

総 論

# 太陽光発電技術の現状と今後の展開

Current Status and Future Development of PV Technology

清水正文\*  
Masafumi Shimizu

沢井啓安\*  
Hiroyasu Sawai

## 要 旨

太陽電池の全世界における生産量は過去10年間平均35%を超えるペースで増加しており、2004年には1,194MWに達した。今後とも高い伸びが期待され、2010年には世界の電力需要の0.1%を太陽光発電が占めると予測されている。一方NEDOでは今後の技術開発の方向性を示すため、2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) が策定された。次期技術開発の方向としては、シリコンバルク型太陽電池では極薄基板の高効率セル製造技術、シリコン薄膜型太陽電池では大面積多接合の高生産性製造プロセス技術、また、色素増感太陽電池では低コスト高効率なモジュール製造技術等が挙げられ、これら要素技術確立に向けた方向付けを行うための先導研究が進められている。

Annual increase in the production volume of PV cells and modules exceeds 35% in recent ten years, and it has reached 1,194MW in 2004. The rapid increase is expected to continue, and the worldwide share of PV in total power generation is estimated to become 0.1% in 2010. NEDO announced a roadmap for technological development of PV systems, "PV roadmap toward 2030 (PV2030)". In this roadmap, the next-generation R&D is targetted on high-efficiency ultra thin crystalline Si solar cell, high throughput large area multi-junction thin-film Si solar cell, low-cost high-efficiency dye-sensitized solar cell, and others. The feasibility studies are currently underway to clarify the prospect for the development of these elemental technologies.

## まえがき

京都議定書による地球温暖化ガス排出量6%の削減を目指す国民プロジェクトとして「チームマイナス6%」運動が環境省の旗振りで国を挙げた取り組みとして行われている。「2010年に地球温暖化負荷ゼロ」を目指す当社もこの主旨に賛同し、チームメンバーとして参加を決定し、具体的な取り組みがスタートした。一方、国内外で顕在化しつつある地球環境問題への対応の一環として太陽光発電の導入が進んでいる。

太陽電池の全世界における年間生産量は過去10年間平均35%を超えるペースで増加しており、2004年には1,194MWに達した。国別生産量では日本は601MWで50%のシェアを占めており、次いで欧州の314MW (シェア26%)、米国の139MW (同12%)と続いている。今後とも高い伸びの導入拡大が期待されており、2010年には世界の電力需要の0.1%を太陽光発電が占める

と予測されている<sup>1)</sup>。

これらの状況下、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では太陽光発電の持続的な発展と普及拡大に向けた技術開発の方向性を示すため、2030年までの長期視野に立った技術開発戦略として太陽光発電ロードマップ (PV2030) が策定された。

そこで本稿では、急拡大を続ける太陽光発電導入の中で、技術開発の現状と更なる発展を遂げるための今後の開発方向について概論する。

## 1. 太陽電池生産量の推移

太陽電池の全世界における年間生産量は過去10年間平均35%を超えるペースで増加を続けており、特に2004年は前年比伸び率60.6%と大幅に伸長し、生産量は1,194MWに達した。国別生産量では日本は601MW (シェア/前年比伸び率: 50% / 65%)、欧州は314MW

\* 技術本部 エコロジー技術開発センター

(同26% / 63%), 米国は139MW (同12% / 35%) で、日本と欧州の伸びが60%を超え顕著である。今後も引き続き大きな伸びが期待されており、2010年には日本での太陽電池生産量は1,230MWに達すると予測されている<sup>2)</sup>。図1に世界の太陽電池生産量の推移を示す<sup>3)</sup>。

種類別生産量を見ると、単結晶シリコンが344MW

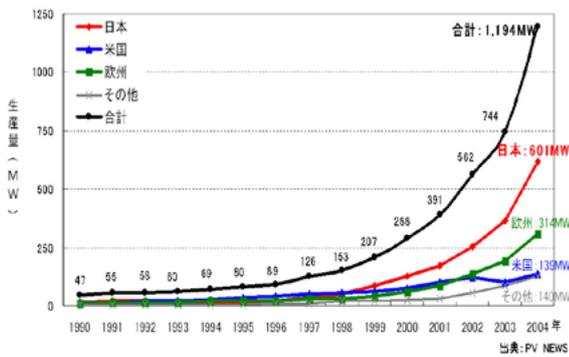


図1 世界の太陽電池生産量の推移

Fig. 1 World production volume of PV cell/module.

