

第 31 回太陽光発電欧州会議 (31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告

2015. 9. 23

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日 : 2015年9月14日～9月18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、Stefan Rinck (SINGULUS TECHNOLOGIES) で、論文委員長は Nigel Taylor (EC-JRC) であった。今年、77 の国と地域から約 2,500 名の参加者があった。前回より、約 500 名、前々回より、約 1,250 名程少ないが、太陽光発電に関する最大規模の会議となった。

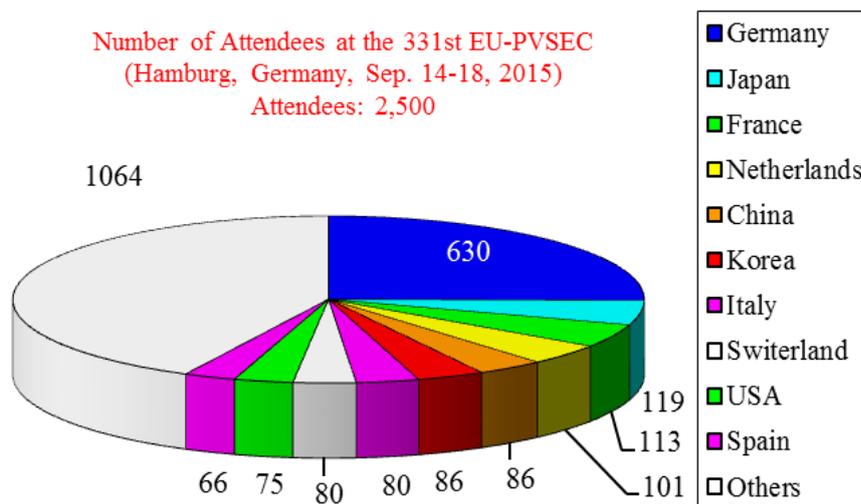


図 1 国別参加者数 (Dr. P. Helm提供)

図 1 に、国別参加者数を示す。国別では、①ドイツ 630 名、②日本 119 名、③フランス 113 名、④オランダ 101 名、⑤中国 86 名、⑥韓国 86 名、⑦イタリア 80 名、⑧スイス 80 名、⑨米国 75 名、⑩スペイン 66 名、の順であった。

図 2 は、国別発表論文数を示す。69カ国から、前回会議より 187 件減ではあったが、1,241 件の論文発表があった。国別では、①ドイツ 245 件、②日本 71 件、③中国 69 件、④台湾 69 件、⑤オランダ 65 件、⑥イタリア 63 件、⑦スペイン 62 件、⑧フランス 61 件、⑨スイス 56 件、⑩米国 54 件、の順であった。

**Number of Papers presented at the 31st EU-PVSEC
(Hamburg, Germany; September 14-18, 2015)
1241 Papers**

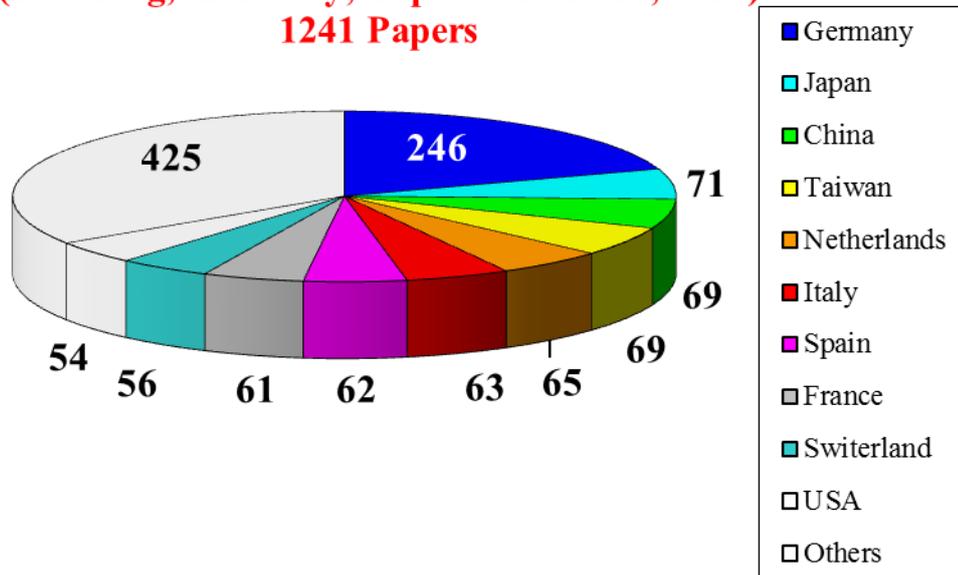


図2 国別発表論文数 (RTS提供)

