

# 第35回 IEEE 光起電力専門家会議 (35<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2010. 6. 25

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日：2010年6月20日～25日。

2. 開催場所：Hawaiian Convention Center (ホノルル、ハワイ、米国)。

3. 本会議の概要：米国主催の太陽光発電会議で、前々回から、毎年開催されることとなった。今回の会議の組織委員長は Robert Walters (Naval Research Lab.) で、プログラム委員長は Richard King (Spectrolab) であった。

今回は、米国電気電子学会 (IEEE) 主催で開催され、39カ国から1,394名の参加者があった。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、①米国約800名、②日本約200名、③ドイツ約80名、④韓国約70名、⑤台湾約60名の順であった。

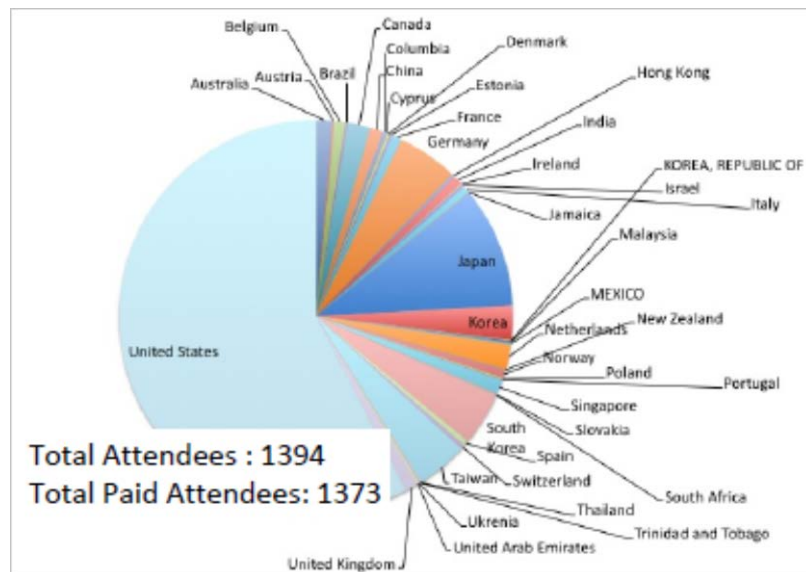


図1 国別参加者数

PV Velocity Forum等を通じて、各国のPVロードマップ、産業界の招待講演が企画され、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。

図2は、国別発表論文数を示す。約40カ国から1063件のアブストラクト (Late Newsを含む) 投稿があり、前回の34th IEEE PVSCに比べて50%増であった。招待講演を含めて976件の論文発表があった。国別では、①米国461件、②日本95件、③ドイツ67件、④韓国63件、⑤台湾50件、⑥オーストラリア23件、⑦インド23件、⑧オランダ22件、⑨中国21件、の順であった。

**Number of Papers to be presented  
at the 35th IEEE-PVSC  
(Hawaii, USA, June 20-25, 2010): 976 Papers**

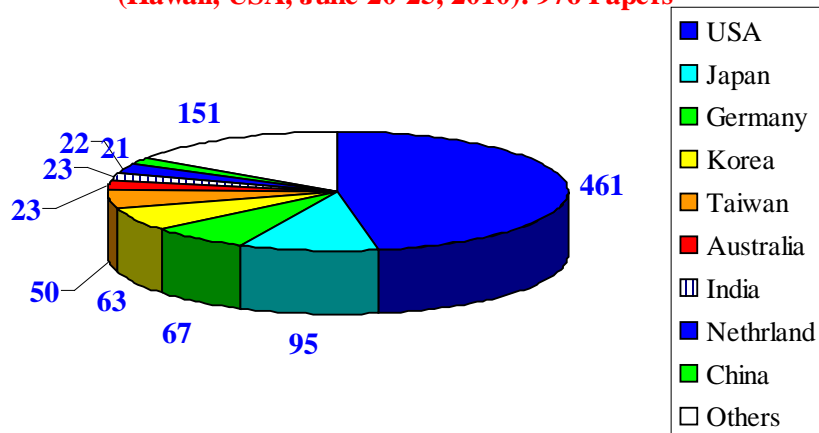


図2 国別発表論文件数

**Number of Papers to be presented  
at the 35th IEEE-PVSC  
(Hawaii, USA, June 20-25, 2010)**

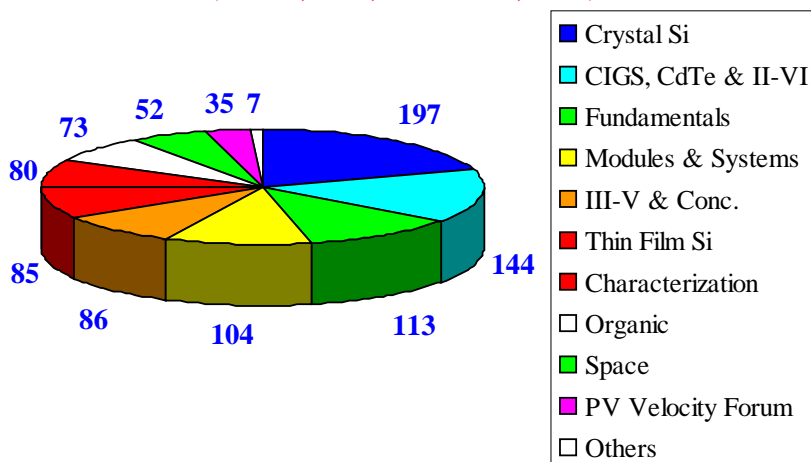


図3 発表論文件数の分野別内訳

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197件、②CIGS、CdTeおよびII-VI族系144件、③基礎及び新材料113件、④モジュールおよびシステム104件、⑤III-V及び集光86件、⑥薄膜Si系85件、⑦キャラクタリゼーション80件、⑧有機系73件、⑨宇宙52件、⑩PV Velocity Forum35件、⑪その他7件、の順であった。

この他、23社の展示があった。前回のSEIA主催の展示会に不満があったため、IEEE主催の小規模な展示会となった。

#### 4. 開会式基調講演の概要

(1) J. Alona (ハワイ州知事) は、本会議開催の歓迎の意を述べると共に、ハワイの太陽光発電を含む再生可能エネルギーに関する取り組みの一端を述べた。また、日米のクリーンエネルギーの共同開発に関して、オバマ大統領と鳩山前首相との間で、調印がなされている。ハワイと沖縄県との間でも再生可能エネルギーに関する協力が締結されており、今後が期待されるとの事である。

(2) R. Jindal (IEEE Electron Devices Society (EDS) 会長) は、EDSの新しい取り組みの一つとして、2011年から Journal of Photovoltaics を発刊を計画しており、Editor-in-Chiefに、Tim Anderson (Univ. Florida) の予定である。今回の機会に、初めて、EDSのCelebrated Memberの称号を、元ベル研のGeorge E. Smithに授与した。Smith博士は、ベル研で、1969年、W. Boyleと共に、CCD (Charge-Coupled Device) を発明し、2009年、ノーベル物理学賞を受賞している。

(3) R. Resch (SEIA) は、米国の最近の太陽光発電429MWの状況を紹介すると共に、今後の展望を述べた。米国では、約1000の企業が参入し、約4万6千人の雇用を生み出している。2009年の太陽光発電導入量は、429MWで、ドイツ3,800MW、イタリア700MW、日本460MWに次いで4位だが、対前年比38%の成長を見せている。2014年にドイツを抜き、2015年までに10GW/年導入を目標としている。このためには、①技術開発とコスト低減の継続、②太陽光発電市場を活性化するポリシー尺度の開発、③広範な教育と太陽光発電の重要性の教宣の推進、④製品と設置の質の維持、が重要であるとしている。