(シェア29%), 多結晶シリコンが669MW (56%), アモルファスシリコン単結晶が60MW (5%) で、更にリボンシリコンの41MW (4%) を加えたシリコンバルク型で全体の94%を占めており、ここ3年間はほぼ同程度のシェアで推移しており、シリコン原材料の供給問題の懸念はあるが、当分の間はこの傾向が続くと思われる。表1に2002～2004年における世界の太陽電池種類別生産量を示す<sup>3)</sup>。

用途としては現状では公的支援を前提とした住宅用、公共施設用、発電用実証プラント等が中心であるが、長期的な視野では、太陽光発電のコスト低減の進展や更には汎用電力並みの発電コスト実現に伴い、産業用や電力事業用途への拡大が期待される。2004年5月に欧州再生可能エネルギー委員会より発表された

表1 2002～2004年における世界の種類別太陽電池生産量

Table 1 Production volume of PV cell/module by cell technology in from 2002 to 2004.

種類	2002年		2003年		2004年	
	MW	%	MW	%	MW	%
単結晶シリコン	160.8	28.6	200.5	26.9	343.5	28.7
多結晶シリコン	308.1	54.8	455.8	61.3	669.2	56.0
a-Si/単結晶Si	30.0	5.3	30.0	4.0	60.0	5.0
リボンシリコン	16.9	3.0	6.8	0.9	41.0	3.4
薄膜シリコン	37.9	6.7	43.3	5.8	64.6	5.4
CIS	3.0	0.5	4.0	0.5	3.0	0.3
CdTe	4.6	0.8	3.0	0.4	13.0	1.1
集光型	0.5	0.1	0.7	0.1	0.5	0.0
合計	561.8	100	744.1	100	1,194.7	100

Renewable Energy Scenario to 2040によると、世界の総発電量に占める太陽光発電の割合は、図2に示すように、2010年に0.1%、2020年に1.1%、2030年に8.3%、2040年には25%に拡大すると予測されている<sup>1)</sup>。

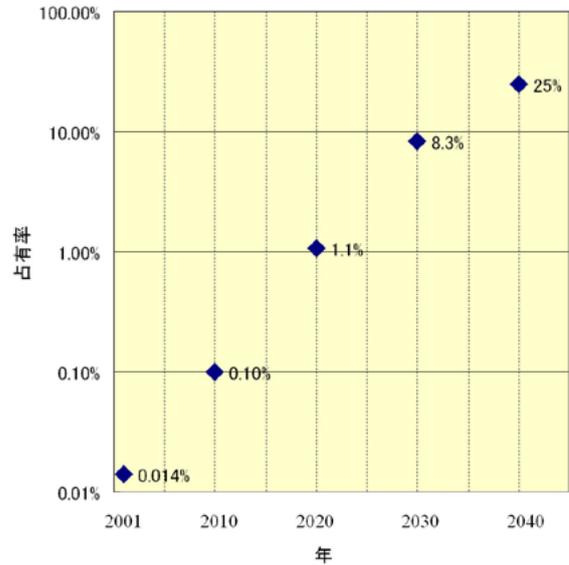


図2 世界の総発電量に占める太陽光発電の割合

Fig. 2 PV Share for total power generation (global).

## 2. 技術開発の現状

### 2・1 太陽電池の種類と特長

太陽電池には表2に示すように、材料で分類するとシリコン系、化合物半導体系、有機系があり、さらに結晶やデバイス構造でバルク型、薄膜型、単結晶型、多結晶型等に細分化できる。これらの中で現在の生産量の大部分を占めているのはシリコンバルク型太陽電池で

表2 太陽電池の種類と特徴

Table 2 Kind of solar cell and its features.

太陽電池	種類	特徴	
シリコン系	バルク型	単結晶	高い変換効率 豊富な使用実績
		多結晶	大量生産に適する 豊富な使用実績
		リボン	スライス工程不要
	薄膜型 (a-Si、μc-Si)	低コスト化のポテンシャル	
化合物半導体系	単結晶型 (GaAs系)	高い変換効率、高コスト 集光型セルとして使用	
	多結晶型 (CIGS、CdTe)	資源量の制約物質を含む 公害物質を含むものがある	
有機系	色素増感型	真空、高温プロセスが不要	
	有機薄膜型	低コスト化のポテンシャル	