図3は、発表論文数の分野別内訳を示す。分野別では、①太陽光発電の適用、性能、信頼性344件、②結晶Si系81件、③薄膜系（薄膜Si、CIGS・CdTe等II-VI、色素・有機）269件、④先進太陽電池技術1273件、⑤太陽光発電の応用92件、⑥主要電源としてのPV78件、⑦集光太陽光発電52件、の順であった。

**Number of Papers presented
at the 31st EU-PVSEC
(Hamburg, Germany,; September 14-18, 2015) 1241 Papers**

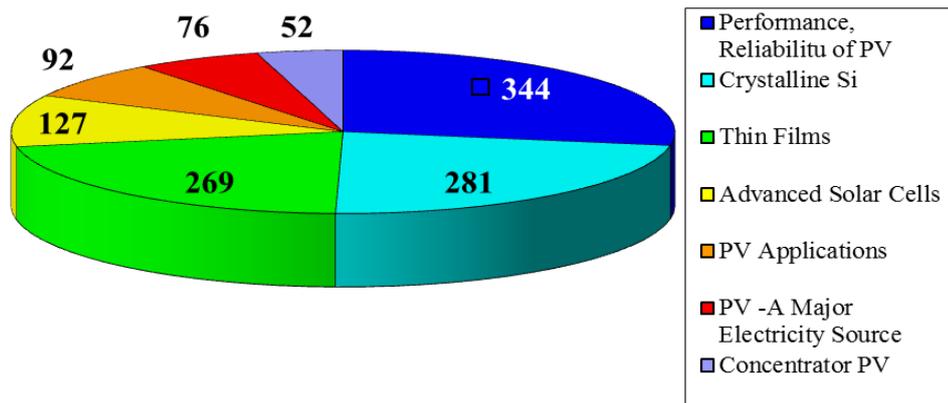


図3 発表論文数の分野別内訳 (RTS提供)

Becquerel Prizeは、Andres Cuevas (ANU) が受賞した。bifacial太陽電池の研究開発への貢献、評価解析、再結合、表面再結合や表面パッシベーション、エミッタの最適化、passivating contact、などの業績が評価された。

この他、学会併設の展示会には、18か国、100社の太陽光発電関連企業、機関が出展した（2014年は、130社、2013年は、27か国247社、2012年は、35か国619社であり、減少傾向にある）。

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 太陽電池およびモジュールの新材料、新概念分野：

(1) A. J. Nozik(NREL)は、“Future Generation Soar Photon Conversion to Photovoltaics and Solar Fuels Based on Nanoscale and Size Quantization”と題して、基調講演を行った。CO₂削減に向け、solar photonによる水の分解により水素、酸素生成が可能で、いわゆるSolar Fuelの人工合成が期待できる。TiO₂やGaNなどのワイドギャップ半導体が必要で、現状では、生成効率も低い。低ギャップ半導体もトライされているが、不安定である。講演では、いわゆる第三世代太陽電池の試みが概説された。第一世代は、結晶シリコン太陽電池、第二世代は、薄膜シリコン、CIGSやCdTeの薄膜太陽電池を指している。単一接合セルでは変換効率31%、その集光動作では41%が限界であり、第1世代、第2世代の太陽電池技術は、そこで尽きるという。そこで、高性能、低コストの第3世代の太陽電池技術に関する研究が必要である。高光電圧のアプローチとして、ホットキャリアがあり、高光電流のアプローチとして、多接合やマルチエキストンがある。熱力学的考察から、最も現実的な多重バンドギャップの多接合セルの理想状態での変換効率は、表1に示すように、86.8%である。

