

第 27 回太陽光発電欧州会議（27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition）報告

2012. 9. 30

山口真史（豊田工大）

1. 開催月日：2012年9月24日～28日。

2. 開催場所：Messe Frankfurt and Congress Center（フランクフルト、ドイツ）。

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、Stefan Nowak（IEA-PVPS、スイス）で、論文委員長は Arnulf Jager-Waldau（EC-JRC、イタリア）であった。開会式で、Nowak 委員長が、フランクフルトは、詩人ゲーテの生誕地で、ゲーテの言葉を引用したメッセージ “You can build something beautiful even from the stones that are laid in your path.” が述べられた。今年は、76 の国と地域から 4,024 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。

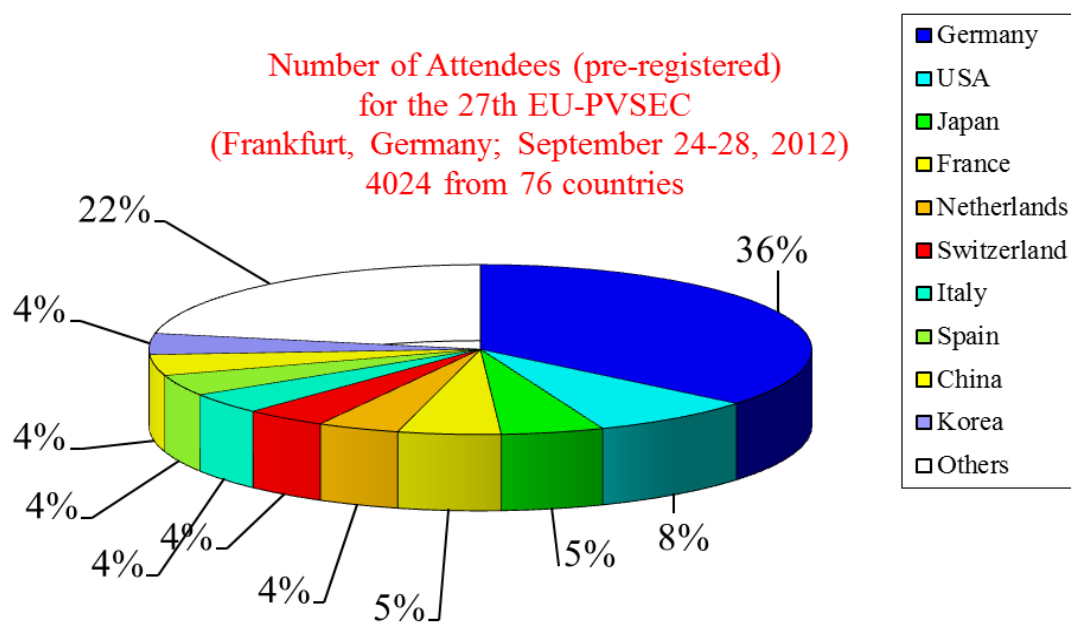


図 1 国別参加者数

図 1 に、国別参加者数（pre-registered）を示す。国別では、①ドイツ 36%（約 1450 名）、②米国 8%（約 320 名）、③日本 5%（約 2007 名）、④フランス 5%（約 200 名）、⑤オランダ 4%（約 160 名）、⑤スイス 4%（約 160 名）、⑤イタリア 4%（約 160 名）、⑤スペイン 4%（約 160 名）、⑤中国 4%（約 160 名）、⑤韓国 4%（約 160 名）、の順であった。

**Number of Papers presented at the 27th EU-PVSEC
(Frankfurt, Germany; September 24-28, 2012)
1572 Papers**

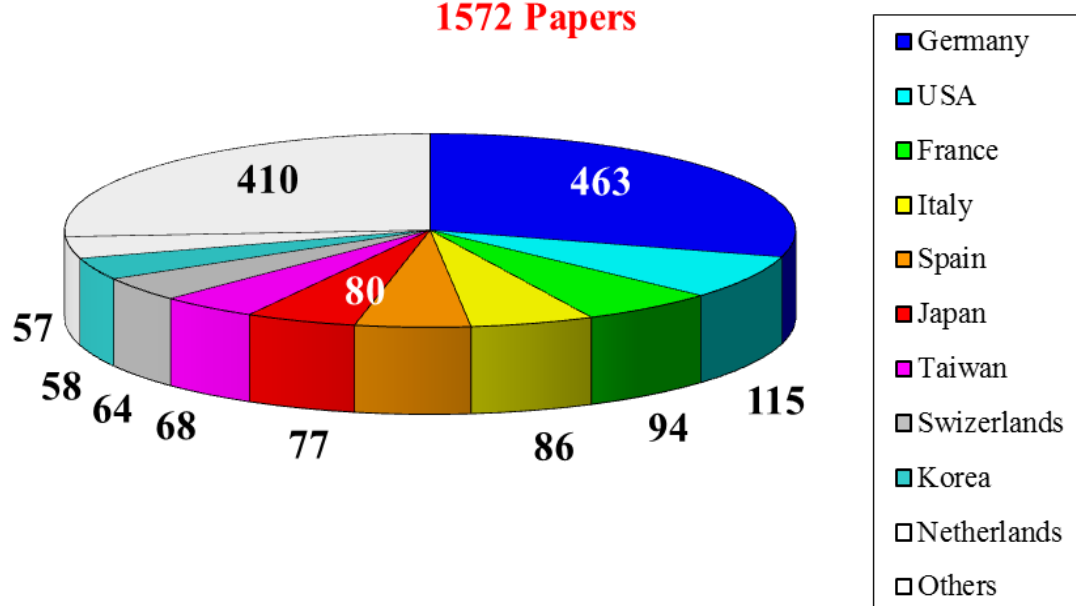


図 2 国別発表論文件数 (RTS提供)

図 2 は、国別発表論文件数を示す。69カ国から1,572件の論文発表があった。国別では、①ドイツ463件、②米国115件、③フランス94件、④イタリア86件、⑤スペイン80件、⑥日本77件、⑦台湾68件、⑧スイス64件、⑨韓国58件、⑩オランダ57件、の順であった。

**Number of Papers presented
at the 27th EU-PVSEC
(Frankfurt, Germany; September 24-28, 2012)
1572 Papers**

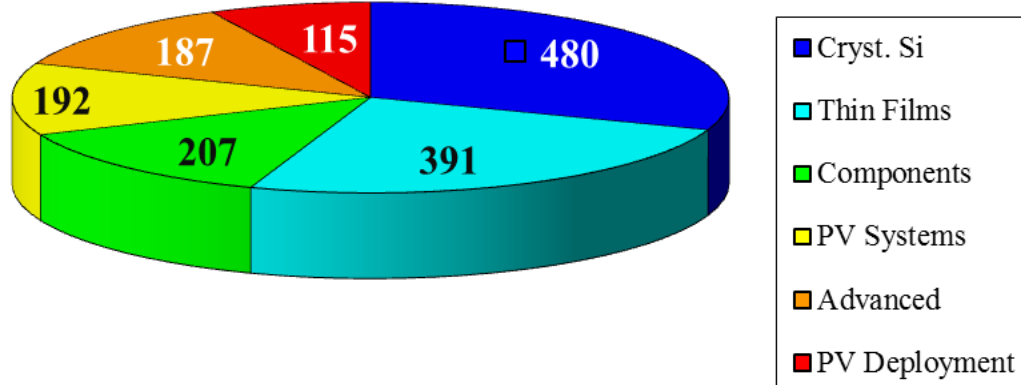


図 3 発表論文件数の分野別内訳 (RTS提供)

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Si480系件、②薄膜系（薄膜Si、CIGS・CdTe等II-VI、色素・有機）391件、③PVコンポーネント207件、④PVシステム192件、⑤先端PV（超高効率、集光、宇宙、基礎・新材料・新素子）187件、⑥PV普及（国家プログラム・政策・PV市場）115件、の順であった。

Becqurel Prizeは、Winfred Hoffmann（Applied Materials）が受賞した。結晶Si太陽電池の産業化への貢献、EPIAのトップとして関連産業や産学連携への貢献、フィードインタリフ制度策定への駆動、などの業績が評価された。

この他、学会併設の展示会には、35 か国 619 社の太陽電池関連企業が出展した。

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 先進太陽電池分野（超高効率多接合、集光型、宇宙用、量子・ナノ構造等新型、新材料）：

（1）H. A. Atwater（CALTEC）は、“Photonic Design Principles for High Efficiency Photovoltaics”と題して、基調講演を行った。高効率（>20%）かつ低コスト（モジュールコスト<\$0.5/W）のアプローチが述べられた。

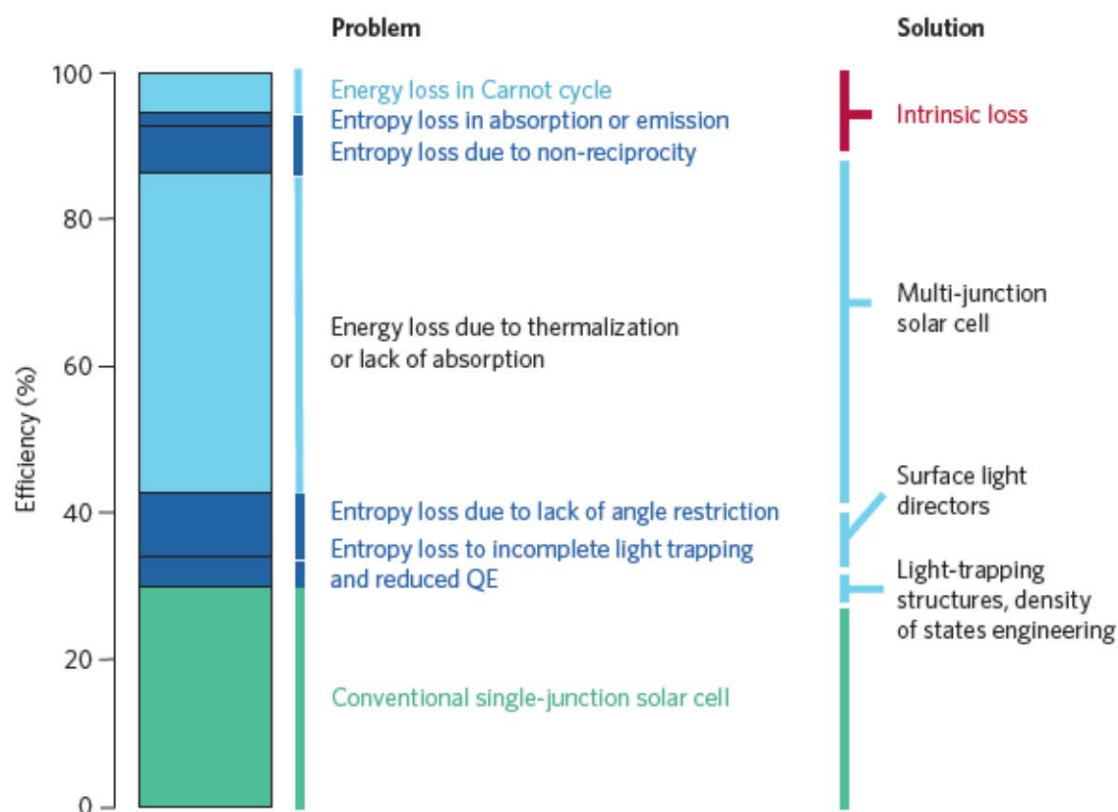


図4 種々の損失要因と解決手段

図4に示すように、太陽光エネルギー変換における種々の損失要因が言及され、①スペクトル損失が一番大きい、②非輻射再結合など結晶品質要因、③光反射を含む光不完全

利用、などである。(1)式に示す、電圧損失についても、Carnotロス、光放出口ロス、不完全光トラッピング、非輻射再結合損失、などがあり、約400mVの損失だが、その多くは、サブ波長構造、ナノフォトニック構造など光トラッピングを含む光マネジメントにより改善できる。一例として、a-Siセルにおける裏面反射構造の有効性が紹介された。通常構造の効率6.94%から9.6%に改善されている。

