

第 22 回太陽光発電欧州会議 (22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告

2007.9.19

山口 真史 (豊田工大)

1 . 開催月日 : 2007年9月3日~7日。

2 . 開催場所 : Fiera Milan (ミラノ、イタリア)。

3 . 本会議の概要 :

毎年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、G. Willeke(Fraunhofer ISE、ドイツ)で、論文委員長は Heinz Ossenbrink (EC-JRC、イタリア) であった。

83 カ国から約 3,000 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 に、国別参加者数を示す。国別では、ドイツ 947 名、米国 460 名、イタリア 212 名、スペイン 157 名、日本 155 名、ノルウェー138 名、フランス 123 名、オランダ 116 名、韓国 104 名、スイス 94 名、英国 77 名、台湾 76 名、ベルギー70 名、オーストラリア 62 名、中国 59 名の順であった。

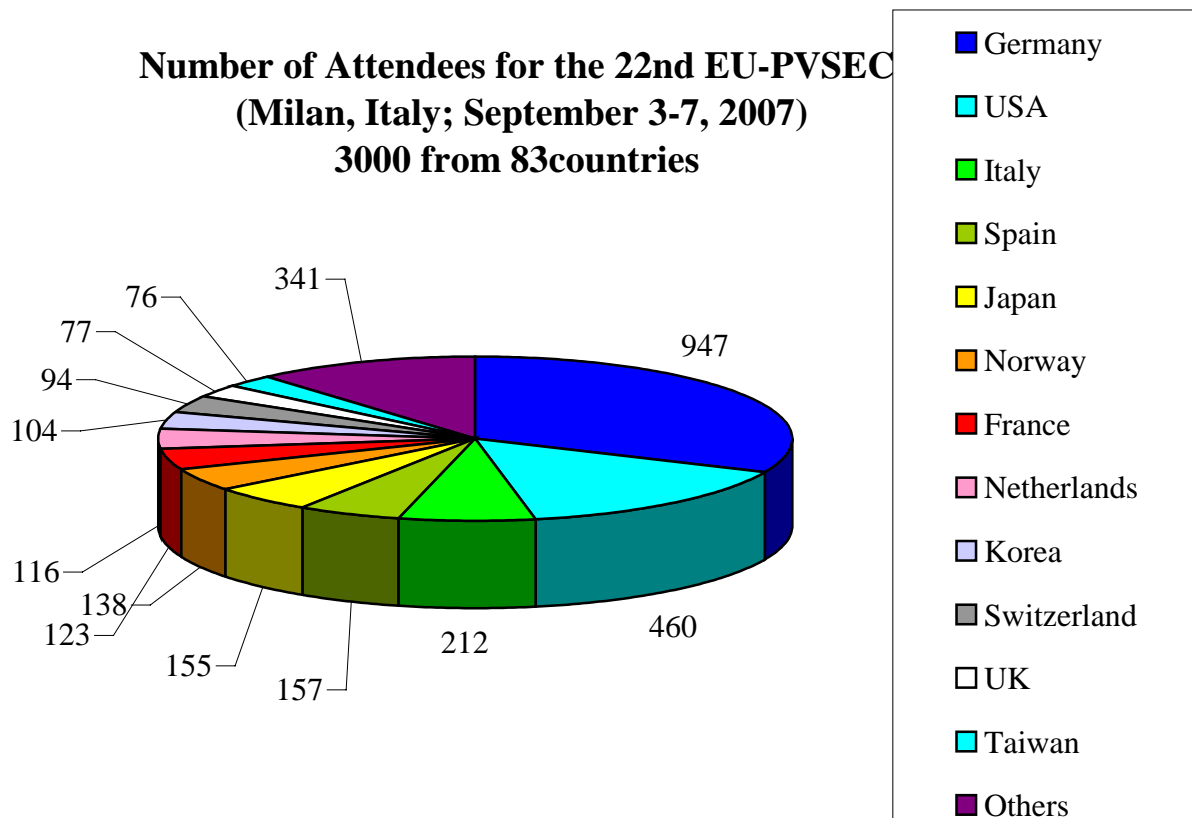


図 1 国別参加者数

**Number of Papers presented at the 22nd EU-PVSEC
(Milan, Italy; September 3-7, 2007)
1103 Papers**

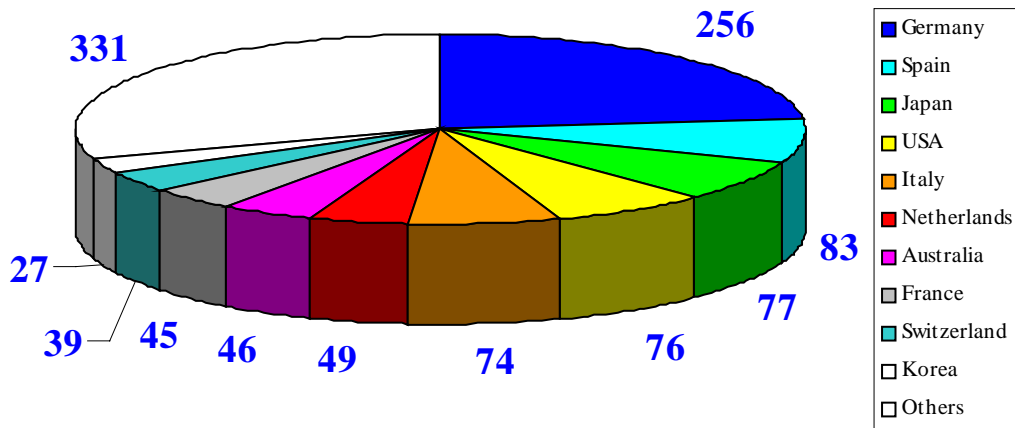


図 2 国別発表論文件数

図 2 は、国別発表論文件数を示す。71カ国から1103件の論文発表が予定されていた。国別では、ドイツ256件、スペイン83件、日本77件、米国76件、イタリア74件、オランダ49件、オーストラリア46件、フランス45件、スイス39件、韓国27件、の順であった