表1. 多接合セルの理想状態での理論変換効率

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

表2. 第3世代太陽電池技術の提案と高効率化の可能性

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

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

ト、n-i-p 構造の改善などである。マルチエキシトン型および中間バンド構造太陽電池の現状を紹介された。これまで損失となっていた $h\nu - E_g$ ($h\nu$:光子エネルギー)のエネルギーを何とか活用したというのが、マルチエキシトン型セルの考え方である。従来、紫外線領域では、衝突電離により、1個の光子から2個の電子-正孔対が生成されることは知られていた。図4は、量子ドット構造によるマルチエキシトン生成を示す。図5は、米国ロスアラモス国立研究所による PbS 量子ドット構造におけるマルチエキシトン生成を示す。NREL でも、シリコンナノ結晶中において、高エネルギーの光子を入射すると、複数の電子・正孔対を生成するマルチエキシトン効果を観測することに成功している。NREL では、ITO/PbSe ナノ結晶/金属のショットキー構造で、効率 2~3% ($J_{sc}=21.4\text{mA/cm}^2$)を実現している。

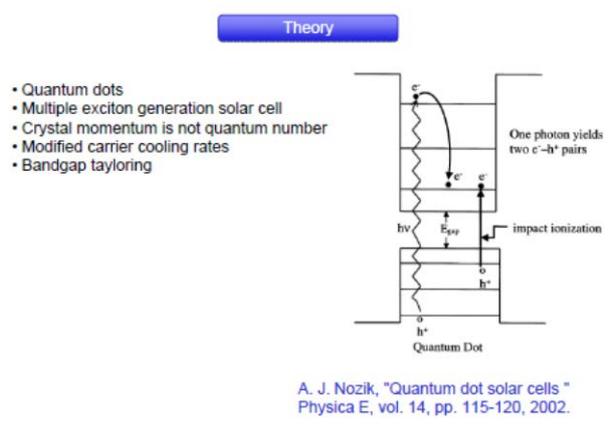


図4 量子ドット構造によるマルチエキシトン生成 (Prof. A. Marti提供)

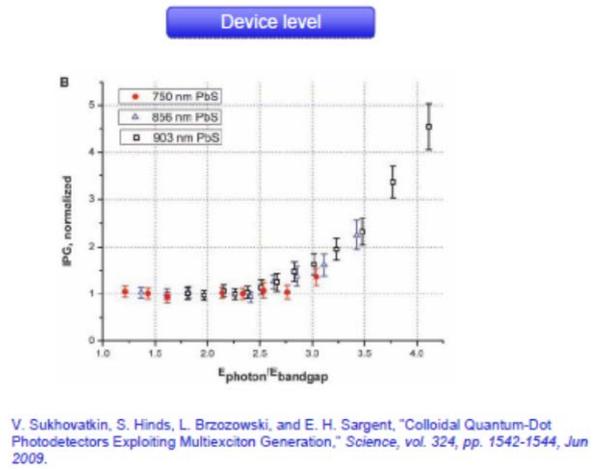


図5 PbS量子ドット構造におけるマルチエキシトン生成 (Prof. A. Marti提供)

(2) M. A. Greenら (UNSW) は、“Improvements in Sunlight to Electricity Conversion Efficiency: above 40% for Direct Sunlight with over 30% Targeted for Global” と題して、基調講演を行った。

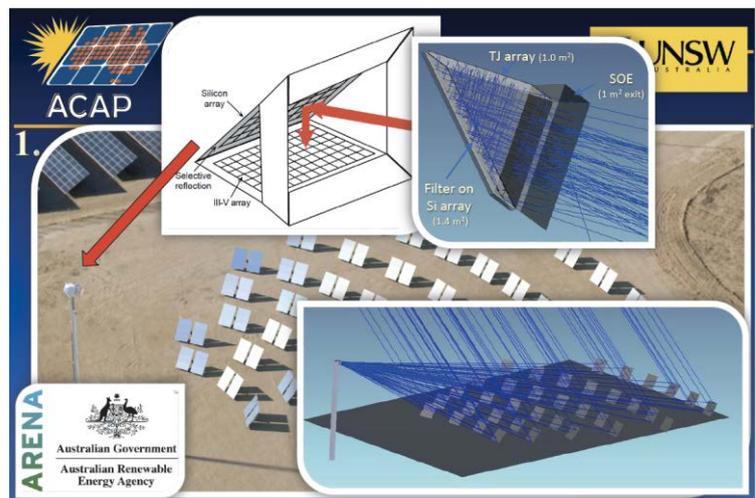


図6 反射系による波長スプリッティング (Prof. M. A. Green提供)