$$qV_{oc} = E_g \left(1 - \frac{T}{T_{sun}} \right) - kT \left[\ln \left(\frac{\Omega_{emit}}{\Omega_{sun}} \right) + \ln \left(\frac{4n^2}{I} \right) - \ln(QE) \right] \quad (1)$$

III-V族化合物は、直接遷移バンド構造で、薄膜化が可能で、単接合でも効率28%以上の結果が得られている。AltaDevicesの成果も述べられた。2.5 μm以下に薄膜化することで、フォトンリサイクリングによる高い量子効率を実現し、図5に示すように、単接合での世界最高効率28.8%を実現している。アパーチャ面積856.8cm²で、モジュール効率23.5%を得ているとの事である。

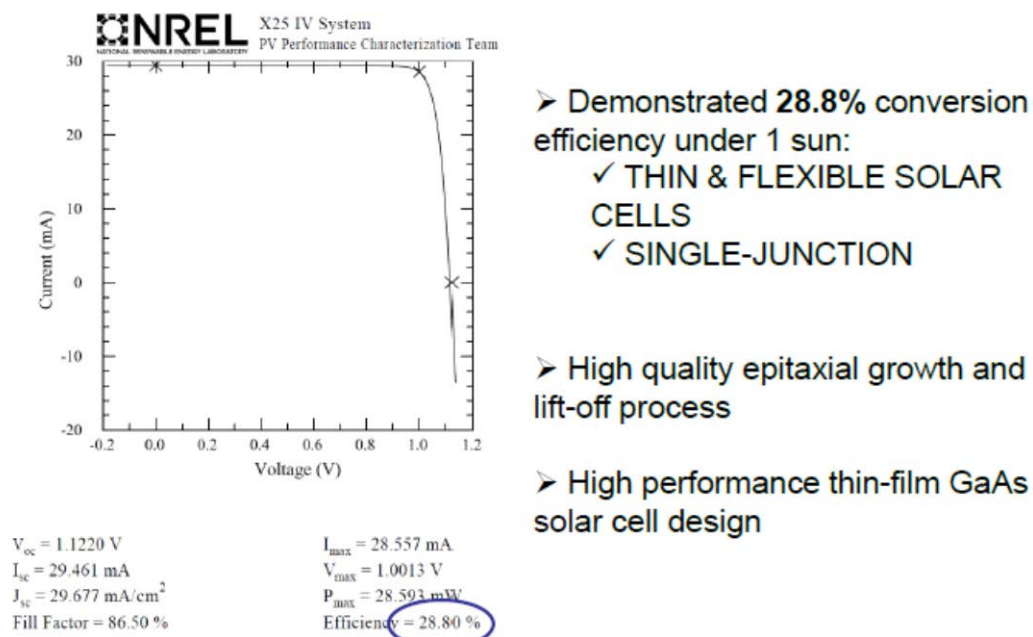


図5 単接合での世界最高効率（28.8%）GaAs薄膜太陽電池

(2) M. Wiesenfarthら (FhG-ISE) は、“Advanced Concepts in Concentrating Photovoltaics”と題して、プレーナリ講演を行った。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。①III-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。②PV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。集光型太陽電池は、結晶Si太陽電池を用いた集光倍率3倍以下の低倍集光、結

晶Siなどの太陽電池を用いた3～100倍の中倍集光、III-V族多接合太陽電池を用いた400倍以上の高倍集光に分類される。ここでは、高倍集光に言及された。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、集光型太陽電池モジュールの現状、FhG-ISEの取り組みが述べられた。表1に示すように、研究段階の集光型セルの効率は、SharpおよびSolar Junctionにより43.5%に達し、モジュール効率30～33%、システム効率25～27%の現状であり、他の太陽電池よりも格段に性能が良い。

表1 III-V族多接合、集光型太陽電池の効率比較

Cell Architecture	Champion Efficiency	Company
Dilute nitride	43.5% (>43% @ 400–1000 suns)	Solar Junction
GaInP/Ga(In)As/GaInAs (Inverted metamorphic)	43.5% @ 306 suns	Sharp
	42.6% @ 327 suns (40.9% @ 1093 suns)	NREL
	42.4% @ 325 suns (41% @ 1000 suns)	Emcore
GaInP-GaAs-wafer-GaInAs	42.3% @ 406 suns	Spire
GaInP-Ga(In)As-Ge	41.6% @ 364 suns	Spectrolab
GaInP-GaInAs-Ge	41.1% @ 454 suns	Fraunhofer ISE
GaInP-GaInAsQD-Ge	~40%	Cyrium
GaInP-GaInAsQW-Ge	~40%	Quantasol/JDSU

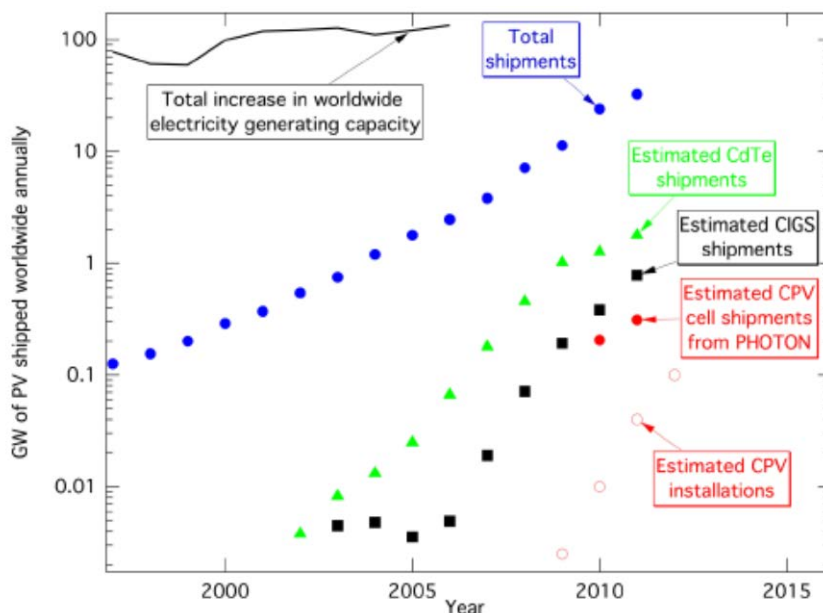


図6 CPVの出荷量の伸びと他のPV出荷量の推移との比較

既に、数社が、1 MW以上のCPVシステム設置に貢献している。図6には、CPVの出荷量の伸びと他のPV出荷量の推移との比較を示す。現状では、CPVの製造コストは、薄膜系や結晶Si

系と同等との事である。特に、 $2500\text{kWh/m}^2/\text{yr}$ 以上の日射条件の良い地域では、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、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。2011年の生産規模は650MWで、2012年には、60MWのCPVシステム導入で、累積400MW以上に達するとの事である。図7に示すように、2015年頃には、1.5GWのCPVシステム導入を期待している。IEC62109、62108に準拠した認証、加速寿命試験を含む各種信頼性試験も行われている。3年間の実証試験でも、目に見える劣化はないが、追尾系の不良、保護ダイオードの重要性が指摘されている。発生電力の予測と実際のデータとの一致は良いとの事である。FhG-ISEでも、反射鏡を用いたCPVの電気、熱のコジェネレーションが検討されている。結晶Siセル（ $4\times 4.4\text{cm}^2$ ）を用いた系では、電気効率14%＋熱効率49%＝トータル効率63%だが、3接合セル（ $4\times 1\text{cm}^2$ ）を用いた系では、電気効率30.1%が得られ、トータル効率75%が可能としている。

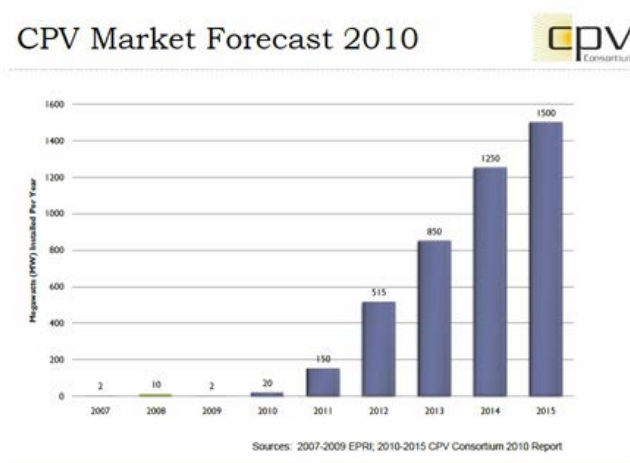


図7 CPVの市場予測

(3) C. Baur (ESA) は、“Maximum Realistic Conversion Efficiencies of Solar Cells for Space Applications” と題して、プレーナリ講演を行った。FhG-ISEのコンピュータコード” eta Opt” と材料特性を用いて、理想状態（内部量子効率100%、ミラーによる100%裏面反射；裏面屈折率 $n_r=0$ ）を仮定して、 $T=298\text{K}$ 、 AM0 （ 136.7mW/cm^2 ）での効率が計算されている。実際は、飽和電流密度は、計算値の33.5倍、単接合セルの内部量子効率は98%、裏面屈折率 $n_r=5.7$ 程度であり、GaAs単接合セルの理想状態、現実値およびAltaDevicesの特性を比較して、表2に示す。