**Number of Papers presented at the 22nd EU-PVSEC
(Milan, Italy; September 3-7, 2007)
1103 Papers**

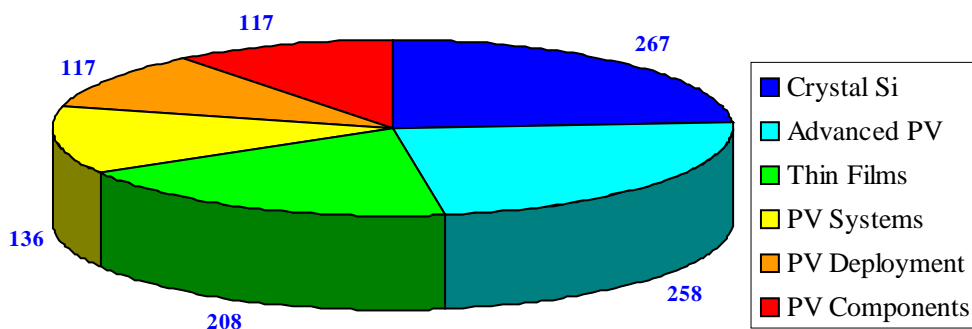


図 3 発表論文件数の分野別内訳

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267件、先端PV（基礎・新材料・素子）258件、薄膜系208件、PVシステム136件、PVコンポーネント117件、国家プログラム・PV市場117件、の順であった。

この他、32カ国から520社の展示があった。

4. 主な発表論文の概要

プログラム委員会のまとめた本会議のハイライトを交えて、本会議のトピックスの概要を述べる。

4.1 超高効率太陽電池分野：

(1) R. Kingら (Spectrolab) は、“Multijunction Solar Cells with Over 40% Efficiency and Future Directions in Concentrator PV” と題して、一族化合物多接合太陽電池、集光型太陽電池の現状と今後の方向性を述べた。

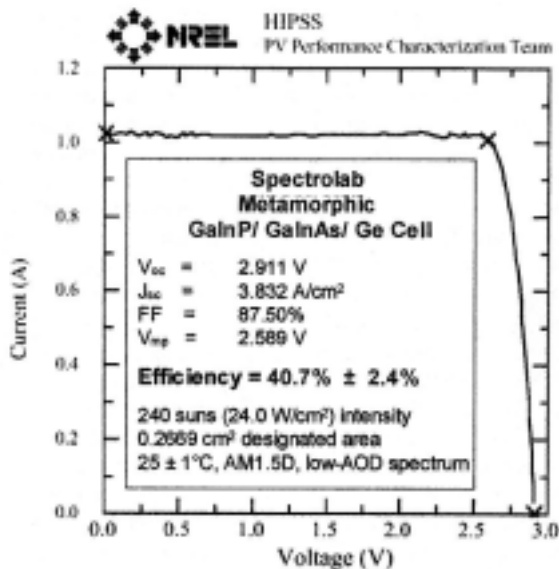


図4 40.7%格子不整合3接合セルの240倍集光I-V特性

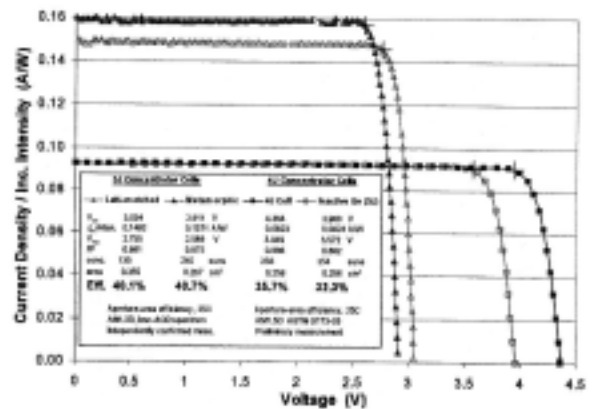


図5 4接合GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge集光セルのI-V特性

Ge基板上にMOCVD成長によりGaInP/GaInAs/Ge 3接合セル（面積0.2669cm²）が作製され、図4に示すように、AM1.5Dの240倍集光で40.7%の高效率化を達成している。格子整合系3接合セルの効率40.1%に対して、格子不整合系3接合セルで世界最高効率を実現している。さらに、次世代集光型太陽電池として、4～6接合セルも検討されている。GaInP(1.86eV)/AlGaInAs(1.62eV)/GaInAs(1.38eV)/Ge(0.67eV) 4接合セル（面積0.256cm²）が作製され、図5に示すように、AM1.5Dの256倍集光で効率35.7%を得ている。バンドギャップ1.9eV/1.43eV/1.03eV/0.67eVの4接合セルで効率47%が期待できる。2010年までに、モジュール効率40%、電力コスト0.15ドル/kWh、2015年までに、43%、0.07ドル/kWhを目標としている。図6に、一族化合物集光型多接合セルモジュールのSpectrolabによる生産量予測をSharpによる予測と比較して示す。2016年の生産量1.3GWを予測している。