(4) J. Edmonds (Univ. Maryland) は、“The Energy Challenge of Climate Stabilization” と題して、地球のエネルギーバランス、温室ガス (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O) 放出の影響に関する考察が述べられた。CO<sub>2</sub>濃度に関しては、産業革命以前の280ppmから2010年の393ppmへと増加している。温室ガス排出に関して、ユティリティー分野では、90%まで削減可能だ、輸送分野が課題となろう。

#### 5. Cherry Award受賞記念講演の概要

(1) Cherry Award ChairであるA. Luque (UPM) に代り、L. Kazmerski (NREL) が、William R. Cherry Awardの経緯 (表1)、これまでの受賞者 (表2) の説明がなされた。

表1 William R. Cherry Awardの経緯

This award is named in honor of William R. Cherry, a founder of the photovoltaic community. In the 1950's, he was instrumental in establishing solar cells as the ideal power source for space satellites and for recognizing, advocating, and nurturing the use of photovoltaic systems for terrestrial applications. The William R. Cherry award was instituted in 1980, shortly after his death. The purpose of the award is to recognize engineers and scientists who devote a part of their professional life to the advancement of the technology of photovoltaic energy conversion. The nominee must have made significant contributions to the science and/or technology of PV energy conversion, with dissemination by substantial publications and presentations. Professional society activities, promotional and/or organizational efforts and achievements are not considerations in the election for the award.

表2 これまでのWilliam Cherry Awardの受賞者

Dr. Paul Rappaport 1980	Dr. Martin A. Green 1990	Dr. Christopher R. Wronski 2000
Dr. Joseph L. Loferski 1981	Mr. Peter A. Iles 1991	Dr. Richard M. Swanson 2002
Prof. Martin Wolf 1982	Dr. Lawrence L. Kazmerski 1993	Dr. Ajeet Rohatgi 2003
Dr. Henry W. Brandhorst 1984	Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994	Dr. Timothy J. Coutts 2005
Mr. Eugene L. Ralph 1985	Dr. Allen M. Barnett 1996	Dr. Antonio Luque 2006
Dr. Charles E. Backus 1987	Dr. Adolf Goetzberger 1997	Dr. Masafumi Yamaguchi 2008
Dr. David E. Carlson 1988	Dr. Richard J. Schwartz 1998	Dr. Stuart Wenham 2009

今回の受賞者であるRichard R. King(Spectrolab)が紹介された。高効率集光型III-V型太陽電池の技術開発への貢献が評価されたものである。

(2) R King(Spectrolab)が、“Multijunction Solar Cells - A Look Back and the Path Forward”と題して、受賞記念講演を行った。①多接合(MJ)セルの歴史、②Spectrolabでの最近の成果、③集光型太陽電池およびシステムの経済性および今後の展開、が述べられた。

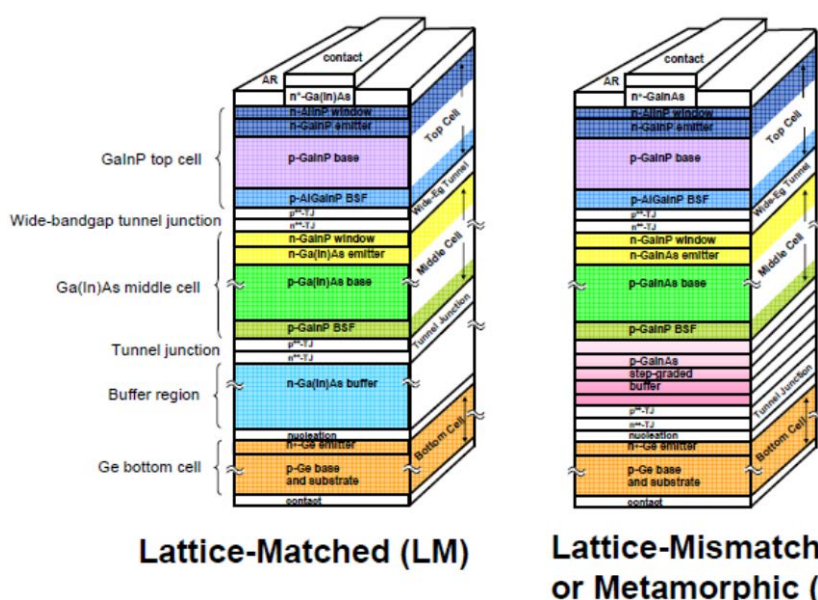


図4 格子整合(LM)系および格子不整合(MM)系3接合セルの構造

Spectrolabでは、2004年の格子整合(LM)系3接合セル(図4)の175倍集光で、効率37.3%、2005年のLM系3接合セルの236倍集光で、効率39.0%を達成し、集光型III-V化合物3接合セルの高効率化に貢献している。2007年には、Ge基板上にMOCVD成長により格子不整合(MM)系(図4)GaInP/GaInAs/Ge3接合セル(面積0.2669cm<sup>2</sup>)のAM1.5Dの240倍集光で40.7%の高効率化を実現している。さらに、2009年、LM系GaInP/GaInAs/Ge3接合セルの364倍集光で効率41.6%の世界最高効率を達成した。グリッドのシャドー損失の低減と直列抵抗の低減が、改善点である。図5に、世界最高効率41.6%の格子整合GaInP/GaInAs/Ge3接合セルの364倍集光I-V特性を示す。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

ル（面積 $0.256\text{cm}^2$ ）が作製され、図6に示すように、AM1.5Dの256倍集光で効率36.9%を得ている。バンドギャップ $1.9\text{eV}/1.43\text{eV}/1.03\text{eV}/0.67\text{eV}$ の4接合セルで効率47%が期待できる。図7には、世界最高効率41.6%の格子整合GaInP/GaInAs/Ge3接合セルの実現による最新の効率チャートを示す。

2010年末までに、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。また、2010年に、300MWの集光型多接合セル生産の計画であるとの事である。