表2 GaAs単接合セルの理想状態、現実値およびAltaDevicesの特性比較

	効率 (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)
理想状態	33.3	32.0	1160
現実値 ($n_r=5.7$, $E=0.98$)	28.9	30.4	1069
GaAsセル (AltaDevices)	29.8	29.7	1122

表3には、3接合セルの現実値および3G30のAdvancedセルの性能比較を示す。3接合セルの場合、内部量子効率は94%、裏面屈折率 $n_r=20$ 程度と試算される。特に、トップセルの内部量子効率は0.94と低い。これは、紫外線やカバーガラスの影響が考えられる。放射線耐性設計の影響も考えられる。これらの補正で、表3に示すように、実際の特性に近づく。多接合セルの変換効率の理想状態、現実値の比較を、表4に示す。4接合セルで、EmCoreにより効率34.2%が得られており、表4に示すように、多接合化により、宇宙用太陽電池のさらなる高効率化が期待される。

表3 3接合セルの理想状態、現実値の特性比較

	効率 (%)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)
現実値 ($n_r=5.7$, $E=0.98$)	34.8	18.8	2888
3G30	29.8	17.2	2700
現実値 ($n_r=20$, $E=0.94$)	30.0	17.4	2688

表4 多接合セルの理想状態、現実値の特性比較と接合数の効果

接合数	2	3	4	5	6
理想状態	42.3	48.2	52.0	54.3	56.3
現実値	30.8	35.5	38.4	40.3	42.0

この他、T.Markvart (Univ. Southampton) による“Harvesting Sunshine: Solar Cells, Photosynthesis and Thermodynamics of Light”と題する基調講演、M. A. Greenら (UNSW) による“Harnessing Plasmonics for Photovoltaics”と題するプレナリ講演があった。

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) M. Fischerら (Q-Cells) は、“The SEMI: International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) – Challenges in c-Si Technology for Suppliers and Manufacturers”と題して、基調講演を行った。結晶Si太陽電池に関するITRPVロードマップの改訂版 (www.itrpv.net) を基に、現状と今後の方向性が述べられた。モジュール価格も、\$0.823/Wp (モジュール/セル/ウェハ/ポリSi : 0.36/0.204/0.135/0.124) から、2020年には、累積生産量10⁷MWとなり、モジュール価格は、学習曲線によれば、\$0.2~0.3/Wpになることが予想される。ポリSi価格も、2010年の\$67/kgから、2011年第一四半期の\$50/kg、2011年末の\$30/kg、2012年9月1日時点の\$20/kgに、急激な価格低減がなされている。

結晶Si太陽電池の薄型化も進もう。図8は、ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池のウェハ厚の薄型化予測を示す。図9は、ITRPVロードマップにおける結晶Siのカーブロス低減予測を示す。結晶Siインゴットのダイヤモンドワイヤを含むスライス技術、薄型基板の操作技術、プロセス技術、高効率デバイス構造技術、薄型太陽電池に適したインターコネクションや封止技術などの開発と同時に、リサイクルが必要である。

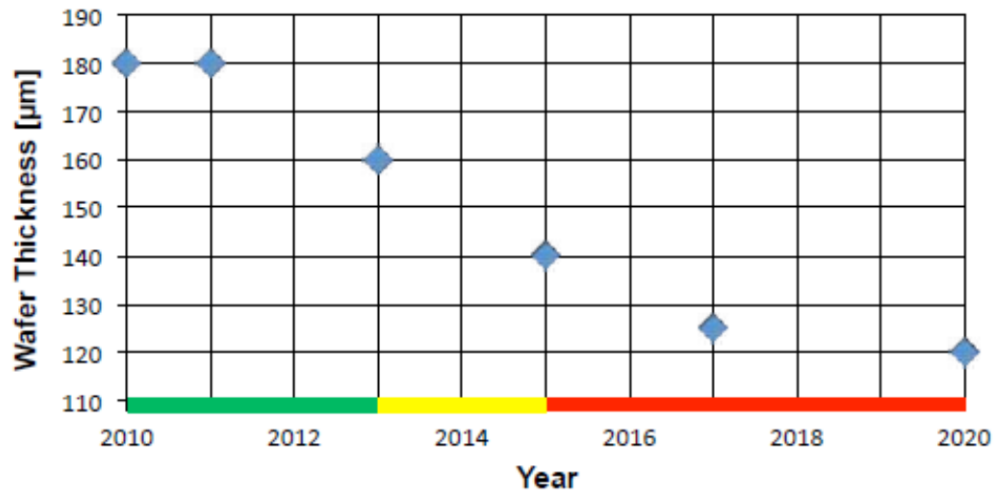


図8 ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池のウェハ厚の薄型化予測

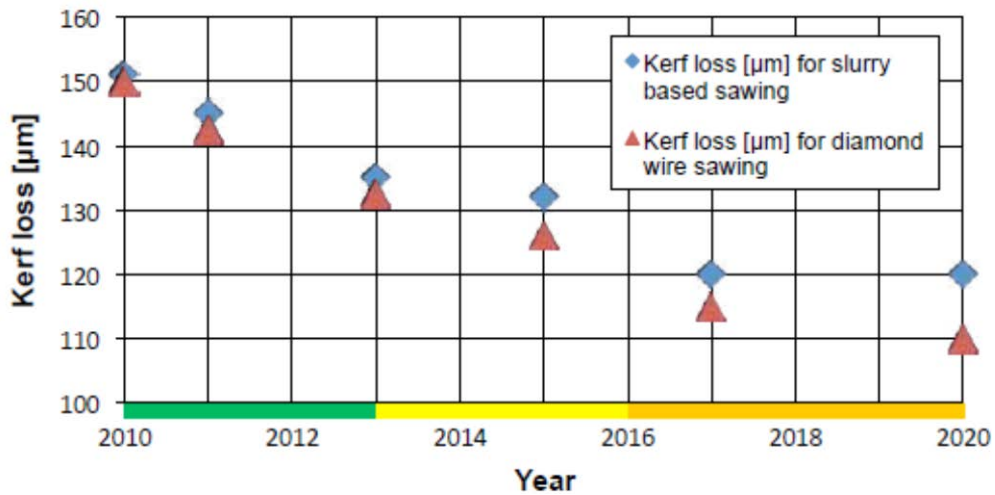


図9 ITRPVロードマップにおける結晶Siのカーフロス低減予測

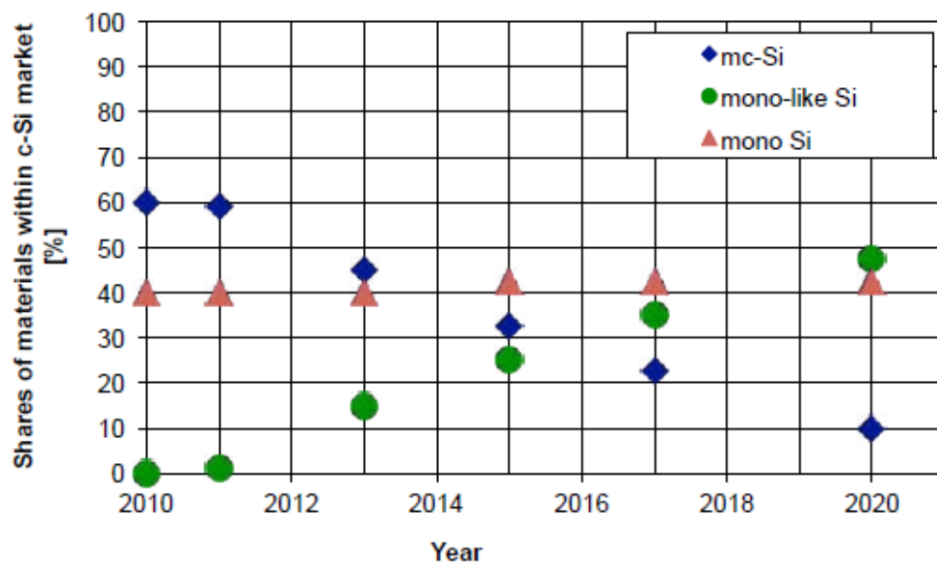


図10 ITRPVロードマップにおける単結晶、擬似単結晶、多結晶基板のシェアの傾向

図 1 0 は、ITRPVロードマップにおける単結晶、擬似単結晶、多結晶基板のシェアの傾向を示す。単結晶のシェアは変わらず、多結晶のシェアが減少し、擬似単結晶のシェアが増加すると予測されている。

n型基板の導入も増えている。図 1 1 には、ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池製造に占めるn型基板の比率予測を示す。

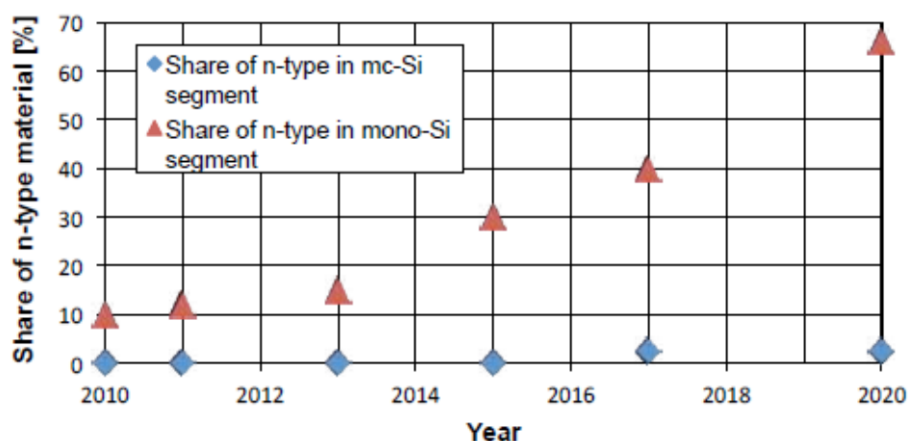


図 1 1 ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池製造に占めるn型基板の比率予測

図 1 2 は、ITRPVロードマップにおける太陽電池モジュール製造コスト低減モデルを示す。2020年には、2010年コストの40%に低減することが予測されている。BOSコストの低減のためには、太陽電池の高効率化が重要である。図 1 3 は、ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池の効率向上を示す。結晶Si太陽電池の高効率化のためには、再結合損失の低減が必要で、製造プロセス時の汚染が課題である。

