

第 20 回欧州太陽光発電会議 (20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告

2005.6.25

山口 真史 (豊田工大)

1. 開催月日：2005年6月6日～10日。

2. 開催場所：バルセロナ国際会議場 (バルセロナ、スペイン)。

3. 本会議の概要：1年毎に開催される太陽光発電に関する欧州会議である。今回の会議の組織委員長は W. Palz(WCRE、ベルギー)、論文委員長は H. Ossenbrink(EC-JRC、イタリア)であった。今回、J. Luther(Fraunhofer ISE、ドイツ)が、Fraunhofer ISE 所長として、結晶 Si、有機化合物、有機太陽電池および TPV に関する研究業績により、Becquerel Prize を受賞した。

76 カ国から 2151 名の参加者があった。太陽光発電関連の国際会議としては、これまでの最多の参加者であり、太陽光発電に対する大きな関心と関連分野に参画する人々の増加を反映していると思われる。図 1 に、国別参加者数を示す。国別では、ドイツ 619 名、スペイン 215 名、米国 173 名、日本 115 名、フランス 103 名、オランダ 99 名、イタリア 95 名、英国 86 名、ベルギー 63 名、スイス 61 名、の順であった。

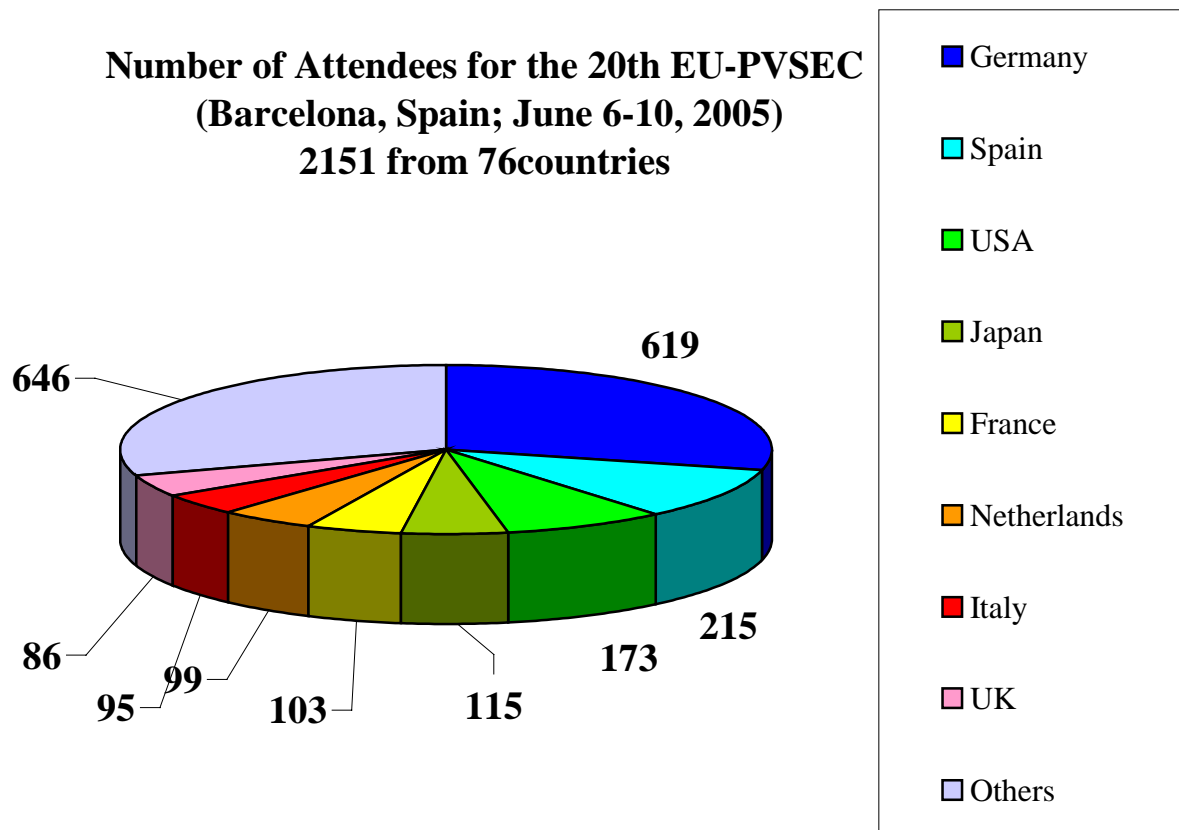


図 1 国別参加者数

各国のPVロードマップ、産業界の招待講演やワークショップが企画され、プログラム構成に関する運営側の努力の跡が現れていた。

**Number of Papers presented
at the 20th EU-PVSEC
(Barcelona, Spain; June 6-10, 2005)
1048 Papers**

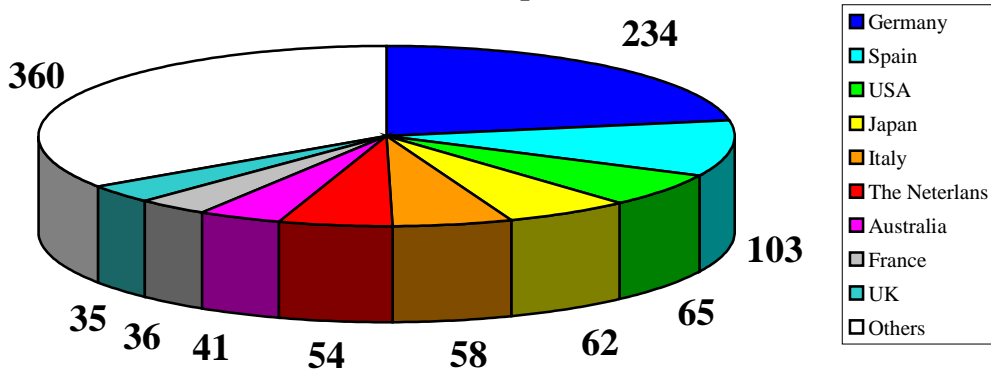


図 2 国別発表論文件数

図 2 は、国別発表論文件数を示す。1048件の論文発表があった。国別では、ドイツ234件、スペイン103件、米国65件、日本62件、イタリア58件、オランダ54件、オーストラリア41件、フランス36件、英国35件、スイス25件の順であった。

**Number of Papers presented
at the 20th EU-PVSEC
(Barcelona, Spain; June 6-10, 2005)
1048 Papers**

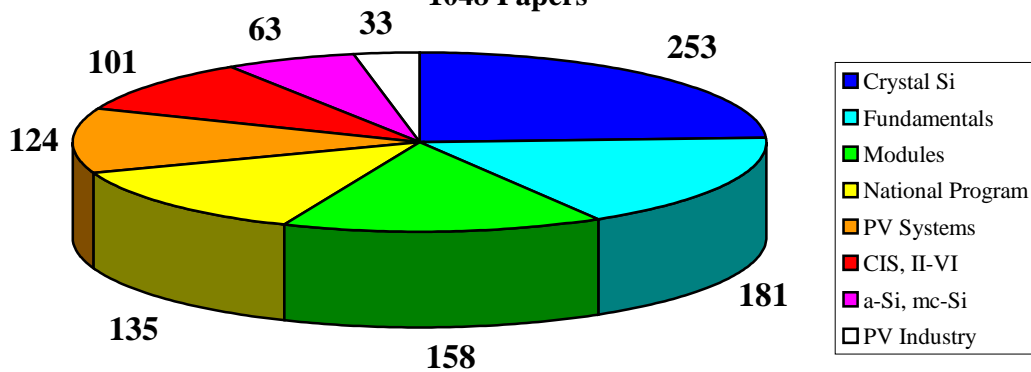


図 3 発表論文件数の分野別内訳

図3は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、結晶Si系253件、集光・宇宙を含む基礎181件、モジュール158件、国家プログラム135件、PVシステム124件、CIS及び族101件、a-Si及び微結晶Si63件、PV産業33件、の順であった。従来のEU-PVSEC会議の通り、結晶Si分野、モジュール、システムや国家プログラム関係の発表が多かった。

国別で見ると、表1に示すように、ドイツからの論文発表では、結晶Si系の論文発表が99件と圧倒的に多く、また、オーストラリアも、圧倒的に結晶Si系の論文発表が多い。スペインからの論文発表では、モジュール、システム、結晶Si、基礎と拮抗している。米国からの発表論文の中では、集光・宇宙を含む基礎が多く、結晶Si、モジュールが次いでいる。日本からの論文発表は、結晶Si関係が多く、集光を含む基礎とシステムが次いでいる。このように、国柄が現れていたが、従来、日本からは薄膜Si関係の論文発表が多かったが、今回、この分野での日本企業からの発表が少なく、残念であった。

表1 国別・分野別の発表論文件数

	Fundamen	Cryst. Si	Thin Si	CIS	Modules	System	Nt'nl Pro.	Industry	Total
Germany	29	99	11	32	18	19	15	11	234
Spain	18	19	0	3	24	22	14	3	103
USA	16	12	4	9	12	6	3	3	65
Japan	11	16	5	6	8	11	3	2	62
Italy	6	9	5	3	15	11	8	1	58
Australia	8	23	1	0	8	0	1	0	41
France	1	12	0	5	7	1	5	5	36
UK	8	2	1	3	6	7	8	0	35
Others	84	61	36	40	60	47	78	8	414
Total	181	253	63	101	158	124	135	33	1048

この他、32カ国から270社の展示があった。

次回21回EU-PVSECは、来年5月ハワイで開催される太陽光発電世界会議(WCPEC-4)としての合同会議となるが、翌月にドイツ、チェコあるいはギリシャで22回EU-PVSECを開催するとのアナウンスがあった。EU-PVSECが盛況で結構な事ではあるが、WCPEC-4や他のPV関連会議への悪影響も懸念される。

4. プログラム委員長の見る本会議のトピックス

(1) 太陽光発電は、予想以上に、急激に成長を続けている。PVの9割を占める結晶シリコンの原材料供給不安がある。新しい太陽電池級(SOG)Siの本格量産化は、2007/2008年と予想される。これらの課題を克服するために、下記の技術開発が進んでいる。