本研究の動機は、Ge基板上の3接合太陽電池の集光下で、効率40%以上が達成されているが、Geボトムセルでは、電流不整合があり、Siボトムセルを使いたい、即ち、III-V+Siタンデムセルのアプローチ、反射系（図6）やプリズム（図7）使用による波長スプリッティング、および集光応用である。図8に示すように、図6のタイプの光学系を用い、NRELによるAM2.53測定で、アパーチャ面積 287cm^2 のGaInP/GaAs/Ge 3接合セル+Siセルにおいて、効率 $35.7\% + 4.7\% = 40.4\%$ が得られている。今後は、基板選択やウエハボンディングの適用による柔軟性、誘電体ミラー、ARおよびフィルターの光学損失の低減が課題としている。また、Si-HJTセル+ペロブスカイトセルの波長分割スプリッティングで、 $20.5\% + 7.5\% = 28.0\%$ も得られている。

さらに、図9に示すように、図7のタイプの光学系を用い、AZUR Space製III-V 3接合宇宙用セル+Trina Solar製Siバックコンタクトセルの 30cm^2 ミニモジュールにおいて、AM1.5Gで、効率 $31.9\% + 2.25\% = 34.2\%$ が得られている。光学系やARの改善により、1-sun効率36%、さらには、効率40%の実現が可能との事である。

