18-27.
- Mankins, J.C. (1997)**. A fresh look at space solar power: New architectures, concepts, and technologies. *Acta Astronautica*, **41**(4-10), pp. 347-359.
- Mankins, J.C. (2002)**. A technical overview of the “Suntower” solar power satellite concept. *Acta Astronautica*, **50**(6), pp. 369-377.
- Mankins, J.C. (2009)**. New directions for space solar power. *Acta Astronautica*, **65**, pp. 146-156.

- Manuel, J. (2003).** The quest for fire: Hazards of a daily struggle. *Environmental Health Perspectives*, **111**(1), pp. A28-A33.
- Marcos, J., L. Marroyo, E. Lorenzo, D. Alvira, and E. Izco (2010).** Power output fluctuations in large scale PV plants: One year observations with one second resolution and a derived analytic model. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, doi:10.1002/pip.1016.
- Marti, A., and A. Luque (eds.) (2004).** *Next Generation Photovoltaics: High Efficiency through Full Spectrum Utilization*. Institute of Physics Publishing, Bristol, UK and Philadelphia, PA, USA, 332 pp.
- Maycock, P.D. (1976-2003).** *PV News*. PV Energy Systems 1982 (vol 1) through 2003 (vol 22). PV Energy Systems, Williamsburg, VA, USA.
- Maycock, P.D. (2002).** *The World Photovoltaic Market – Report* (January). PV Energy Systems, Williamsburg, VA, USA.
- Medrano, M., A. Gil, I. Martorell, X. Potau, and L.F. Cabeza (2010).** State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), pp. 56-72.
- Meeder, A., A. Neisser, U. Rühle, and N. Mayer (2007).** Manufacturing the first MW of large-area CuInS<sub>2</sub>-based solar modules – Recent experiences and progress. In: *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Milan, Italy, 3-7 September 2007, pp. 2115.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver, and Z.-C. Zhao (2007).** Global climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, pp. 747-846.
- Mehling, H., and L.F. Cabeza (2008).** *Heat and Cold Storage with PCM : An Up to Date Introduction into Basics and Applications*. Springer, Berlin, Germany and London, UK, 308 pp.
- Meier, J., S. Dubail, R. Platz, P. Torres, U. Kroll, J.A. Selvan, N. Pellaton Vaucher, C. Hof, D. Fischer, H. Keppner, R. Flückiger, A. Shah, S. Shklover, and K.-D. Ufert (1997).** Towards high-efficiency thin-film silicon solar cells with the “micromorph” concept. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **49**(1-4), pp. 35-44.
- Meleshko, V.P., V.M. Kattsov, B.A. Govorkova, P.V. Sporyshev, I.M. Skolnik, and B.E. Snerov (2008).** Climate of Russia in the 21st century. Part 3. Future climate change calculated with an ensemble of coupled atmosphere-ocean general circulation CMIP3 models. *Meteorology and Hydrology*, **33**(9), pp. 541-552. Original Russian text published in *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 9, 2008.
- Miller, J.E., M.D. Allendorf, R.B. Diver, L.R. Evans, N.P. Siegel, and J.N. Stuecker (2008).** Metal oxide composites and structures for ultra-high temperature solar thermochemical cycles. *Journal of Materials Science*, **43**(14), pp. 4714-4728.
- Mills, A., and R. Wiser (2010).** *Implications of Wide-Area Geographic Diversity for Short-Term Variability of Solar Power*. DE-AC02-05CH11231, LBNL-3884E, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.
- Mills, B.F., and J. Schleich (2009).** Profits or preferences? Assessing the adoption of residential solar thermal technologies. *Energy Policy*, **37**(10), pp. 4145-4154.
- Mills, E. (2005).** The specter of fuel-based lighting. *Science*, **308**(5726), pp. 1263-1264.
- Ministry of New and Renewable Energy (2009).** *Jawaharlal Nehru National Solar Mission*

- Towards Building SOLAR INDIA*. Ministry of New and Renewable Energy, New Delhi, India, 15 pp.
- Mints, P. (2010).** The PV industry's black swan. *Photovoltaics World*, 18 March 2010.
- Mints, P. (2011).** PV sector market forecast – Thin-film in the era of cheap crystalline PV. *Renewable Energy World Magazine*. 11 February 2011.