(2) 結晶Siでも、20%以上の高効率化、材料使用量の向上(40%)、歩留まり向上、薄型化、リボン成長、SLIVER、帯域溶融、などの技術開発が進んでいる。

(3) 集光式太陽光発電技術も急激に進展している。商用化の動向に加え、新しい高効率概念の道を提供しているし、標準化も進みつつある。

(4) 薄膜もせがまれている。Wuerth SolarによるCISモジュール年産15MW(2007年)のアナウンス、UNAXISやカネカのa-Si、など多くの商用化やパイロット生産の動きがある。

(5) ドイツ市場は成長率を維持している。産業界は、確固とした位置を形成しつつある。PVは経済成長や雇用拡大を提供しよう。スペイン、ギリシャ、カリフォルニア、中国など、新たな市場が開発されつつある。

(6) サイドイベントとして、アーキテクチャ、発展途上国、政策・戦略、新太陽電池概念、に関するフォーラムが開催された。図4には、上記新太陽電池概念のフォーラムとして開催されたFULLSPECTRUMプロジェクトの組織構成を示す。ECの5年間プロジェクト(2003年11月~2008年10月)で、総予算8.3百万ユーロで、A. Luque(マドリード工大)がリーダーとなり、高効率多接合、集光型、新概念や有機太陽電池の研究を進めている。

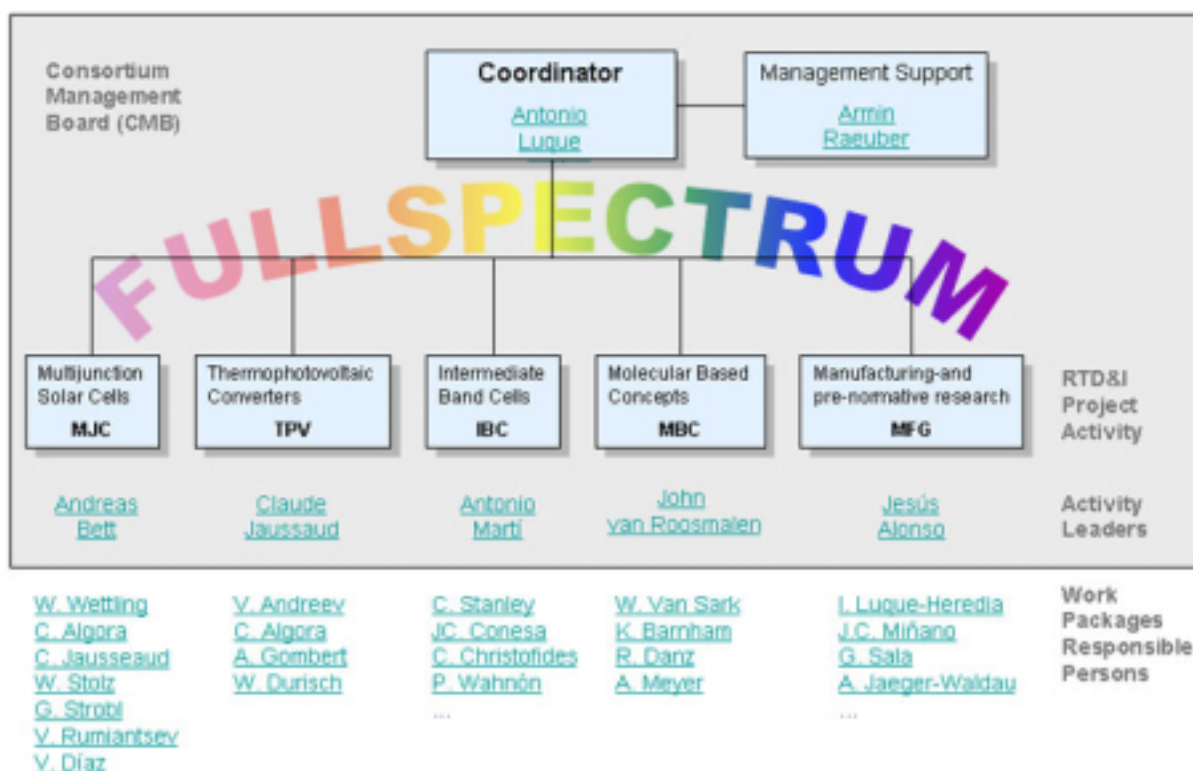


図4 FULLSPECTRUMプロジェクトの組織構成

5 . 結晶 Si 太陽電池分野の主な発表論文の概要

プログラム委員長のまとめた今回の会議のハイライトは、結晶SiのShortageの課題の解決に向けた取り組みがある。結晶Si太陽電池分野においては、結晶Si太陽電池の高効率化、薄型化に加え、太陽電池級Siの量産化の動向にある。

(1) J. Poortmansら (IMEC) は、 “ Photovoltaic and Microelectronics: Going Their Own Way or Still Cross-Fertilizing (2CP.1.1) ” と題して、マイクロエレクトロニクスとPVの関係を論じている。2004年のマイクロエレクトロニクスの売り上げ収入、研究開発投資額は、各々、約2000億ドル、200億ドルで、PVとしては、その恩恵に浴している面もあり、非常に参考になる。過去には、PERL (passivated emitter, rear local) セルなどは、マイクロエレクトロニクスの知識が役に立っているし、マイクロエレクトロニクス用に開発された種々のプロセス技術・装置や分析装置もPVで活用されてきた。現在も、マイクロエレクトロニクスは、結晶Siが相変わらず主流で、PVと似ている。

表2に、マイクロエレクトロニクスの主要項目の現在と今後の方向を示す。ゲート絶縁材料は、バルク結晶Siの動向に対応しているし、例えば、Atomic Layer DepositionによるAl₂O₃膜などは、将来の薄型セルの表・裏面パッシベーションとして期待される。層間絶縁膜は、薄膜結晶Siに対応している。例えば、セラミックス基板上のAl 援用結晶化プロセスなども期待される。表にはないが、先端デバイス (Ge-on-Si集積、Siナノ結晶、共鳴トンネルデバイス) や先端装置技術 (高温エピ、薄型基板技術) の今後の動向は参考になる。将来的には、高スループットのエピ成長装置や多結晶Si堆積装置、CO₂ベースのクリーニング・表面修飾技術などの適用の可能性もある。論文は、www.imec.be/wwwinter/energy/publications2005.shtmlで入手できる。

表2 マイクロエレクトロニクスの主要項目の現在と今後の方向

Device part	Challenge	Traditional material	New materials/devices
Gate dielectricum	Increasing gate capacitance without further increase of gate leakage	SiO ₂	High-k dielectrics
Intermetal dielectricum	Reducing intermetal capacitance to reduce propagation loss (RC-constant of the interconnections)	SiO ₂ , Si ₃ N ₄	Low-k dielectrics
Interconnects	Reducing interconnect resistance (RC-constant of the interconnections)	Al	Cu
Semiconductor	Increasing drive current of the transistor	Si	Strained Si, unstrained and strained Ge

Table 1: Schematic overview of the main changes on the level of material set for CMOS-devices

(2) W.C. Sinke (ECN) は、 “ The CRYSTALCLEAR Integrated Project: Next Generation Crystalline Silicon Technology from Lab to Production (2E.1.5) ” と題して、ECの産学連携コンソシアム “ CRYSTALCLEAR ” プロジェクトの概要を述べた。BP Solar、DeutscheCell、Deutsche Solar、Isotofon、Photowatt、REC、Scanwafer、Shell Solar、RWE Schott Solar の9社とECN、CNRS、Fraunhofer ISE、IMEC、Univ. Konstanz、UPM、Univ. Utrechtの7大学・機関から成り、W.C. Sinke (ECN) がリーダーである。基礎的研究から技術開発に及び、Si原料問題の解決、実用モジュール効率の向上 (13.5% 16%、2010年)、モジュールコ

スト低減（1.7\$ / W、累積モジュール出荷時10GW時）を目指す。図5に示すように、7つの技術開発テーマに関して、概略と現状が述べられた。2004年1月から2008年末までのプロジェクトで、5年間の予算総額は28百万ユーロで、ECから16百万ユーロ、残りはパートナーから提供される。情報は、www.ipcrystalclear.infoで、また、論文は、www.ecn.nl/library/conf/conf2005.htmlで、入手できる。

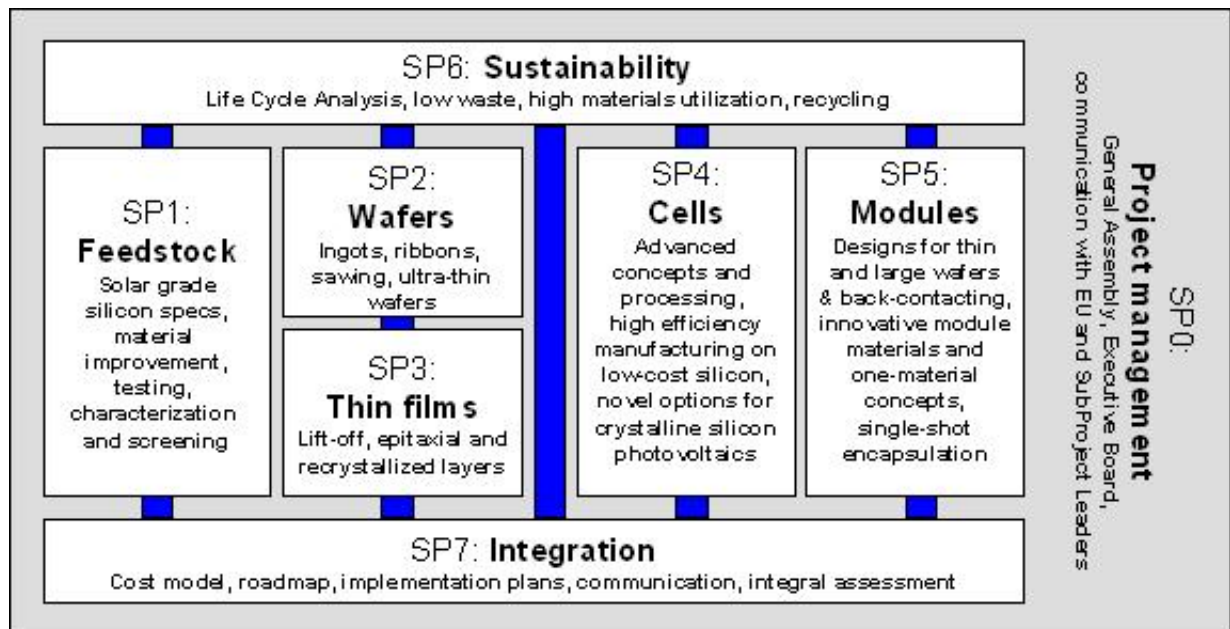


図5 CRYSTALCLEARプロジェクトの概要

(3) D. Weidhausら (Wacker-Chemie) は、“Pilot Production of Granular Polysilicon from Trichlorosilane by Using a Fluidized Bed-Type Reactor (2CP.1.2)”と題して、太陽電池級Siの量産技術開発について報告した。