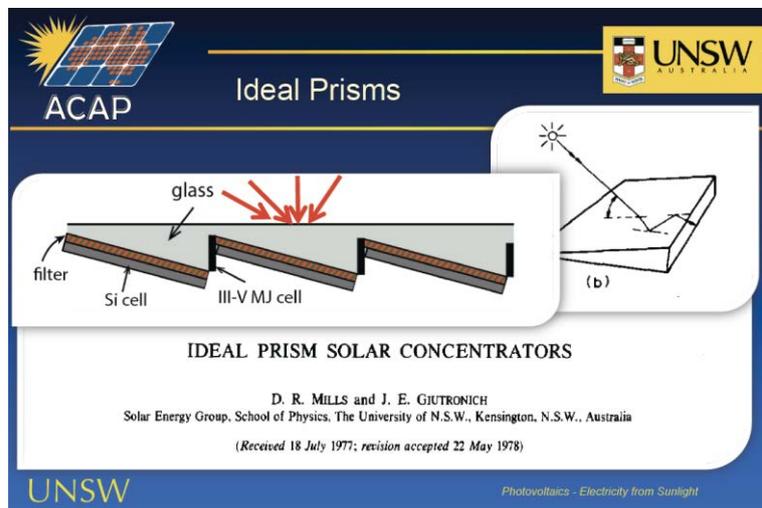


図7 理想プリズム使用による集光型III-V/Si太陽電池構造（Prof. M. A. Green提供）

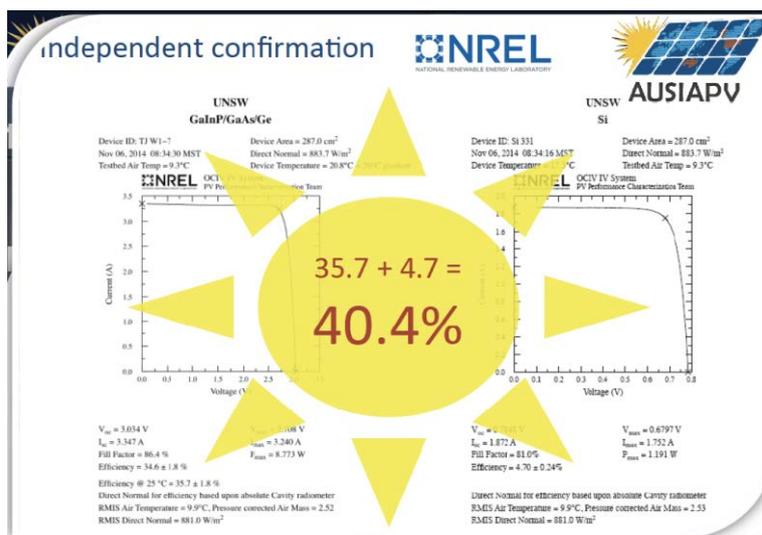


図8 図6の光学系を用いたIII-V 3接合セル/Siセルのタンデム構造太陽電池の特性（Prof. M. A. Green提供）

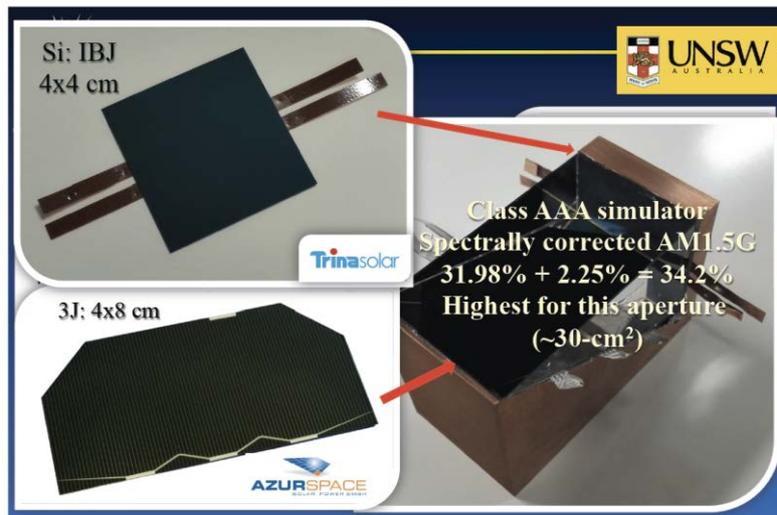


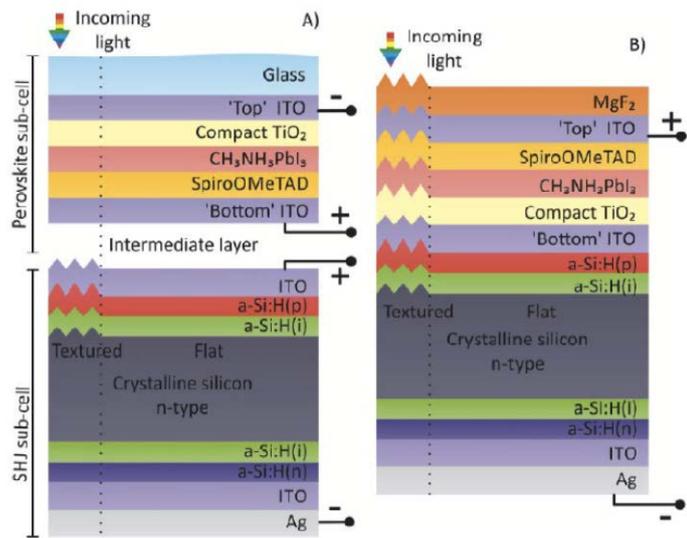
図9 図7の光学系を用いたIII-V 3 接合セル/Siセルのタンデム構造太陽電池の特性
(Prof. M. A. Green提供)

(3) C. Ballifら (EPFL) は、“Towards Ultra-High Efficient Photovoltaics with Perovskite/crystalline Silicon Tandem Devices”と題して、基調講演を行った。結晶Si太陽電池では、効率25.6%が達成され、限界効率に近づいている。一方、ペロブスカイト太陽電池に用いられている $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は、1.55eVの直接遷移型のバンドギャップを有する。小結晶粒界だが、少数キャリア拡散長(100~1000nm)を持ち、高光吸収係数(GaAsに近い光吸収係数)、高 ϵ 、移動度(電子 $7.5\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、正孔 $12.5\sim 66\text{cm}^2/\text{Vs}$)などの特徴を有し、2009年の効率3.8%から最近の効率20.1%と進展している。さらなる高効率化を目指して、ヘテロ接合Si太陽電池とペロブスカイト太陽電池のタンデム化のアプローチが述べられた。表3に、ペロブスカイト系タンデム太陽電池の研究状況をまとめて示す。

表3 ペロブスカイト系タンデム太陽電池の研究状況
(Prof. C. Ballif提供)

