

第 25 回太陽光発電欧州会議 (25th EU-PVSEC、25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告

2010. 9. 11

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日 : 2010年9月7日～11日。

2. 開催場所 : Convention Center Valencia (バレンシア、スペイン)。

3. 本会議の概要

今回は、太陽光発電欧州会議 25th EU-PVSEC、アジア・太平洋会議 20th PVSEC、米国会議 36th IEEE PVSC の合同会議、すなわち第 5 回太陽光発電世界会議 (WCPEC-5、5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion) でもあった。今回の会議の組織委員長は、Giovanni Santi (EC-JRC、イタリア) で、副委員長は、小長井誠 (東工大)、Robert Walters (米国 Naval Research Lab.)、論文委員長は Heinz Ossenbrink (EC-JRC、イタリア)、副委員長は、近藤道雄 (産総研)、David Wilt (米国 Airforce Research Lab.) であった。今年、73 の国と地域から 4,540 名の参加者があった。太陽光発電に関するこれまでの最大規模の会議となった。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も反映していると思われる。

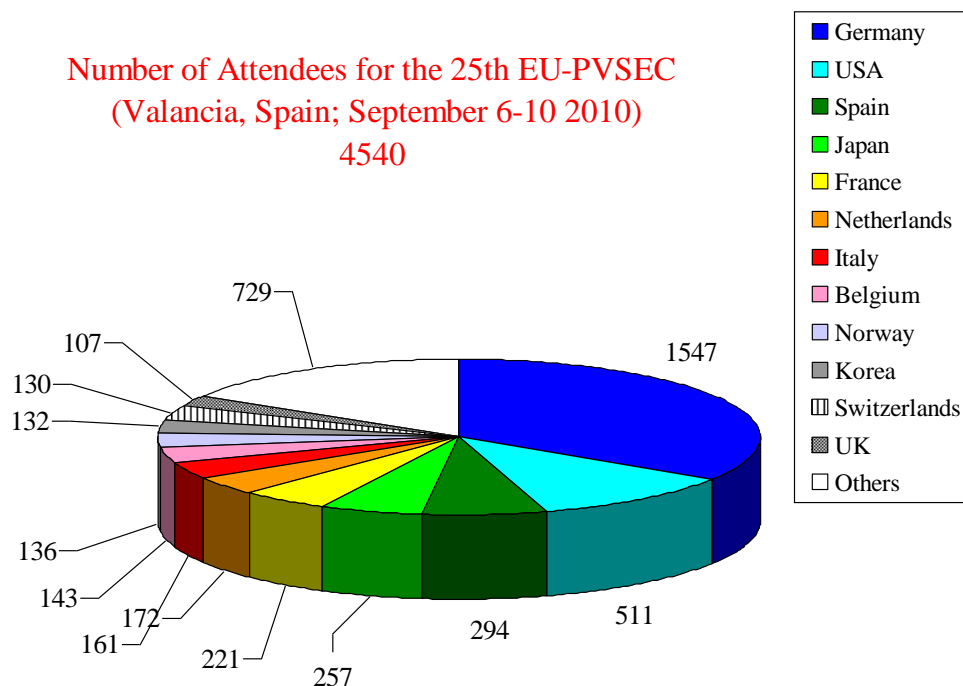


図 1 国別参加者数

図 1 に、国別参加者数を示す。国別では、①ドイツ 1547 名、②米国 511 名、③スペイン 294 名、④日本 257 名、⑤フランス 221 名、⑥オランダ 172 名、⑦イタリア 161 名、⑧ベ

ルギー143名、⑨ノルウェー136名、⑩韓国132名、⑪スイス130名、⑫英国107名、⑬中国97名、⑭台湾93名の順であった。

**Number of Papers presented at the 25th EU-PVSEC
(Valencia, Spain; September 6-10, 2010)
1725 Papers**

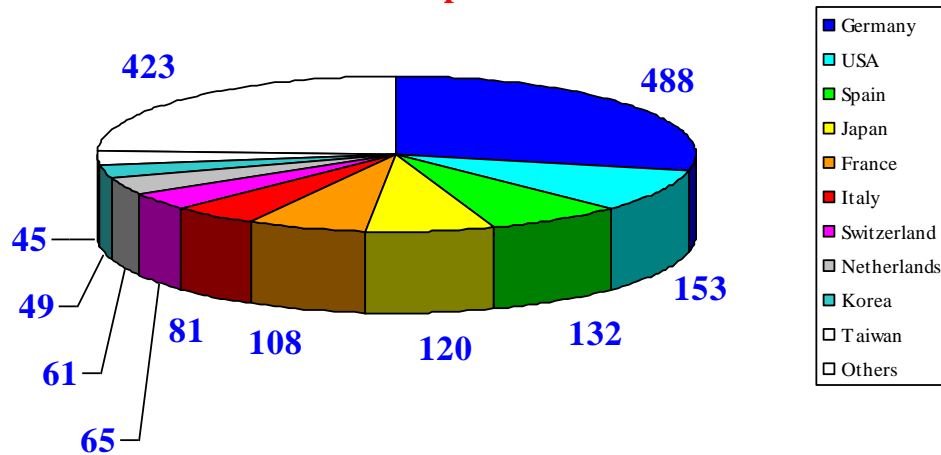


図2 国別発表論文件数

前回の1580件に比べて、1.5割多い1817件の論文投稿があり、67カ国から1725件の論文発表があった（プレーナリ31件、口頭講演312件、ポスター講演1382件）。図2は、国別発表論文件数を示す。国別では、①ドイツ488件、②米国153件、③スペイン132件、④日本120件、⑤フランス108件、⑥イタリア81件、⑦スイス65件、⑧オランダ61件、⑨韓国49件、⑩台湾45件、の順であった。

**Number of Papers presented at the 25th EU-PVSEC
(Valencia, Spain; September 6-10, 2010)
1725 Papers**

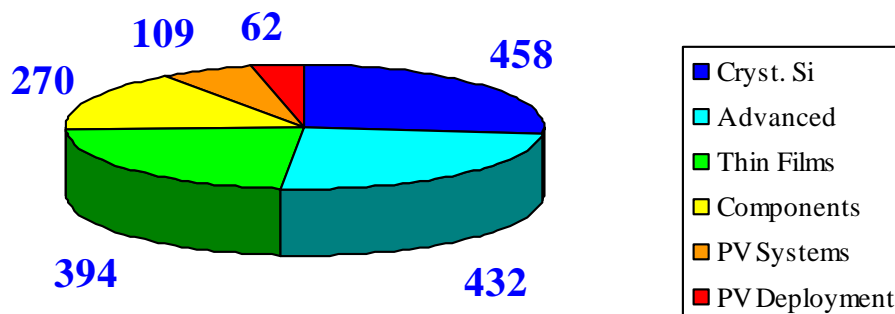


図3 発表論文件数の分野別内訳

図3は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①結晶Si系458件、②先端PV（超高効率、集光、宇宙、色素・有機、基礎・新材料・新素子）432件、③薄膜系（CdTe等II-VI族、CIGS系）394件、④PVコンポーネント270件、⑤PVシステム109件、⑥国家プログラム・政策・PV市場62件、の順であった。

この他、学会併設の展示場（80000cm²）では、100カ国を超える国から963社の太陽電池関連企業が出展した。展示会の参加者は、約4万人との事である。

4. 主な発表論文の概要

プレーナリ講演を中心に、本会議のトピックスの概要を述べる。

4. 1 先端太陽電池分野

4.1.1 超高効率太陽電池分野

(1) G.S. Kinsey ら (Amonix) は、“Energy Prediction of Amonix CPV Solar Power Plants” と題して、プレーナリ講演を行った。集光式太陽光発電 (CPV) は、現状の PV のシステムコスト \$5~7/W に対して \$3/W の低コスト化が可能で、かつ、出力の平坦性、高性能という特長があり、utility 向きである。図4に、結晶 Si と比較して、CPV による電力コスト低減の可能性を示す。CPV に関しては、世界で 25 社が参入しているが、セルは III-V 族セルが主である。16MW 生産されている。Amonix 社は、1980 年代は、非集光セルの modify や集光コンセプトの構築、1990 年代は、セル開発、2000 年代は、商用化へと移行している。結晶 Si の CPV では、効率 27.6% の実績を有し、III-V 多接合セルの CPV では、NREL の委託テーマとして、効率 33% のターゲットがある。セル効率 39%、モジュール効率 31%、システム効率 25% の実績である。1997 年の 1kW の CPV システムから、2008 年の 50kW システムと高出力化をはかってきている。20~25 年間で、7700 以上の CPV システムのフィールド実証の実績を有し、25 年間は、特性保証ができるとしている。また、日別、月別電力発生予測も行っている。40℃ の外気温下でも、特性低下はない。出力低下率としては、セルレベルで 0.3%/年を想定している。今後の課題として、さらなる高性能化、低コスト化、特性評価、寿命試験、特性保証、などがある。