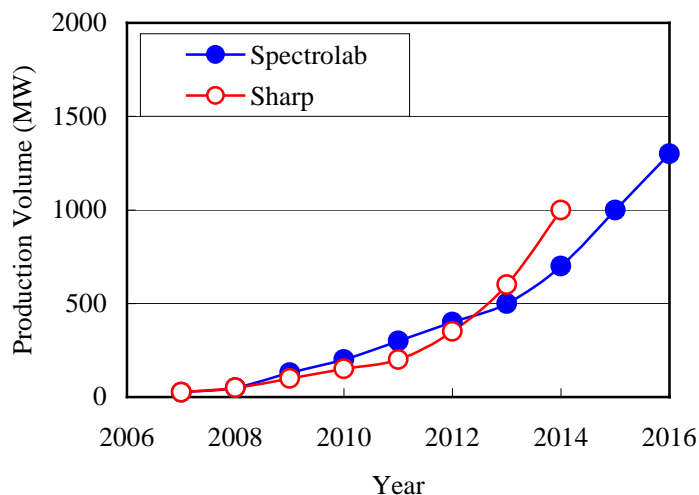


図6 - 族化合物集光型多接合セルモジュールの生産量予測 (SpectrolabとSharpによる予測比較)

(2) W. Guterら (Fraunhofer ISE) は、“Investigation and Development of III-V Triple-Junction Concentrator Solar Cells” と題して、格子不整合系3接合セルの課題の一つである転位挙動について報告した。Ge基板上のGaInAsのMOCVD成長が検討されている。バッファ層としてstep-graded GaInAsが導入されている。格子不整合歪は緩和され、格子不整合転位は界面に発生しているが、太陽電池活性層には転位は見られない。また、エピ成長表面に見られるクロスハッチパターンは電気的に不活性である。トンネル接合を形成すると、図7に示すように、トンネル接合からの転位発生が

見られる。転位は積層欠陥を伴っており、局所ストレスが生因ではないかと考えている。

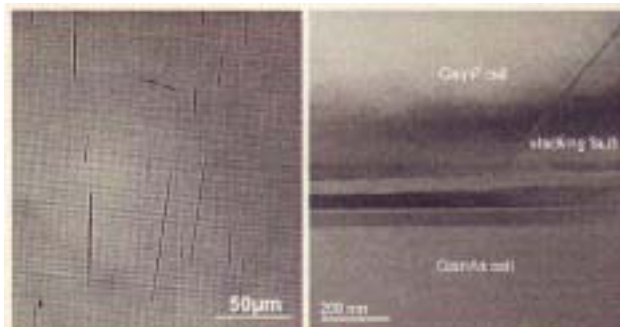


図7 3接合セル表面の顕微鏡写真(左)とトンネルダイオード上のトップセルの断面TEM暗視野像(右)

(3) A. Barnettら (Univ. Delaware) は、“Milestones Toward 50% Efficient Solar Cells” と題して、DARPA (米国・国防総省国防高等研究事業局) の効率50%以上の実現を目指した超高効率太陽電池 (VHESC) プロジェクトの進捗状況を報告した。

4~6接合の多接合化により、効率50%以上の超高効率化が期待できる。このプログラムでは、図8に示すように、6接合セルにより効率50%の達成を目標としている。図9に示すように、太陽光をフレネルレンズで集光し、dichroicプリズムで短波長光と長波長光を分離し、空間的に分離配置した複数のセルで受光する構成である。今回は、Emcore製 GaInP/GaAs 2接合セル (面積0.1245cm²) の20倍集光で効率31.7% (図10)、Univ. Delaware で作製した a-Siヘテロフェイス n型ベースSiセル (0.158cm²) のGaAsフィルター下での20

倍集光で効率4.98%、NRELで作製したGaInAsP/GaInAs 3 端子 2 接合セルのSiフィルター下での20倍集光で、効率3.46% + 2.79% = 6.25%を得ている。等価的に5 接合セル構成で、これらの効率の積算として、31.7% + 5% + 6.2% = 42.9%を得たとしている。今後、光学系や各サブセルの最適化により、効率50%モジュールの実現が期待できるとしている。