- Möller, S., D. Kaucic, and C. Sattler (2006).** Hydrogen production by solar reforming of natural gas: A comparison study of two possible process configurations. *Journal of Solar Energy Engineering*, **128**(1), pp. 16-23.
- Munoz, J., L. Narvarte, and E. Lorenzo (2007).** Experience with PV-diesel hybrid village power systems in southern Morocco. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **15**, pp. 529-539.
- Murata, A., H. Yamaguchi, and K. Otani (2009).** A method of estimating the output fluctuation of many photovoltaic power generation systems dispersed in a wide area. *Electrical Engineering in Japan*, **166**(4), pp. 9-19.
- Nankhuni, F.J., and J.L. Findeis (2004).** Natural resource-collection work and children's schooling in Malawi. *Agricultural Economics*, **31**(2-3), pp. 123-134.
- Narayan, G.P., M.H. Sharqawy, E.K. Summers, J.H. Lienhard, S.M. Zubair, and M.A. Antar (2010).** The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1187- 1201.
- NAS (2004).** *Laying the Foundation for Space Solar Power – An Assessment of NASA's Space Solar Power Investment Strategy*. National Academy of Sciences (NAS), Washington, DC, USA.
- NRC (2010).** *Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use*. National Research Council (NRC), The National Academies Press, Washington, DC, USA, 506 pp.
- Navigant Consulting Inc. (2006).** *A Review of PV Inverter Technology Cost and Performance Projections*. NREL/SR-620-38771, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 100 pp.
- NEDO (2009).** *The Roadmap PV2030+* NEDO. New Energy and Industrial Technology Organization, Kawasaki, Japan.
- NEEDS (2009).** *New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS). Final Report and Database*. New Energy Externalities Development for Sustainability, Rome, Italy.
- Neij, L. (2008).** Cost development of future technologies for power generation – A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments. *Energy Policy*, **36**, pp. 2200- 2211.
- Nelson, J. (2003).** Over the limit: Strategies for high efficiency. In: *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press, London, England, pp. 289-323.
- Nicol, F., M. Wilson, and C. Chiancarella (2006).** Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds. *Energy and Buildings*, **38**(7), pp. 802-813.
- Norton, B. (2001).** Solar process heat: Distillation, drying, agricultural and industrial uses. In: *Solar Energy: The State of the Art. ISES Position Papers*. J.M. Gordon (ed.), James & James, London, UK, pp. 477-496.
- NREL (2011).** *The Open PV Project* (online database). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, USA. Available at: [openpv.nrel.gov](http://openpv.nrel.gov).

- O'Regan, B., and M. Graetzel (1991).** A low-cost, high-efficiency solar-cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature*, **353**(6346), pp. 737-740.
- Ogimoto, K., T. Oozeki, and Y. Ueda (2010).** Long-range power demand and supply planning analysis including photovoltaic generation penetration. *The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ) Transactions on Power and Energy, Tokyo*, **130-B**(6), pp.575-583.
- Oozeki, T., T. Takashima, K. Otani, Y. Hishikawa, G. Koshimizu, Y. Uchida, and K. Ogimoto (2010).** Statistical analysis of the smoothing effect for photovoltaic systems in a large area. *The Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ) Transactions on Power and Energy, Tokyo*, **130-B**(5), pp. 491-500.
- Otani, K., J. Minowa, and K. Kurokawa (1997).** Study on areal solar irradiance for analyzing areally-totalized PV systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **47**(1-4), pp. 281-288.
- Otani, K., A. Murata, K. Sakuta, J. Minowa, and K. Kurokawa (1998).** Statistical smoothing of power delivered to utilities by distributed PV systems. In: *2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Proceedings of the International Conference*, Vienna, Austria, 6-10 July 1998.
- Paksoy, H. (2007).** *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design*. Springer, London, UK and Berlin, Germany.
- Parente, V., J. Goldemberg, and R. Zilles (2002).** Comments on experience curves for PV modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **10**, pp. 571-574.
- Park, H.G., and J.K. Holt (2010).** Recent advances in nanoelectrode architecture for photochemical hydrogen production. *Energy & Environmental Science*, **3**(8), pp. 1028-1036.
- Patrick, E. (2007).** Sexual violence and fuelwood collection in Darfur. *Forced Migration Review*, **27**, pp. 40-41.