原料にトリクロロシランを用い流動床法による年産100トンの太陽電池級Siのパイロットプラントを建設し、2004年10月から150トン程度生産している。平均径720 μ mの粒状で、抵抗率1~10 cm、少数キャリア寿命7~10 μ sのインゴットも試作している。年産数1000トン級の商業プラントについては、2006年着工し、2007年完成、2008年からの本格量産化を計画している。

日本でも、今回発表はなかったが、トクヤマが年産200トンの太陽電池級多結晶Siの実証プラント建設に着手している。プロセスとしては、原料にトリクロロシランを用い、筒状の反応容器内でガスから直接液状のSiを析出する溶融析出 (VLD; Vapor to Liquid Deposition) 法を採用しており、従来の方法に比べて析出速度が速く、低コストで多結晶Siを製造できる見込みであるとの事である。投資額は約30億円で、2005年度末に完成予定で、2006年度からサンプル出荷する予定である。実証が順調に行けば、年産数1000トン規模の商業プラント建設も視野に入れているとの事で、期待が大きい。

(4) R.W. Swanson (SunPower) は、“How Close to the 29% Limit Efficiency Can Commercial Silicon Solar Cells Become? (2EP.1.1)”と題して、結晶Si太陽電池理論変換効率の再検討について報告した。

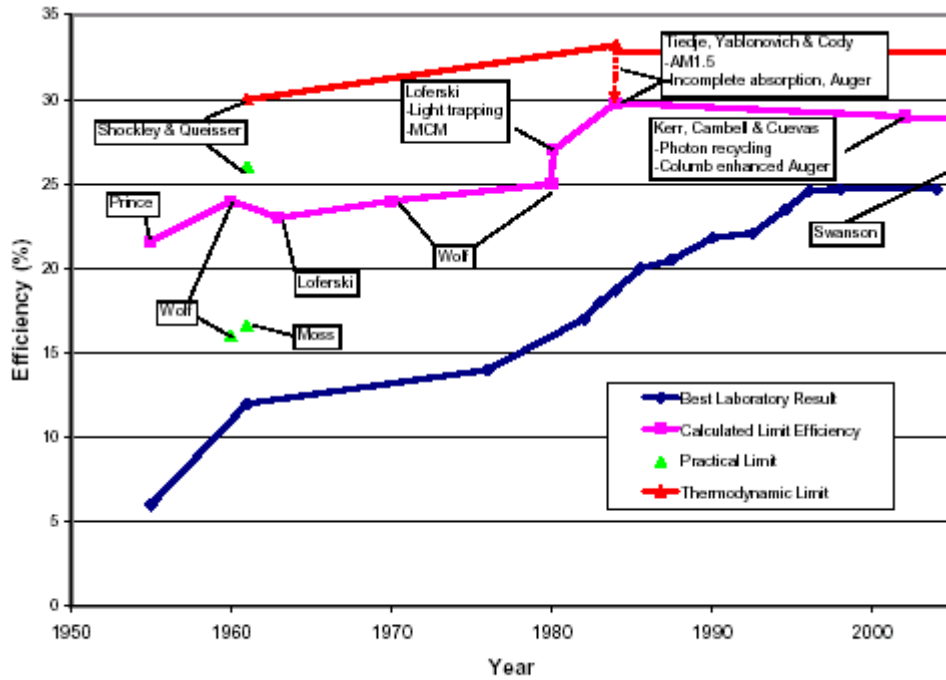


Figure 1. Progress in calculated limit efficiencies. (AM0 efficiencies have been adjusted to AM1 by adding 10% relative.)

図 6 結晶 Si 太陽電池の限界効率計算結果と実績値の変遷

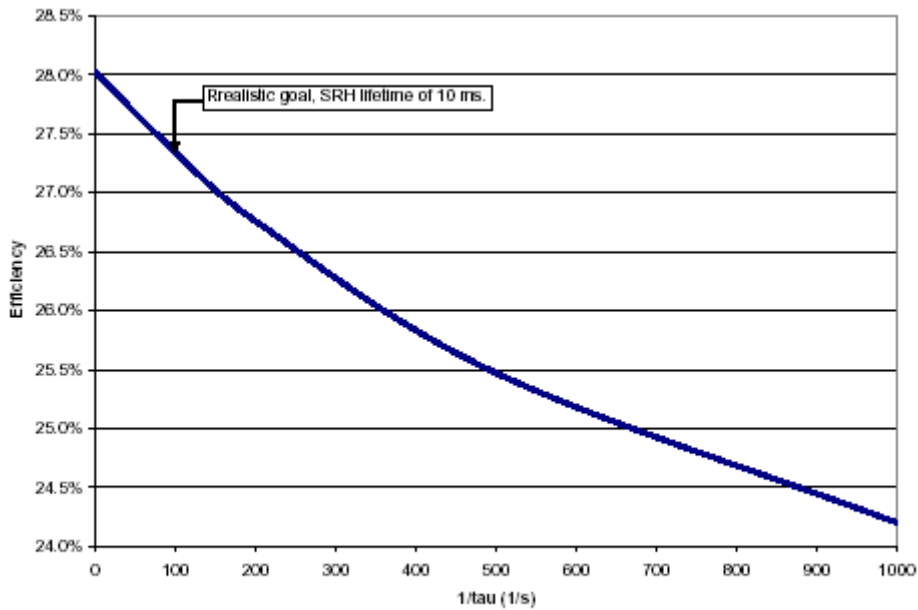


Figure 2. Impact of defect mediated bulk recombination on limit efficiency.

図 7 結晶Si太陽電池の変換効率に及ぼすバルク再結合の効果

図 6 には、結晶 Si 太陽電池の限界効率計算結果と実績値の変遷を示す。Shockley と Queisser によれば、結晶 Si 太陽電池において、逆方向飽和電流は、 $J_0 = 0.27 \text{ fA/cm}^2$ で、

$V_{oc} = 0.845V$ となり、理論限界効率は 32.7%と試算されていた。今回、Swanson は、オージェ再結合を考慮した結晶 Si 太陽電池の最大理論効率は 28.9%であり、最適なウェハ厚は $80\mu\text{m}$ であるとの報告をおこなった。実際のセルにおける損失要因は、光学損失、バルク再結合、表面パッシベーション、電極形成等がある。放射再結合だけを考えると、放射再結合割合は $R_{rad} = Bpn$ で、Si の放射再結合確率 $B = 9.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 / \text{sec}$ として、放射再結合電流は、 $J_{rad} = qKWR_{rad}$ で与えられる。図 7 には、結晶 Si 太陽電池の変換効率に及ぼすバルク再結合の効果を示す。バルク再結合を考慮すると、現実的なゴールは、少数キャリア寿命 10ms で、効率 27.3%程度であろう。

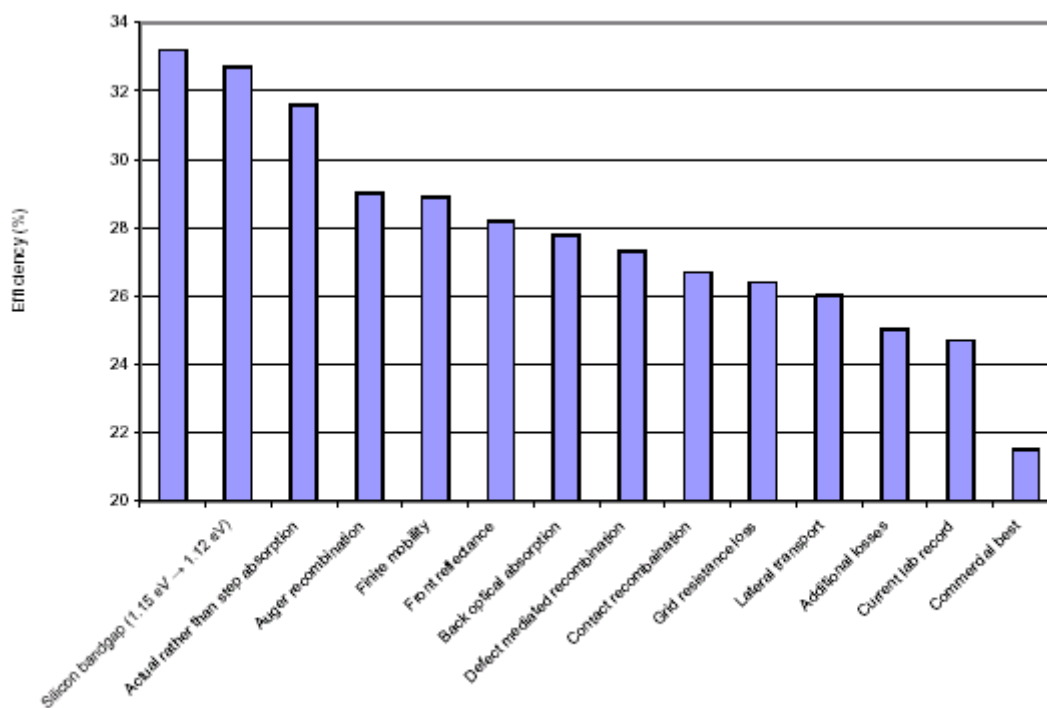


Figure 4. The loss waterfall in going from the thermodynamic limit to future practical cells.