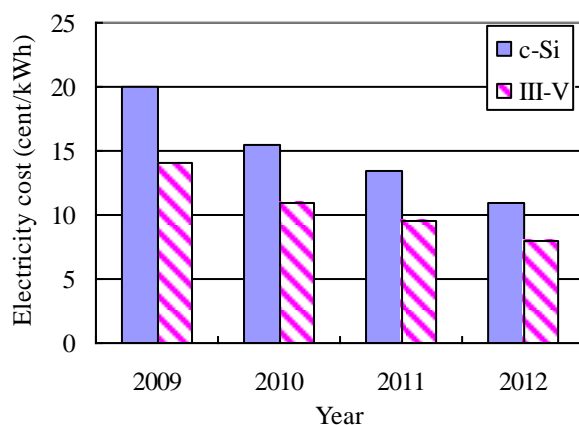


図4 結晶 Si と比較しての CPV による電力コスト低減の可能性

(2) M. Meuselら (AZUR SPACE Solar Power) は、“III-V Multi-Junction Solar Cells – from Current Space and Terrestrial Products to Modern Cell Architectures” と題して、Fraunhofer ISE の成果を交えて、III-V族化合物の宇宙用、地上電力用多接合太陽電池についてプレナリ講演を行った。宇宙用太陽電池としては、格子整合系が研究開発され、ベストの結果として、初期 (BOL) 効率30.6%、終期 (EOL) 効率26.1%が得られている。製品としては、BOL効率28%、EOL効率24.6%から2011年には、各々、29.5~30%、25.5~26%に改善するとしている。図5には、Fraunhofer ISEおよびAZUR SPACEでの宇宙用3接合セルの高効率化の変遷を示す。集光用には、トンネルダイオード、トップセル厚、エミッタドピング、ARコーティングなどが検討され、500倍集光で平均効率39.5%が得られている。図6には、GaInP/GaInAs/Ge3接合太陽電池の非集光下でのI-V特性を示す。30.17cm²セルで、AM1.5G 効率34.1% (J_{sc}=14.7mA/cm²、V_{oc}=2.691V、FF=86.0%) の高効率を実現している。

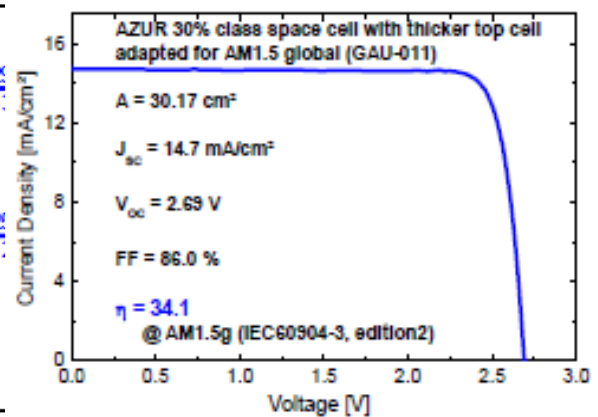
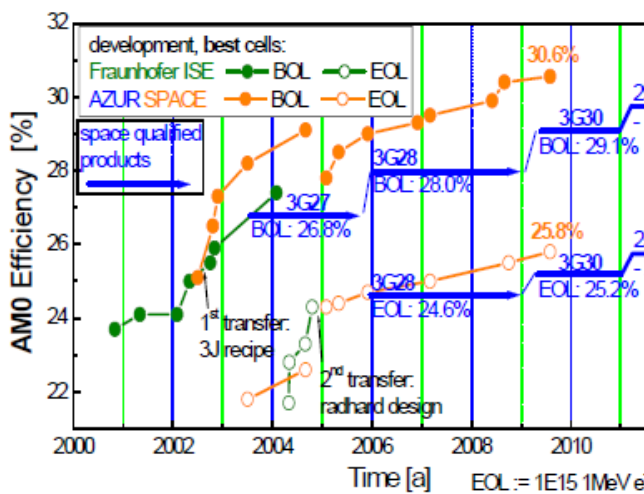


図5 Fraunhofer ISEおよびAZUR SPACEでの宇宙用3接合セルの高効率化の変遷

図6 GaInP/GaInAs/Ge3接合太陽電池の非集光下でのI-V特性

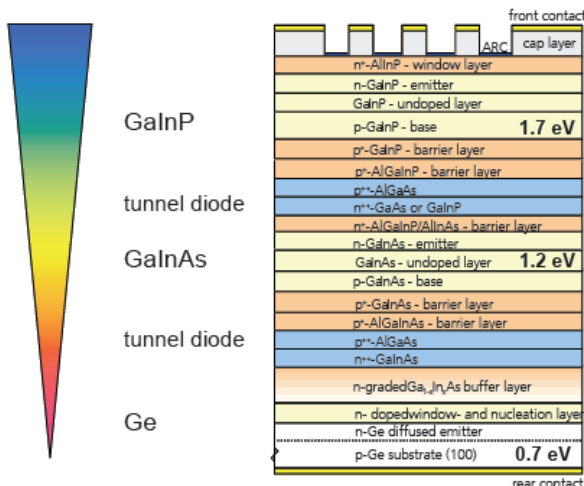


図7 高効率GaInP/GaInAs/Ge3接合太陽電池の構造

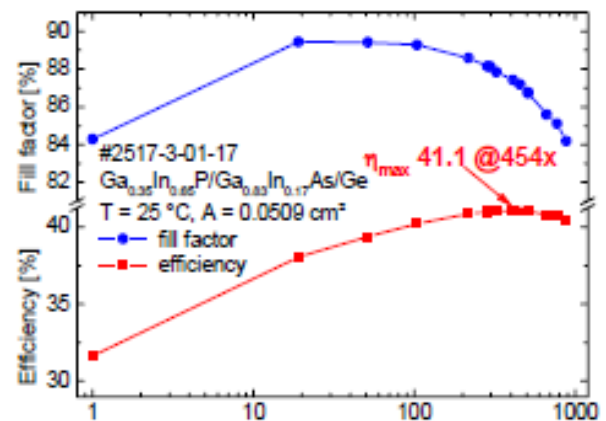


図8 高効率GaInP/GaInAs/Ge3接合太陽電池効率の集光倍率依存性

Fraunhofer ISEでは、図7、図8に示すように、格子不整合 $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$ 3接合構造太陽電池(面積 0.0509cm^2)の454倍集光で41.1%(25°C 、 $I_{sc}=380.5\text{mA}$ 、 $V_{oc}=2867\text{mV}$ 、 $\text{FF}=87.2\%$)の高効率を実現している。従来の格子整合系に比べ、格子不整合系は、サブセルのバンドギャップ組み合わせの最適化が可能である。1.2%の格子不整合があり、課題であった格子不整合に伴う転位の問題も検討され、In組成17%/23%/17%のovershooting層を含むステップグレーディッドバッファ層やGaInNAsバッファ層の導入による貫通転位の伝播が抑制され、太陽電池の活性層の低転位密度化(エッチピット密度 $3\times 10^5\text{cm}^{-2}$)が高効率化につながっている。また、高倍集光用にトンネルダイオードも改善され、 $\text{p}^+\text{AlGaInP}/\text{p}^+\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ($2\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$, 20nm)/ $\text{n}^+\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}$ ($>1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, 20nm)/ $\text{n}^+\text{AlGaInP}$ 構造で、1,000倍集光でも $\text{FF}>80\%$ のセルが実現している。