- Perpinan, O., E. Lorenzo, M.A. Castro, and R. Eyras (2009).** Energy payback time of grid connected PV systems: Comparison between tracking and fixed systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **17**(2), pp. 137-147.
- Photovoltaic Geographic Information System (2008).** *Solar Radiation and Photovoltaic Electricity Potential Country and Regional Maps for Europe (Africa)*. Institute for Energy, Renewable Energy Unit, European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy.
- PHPP (2004).** *PassivHaus Planning Package (PHPP). Technical Information PHI-2004/1(E) - Specifications for Quality Approved Passive Houses*. PassiveHause Institute, Darmstadt, Germany.
- Piatkowski, N., C. Wieckert, and A. Steinfeld (2009).** Experimental investigation of a packed-bed solar reactor for the steam-gasification of carbonaceous feedstocks. *Fuel Processing Technology*, **90**(3), pp. 360-366.
- Piwko, R.J., X. Bai, K. Clark, G.A. Jordan, and N.W. Miller (2007).** *Intermittency Analysis Project: Appendix B: Impact of Intermittent Generation on Operation of California Power Grid*. California Energy Commission, PIER Research Development & Demonstration Program, Sacramento, CA, USA.
- Piwko, R., K. Clark, L. Freeman, G. Jordan, and N. Miller (2010).** *Western Wind and Solar Integration Study*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.
- POSHIP (2001).** *Calor Solar Para Provesos Industriales: Proyecto POSHIP (Potential of Solar Heat for Industrial Processes)*. Instituto Para Lad Diversificacion y Ahorro de Energia (IDAE), Madrid, Spain.
- Pregger, T., D. Graf, W. Krewitt, C. Sattler, M. Roeb, and S. Moeller (2009).** Prospects of solar

- thermal hydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**(10), pp. 4256-4267.
- Probst, M.M., and C. Roecker (2007).** Towards an improved architectural quality of building integrated solar thermal systems (BIST). *Solar Energy*, **81**(9), pp. 1104-1116.
- Ralegaonkar, R.V., and R. Gupta (2010).** Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 2238-2242.
- Ramachandran, J., N.M. Pearsall, and G.A. Putrus (2004).** Reduction in solar radiation fluctuation by spatial smoothing effect. In: *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Proceedings of the International Conference*, WIP-Renewable Energies, Paris, France, 7-11 July 2004, pp. 2900-2903.
- REN21 (2009).** *Renewables Global Status Report. 2009 Update*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 32 pp.
- REN21 (2010).** *Renewables 2010 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 80 pp.
- Richter, C., S. Teske, and R. Short (2009).** *Concentrating Solar Power: Global Outlook 2009 – Why Renewable Energy is Hot*. Greenpeace International, SolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Storage), and ESTELA (European Solar Thermal Electricity Association), 88 pp. Available at: [www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/concentrating-solar-power-2009.pdf](http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/concentrating-solar-power-2009.pdf).
- Rickerson, W., T. Halfpenny, and S. Cohan (2009).** The emergence of renewable heating and cooling policy in the United States. *Policy and Society*, **27**(4), pp. 365-377.
- Rodat, S., S. Abanades, and G. Flamant (2009).** High-temperature solar methane dissociation in a multitubular cavity-type reactor in the temperature range 1823-2073 K. *Energy & Fuels*, **23**, pp. 2666-2674.
- Roeb, M., C. Sattler, R. Kluser, N. Monnerie, L. de Oliveira, A.G. Konstandopoulos, C. Agrafiotis, V.T. Zaspalis, L. Nalbandian, A. Steele, and P. Stobbe (2006).** Solar hydrogen production by a two-step cycle based on mixed iron oxides. *Journal of Solar Energy Engineering*, **128**(2), pp. 125-133.
- Roeb, M., M. Neises, J.P. Sack, P. Rietbrock, N. Monnerie, J. Dersch, M. Schmitz, and C. Sattler (2009).** Operational strategy of a two-step thermochemical process for solar hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**(10), pp. 4537-4545.
- Rogner, H.-H., F. Barthel, M. Cabrera, A. Faaij, M. Giroux, D. Hall, V. Kagramanian, S. Kononov, T. Lefevre, R. Moreira, R. Nötstaller, P. Odell, and M. Taylor (2000).** Energy resources. In: *World Energy Assessment. Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council, New York, USA, 508 pp.