Device	4TT	2TT	Reference
Perovskite/c-Si	13.4%		P. Löper et al. PCCP, 17, 2015
Perovskite/CZTS		4.6%	T. Todorov et al. APL, 17, 2014
Perovskite/c-Si	17%		C. Bailie et al. EES, 2014
Perovskite/CIGS	18.6%		C. Bailie et al. EES, 2014
Perovskite/c-Si		13.7%	J. Mailoa et al. APL, 106, 2015
Perovskite/c-Si		21.3%	Oxford PV, announced at HOPV15
Perovskite/CIGS	19.5%		L. Kranz et al. J. Phys. Chem. Let., 6, 2015
Perovskite/c-Si	19.6%		J. Werner et al. SolMat, 141, 2015

タンデム構成として、図10に示すように、4端子型とモノリシック2端子型が検討された。ペロブスカイト材料のサブバンド端の光吸収が懸念されたが、問題ないとの事である。



Filipič *et al.*, *Opt. Expr.* 23, A263 (2015)

図 1 0 ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池の構成 (Prof. C. Ballif提供)

表面および裏面のTCOとして、FTO、IZOが用いられ、これらの光吸収も改善され、ペロブスカイト単接合太陽電池、効率10.7%が得られている。図 1 1 に、ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池の電流密度—電圧特性と内部量子効率特性を示す。4端子構成のペロブスカイト/Siタンデム太陽電池において、効率22.8%が得られている。最適化により、効率25.0%が期待できるとしている。図 1 2 に示すように、モノリシック構成のペロブスカイト/Siタンデム太陽電池で、効率16.1%、図 1 3 に示すように、ペロブスカイト/CIGSタンデム太陽電池では、効率19.5%、図 1 4 に示すように、ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池ミニモジュール (12cm²) で、効率11.5%が得られている。表 4 に、ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池の予想特性を示す。今後、TCOや中間層の光学損失の低減、コンタクト改善等により、効率27.5%も夢ではないとまとめた。

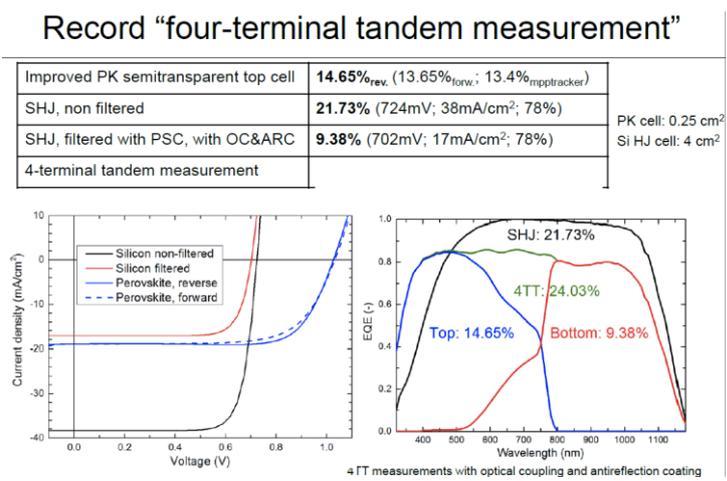


図 1 1 4端子構成のペロブスカイト/Siタンデム太陽電池の電流密度—電圧特性と内部量子効率特性 (Prof. C. Ballif提供)

Monolithic tandem:
Low-temperature planar perovskite cell on heterojunction silicon bottom cell

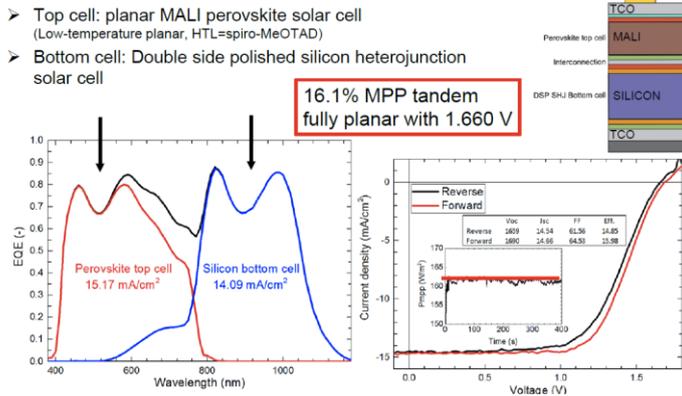
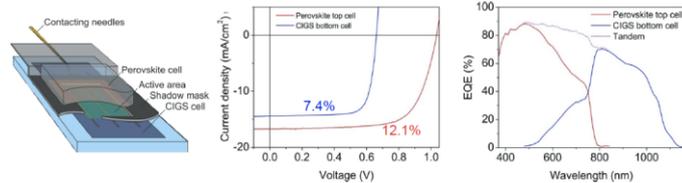


