

# 第 26 回太陽光発電欧州会議（26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition）報告

2011. 9. 15

山口真史（豊田工大）

1. 開催月日：2011年9月5日～9日。

2. 開催場所：Congress Center Hamburg（ハンブルグ、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、Heinz Ossenbrink（EC-JRC、イタリア）で、論文委員長は Arnulf Jager-Waldau（EC-JRC、イタリア）であった。今年は、84の国と地域から約4,467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。

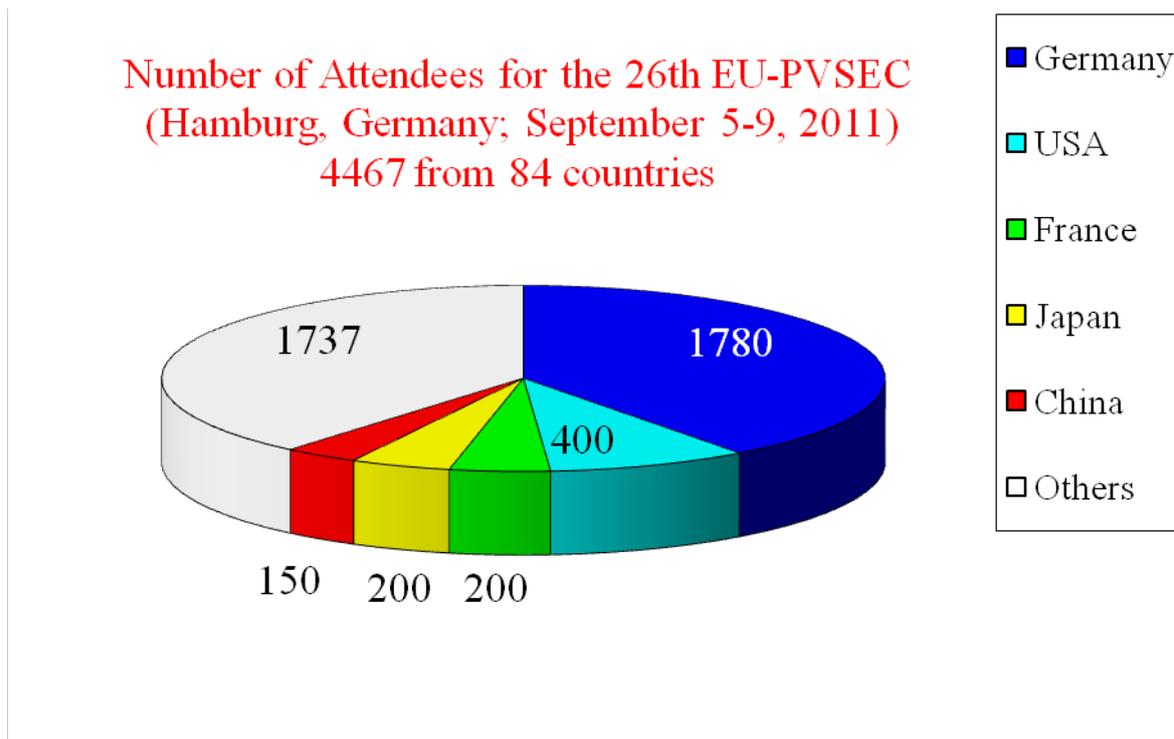


図1 国別参加者数

図1に、国別参加者数を示す。国別では、①ドイツ約1780名（約40%）、②米国約400名、③フランス約200名、④日本約200名、⑤中国約150名、の順であった。

**Number of Papers presented at the 26th EU-PVSEC  
(Hamburg, Germany; September 5-9, 2011)  
1499 Papers**

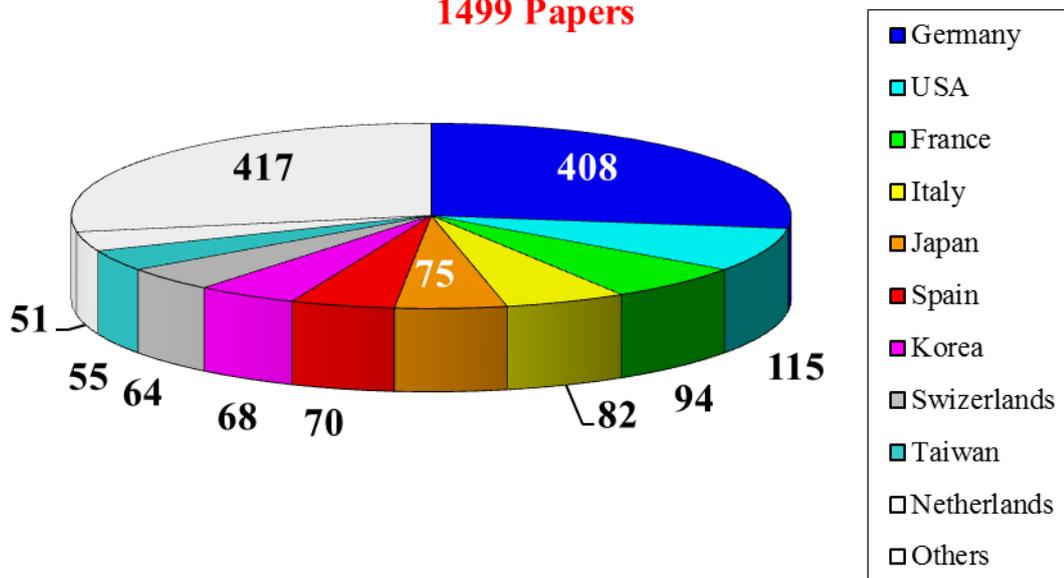


図2 国別発表論文件数

図2は、国別発表論文件数を示す。67カ国から1,499件の論文発表があった。国別では、①ドイツ408件、②米国115件、③フランス94件、④イタリア82件、⑤日本75件、⑥スペイン70件、⑦韓国68件、⑧スイス64件、⑨台湾55件、⑩オランダ51件、の順であった。

**Number of Papers presented  
at the 26th EU-PVSEC  
(Hamburg, Germany; September 5-9, 2011)  
1499 Papers**

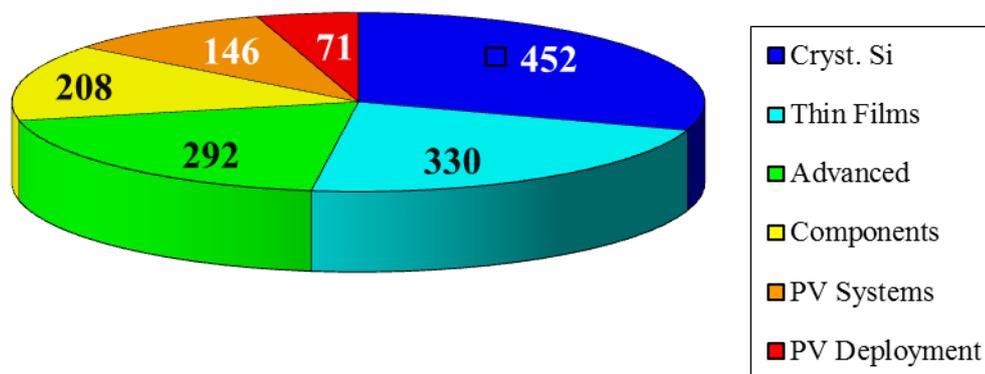


図3 発表論文件数の分野別内訳

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452件、②薄膜系330

件、③先端PV（超高効率、集光、宇宙、色素・有機、基礎・新材料・新素子）292件、④PVコンポーネント208件、⑤PVシステム146件、⑥国家プログラム・政策・PV市場71件、の順であった。

Becquere Prizeは、Wim Sinke (ECN) が受賞した。結晶Si太陽電池の研究開発への貢献、Crystal Clearプロジェクトなどのプロジェクト推進、Strategic Research Agendaの策定委員長、などの業績が評価された。

この他、学会併設の展示会には、999社の太陽電池関連企業が出展し、約40,000名の来場者があったとの事である。

#### 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 超高効率太陽電池分野：

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。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していること。

(1) A. Gombert (Solitec Solar) は、“Status of Concentrator PV Technology” と題して、プレーナリ講演を行った。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、Solitec Solarの取り組みが述べられた。研究段階の集光型セルの効率は43.5%に達し、モジュール効率25～30%、システム効率23～27%の現状であり、他の太陽電池よりも格段に性能が良い。既に、数社が、1MW以上のCPVシステム設置に貢献している。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、2500kWh/m<sup>2</sup>/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。2010年の生産規模は155MWで、IEC62109に準拠した認証、各種信頼性試験も行われている。ISOFOCでの知見によれば、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。2012年までに、モジュール効率30～35%を実現し、図4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。