あり、今後も当面この状況が続くと思われる。シリコン薄膜型はビル用途を中心として生産量が拡大しつつあり、有機色素増感太陽電池と併に次世代の低コスト太陽電池として期待されている。また、化合物半導体系では単結晶型は集光セルとして、多結晶型は住宅用として、実用化が進められている。

## 2・2 各太陽電池の変換効率

表3に研究レベルにおける各太陽電池の変換効率を示す<sup>4)~7)</sup>。

シリコンバルク型では、単結晶でフォトリソ電極、表面逆ピラミッド、裏面部分BSF技術を使った4cm<sup>2</sup>セルで24.7%、同電極、裏面 $\mu$ c-Siへテロ接合/部分BSF技術を使った25cm<sup>2</sup>セルで23.5%の変換効率を得られている。また、印刷電極、表裏a-Siへテロ接合/TCO電極(HIT構造)の100cm<sup>2</sup>セルで21.3%が報告されている。多結晶ではフォトリソ電極、表面アルカリテクスチャー、裏面全面Al-BSFの4cm<sup>2</sup>セルで18.9%、印刷電極、表面RIEテクスチャー、裏面全面Al-BSFの232.5cm<sup>2</sup>セルで17.7%、フォトリソ電極、表面プラズマテクスチャー、裏面部分BSFの99 $\mu$ m薄型1cm<sup>2</sup>セルで20.3%が得られている。また、EFGリボン結晶では印刷電極、MgF<sub>2</sub>/SiNの2層ARCを使った91.27cm<sup>2</sup>セルで16.4%が報告されている<sup>8)</sup>。総じて単結晶では21~24%、多結晶では小面積セルの高効率技術で18~20%、大面積セルの実用化技術で17%をこえる変換効率を得られている。これら研究成果は、順次、量産技術へ展開し実用化

が進められている。

シリコン薄膜型では、a-Si/ $\mu$ c-Siの2層ハイブリッド14.23cm<sup>2</sup>サブモジュールで11.7%、a-Si/a-SiGe/a-SiGeの3層ハイブリッド905cm<sup>2</sup>モジュールで10.4%が報告されている。CIGSでは3459cm<sup>2</sup>モジュールで13.4%が得られている。また、有機色素増感型では0.2cm<sup>2</sup>程度の小面積セルで10%を超える変換効率が報告されており、実用化にはまだ課題が多く時間がかかるが、評価できる効率レベルに達してきた。

## 2・3 基板薄型化への取り組み

太陽電池生産量の急拡大に伴いシリコン原材料の需給が逼迫しており、必要量のシリコン原料の入手確保が困難な状況になっている。また、シリコン価格も高騰しており、今後太陽電池モジュールの低価格化が進む中で、シリコン原材料問題は採算面でも懸念材料になっている。

このためメーカー各社はシリコン使用量を削減すべく、セルの薄型化開発を積極的に進めている。現在生産されているセル厚は180 $\mu$ m~220 $\mu$ mであり、2010年頃には100 $\mu$ m程度の薄型化を目標に、薄型スライス技術、薄型セルプロセス技術の開発が行われている。このセル厚100 $\mu$ mまでの開発は基本的には現状のプロセスをベースに進められている。

さらに、次世代技術としてもう一段の低コスト化を目指し、50 $\mu$ m級の超薄型セルの開発が始まった。この超薄型基板の製造プロセスは従来技術の延長では

表3 研究レベルにおける各太陽電池の変換効率

Table 3 Current conversion efficiencies of various type solar cells at their research stages.

分類	セル構造	研究機関	面積 (cm <sup>2</sup> )	変換効率 (%)	Voc (mV)	Isc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	発表年	備考
Siバルク型	単結晶	UNSW	4(da)	24.7	706	42.2	0.828	1999	FZ結晶
			22.1(da)	23.7	704	41.5	0.810	1996	
	単結晶	シャープ	25(da)	23.5	694	41.1	0.823	1997	FZ結晶
	単結晶	三洋電機	100(t)	21.3	717	38.6	0.770	2003	CZ結晶
	多結晶	FISE	1(ap)	20.3	664	37.7	0.809	2004	セル厚99 $\mu$ m 川鉄基板
	多結晶	シャープ	4(ap)	18.9	641	36.9	0.796	2003	川鉄基板
			25(ap)	18.4	641	35.9	0.798	2003	
	多結晶	京セラ	232.5(t)	17.7	620	37.0	0.77	2004	
リボン (EFG)	RWE	91.27	16.4	606	33.8	0.80	2005	セル厚200 $\mu$ m	
Si薄膜型	a-Si/ $\mu$ c-Si	カネカ	14.23(ap)	11.7	5.462(V)	2.99	0.713	2004	サブモジュール
Si薄膜型	a-Si/a-SiGe/a-SiGe	USSC	905(ap)	10.4	4.353(V)	3.285(A)	0.66	1998	
Si薄膜型	a-Si/a-SiGe/nc-Si	USSC	0.25(ap)	12.6	2.128(V)	8.33	0.71	2005	Stable
化合物半導体多結晶型		昭シエル	3459(ap)	13.4	31.2(V)	2.16(A)	0.689	2002	Cd free
化合物半導体多結晶型		U.Uppsala	16.0(ap)	16.6	2.643(V)	8.35	0.751	2000	サブモジュール
色素増感型		シャープ	0.223(ap)	10.8	729	20.6	0.704	2005	
色素増感型		EPFL	0.1863(ap)	10.4	720	20.53	0.704	2001	