- Ropp, M., J. Newmiller, C. Whitaker, and B. Norris (2008).** Review of potential problems and utility concerns arising from high penetration levels of photovoltaics in distribution systems. In: *Proceedings of the 33rd Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, San Diego, CA, 11-16 May, 2008, pp. 518-523.
- Ruhl, V., F. Luetter, C. Schmidt, J. Wackerbauer, U. Triebswetter (2008)** *Standortgutachten Photovoltaik in Deutschland*. EuPD Research and IFO Institut für Wirtschaftsforschung, Universität München, Bonn, Germany and München, Germany, 28 pp.
- Santamouris, M., and D. Asimakopoulos (eds.) (1996).** *Passive Cooling of Buildings*. James & James, London, 472 pp.

- Sargent and Lundy LLC Consulting Group (2003).** *Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 344 pp.
- Schaeffer, G.J., A.J. Seebregts, L.W.M. Beurskens, H.H.C. Moor, E.A. Alsema, W. Sark, M. Durstewicz, M. Perrin, P. Boulanger, H. Laukamp, and C. Zuccaro (2004).** *Learning from the Sun: Analysis of the Use of Experience Curves for Energy Policy Purposes – The Case of Photovoltaic Power. Final Report of the Photex Project*. DEGO: ECN-C-04-035, Energy Research Centre of the Netherlands, Petten, The Netherlands.
- Schaller, R., and V. Klimov (2004).** High efficiency carrier multiplication in PbSe nanocrystals: Implications for solar energy conversion. *Physical Review Letters*, **92**(18), 186601.
- Scheffler, J. (2002).** *Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten*. Fakultät Elektrotechnik und Informatik, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, Germany.
- Schossig, P., H.-M. Henning, S. Gschwander, and T. Haussmann (2005).** Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **89**, pp. 297-306.
- Schunk, L.O., P. Haeberling, S. Wepf, D. Wuillemin, A. Meier, and A. Steinfeld (2008).** A receiver-reactor for the solar thermal dissociation of zinc oxide. *Journal of Solar Energy Engineering*, **130**(2), 021009.
- Schunk, L.O., W. Lipinski, and A. Steinfeld (2009).** Heat transfer model of a solar receiver- reactor for the thermal dissociation of ZnO - Experimental validation at 10 kW and scale-up to 1 MW. *Chemical Engineering Journal*, **150**(2-3), pp. 502-508.
- SEIA (2010a).** *US Solar Industry – Year in Review 2009*. US Solar Energy Industries Association (SEIA), Washington, DC, USA.
- SEIA (2010b).** *US Solar Market Insight, 2nd Quarter 2010 Executive Summary*. US Solar Energy Industries Association (SEIA), Washington, DC, USA.
- SEMI (2009a).** Polysilicon shipments reach 43,901 Mt in 2008. Press Release, 10 March 2009, Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI), San Jose, CA, USA. Available at: [www.semi.org/en/Press/CTR\\_028736](http://www.semi.org/en/Press/CTR_028736).
- SEMI (2009b).** *China's Solar Future (SEMI China White Paper)*. Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI), San Jose, CA, USA.
- SEMI (2009c).** *The Solar PV Landscape in India – An Industry Perspective (SEMI India White Paper)*. Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI), San Jose, CA, USA.
- Service, R.F. (2009).** Sunlight in your tank. *Science*, **326**(5959), pp. 1471-1475.
- Sharma, A. (2011).** A comprehensive study of solar power in India and World. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, pp. 1767–1776.
- Shockley, W., and H.J. Queisser (1961).** Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, **32**(3), pp. 510-519.
- Shu, H., L. Duanmu, C. Zhang, and Y. Zhu (2010).** Study on the decision-making of district cooling and heating systems by means of value engineering. *Renewable Energy*, **35**, pp. 1929-1939.
- Sims, R.E.H., R.N. Schock, A. Adegbululgbé, J. Fenhann, I. Konstantinavičiute, W. Moomaw, H.B. Nimir, B. Schlamadinger, J. Torres-Martínez, C. Turner, Y. Uchiyama, S.J.V. Vuori, N. Wamukonya, and X. Zhang (2007).** Energy supply. In: *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, pp. 251-322.