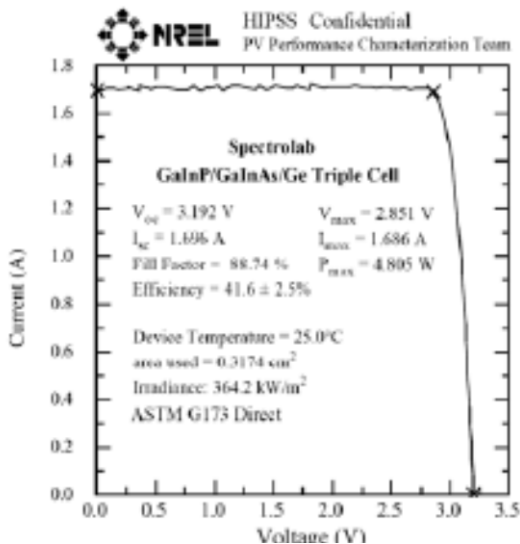


図5 41.6%格子整合GaInP/GaInAs/Ge 3接合セルの364倍集光I-V特性

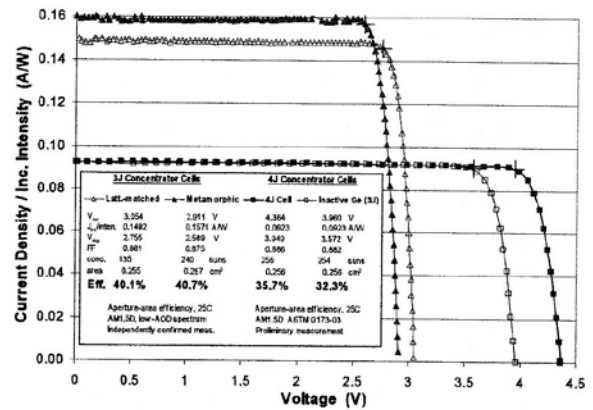


図6 4接合GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge 集光セルのI-V特性

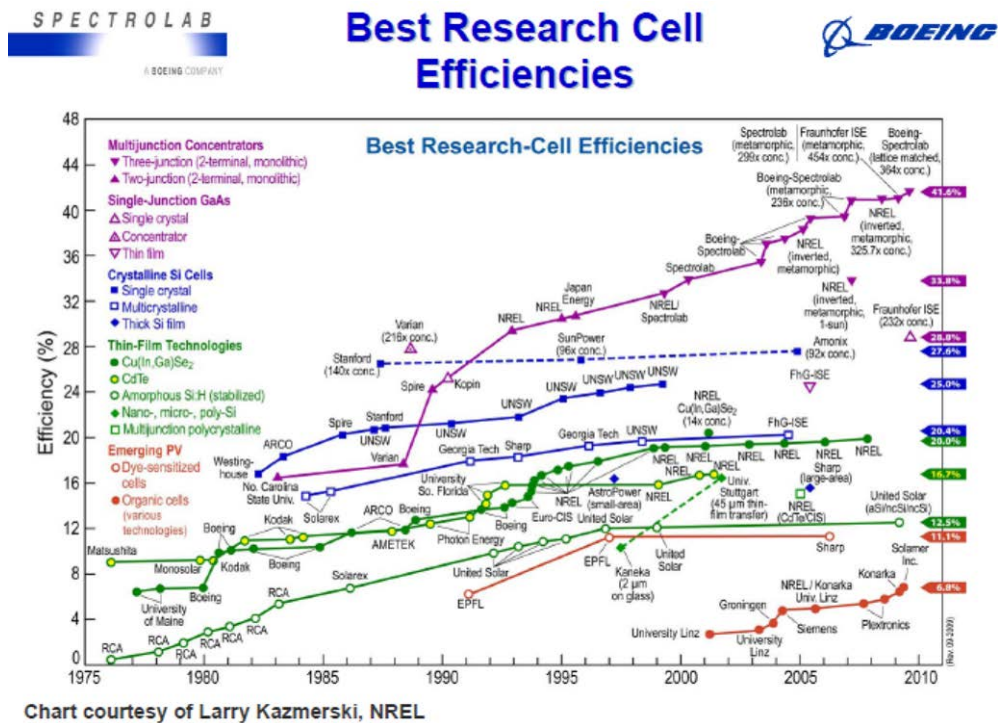


Chart courtesy of Larry Kazmerski, NREL

図7 各種太陽電池の高効率化の変遷

## 6. 本会議のトピックス

プレーナリ講演を中心に、本会議のトピックスを紹介する。

### 6.1 基礎、新材料・デバイス分野：

(1) J. Adams ら (Imperial College) は、“Experimental Measurement of Restricted Radiative Emission in Quantum Well Solar Cells” と題して、プレーナリ講演において、量子井戸 (QW) 型太陽電池の状況を報告した。K. Barnham の Imperial College のグループは、量子井戸型太陽電池を提案し、InGaAs/GaAs 系歪超格子構造の課題の一つであった圧縮応力を InGaAs の井戸層/GaAsP 障壁層の歪緩和量子井戸 (SB-QW) を 1999 年に提案している。20MQW の SB-QW 太陽電池で、GaAs バルク太陽電池の  $J_{sc}=28\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=970\text{mV}$  に対して、 $J_{sc}=27.1\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=950\text{mV}$  で、効率 20% を実現している。AM1.G の 500 倍集光で効率 28.3% を達成している。K. Barnham は、QuantaSolar 社を設立し、最近、集光下で効率 28.8% を得ているとの事である。効率向上のための課題に、暗電流の低減、放射再結合の低減があり、今回、放射再結合の課題を明らかにする目的で、フォトルミネッセンス (PL) の実験的解析結果が報告された。532nm レーザ励起で、実験試料からの PL の TE および TM モードが解析された。価電子帯の重い正孔 (HH) 準位に基づく TE モード発光ピーク 1.27eV に対して、軽い正孔 (LH) 準位に基づく TM モード発光ピークは 1.34eV である。GaAs/InGaAs/GaAsP の圧縮応力系では、HH 準位に基づく TE モード発光ピーク 1.2eV に対して、LH 準位に基づく TM モード発光ピークは 1.3eV であり、InP/InGaAs/InAlAs の引っ張り応力系では、HH 準位に基づく TE モード発光ピーク 0.83eV に対して、LH 準位に基づく TM モード発光ピークは 0.86eV と、応力の影響を観測している。結論として、SB-QW 構造で、転位発生なしにバンドギャップ設計でき、放射再結合も制御できるとしている。今後は、フォトンリサイクリングを狙って、DBR 構造などの検討を予定している。

(2) A. Zedda, A. Heeger (Konarka) は、“Progress and Future Challenges for the Organic Photovoltaics Industry” と題して、プレーナリ講演を行った。A. Heeger は、有機太陽電池の基礎について述べた。太陽電池では、ヘテロ接合がキャリアの分離に有効であり、有機太陽電池にも適用されている。有機太陽電池は、Konarka 社などで、実用化されており、フレキシブル、軽量、シースルー太陽電池として期待される。太陽電池において、材料中のフォトンの吸収、光誘起電荷の分離、電極での電荷の収集が重要だが、ヘテロ接合界面での高速電荷分離を狙いとして、ドナー、アクセプターのバルクヘテロ接合型が検討されている。P3Ht/PCBM 系では、 $V_{oc}=0.6\text{V}$ 、 $J_{sc}=9.6\text{mA}/\text{cm}^2$  だが、高効率化に向けた検討がなされている。 $V_{oc}$  の起源として、 $V_{oc} \propto E_{\text{PCBM-LUMO}} - E_{\text{Polymer-HOMO}}$  で、上記の系では、 $V_{oc}=0.6\text{V}$  が妥当である。Deeper Homo を使えば、 $V_{oc}=0.9\text{V}$  が可能としている。 $J_{sc}$  向上には、低バンドギャップ材料が有効である。また、PCBM/PBMT の周期構造も検討されている。安定な deep Homo ポリマーとして、PCDTBT が適用され、PCDTBT/PCBM 系で、効率約 6% ( $V_{oc}=0.88\text{V}$ 、 $J_{sc}$ =約  $14\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=0.64$ ) が得られている。FF 改善を狙いとして、PCDTBT/PC70BM 系が検討され、界面の再結合トラップが課題であるとの事である。ターゲット効率 10~15% の実現のためには、①低バンドギャップ材料の検討 (25% 以上の  $J_{sc}$  改善)、②deep Homo の検討 (50% 以上の  $V_{oc}$  改善)、③タンデムセルの検討 (50% 以上の効率改善)、が必要であるとしている。電子機器用インク材料が、低コスト roll-to-roll 印刷製造に使えるとしている。