図 8 種々の損失要因を考慮した場合の結晶Si太陽電池の効率低下

表面再結合電流は、逆方向飽和電流 J_0 と pn の積で決まり、次式で与えられる。

$$J_{rec} = J_0 \left(\frac{pn}{n_i^2} - 1 \right)$$

浅い接合と高品質な熱酸化膜でパッシベーションした従来のセル構造では、 J_0 は 20 fA/cm^2 以上であり、最大変換効率は 25%に留まる。通常はさらに電極を形成する必要がある

り、 J_0 はより大きな値となる。図8には、種々の損失要因を考慮した場合の結晶Si太陽電池の効率低下を示す。一方、HITセルでは電極付きで $J_0 = 18 \text{ fA/cm}^2$ 程度であり、25%以上の効率が期待できる。また、 J_0 を小さく抑えられる材料としてa-Siやpoly-Si、a-SiC、さらにはInPなどとのヘテロ接合などが期待されるとしている。これらの改良により、実用効率26%が期待できるとしている。

この他、主要な結晶Si太陽電池メーカーにおいて、当面の目標である1GW/年の生産能力に向けて設備の拡張が進んでいる。表3には、結晶Si太陽電池モジュールの生産状況および計画を示す。

表3 結晶Si太陽電池モジュールの生産状況および計画(MW)(PV News等より)

	2004	2005 -plan
Sharp	324.0	450
Kyocera	105.0	150 170
BP Solar Gr.	85.8	105
Mitsubishi	75.0	100
Q-Cells	75.0	140 170
Shell Gr.	72.0	90
Sanyo	65.0	120
RWE Gr.	65.0	95
Isofoton	53.3	
MOTECH	35.0	85

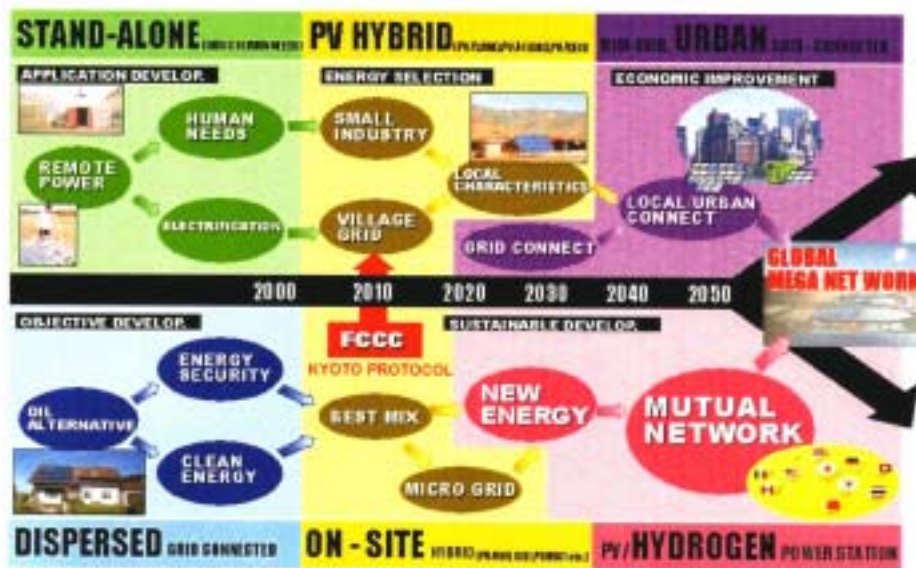


Figure 8 : Kyocera PV Dream Innovation

図9 京セラの今後の展開

PV工業界のプレーナリ講演として、I. Yukawaら(京セラ)は、“Our Solar Power Spirit-Solar Innovation (8BP.2.1)”と題して、京セラの展開の現状と今後について報告した。図9には、京セラの今後の展開を示す。

また、大面積・高効率セルとして注目すべき成果としては、量産レベルの高効率(20.5%) CZ-Si太陽電池があり、K. Nakamuraら(シャープ)は、“Development of 20% Efficiency

Mass Production Si Solar Cells (2D0.2.4)”と題して報告した。単結晶 Si 太陽電池の高効率化と低コスト化を狙って、図 1 2 に示す n 型ベースの裏面コンタクトセルを検討している。数値計算から、表面再結合速度、裏面再結合速度として、各々、10cm/s 以下、100cm/s 以下が必要であり、表・裏面パッシベーション効果が検討された。n 型ウエハの表面パッシベーションについては、SiNx 単層が SiO₂/SiNx 2 層構造よりも良く、図 1 0 に示すように、高屈折率 n の SiNx 膜がパッシベーション効果に優れている。しかし、高 n SiNx 膜は、短波長領域での光吸収の問題がある。そこで、低反射損失の低 n SiNx 膜と深さ方向に n を変化させ、Si 表面が低表面再結合速度となるように高 n SiNx とした二重層(DL)SiNx 構造として、セル効率の改善をはかっている。裏面パッシベーションについても、種々のパッシベーション膜が検討されたが、図 1 1 に示すように、p⁺表面パッシベーションに関しては、低温熱酸化(TO)SiO₂/常圧 CVD(APCVD)SiO₂ の 2 層 (DL) SiO₂ 構造が最も良い結果が得られた。SiNx 中の固定電荷が、p⁺表面での再結合を増加させることが考えられる。Cz 成長 n 型単結晶基板を用い、95mm x 95mm の裏面コンタクトセル(図 1 2)において、表 4 に示すように、効率 20.5% が実現している。今回は、フォトリソと蒸着を裏面コンタクト形成に用いたが、量産技術の確立に向け、スクリーン印刷によるコンタクト形成も検討され、低焼成温度化に適した新しい Ag ペーストを開発し、効率 19.3% が得られており、現用太陽電池と同様のコストで量産レベルでの効率 20% が実現できるだろうと述べた。

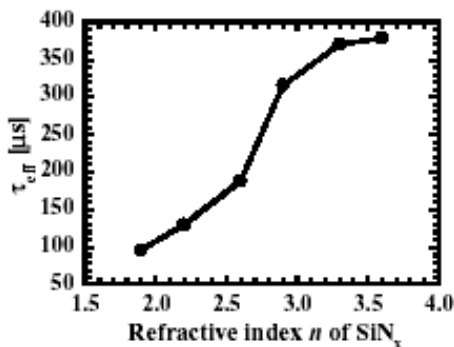


Figure 5: Effective lifetime of Cz wafer with SLSiN as a function of refractive index n of SLSiN

図 1 0 CZ 成長 n 型 Si ウエハの実効ライフタイムに及ぼす SiNx 膜の屈折率 n の効果

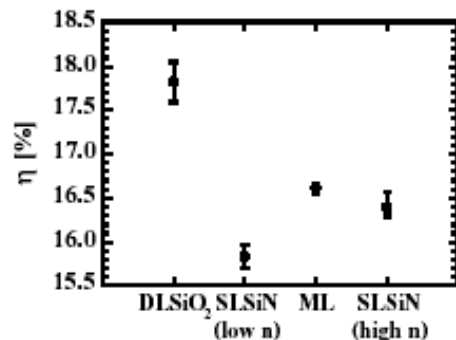


Figure 7: Conversion efficiencies of solar cells which rear surface are passivated with DL SiO₂, SLSiN (low n), ML and SLSiN (high n).

図 1 1 各種裏面パッシベーション膜のセル効率に及ぼす影響

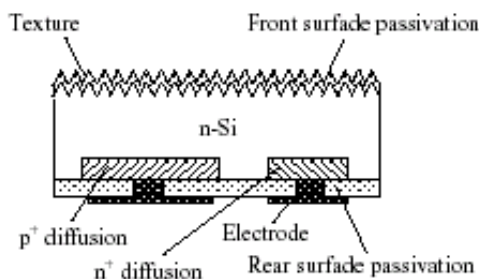


Figure 1: Schematic configuration of Si solar cell

図 1 2 裏面コンタクト単結晶 Si 太陽電池の構造

表 4 効率 20.5% の太陽電池特性

Table IV: PV performances of 20.5 % efficiency solar cell.

Area(cm ²)	Jsc(mA/cm ²)	Voc(V)	F.F.	η(%)
90.25	39.5	0.651	0.796	20.5

Note: Cell Dimensions: 95mm x 95mm x 200μm thick
Measured at AM1.5G, 100mW/cm², 25°C

Ga ドープ基板やn型基板に関する発表もあった。n型基板の単結晶 Si 太陽電池については、Shell Solar から、面積 148.9 cm^2 セルで、効率 17.4%の報告があった。n型ベースは、光劣化が少ないとか、高Lの特長があり、50GW製造も可能としているが、B拡散が課題で、深いエミッターになるようである。UNSW から、FZ成長n型 Si 基板を用い、面積 22 cm^2 の Rear Emitter PERT セルで、効率 22.3%を実現している。

Origin Energy は、オーストラリア国立大発明の SLIVER Si セルモジュールの製造に向けた技術開発の状況を報告した。SLIVER セルは、厚さ $50 \mu\text{m} \times 1 \sim 2 \text{ mm}$ の短冊状であり、Si 原料の使用量を最大 90%削減でき、フレキシブルで光透過可能なモジュールが製作できるとしている。 0.77 cm^2 の小面積セルで効率 19.1%、温度係数は $0.31\% / \text{ }^\circ\text{C}$ と低いとの事である。 104 cm^2 モジュールで効率 17.7%が得られている。10Wや40Wモジュールも試作しているとの事で、生産能力 5 MWの向上を建設しており、10Wタイプを出荷予定である。将来、30MW生産を目指すとの事である。

さらに、p型 HIT、薄型化、パッシベーションやゲッタリングに関する基礎的検討、非接触法を含むプロセスのモニタリングや評価の技術が進展、フォトルミネッセンス(PL)や可視化技術によるライフタイム、再結合速度、反射率の評価、など、幅広い研究開発が進められている。

また、結晶 Si 系に関する将来指向の研究例として、M.A. Green ら (UNSW) による “All-Silicon Tandem Cells Based on “Artificial” Semiconductor Synthesised Using Silicon Quantum Dots in a Dielectric Matrix (1AP.1.1)” がある。図 1 3 に示すように、非化学量論的組成の SiO 、 SiN 、 SiC などから Si の量子ドット (QD) を形成し、Si 系の 3 接合タンデムセルを作ろうとするものである。図 1 4 に示すように、QD からのフォトルミネッセンスにおいて、量子サイズ効果が確認されているが、電気的特性面では、移動度等が測定されている段階である。

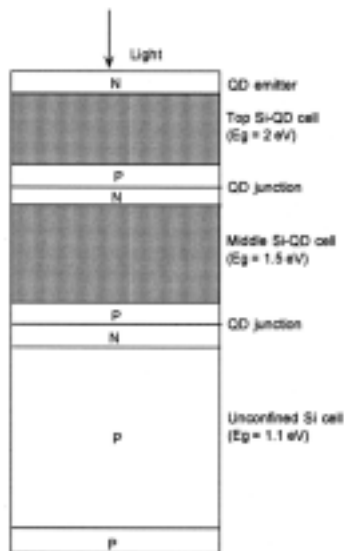


Figure 3: All-silicon 3-cell tandem stack based on silicon quantum dots.