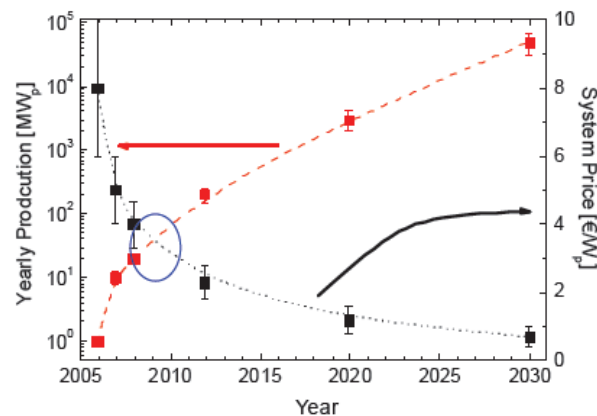


図9 集光型太陽電池の生産量と集光式太陽光発電システムの価格推移予測

図9には、集光型太陽電池の生産量と集光式太陽光発電システムの価格推移予測を示す。システム価格低減と将来の大規模太陽光発電システムに貢献することが期待される。2030年には、集光型太陽電池が年産40GWと、結晶Si太陽電池、薄膜太陽電池と共に、1/3のシェアを占め、三本柱を形成することが期待される。

(3) 山口ら(豊田工大)は、“Recent R&D Topics on Concentrator Multi-Junction Solar Cells and Materials under Innovative Solar Cells’ R&D Project”と題して、2008年度から開始されたNEDOの「革新型太陽電池プロジェクト」の東大拠点の「超高効率集光型多接合太陽電池」研究チームの成果概要が報告された。2014年度末までに、集光下でのセル効率45%、モジュール効率35%の達成を目指している。これまでに、日本のチームでは、III-V族化合物多接合太陽電池の高効率化のために、①電流整合、②ワイドギャップトンネル接合、③サブセル材料および基板材料の格子整合、④InGaP-Geボトムセル、⑤disordered InGaPを考慮あるいは提案された。InGaP/InGaAs/Ge3接合セルは、わが国でも、宇宙用太陽電池として実用化されている。また、電極設計、トンネル接合の改良などにより、200倍集光で効率39.2%が報告されている。今回、シャープによる最近の成果も報告された。ボトムGeセルを用いた格子整合3接合太陽電池は、理論限界効率に近づいている。図10に示すように、Ge接合を1.0eV接合で置き換えると、電流のロスなく、セル電圧を上げ

ることで、効率向上が期待できる。

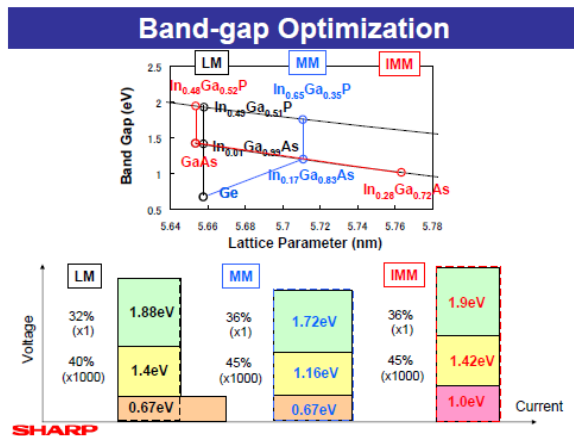


図 1 0 3 接合の高効率化のためのバンドギャップ最適化

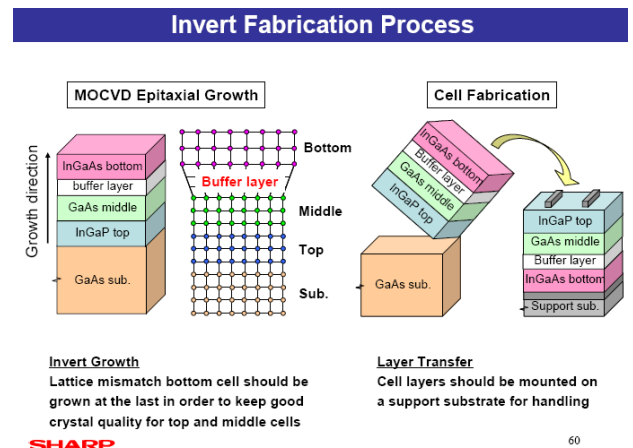


図 1 1 逆エピ構造太陽電池の作製プロセス

今回、多接合セル層の成長時の熱負荷軽減と格子不整合層を最終段にする狙いで、図 1 1 に示す逆構造を検討した成果が紹介された。図 1 1 に示すように、GaAs基板上に、有機金属気相堆積 (MOCVD) 法で、1.8eV $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ /1.4eV GaAs/1.0eV $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 3 接合セルが、逆構造でモノリシックに成長されている。格子不整合 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 接合は、最後に成長されている。格子不整合の課題は、バッファ層の工夫により、歪緩和と転位密度低減がはかられ、高Vocが得られている。3接合セルの効率は、図 1 2 に示すように、1-sunのAM1.5Gでの、効率は35.8%で、非集光下での世界最高効率を達成している。これまでの非集光下での世界最高効率は、1997年に達成したジャパンエナジー、住友電工、豊田工大による InGaP/GaAs/InGaAs3接合セルの33.3%、2008年にNRELのグループが、InGaP/GaAs/InGaAsで達成した33.8%であったが、今回の成果は、これらの値を凌駕した。

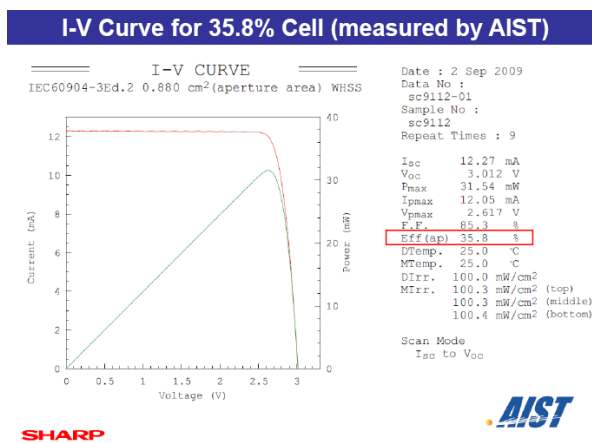


図 1 2 シャープの世界最高効率InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池のI-V特性

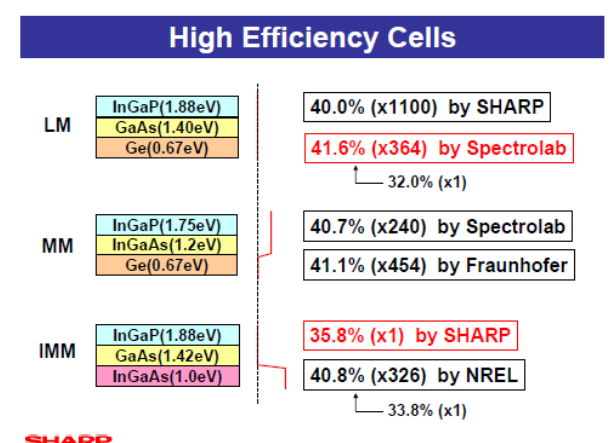


図 1 3 高効率3接合セルの構造と特性のまとめ

図 1 3 には、高効率3接合セルの構造と特性のまとめを示す。III-V族3接合セルの効率化に関しては、Sharp、Spectrolab、Fraunhofer ISE、NRELなどがしのぎを削っている。非集光では、Sharpの逆エピ構造格子不整合 (IMM) 系InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルで効

率35.8%が、集光動作したでは、Spectrolabの格子整合（LM）系InGaP/GaAs/Ge 3 接合セルの364倍集光で効率41.6%の状況である。Sharpでは、自社測定ではあるが、上記構造セルの230倍集光で効率42.1%を得ている。今後、電流整合と直列抵抗の低減により、AM1.5Dの1000倍集光で効率44.8%が達成できる。このように、III-V族化合物半導体を用いた集光型多接合太陽電池の高効率化が進展し、当面は、III-V族化合物半導体を用いた集光型多接合太陽電池が50%以上の超高効率を実現できる唯一の解と考えられる。