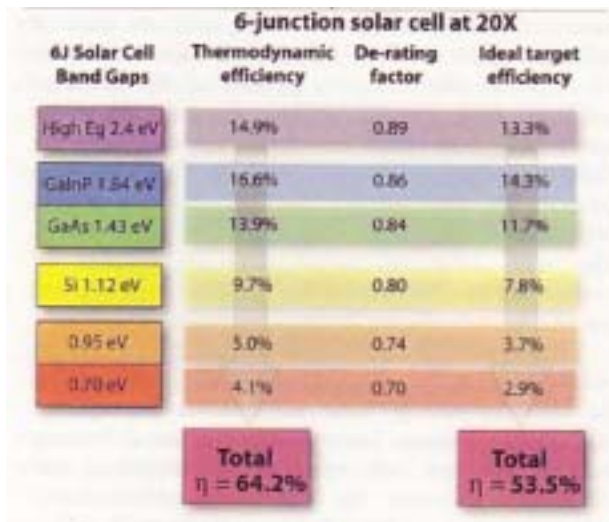


図8 提案6 接合セル設計の予想効率

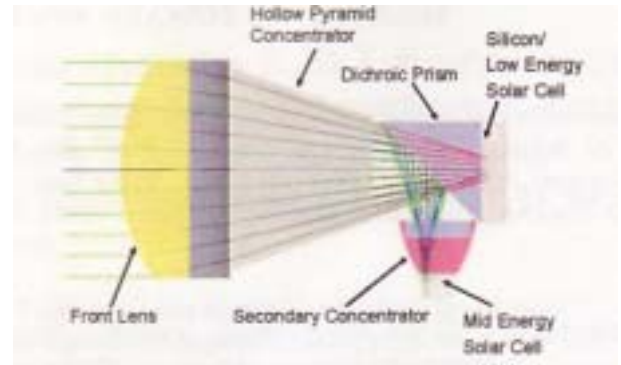


図9 概念設計証明のためのコンポーネント構成

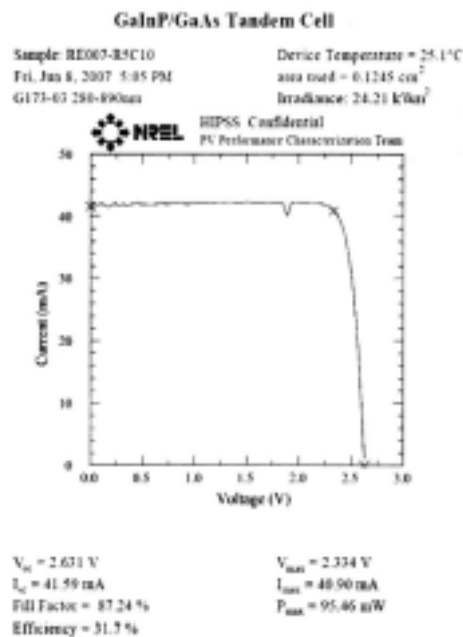


図10 Emcore製GaInP/GaAs 2 接合セル（面積0.1245cm²）の20倍集光下でのI-V特性

(4) M. Green (UNSW) は、第3世代PVのうち、Siベースのタンデムセルの試みを報告した。前回に比べて、進展はない。3接合タンデムセルで効率50.5%が期待できる。図11に示すように、非化学量論的組成のSi₀、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12に示すように、QDからのフォトルミネッセンスにおいて、2~5nmサイズの量子ドットにおいて1.3~1.65eVの高

バンドキャップ化、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。2008年までに概念を確認したいとの事であるが、課題として、再結合、輸送、ドーピング、セル設計などがある。

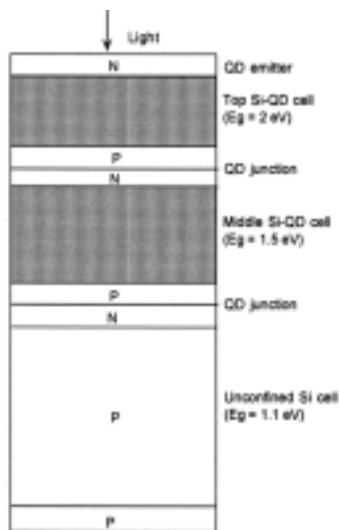


図11 量子ドット (QD) を用いたSi系3接合タンデムセルの構造

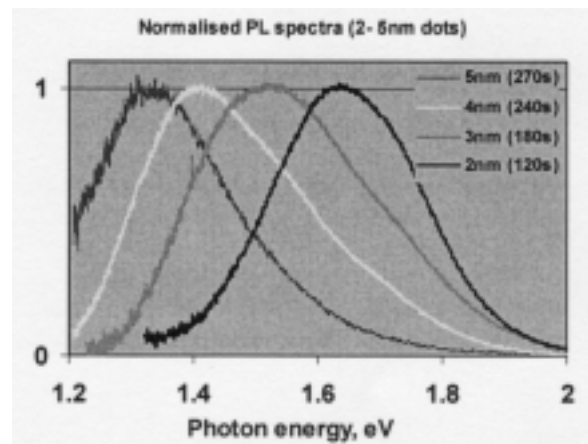


図12 量子ドット (QD) からの室温フォトルミネッセンス

4.2 結晶Si太陽電池分野：

(1) K. Hesse (Wacker-Chemie) は、“An Overview on Silicon Feedstock”と題して、太陽電池用ポリSi原料生産の動向とWackerの取り組みを報告した。図13に、2012年までの原料Siの需要予測を示す。2012年での需要は10~20万tと2006年の2~4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13万tである。Wackerの生産量は、2006年の6500tから2010年までに2.2万tまで増強するとのアナウンスがあった。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、等があるが、Wacker自身が2000年から2006年にかけて製造コストを46%削減しており、今後トリクロロシランをベースとしたSiemens法が原料Si製造の主流であろうとしている。

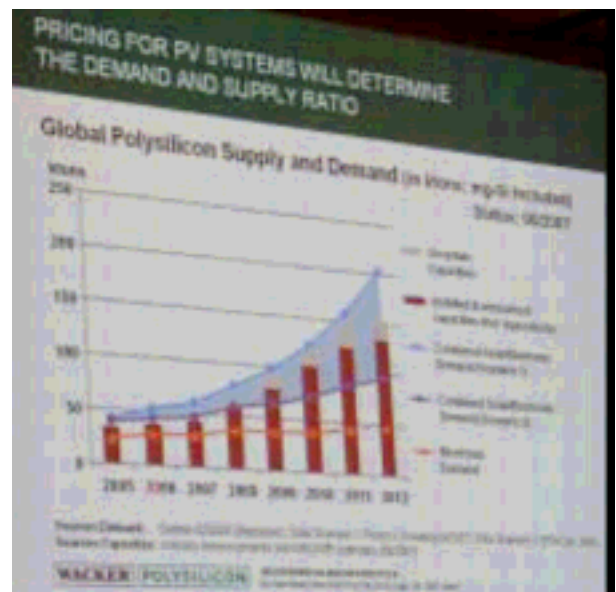


図13 太陽電池用原料Siの需要予測

(2) E. Alsemaら (Univ. Utrecht) は、“Reduction of the Environmental Impacts in

Crystalline Silicon Module Manufacturing”と題して、最近の結晶Si太陽電池技術に対するLCA (Life Cycle Assessments) 解析結果を報告した。表1には、結晶Si太陽電池モジュール製造における地球温暖化ガス放出抑制を実現するためのオプション（工程や要素技術）と環境改善やコスト低減の可能性、適用のための主要障壁がまとめられている。

表1 結晶Si太陽電池モジュール製造における地球温暖化ガス放出抑制を実現するためのオプション（工程や要素技術）と環境改善やコスト低減の可能性、適用のための主要障壁