- Sinha, P., C.J. Kriegner, W.A. Schew, S.W. Kaczmar, M. Traister, and D.J. Wilson (2008)**. Regulatory policy governing cadmium-telluride photovoltaics: A case study contrasting life-cycle management with the precautionary principle. *Energy Policy*, **36**, pp. 381-387.
- SolarPACES (2008)**. *SolarPACES Annual Report 2007*. International Energy Agency, Paris, France, 204 pp.
- SolarPACES (2009a)**. *SolarPACES Annual Report 2008. Task I: Solar Thermal Electric Systems*. International Energy Agency, Paris, France, pp. 3.1-3.14.
- SolarPACES (2009b)**. *SolarPACES Annual Report 2008. Task VI: Solar Energy & Water Processes and Applications*. International Energy Agency, Paris, France, pp. 8.1-12.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood, and D. Wratt (2007)**. Technical summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, pp.19-91.
- Spath, P.L., and W.A. Amos (2003)**. Using a concentrating solar reactor to produce hydrogen and carbon black via thermal decomposition of natural gas: Feasibility and economics. *Journal of Solar Energy Engineering*, **125**(2), pp. 159-164.
- Specht, M., F. Baumgart, B. Feigl, V. Frick, B. Stuermer, U. Zuberbuehler, M. Sterner, and G. Waldstein (2010)**. Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz (Storage of bioenergy and renewable power in the natural gas network). In: *FVEE Annual Meeting 2009. Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien*, Berlin, Germany.
- Sreeraj, E.S., K. Chatterjee, and S. Bandyopadhyay (2010)**. Design of isolated renewable hybrid power systems. *Solar Energy*, **84**(7), pp. 1124-1136.
- Staebler, D.L., and C.R. Wronski (1977)**. Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si. *Applied Physics Letters*, **31**(4), pp. 292-294.
- Stein, W., B. Antonioli, S. Bönisch, M. Hausotte, A. Hofmann, R. Joziak, H. Krautz, P. Minton, B. Mone, J.-C. Müller, J. Pantförder, A. Schuster, G. Springer, J. Springer, and S. Klein (2009)**. Status of thin-film Si high-efficiency tandem junction module fabrication on ultra-large substrates of 2.20 x 2060 m<sup>2</sup> at Sunfilm. In: *Proceedings of the 24th EU PV Solar Energy Conference, 6th European PV Industry Forum*, Hamburg, Germany, 23 September 23 2009.
- Steinfeld, A. (2005)**. Solar thermochemical production of hydrogen - a review. *Solar Energy*, **78**(5), pp. 603-615.
- Steinfeld, A., and A. Meier (2004)**. Solar Fuels and Materials. In: *Encyclopedia of Energy*. Vol. 5. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 623-637.
- Sterner, M. (2009)**. *Bioenergy and Renewable Power Methane in Integrated 100% Renewable Energy Systems. Limiting Global Warming by Transforming Energy Systems*. Dissertation, Kassel University, Kassel, Germany.
- Sun, S.-S., and N.S. Sariciftci (eds.) (2005)**. *Organic Photovoltaics: Mechanisms, Materials, and Devices*. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.

- Taguchi, M., Y. Tsunomura, H. Inoue, S. Taira, T. Nakashima, T. Baba, H. Sakata, and E. Maruyama (2009).** High-efficiency HIT solar cell on thin ( $< 100 \mu\text{m}$ ) silicon wafer. In: *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 21-25 September 2009, pp. 1690.
- Teske, S., T. Pregger, S. Simon, T. Naegler, W. Graus, and C. Lins (2010).** Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency*, doi:10.1007/s12053-010-9098-y.
- The European Parliament and the Council of the European Union (2010).** *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings*. 2010/31/EU. Official Journal of the European Union, pp. 23.
- Torres, J.M.M., N.G. López, and C. Márquez (2010).** *The Global Concentrator Solar Power Industry Report 2010-2011*. First Conferences Ltd., London, UK.
- Trieb, F. (2005).** *Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Final Report*, German Aerospace Centre (DLR), Stuttgart, 285pp.
- Trieb, F., M. O'Sullivan, T. Pregger, C. Schillings, and W. Krewitt (2009a).** *Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe - Potential, Infrastructure and Cost*. German Aerospace Centre (DLR), Stuttgart, Germany, 172 pp.