A. Zedda は、Konarka 社の状況を報告した。デバイス効率は 8% に近づき、モジュール効率も 4% が得られつつある。寿命試験結果も報告され、封止モジュールで、5000 時間までの

結果が得られている。Konarka社は、laptopバッグなどを含む製品を製造しており、建材応用に向けた青色、緑色、赤色の半透明モジュールも示された。

## 6.2 CIGS、II—VI化合物薄膜セル分野：

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) J. Britt ら (Global Solar Energy) は、“Production of Flexible CIGS PV at Global Solar Energy” と題して、プレーナリ講演を行った。1996 年に米国・ツーソンに GSET を設立し、2006 年にベルリンに GSED を設立している。Roll-to-roll 法による CIGS セルおよびモジュール (図 8) の技術開発、製造販売を行っている。Roll-to-roll 法による CIGS セルモジュールは、軽量で、操作性が良いフレキシブルモジュールを提供でき、プロセス時間の短縮やスケールアップにも有利であるとしている。現在、75MW の製造規模である。製造プロセスは、ステンレススチール等の基板上に Mo、TCO の堆積、CIGS は共蒸着、バッファ層は CSD 法で堆積している。モジュール効率も、2009 年初頭の平均効率 7% (5~8%) から、2009 年末には、平均効率 11% (9.5~11.5%) へと向上し、製造 yield も 90% から 95% へと改善されているとの事である。NREL 測定で、セルで 15.45%、モジュール ( $3900\text{cm}^2$ ) で 13.2% の最高効率を実現している。セル効率、製造 yield を考慮したコスト分析もなされ、基板  $\$8/\text{m}^2$ 、TCO  $\$12/\text{m}^2$ 、セル製造  $\$18/\text{m}^2$ 、ガラス  $\$40/\text{m}^2$ 、であり、効率 9% でモジュールコストは  $\$0.8/\text{W} \sim \$0.89/\text{W}$  で、効率 14% でモジュールコストは  $\$0.52/\text{W} \sim \$0.6/\text{W}$  であり、2014 年末までに  $\$0.8/\text{W}$  が可能としている。適用分野として、可搬型 PV、パワーモジュール (屋根や field)、建材一体型モジュール、等がある。技術ロードマップとして、図 9 に示すように、2015 年にモジュール効率 15% のターゲットがある。課題として、①光吸収層の Eg 制御、②欠陥低減、③有効面積の拡大、④IR 損失の低減、などがある。

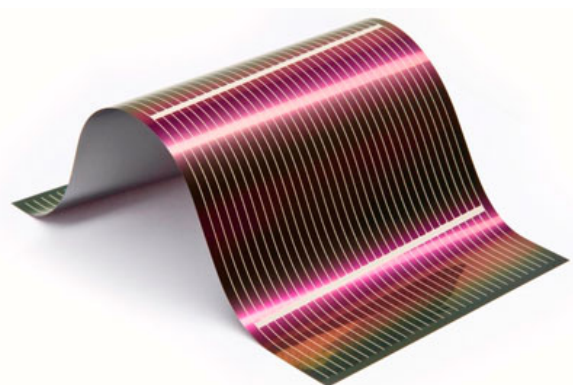


図 8 フレキシブル CIGS セルモジュール

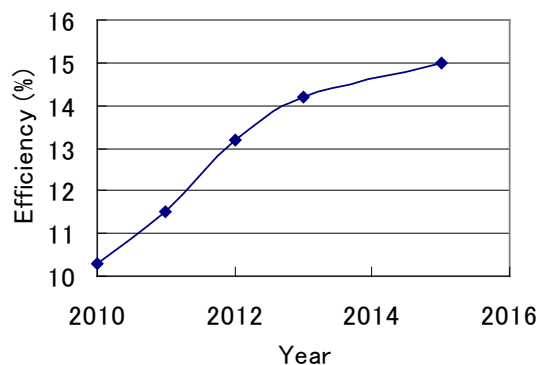


図 9 GSE 社の CIGS セルモジュールの効率向上ロードマップ

### 6.3 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池、モジュール分野：

最近、多くの企業が、III—Vベースの集光太陽光発電（CPV）システムの商用化を開始している。その主な理由として、次の点があげられる。

- ① III—V族セルを用いた集光型太陽電池は40%以上の高効率化を実現しており、近い将来、40%以上の高効率モジュールの実現が可能で、非常に効率の良いCPVシステムを提供できる。
- ② PV応用がサイズの上でも成長しており、より大規模なシステムの実現が要望され、CPVシステムが適している。
- ③ コスト的にも有効な代替PV技術への関心をもたらしていること。

(1) N.Hartsoch (CPV Consortium, SolFocus) は、“The Current Status of the CPV Industry: System Performance and Cost Competitiveness” と題して、プレーナリ講演を行った。図10、図11に示すように、①高効率エネルギー、②高エネルギー生成、③高温動作可能、④次世代革新技術、⑤高速GW製造が可能、⑥低コスト太陽エネルギー、といった集光型太陽光発電（CPV）システムの特徴を述べた後、CPVコンソーシアムでの種々の分析結果が報告された。図12に示すように、現状では、薄膜系や結晶Si系に比べて、CPVの製造コストは高い。しかし、2500kWh/m<sup>2</sup>/yr以上の日射条件の良い地域では、図13に示すよう、他のPV技術よりも電力コスト低減が可能で、8.5セント/kWh以下が期待できる。エネルギーペイバックタイムについても、図14に示すように、他のPV技術に比べて有利であり、1年以下の実現が可能である。図15には、CPVシステムの年間設置量予測を示す。2012年までに、モジュール効率30%を実現し、2015年頃には、1.5GWのCPVシステム導入を期待している。



図10 CPVの特徴（1）

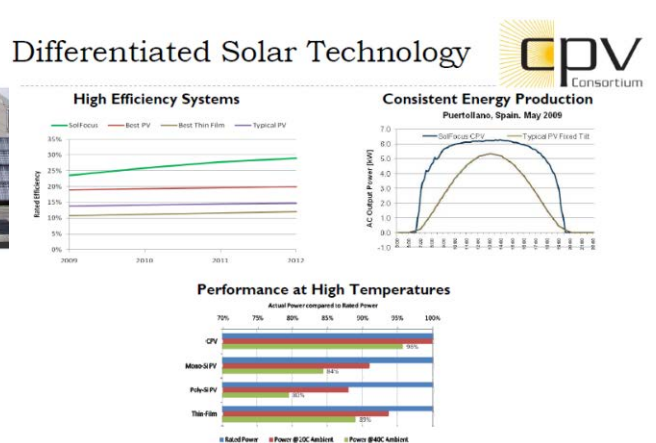
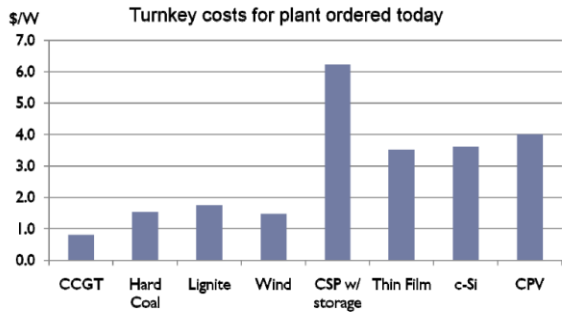