図 1 2 モノリシック構成のペロブスカイト/Siタンデム太陽電池の電流密度—電圧特性と内部量子効率特性 (Prof. C. Ballif提供)

4-terminal Perovskite/CIGS tandem solar cell **EMPA**
19.5% efficiency



	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Perovskite top cell	1034	16.7	70.3	12.1
CIGS cell (stand-alone)	689	34.1	78.4	18.4
CIGS bottom cell	661	14.4	77.4	7.4
4-terminal tandem cell				19.5

Further efficiency enhancement !

L. Kranz, Tiwari et al., J. Phys. Chem. Lett. 2015, 6, 2876-2881 Collaboration with LPI-EFL

図 1 3 ペロブスカイト/CIGSタンデム太陽電池の電流密度—電圧特性と内部量子効率特性 (Prof. C. Ballif提供)

Up-scaling: from lab-cells to mini-modules

	Area (cm ²)	PCE (%)	Voc (mV)	Isc (mA)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)
module	10.9 (active area)	12.6				15.8(seg)
	12 (aperture area)	11.5	6520.5	28.8	14.4(seg)	73.4
Ref	0.49	15.5	1014.0		20.1	75.9

Dead Width **450 μm**
Fd (fraction of dead area) **9.1%**

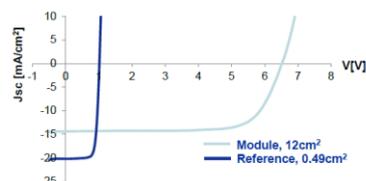


図 1 4 ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池ミニモジュールの電流密度—電圧特性と内部量子効率特性 (Prof. C. Ballif提供)

表 4. ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池の予想特性
(J. Werner et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 141, 407 (2015).)

Table 6. Estimated efficiencies of various four-terminal (4T) and two-terminal (2T) tandem configurations based on the one-diode model and simulated J_{sc} values.

	Perovskite cell (%)	SHJ cell (%)	Tandem cell (%)
4T Constrained Flat	16.4	11.1	27.5
4T Unconstrained Flat	19.2	9.8	29.1
4T Constrained Textured	16.3	12.1	28.4
4T Unconstrained Textured	19.2	11.0	30.1
2T Constrained Flat	14.5	10.9	25.4
2T Unconstrained Flat	17.3	12.9	30.2
2T Constrained Textured	15.2	11.7	26.8
2T Unconstrained Textured	17.5	12.8	30.3

4. 2 結晶Si太陽電池分野：

(1) S.W. Glunzら (FHG-ISE) は、“The Irresistible Charm of a Simple Current Flow Pattern – Approaching 25% with a Solar Cell Featuring a Full-Area Back Contact” と題して、基調講演を行った。市場の91%が、結晶Siであり、62%が多結晶Siである。また、90%以上が、簡易なAl-BSF構造セルであり、low complexityの高効率セルが望まれている。電力コストの低減のためには、高効率セルの開発が重要である。図15は、高効率セルの現状を示す。こうした高効率セルを単純化して、低コスト化をはかる必要がある。基準は、多結晶p型SiのAl-BSFセル（効率18.5%）であり、Levelized Cost of Electricity (LCOE) は、約10ユーロセント/kWhである。図16に示すように、セルの高効率化は、許容セル製造コストの点で有利となる。

Highly Efficient Solar Cells with Low Complexity
World Record for Mono c-Si Solar Cells

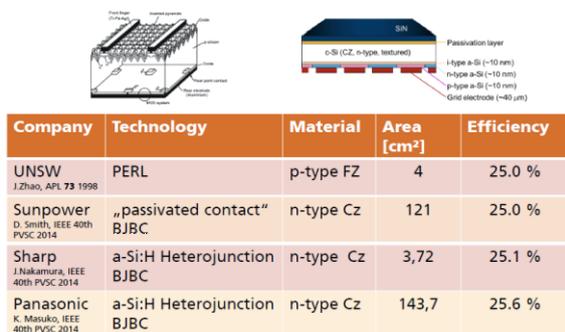


図 15 高効率結晶Si太陽電池現状
(Dr. M. Hermle提供)