- Trieb, F., C. Schillings, M. O'Sullivan, T. Pregger, and C. Hoyer-Klick (2009b).** Global potential of concentrating solar power. In: *SolarPACES Conference*, Berlin, Germany, 15-18 September 2009.
- Tripanagnostopoulos, Y. (2007).** Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, **81**(9), pp. 1117-1131.
- Tsiliniridis, G., G. Martinopoulos, and N. Kyriakis (2004).** Life cycle environmental impact of a thermosyphonic domestic solar hot water system in comparison with electrical and gas water heating. *Renewable Energy* **29**, pp. 1277-1288.
- Tsoutsos, T., N. Fratezeskaki, and V. Gekas (2005).** Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, **33**, pp. 289-296.
- Turner, J., G. Sverdrup, M.K. Mann, P.-C. Maness, B. Kroposki, M. Ghirardi, R.J. Evans, and D. Blake (2008).** Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, **32**, pp. 379-407.
- Twidell, J., and A.D. Weir (2006).** *Renewable Energy Resources*. Taylor & Francis, Oxon, UK.
- Tzempelikos, A., A.K. Athienitis, and A. Nazos (2010).** Integrated design of perimeter zones with glass facades. *ASHRAE Transactions*, **116**(1), pp. 461-478.
- UBS (2009).** *UBS Wealth Management Research (5 March 2009). Solar Energy*. Union Bank of Switzerland, 37 pp. Available at: [http://www.cleantechsandiego.org/reports/UBS\\_Solar\\_Energy\\_Report\\_3-5-09.pdf](http://www.cleantechsandiego.org/reports/UBS_Solar_Energy_Report_3-5-09.pdf).
- UNEP (2007).** *Buildings and Climate Change – Status, Challenges and Opportunities*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Urbschat, C., F. Barban, B. Baumgartner, M. Beste, M. Herr, A. Schmid-Kieninger, F. Rossani, G. Stry-Hipp, and M. Welke (2002).** *Sunrise 2002 – The Solar Thermal and Photovoltaic Markets in Europe. Market Survey*. eclareon GmbH, Berlin, Germany.
- US Photovoltaic Industry Roadmap Steering Committee (2001).** *Solar-Electric Power: The U.S. Photovoltaic Industry Roadmap*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 36 pp.
- US DOE (2008).** *Solar Energy Technologies Programme, Multi Year Program Plan 2008 -2012*. U.S. Department of Energy (US DOE), Washington, DC, USA.

- US DOE (2009).** *Concentrating Solar Power Commercial Application Study: Reducing Water Consumption of Concentrating Solar Power Electricity Generation. Report to Congress.* U.S. Department of Energy (US DOE), Washington, DC, USA, 35 pp.
- US DOE (2011).** *Solar Vision Study (draft).* U.S. Department of Energy (US DOE), Washington DC, USA, final publication currently postponed.
- Viebahn, P., Y. Lechon, and F. Trieb (2010).** The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe: A dynamic assessment of technology development, cost development and life cycle inventories until 2050. *Energy Policy*, doi:10.1016/j.enpol.2010.09.026.
- Voss, K., S. Herkel, J. Pfafferott, G. Löhnert, and A. Wagner (2007).** Energy efficient office buildings with passive cooling – Results and experiences from a research and demonstration programme. *Solar Energy*, **81**, pp. 424-434.
- Wadia, C., A.P. Alivisatos, and D.M. Kammen (2009).** Materials availability expands the opportunity for large-scale photovoltaic deployment. *Environmental Science & Technology*, **43**(6), pp. 2072-2077.
- Wagner, S., J.L. Shay, P. Migliorato, and H.M. Kasper (1974).** CuInSe<sub>2</sub>/CdS heterojunction photovoltaic detectors. *Applied Physics Letters*, **25**, pp. 434.
- WEC (1994).** *New Energy Resources.* World Energy Council (WEC), London, UK.
- Wei, M., S. Patadia, and D. Kammen (2010).** Putting renewables to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, **38**, pp. 919-931.
- Weiss, W. (2003).** *Solar Heating Systems for Houses. A Design Handbook for Solar Combisystems.* Earthscan, London, UK.
- Weiss, W., and F. Mauthner (2010).** *Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2008.* AEE - Institute for Sustainable Technologies, Gleisdorf, Austria for the International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme, 52 pp. Available at: [www.iea-shc.org/publications/downloads/Solar\\_Heat\\_Worldwide-2010.pdf](http://www.iea-shc.org/publications/downloads/Solar_Heat_Worldwide-2010.pdf).