図 1 3 量子ドット (QD) を用いた Si 系 3 接合タンデムセルの構造

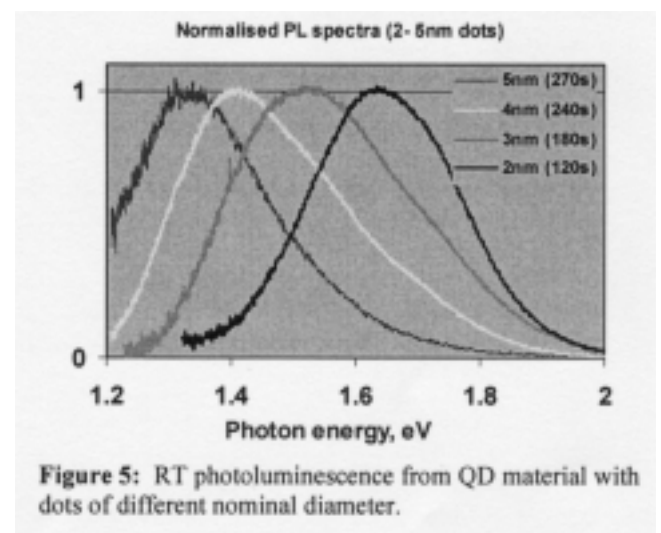


Figure 5: RT photoluminescence from QD material with dots of different nominal diameter.

図 1 4 量子ドット (QD) からの室温フォトルミネッセンス

6 . 薄膜太陽電池分野の主な発表論文の概要

10年前のシナリオでは、薄膜太陽電池の生産量が、今年あたり、結晶Si太陽電池と同等になることが試算されていたが10%にも満たない。しかし、薄膜系も増産の方向にある。表5に、薄膜電池モジュールの生産状況および計画を示す。また、ここに来て、結晶Si太陽電池生産量の急激な伸びに伴う原料Siの供給不安があり、薄膜系に大きな期待が寄せられている。課題は、高効率化、低コスト化、高信頼度化にある。本会議でも、これらの課題克服に向けた検討結果が報告された。

表5 薄膜電池モジュールの生産状況および計画 (MW) (PV News等より)

	Cells	2003	2004	2005	2006	2007
United Solar	a-Si 3-J		17	25	50	
KANEKA	a-Si/μc-Si	20	20	20	30	
Mitsubishi Heavy Ind.	a-Si	10	10	10	30	
Shell Solar	CIGS					
Wuerth Solar	CIGS		1	1.5		15
First Solar	CdTe	2	6	20	40	75

(1) B. Rech(Forschungszentrum Julich) ” は、 Overview on Thin Film Silicon Photovoltaics (3BP.1.1) ” と題して、薄膜Si太陽電池に関する総合報告を行った。低温成長 (< 200)、低コスト基板使用。低材料消費、フレキシブル性の可能性、等の特徴を有しながら、2004年の生産量は約50MWである。カネカは30MWへ、United Solarは50MWへと、増産のアナウンスがあった。大面積化と堆積速度の高速化の方向にある。現状の最高効率は、United Solarのa-Si₃接合タンデム小面積 (0.25 cm²) セルの初期効率14.6%、安定化効率13%である。カネカは、3825 cm²のa-Si/μc-Siタンデムセルの大面積モジュールで初期効率13.1%、14.23m²のミニモジュールで、安定化効率11.7%を得ている。今後は、大面積モジュールで14%以上の安定化効率を目指して、研究開発の強化が必要であろう。光トラッピングの導入や光劣化の低減などが課題である。

大面積化については、30 x 30 cm²から 1 m²への流れにある。J. Meierら (Uniaxis SPTec)は、” Microcrystalline Silicon Single-Junction and “ Micromorph ” Tandem Solar Cells Prepared in UNIAXIS KAI PECVD Single-Chamber Reactors (3BP.1.5) ” と題して、薄膜Si太陽電池用堆積装置の大型化について、報告した。Uniaxisは、薄膜トランジスタ用大型プラズマCVD薄膜Si堆積装置を開発している。薄膜Si太陽電池のコスト低減には装置コストの大幅な低減が必要で、シングルチャンバの成膜装置の開発に力を入れており、今回、125 cm x 110 cm用プラズマCVD装置を開発した。a-Siやμc-Si薄膜太陽電池の試作結果を報告し、薄膜Si大型堆積装置の有効性を示し、薄膜太陽電池の商業化を後押ししている。図15に示すように、1.25 x 1.1m²の大面積a-Si単接合太陽電池モジュールで、効率の7.3%を実現している。Sharpは、短パルスVHFプラズマCVD法による56 cm x 92.5 cmのa-Si/μc-Siタンデムセルで、初期効率12.14% (安定化効率11%) を得ている。

T. Matsuiら(産総研)は、” Improved Spectral Response of Silicon Thin Film Solar Cells by TiO₂-ZnO Antireflection Inter-Bilayer at TC0/Si Interface (3BP.1.3) ” と

題して、高速薄膜堆積下で作製したa-Siおよび μ c-Si単接合薄膜太陽電池の特性に及ぼす TiO_2 および TiO_2 -ZnOのAR層に関する検討結果を報告した。表6に示すように、AR層の導入により特性改善がはかられ、小面積(0.25 cm^2)ながら、a-Si単接合太陽電池で安定化効率9.24%、成膜速度2.3nm/sの μ c-Si薄膜太陽電池で安定化効率9.13%と、この系でのこれまでの最高値を得ている。

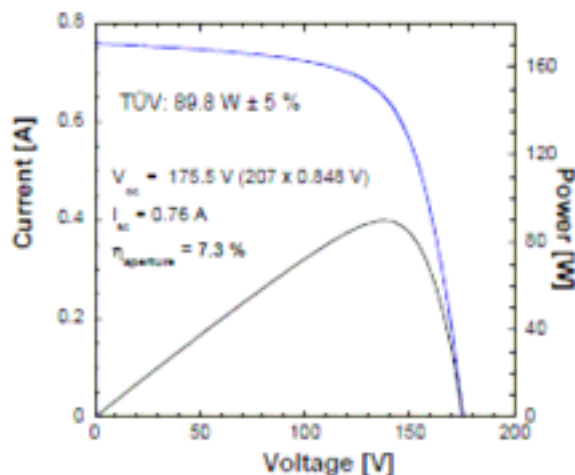


Fig. 10: First industrial size a-Si:H p-i-n module of UNAXIS prepared on AFG front-TCO. The module is fabricated in a KAI-1 1200 system of 1.25x1.1 m^2 area at a deposition rate of 3 $\text{\AA}/\text{sec}$ for the i-layer. The AM1.5 I-V characteristics were independently confirmed by TÜV Rheinland. The module consists of 207 segments of 5 mm width.

図 1 5 1.25 x 1.1 m^2 の大面積a-Si単接合太陽電池モジュールのI - V特性

表 6 TCO/Si界面へのAR層導入によるa-Si、 μ c-Si単接合薄膜太陽電池の特性への影響

Table I. *J-V* parameters of a-Si:H and μ c-Si:H single junction solar cells with different AR structures at the TCO/Si interface.

Absorber layer	AR-layer	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
a-Si:H* (0.3 μm)	no AR	15.1	0.938	0.710	10.0
	TiO_2	15.7	0.933	0.700	10.3
	TiO_2 -ZnO	16.0	0.938	0.692	10.4
μ c-Si:H** (2.3 μm)	no AR	21.8	0.512	0.675	7.54
	TiO_2	22.1	0.515	0.697	7.96
	TiO_2 -ZnO	23.8	0.518	0.687	8.48

* Annealed states (not light soaked)

** Prepared under a high-rate condition (>2 nm/s)

(2) M. Powallaら(ZSW)は、" CIS Thin-Film Solar Modules an Example for Progress in PV (4CP.2.1) "と題して、Stuttgart大およびZSWでのCIGS薄膜太陽電池の基礎技術開発を経て、1999年以降のWuerth Solarでのパイロット生産および本格生産の状況を報告した。図16に、ZSWでおよびWuerth Solarにおける0.07 m^2 および0.7 m^2 モジュールの変換効率の進展を示す。年次経過と共に、効率向上がはかられている。60 cm x 120 cm のCIGS太陽電池モジュールの最高効率は、図17に示すように、13.0%であり、85Wモジュールに相当する。2004年には、1.3MW/年の生産能力を有し、モジュール2万枚を製造し、売り上げ390万ユーロで、2007年に年産15MWの計画である。

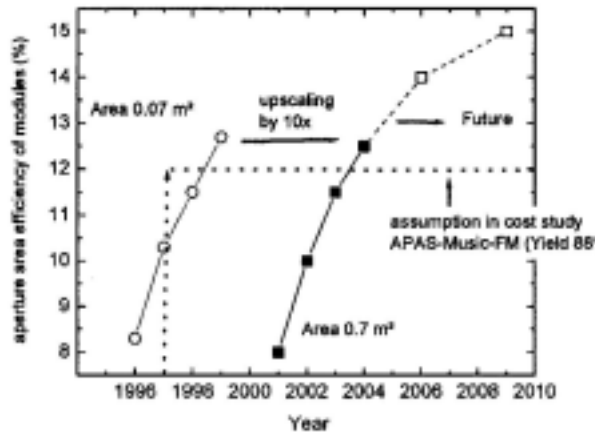


Figure 1: Efficiency road map of average aperture-area efficiencies for 0.07 m² ZSW modules and for standard 0.7 m² modules from the Wuerth Solar pilot production line, including values expected in the future.