(t):total area (ap):aperture area (da):designated illumination area

UNSW: University of New South Wales, FISE: Fraunhofer-ISE, RWE: RWE SCHOTT Solar GmbH,

USSC: United Solar Systems Corporation, U. Uppsala: Uppsala University, EPFL: École Polytechnique Fédérale de Lausanne

対応困難であり、スライス、セル、モジュールの各プロセスで革新的な技術開発が必要である。また同時に、より一層の高効率化を目指し、変換効率としては実用レベルで20%を超える目標値が設定されている。図3にセル厚と変換効率のシミュレーション結果を示す<sup>9)</sup>。裏面再結合速度100cm/s、内部反射率90%で50 $\mu$ mセルの変換効率が20%を超えることが判り、超薄型セルの高効率化への目標が明らかにされた。今後これら目標達成に向けた研究開発が進められることになる。

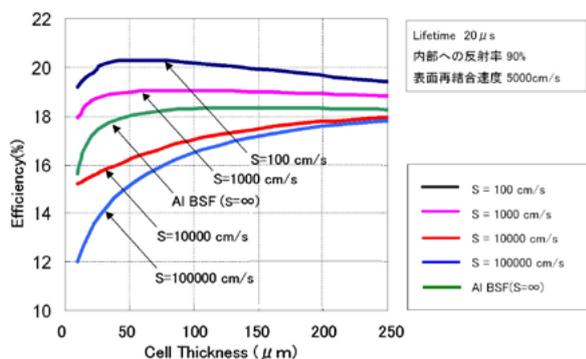


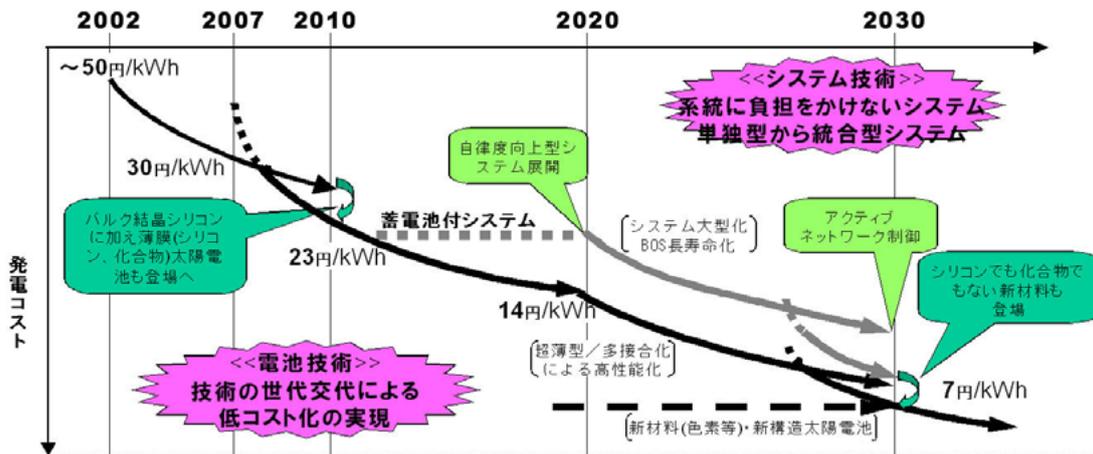
図3 超薄型セルシミュレーション  
Fig. 3 Simulated conversion efficiency of crystalline Si solar cell.