Measure	Reduction potential	Synergy with cost reduction	Main barriers for adoption
New silicon feedstock process with reduced energy consumption	+++	yes	Technological complexity, material quality, capital requirements
Reduction of silicon consumption	++	yes	Wafer quality, sawing techn., wafer handling, wire strength
Improved energy-efficiency in ingot growing (mono+ multi)	+	somewhat	Uncertainty about cost, lack of urgency, long equipment life
Slurry recycling	+	yes	Concerns about quality loss?
Improved energy-efficiency in cell and module manufacturing	+	little	No sense of urgency
Frameless modules	+	Probably not	Concern for module lifetime
EOL recycling of modules	+	Uncertain	Module disassembly is quite difficult; long module life times make it difficult to organise take-back system
Abatement of FC gas emission	+	none	No sense of urgency, higher costs
Abatement of NOx emission from etching process	?	none	No sense of urgency, higher costs
Lead-free pastes and solders	+	none	Technical problems, low sense of urgency
Reduced water consumption	Location dependent	None	No sense of urgency, higher costs
Contacting without silver	+	perhaps	No good candidate available yet
Design-for recycling module concept	++	?	No good candidate available yet, low sense of urgency

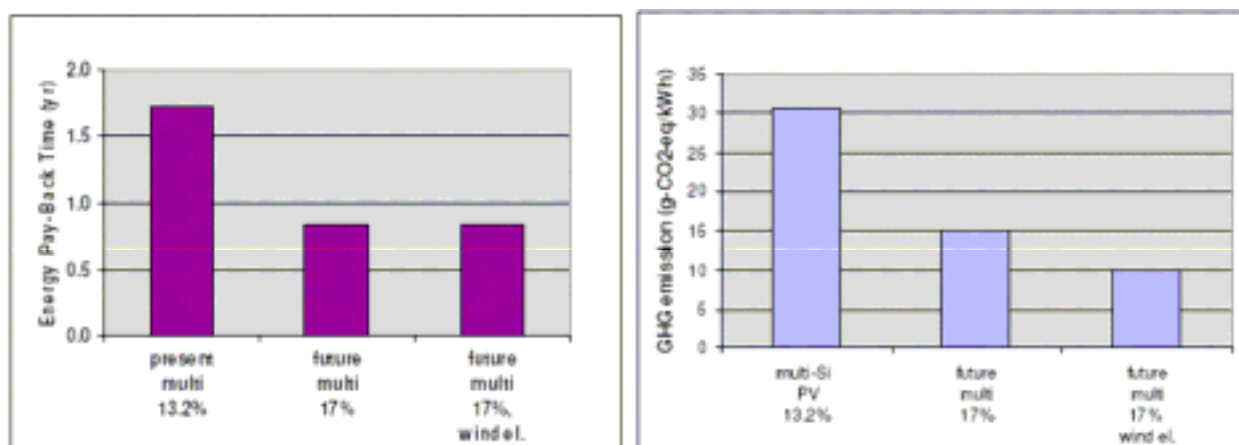


図14 南欧（日射量1700kWh/m²/year）における多結晶SiルーフトップPVシステムを想定した場合のenergy pay-back time（左）と地球温暖化ガス放出に関する改善の可能性（右）

また、図14には、南欧（日射量1700kWh/m²/year）における多結晶SiルーフトップPVシステムを想定した場合のenergy pay-back timeと地球温暖化ガス放出に関する改善の可能性を示す。energy pay-back timeも現行の1.7年から1年以下に、地球温暖化ガス放出も30g/kWhから10～15g/kWhに低減できる可能性がある。今後も、コスト低減と両立させながら地球温暖化ガス放出抑制に有効な技術開発を進める必要があるが、同時に、エネルギーや材料消費、環境放出や廃棄物生成に関する透明性を高めることは、企業理念にも影響するが、公共の理解を増すことになり、関連分野の発展につながろうと述べた。

（3）n型基板を用いた結晶Si太陽電池に関しては、Sanyoが100cm²のHIT（Heterojunction with Intrinsic Thin-layers）セルで効率22.3%を報告した。これまでの21.8%から、グリッド電極や反射防止膜の改善により、効率改善がなされた。

SunPowerからは、バックコンタクト型のn型単結晶Si太陽電池の損失解析結果が報告された。この結果をもとに改良した太陽電池では、平均効率が20.8%から22.4%に改善されている。96セルモジュール327.6Wモジュールで変換効率20.1%が得られている。太陽電池生産量を現行の110MWから2008年に250MW、2009年に400MWに増産するとアナウンスした。

ECNからは、電極を全てスクリーンプリントした裏面AIエミッタセルに関する報告があった。n型FZ単結晶Si基板を用いたセル（140cm²）で効率17.4%、CZ単結晶セル（99.5cm²）で17.0%、多結晶セル（151cm²）で14.4%を実現している。しかし、この構造では、表面パッシベーションが改善されても、効率18%程度が限界のようである。

（4）結晶Si太陽電池は、薄型化の方向にある。Meyer Burgerからは、ワイヤースライス時のスライス条件と発熱の関係について報告があった。ワイヤー径120μm、ウエハー厚75μmのスライス条件で、500枚のウエハーで90%以上の収率が得られており、多結晶Si太陽電池の薄型化に向け、朗報であると言える。

（5）Konstanz大からは、RGS（Ribbon Growth on Substrate）ウエハーを用いた太陽電池のポテンシャルに関する報告があった。スライス工程がないため、キャスト成長多結晶に比べて、原料Si重量当り出力で有利であるとしている。例えば、キャスト成長ウエハーを用いたセル（250μm厚/効率15%）の単位出力当り重量10.5g/Wに対して、RGSセルで、300μm厚/効率13%の場合5.4g/W、130μm厚/効率10.6%の場合2.9g/Wであるとしている。今回、リソグラフィ技術を用いたRGSウエハーセル特性に関する報告があった。2x2cm²の300μm、210μmおよび130μm厚セルで、各々、効率14.4%、13.0%、11.6%を得ている。5x5cm²の300μm、100μm厚セルで、各々、効率13.1%、10.6%を得ている。また、スクリーン印刷を用いたRGSセルでは、200μm厚の4.9x4.9cm²セルで、効率12.3%、9.8x9.8cm²セルで、効率11.9%を得ている。結晶粒径がmm以下と小さく、基板から等の不純物混入も多く、C濃度は10¹⁸ cm⁻³以上との事であり、キャスト成長ウエハーを用いた場合に比べて変換効率が低い原因となっている。RGSを含めたりボン結晶技術の優位性はほとんどなくなりつつあると考えられる。