# CPV Market Forecast 2010

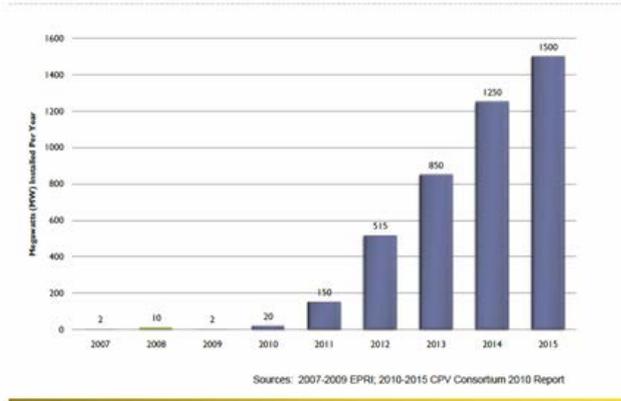


図4 CPVの市場予測

(2) R. Kingら (Spectrolab) は、“Solar Cell Generations over 40% Efficiency” と題して、集光型太陽電池についてブーナリー講演を行った。集光型太陽光発電システムの効率分析では、セル効率40%とした場合、現状の光学効率80%、温度係数要因0.925、電流不整合の設計要因0.99で、モジュール効率29.3%、インバーター効率0.97、日射条件による電流不整合要因0.954、追尾誤差要因0.99で、システム効率26.3%と試算される。当面、セル効率とモジュール効率の向上が必要である。電力コスト0.1ユーロ/kWh以下を実現するためには、セル効率26%、システム効率16.5%の結晶Siは7.5kWh/m<sup>2</sup>day以上の日射条件が必要であるが、セル効率40%、50%の集光型PVでは、各々、5.8kWh/m<sup>2</sup>day、4.1kWh/m<sup>2</sup>day以上で可能で、極めて有利である。これまで、SpectrolabでのIII-V族多接合太陽電池の技術開発の状況も紹介された。

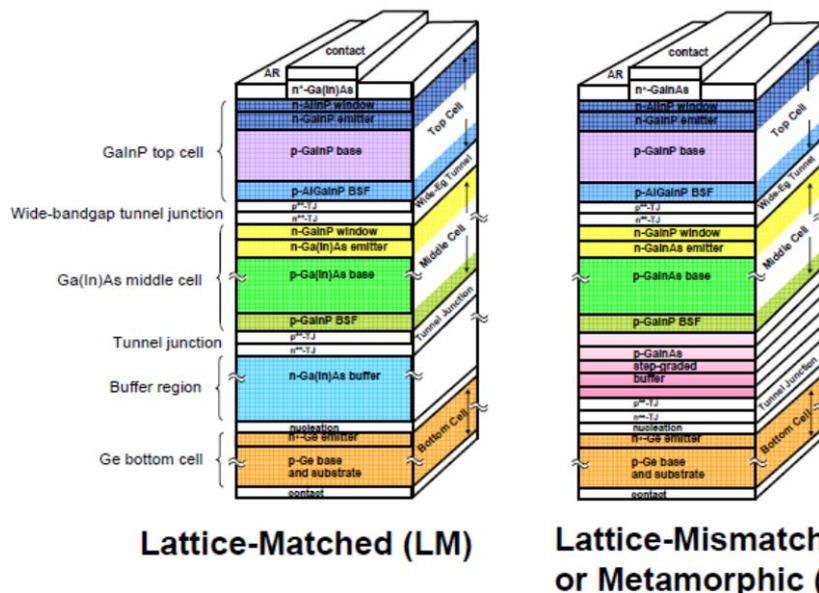


図5 格子整合 (LM) 系および格子不整合 (MM) 系 3 接合セルの構造

Spectrolabでは、2004年の格子整合(LM)系3接合セル(図5)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基板にMOCVD成長により格子不整合(MM)系(図5) 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6に、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(面積0.256cm<sup>2</sup>)が作製され、AM1.5Dの256倍集光で効率36.9%を得ている。今後、1.7eV/1.48eV/1.12eV/0.67eV 4接合セルの500倍集光で効率44.4%、2eV/1.7eV/1.4eV/1.2eV/0.67eV 5接合セルの500倍集光で効率47.4%、2eV/1.7eV/1.46eV/1.2eV/0.67eV/0.67eV 6接合セルの500倍集光で効率50.9%が可能であるとしている。

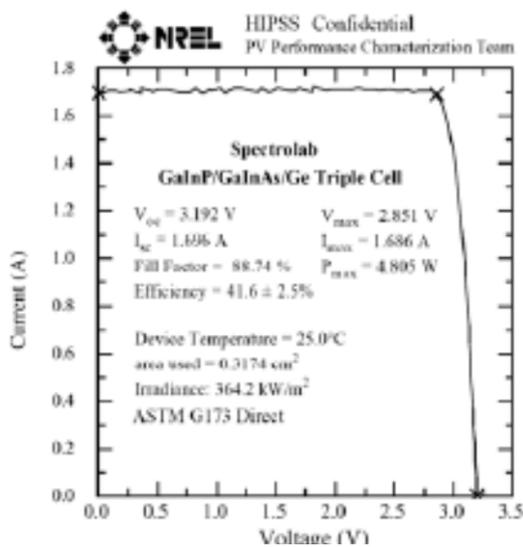


図6 41.6%格子整合GaInP/GaInAs/Ge

3接合セルの364倍集光I-V特性

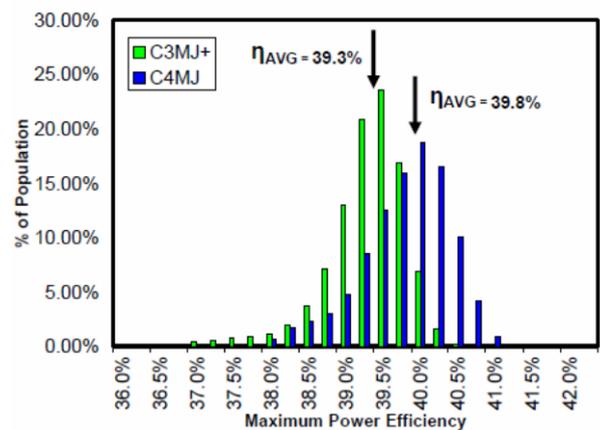


図7 生産した集光型3接合セル効率の度数分布

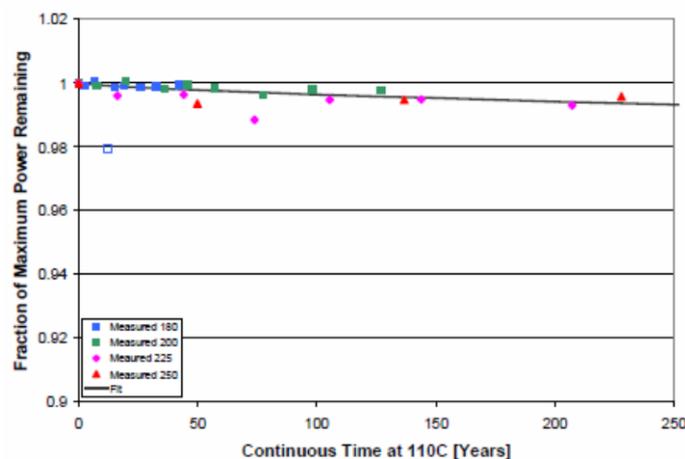


図8 高温加速試験に基づく110°Cでの集光型3接合セルの推定寿命

生産レベルの集光型セルの平均効率も、図7に示すように、C1MJセルの36.9%から、C2MJセルの37.7%、C3MJセルの38.7%、最近のC4MJセルの39.8%へと改善されている。集光型3接合セルの各種信頼性評価試験も行われている。表1は、集光型3接合セルの信頼性評価試験項目を示す。図8は、高温度加速試験に基づく110°Cでの集光型3接合セルの推定寿命を示す。180°C、200°C、225°C、250°Cでの高温加速試験が行われ、それらのデータのアレニウスプロットから、集光型セルの最大動作温度110°Cでの寿命が推定されている。集光型3接合セルは、熱的に信頼性があることが示されている。今後、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。10年以内に、セル効率50%を達成したいとの事である。

表1 集光型3接合セルの信頼性評価試験項目

Test	Test Conditions	Results
LIV	25 °C, under 50 W/cm <sup>2</sup> of ASTM G173-03(2008)	Effmp = 39.6%
Temperature and intensity	10, 25, 60, 85 and 110C at 50, 75, 100 and 125 W/cm <sup>2</sup>	Characterization
Thermal cycle	1,500 cycles from -40C to +110C with 10 min dwells	NPmp = 1.00
Damp heat	85C/85% RH	NPmp=0.990
		NPmp=0.993
Humidity Freeze	500 thermal cycle preconditioning, 20 cycles IEC 62108	NPmp = 0.993
High temperature soak	180, 200, 225 and 250 C in N <sub>2</sub>	NPmp = 1.00
Accelerated Operating Life	1,000 hrs @ 160°C in air with dark forward current of 0, 1 A & 4 A	NPmp=0.990
ESD	JEDEC CDM 1,000 & 2,000 V	Class IV (Pass 2,000 V)
	JEDEC HBM 4,000 & 8,000 V	Class 3A (Pass 4,000 V)
Outdoor test	> 10 kW on sun for 6 months	No Failures Observed