図11 CPVの特徴（2）



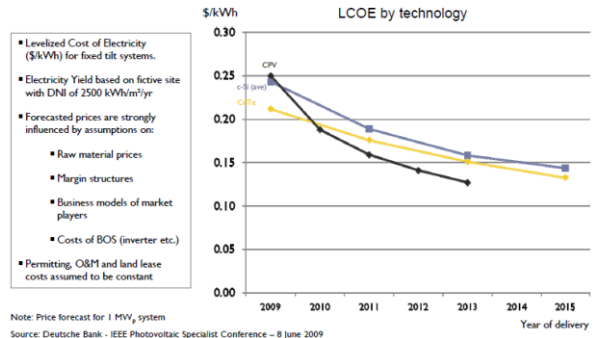
## CPV: Higher Capital Costs Compared to PV Technologies



Sources: OekoInstitut; Eurocopper; Deutsche Bank - IEEE Photovoltaic Specialist Conference - 8 June 2009; Concentrix Solar analysis

図 1 2 製造コスト比較

## Levelized Cost of Electricity is the Better Metric for Comparison



Note: Price forecast for 1 MW<sub>p</sub> system

Source: Deutsche Bank - IEEE Photovoltaic Specialist Conference - 8 June 2009

図 1 3 電力コスト比較

## Fastest Energy Payback

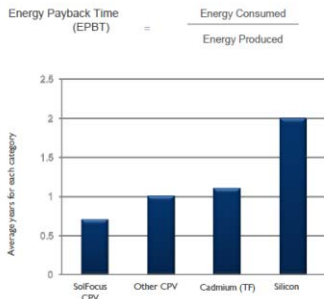


図 1 4 エネルギーペイバックタイムの比較

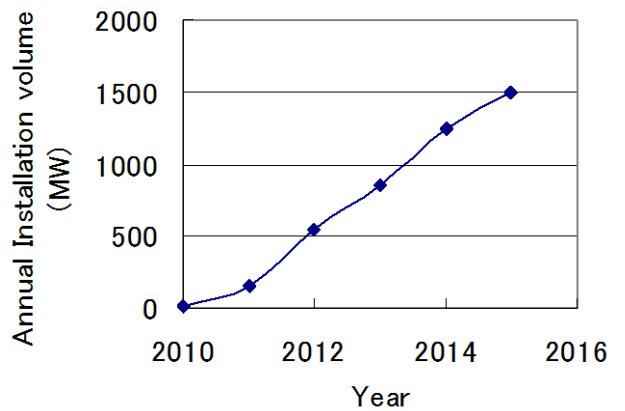


図 1 5 CPVの設置量予測

### 6.4 結晶Si太陽電池分野：

(1) P. J. Cousins ら (SunPower) は、“Gen III: Improved Performance at Lower Cost” と題して、n 型単結晶シリコン太陽電池の進展について、プレーナリ講演を行った。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。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%であったものが、第二世代では 22.2%、さらに最新の第三世代 (Gen III)では 23%まで向上しており、最高効率は 24.2%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、本年度中には 1.4GW/year の生産能力を持つマレーシア工場(FAB3)の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。

(2) Fraunhofer-ISE からは“n-type silicon :enabling 20% in industrial production”と題して n 型単結晶シリコン太陽電池のポテンシャルについて報告があった。p 型のボロンドープ CZ 基板は酸素を比較的多く含有しており、この酸素が光照射によりボロンと複合体

を形成し変換効率の低下を引き起こす（光劣化現象：LID, Light induced degradation）ことが知られている。この光劣化について、酸素濃度 0 で 21.25%のセル構造を基準として酸素濃度をパラメータに変換効率を計算したところ、 $6 \times 10^{17}$  [atoms/cm<sup>3</sup>]程度の酸素濃度（通常の CZ 基板の酸素濃度よりも低い）で変換効率は 20%を切る結果となった。一方で n 型単結晶シリコン太陽電池の場合、基板中にボロンが含まれていないため光劣化を考慮する必要がない。実際に n 型基板を使用した n 型単結晶シリコン太陽電池で変換効率は 20%を超えており、エミッターを裏面に部分的に形成した構造では 23.8%の効率が得られている。

（3）パッシベーションに関しては、裏面（p 型）パッシベーション用として、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に関する発表があった。現状では、裏面は Al による BSF 形成が一般的であり、再結合速度は 500~1000cm/s 程度である。しかし、20%を超える変換効率を達成するためには、裏面の再結合速度を 100cm/s 以下に落とし、電極を局所的にする構造が求められる。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜は負の固定電荷を有しているため、電界効果によるパッシベーションが期待出来、実際に ALD により形成したパッシベーション膜は 10cm/s 程度と非常に低い再結合速度が得られている。他にもガスのカーテンにより分断された連続リアクターによる製膜の報告や、アニールの効果などについても報告が行われた。

（4）シリコン中の不純物に関しては、ライフタイムキラーである鉄について幾つかの報告があった。多結晶シリコン基板中に含まれる鉄がリングゲッターリングにより除去可能な濃度は  $5 \times 10^{13}$  [atoms/cm<sup>3</sup>]程度であり、それを超える鉄は析出する。鉄析出物の密度とその大きさについてインゴットの高さ方向の分布をシンクロトロンを利用して測定した結果、析出物の大きさは数 10nm と一定であるのに対し、密度はインゴット上部に向かうにつれて上昇するという結果であった。析出に影響を及ぼすであろう結晶粒界や転位の密度との関連についてはまだ未検討とのことである。

（5）結晶成長については、従来の CZ 法やキャスト法の数値シミュレーションや、双晶の発生についての検討が報告された他、新しい成長法として、浮遊膜成長(floating film growth)が報告された。浮遊膜成長は、原理は液相成長法であり、成長した結晶を結晶成長と垂直方向に引くことでフィルム状の結晶を得る方法である。

## 6.5 アモルファス、ナノ／マイクロ結晶薄膜Si太陽電池分野：

D. Van Gestelら (IMEC) は、“Thin-Film Polycrystalline Si Solar Cells with Low Intragrain Defect Density made via Laser Crystallization and Epitaxial Growth”と題してプレーナリ講演を行った。非シリコン基板への薄膜多結晶のレーザー結晶化技術に関する報告である。動機として、コンヴェンショナルな多結晶シリコン太陽電池でのウェハコストを33%低減することにある。水素処理で、キャリア拡散長が2倍に改善されている。既知のAIC(Al-induced crystallization)を用いた結晶化では、<0.1mmの比較的大きい結晶粒が得られ、効率は~8%であった。結晶化温度を下げると結晶粒径は大きくなるが、低温で結晶化した粒径の大きいものは必ずしも効率は高くなかった。これは粒内欠陥密度が大きいためであり、この低減が課題である。この他、活性な粒界への言及などもあった。

## 6.6 宇宙用太陽電池分野：

T. Takamotoら (Sharp) は、“World’s Highest Efficiency Triple-junction Solar Cells Fabricated by Inverted Layers Transfer Process” と題して、プレーナリ講演を行った。-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。さらに、2008年度から開始された「革新的太陽光発電技術研究開発」プログラムの東大拠点の第一研究チームとして、高効率集光型多接合太陽電池の研究開発を進め、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。高倍集光によるInGaP/InGaAs/Ge3接合セルの高効率化がなされている。セルサイズの最適化とグリッドピッチ等の最適設計により、InGaP/InGaAs/Ge3接合セルの1100倍集光で40.02%の高効率化を実現している。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16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。