4.3 アモルファス、ナノ/微結晶薄膜 Si 太陽電池分野：

結晶Siの原料問題が続く中、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) A. Jaeger-Waldau (EC-JRC) は、薄膜太陽電池の現状と動向について、プレーナリ講演を行った。130以上の企業が、薄膜太陽電池分野に参画し、2006年、21の企業が薄膜太陽電池を生産した。78社（欧州33社、米国19、中国12、日本9、他8；薄膜Si44社、CIS19、CdTe8、色素他5）が増産をアナウンスしている。図15は、生産増強のアナウンスをもとに予測した薄膜太陽電池系の生産規模を示す。しかし、増産の時期に不確かさがある。

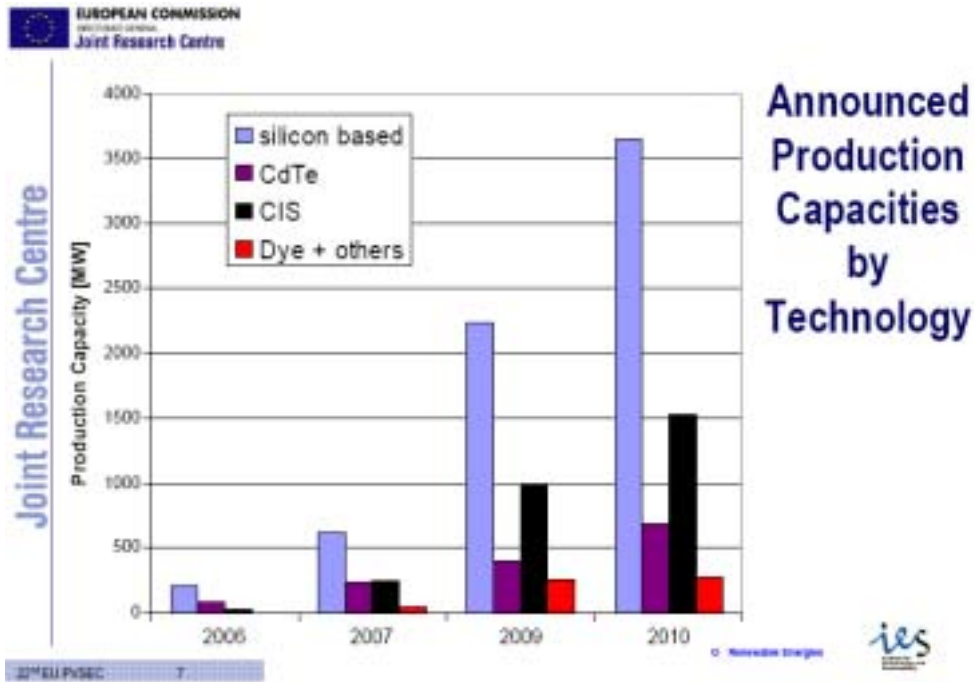


図15 投資や生産増強のアナウンスをもとに予測した薄膜太陽電池系の生産規模

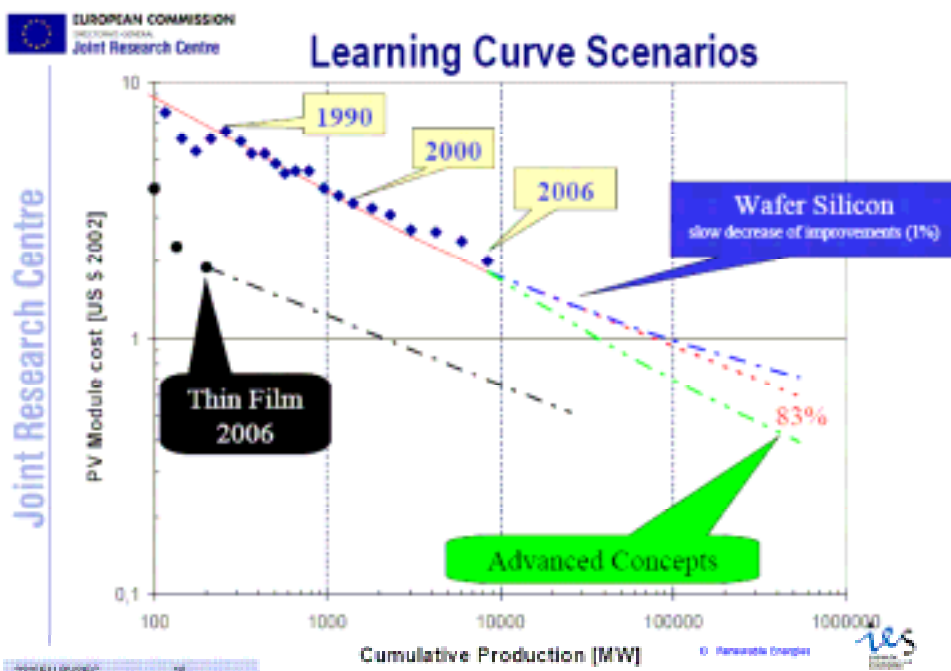


図16 結晶系と薄膜系のモジュールコスト比較

図16には、結晶系と薄膜系のモジュールコスト比較を示す。薄膜PVは、アナウンス通り生産量が增強されれば、1ユーロ/W以下を実現できる可能性がある。また、図17に示すように、PV市場予測がなされているが、PV市場の拡大のためには、まだしばらくは国の助成を必要としている。