#### 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) R. Mertens (IMEC) は、“Crystalline Silicon for PV Application, Status, Challenges and Growth for Large Scale Electricity Production” と題して、基調講演を行った。結晶Si太陽電池に関するITRPVロードマップが引用されている。図9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10は、ITRPVロードマップにおける大量生産レベルの結晶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。Fe<sub>i</sub>、FeB、Ni、Cuなどの不純物の効果が言及されている。

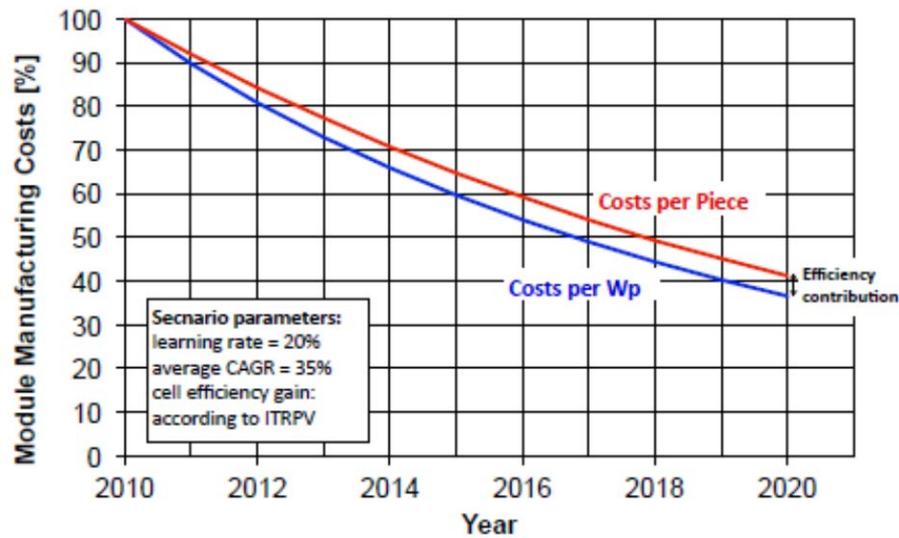


図9 ITRPVロードマップにおける太陽電池モジュール製造コスト低減モデル

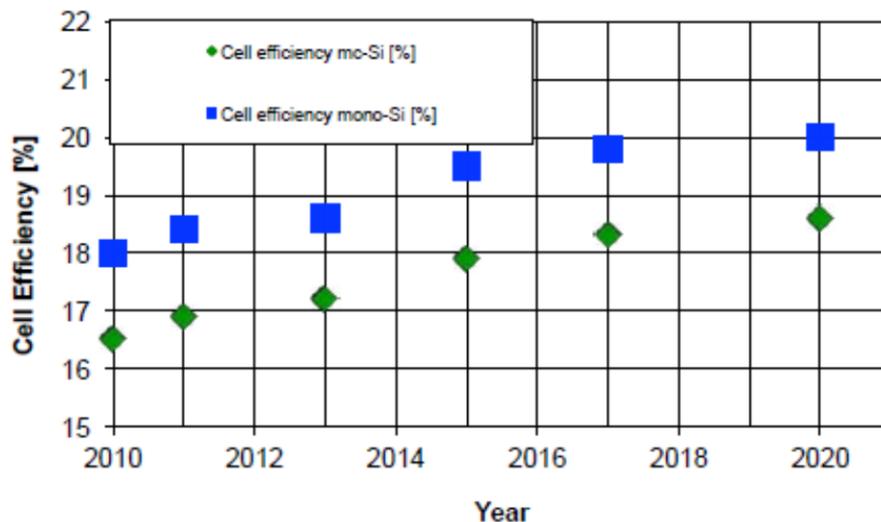


図10 ITRPVロードマップにおける大量生産レベルの結晶Si太陽電池の効率向上

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チングへの傾向にある。先端太陽電池技術も要約された。

①銅は銀より安価で、資源としても豊富である。課題は、プロセス中のダメージ、信頼性などである。

②CMOSのゲート絶縁膜として用いられているAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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り、4cm<sup>2</sup>のp-type FZ、n-type FZで、各々、21.1%、22.5%が実現している。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。

③熱拡散に代わるイオン注入も注目されている。243cm<sup>2</sup>CZで効率19.1%の状況である。課題は、コストとスループットである。

④n型基板の導入も増えている。図11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。FhG-ISEでは、4cm<sup>2</sup>、141cm<sup>2</sup>のFZ-Siで、各々、20.1%、19.6%を実現している。

⑤ヘテロ接合型も最近の傾向である。三洋電機は、HIT太陽電池で、

モジュール効率20.6%の状況で、本会議で、98 $\mu$ m厚の10cmx10cmセルで効率23.7%の達成を発表している。⑥裏面コンタクトセルも最近の傾向である。図1 2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裏面コンタクトセルの比率予測を示す。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。

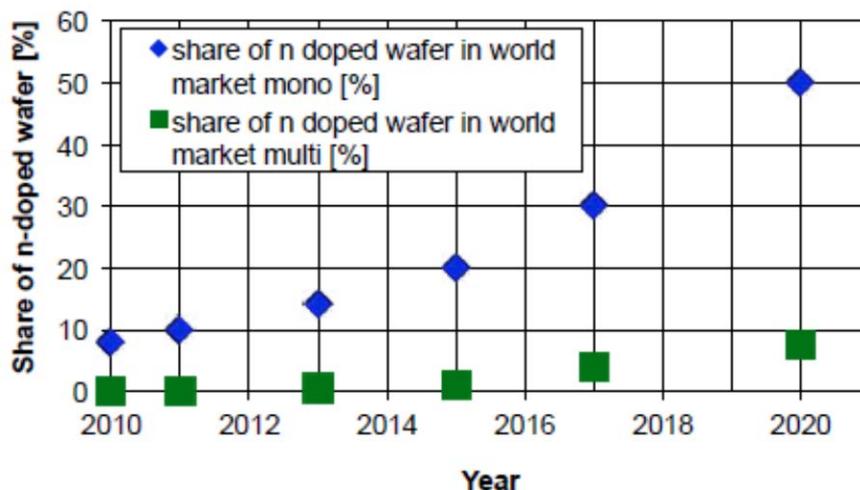


図1 1 ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池製造に占めるn型基板の比率予測

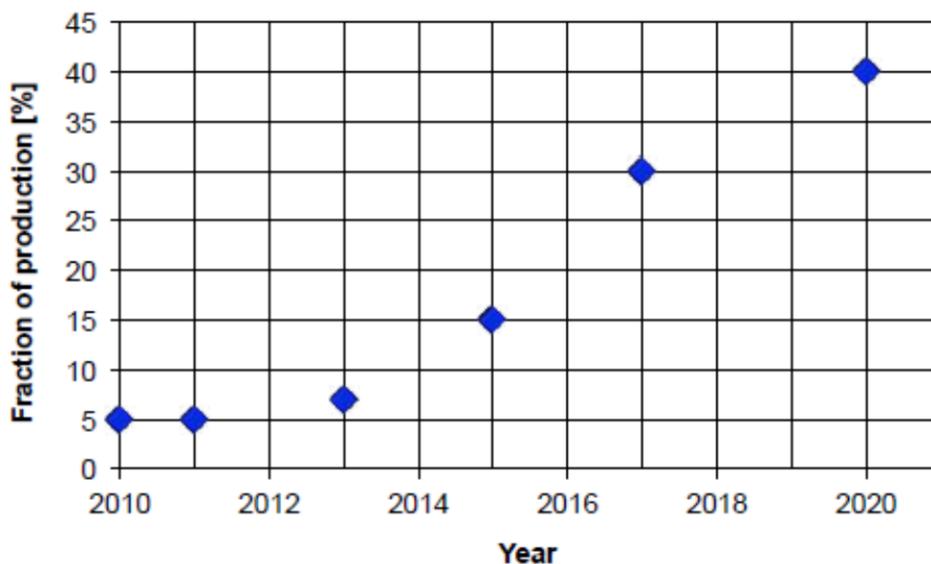


図1 2 ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池製造に占める裏面コンタクトセルの比率予測

⑦結晶Si太陽電池の薄型化も進もう。図1 3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1 4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が必要である。