### 3. 2030年に向けた太陽光発電ロードマップと今後の技術開発

#### 3・1 2030年に向けた太陽光発電ロードマップ

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では太陽光発電の持続的な発展と普及拡大に向けた今後の技術開発の方向性を示すため、2004年6月に「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)」を策定し、公開した。それによると、2030年に太陽光発電の目指す姿として今後2030年までの期間は太陽光発電の本格的な市場形成期と捉え、太陽光発電がその利用拡大によりエネルギー資源問題や地球環境問題に対応した主要エネルギー源の一つとなるための認知と信頼獲得の期間と位置付けられている。また、太陽光発電の制約のない利用拡大を実現し、2030年までに累積導入量を100GW、発電量として家庭用電力の1/2程度、全電力に占める太陽光発電量を10%と想定されている。図4にPV2030で想定された太陽光発電の経済性改善シナリオを示す<sup>10)</sup>。

経済性の改善では2030年までに汎用電力並みの発電コスト(7円/kWh程度)を達成し、経済性の面で他のエネルギーとの競合を可能としている。また、太陽光発電の利用形態を従来からの系統連系から電力系統に過度の負担をかけない新しいシステム形態に転換



[参考:太陽光発電の展開イメージ]

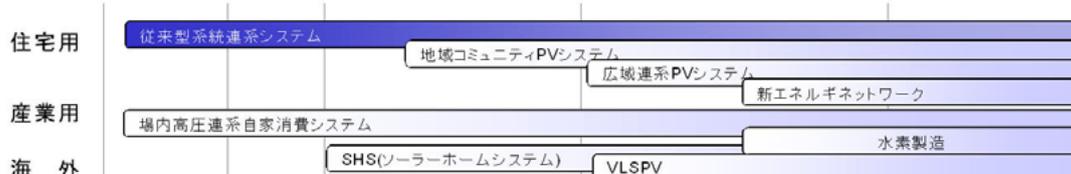


図4 太陽光発電の経済性改善シナリオ

Fig. 4 Scenario for improving the economic efficiency of PV power generation.

するとともに、広範囲な場所、状況での利用を実現するとしている。技術開発ではモジュール製造コストの低減が最重要課題であり、2020年75円/W、2030年50円/W以下を目指した性能向上のための技術革新、新しいコンセプトの太陽電池の開発が必要としている。

電力システムに過度の負担をかけない新しいシステム形態への転換では、蓄電機能を付加した自律度向上型システム技術の確立や地域/広域エネルギーネットワークシステムの形成が必要であり、また、多様な用途・設置場所・利用形態に対応するためのモジュールの多様化、多機能化、建材・部材との一体化等の付加価値増加に向けた技術開発も必要としている。上記の他に太陽光発電の持続的な発展を確保するためには、シリコン原材料の安定供給技術をはじめとする周辺産業に対する大量生産技術、性能評価技術、リサイクル技術などの基盤技術の開発も重要としている。

### 3・2 技術開発の方向と先導研究

技術開発の方向としては、シリコンバルク型太陽電池では極薄基板Si太陽電池の高効率セル製造技術、シリコン薄膜型太陽電池では大面積多接合薄膜太陽電池の高生産性製造プロセス技術、CIS系化合物半導体太陽電池では多接合構造セルの非真空型薄膜製造技術、また、新概念太陽電池では集積型大面積色素増感太陽電池の安価なモジュール製造技術等が挙げられている。これら技術開発の方向と最近の太陽光発電技術を巡る開発動向を踏まえ、本格的な次世代技術開発に入る前段階として、先導研究が2004年10月から2006年3月までの1.5年の期間で実施されている。この先導研究では、2030年へのステップとして、2020年に向けた技術開発目標を達成するための要素技術確立への方向付けを行うことを目標にフィージビリティスタディが行われている。表4に2020年の技術開発目標を<sup>1)</sup>、表5に各太陽電池の先導研究実施テーマを示す<sup>9)</sup>。

表4 2020年の技術開発目標

Table 4 Targets of PV R&D toward 2020.

項目	開発目標	(参考) 2030年
多結晶シリコン太陽電池	モジュール効率19% (セル効率25%)	22% (25%)
薄膜シリコン太陽電池	モジュール効率14% (セル効率18%)	18% (20%)
化合物(CIS系等)太陽電池	モジュール効率18% (セル効率25%)	22% (25%)
超高効率太陽電池		40% (50%)
色素増感太陽電池	モジュール効率10% (セル効率15%)	15% (18%)
モジュール製造コスト	75円/W	<50円/W
モジュール寿命	30年	
インバータ	15,000円/kW	
蓄電装置	10円/Wh	

表5 各太陽電池の先導研究実施テーマ

Table 5 Leading R&D themes of advanced solar cells.