図 1 6 ZSW であり Wuerth Solar における 0.07 m² および 0.7 m² モジュールの変換効率の進展

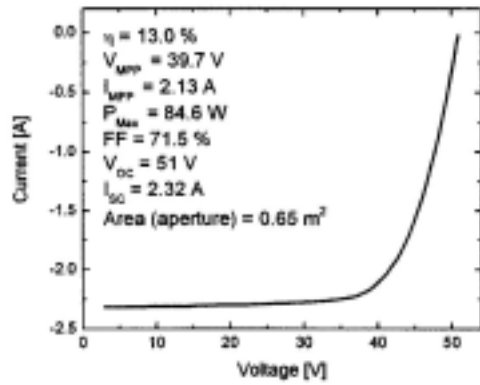


Figure 12: IV characteristic of the current champion 60 cm x 120 cm CIGS module from Wuerth Solar with 13.0 % efficiency.

図 1 7 60 c m x 120 c m の C I G S 太陽電池モジュールの最高効率

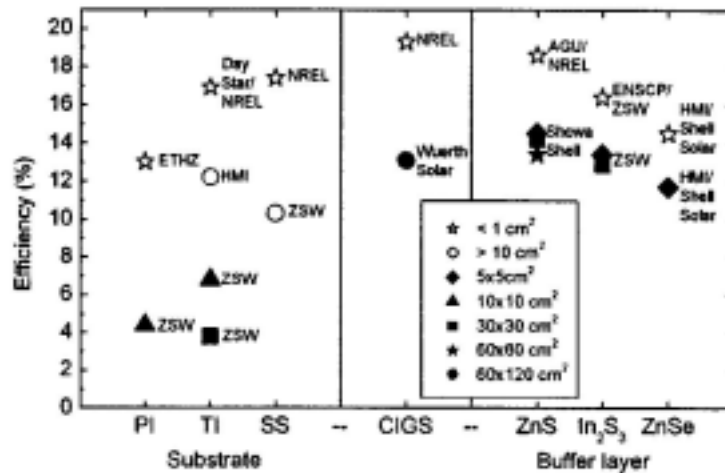


Figure 8: Overview of record cells (open symbols) and modules (closed symbols) on either flexible substrates (polyimide PI, titanium, stainless steel SS) or with a Cd-free buffer layer, compared with the highest, standard efficiencies on glass with a CdS buffer.

図 1 8 C I G S 太陽電池、モジュール効率と各種バッファ層、フレキシブル基板

Shell Solarは、1998年からCIGSモジュール生産を開始している。60 cm x 90 cm モジュールで、平均効率12.5%、ベスト13.1%を得ている。屋外での信頼性試験がなされ、1000時間後に、効率が11.5%から10.7%に低下しているものもあり、低下原因の解明と改善が

必要である。NRELでは、小面積セル(0.41 c m²)で19.5%の最高効率を得ている。今回発表はなかったが、大面積モジュール(3459 c m²)の最高効率は、昭和シェル石油の13.4%である。この他、図18に示すように、各種活性層材料、各種バッファ層材料、フレキシブル基板などに関する発表もあった。

今回発表はなかったが、CdTe太陽電池モジュールに関しては、First Solarが2004年には6MWの生産を行い、2005年には25MWへ増産する計画である。

7. Ⅲ族化合物太陽電池および集光型太陽電池分野の主な発表論文の概要

大規模太陽光発電システムの需要増加や原料Siの供給不安の解消に関連して、集光式太陽光発電への関心の高まりと技術進展が今回の会議のトピックスの一つであった。今回、

Ⅲ族化合物太陽電池、集光、宇宙の分野に関連して、発表された論文の分類をまとめて表7に示す。これらの分野で100件の発表があったが、集光技術関係が、約50件であった。

表7 Ⅲ族セル、集光技術、宇宙用セルと分類される発表論文

	III-V	Space	Conc. III-V Cell	Conc. Si Cell	Modules	System	Total
Germany	8	1	1	0	4	1	15
USA	5	3	4	1	0	2	15
Spain	3	1	1	3	1	5	14
Italy	0	0	3	2	1	5	11
Japan	3	3	1	0	2	1	10
UK	4	0	1	0	0	2	7
Others	14	4	3	0	2	5	28
Total	37	12	14	6	10	21	100

(1) K. Araki ら(大同特殊鋼、大同メタル他)に代わり、H.S. Lee(豊田工大)が、"A 550X Concentrator System with Dome-Shaped Fresnel Lenses Reliability and Cost (5D0.7.5)"と題して、NEDOプロジェクトで行われた集光型高効率InGaP/InGaAs/Ge 3 接合太陽電池モジュールの技術開発の成果を報告した。今回の成果は、要素技術としてのトンネル接合および電極設計による高集光用InGaP/InGaAs/Ge 3 接合セルの開発、高集光用、注入モールド法による低コストドーム型1次フレネル光学レンズの開発、光強度の均一化と色収差の補正に有効な2次光学レンズ(ホモジナイザー)の開発、高集光下での温度上昇の抑制をはかった良熱伝導性エポキシシートの開発、等の研究開発によるものである。前回は、図19に示す400倍集光を報告したが、今回は、550倍集光モジュールを報告した。図19には、550倍集光モジュールも示す。

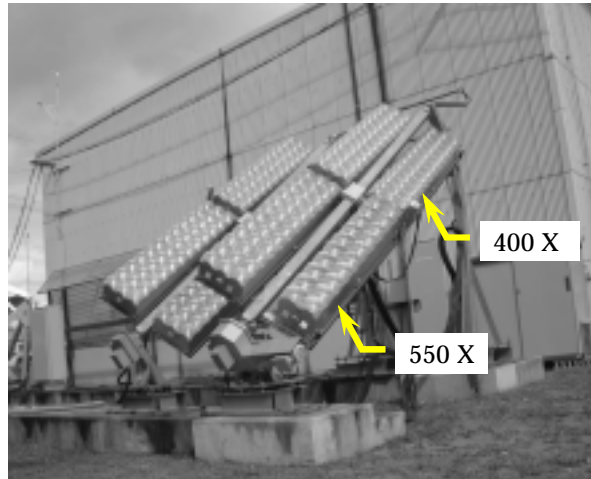


Figure 1: 550 X and 400 X modules on two-axis trackers using open-loop control. The bottom right module with two lines of lenses is a 550 X 150 W module. The remainder are 400 X 200 W modules. The overall system rating is 1550 W.

図 1 9 550倍および400倍大面積 InGaP/ InGaAs/Ge 3 接合セルモジュール (5445、7056cm²)

表 8 400倍および550倍集光モジュールの評価結果

Table. 1 Uncorrected peak efficiency measurement

Concentration	Area cm ²	Site	Ambient	Uncorrected Efficiency	DNI W/m ²
400 X	7,056	Inuyama, Japan Manufacturer	29 C	27.6 %	810
400 X	7,056	Toyohashi, Japan Independent	7 C	25.9 %	645
400 X	1,176	Fraunhofer ISE, Germany Independent	19 C	27.4 %	839
400 X	1,176	NREL, USA Independent	29 C	24.9 %	940
550 X	5,445	Inuyama, Japan Manufacturer	33 C	28.9 %	741
550 X	5,445	Toyohashi, Japan Independent	28 C	27 %	777

セルレベルでは、38.9% (498倍集光) の高効率 3 接合セルを実現すると共に、表 8 に示すように、400倍集光モジュールで効率27~28%、550倍集光モジュールで効率29~31.5%を実現している。400倍および550倍の高効率集光型多接合セルモジュールをFaunhofer ISE、NRELと豊橋技科大で性能評価された結果も報告された。表 8 に、3 機関による集光モジュールの効率測定結果を示す。温度補正なしで、400倍集光モジュールで27.4%、550倍集光モジュールで28.9%の効率が得られている。また、Fraunhofer ISEとNRELでの評価でも、本モジュールの高性能が確認されている。集光型 3 接合セルモジュールの実証試験もなされ、平板型モジュールに比べて 2 倍の発電性能が実証されている。今回は、さらに、集光型 3 接合セルおよびモジュールの信頼性試験がなされ、20年を超える高信頼度が予測

されている。表9には、NEDOプロジェクトにおける集光型3接合セルおよびモジュールの技術開発の成果をまとめて示す。2006年3月末までに、セル効率の向上(38.9% 40%)、1次光学レンズの光学効率の向上(85.8% 91%)等により、モジュール効率31%以上を目指している。これらの成果は、www.syracuse-pv.webhop.orgで見ることができる。

表9 NEDOプロジェクトにおける集光型3接合セルおよびモジュールの技術開発の成果
Table 2: Achievement by NEDO CPV project
(2001-2003 R&D, 2004 Evaluation; 3 companies and 5 Universities)

Cell	Performance: > 37 % at 500 X
	Grid optimization for high concentration
	New tunnel junction for higher current density
Lens	Performance: 86.2 % at 550 X
	Dome-shaped Fresnel lens by injection molding
	37 yrs material lifetime by acceralation test
Module	Perfromance: 31.5±1.7 % (correction: 25 C cell), 28.9 % (Uncorrected)
	New technologies: Kaleidoscope homogenizer, passive cooling by epoxy lamination etc.,
	20 yrs. lifetime against concentrated sunlight
Tracker	Open-loop tracker, 20 yrs maintenance-free
System	One year field test: 1.6 times more energy than mc-Si PV even in cloudy Japan.