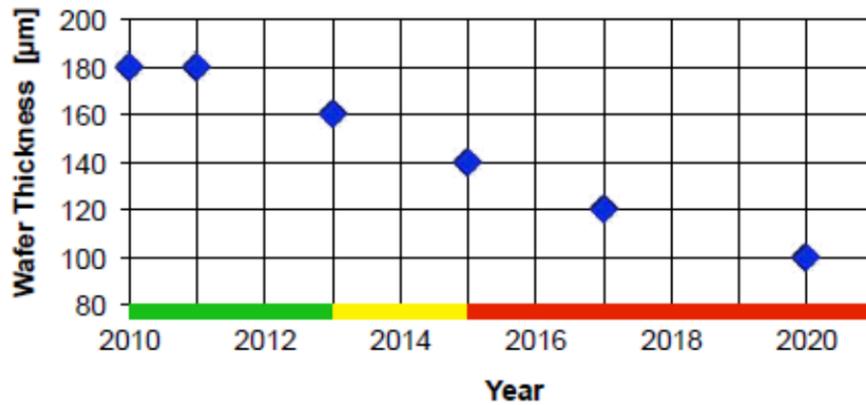


図1.3 ITRPVロードマップにおける結晶Si太陽電池のウエハ厚の薄型化予測

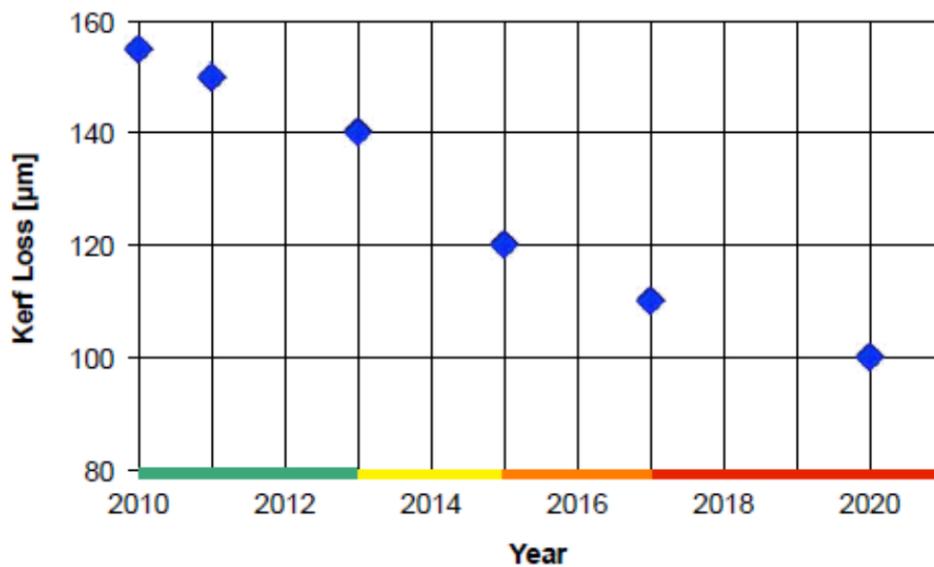


図1.4 ITRPVロードマップにおける結晶Siのカーフロス低減予測

(2) C. Balifら (EPFL) は、“High Efficiency Silicon Hetero-junction Cells: from basics to pilot lines” と題して、ヘテロ接合結晶Si太陽電池に関して、プレーナリ講演を行った。図1.5に示すように、ヘテロ接合太陽電池は、a-Siによる優れたパッシベーション、薄型化に適した200°C程度の低温プロセス、単純構造・単純プロセスの特徴を有する。しかし、三洋電機のHITセルの効率23.7%に対して、RRSは21.2%、EPFLは21%で、マジックである。ドイツのROTH&RAUと共同開発を行っている。図1.6に示すように、a-S成膜には、PECVD装置として、VHF (40.68MHz) のKAI-M-PECVD装置と13MHzのOCTOPUS-PECVD装置を用いている。ヘテロ接合太陽電池の高効率化のキー技術は、ヘテロ接合、TCOである。ヘテロ接合の基礎的理解が重要で、界面再結合に注力し、過剰キャリア密度と実効キャリア寿命、界面準位と内蔵電荷等を検討した。表面、裏面TCOと裏面Ag電極は、DCスパッタにより、表面Ag電極は、スクリーン印刷により形成した。基本的にテクスチャーn型Fz基板 (4Ω cm、240 μm厚) を用いた。

## Heterojunction crystalline solar cells

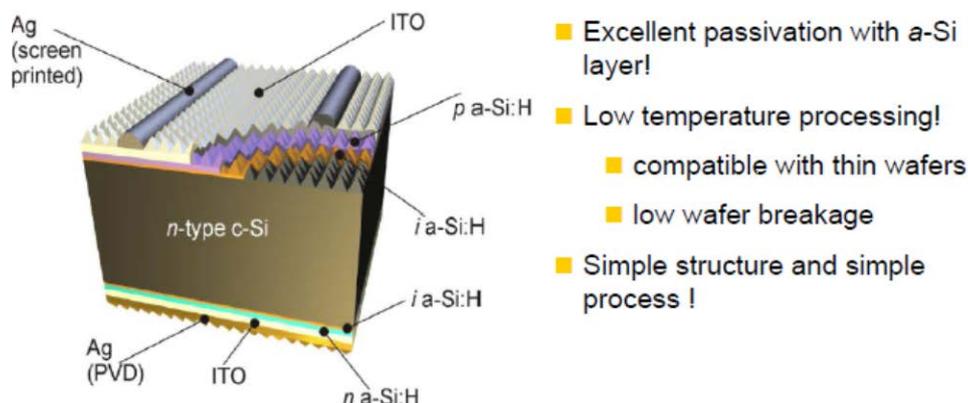


図 1 5 ヘテロ接合結晶Si太陽電池の構造と特徴

### PECVD reactors for HJT cells at PV-LAB Neuchâtel Amorphous silicon deposition



KAI-M, large-area industrial reactor, 40x50 cm<sup>2</sup> VHF (40.68 MHz)

OCTOPUS cluster from Indeotec SA R&D reactor, 13x13 cm<sup>2</sup> (13 – 100 MHz)

725	V <sub>oc</sub> [mV]	714
37.3	J <sub>sc</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	36.5
77.8	FF [%]	78.2
21 %	Efficiency	20.4%

図 1 6 PECVD装置とEPFLでのヘテロ接合結晶Si太陽電池特性の結果

n型FZの2cmx2cmセルでは、図 1 6 に示すように、VHF-PBCVDで効率21%、13MHz-PECVDで効率20.4%が得られている。n型CZの2cmx2cmセルでは、効率20.8% (V<sub>oc</sub>=731mV、J<sub>sc</sub>=36.9mA/cm<sup>2</sup>、FF=77.1%)、n型FZの100cm<sup>2</sup>セルでは、効率20.5% (V<sub>oc</sub>=729mV、J<sub>sc</sub>=36.5mA/cm<sup>2</sup>、FF=77.2%)、p型FZの100cm<sup>2</sup>セルでは、効率19.75% (V<sub>oc</sub>=717mV、J<sub>sc</sub>=37.9mA/cm<sup>2</sup>、FF=72.7%) が得られている。

ROTH&RAUでは、n型CZの2cmx2cmセルでは、効率21.9% (V<sub>oc</sub>=735mV、J<sub>sc</sub>=38.5mA/cm<sup>2</sup>、FF=77.8%)、n型FZの15.6cmx15.6cmセルでは、効率20% (V<sub>oc</sub>=719mV、J<sub>sc</sub>=36mA/cm<sup>2</sup>、FF=77.2%)、n型CZの238.5cm<sup>2</sup>セルでは、効率19.65% (V<sub>oc</sub>=722.8mV、J<sub>sc</sub>=35.48mA/cm<sup>2</sup>、FF=76.7%)、n型CZの596cm<sup>2</sup>セルでは、効率19.3% (V<sub>oc</sub>=728mV、J<sub>sc</sub>=36mA/cm<sup>2</sup>、FF=73.8%)、の状況である。

### 4. 3 薄膜太陽電池分野：

(1) M. Konagai (東工大) は、” Thin-Film Photovoltaics: An Overview” と題して、薄膜太陽電池全般に関する基調講演を行った。2010年の結晶Si太陽電池生産量20.2GWに対して、CdTe1.4GW、薄膜Si1.1GW、CIGS0.4GWで、ソーラーフロンティアが1GWのCIGS太陽電池生産の工場も最近の話題である。1976～1990年の効率8%から、1990～2010年の10～12%、2010～2020年の15%の効率向上の流れにあり、さらに2050年に向けた効率40%のロードマップがある。Table 1～3に示すように、薄膜太陽電池の効率の現状 (M. Green et al., Progress in Photovoltaics **19**, 565 (2011).) も紹介された。薄膜Si太陽電池の高効率化のキー技術として、TCO、活性層、中間層、裏面反射層などがある。TCOについては、旭硝子や東工大でのSnO<sub>2</sub>、W-テクスチャーSnO<sub>2</sub>、ZnO、W-テクスチャーZnOの研究例が紹介された。

**Table 1.** Confirmed terrestrial cell and submodule efficiencies measured under the global AM1.5 spectrum (1000W/m<sup>2</sup>) at 25°C (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global).