- Wentzel, M., and A. Pouris (2007).** The development impact of solar cookers: A review of solar cooking impact research in South Africa. *Energy Policy*, **35**(3), pp. 1909-1919.
- Werner, S. (2006).** Ecoheatcool. WP1: The European Heat Market 2003, WP4: District Heating Possibilities, WP2: The European Cooling Market. In: *Nordic Energy Perspectives Conference*, Helsinki, Finland, 24 January 2006. Available at: [www.nordicenergyperspectives.org/doc24jan06.asp](http://www.nordicenergyperspectives.org/doc24jan06.asp).
- Wiemken, E., H.G. Beyer, W. Heydenreich, and K. Kiefer (2001).** Power characteristics of PV ensembles: Experiences from the combined power production of 100 grid connected PV systems distributed over the area of Germany. *Solar Energy*, **70**(6), pp. 513-518.
- Wiser, R., G. Barbose, and C. Peterman (2009).** *Tracking the Sun: The Installed Cost of Photovoltaics in the U.S. from 1998-2007.* Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 42 pp.
- Wiser, R., G. Barbose, and E. Holt (2010).** *Supporting Solar Power in Renewable Portfolio Standards: Experience from the United States.* LBNL- 3984E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 38 pp.
- WMO (2008).** *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation.* WMO-No. 8, World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 681 pp.
- World Bank Global Environment Facility Program (2006).** *Assessment of the World Bank/GEF Strategy for the Market Development of Concentrating Solar Thermal Power.* The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, Washington, DC, USA, 149 pp.

- Woyte, A., R. Belmans, and J. Nijs (2001).** Power flow fluctuations in distribution grids with high PV penetration. In: *Proceedings of the 17th EC PV Solar Energy Conference*, Munich, Germany, 22-26 October 2001, pp. 2414-2417.
- Woyte, A., R. Belmans, and J. Nijs (2007).** Fluctuations in instantaneous clearness index: Analysis and statistics. *Solar Energy*, **81**(2), pp. 195-206.
- Yakimov, A., and S.R. Forrest (2002).** High photovoltaics multiple-heterojunction organic solar cells incorporating interfacial metallic nanoclusters. *Applied Physics Letters*, **80**(9), pp. 1667-1669.
- Yamamoto, K., A. Nakashima, T. Suzuki, M. Yoshimi, H. Nishio, and M. Izumina (1994).** Thin-film polycrystalline Si solar cell on glass substrate fabricated by a novel low temperature process. *Japanese Journal of Applied Physics*, **33**, pp. L1751-L1754.
- Yang, C.J. (2010).** Reconsidering solar grid parity. *Energy Policy*, **38**, pp. 3270-3273.
- Yang, J., and S. Guha (1992).** Double-junction amorphous silicon-based solar cells with 11-percent stable efficiency. *Applied Physics Letters*, **61**(24), pp. 2917-2919.
- Young, W.R. (1996).** *History of Applying Photovoltaics to Disaster Relief*. Florida Solar Energy Center, Cocoa, FL, USA, 16 pp.
- Z'Graggen, A., and A. Steinfeld (2008).** Hydrogen production by steam-gasification of carbonaceous materials using concentrated solar energy – V. Reactor modeling, optimization, and scale-up. *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**(20), pp. 5484-5492.
- Zayed, J., and S. Philippe (2009).** Acute oral and inhalation toxicities in rats with cadmium telluride. *International Journal of Toxicology*, **28**(4), pp. 259-265.
- Zervos, A., C. Lins, and J. Muth (2010).** *RE-thinking 2050 – A 100% Renewable Energy Vision for the European Union*. European Renewable Energy Council, Brussels, Belgium.
- Zhang, X., W. Ruoshui, H. Molin, and E. Martinot (2010).** A study of the role played by renewable energies in China's sustainable energy supply. *Energy*, **35**(11), pp.4392-4399, doi:10.1016/j.energy.2009.05.030.
- Zoellner, J., P. Schweizer-Ries, and C. Wemheuer (2008).** Public acceptance of renewable energies: Results from case studies in Germany. *Energy Policy*, **26**, pp. 4136-4141.