4.1.2 新材料・新型太陽電池

(1) M. Greenら (UNSW) は、”Recent Progress with Hot Carrier Solar Cells” と題して、第3世代PVのうち、ホットキャリア太陽電池の最近の状況について、プーナリ講演を行った。太陽電池として、結晶シリコン系、薄膜シリコン系、CIGSやCdTeの化合物多結晶薄膜系、III-V族化合物多接合型および集光型、色素増感系、有機系など多くの材料系で研究開発が進められ、その多くが実用化されている。これらのアプローチとは別に、近年、UNSWのM. Greenが命名した第三世代太陽電池がある。第一世代は、結晶シリコン太陽電池、第二世代は、薄膜シリコン、CIGSやCdTeの薄膜太陽電池を指している。単一接合セルでは変換効率31%、その集光動作では41%が限界であり、第1世代、第2世代の太陽電池技術は、そこで尽きるという。そこで、高性能、低コストの第3世代の太陽電池技術に関する研究が必要である。熱力学的考察から、最も現実的な多重バンドギャップの多接合セルの理想状態での変換効率は、表1に示すように、86.8%である。

表1. 多接合セルの理想状態での理論変換効率

接合数	非集光	集光
1 接合	30.8%	40.8%
2 接合	42.9%	55.7%
3 接合	49.3%	63.8%
4 接合	68.2%	86.8%

表2. 第3世代太陽電池技術の提案と高効率化の可能性

概念	提案年	理想状態での変換効率
多接合	1955	86.8%
多重励起	1972	85.4%
ホットキャリア	1981	86.2%
マルチバンド（中間バンド）	1997	86.8%
量子井戸	1990	60%
不純物バンド PV	1960	63%

この他、表2に示すように、衝突電離などの多重電子-正孔対生成の原理を利用できれば、変換効率 85.4%、ホットキャリアセルでは 86.2%、多重バンド励起が利用できれば 86.8%など、可能性が示唆され、実際的には、理論変換効率 $\times 0.8$ の変換効率 70%の実現が可能で、実用効率としては、さらに $\times 0.8$ の 55%の可能性があるとしている。6 接合タンデムの効率限界 58%より少し低い、魅力的と考えている。ホットキャリアセル材料としては、バンドギャップ 1eV 程度の材料が適している。課題は、エネルギー選択コンタ

ト、n-i-p 構造の改善などである。エネルギー選択コンタクトとして、ポリ Si/Si-QD 内蔵酸化層/ウエハ構造が検討されている。ホットキャリアセルとして、透明導電性酸化層/n型 QD 光吸収層/ワイドギャップ p 型層構造の検討がなされている。

(2) A. Marti ら (UPM) は、” Experimental Activities in the Next Generation of Solar Cells ” と題して、マルチエキシトン型および中間バンド構造太陽電池の現状を紹介した。これまで損失となっていた $h\nu - E_g$ ($h\nu$: 光子エネルギー) のエネルギーを何とか活用したというのが、マルチエキシトン型セルの考え方である。従来、紫外線領域では、衝突電離により、1個の光子から2個の電子-正孔対が生成されることは知られていた。図14は、量子ドット構造によるマルチエキシトン生成を示す。図15は、米国ロスアラモス国立研究所によるPbS量子ドット構造におけるマルチエキシトン生成を示す。NRELでも、シリコンナノ結晶中において、高エネルギーの光子を入射すると、複数の電子・正孔対を生成するマルチエキシトン効果を観測することに成功している。NRELでは、ITO/PbSeナノ結晶/金属のショットキー構造で、効率2~3% ($J_{sc}=21.4\text{mA/cm}^2$) を実現している。

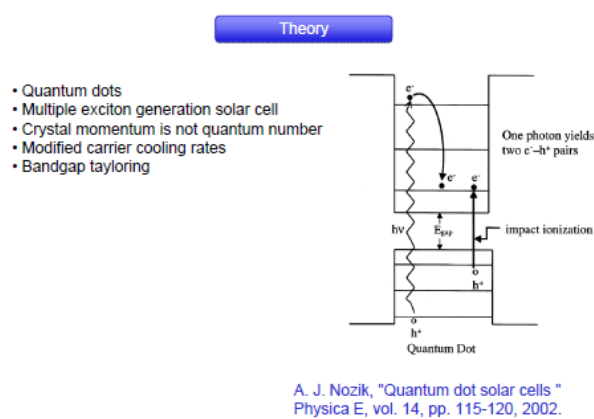


図 1 4 量子ドット構造によるマルチエキシトン生成

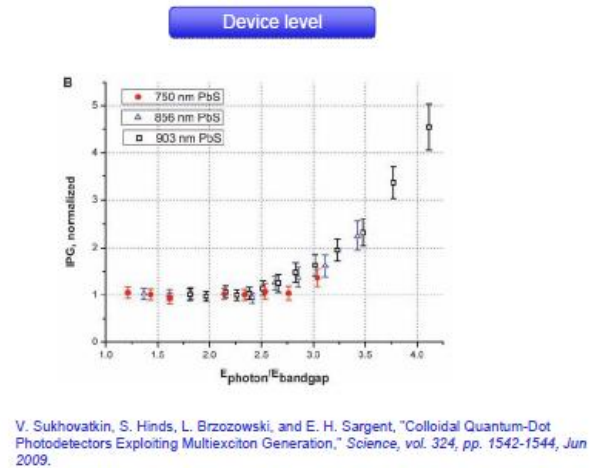


図 1 5 PbS量子ドット構造におけるマルチエキシトン生成

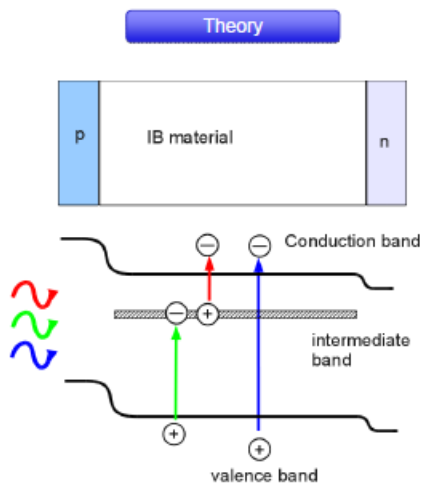


図 1 6 中間バンド構造太陽電池

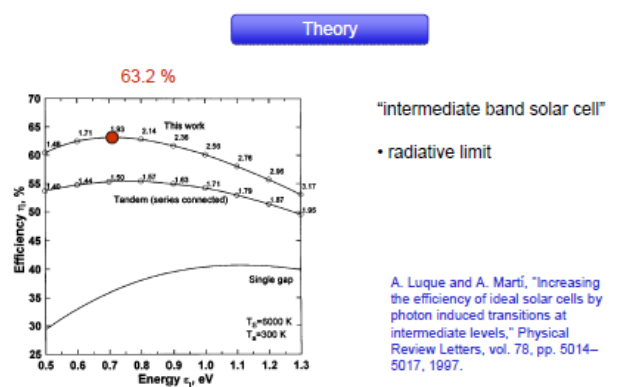
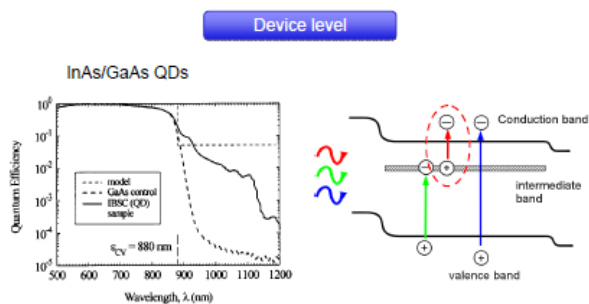
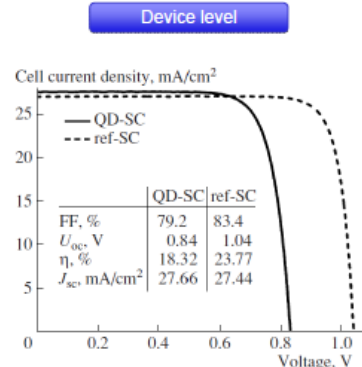


図 1 7 中間バンド構造太陽電池の高効率化の可能性



A. Luque, A. Martí, C. Stanley, N. Lopez, L. Cuadra, D. Zhou, J. L. Pearson, and A. McKee, "General equivalent circuit for intermediate band devices: Potentials, currents and electroluminescence," *Journal of Applied Physics*, vol. 96, pp. 903-909, 2004.

図 1 8 InAs/GaAs-QD太陽電池の量子効率の波長依存性



S. A. Blokhin, A. V. Sakharov, A. S. P. A. M. Nadochty, M. V. Maximov, N. N. Ledentsov, A. R. Kovsh, S. S. Mikhlin, and V. M. Lantrat, "AlGaAs/GaAs Photovoltaic Cells with an Array of InGaAs QDs," *Semiconductors*, vol. 43, pp. 514-518, 2009.