Classification <sup>a</sup>	Effic. <sup>b</sup> (%)	Area <sup>c</sup> (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF <sup>d</sup> (%)	Test Centre <sup>e</sup> (and date)	Description
Silicon							
Si (crystalline)	25.0 ± 0.5	4.00 (da)	0.706	42.7 <sup>f</sup>	82.8	Sandia (3/99) <sup>g</sup>	UNSW PERL [13]
Si (multicrystalline)	20.4 ± 0.5	1.002 (ap)	0.664	38.0	80.9	NREL (5/04) <sup>g</sup>	FhG-ISE [14]
<b>Si (thin film transfer)</b>	<b>19.1 ± 0.4</b>	<b>3.983 (ap)</b>	<b>0.650</b>	<b>37.8<sup>h</sup></b>	<b>77.6</b>	<b>FhG-ISE (2/11)</b>	<b>ISFH (43 μm thick) [4]</b>
Si (thin film submodule)	10.5 ± 0.3	94.0 (ap)	0.492 <sup>i</sup>	29.7 <sup>i</sup>	72.1	FhG-ISE (8/07) <sup>g</sup>	CSG Solar (1–2 μm on glass; 20 cells) [15]
III-V cells							
<b>GaAs (thin film)</b>	<b>28.1 ± 0.8</b>	<b>0.998 (ap)</b>	<b>1.111</b>	<b>29.4<sup>h</sup></b>	<b>85.9</b>	<b>NREL (3/11)</b>	<b>Alta Devices [5]</b>
GaAs (multicrystalline)	18.4 ± 0.5	4.011 (t)	0.994	23.2	79.7	NREL (11/95) <sup>g</sup>	RTI, Ge substrate [16]
InP (crystalline)	22.1 ± 0.7	4.02 (t)	0.878	29.5	85.4	NREL (4/90) <sup>g</sup>	Spire, epitaxial [17]
Thin film chalcogenide							
CIGS (cell)	19.6 ± 0.6 <sup>j</sup>	0.996 (ap)	0.713	34.8 <sup>k</sup>	79.2	NREL (4/09)	NREL, CIGS on glass [18]
CIGS (submodule)	16.7 ± 0.4	16.0 (ap)	0.661 <sup>l</sup>	33.6 <sup>j</sup>	75.1	FhG-ISE (3/00) <sup>g</sup>	U. Uppsala, 4 serial cells [19]
CdTe (cell)	16.7 ± 0.5 <sup>j</sup>	1.032 (ap)	0.845	26.1	75.5	NREL (9/01) <sup>g</sup>	NREL, mesa on glass [20]
Amorphous/nanocrystalline Si							
Si (amorphous)	10.1 ± 0.3 <sup>l</sup>	1.036 (ap)	0.886	16.75 <sup>f</sup>	67.0	NREL (7/09)	Oerlikon Solar Lab, Neuchatel [21]
Si (nanocrystalline)	10.1 ± 0.2 <sup>m</sup>	1.199 (ap)	0.539	24.4	76.6	JQA (12/97)	Kaneka (2 μm on glass) [22]
Photochemical							
<b>Dye-sensitized</b>	<b>10.9 ± 0.3<sup>n</sup></b>	<b>1.008(da)</b>	<b>0.736</b>	<b>21.7<sup>h</sup></b>	<b>68.0</b>	<b>AIST (1/11)</b>	<b>Sharp [6]</b>
Dye-sensitized (submodule)	9.9 ± 0.4 <sup>n</sup>	17.11 (ap)	0.719 <sup>l</sup>	19.4 <sup>kl</sup>	71.4	AIST (8/10)	Sony, eight parallel cells [23]
Organic							
Organic polymer	8.3 ± 0.3 <sup>n</sup>	1.031 (ap)	0.816	14.46 <sup>k</sup>	70.2	NREL (11/10)	Konarka [24]
Organic (submodule)	3.5 ± 0.3 <sup>n</sup>	208.4 (ap)	8.620	0.847	48.3	NREL (7/09)	Solarmer [25]
Multijunction devices							
GaInP/GaAs/Ge	32.0 ± 1.5 <sup>m</sup>	3.989(t)	2.622	14.37	85.0	NREL (1/03)	Spectrolab (monolithic)
GaAs/CIS (thin film)	25.8 ± 1.3 <sup>m</sup>	4.00 (t)	–	–	–	NREL (11/89)	Kopin/Boeing (four terminal) [26]
<b>a-Si/nc-Si/nc-Si (thin film)</b>	<b>12.4 ± 0.7<sup>o</sup></b>	<b>1.050 (ap)</b>	<b>1.936</b>	<b>8.96</b>	<b>71.5</b>	<b>NREL (3/11)</b>	<b>United Solar [7]</b>
a-Si/nc-Si (thin film cell)	11.9 ± 0.8 <sup>p</sup>	1.227(ap)	1.346	12.92 <sup>k</sup>	68.5	NREL (8/10)	Oerlikon Solar Lab, Neuchatel [27]
a-Si/nc-Si (thin film submodule)	11.7 ± 0.4 <sup>m,q</sup>	14.23 (ap)	5.462	2.99	71.3	AIST (9/04)	Kaneka (thin film) [28]
Organic (two-cell tandem)	8.3 ± 0.3 <sup>n</sup>	1.087 (ap)	1.733	8.03 <sup>k</sup>	59.5	FhG-ISE (10/10)	Heliatek [29]

**Table II.** Confirmed terrestrial module efficiencies measured under the global AM1.5 spectrum (1000W/m<sup>2</sup>) at a cell temperature of 25°C (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global).

Classification <sup>a</sup>	Effic. <sup>b</sup> (%)	Area <sup>c</sup> (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)	FF <sup>d</sup> (%)	Test Centre (and date)	Description
Si (crystalline)	22.9 ± 0.6	778 (da)	5.60	3.97	80.3	Sandia (9/96) <sup>e</sup>	UNSW/Gochemann [32]
Si (large crystalline)	21.4 ± 0.6	15 780 (ap)	68.6	6.293	78.4	NREL (10/09)	SunPower [33]
<b>Si (multicrystalline)</b>	<b>17.8 ± 0.4</b>	<b>14 920 (ap)</b>	<b>38.86</b>	<b>9.04<sup>f</sup></b>	<b>75.7</b>	<b>ESTI (2/11)</b>	<b>Q-Cells (60 serial cells) [8]</b>
Si (thin-film polycrystalline)	8.2 ± 0.2	661(ap)	25.0	0.320	68.0	Sandia (7/02) <sup>e</sup>	Pacific Solar (1–2 μm on glass) [34]
<b>GaAs (crystalline)</b>	<b>21.1 ± 0.6</b>	<b>921 (ap)</b>	<b>12.69</b>	<b>1.98<sup>f</sup></b>	<b>77.1</b>	<b>NREL (4/11)</b>	<b>Alta Devices [5]</b>
CIGS	15.7 ± 0.5	9703 (ap)	28.24	7.254 <sup>g</sup>	72.5	NREL (11/10)	Miasole [35]
CIGSS (Cd free)	13.5 ± 0.7	3459 (ap)	31.2	2.18	68.9	NREL (8/02) <sup>e</sup>	Showa Shell [36]
<b>CdTe</b>	<b>12.8 ± 0.4</b>	<b>6687 (ap)</b>	<b>94.1</b>	<b>1.27</b>	<b>71.4</b>	<b>NREL (1/11)</b>	<b>PrimeStar monolithic [9]</b>
a-Si/a-SiGe/a-SiGe (tandem)	10.4 ± 0.5 <sup>h,j</sup>	905 (ap)	4.353	3.285	66.0	NREL (10/98) <sup>e</sup>	USSC [37]

**Table III.** “Notable Exceptions”: “Top ten” confirmed cell and module results, not class records measured under the global AM1.5 spectrum (1000W/m<sup>2</sup>) at 25°C (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global).