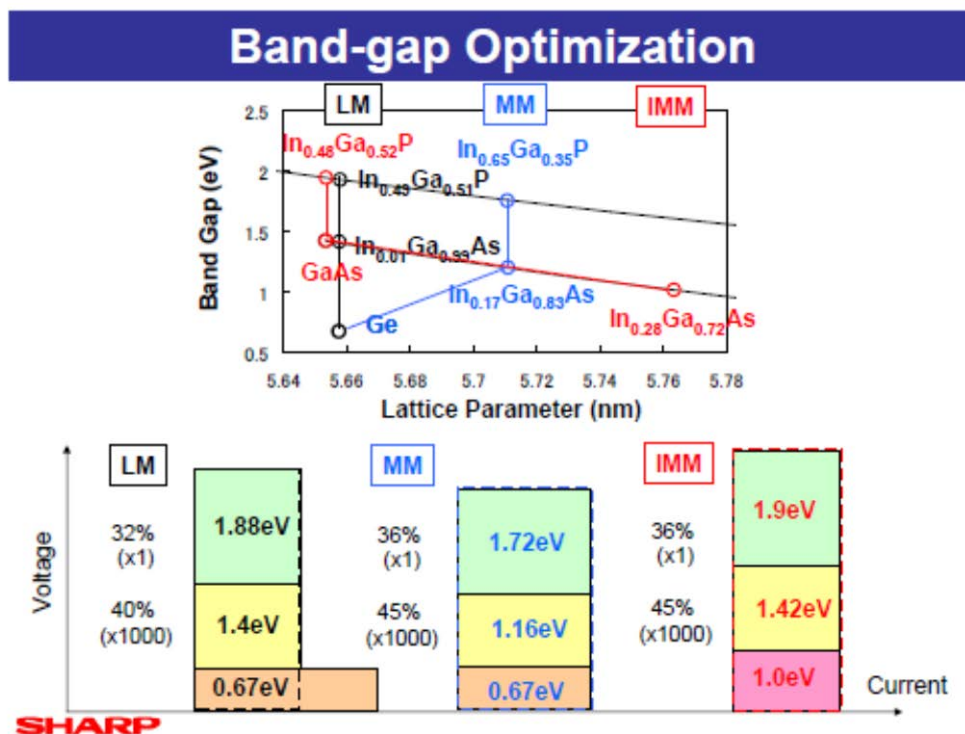


図16 3接合の高効率化のためのバンドギャップ最適化

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17に示す逆構造を検討した成果が紹介された。図17に示すように、GaAs基板に、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18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。

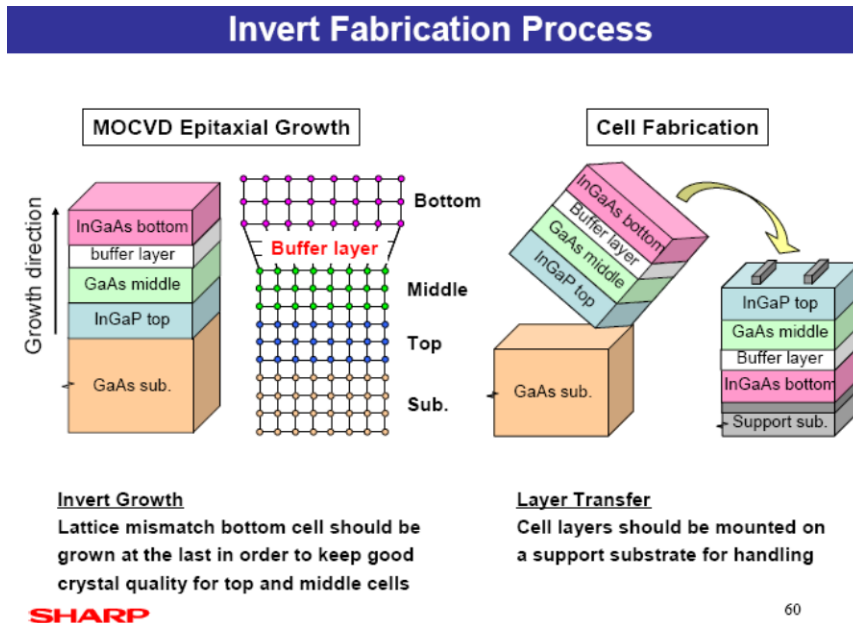


図17 逆エピ構造太陽電池の作製プロセス

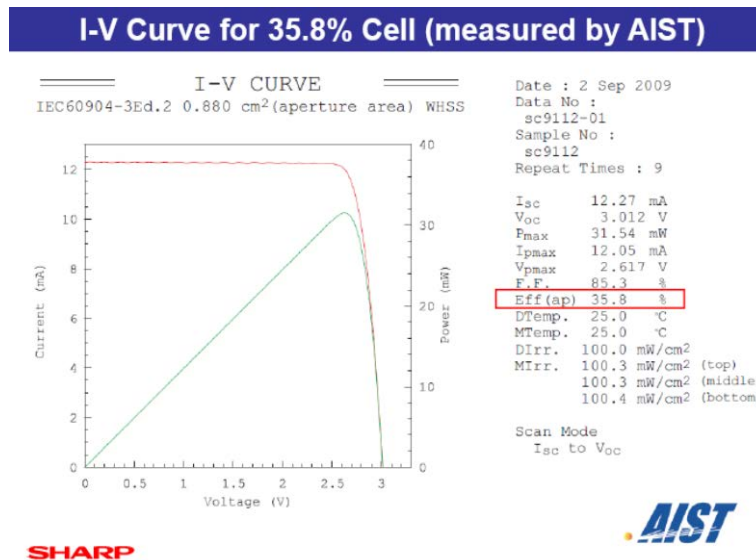


図18 シャープの世界最高効率InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池のI-V特性

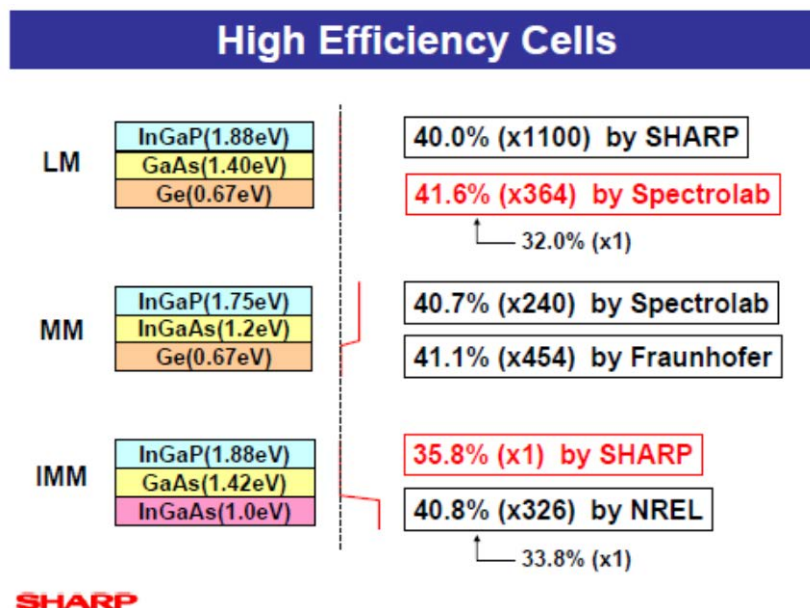


図 1 9 高効率 3 接合セルの構造と特性のまとめ

図 1 9 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%が達成できるとしている。また、宇宙用薄型セル（Space Solar Sheet）の試みも紹介された。