図 1 9 InGaAs-QDを含むAlGaAs/GaAsセルのI-V特性

単接合セルの $I_{sc}-V_{oc}$ のトレードオフを解決するために、図 1 6 に示すように、中間バンド構造太陽電池を提案している。1.95eV、1.24eV、0.71eVの多重光励起過程の利用により、理論効率63.2%を試算している。図 1 7には、中間バンド構造太陽電池の高効率化の可能性を示す。効率63.2%が期待できるとしている。グラスゴー大との共同研究で、10層QD構造で、バルクセルに比べて、図 1 8 に示すように、 10^{-2} 倍の収集電流の増分を得ているが、 V_{oc} は0.84Vから0.66Vに低下している。この他、他機関での研究状況が紹介された。最近、ロシアのグループが、図 1 9 に示すように、InGaAs-QDを含むAlGaAs/GaAsセルで効率18.3%を得ている。リファレンスセルに比べて V_{oc} が0.2V低く、課題である。

今回、色素増感型および有機太陽電池に関するプレーナリ講演がなかったため、本報告には含めないこととする。

4. 2 結晶Si太陽電池分野

やはり。現在の太陽電池市場を支配する結晶シリコン系太陽電池に関する発表が多かった。

(1) E. R. Weber (Fraunhofer ISE) は、“Silicon Feedstock for PV – The Next Ten Years” と題して、プレーナリ講演を行った。低炭素社会の実現に、太陽光発電が重要で、主要な結晶Siであろう。ポリシリコン生産は、年産12万tだが、価格は\$50/kgで、年産1000tのポリシリコン製造プラントには、\$100Mが必要である。ポリシリコンの製造コスト低減には、金属級(MG)-Siの活用が必要で、アップグレードMG(UMG)-Siの研究開発を進めている。純度99%材料から出発し、ガス反応によるB、P低減で純度99.8%以下、スラグ処理や不純物偏析を活用し、ppmオーダーを実現している。低品位Si上のエピセルなどが検討され、15cmx15cmセルで、平均効率16% (ベスト17%) を得ているとの事である。Defect engineeringが重要であるとまとめた。

(2) H. A. Aulich (OV Crystallox Solar) は、“Large Scale Crystallisation and Wafer Production” と題して、太陽電池用ポリSi原料およびウエハの技術開発、生産の動向を報

告した。結晶Si太陽電池生産は、2009年は7.86GWで、年率32%の伸びを示し、太陽電池生産の主流を占め、EPIAによると、2013年段階でも、75%が結晶Siだろうと予測されている。結晶Si太陽電池生産は2015年、2020年には、各々52GW、163GWになるだろうと予測され、ポリシリコン生産の重要性は引き続き。少し古いが、図20には、昨年(2011年)の24th EU-PVSECで報告されたK. Hesse (Wacker-Chemie) ”Status and Development of Solar-grade Silicon Feedstock” の図を引用して、2012年までの原料Siの需要予測と生産量予測を示す。2012年での需要は12~30万t/年と2008年の2.4~6倍に増大すると予測している。なお、2012年における原料メーカー各社の総生産量(現行生産量+アナウンス値)は15.5万t/年である。太陽電池級(SOG)-Siの製造法として、Siemens法、流動床法や金属級(MG)-SiからのSOG-Si製造法、等がある。図21には、金属級(MG)-Siからの太陽電池級(SOG)-Si生産を示す。結晶Siに関して、さらなる技術開発が必要であり、多結晶Siについては、①CZ-Si並みの品質向上、②1000kgのインゴット成長、③るつぼの再利用、単結晶Siに関しては、①低コスト化、②大口径化生産性向上、③エネルギー消費の低減、などが必要である。スライスについても、薄型化、カーフロス低減、高速スライスなどに対応できる研究開発が必要である。勿論、今後10年、結晶Siのリサイクル(Fe、SiCの低減)、太陽電池の薄型化(80 μ m~120 μ m厚)、カーフロスの低減、Si消費の低減(8gg/Wから4g/Wへ)、セルの高効率化、なども重要である。

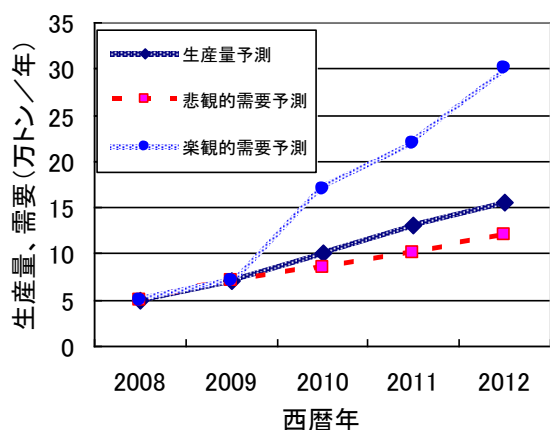


図20 太陽電池用原料Siの需要予測

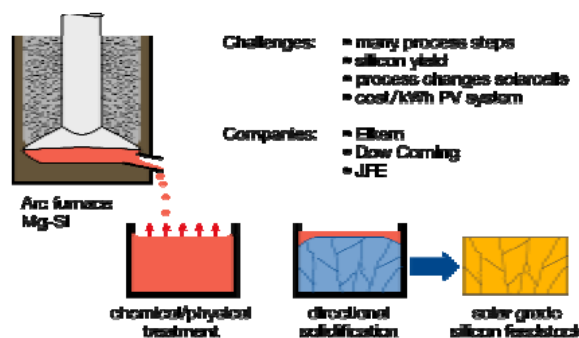


図21 金属級(MG)-Siからの太陽電池級(SOG)-Si生産

(3) R. Swansonら(SunPower)は、“Recent Progress in Back Contacted Solar Cells”と題して、高効率裏面コンタクト型結晶太陽電池の最近の状況について報告した。LCOE(localized cost of electricity) = (Total life cycle cost) / (Total lifetime energy production)のためには、変換効率を上げて総発電量を増やすことと生産量拡大によるコストダウンが必須である。高効率セルとして、裏面コンタクトセルがある。長所は、①高効率、②低コストメタルの片側電極、③クラック回避、④薄型化のロードマップに適している、などである。欠点は、①高ライフタイム材料が必要、②生産が難しい(パターン併せ、シャント、パターン欠陥)、などである。SunPowerのセルテクノロジーは第一世代(Gen I)では変換効率が20.5%(2003年)であったものが、第二世代では22.2%(2006年)、さらに最新の第三世代(Gen III)では23.4%(2008年)まで向上しており、最高効率は24.2%(2010年)に達して

いる。これは裏面のp型領域やBSF領域の最適化による。生産面では、22%のセルテクノロジーは既に500MW/yearの生産能力を有しており、1.4GW/yearの生産能力を持つマレーシア工場(FAB3)が2月に完成し、本年度中には稼動が予定されている。モジュール効率も、GenIIIでは、20.5%が達成され、21%になるだろうとの事である。

4. 3 薄膜太陽電池分野

4.3.1 アモルファス、ナノ/微結晶薄膜 Si 太陽電池分野

結晶Si太陽電池に次いで、薄膜Siセル、化合物薄膜セルや集光型セルなどにも大きな期待が寄せられている。

(1) U. Rau (Forschungszentrum Julich) は、” Status and Perspective of Amorphous and Microcrystalline Silicon Based Solar Cells” と題して、アモルファスおよび微結晶薄膜Si太陽電池の高効率化に関する試みが報告された。セルレベルでは、0erliconの11.9% a-Si/nc-SiタンデムセルやUniSolarの12.5%トリプルセルがあり、安定化効率10%以上のモジュールもでき、0erliconによるモジュールコスト0.5ユーロ/Wのプロダクションラインのアナウンスもある。高効率化、低コスト化、資源や無毒性の考慮、エネルギーペイバックタイム低減、生産性向上の流れにあり、今回は、高効率化要素技術が報告された。

①ARとして、ZnOの新しいエッチングが検討され、タンデムセルのIscは相対的に4~7%改善、効率も12.8%から13.2%に改善された。

②ZnOのHCl、HF、HF+HClによるテクスチャーエッチングが検討され、 μ c-Si単接合セル効率は、各々、7.3%、7.6%、8.2%が得られている。light scatteringの予測手法も検討されている。