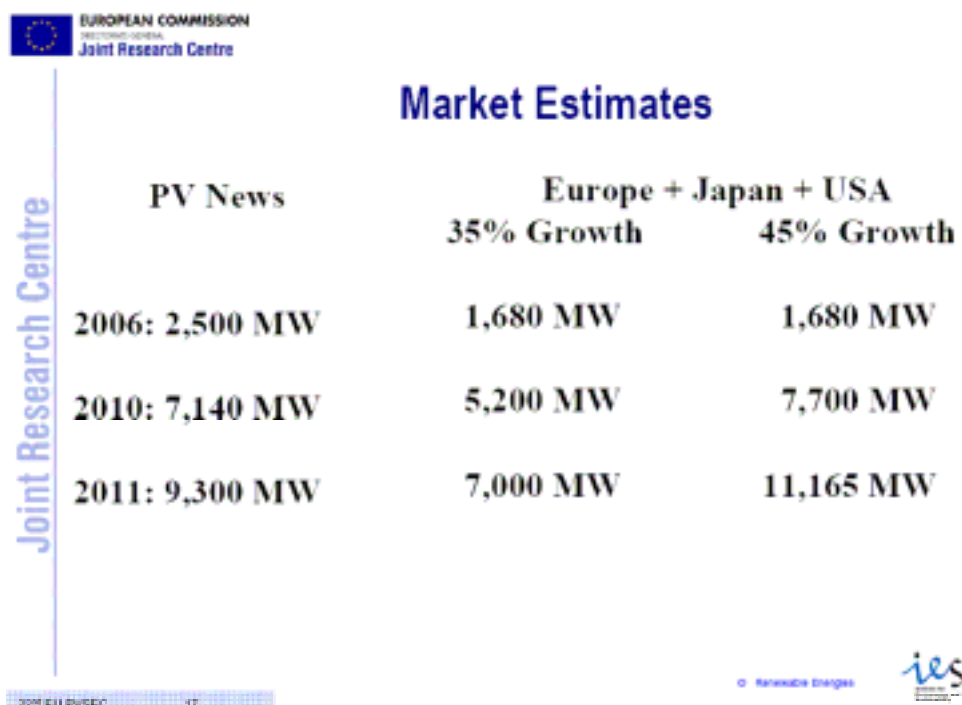


図17 PV市場予測

(2) H. Takatsuka (三菱重工) はプレーナリ講演において、薄膜Si太陽電池のコスト低減に向け、高効率化、高速堆積、大面積基板(1.4m×1.1m)、歩留まりが重要であると述べた。高周波(70MHz)プラズマCVDの適用により、2.3m/sの高速堆積を実現し、420mm×570mmモジュールで、平均効率12.83%を実現している。三菱重工は、2002年秋からアモルファスSi(a-Si)モジュール生産(10MW/年)を開始し、2007年度末までに28MW、2007年秋からはa-Si:H/微結晶(μc-Si:H)タンデムセルモジュールを年産40MWの計画である。次は、100MW生産であるとしている。

(3) Applied Materialsからは、薄膜Si太陽電池分野への参入の現状が報告された。面積1cm²の単接合セルにおいて、a-Siセルで効率9.7%、μc-Siセルで7.7%、面積1.4m²のa-Si:H/μc-Si:Hのタンデムセルモジュールで10.4%を得ている。安定化460Wモジュールのための5.7m²CVDシステムを検討中とのことである。

(4) Oerlikonからは、面積1.4m²のa-Si:Hの単接合セルモジュールで効率9.6%(安定化後20%低下)、微結晶Siセルモジュールで効率9.46%を達成している。20台のプラズマCVDからなる製造システムを提示している。

4.4 CIGS、 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いかったり、不活性化されていいたりして、結晶粒径 $1\mu\text{m}$ でも高効率が期待できる。

(1) M. Lux-Steiner ら (HMI) は、EU ATHLET (Advanced Thin Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics) プロジェクトの状況について、プレナリ講演を行った。図 18 にプロジェクト構造を示す。24 機関が参画し、6 つのサブプロジェクトから成る。

そのうちの一つの高効率太陽電池は、3 項目から成る。フレキシブル基板上およびタンデム用 CIGS 太陽電池 (ETHZ、CNRS-ENSCP、HMI、Solarion、ZSW、FUB) は、金属箔上で効率 18%、ポリマー上で 15% のフレキシブル CIGS 太陽電池の開発と roll-to-roll の工業プロセスによる効率 10% 以上のモジュールの開発を目指す。先端 Si 薄膜多接合太陽電池 (UniNE、FZJ、SGR、CIEMAT) は、ガラス基板上の安定化効率 14% 以上の薄膜 Si 多接合セルの開発を目指す。高効率薄膜多結晶太陽電池 (IMEC、HMI、SGR) は、効率 15% 以上の実現を目標としている。最近の成果として、 27cm^2 の Ti 箔上に効率 15% のフレキブル CIGS セルを実現している。