## 6.7 市場および政策分野：

W. C. Sinkeら（ECN）は、” The Solar Europe Industry Initiative: Research Technology Development and Demonstration in Support of 2020 and Long-Term Targets” と題して、プレーナリ講演を行った。The Solar Europe Industry Initiative（SEII）の概要が報告された。欧州共同体（EU）は、2020年までに、善エネルギーの 20%、全電力の 35%を再生可能エネルギーでまかなおうというターゲットを設定した。図 2 0 には、太陽光発電関係の EU の工業化ビジョンを示す。このターゲットを支援するために、Strategic Energy Technology（SET）計画が立案された。この計画の鍵は、技術開発および最小コストで社会への最大利益を可能とする大規模導入・普及を狙いとする産業政策の確立である。PV solar energyおよび集光 solar powerを包含する SEIIが、2010年6月にスタートした。図 2 1 には、大規模導入を狙いとした SEII の方向性を示す。SEIIは、EUおよびメンバー国のプログラムに関して、明確な技術関連のターゲット、研究開発および実証の優先度を提供するだろう。SEIIの PV 部分は、欧州における大部分の研究開発および工業化を代表する European Photovoltaic Technology Platform および EPIA（European Photovoltaic Industry

Association) との共同作業である。

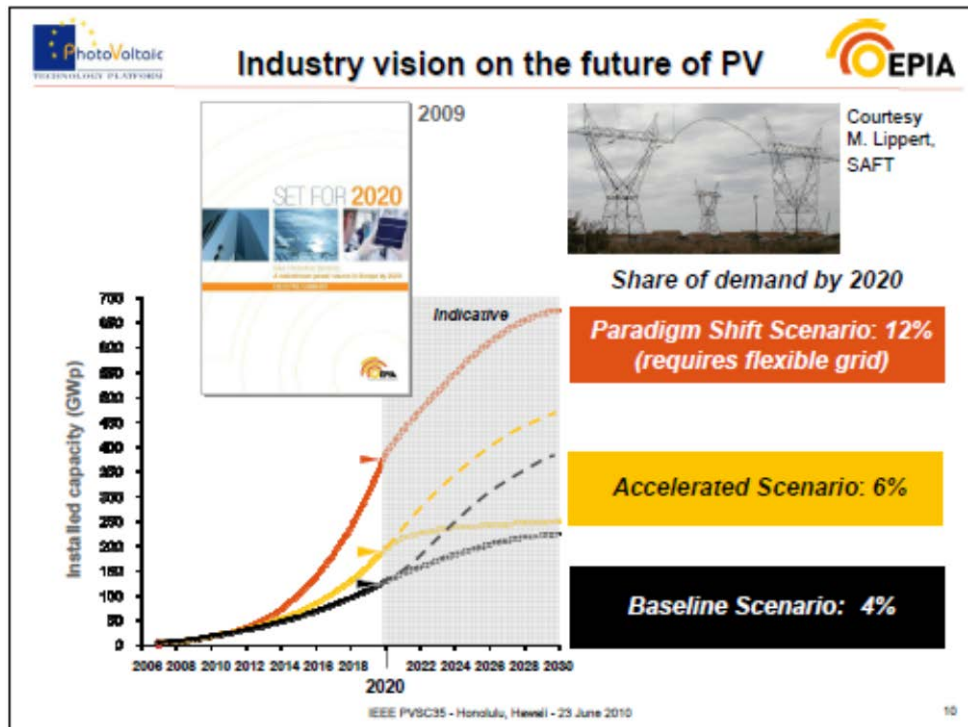


図 2 0 太陽光発電関係のEUの工業化ビジョン

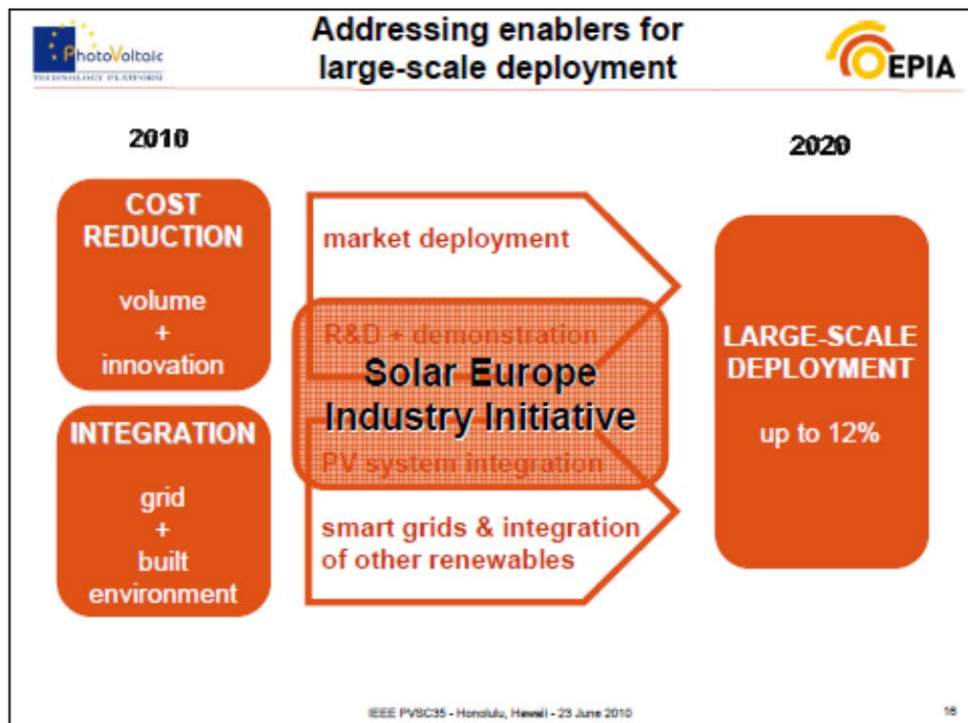


図 2 1 大規模導入に向けたSEIIの方向性

図 2 2 には、太陽光発電技術の現状とSEIIの目標を示す。図 2 3 は、CO<sub>2</sub>排出に関わる他の

エネルギーとの比較を示す。図 2 4 は、SEIIの展開プランを示す。

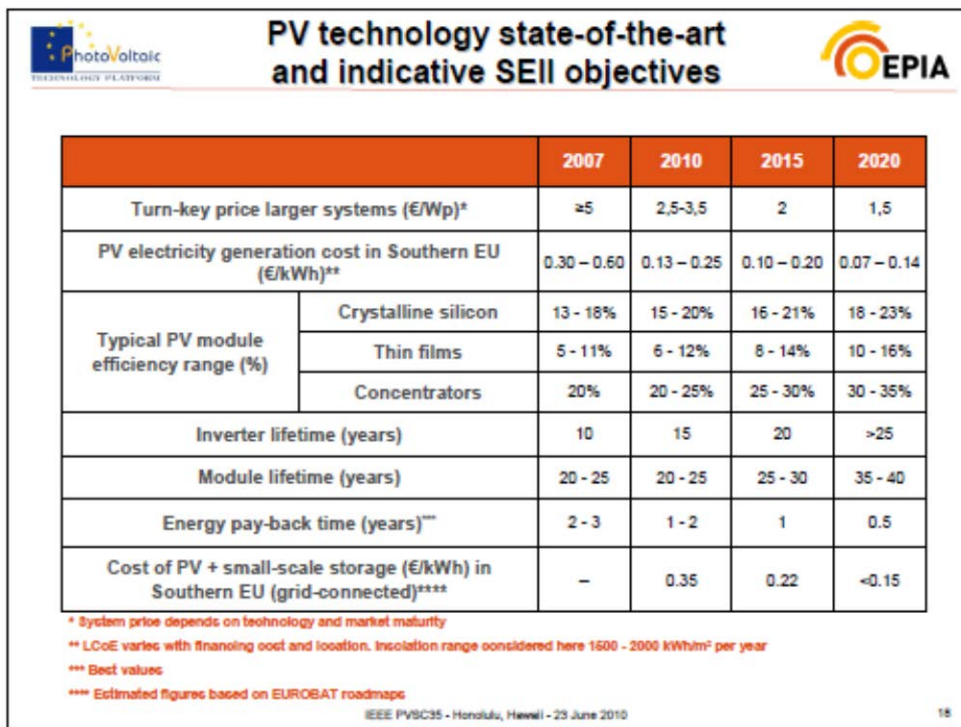


図 2 2 太陽光発電技術の現状とSEIIの目標

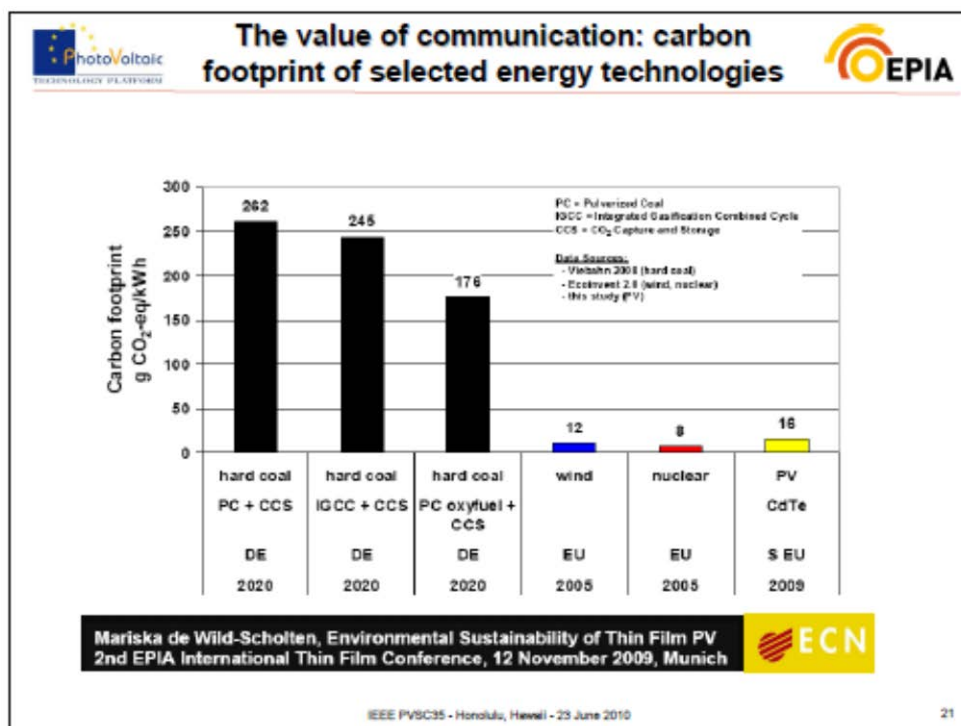
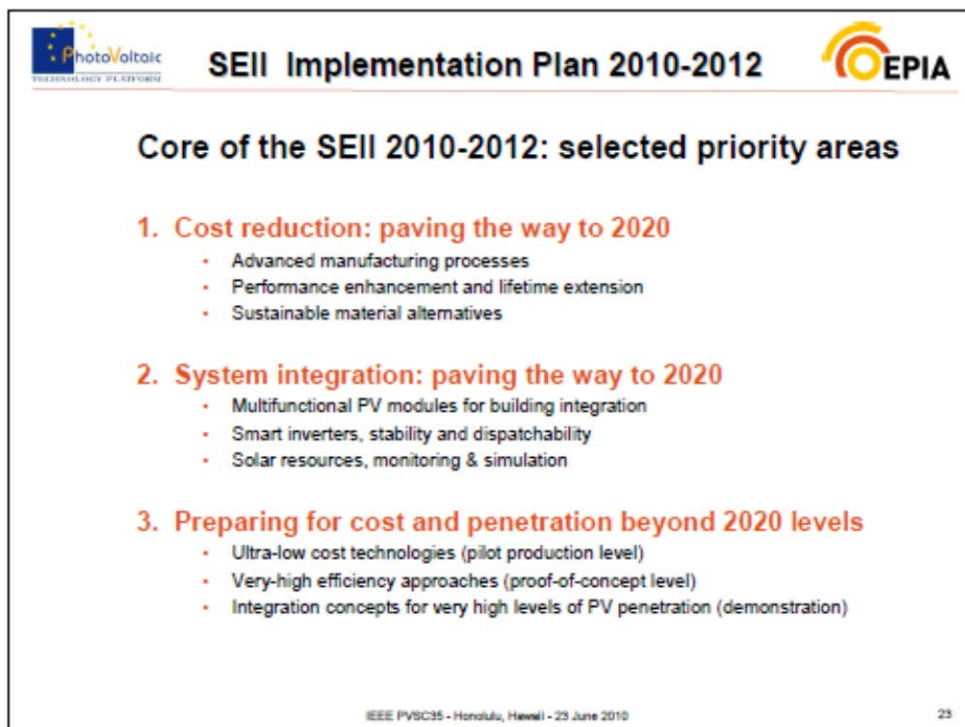


図 2 3 CO<sub>2</sub>排出に関わる他のエネルギーとの比較



The slide is titled "SEII Implementation Plan 2010-2012" and features logos for "PhotoVoltaic TECHNOLOGY PLATFORM" and "EPIA". The main heading is "Core of the SEII 2010-2012: selected priority areas". It lists three main areas:

- 1. Cost reduction: paving the way to 2020**
  - Advanced manufacturing processes
  - Performance enhancement and lifetime extension
  - Sustainable material alternatives
- 2. System integration: paving the way to 2020**
  - Multifunctional PV modules for building integration
  - Smart inverters, stability and dispatchability
  - Solar resources, monitoring & simulation
- 3. Preparing for cost and penetration beyond 2020 levels**
  - Ultra-low cost technologies (pilot production level)
  - Very-high efficiency approaches (proof-of-concept level)
  - Integration concepts for very high levels of PV penetration (demonstration)

At the bottom, it reads "IEEE PVSC35 - Honolulu, Hawaii - 23 June 2010" and "23".

図 2 4 SEIIの展開計画

## 7. 感想

結晶Si太陽電池セッションでは、欧米からの研究成果発表が盛んで、これを、韓国、台湾の企業が熱心に聴講する姿勢を感じた。一方、日本企業からの参加は少なく、今後の危惧を感じる。また、欧州で産学連携が進んでいる。確かに、わが国は、結晶Si太陽電池生産量において、世界一だったが、中国、ドイツ、に追い抜かれ、台湾、韓国が追い上げている。これは、わが国における結晶Si太陽電池の研究開発者人口およびレベルが十分とは言えないことに起因しているだろう。半導体LSI凋落の二の舞を踏まないためにも、わが国における研究開発の強化と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。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。

次回の36th IEEE PVSCは、WCPWC-5として、2010年9月6日～10日、スペインのバレンシアで、次々回の37th IEEE PVSCは、2011年6月19日～24日、シアトルで、その次の37th IEEE PVSCは、2012年6月3日～8日、テキサス州オースチンで開催予定である。