③タンデムセルの場合、中間反射構造が重要で、山本氏(カネカ)オリジナルの μ c-Si/a-SiO_xが検討され、屈折率やEg制御がなされ、k=1.6で、トップセル、ボトムセルのJscが11.3、11.413.8mA/cm²と最適化がなされている。

④吸収層の薄型化も検討され、タンデムセルの光劣化率が-7.2%から-4.8%に改善されている。

⑤直列コネクション法が検討され、ポイントコンタクトによるactive areaの増加で、相対効率1%が改善されている。

表3に、薄膜Si太陽電池技術のロードマップを示す。短期的には、目標達成が見込まれるので、ロードマップも前倒しすべきとしている。

表3 薄膜Si太陽電池技術のロードマップ

年	2008~2013	2013~2020	>2030
モジュールコスト (ユーロ/W)	<1 ↓ 0.65	<0.65 ↓ <0.4	0.4 ↓ ?
モジュール効率	>10% ↓ >12%	>12% ↓ >15%	>15% ↓ >15% + α

今後、①高速 μ c-SiのPECVD成膜、②高品質TCO、③低コストパッケージング、④大型製膜装置、⑤製造ラインの単純化、⑥フレキシブルセルのためのroll-to-rollプロセス、などが重要としている。

AMAT社の薄膜太陽電池用大型製造装置分野からの撤退やシャープの薄膜Si太陽電池製造の重点化見直しなど、暗いニュースが多いが、二番手として頑張っって欲しい。薄膜Si太陽電池分野においても、高効率化、コスト低減や長寿命化に向け、原子レベルでの構造や界面の解析、光劣化機構の解明と抜本的解決などの基礎的研究に加え、新材料や新型構造による高効率化、高速堆積、大面積基板、TCO付基板の低コスト化、歩留まり向上などに関する技術開発が重要であると考えられる。

4.3.2 CIGS、II-VI族化合物薄膜太陽電池分野

CdTe や CIGS 系の化合物薄膜セルは、アモルファス Si および微結晶 Si 薄膜セルと共に、低コストの薄膜太陽電池として期待されている。これらの材料は、真空蒸着やスパッタ法などで、わりと簡単に作製でき、多結晶薄膜でありながら、多結晶粒界が少数キャリアのキラーにはなっていなかったり、不活性化されていたりして、結晶粒径 $1\mu\text{m}$ でも高効率が期待できる。

(1) B. Hansen (First Solar) は、“Multi-megawatt Production toward 2020”と題して、プレーナリ講演を行った。First Solar 社は、1999年に設立され、低コストCdTe太陽電池生産をリードしている。生産規模も、2005年の25MWから、2008年の716MW、2009年の1.228GWと飛躍的増強をすすめており、2010年1.416GW、2011年2.124GW、2012年2.242GWの計画である。モジュール効率も、図22に示すように、2002年の7.5%から、2007年の10%、2008年の10.5%、2009年の11.0%と改善をはかってきている。

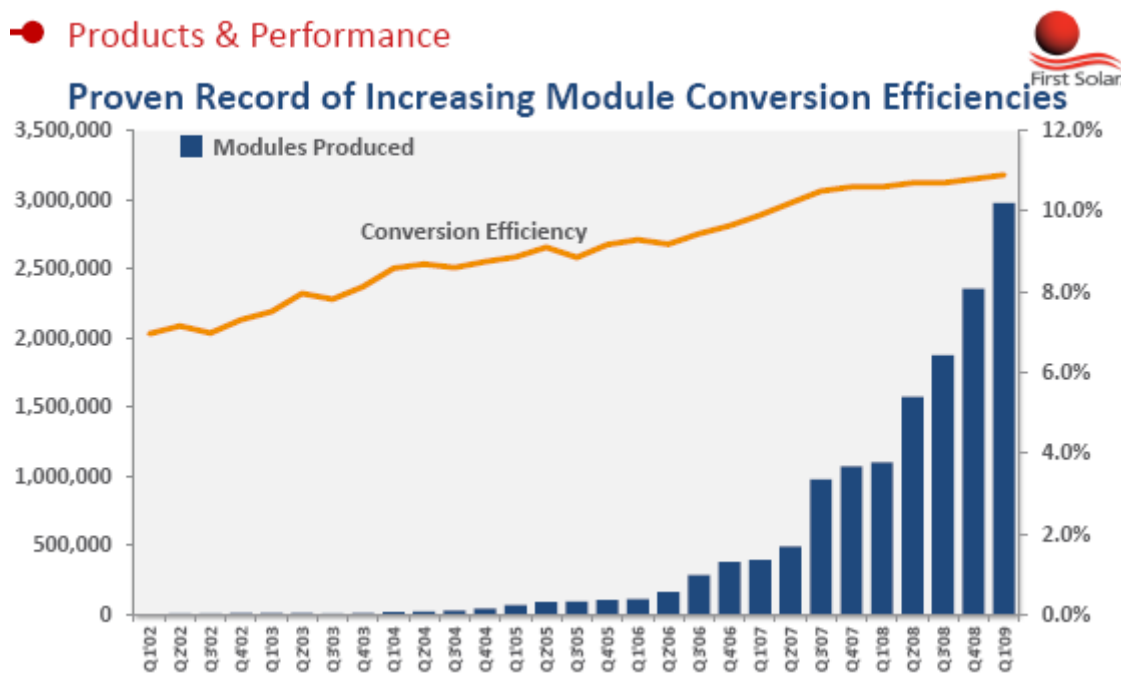


図 2 2 First Solar 社におけるモジュール効率改善とモジュール製造量増加

モジュールコストも、図 2 3 に示すように、2007 年の \$1.29/W から 2009 年の \$0.93/W へと低減がはかられ、2014 年には \$0.52-0.63/W の計画である。56%~68% のコスト低減のシナリオとして、① 効率向上により 18~25% 低減、② 高生産性により 4~6% 低減、③ 材料消費低減により 4~6%、④ 低コストロケーションにより 3~4%、⑤ プラント規模により 2%、を考えている。BOS コストも、2009 年の \$1.4/W から 2014 年の \$0.91~0.98/W に低減をはかる計画にある。大面積モジュールは、サイズ 60cmx120cm、重量 12kg で、出力の温度係数は、0.25%/°C と低く、80% 出力まで、25 年間の出力保証をしているとのことである。出力低下率は、結晶 Si と同等の 0.6%/年を想定している。セールスチャンネルとして、欧州に 15 社、米国/カナダに 11 社、オーストラリアに 2 社があり、市場開拓につとめている。リサイクルプログラムも進めているが、まだ、本格的ではないとの事である。エネルギーペイバックタイム 0.8 年と試算している。



図 2 3 First Solar 社における CdTe 太陽電池モジュールコストの低減

(2) H.W. Schock (Helmholtz-Centre Berlin for Materials and Energy) は、2010 年 Becquerel Prize を受賞した。”Status and Future Potentials on CIS and Related Solar Cells”と題して、受賞記念講演を行った。まず、同氏の II-VI 族化合物や CIGS に関する研究開発の貢献が述べられた。1979 年の CdS-Cu₂S セル、1987 年の CIGS セル、1988 年の co-evaporation 法による効率 4.1%、1993 年の効率 14.8% (Voc=513mV、FF=0.76、Jsc=40.4mA/cm²) 等の発表、2000 年頃からは、Na 効果、界面特性やモデリングなど基礎的研究への貢献が述べられた。並行して、1986 年からの EURO CIS プロジェクト (効率 10%)、1990-1992 年の EURO CIS プロジェクト II (効率 14.8%)、1992-1995 年の EURO CIS プロジェクト III (セル効率 17.6%、10cmx10cm モジュール効率 10%)、1997-1999 年の EURO CIS モジュールプロジェクト、2001-2003 年の PRO CIS プロジェクト (技術移転)、2005-2009 年の LAR CIS プロジェクト (大面積技術と技術移転) への貢献も述べられた。結果として、表 4 に示すように、ベストセル効率 20.3%、プロトタイプモジュール効率 16%、製造レベルのモジュール効率 13% の実現に貢献している。ベストの特性を組み合わせると、効率 21.3% が可能で、将来的には、効率 25% が期待できるとしている。今後、2000MW 製造、0.5 ユーロ/W 以下のコスト低減が期待でき、層堆積、接合形成、界面特性などが重要であるとしている。