Classification <sup>a</sup>	Effic. <sup>b</sup> (%)	Area <sup>c</sup> (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Test Centre (and date)	Description
Cells (silicon)							
Si (MCZ crystalline)	24.7 ± 0.5	4.0 (da)	0.704	42.0	83.5	Sandia (7/99) <sup>d</sup>	UNSW PERL, SEH MCZ substrate [38]
Si (large crystalline)	24.2 ± 0.7	155.1(t)	0.721	40.5 <sup>e</sup>	82.9	NREL (5/10)	Sunpower n-type CZ substrate [39]
Si (large crystalline)	23.0 ± 0.6	100.4(t)	0.729	39.6	80.0	AIST (2/09)	Sanyo HIT, n-type substrate [40]
<b>Si (large multicrystalline)</b>	<b>19.5 ± 0.4</b>	<b>242.7(t)</b>	<b>0.652</b>	<b>39.0<sup>f</sup></b>	<b>76.7</b>	<b>FhG ISE (3/11)</b>	<b>Q-Cells, laser fired contacts [8]</b>
Cells (others)							
GaInP/GaAs/GaInAs (tandem)	35.8 ± 1.5	0.880 (ap)	3.012	13.9	85.3	AIST (9/09)	Sharp, monolithic [41]
CIGS (thin film)	20.3 ± 0.6	0.5015 (ap)	0.740	35.4 <sup>e</sup>	77.5	FhG-ISE (6/10)	ZSW Stuttgart, CIGS on glass [42]
<b>CZTSS (thin film)</b>	<b>9.7 ± 0.3</b>	<b>0.4362 (ap)</b>	<b>0.516</b>	<b>28.6<sup>f</sup></b>	<b>65.4</b>	<b>NREL (8/09)</b>	<b>IBM solution grown [10]</b>
a-Si/nc-Si/nc-Si (tandem)	12.5 ± 0.7 <sup>g</sup>	0.27 (da)	2.010	9.11	68.4	NREL (3/09)	United Solar stabilized [43]
Dye-sensitized	11.2 ± 0.3 <sup>h</sup>	0.219 (ap)	0.736	21.0	72.2	AIST (3/06) <sup>d</sup>	Sharp [44]
Luminescent submodule	7.1 ± 0.2 <sup>h</sup>	25(ap)	1.008	8.84 <sup>e</sup>	79.5	ESTI (9/08)	ECN Petten, GaAs cells [45]

a-Siで効率10%、2 接合タンデムで安定化効率12%の状況で、最近、図 1 7 に示すように UniSolarが 3 接合タンデムで初期効率16.3%達成しているとの事である。三洋電機は、本会議で、1cm<sup>2</sup>セルで、初期効率13.5%、安定化効率12.2%、大面積セルで、初期効率12%、安定化効率10.7%、を発表している。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。CIGS系の高効率化のキー技術は、TCO、バッファ層、活性層、デバイス物理、などである。ZSWが、小面積セルで効率20.3%、ソーラーフロンティアは、30cmx30cmサブモジュールで効率17.2%の状況で、150Wモジュール（効率12.2%）を出荷している。今後の高効率化のためには、ワイドギャップ材料での高効率化が必要である。フレキブルセルや、CZTSも最近の研究開発の傾向である。フレキシブルセルでは、75.7cm<sup>2</sup>で効率15.9%の状況である。CZTSセルは、長岡工業高専の片桐がパイオニアだが、IBMは9.6%を実現している。CIGS系の課題は、原材料量限界、大面積モジュール

の効率向上、などである。CdTeセルでは、First Solarの小面積セル効率17.3%、モジュール効率11.7%、モジュールコスト\$0.75/Wの状況で、2011年の生産量は2.3GW、2014年までに、モジュールコストを\$0.5/Wまでに低減する予定である。CdTe系の課題は、原材料量限界、大面積モジュールの効率向上、などである。有機系太陽電池の現状に関しても報告があったが、4.5に譲る。また、NEDOの革新的太陽電池研究開発の状況も報告された。ターゲットは効率30%で、材料開発と低倍集光が特徴である。CIGSの集光動作で、効率20.3%の状況である。

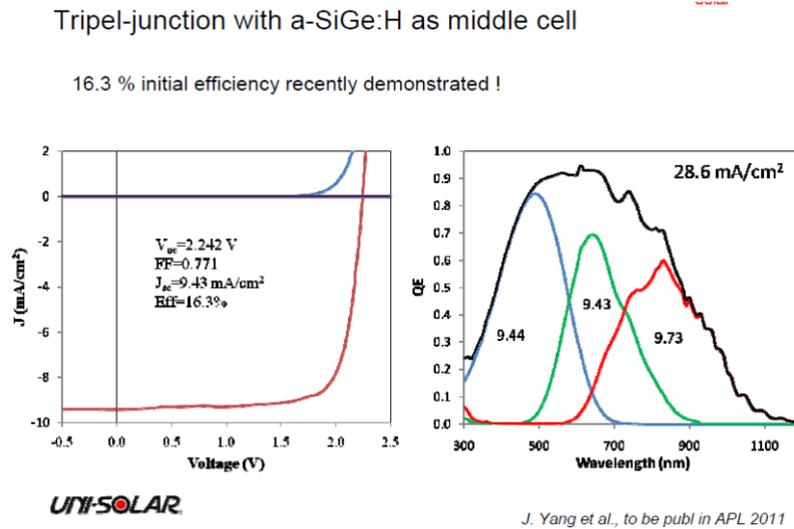


図 1 7 UniSolarによる3接合薄膜SiタンデムセルのI-V特性と分光感度特性

(2) J. Meier (Oerlikon Solar-Lab) は、“Perspective of Thin-Film Silicon Photovoltaics - from Lab Cells towards Large-Scale Solar Modules” と題してプレナリ講演を行った。Oerlikon社の概要説明の後、これまでの貢献、検討結果が報告された。薄膜Siセルは、豊富な材料、低材料消費、低消費電力生産の特長を有し、効率10%モジュールで、0.058ユーロ/Wの低モジュールコスト、1年以下の低エネルギーペイバックタイムが期待できる。VHFはNeuchatel大の提案で、低周波のp-CVDより、イオン損傷が少なく、有利である。光トラッピングに関しては、Asahi U より、LPCVD ZnOが量子効率改善に優れている。マイクロモルフオタンデム (a-Si/ $\mu$ c-S) iは、1994年のWCPEC-1で、Meierが提案した。R&D用KAI-Mシステム、LPCVD-ZnOのTCOを用いて、先に、a-Siセルで、安定化効率10.09%、a-Si/ $\mu$ c-Siタンデムセルで、効率11.91%を達成したことを報告している。今回は、1.7eV/1.1eVのa-Si:H/ $\mu$ c-S:Hタンデムセルについて報告された。課題は、効率、スループット、yield、コストにある。①R&D用KAI-Mシステムの最適化により、薄膜Si堆積の改善をはかった。②LPCVD-ZnOのTCOのlight trappingにより、安定化効率の改善につながるa-Si層厚の低減をはかった。③中間反射層として、ドーピングした $\mu$ c-SiO<sub>x</sub>中間層を導入した。④テクスチャーLPCVD-ZnOを表面および裏面TCOに用いた。⑤Corningと共同で、新しいテクスチャーガラス基板を開発した。裏面反射層で、テクスチャー基板により、収集効率が改善され、a-Si:H/ $\mu$ c-S:Hタンデムセルの小面積セル (1.04cm<sup>2</sup>) で、初期効率13.9%、安定化効率12.24%が得られている。KAI-1200の1.4m<sup>2</sup>PECVD装置を用いて、1.4m<sup>2</sup>のa-Si、タンデムセルのR&Dモジュールで、各々、9.7%、12.2% (真性効率13.1%) の安定化効率を得て

いる。図18は、 $1.4\text{cm}^2$ のa-Si:H/ $\mu\text{c-S:H}$ タンデムセルモジュールのI-V特性を示す。12.2%は165Wモジュールに相当し、174Wモジュールを実現するために、効率13.1%を目指す。図19は、 $1.4\text{cm}^2$ のa-Si:H/ $\mu\text{c-S:H}$ タンデムセルモジュール(左)とa-Siセルモジュール(右)を示す。これまで、同社は、750MWの生産に貢献している。今後、モジュールコスト0.5ユーロ/W、モジュール価格1.38ユーロ/Wの実現に貢献して行きたいと結んだ。