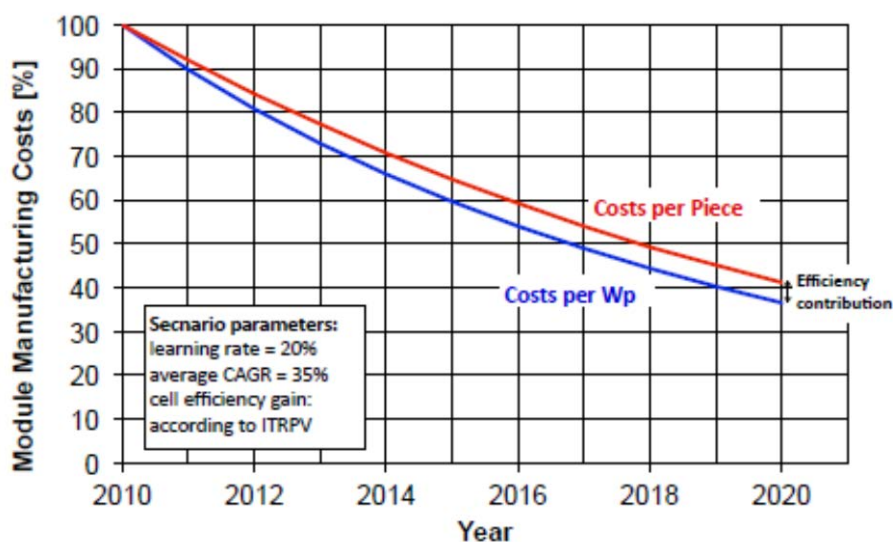


図 1 2 ITRPVロードマップにおける太陽電池モジュール製造コスト低減モデル

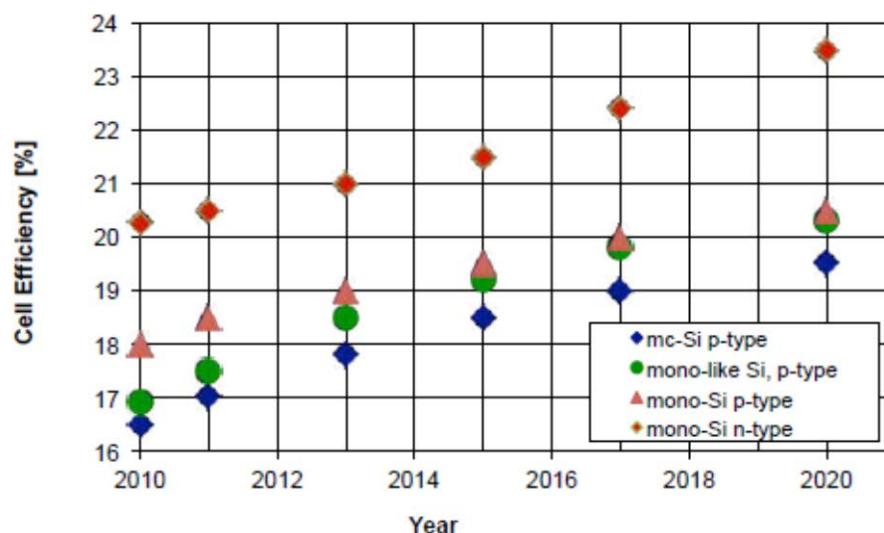


図 1 3 ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池の効率向上

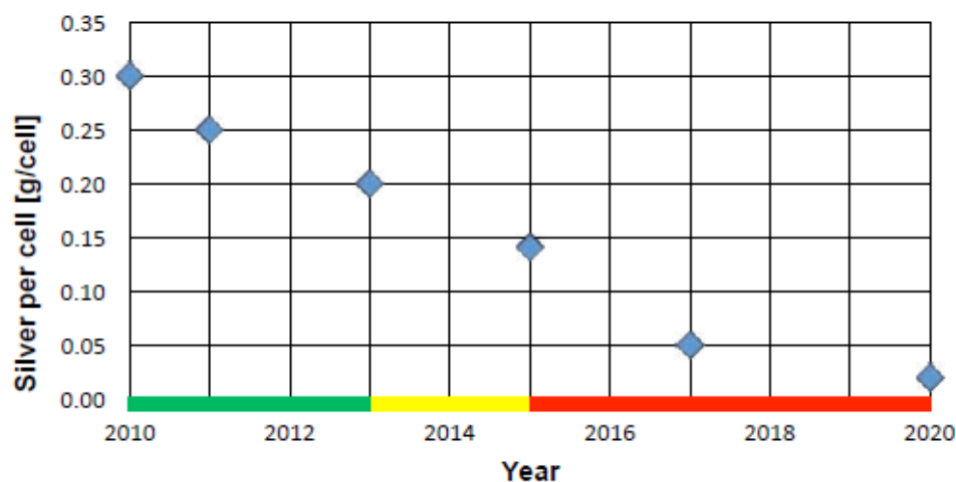


図 1 4 ITRPVロードマップにおけるセル当たりのAg使用量の低減予測

全面BSFからPERCセルへ、単一ステップスクリーン印刷から2ステップメタリゼーションプロセスへ、コスト高の銀インクから銅プレーティングへの傾向にある。図 1 4 は、ITRPVロードマップにおけるセル当たりのAg使用量の低減予測を示す。Cuは、Agより安価で、資源としても豊富であり、Ag代替として期待されている。課題は、プロセス中のダメージ、信頼性、接着性などである。Pbフリーペーストは、2012年中に可能であろうとの事である。

図 1 5 には、ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池の再結合電流密度低減の予測を示す。バルク再結合電流低減には、結晶品質の向上が必要である。表面再結合電流低減には、表面パッシベーションのみならず、低濃度ドーピング、選択エミッタが有効である。裏面再結合電流低減には、 Al_2O_3 、SiN裏面パッシベーション、裏面反射/パッシベーション構造、部分コンタクトなどが検討されている。

図 1 6 は、ITRPVロードマップにおけるガラス厚の低減予測を示す。モジュールにおいては、ガラス厚の低減傾向にあり、ARコートガラス、バックシート反射、インターコネクション損失低減などが検討されている。

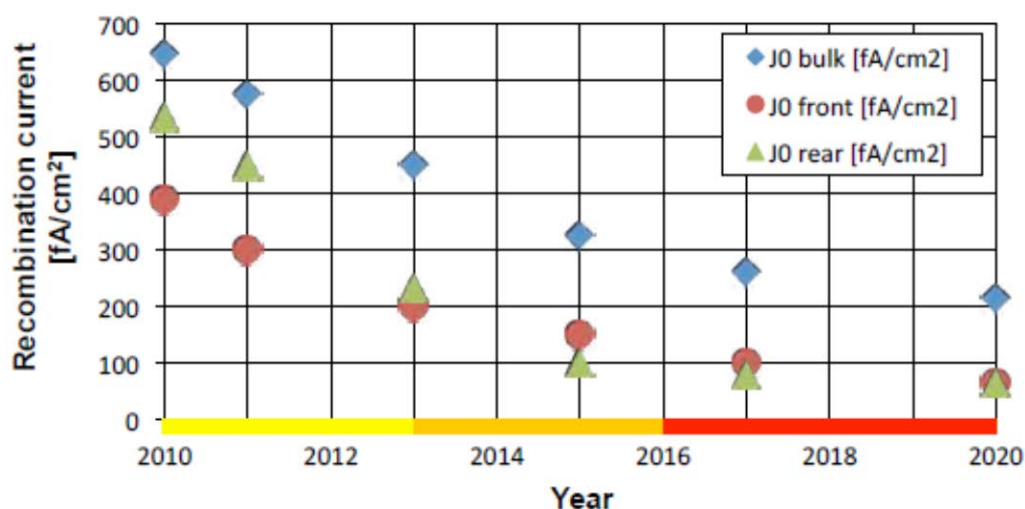


図 1 5 ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池の再結合電流密度低減の予測

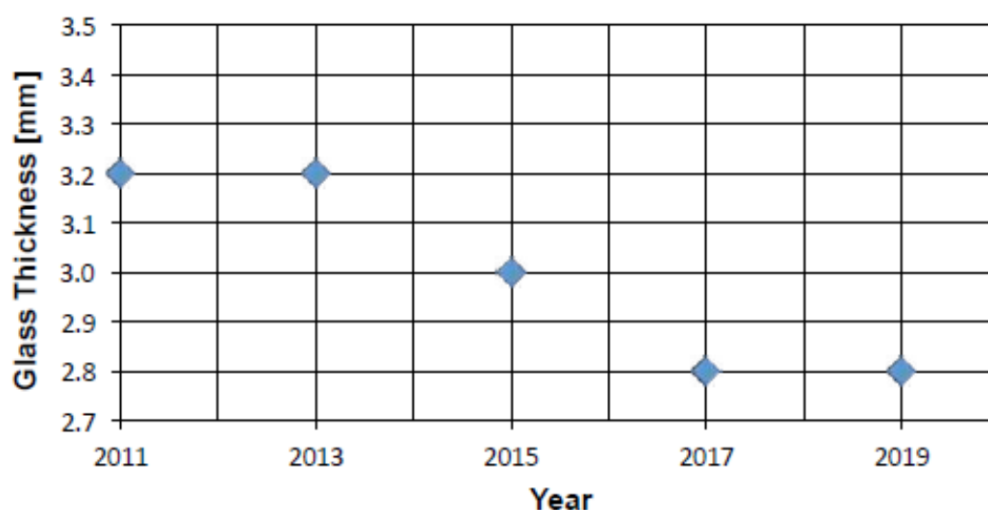


図 1 6 ITRPVロードマップにおけるガラス厚の低減予測

(2) S. Glunz (FhG-ISE) は、“Overview of High Efficiency c-Si Solar Cell Development in Research and Production” と題して、基調講演を行った。160 μ m 厚の単結晶Si太陽電池では、短絡電流密度 J_{sc} として、理論値には、最大43.6mA/cm²が得られるはずである。種々の損失があるが、p-SiのAl-BSFセルでは、光学損失分－5mA/cm²、表面再結合損失分－1.1mA/cm²、ベース再結合損失分－0.8mA/cm²、裏面再結合損失分－1.1mA/cm²があり、35.6mA/cm²で、 V_{oc} =627mV、効率18.4%である。損失低減に向けた種々のアプローチが紹介された。