表 4 CIGS 太陽電池効率の状況と高効率化の可能性

	HIB	NREL	ZSW	Potential
Voc (mV)	702.5	691.8	720.4	720
Jsc (mA/cm ²)	35.63	35.74	36.33	36.5
FF (%)	77.52	81.03	76.78	81.2
η (%)	19.4	20.0	20.3	21.3

この分野では、短期的には、コスト低減、実質的生産量の増加や環境調和型太陽電池の開発などが課題である。中期的には、コスト低減 (<1 ユーロ/W)、大面積モジュールの効率向上 (>14%) や新しい製造法の開発が課題である。大面積モジュールの高効率化が必要である。長期的には、多接合化による高効率化 (>25%)、太陽電池の損失メカニズムや大面積モジュールの非一様性の理解等、基礎的理解が重要であると考えられる。

4. 4 太陽光発電システム、コンポーネント分野

(1) B. Burger ら (Fraunhofer ISE) は、“Module Integrated Electronics” と題して、Active バイパスダイオード、DC/DC コンバーター、Micro インバーターについて報告した。今後は、パワーエレクトロニクス系も高効率化、長寿命化、低コスト化が重要であるとしている。

(2) G. Betterwart ら (SMA Solar Tech) は、各種インバータ、AC モジュール、DC/DC モジュールについて比較検討を行っている。パラレル string インバータおよびマルチ string インバータは、ほとんどの PV プラントに適用可能で、AC モジュールや DC/DC モジュールは特殊用途で、マイクロ住宅用 PV プラントなどに、適用可能としている。

(3) J. Poortmans ら (IMEC) は、スマート PV モジュールに関する検討結果を報告した。他の電子回路のインテグレーションを想定して、i-module (interconnect module)、i²-module (integrated interconnect module)、Si²-module (smart i²-module) が検討されている。高効率、高周波・高速スイッチングデバイス用 2-DEG パワー MOSFET として、AlGaIn/GaAs ヘテロ構造や GaN-on-Si デバイスが検討されている。結晶欠陥が課題である。

(4) D. DeGraaff ら (SunPower) は、SunPower 社における結晶 Si 太陽電池モジュールの信頼性試験の方法論について講演した。加速寿命試験として、① UV 試験、② オープン試験、③ 電圧印加しながらの 600 時間のダンプ熱試験、④ 85°C 85% の高温高湿試験、⑤ -40°C ~ 60°C の熱サイクル試験、がなされ手いる。相対効率が 2~6% 低下するものもあり、EL イメージでリーク電流増加を観測している。また、熱サイクル試験で、マイクロクラックが生ずるものもある。品質保証試験、特に、裏面シートの品質保証が必要で、熱サイクル試験、湿度試験、ダンプ熱試験、などが検討されている。今後は、製造者として、45 年の品質制御が必要で、封止材、裏面シートやバイパスダイオードの試験が必要である。加速寿命試験、加速ストレス試験など信頼性試験の継続的管理が要求される。

(5) 植田ら (東工大) は、北杜市の大規模 PV システムにおけるエネルギー変換損失モデルの構築を目指しての試みを報告した。24 種のモジュール約 2MW が設置されている。室内の dark および 1-sun の I-V 測定に基づき、モジュール損失解析、システム損失解析がなされた。モジュール温度および日射量測定もなされ、結晶 Si は特性劣化は少なく、アモルフ

アス Si 太陽電池の初期劣化は、10%程度であった。

(6) F. Baungettnerら (Univ. Adv. Sci. Zurich) は、他の再生可能エネルギーとの比較を述べ、PVの広範な導入普及のためには、PVのR&Dとコスト低減、蓄電のR&Dとコスト低減が必要とまとめた。

(7) D. Masaら (UPM) は、PVシステムからのエネルギー発生予測を報告した。日射量、外気温度等の予測をベース、3つのモデルを用いて、エネルギー発生を予測した結果が述べられた。現在のところ、数値的に気象を予測し、日射量や外気温度を予測するモデルが、良い結果を得ている。今後は、非線形、エラーフィードバック、ニューラルネットワークが重要と述べた。

(8) S. Giostraは、PVを用いた住宅、オフィス、ミュージアムなどのデザインについての試みを紹介した。

4. 5 国家プログラム、政策

(1) J. Lushetsky(DOE)は、“Overview about Policies and Markets for PV in the America”と題して、米国のPV政策、市場について報告した。図24には、米国における太陽光発電予算の変遷を示す。過去4年間で、PV予算は急激に増加した。最初の増加は、2007年度で、“Solar America Initiative”の開始で、grid parityのターゲットを2020年から2015年に前倒ししている。最近の2009、2010年度の予算増加は、PVの導入・普及や国内製造の強化を狙ったものである。2010年度の集光関係予算が約1/4を占めており、米国の集光PVにかける期待が大きい。

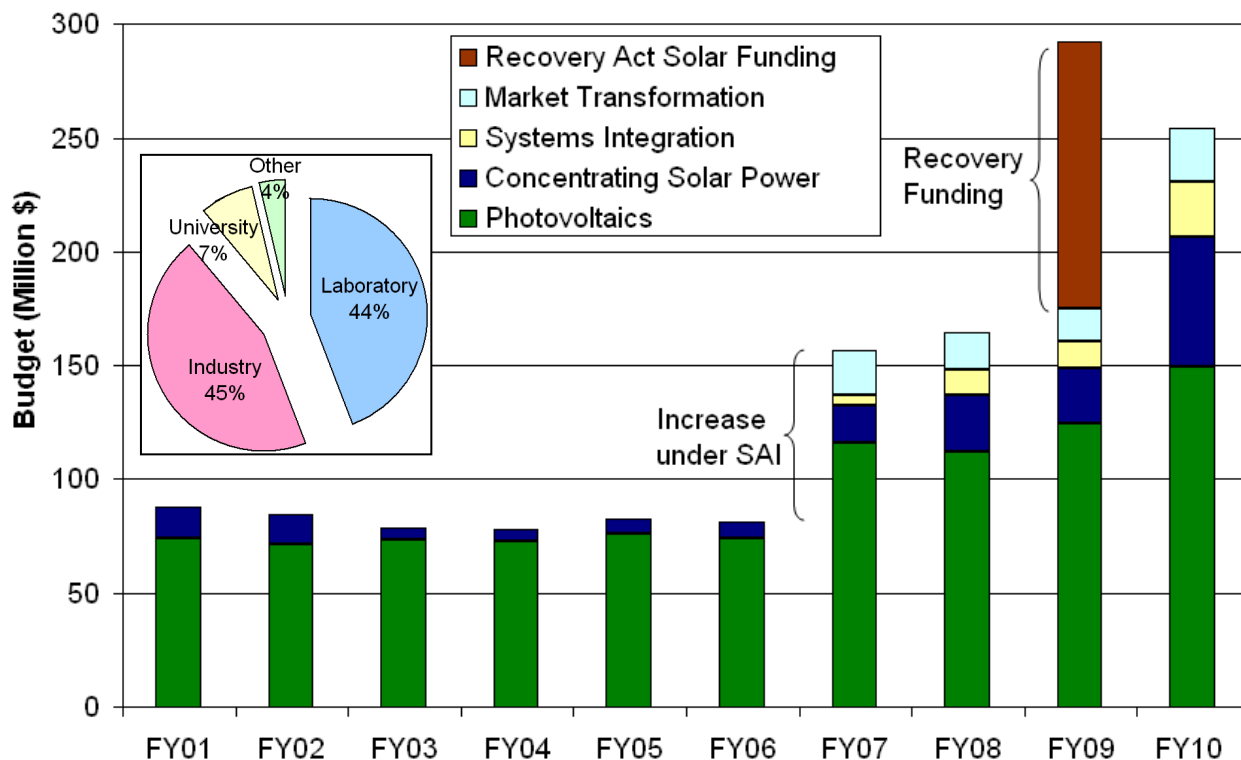


図24 米国における太陽光発電予算の変遷

図 2 5 には、DOE における太陽光発電の研究開発、製造とプロジェクトの概要を示す。Next Generation プロジェクトでは、材料科学や革新型デバイスから始まり、デバイスアーキテクチャ、プロトデバイス作製、製品開発・プロセス開発への流れを意図している。電力コスト（システムコスト）も、2010年の21-30セント/kWh（\$3.4/W）から、2020年8-13セント/kWh（\$2.2/W）、2030年7-12セント/kWh（\$1/W）のターゲットがある。