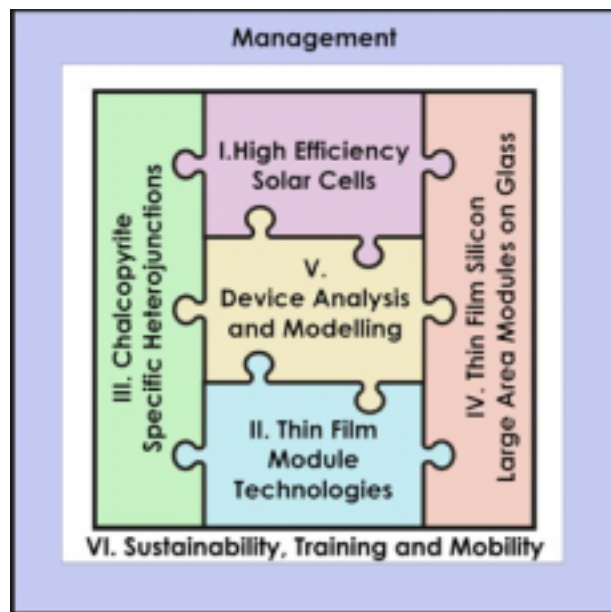


図 18 EU ATHLET のプロジェクト構造

(2) Wuerth Solar からは、同社における CIGS 太陽電池モジュール生産の状況が報告された。同社の 2006 年の生産量は 1.5MW で、2007 年の生産規模は 15MW で、2008 年春までには 30MW まで増強するとの事である。 $30\times 30\text{cm}^2$ モジュールについては、1991 年の効率 8.3% から現在約 15% に向上がはかられ、 $60\times 120\text{cm}^2$ モジュールについては、13.2% で、エネルギーペイバックタイムも 1.5 年と結晶 Si 系より良いとしている。

(3) SulfurCell 社では、 $1.25\times 0.65\text{m}^2$ モジュールも試作されており、効率 8% を実現している。2004 年の 35W モジュールから改善がはかられており、2010 年には 85W モジュール (効率 10.7%) の実現を目指すとしている。

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。

4.5 国家プログラム、政策：

(1) W. Sinkeら (ECN)は、“A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology – Report of the EU PV Technology Platform”と題して、Sinke氏が委員長として、24名で構成されたワーキンググループ (Science, Technology and Applications of the EU PV Technology Platform) がまとめた「EUにおけるPVの研究開発の今後の方向性」を述べた。太陽電池の効率等の性能目標、コスト・価格目標を明示し、それを踏まえて各種太陽電池、モジュール、システム分野での短期、中期、長期研究開発課題が提示されている。表2には、Strategic Research Agendaに含まれる主要ターゲットの要約を示す。

表2 Strategic Research Agendaに含まれる主要ターゲットの要約

	1980	Today (= 2007)	2015/2020	2030	Long term potential
Typical turn-key system price (2007 €/Wp, excl. VAT)	>30	5	2.5/2.0	1	0.5
Typical electricity generation costs southern Europe (2007 €/kWh)	>2	0.30	0.15/0.12 <i>(competitive with retail electricity)</i>	0.06 <i>(competitive with wholesale electricity)</i>	0.03
Typical commercial flat-plate module efficiencies	up to 8%	up to 15%	Up to 20%	up to 25%	up to 40%
Typical commercial concentrator module efficiencies	(~10%)	up to 25%	Up to 30%	up to 40%	up to 60%
Typical system energy pay-back time southern Europe (yrs)	>10	2	1	0.5	0.25

“Flat plate” refers to standard module for use under natural sunlight, “concentrator” refers to systems which concentrate sunlight (and, by necessity, track the sun across the sky).

(2) ドイツに続き、欧州各国でのFeed-in-Tariff制度が開始あるいは計画されている。

A. Lilloら (ENEA) は、“Status of PV Technology in Italy”と題して、イタリアにおけるFeed-in-Tariff制度、PVの研究開発状況を報告した。イタリアのPV積算導入量は2006年45MWであったが、Feed-in-Tariff制度(0.4ユーロ/kWh)により、32MWが稼動し、200MWを設置中との事である。2016年までの積算導入量目標は、3,000MWである。この他、イタリアでのPVの研究開発の現状に関する報告があった。ENEAは、結晶Si、a-Siや集光システムに関する研究開発を行っており、微結晶Siタンデムで効率11.3%の他、珍しいところでは、Cu₂Sセルで効率2%を得ているとの事である。CESIはGaAs単接合およびInGaP系3接合集光モジュールの開発を行っている。InGaP/InGaAs/Ge 3接合集光モジュールの300倍集光で効率30%を得ているとの事である。この他、ポリSi生産、CdTeセルに関する取り組みが紹介された。

(3)ギリシアの総電力に対する再生可能エネルギーの導入ターゲットは、2010年、2020年、各々、20%、29%である。PVに関しては、2020年までに500MW(系統連係)+200MW(諸島用)導入予定である。Feed-in-Tariff制度(0.4~0.5ユーロ/kWh)が開始され、昨年以來、4300件の申込があり、計画の4倍との事である。

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。今回の組織委員長も、科学、技術と市場のバランスを議論する時期とも言っていた。

現在主流の結晶Si系もfeed stock問題等、正念場であるが、本会議での発表論文件数が267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、この問題は2~3年以内に解決され、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る。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。

現在主流の結晶Si系がSi shortageで生産量の成長率低下が懸念されている昨今、薄膜SiやCIGS太陽電池等の薄膜太陽電池や集光型太陽電池も、絶好の機会であり、さらなる高効率化、低コスト化、生産性向上等による結晶Si系に相当する地位の確立を期待したい

第3世代PV、EUのFullSpectrumプロジェクトや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。CIGS太陽電池にしても、ベル研の最初のCIS太陽電池から30年が経過している。他の太陽電池でも、種から実りを得るまでには、それ相当の時間を要すると考えられる。

EU-PVSECは、毎年9月か10月に開催予定で、次回の23rd EU-PVSECは、2008年スペインのバレンシアで、24th EU-VSECは、2009年オランダのアムステルダムで25th EU-PVSECは世界会議WCPEC-5となり、2010年ドイツのベルリンで開催予定である。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。アジア・太平洋地区の第17回太陽光発電国際会議(PVSEC-17)は、2007年12月3日~7日、福岡国際会議場で開催予定である。33rd IEEE PVSCは、2008年5月11日~16日、San Diegoで開催予定である。

(以上)