①裏面の再結合速度は高く、メタリゼーションの改良が有効である。Alペーストの改良によるAl-BSF改良型では、 J_{sc} は35.7mA/cm²に改善され、 V_{oc} =633mVで、効率 η =18.7%である。裏面再結合損失分は、－1.1mA/cm²がら－0.8mA/cm²に改善されているが、高濃度ドーピングによる表面再結合や表面パッシベーションが不十分であることが、課題である。

②表面層の改良として、選択リンエミッタ構造が有効である。PSGからのlaser-over dopingや高濃度エミッタ拡散層の化学的エッチバックが検討され、選択エミッタを用いたp-Siベ

ースのAl-BSFセルでは、 $J_{sc}=36.2\text{mA/cm}^2$ で、 $V_{oc}=643\text{mV}$ 、 $\eta=19.0\%$ となっている。表面再結合損失分が -1.1mA/cm^2 から -0.4mA/cm^2 に大きく改善されているが、ベース層および裏面での再結合が課題である。

③裏面再結合の低減に、裏面パッシベーションが有効である。裏面パッシベーションを用いたQ-CellsのQ-ANTUM技術（a-SiNx:HのAR、スクリーン印刷表面コンタクト、laser firedポイントコンタクトなど）によるp型ベースの単結晶および多結晶セル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の特性を表5に示す。 38.9mA/cm^2 の高い J_{sc} が得られている。CMOSのゲート絶縁膜として用いられている Al_2O_3 は、負電荷、化学パッシベーション、電界効果パッシベーションが特徴である。表面再結合速度の増加につながる熱的安定性が課題である。 AlOx/SiNx のダブル裏面パッシベーションも検討されている。表6に、Trinaによる AlOx/SiNx の裏面パッシベーションを用いたp型cast-monoのPERCセル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の特性を示す。表7に、Schottのp型CZ-SiのPERCセル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の最新の特性を示す。スタック裏面パッシベーションが用いられ、光劣化後の特性で、選択エミッタを用いずに、 38.9mA/cm^2 の高い J_{sc} が得られている。抵抗率は $2\sim 4\Omega\text{cm}$ のものが用いられている。表8に、 $170\mu\text{m}$ 厚のMCZ-p型Si（ $0.9\Omega\text{cm}$ ）を用いたメタルラップスルー（MWT）PERCセル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の特性を示す。光劣化抑制のため、低 O_i 濃度のMCZ結晶が用いられ、laser overdopingによる選択エミッタ、熱酸化 SiO_2 パッシベーションなどが用いられている。PERCセルは、MWT技術と整合性が良い。

表5 Q-CellsのQ-ANTUM技術によるセル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
CZ-Si	652	38.9	78.9	20.2
mc-Si	652	38.9	76.7	19.5

表6 Trinaによる AlOx/SiNx の裏面パッシベーションを用いたp型cast-monoのPERCセル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Best	649	38.1	79.6	19.6
Average	647	38.1	78.8	19.4
Al-BSF	635	36.8	78.1	18.3

表7 Schottのp型CZ-SiのPERCセル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の最新の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
CZ-Si	664	39.9	79.2	21.0

表8 $170\mu\text{m}$ 厚のMCZ-p型Si（ $0.9\Omega\text{cm}$ ）を用いたメタルラップスルー（MWT）PERCセル（ $156\text{x}156\text{mm}^2$ ）の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Median	652	38.9	78.9	20.2
Best cell	652	38.9	76.7	19.5

まとめると、p-Siベースの裏面パッシベーションセルでは、 $J_{sc}=37.2\text{mA/cm}^2$ で、 $V_{oc}=651\text{mV}$ 、 $\eta=20.0\%$ となっている。裏面パッシベーションにより、裏面再結合損失分が -1.1mA/cm^2 から -0.3mA/cm^2 に大きく改善され、かつ、内部反射の改善により、光学損失成分が、 -5mA/cm^2

から $-4.6\text{mA}/\text{cm}^2$ に改善されているが、ベース層での再結合、光劣化による寿命制限が課題である。

④ベース層の改善に向け、n型基板の導入も増えている。表9に、Yingli/ECNによるPanda技術を用いたn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性を示す。表10に、Boschによるn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性を示す。Boschの検討によれば、n型Siのトップとテールで、ドーピング濃度は、6倍異なるが、セルの変換効率は、ほぼ一定との事である。

まとめると、n-SiベースのP-BSFセルでは、 $J_{sc}=37.1\text{mA}/\text{cm}^2$ で、 $V_{oc}=648\text{mV}$ 、 $\eta=19.7\%$ となっている。n型ベースにより、ベース再結合損失分が $-0.8\text{mA}/\text{cm}^2$ から $-0.2\text{mA}/\text{cm}^2$ に大きく改善されているが、裏面再結合が課題である。

表9 Yingli/ECNによるPanda技術を用いたn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Average	648	39.2	78.0	19.8
Maximum	649	39.3	78.3	20.0

表10 Boschによるn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Gold coated	648	39.1	79.5	20.1
Black coated	647	38.7	79.4	19.9

⑤n型Siベースセルの裏面再結合の抑制が検討されている。表11に、Q-Cellsによるn型Siベース、B裏面エミッタP-FSFセルの特性を示す。裏面Bドーパエミッタの裏面接合で、裏面パッシベーションがなされている。表12に、FhG-ISEによるn型SiベースのPERLセルの特性を示す。表面Bエミッタの Al_2O_3 パッシベーション、 SiNx のAR、 n^{++} -BSF、 SiO_2 裏面パッシベーションが用いられ、高い $V_{oc}=705\text{mV}$ 、アパーチャ効率23.9%が得られている。Pの局所拡散の代わりに、レーザドーピングなど、本技術の工業化も検討されている。表13は、工業化に向けたn型SiベースのPERLセルの特性を示す。表12、表13の結果は、FhG-ISEの認定データである。

まとめると、n-SiベースのPERLセルでは、 $J_{sc}=37.3\text{mA}/\text{cm}^2$ で、 $V_{oc}=682\text{mV}$ 、 $\eta=21.3\%$ となっている。n型ベースにより、表面再結合損失分、ベース再結合損失分、裏面再結合分が、各々、 $-0.8\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $-0.3\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $-0.5\text{mA}/\text{cm}^2$ と、再結合損失はかなり改善されているが、光学損失低減が課題である。

表11 Q-Cellsによるn型Siベース、B裏面エミッタP-FSFセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Maximum	667	39.6	79.18	20.9

表12 FhG-ISEによるn型SiベースのPERLセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Best	705	41.1	82.5	23.9

表 1 3 工業化に向けたn型SiベースのPERLセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Best	701	39.8	80.1	22.4

⑥光学損失低減のため、裏面コンタクトセルが検討されている。裏面コンタクトセルも最近の傾向である。この分野では、Sunpowerが実績を有し、2002年の20.6%から、2010年の24.2%へと、効率向上をはかってきている。表 1 4 は、SiIFab/ISC Konstanz、Bosch Solar/Varian/ISFH、Samsung SDI/Varianによる裏面コンタクトセルの特性を示す。SiIFab/ISC Konstanzのセルは、 $\text{BBr}_3+\text{POCl}_3$ 拡散、 SiNx パッシベーション、レーザパターニング、スクリーン印刷メタリゼーションを用いたBifacialセルである。熱拡散に代わるイオン注入も注目されている。Varianとの共同研究開発が進められている。課題は、コストとスループットである。Bosch Solar/Varian/ISFHでは、シャローマスクを用いた選択ドーピングがなされている。Samsung SDI/Varianでは、イオン注入による選択ドーピングに加え、 SiO_2 熱酸化パッシベーションが用いられている。

まとめると、n-Siベースの裏面コンタクトセルでは、 $\text{Jsc}=39.2\text{mA/cm}^2$ で、 $\text{Voc}=699\text{mV}$ 、 $\eta=23.0\%$ となっている。裏面コンタクトにより、光学損失分が、 -2mA/cm^2 と大きく改善され、また、n型ベースにより、表面再結合損失分、ベース再結合損失分が、各々、 -0.2mA/cm^2 、 -0.3mA/cm^2 とかなり改善されているが、裏面再結合分が、 -1.6mA/cm^2 と多く、課題である。

表 1 4 SiIFab/ISC Konstanz、Bosch Solar/Varian/ISFH、Samsung SDI/Varianによる裏面コンタクトセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
SiIFab/ISC Konstanz	646	41.2	79.1	21.0
Bosch Solar/Varian/ISFH	685	41.3	75.0	21.2
Samsung SDI/Varian	676	40.1	81.0	22.4

⑦ヘテロ接合型も最近の傾向である。Panasonic（三洋電機）は、HIT太陽電池で、モジュール効率20.6%の状況で、前回会議で、 $98\mu\text{m}$ 厚の $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ セルで効率23.7%の達成を発表している。a-Siによる両面コンタクトパッシベーションにより高い $\text{Voc}747\text{mV}$ が実現している。裏面コンタクトセルとヘテロ接合の併用により、高いJscの実現が期待できる。表 1 5 に、a-Siによるヘテロ接合を併用したn型ベース裏面コンタクトセルの特性を示す。裏面に、n型a-Si、p型a-Siによるヘテロ接合を用いられている他、表面も、a-SiによるFSF層が用いられている。

表 1 5 a-Siによるヘテロ接合を併用したn型ベース裏面コンタクトセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
n型FZ-Si 4cm ²	723	41.8	77.4	23.4
n型CZ-Si 239cm ²	692	38.4	77.9	20.7

表 1 6 裏面コンタクトパッシベーションを用いた
Sunpowerのn型ベース裏面コンタクトセル (155cm²) の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Peak	721	40.5	82.9	24.2
Median	727	40.0	81.2	23.6

表 1 6 に、裏面コンタクトパッシベーションを用いたSunpowerのn型ベース裏面コンタクトセル (155cm²) の特性を示す。最高効率24.2% (平均効率23.6%)、モジュール効率21.2%の状況であり、2013年初頭から、50MW程度の本仕様のモジュール生産を開始するとの事である。

まとめると、裏面コンタクトパッシベーションを併用したn-Siベースの裏面コンタクトセルでは、Jsc=39.4mA/cm²で、Voc=721mV、 η =24.1%となっている。損失解析がなされ、バルク再結合損失が3.5%と多く、表面再結合損失1.1%、裏面再結合損失0.8%の、計5.4%である。

今後の方向として、フォトニック構造などによるlight trappingなどが、高効率化に有効で、低コスト化に向け、高効率・低コストセル構造、単純な低コストプロセスなどの開発が必要であるとまとめた。