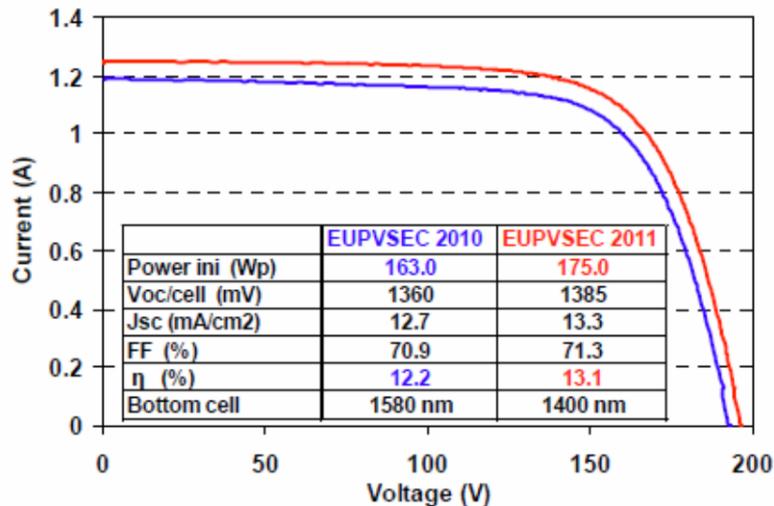


図18  $1.4\text{cm}^2$ のa-Si:H/ $\mu\text{c-S:H}$ タンデムセルモジュールのI-V特性

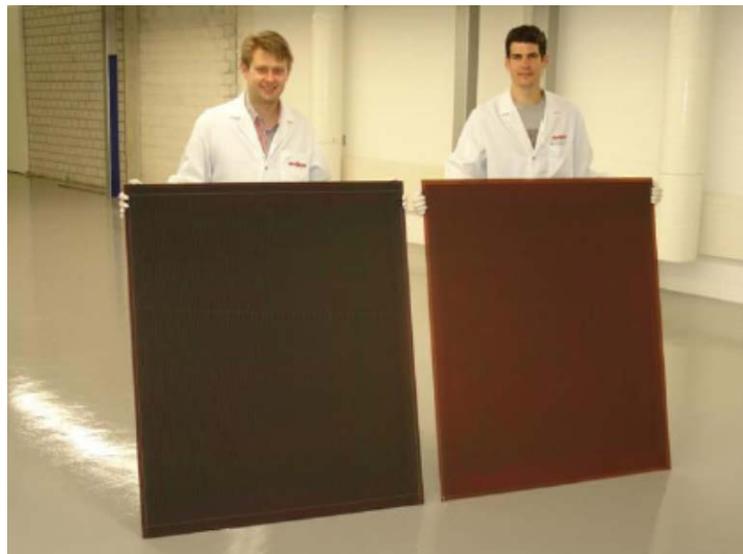


図19  $1.4\text{cm}^2$ のa-Si:H/ $\mu\text{c-S:H}$ タンデムセルモジュール(左)とa-Siセルモジュール(右)

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. 4 CIGS、II—VI族化合物薄膜太陽電池分野：

(1) H. Sugimoto ら (ソーラーフロンティア) は、”Challenge to 18% Efficiency 30x30cm<sup>2</sup>-Sized Cu(InGa)(SeS)<sub>2</sub> Submodules in Solar Frontier”と題して、プレーナリ講演を行った。2011~2012年に効率13.3%150W、2013年に効率14.2%160W、2014年に効率15%170Wモジュールの生産の計画である。30cmx30cmサブモジュールで、効率17.2%を実現している。図20に、30cmx30cmサブモジュール(アパーチャ面積808cm<sup>2</sup>)のI-V特性を示す。効率16%から効率17.2%へ改善がはかられている。主な改善点は、下記の通りである。デバイス構造設計、回路設計の最適化、太陽電池構成層の uniformity 改善(Mo裏面電極のシート抵抗、金属プリカーサーのCu/III比、活性層形成時の温度、ZnO窓層のシート抵抗)、light trappingによる光損失低減、などである。ZnOテクスチャーサイズの最適化によるlight trappingの促進によりJscが1.5%増加、新しいパターンニング(モノリシック集積、レーザパターンニングの精度向上)により、高精度、クラックレス、生産性が改善され、dead層100μm以上低減され、Jscは3%の増加が可能である。回路設計の再最適化、シミュレーションの結果、light trappingの改善が可能である。今後、NEDO次世代高性能技術開発プロジェクト目標の効率18%以上が可能だとしている。90x120cm<sup>2</sup>モジュールで、アパーチャエリア効率14.6%が実現している。さらに、CZTSの5cmx5cmサブモジュールで、効率7.2%を得ている。

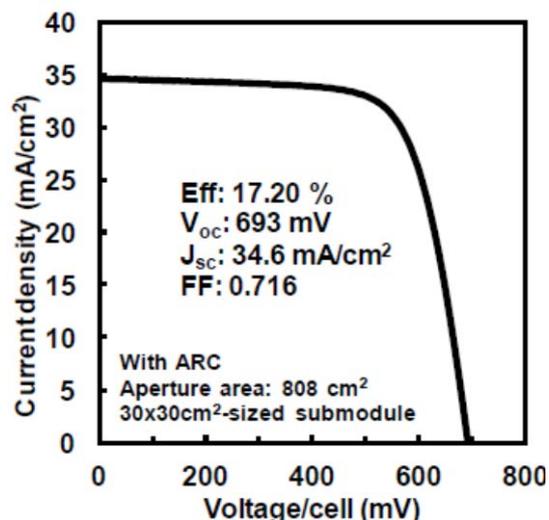


図20 30cmx30cmサブモジュール(アパーチャ面積808cm<sup>2</sup>)のI-V特性

(2) A.N. Tiwari ら (EMPA) は、”Flexible Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> and CdTe Solar Cells: Current Status and Future Prospects”と題して、プレーナリ講演を行った。スピノフしたFLISOMとの共同研究開発である。roll-to-rollによるフレキシブル太陽電池は、材料の使用効率が高い、低熱負荷、低装置コスト、高速製造、応用面、で特長を有するが、高効率、長期信頼性が必要である。セル効率>18%、モノリシックサブモジュール効率>15%を目標としている。高効率化のキー技術は、モフォロジー改善、マイクロ構造と欠陥制御、ストレス低減、組成制御、Naドーピング、等である。ポリイミド上で、効率18.7%(Voc=712mV、Jsc=34.8mA/cm<sup>2</sup>、FF=75.7%)、ステンレス上で、効率17.7%(Voc=699mV、Jsc=34.2mA/cm<sup>2</sup>、FF=73.8%)である。10cmx10cm

サブモジュールで、効率 14.8%を得ており (FLISOM)、効率 16%以上が可能であるとしている。今後の課題は、roll-to-roll 装置の改良、モノリシックインターコネクション、封止、等である。また、CdTe セルも低温蒸着で形成され、ステンレス上で効率 15.6%、ポリマー上で効率 13.8%、モジュール効率 9.4%である。

この分野では、短期・中期的には、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、大面積モジュールの効率向上や新しい製造法の開発が課題である。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. 5 新材料・新型太陽電池：

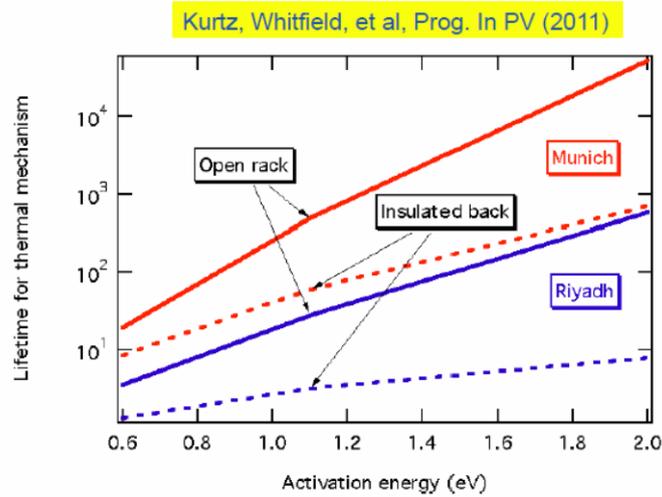
有機太陽電池に関して、C. Brabec (Univ. Erlangen-Nurnberg) ” Printed Solar Cells: a Next Generation Platform” と題して、プレーナリ講演を行った。低温度印刷PV技術として、有機系、量子ドットがあるとしている。まず、有機系太陽電池の現状が紹介された。バルクヘテロ接合 (BJT) の概念が有効で、P3HTの他に、35以上の高分子系で効率5%以上が実現している。出荷されている有機系太陽電池の効率は、3%のオーダーである。三菱化学は、低分子系で効率10.1%を実現している。有機系太陽電池の効率向上が必要である。1.65eVのabsorber、励起子の結合エネルギーの点から高励起子エネルギー材料が重要である。現状の製造コストは、8.5ユーロ/W程度だが、GW生産により、製造コスト\$1/W以下が可能である。25セントユーロ/Wを目指すとしている。低コスト化のためには、現状の高度な材料選定、低生産速度、低い歩留り、低い品質管理が課題である。バリア層、TCO電極、Ag電極、など、材料面での低コスト化も必要である。また、将来テーマとして、Agナノワイヤ電極、ZnO、TiO<sub>x</sub>、MoO<sub>x</sub>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、WO<sub>x</sub>、ダウンコンバージョン、アップコンバージョン、希土類系、などの試みも紹介された。