太陽電池	先導研究実施テーマ
結晶シリコン太陽電池	新型ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池 極薄型結晶シリコン太陽電池のオール ドライプロセス 極薄型擬単結晶シリコン太陽電池 極薄型多結晶シリコン太陽電池
シリコン薄膜系太陽電池	高開放電圧ヘテロ接合薄膜シリコン太陽電池 $\mu$ 波プラズマCVDによる薄膜Si太陽電池 製造技術 薄膜シリコン太陽電池の次世代 プロセス 広帯域スペクトル利用型薄膜 シリコン太陽電池
CIS、化合物系太陽電池	CIS系大粒径薄膜太陽電池 CIS系多接合薄膜太陽電池 ワイドギャップCIS系太陽電池の 高効率化技術
色素、有機薄膜系太陽電池	大面積・集積型色素増感太陽電池 光充電型色素増感太陽電池

### むすび

地球環境問題が身近な問題として顕在化し、この解決に向けた実効ある取り組みの必要性が一段と高まってきた。我が国では国民レベルの運動としてチームマイナス6%がスタートし、各分野・部門でそれぞれ具体的な取り組みが行われている。

一方で、CO<sub>2</sub>排出量削減に効果がある太陽光発電の導入が日本、ヨーロッパを中心に急拡大しており、地球環境問題を解決する一方策として期待が強まってきた。また同時に、資源エネルギー庁がエネルギー安定供給確保の一環として太陽光発電の導入促進施策を講じており、太陽光発電の将来の主要エネルギー源としての認識が高まってきた。2030年には全電力需要の10%程度を太陽光発電が占めるとの期待を込めた予測がなされている。これを実現するためには太陽光による発電コストを汎用電力並み程度まで低減させることが必要不可欠であり、太陽光発電システムの低コスト化技術開発が極めて重要である。

本特集号掲載の論文・技術解説は各太陽電池の低コスト化・高効率化技術を中心とした最近の開発成果を述べており、これらは将来の技術開発のステップとして今後の技術開発を牽引加速し、太陽光発電の普及促進の一助となることを期待するとともに、本稿が地球環境問題解決の糸口となれば幸いである。

### 参考文献

- 1) Renewable Energy Scenario to 2040 by European Renewable Energy Council (May, 2004) <http://www.erec-renewables.org/>
- 2) 小林哲三他, “太陽光発電産業自立に向けたビジョン”, 太陽電池発電協会, 第21回太陽光発電システムシンポジウム予稿集, Session 3, pp. 1-11 (2003)

- 3) “太陽光発電情報(3月分)”, (株)資源総合システム (2005)
- 4) 清水正文, “結晶系シリコン太陽電池の技術動向”, オプトニュース, No.1, pp.46-49 (2005)
- 5) 小長井誠, “結晶系太陽電池の研究開発の方向性”, 太陽光発電協会, 第22回太陽光発電システムシンポジウム予稿集, Session 2, pp. 38-47 (2005)
- 6) M. K. Nazeeruddin et al., “Engineering of Efficient Panchromatic Sensitizers for Nanocrystalline TiO<sub>2</sub>-Based Cells”, J. Am. Chem. Soc. 123, pp. 1613-1624 (2001)
- 7) N. Koide et al., “Improvement of Efficiency of Dye Sensitized Solar Cells by Reduction of Internal Resistance”, Proc. 31th IEEE/PVSC, pp. 175-176 (2005)
- 8) J. Horzel et al., “Experimental Results on The Way Toward Thin EFG Si Solar Cells in Production”, Proc. 20th EU/PVSEC, pp. 698-701 (2005)
- 9) “超薄型多結晶シリコン太陽電池の研究開発”, NEDO 平成16年度成果報告会予稿集「太陽光発電に関する技術開発及びフィールドテスト事業」, NEDO, pp. 106-113 (2005)
- 10) “2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)”, NEDO, (2004) [http://www.nedo.go.jp/informations/other/161005\\_1/gaiyou\\_e.pdf#search=PV2030](http://www.nedo.go.jp/informations/other/161005_1/gaiyou_e.pdf#search=PV2030)
- 11) “平成16年度「革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発」に係わる公募について”, NEDO, (2004) <http://www.nedo.go.jp/>  
(2005年9月27日受理)