(3) R. Russellら (IMEC) は、“A Simple Copper Metalisation Process for High Cell Efficiencies and Reliable Modules” と題して、プレーナリ講演を行った。CuによるAg代替が検討されている。ここ10年間で、Agペースト価格は、3倍に高騰しており、セル化コストのうち、Agペーストコストは、30~40%を占めている。ITRPVロードマップでも、Ag使用量低減の方向性が示されている。Agの材料コスト\$1000/kgに対して、Ni/Cu/Sn系は、\$9/kg、かつコンタクト抵抗が低く、焼成温度も低くでき、コスト低減、効率向上の可能性がある。先進構造として、Cu表面コンタクト/Al裏面コンタクトの可能性はある。

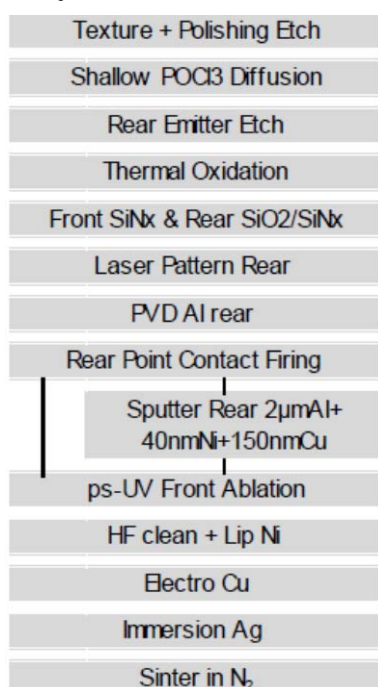


図 1 7 セル作製フロー

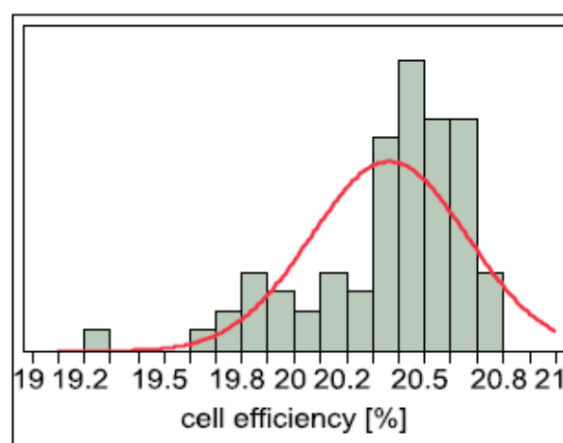


図 1 8 7 4 セルの効率度数分布

図17に、セル作製フローを示す。CZ p-Si ($1\sim3\Omega\text{cm}$) の $12.5\times12.5\text{cm}^2$ のPERCセルを用い、Cu表面/AlNiCu裏面が検討された。図18は、74セルの効率度数分布を示す。ベストセル20.9%、平均20.36%が得られている。ベストセルのFhG-ISEによる測定では、効率20.3% ($J_{sc}=38.8\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=660.8\text{mV}$ 、 $FF=79.2\%$) となっている。日立化成の接着テープによるコンタクトの接着性が検討され、Cu/Al系は、Agスクリーン印刷/Alと同等の良い接着性を示している。18枚の $25\times25\text{cm}^2$ のテドラ/EVA/1セル/EVA/ガラスのラミネート構造に関して、 $-40^\circ\text{C}\sim85^\circ\text{C}$ の300回の熱サイクル試験、 $85\%\text{RH}$ 85℃の1500時間のダンプ熱試験もなされ、Agと同等の信頼性を示している。

今後の課題は、効率21%以上のセル技術、信頼性研究、工業化である。

この他、H. Schulte-Huxel ら (ISFH) の“From High-Efficiency n-type Solar Cells to Aluminum-Based Modules Exceeding 20% Efficiency”、I. G. Romijn ら (ECN) の“Industrial Implementation of Efficiency Improvements in n-type Solar Cells”、C. W. Lan ら (NTU) の“Development of High-Quality Multi-Crystalline Si for PV”、A. Cuevas (ANU) の“Misconceptions and Misnomers in Solar Cells”と題するプレナリ講演、があった。

4. 3 薄膜太陽電池分野：

(1) M. Zeman (Delft Univ. Tech.) は、“Thin-Film Si Photovoltaics”と題して、薄膜Si太陽電池に関する基調講演を行った。UniSolarが3接合タンデムで初期効率16.3%、LG電子の安定化効率13.4%、実用モジュール効率6~10%の状況である。図19に、UniSolarによる3接合タンデムセルの初期効率16.3%を示す。課題は、モジュールの安定化効率15%以上、CVDコスト低減、a-Siの光劣化抑制、などである。

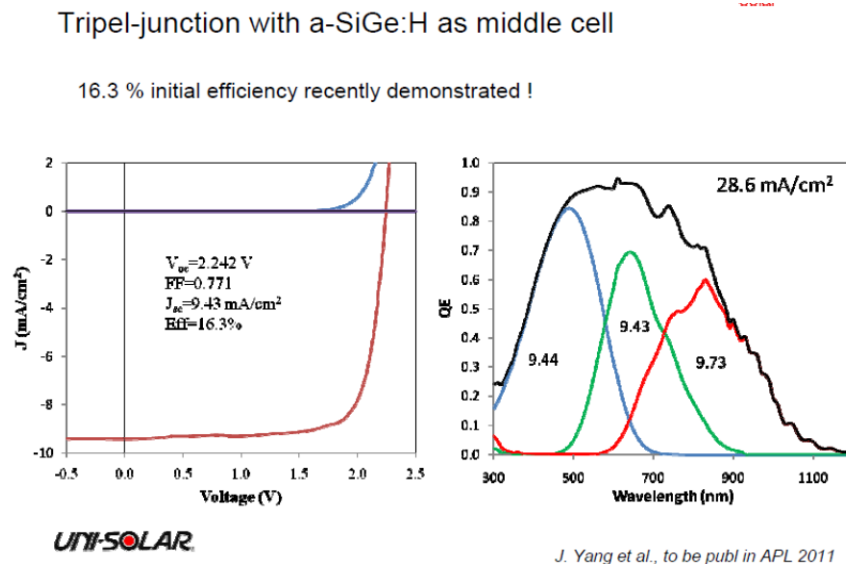


図19 UniSolarによる3接合薄膜SiタンデムセルのI-V特性と分光感度特性

薄膜Si太陽電池の高効率化のキー技術として、新材料、light trapping、ナノ・インブリント技術、モデリング、新概念が重要としている。新材料として、a-SiO₂、s-SiC、 $\mu\text{c-SiGe}$ などのアプローチが紹介された。Light trappingに関しては、通常のテクチャ構造、TCOのエッチングと堆積を組み合わせたmodulatedテクチャ構造、manipulatedテクスチャ構

造などが、反射防止と散乱の観点から言及された。ナノ・インプリントリソグラフィについては、テクスチャのマスターからスタンプ、ナノ・インプリントの流れが紹介された。本手法により、効率12.0% ($J_{sc}=12/9\text{mA/cm}^2$ 、 $V_{oc}=1359\text{mV}$ 、 $FF=68.7\%$) の2接合タンデムセルができているとの事である。2.5 μm 厚の $\mu\text{c-Si}$ セルの効率17% ($J_{sc}=30\text{mA/cm}^2$) のターゲットに向け、三次元光学モデリングをすすめている。新概念として、 ZnO:Al 中のAgナノ粒子によるBSR効果の例などが紹介された。

今後の方向として、効率20%以上の実現を目指して、4接合タンデム、 a-Si の光劣化抑制、高品質材料による V_{oc} 向上、高光吸収材料、light trapping、新材料などの検討が必要としている。 $EQE=0.7$ 、 $V_{oc}/E_g/q=0.55$ 、 $FF=0.75$ により、効率18.3%、 $EQE=0.7$ 、 $V_{oc}/E_g/q=0.65$ 、 $FF=0.8$ により、効率21.2%の実現が可能とまとめた。

4. 4 CIGS、II—VI族化合物薄膜太陽電池分野：

(1) H.W. Schock ら (Helmholtz-Centre Berlin for Materials and Energy) は、“Opportunities and Hurdles for Compound Semiconductors Thin Film Solar Cells in the GW Market”と題して、基調講演を行った。結晶 Si 太陽電池モジュールのコストダウンが進む中、CIGS、CdTe、薄膜 Si 系の薄膜太陽電池の2011年の生産量は、3204MWで、太陽電池生産量の14%と頑張っている。小面積セルの効率は、CIGSで20.3%、CdTeで16.7%であり、モジュール効率は、CIGSで17.8%、CdTeで14%である。表17に、CIGSの高効率セルの効率を示す。ベストの特性を組み合わせると、効率21.6%が可能で、将来的には、効率25%が期待できるとしている。表18に、CIGS、CdTe太陽電池モジュールの実用効率の進展の予測を示す。

表 1 7 CIGS 太陽電池効率の状況と高効率化の可能性

	HIB	NREL	ZSW	Potential
V_{oc} (mV)	702.5	691.8	720.4	720
J_{sc} (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

表 1 8 CIGS、CdTe 太陽電池モジュールの実用効率の進展の予測

	2012	2015	2020	2025
CIGS	13	14-15	15-16	16-17
CdTe	10-12.5	13	13.5	14-15

2012年の生産規模は、CIGS系では、ソーラーフロンティアの1000MWを筆頭に、計2170MW、CdTe系では、First Solarの2700MWを筆頭に、計3100MWである。2015年には、薄膜系で、計10.5GW程度になろうと述べた。今後は、効率向上、高信頼性と同時に、モジュールコストの低減が必要である。モジュールコスト0.5ユーロ/W以下に向けた薄膜系のコストダウンのためには、高スループットなどプロセス改良、ガラス、封止などの改善が必要である。また、コスト低減には、生産量拡張が有効である。投資と同時に市場拡大が必要であり、BIPVや軽量・フレキシブルモジュール用適用領域の発掘が望まれる。今後の高効率化のためには、層堆積、接合形成、界面特性、ワイドギャップ材料での高効率化、などが重要で