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認定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：

S. Kurtz (NREL) は、” The Challenge to Move from “one-size-fits-all” to PV Modules the Customer Needs” と題して、基調講演を行った。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。劣化モードが活性化エネルギーモードに従う場合、高温地域でのPVモジュール使用は、図21に示すように、低寿命となるであろう。図21は、100℃で1000時間動作に基づく結晶Si太陽電池モジュールの予測寿命 (活性化エネルギー依存型劣化モード) を示す。PVモジュールのいくつかの劣化モードも紹介された。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、など多岐にわたる。

## Predicted lifetime based on 1000 h @ 100°C (Arrhenius behavior)

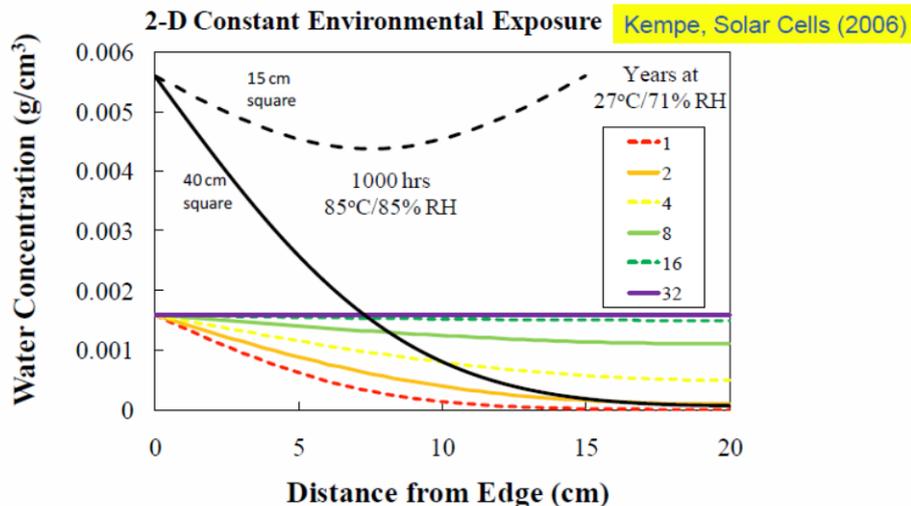


*A module that lasts 30 y in Munich might last 1-3 y in Saudi Arabia  
Aging rate can vary by a factor of 10 - 1000 depending...*

図 2 1 100°Cで1000時間動作に基づく結晶Si太陽電池モジュールの予測寿命  
(活性化エネルギー依存型劣化モード)

図 2 2 は、1000時間の damp heat (蒸気熱) 試験後のモジュールの水浸透濃度のモジュール端からの距離依存性を示す。モジュールへの水浸透は、モジュール構造に依存すると考えられるが、複雑である。PVモジュールの信頼性試験を通して、寿命予測、品質保証の国際的な連携が必要であり、IEA Task13などの活動を展開中である。

## Water in module after damp heat



*The water concentration after 1000 h of damp heat depends on  
module geometry and does NOT match concentration in field*

図 2 2 1000時間の damp heat (蒸気熱) 試験後のモジュールの水浸透濃度のモジュール端からの距離依存性

#### 4. 7 PV システム :

M. Braun (Univ. Stuttgart) は、” Is the Grid Ready to Accept Large Scale PV Deployment?” と題して、基調講演を行った。ドイツは、大規模PV導入の代表例である。ドイツの1990～2010年において、天然ガス26GW、石油21GW、石炭27GW、原子力21GWに対して、再生可能エネルギー、水力5GW、バイオマス5GW、風力27GW、PV17GWと、PVも設備容量的に、原子力並みに近づいている。2011年5月8日の晴天の日を例にとると、13GWのPVで、PVは、総発電量の30%以上を、風力と合わせると50%以上の寄与を示している。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。成功例、失敗例から多くを学ぶべきであるとしている。PVシステムのsmart integrationのためには、送電線拡張のコスト低減に加え、安定性やコスト効率の面から、①周波数制御、②電圧制御、③システムセキュリティの確保、④サイトでの発生電力消費や電力・エネルギー管理、が重要であると述べた。

#### 4. 8 国家プログラム、政策 :

(1) N. M. Pearsell (Univ. Northumbria) は、” Updating the European Strategic Agenda” と題して、Pearsell女史が委員長として、29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」(SRA: Strategic Research Agenda) の第II版 (2011.9) に関する報告があった。市場の急激な成長、PVに対する期待・要請の増加、研究開発の達成と新たな展開の必要性、などが、SRAの改版の背景にある。表2は、Strategic Research Agendaに含まれるPVの主要ターゲットの要約を示す。NEDOのPV2030+ロードマップのターゲットとほぼ同じ目標が設定されている。結晶SiPV、薄膜PV、集光 (CPV) 等について、2011～2016年、2016～2025、2025～2035年の時系列、短期的開発 (製造開発)、中期的研究開発 (応用研究)、長期的研究開発 (基礎研究) のプライオリティ、主要な研究開発テーマが良くまとめられている。表3は、一例として、結晶Si太陽電池の研究開発のプライオリティを示す。情報は、[www.eupvplatform.org](http://www.eupvplatform.org)で入手できる。

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

**Table 1. Targets for the development of PV that are used as the basis for the research objectives, together with current and historical data (see below for summary of assumptions used in the cost calculations).**

	1980	TODAY	2020	2030	LONG TERM POTENTIAL
Typical turn-key price for a 100 kW system (2011 €/kW, excl. VAT)	>30	2.5	1.5	1	0.5
Typical electricity generation costs Southern Europe (2011 €/kWh)	>2	0.19	0.10	0.06	0.03
Typical system energy payback time Southern Europe (years)	>10	0.5-1.5	<0.5	<0.5	0.25

表3 結晶Si太陽電池の研究開発のプラオリティ

**Table 2. Research priorities for silicon materials needed for crystalline silicon photovoltaics – time horizons for first expected application of research results in (pilot) manufacturing and products. Targets to be achieved in those time horizons are also shown.**

MATERIALS	2011 – 2016	2016 – 2025	2025 – 2035 and beyond
<b>Industry manufacturing aspects</b>	Target: polysilicon ■ Consumption 5 g/W ■ Cost 15-25 €/kg (depending on quality) ■ Wafer thickness <150 µm	Target: polysilicon ■ Consumption <3 g/W ■ Cost 10-20 €/kg (depending on quality) ■ Wafer thickness <100 µm	Target: polysilicon ■ Consumption <2 g/W ■ Cost <10 €/kg (depending on quality) ■ Wafer thickness <50 µm
<b>Applied / advanced technology aspects</b>	■ New Si feedstock ■ Improved crystal growth ■ Reusable crucibles with low-impurity inclusion ■ Reduced kerf loss in sawing ■ Fracture mechanics of thin wafers ■ Metal pastes suited for low-temperature firing and high-resistivity emitters ■ Avoidance of hazardous materials ■ Encapsulants with low total cost of ownership ■ New frames and supporting structures ■ Reduction of glass thickness ■ Improved recycling ■ Low-impact, safe manufacturing ■ Development of Cu-based contact systems	■ New Si feedstock ■ Low-defect (high electronic quality) silicon wafers ■ Improved wafering ■ Wafer equivalents ■ High-throughput reactors for Si (epitaxial) deposition ■ Improved encapsulants ■ Safe processes ■ Conductive adhesives or other solder free solutions for module interconnection ■ Recycling of kerf ■ Si yield >75% ■ Kerfless methods for Si-foil or ribbon production with thickness <75 µm	■ New Si feedstock ■ Low-defect (high electronic quality) silicon wafers ■ Improved wafering ■ Wafer equivalents ■ New encapsulants ■ Safe processes ■ Si yield >90% ■ Kerfless methods for Si-foil production with thickness <<50 µm ■ Integration of up and down-converters in crystalline Si cells and modules
<b>Basic research and fundamentals</b>	■ Defect characterisation and control in silicon ■ New feedstock technologies ■ Advanced wafering technologies ■ Wafer-equivalent technologies ■ Reliability and ageing of Cu-based contact systems ■ New encapsulants	■ Defect control in silicon ■ New feedstock technologies ■ Novel wafering technologies ■ Wafer-equivalents technologies ■ New materials for metal contacts ■ New encapsulants ■ Material development for up and down-conversion layers	■ Wafer-equivalent technologies ■ New materials for metal contacts and cell/module manufacture ■ Material development for up- and down-conversion layers

## 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件数が452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

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やSERIS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。

本年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、基礎に打ちかえる必要がある。

次回の27<sup>th</sup> EU-PVSECは、2012年9月24日～28日に、ドイツのフランクフルトで開催予定である。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、福岡で、38<sup>th</sup> 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。

(以上)