今回は、集光型太陽電池モジュールやシステムの製造販売の動きも話題となった。Fraunhofer ISEからスピン・オフして、Concentrix Solar社が設立されている。



Figure 6. FLATCON[®] module developed by Fraunhofer ISE: A one-stage Fresnel lens concentrator with 500x geometric gain. It is under industrial promotion by Concentrix Solar GmbH.

図20 FLATCONモジュールの概観

(2) A.W. Bettら (Fraunhofer ISE) は、“FLATCON Concentrator PV-Technology Ready for the Market (1C0.4.5)”と題して、

(3) J. Lutherら (Fraunhofer ISE) は、“Concentrating Photovoltaics for Highest Efficiencies and Cost Reduction (5DP.1.4)”と題して、

Fraunhofer ISEにおける研究開発の成果、Concentrix Solar社の今後の展開および集光式太陽光発電システムの展望について報告した。Fraunhofer ISEでは、高効率 - 族2接合セルとフレネルレンズを組み合わせたFLATCON (Fresnel Lens All-glass Tandem cell CONcentrator)モジュール(図20)が開発されている、コスト試算によれば、500倍集光で変換効率30%以上の実現が目標となる。従って、多接合セルに注力している。理論的には、2接合セルでは、GaAs/GaSbのメカニカル・スタックセルで高効率が期待できる。LPE成長GaAsセルとZn拡散GaSbセルのメカニカル・スタック2接合セルのAM1.5Dの100倍集光で効率31.3%、560倍集光で効率29.7%を実現している。FLATCONモジュールの平均効率17~18%が実現している。現在、3接合セル(400~500倍集光下で効率35.2%)を開発中で、モジュール効率21~22%も実現している。日射条件の良い場所での100kW~数MWの大規模太陽光発電所への応用を目指している。今後、パイロットラインを設置し、大規模実証システムの検討を予定している。

表10 集光型太陽電池の変換効率の現状

Manufacturer	technology	C	Efficiency	Ref.
Sunpower	Si	100	26.8	[4]
Amonix	Si	250	24.1	[5]
Fraunhofer ISE	Si	92	25.0	[6]
UPM-IES	Si	110	20.6	[7]
Spectrolab	III-V, 3J	175	37.3	[8]
Sharp Co.	III-V, 3J	498	37.2	[9]
Fraunhofer ISE	III-V, 3J	630	35.2	[10]
UPM-IES	III-V, 1J	1000	26.2	[11]
UPM-IES	III-V, 1J	2000	25.0	[11]

Table 2: Efficiencies for Silicon and III-V solar cells with one single pn-junction (1J) and three pn-junctions (3J).

表11 年産20MW、200MWの場合の集光式PVシステムのコスト試算結果

Production costs in €/Wp	20 MW	200 MW
Solar cells	0,48 €/Wp	0,17 €/Wp
Solar cell assembly	0,41 €/Wp	0,20 €/Wp
Lens	0,18 €/Wp	0,07 €/Wp
Module assembly	0,24 €/Wp	0,14 €/Wp
Tracker	0,45 €/Wp	0,29 €/Wp
Module costs and tracker	1,72 €/Wp	0,87 €/Wp
Power inverter	0,33 €/Wp	0,15 €/Wp
Installation	0,07 €/Wp	0,05 €/Wp
Electronics/ BOS	0,40 €/Wp	0,20 €/Wp

Table 3: Result of the cost analysis based on an annual production capacity of 20 MW and 200 MW.

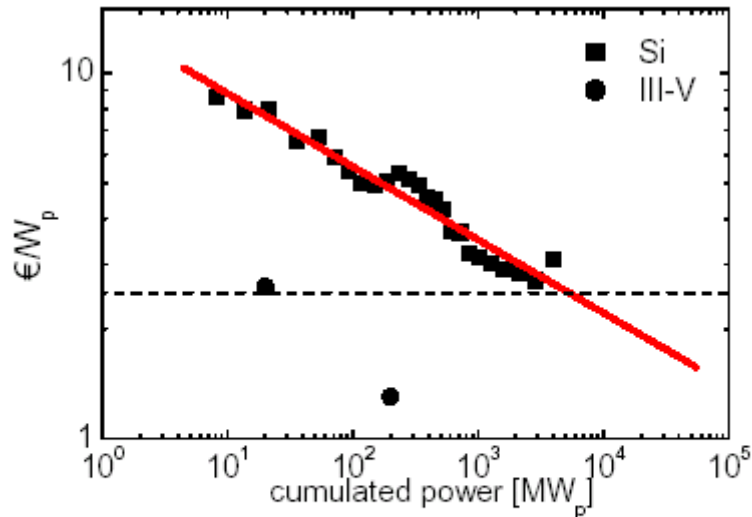


Figure 11: Price curves for flat plate silicon PV modules and for concentrator modules including the tracking. The dashed line indicates costs of 2,5 €/Wp.

図 2 1 平板型結晶Siモジュール価格と集光型モジュール（追尾系を含む）の試算価格との比較

表 1 0 には、集光型太陽電池の変換効率の現状を示す。集光倍率にもよるが、平板型太陽電池に比べて、4 ~ 7 % の高効率化がはかられるのが、集光型の魅力の一つである。電力コスト試算によると、Freiburug の 0.3 ユーロ / kWh より Tabemis の 0.16 ユーロ / kWh と発電コスト削減が可能である。表 1 1 には、年産 20 MW、200 MW の場合の集光式 PV システムのコスト試算結果を示す。また、図 2 1 は、平板型結晶 Si モジュール価格と集光型モジュール（追尾系を含む）の試算価格との比較を示す。集光型モジュールは、平板型モジュールより、低価格化の可能性が大であり、今後が期待される。

Guascor 社は、米国 Amonix 社の高集光型太陽光発電技術を導入し、スペインのバスク地方に 2005 年秋に、高集光型太陽電池モジュール製造工場を新設し、当面、5 kW 太陽電池モジュールを年間 400 台生産する計画である。Amonix 社の年間生産量は 5 ~ 10 MW で、製造原価は 4 ドル / W との事であるが、今後は、変換効率の向上と生産量の増加により、3 ドル / W 以下にできるとしている。

また、展示会場では、Sol3g 社が、200W 高集光モジュールを展示していた (www.sol3g.com/girasol.pdf)。フレネルレンズやホモジナイザーは、明らかに、NEDO プロジェクトの成果をまねたもので、特許対策等の必要性があるし、日本における技術開発を加速する必要がある。

さらに、ENEA (A. Sarno 他、“The PhoCus Standard Unit Design, Realization and Preliminary Performance and Analysis (5D0.7.2)”) の集光システムに用いられているフレネルレンズも大同メタルの技術をまねたものに見えるなど、危機感を感じた。

(4) R. McConnell ら (NREL) は、“High-Performance PV Future: III-V Multijunction Concentrators (1AP.1.5)” と題して、

(5) R.R. King 氏 (Spectrolab) は、 “ Pathways to 40%-Efficient Concentrator Photovoltaics (1C0.4.6) ” と題して、
 米国における - 族化合物多接合太陽電池を用いた集光型太陽電池、モジュールおよび集光式太陽光発電システムに関する技術開発の状況を報告した。



Figure 1: Roadmap of the High-Performance PV Project

図 2 2 米国における高効率太陽電池プロジェクトのロードマップ

Subcontractor	Title
Amonix	Design and Demonstration of a Greater than 33% Efficiency High-Concentration Module Using over 40% III-V Multijunction Devices
Arizona State University	Development of IEC Design Qualification Standard for Concentrator PV Modules
California Institute of Technology	Four-Junction Solar Cell with 40% Target Efficiency Fabricated by Wafer Bonding and Layer Transfer
Concentrating Technologies, LLC	A Scalable Reflective Optics High Concentration PV System
University of Delaware	Novel High Efficiency PV Devices Based on the III-N Material System
University of Delaware	Theoretical and Experimental Investigation of Approaches to >50% Efficient Solar Cells
JX Crystals	Toward 40%-Efficient Hybrid Multijunction III-V Terrestrial Concentrator Cells
Ohio State	Optimized III-V Multijunction Concentrator Solar Cells on Patterned Si and Ge Substrates
Spectrolab, Inc.	Ultra-High-Efficiency Multijunction Cell and Receiver Module
SunPower Corporation	Low Concentration PV System Prototype Assessment of a 3x Mirror Module with SunPower's 20% Efficient A-300 Solar Cell

Table 1: Subcontract projects under the HiPerf PV's "Exploring and Accelerating Ultimate Pathways"

表 1 1 米国の高効率太陽電池プロジェクトの委託研究開発テーマ

図 2 2 に示すように、米国における High-Performance (HiPerf) PV プロジェクトは、
 現用 PV の 2 倍の性能と PV 市場の活性化、促進等へのインパクトを目指している。 -

族化合物多接合セルを主に用いた集光P Vの研究開発により、2020年までに、41%のセル効率、33%のシステム効率の実現により、集光P Vシステム価格1ドル/Wp以下の実現を目標としている。NREL主導の下、このプロジェクトには、表12に示すように、9つの大学、企業が主に参画している。このように、超高効率太陽電池の研究開発において、米国が主導権を握ろうという強い姿勢を感じた。

Amonix社やSolar Systems社による高集光モジュール生産の動きも述べられた。2006年には、15~20MWの高集光モジュール生産が計画されており、10MW生産レベルで、製造コスト2ドル/Wを見込んでいる。この他、50%以上の超高効率化を目指したInGaAsNやInGaNなどの新材料、量子ドット構造太陽電池、低コスト化を目指した - /Siウエハボンディングやヘテロエピ成長多接合セル、メカニカルスタック集光セルモジュール、高効率結晶Si集光セル、集光Siセルモジュール、集光3接合セルモジュール、集光システムの国際標準化、等、米国における幅広い展開の例が紹介された。米国の底力を実感すると共に、ここに来て、集光式太陽光発電システムの重要性が再認識されており、わが国における超高効率太陽電池・材料、集光モジュールおよびシステムに関する研究開発の再強化の必要性を痛感した。