あるとしている。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. 5 有機・色素太陽電池分野：

（1）Y. Yang (UCLA) は、” Organic PV: Status and Outlook” と題して、有機太陽電池に関する基調講演を行った。有機系太陽電池の高効率化には、バルクヘテロ接合（BJT）やタンデムの概念が有効で、P3HTの他に、35以上の高分子系で効率5%以上が実現している。出荷されている有機系太陽電池の効率は、3%のオーダーである。三菱化学は、低分子系で効率11%を実現している。Heliatekは、有機系タンデムで効率10.7%、UCLA/住友化学は、高分子系タンデムで効率10.6%を達成している。有機系太陽電池の効率向上が必要である。2011年に、P3HT/PC60BM、PVNTNT/PC60BMの組み合わせで、効率7%、P3HT/PC71BM、TC60BA/PBDTT-DPPの組み合わせで、効率9.36%だった。今回、UCLAでは、P3HT、住友化学の高分子/吸収端波長900nm材料の構成で、効率10.61%を得ている。無機系では、 $E_g/q-V_{oc}=0.4\sim0.5V$ だが、有機系では、低 E_g 系で、 $E_g/q-V_{oc}=0.7V$ 、高 E_g 系で、 $E_g/q-V_{oc}=1V$ と、大きく、高効率化の障害となっている。60℃、85%RHの高温・高湿試験もなされ、1000時間後でも、10%以内の低下におさまっている。また、将来テーマとして、Agナノワイヤ電極、などの試みも紹介された。色素系では、効率12.3%の現状である。

また、色素・有機太陽電池の分野では、効率15%を目指したセルの高効率化、高信頼度化の検討が必要であり、公立の公的機関による効率測定の実証が必要であることが指摘されている。

4. 6 PV コンポーネント：

（1）J. H. Wohlgemuth (NREL) は、” Standards for PV Modules and Components - Recent Developments and Challenges” と題して、基調講演を行った。IEC TC82は、PVにおける国際連携をリードし、国際標準を発行している。1980年初頭に設置されたモジュールに関する標準化を進めているWG2の活動の概要が報告された。5つのサブWGから成る。

①Measurement Principlesは、IEC60891、60904～10にまとめられ、今後は、CPVに関するWG7（IEC60904-3）と連携し、ダイレクトスペクトラムやCPVデバイス用のソーラーシミュレーターに関わるIEC60904-9のアップデートが必要である。

②Qualification and Safety Testingに関しては、IEC61215（結晶Si）、61646（薄膜系）、61730（PVモジュール）にまとめられている。追加修正として、ホットスポットや温度係数などがある。

③Power and Energy Ratingsに関しては、IEC61853-1（irradiation and temperature performance）および-2（spectral response, cycle of incidence and module temperature）にまとめられている。現在、61853-3（module energy rating calculation）を開発中である。

④Specialized Stress Testsに関しては、IEC617（salt-mist corrosion testing of PV modules）にまとめられている。現在、IEC62719（transported testing）、62712（dynamic mechanical load testing）、62716（corrosion testing）2804（system-voltage durability testing）を開発中である。

⑤Module Componentsに関しては、IEC62790 (junction box)、62109-2 (safety for power convertors)、connectors for PC applications in P systems - safety requirement testing、PV cablesなどを開発中である。Module Materialsは、Encapsulants、Back Sheets and Front Sheets、Adhesives、Pottants、Edge Sealから成り、IEC62775、62788-1-2 (EVA)、62788-1-4 (encapsulants and back sheets)、62788-1-5(encapsulation optimization)、62805-1-1、1-2を開発中である。

PVモジュールの25年間動作中で、最大劣化率は、約0.8%/年である。25～30年保証のためには、PVモジュールの加速ストレス試験に基づく寿命推定が要求される。PVモジュールは多岐にわたり、信頼性試験の難しさがある。初期出力の保証、20年後の出力が予測と異なるケースがあり、消費者が損をすることとなる。現時点では、寿命は予測し難い。PVモジュールの劣化モードとして、熱サイクルによるインターコネクターやハンダの破断、ガラスを通してのリーク電流、水の浸透、などがあり、多岐にわたる。図20に示すように、PVの品質保証に向けた国際標準の開発のため、International PV QA Task Forceの設立が、紹介された。6つのWGがあり、さらに3つのWG(wire loading、testing of TF modules、testing of CPV modules) が組織されている。



International PV Module Quality Assurance Forum

The PV QA Task Force was formed last July by AIST, NREL & JRC to develop international standards for ensuring PV quality >200 volunteers

Task Group 1: PV QA Guideline for Manufacturing Consistency
(leader Ivan Sinicco)

Task Group 2: PV QA Testing for Thermal and mechanical fatigue including vibration (leader Chris Flueckiger)

Task Group 3: PV QA Testing for Humidity, temperature, and voltage
(leaders John Wohlgemuth and Neelkanth Dhere)

Task Group 4: PV QA Testing for Diodes, shading and reverse bias
(leaders Vivek Gade and Paul Robusto)

Task Group 5: PV QA Testing for UV, temperature and humidity
(leader Michael Köhl)

Task Group 6: Communication of PV QA ratings to the community
(leader David Williams)

http://www.nrel.gov/ce/ipvmqa_forum/index.cfm

図20 International PV QA Task Forceの概要

この他、Y. Hishikawa (AIST) の “Traceable Performance Characterization of State-of-the-Art PV Devices”、J. Sutterfluetiら (Oerlikon Solar) の “Bos Costs: Status and Optimization to Reach Industrial Grid Parity” と題する基調講演、があった。

4. 7 PV システム :

(1) F.P. Baumgartnerら (ZHAW Univ.) は、” integration and Management of PV Mattery Systems in the Grid” と題して、プレーナリ講演を行った。ドイツなどでは、系統に占めるPVの比率が増加しつつある。ドイツの場合、図21に示すように、2011、2012、2017、2020年に、各々、24GW (4%)、29GW (5%)、51GW (9%)、68GW (12%) と予測されてい

る。集中発電から分散発電へ、スマートグリッドが重要となろう。系統連携は、電圧や周波数変動をもたらし、系統の安定化のためには、PVシステムのsmart integrationが必要である。一解決策として、PV+EV+バッテリーのsolar home storage system (図2-2)があり、系統の安定化のためにも、バッテリーの重要性が増している。図2-3には、市場における種々のバッテリーの現状をまとめて示す。いくつかのケーススタディが述べられた。図2-4は、PV、バッテリー、グリッドのコストシナリオを示す。2017、2018年頃に、PV+バッテリーシステムも、グリッドパリティを実現できるとしている。

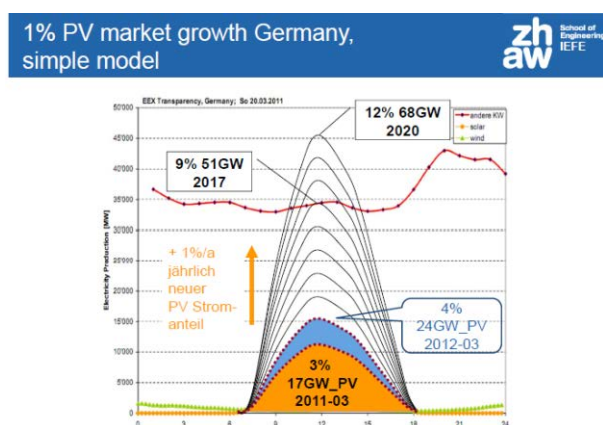


図2-1 ドイツにおける系統に対するPVの割合

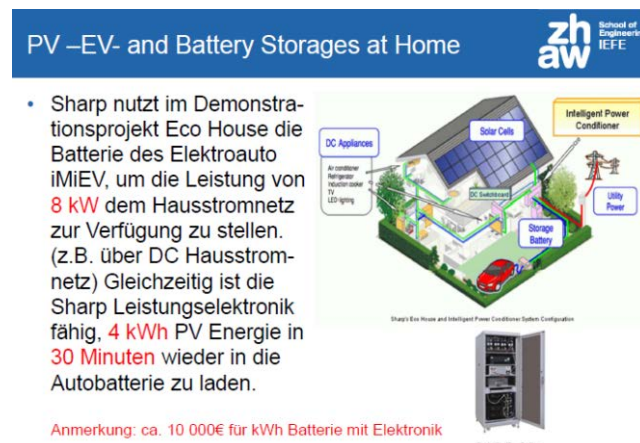


図2-2 PV-EV-Batteryホームシステム

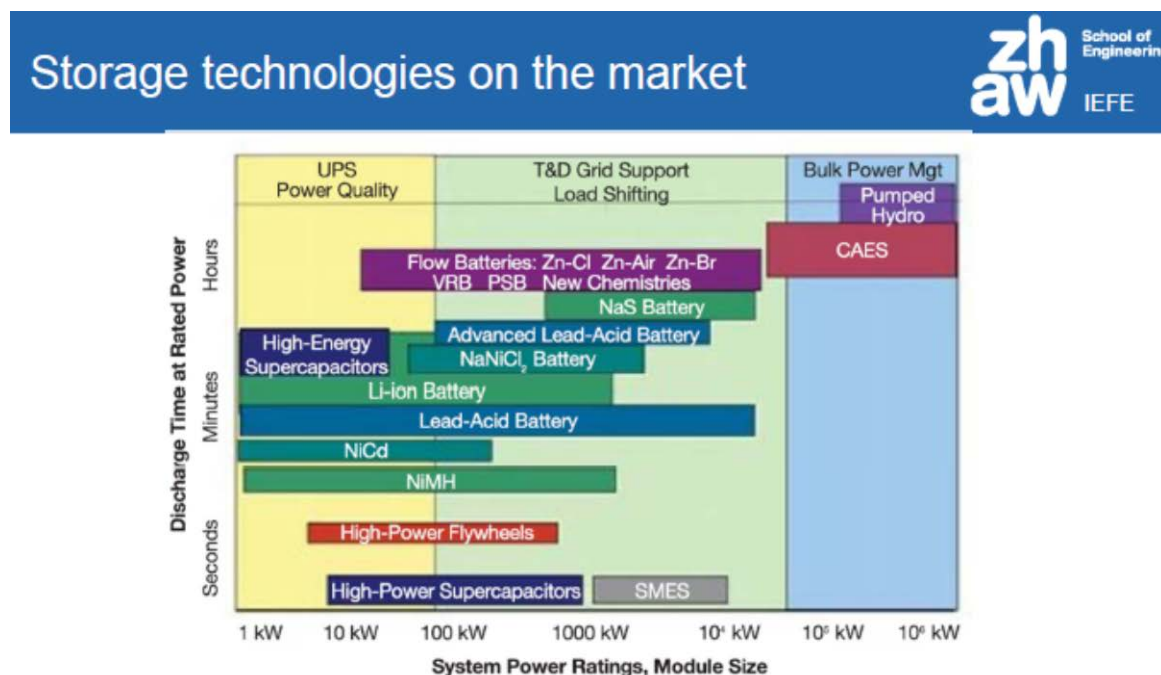


Figure 2. A comparison of grid-level energy storage technologies. UPS, uninterruptible power supply; T&D, transmission and distribution. Source: Electric Power Research Institute.