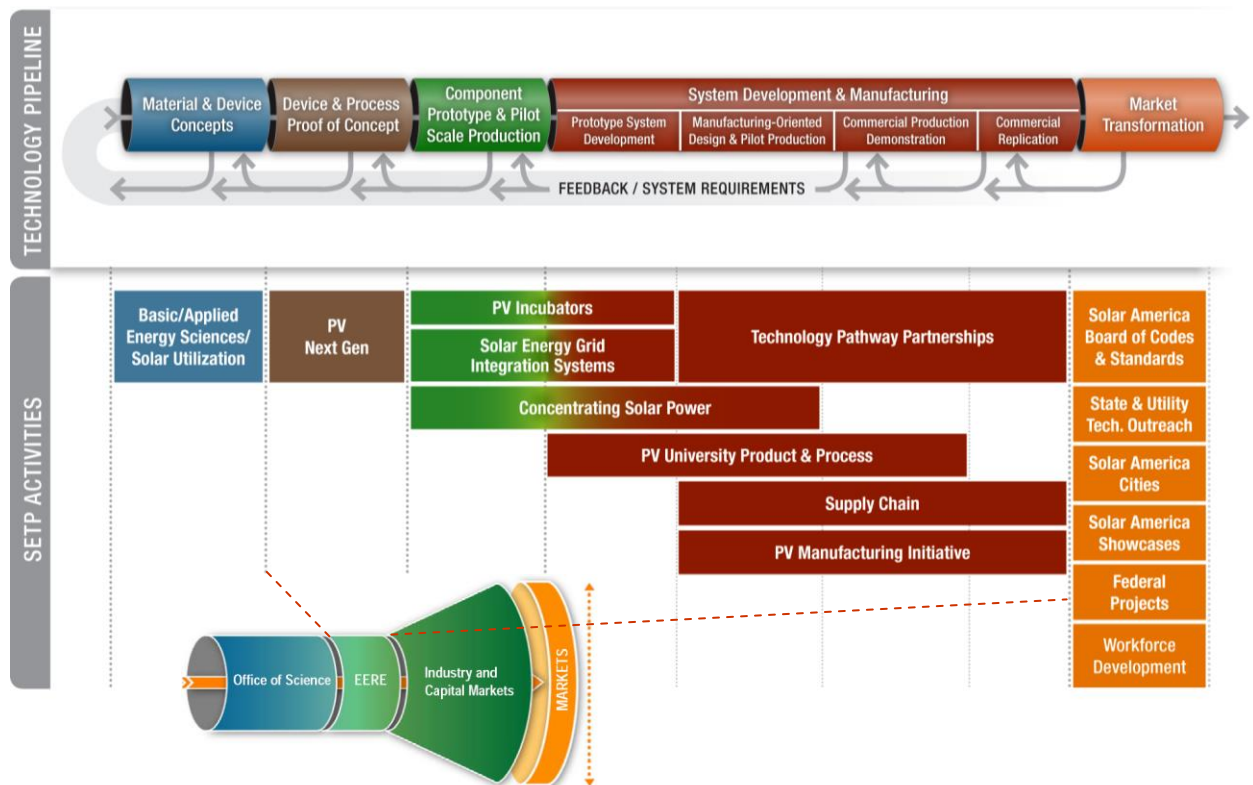


図 2 5 DOE における太陽光発電研究開発、製造とプロジェクトの概要

(2) 一木ら (RTS) は、“Current Status and Future Prospects of the PV Market in Asia” と題して、アジアのPV市場の動向と今後の見通しを述べた。表 5 に、アジア主要国の太陽光発電累積導入量ターゲットを示す。

表 5 アジア主要国の太陽光発電累積導入量ターゲット

	Japan	China	India	Korea	Taiwan
2010	2.627GW	300MW	200MW	441.9MW	4.08MW
2015		(5GW-unofficial)		1.2GW (2016)	
2020	28GW	1.8GW (20GW-unofficial)	22GW (2022)		1GW
2030	53GW				

(3) W. Hoffmann (EPIA) は、“Europe PV Deployment on its Way towards 12% Electricity Share by 2020 and Integrating MENA into the Greater Energy Picture” と題して、欧州のPV市場の動向およびシナリオを報告した。2020年には、欧州全体で、

悲観的ケース、中間、楽観的ケースの各々、132GW、198GW、389GWの太陽光発電累積導入量を予測している。表6は、欧州主要国の2020年の太陽光発電累積導入量の予測を示す。

表6 欧州主要国の2020年の太陽光発電累積導入量の予測 (GW)

	Germany	France	Italy	Spain	UK
Pessimistic	33	21	17	11	8
Intermediate	50	30	25	17	11
Optimistic	80	60	55	40	22

5. 感想

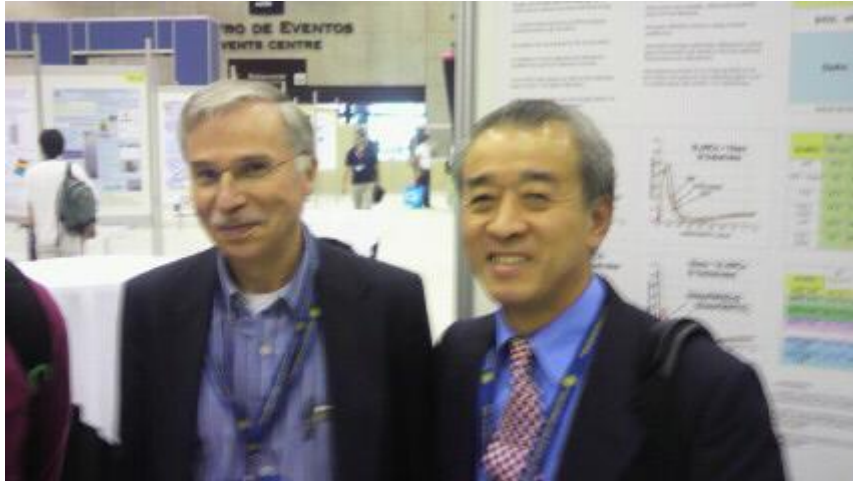
今回の会議は、太陽光発電に関する最大の会議となった。ただし、展示も大型化し、商業主義に走りすぎとの批判も聞こえている。

現在主流の結晶Si系は、本会議での発表論文数も458件と多く、企業や大学、研究所による研究開発の裾野の広がり是他分野を圧倒しており、今後10年は結晶Si系が主流であり続けることが期待される。勿論、そのためにも、研究開発の一層の強化が重要なポイントの一つであると言えよう。将来のためには、大学や国研主導型の研究開発の推進が必要であろう。また、韓国サムソンの結晶Si太陽電池への毎年1000億円投資のアナウンス等、中国、台湾、韓国における結晶Si太陽電池の動向は脅威である。半導体LSIの二の舞となることが懸念される。わが国には、太陽光発電に関し、他国が真似をできない高度な研究開発を行うことが求められている。

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。また、集光型多接合多層電池の高効率化が進み、50%以上の超高効率を達成する一番手は、III-V化合物半導体を用いた集光型多接合太陽電池であることが示されてきたと言えよう。

しかし、第3世代PVやDARPAの将来テーマを含めて、新材料や新型構造太陽電池の研究テーマは実現の可能性は低いが、生き長く研究開発を進めるべきだと思う。5年間のプロジェクトで目標達成はできなくとも、予算規模を少なくして、将来のために、革新的な探索研究を続けて行く必要がある。

1975年に“Solar Cells”の教科書を出し、GaAsヘテロ接合セルのパイオニアであるJ. H. Hovel博士 (IBM) にお会いできたのは、幸運であった。また、PVの分野に戻って来て、ポスター発表する姿に学ぶべきものを感じた。



次回の26th EU-PVSECは、2011年9月5日～8日に、ドイツのハンブルグで開催予定である。EU-PVSECは展示会開催が主になりつつあり、展示場を備えた大都市でしか開催できない状況は、寂しい気がする。また、第37回IEEE光起電力専門家会議は、2011年6月18日～24日に、米国・シアトルで、第21回太陽光発電国際会議（PVSEC-21）は、2011年11月28日～12月2日に、横浜で開催予定である。

（以上）