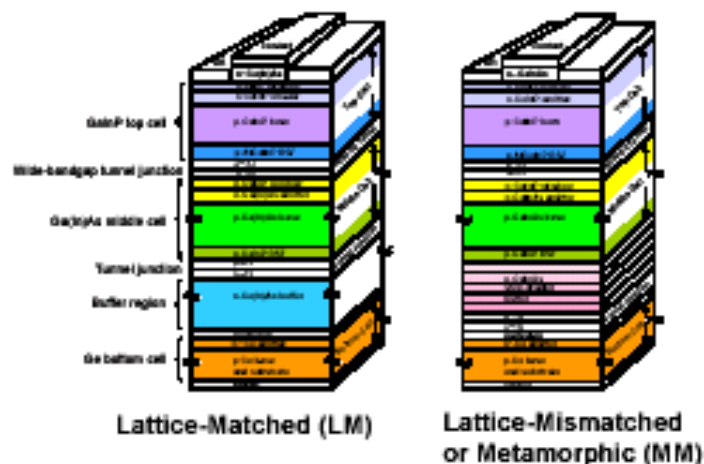


Fig. 4 Schematic cross-section of lattice-matched and metamorphic 3-junction cells. The metamorphic cell incorporates a buffer layer with graded composition to accommodate the mismatch, and suppress propagation of threading dislocations into the active cell layers above.

図 2 3 GaInP/GaInAs/Ge 3 接合セルの構造

このプロジェクトの中で、Spectrolab社は、これまで検討してきたGaInP/GaInAs/Ge 3 接合セル(図23)に関する技術の精査の結果として、図24に示すように、AM1.5Dの236倍集光下で、 $39.0 \pm 2.3\%$ の高効率化を達成している。Sharpは、先に、3接合セルの498倍集光で、効率38.9%の未公認データを発表しているが、先んじて、効率40%に近づいている。図25には、NRELがまとめた各種太陽電池の最高効率の変遷を示す。

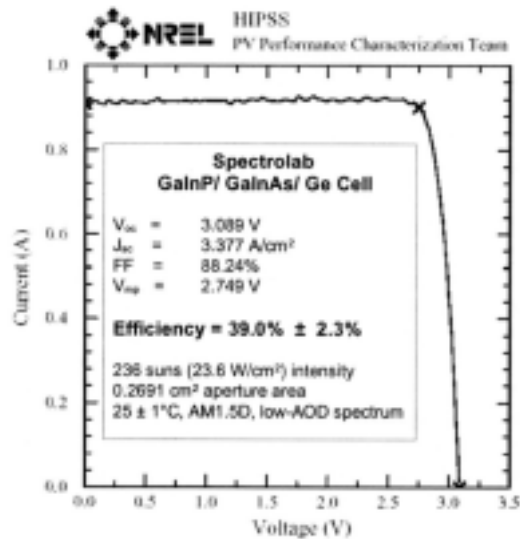


Figure 9: Measurement of I-V characteristic of record 39.0%-efficient cell, independently verified at NREL.

図 2 4 世界最高効率GaInP/GaInAs/Ge 3 接合セルの I - V 特性

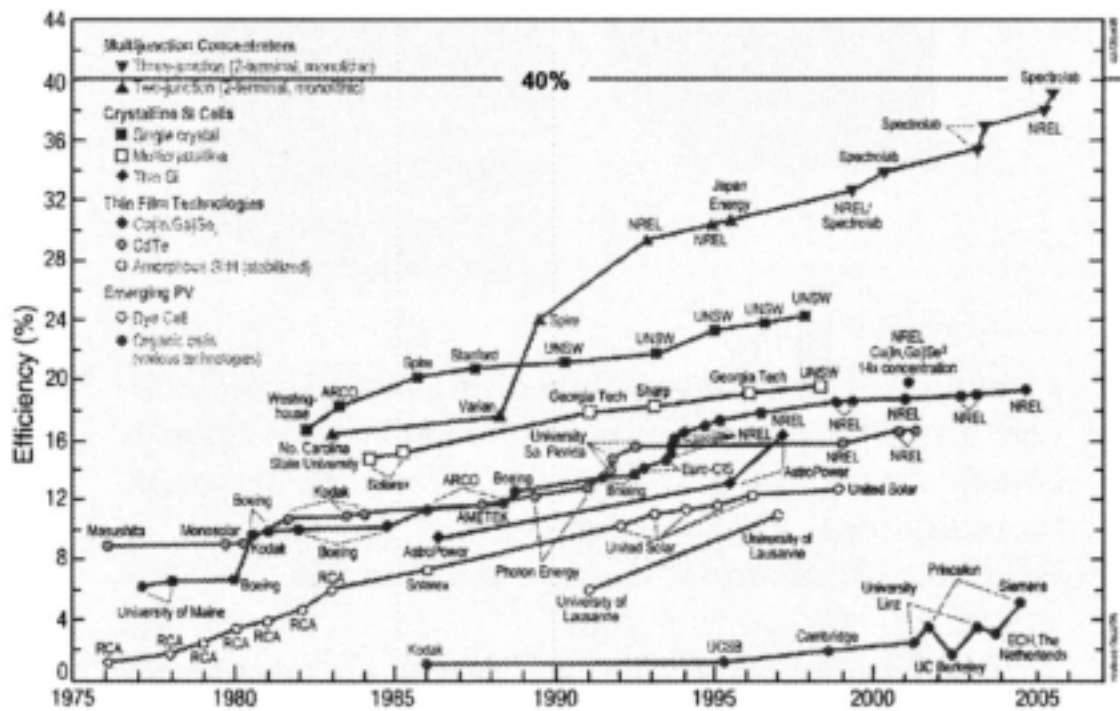


Figure 1: Record solar cell efficiencies for multijunction concentrator cells and other photovoltaic technologies since 1975, as compiled by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). Chart courtesy of Robert McConnell, NREL.

図 2 5 NRELがまとめた各種太陽電池の最高効率の変遷

3 接合セルのターゲットは41%であるが、さらなる高効率化を目指して、5 接合化、6 接合化を検討している。現在の所、図 2 6 に示すような AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/Ge の 6 接合セルで、AM0効率23.6% (図 2 7) を得ている。

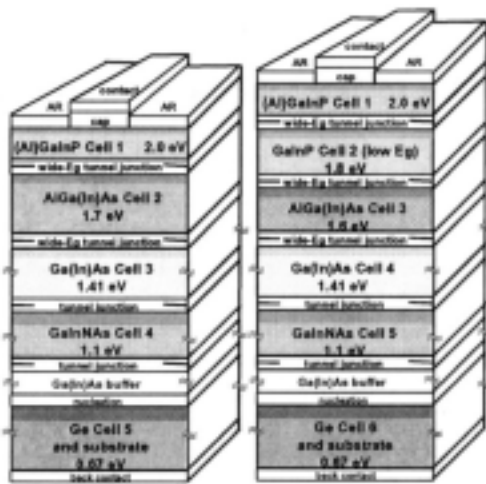


Figure 3: Cross-sections of 5- and 6-junction cells.

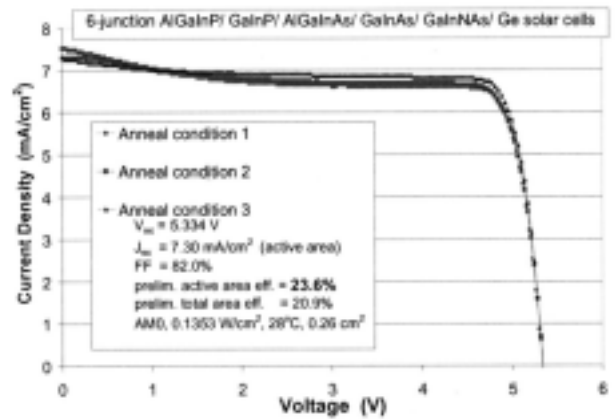


Figure 12: Illuminated current-voltage characteristics for 6-junction AlGaInP/ GaInP/ AlGaInAs/ GaInAs/ GaInNAs/ Ge solar cells, with an active -1.1-eV GaInNAs subcell 5, with V_{oc} over 5.3V.

図 2 6

AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/
Ge の 6 接合セルの構造

図 2 7

AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/
Ge の 6 接合セルの I - V 特性

8 . 感想

プログラム委員長がまとめた会議のハイライトにあるように、結晶Si太陽電池に関する種々の研究開発成果が発表され、Si原材料の供給不安もいずれは解消され、今後も、結晶Si太陽電池が主流を走ることが期待できよう。一方では、欧米および日本を中心に、集光式太陽光発電技術の技術開発の進展と実用化の機運を感じた。薄膜と共に、結晶Siを補完して行くことが期待できよう。

欧州では、高効率太陽電池に関する産学連携のコンソシアムを形成し、日本に戦いを挑んできている印象を感じた。結晶Si太陽電池では、EC主導で、企業9社、大学・研究所7機関の連合チームCRYSTALCLEARプロジェクトがある。確かに、結晶Si太陽電池モジュールのわが国の生産量は世界一ではあるけれど、わが国における結晶Si太陽電池の研究者人口および研究開発レベルは高いとは言えないだろう。半導体LSI凋落の二の舞を踏まないためにも、わが国における産学連携が必要である。

超高効率太陽電池や集光型太陽電池分野でも、EC主導のFULLSPECTRUMプロジェクトに加え、米国のHiPerf PVプロジェクトがある。超高効率太陽電池の研究開発においては、米国を怒らせたようで、米国が主導権を握ろうという強い姿勢を感じた。米国の底力を実感すると共に、ここに来て、集光式太陽光発電システムの重要性が再認識されており、わが国における超高効率太陽電池・材料、集光モジュールおよびシステムに関する研究開発の再強化の必要性を痛感した。