MRS BULLETIN • VOLUME 36 • MARCH 2011 • www.mrs.org/bulletin • Energy Quarterly

図2-3 市場における種々のバッテリーの現状

Future cost trends PV, storage, grid : scenario optimistic ?

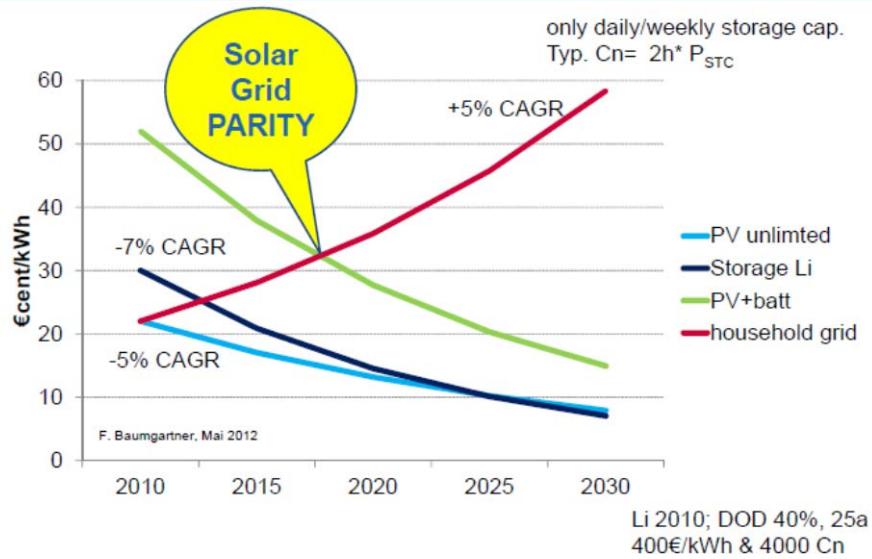


図 2 4 PV、バッテリー、グリッドのコストシナリオ

この他、H. Ossenbrikら (EC-JRC) の“New Opportunities for PV Systems”と題する基調講演、A. Umlondら (SMA Solar Tech.) の“Industrial Solutions for Large PV Integration in the Smart Grid”、H. Schumacher (FH Erfurt) の“Sustainable Development of the Local and Natural Scenery with Renewable Energy Sources”と題するプレナリ講演、があった。

4. 8 市場、政策等：

(1) M. Simonek (Bloomberg New Energy Finance) は、“PV Financing Trends - unequal Scores at half time-”と題して、基調講演を行った。

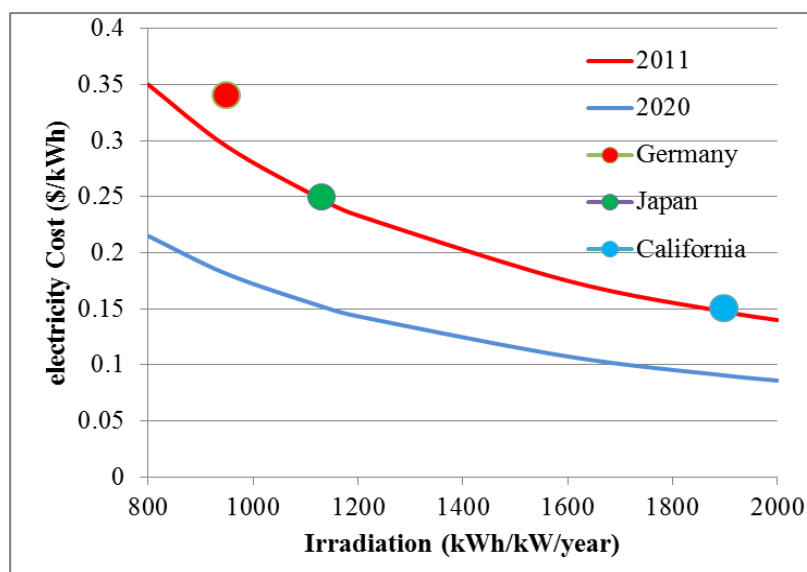


図 2 5 2011、2020年の日射量 (kWh/kW/年) にPVに対する電力コストの関係

2012、2013年、2014年のPVの世界市場は、各々、楽観的には、35.7GW、35.7GW、43.8GW、悲観的には、28.6GW、24.2GW、28.7GWと予測されている。ここ7年間平均して、半導体16%、薬14%、自動車4%に比べて、PVは約2%と低いとの事である。投資は、2011年第1四半期、第2四半期、第3四半期、第4四半期、2012年第1四半期、第2四半期、各々、263、436、436、293、203、333億ユーロと推移している。2011年、国別では、イタリア、ドイツ、中国、フランス、米国、スペイン、日本の順である。図25に、2011、2020年の日射量(kWh/kW/年)にPVの対する電力コストの関係を示す。多くの国で、グリッドパリティが実現されつつある。

(2) P. Rigby (EMIRI) は、“Materials Requirements for PV”と題して、プレーナリ講演を行った。ECでは、低炭素技術のためのロードマップが策定されている。図26は、PV分野における材料ロードマップを示す。材料使用の最適化、光マネジメント、高スループット・低コスト薄層、高付加価値材料、BOS用材料、研究・教育インフラ、の観点からまとめられている。setis.ec.europa.eu/activities/materials-roadmapで、入手できる。

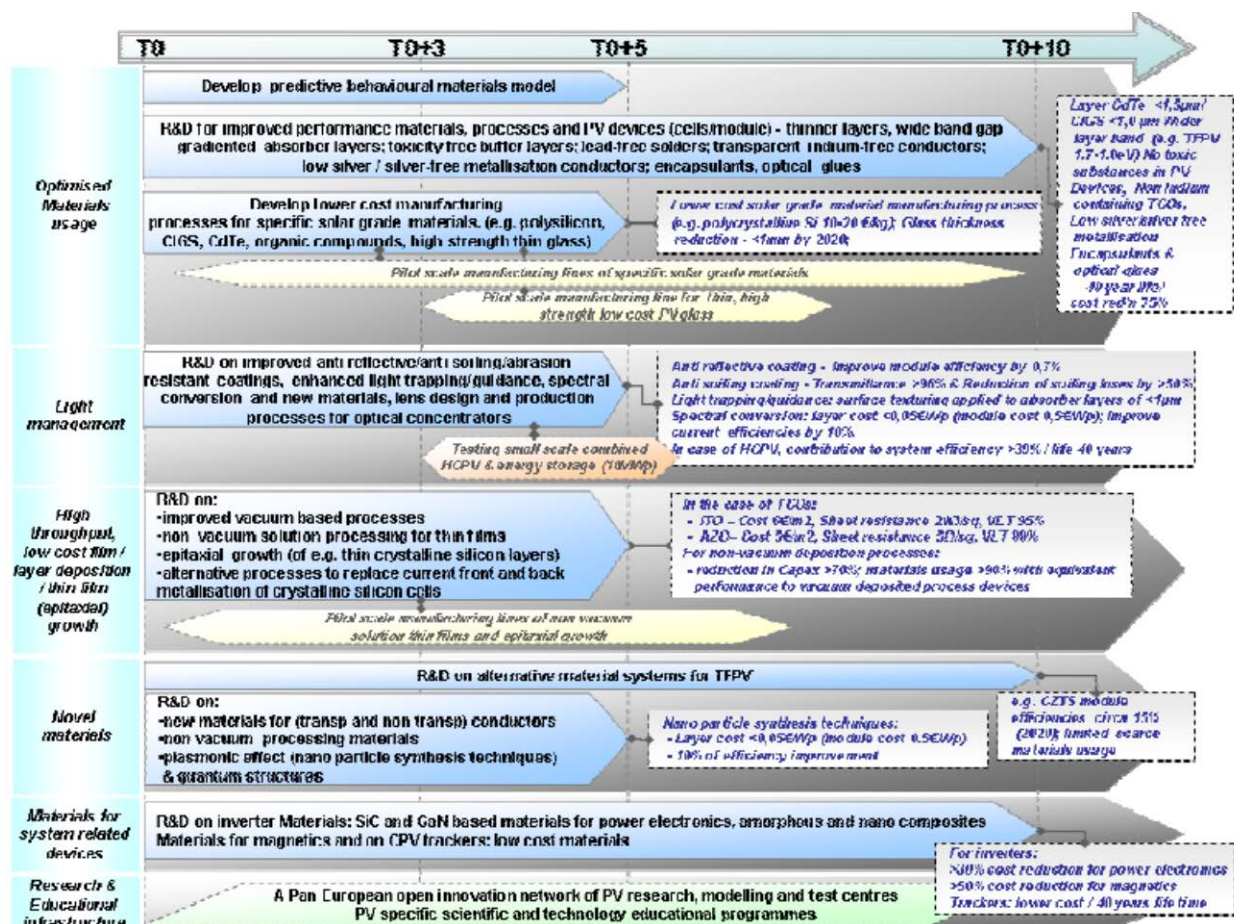


図26 PV分野における材料ロードマップ

この他、I. Pinedo-Pascusら (EC-JRSC) の“AFRETEP: lessons learned from capacity building experiences with African academia”、P. Frankl (IEA) の“PV in IEA Medium-term Market Forecast and Long-term Scenarios”と題するプレーナリ講演、があった。

5. 感想：

今回の会議は、太陽光発電に関する最大規模の会議となった。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件数が480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。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だが、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、中国に追い抜かれ、台湾、韓国が追い上げている。特に、中国企業は、UNSW、米国、ECN、ISFHやSERISなどから技術導入をしており、わが国は、結晶Si太陽電池の研究開発者人口を増やし、レベルを上げることが必要である。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。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、薄膜系の元気のなさも気にかかる。産学連携を強化し、結晶Si太陽電池に対して、性能、コスト、寿命等でも優れたものを開発することが求められている。

昨年6月から、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米での集光型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良い機会となろう。

欧米の専門家達と話す中で、我が国での有機・色素にかけるリソースの多さに驚かれる。性能や信頼性に課題が多く、基礎にたちかえる必要があろう。

次回の28th EU-PVSECは、2013年9月30日～10月4日に、フランスのパリで開催予定である。第22回太陽光発電国際会議(PVSEC-22)は、2012年11月4日～11月9日、中国・杭州で、38th IEEE PVSCは、2013年6月16日～21日、フロリダ州タンパで開催予定である。

(以上)