Why Going to High Efficiencies?
Levelized Cost of Electricity (LCOE)

- What really matters are the Levelized Cost of Electricity (LCOE)
- To rate new solar cell concepts, they have to be compared with the LCOE of the **p-type mc Al-BSF cell**
- Reference system:
 - p-type mc Al-BSF cell
 - Cell efficiency 18,5 %
 - 900 kWh/kWp, 25 years

LCOE-10 €ct/kWh



図 16 基準となる多結晶p型Al-BSFセル
(Dr. M. Hermle提供)

高効率結晶Siセルの研究開発の進展と高効率セルのcurrent flowの違いがレビューされた。1973年のAl-BSFセルから1989年のPRC (Partial Rear Contact) セルへと進展し、CZ-Siで、各々、効率19~20%、20~21.5%の状況である。一方、高効率セルは、バックコンタクト (IBC)、ヘテロ接合 (HIT) やヘテロバックコンタクト (HBC) 構造である。BSF、PRC、IBC構造のcurrent flowの違いが述べられた。低コスト化のためには、簡易なBSF構造的なセル開発が必要である。Al-BSF構造およびPRC構造の効率に及ぼす暗電流密度 J_0 、バルクラ

イフタイム、抵抗率の効果が述べられた。

FhG-ISEにおける高効率セルのアプローチも紹介された。n型CZは、高ドーブでも高いキャリア寿命を持つので、n型PRCセルは高効率が可能である。HF-Dipによるクリーニング、PECVDによるPassDop層形成、レーザによるPassDop層のオープニング、PVDによるAl堆積が用いられた。145cm²セルで、効率21.9%が得られている。さらに、PVDとNi/Cuプレーティングが導入された。4cm²セルで、効率21.7%だが、高Voc（680mV）の可能性がある。N型PRCセルは、高効率化の可能性を有するが、VocとFFのトレードオフ、ベース抵抗率の影響、パターンニングステップの追加が、課題である。

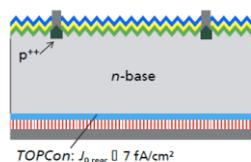
上記課題を軽減するために、TOPCon（Tunnel Oxide Passivated Contact）セルも検討された。ボロンエミッタと裏面パッシベーションのn型ハイブリッドセルである。Wet chemicalもしくはUV/O₃成長によるトンネルoxide形成、PECVDによるa-Si層形成、furnace annealと水素パッシベーションが用いられた。図17は、昨年のEU-PVSECで報告されたn型ハイブリッドTOPConセルの特性を示す。選択エミッタ構造の4cm²セルで、高Voc、効率24.4%が得られている。今回、表面、裏面再結合、バルク再結合、直列抵抗、並列抵抗の効果が言及され、わずかながら、Voc、Jsc、FFが改善され、表5に示すように、n-type Si（200μm厚）の4cm²セルで、効率24.9%、25.13%が実現している。また、n型多結晶Siセルでは、19.6%（Voc=663mV）が得られている。損失要因の分析（表面再結合損失0.70mW/cm²、外部Rs、Rp損失0.49 mW/cm²、裏面再結合損失0.39mW/cm²、バルク再結合損失0.12 mW/cm²、抵抗損失0.05 mW/cm²）がなされ、今後は、コンタクト抵抗の低減、表面、裏面のパッシベーションの改善により、25.5%は、可能であるとまとめた。

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type Hybrid TOPCon Cell – Cell Results

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	PFF [%]	η [%]
Blanket Emitter	4	703	41.4	82.5	84.6	24.0*
Selective Emitter	4	715	41.5	82.1	85.0	24.4*

*192.51, n-type, 2x2 cm², aperture area, confirmed by Fraunhofer ISE Callab

- TOPCon deposition and annealing after front side boron diffusion
- two high temperature processes



F.Feldmann et al Silicon PV 2014

図17 n型ハイブリッドTOPConセルの特性（Dr. M. Hermle提供）

表5 高効率TOPConセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
n-type 200 μ m	719	41.5	83.4	24.9
n-type 200 μ m	718	42.1	83.2	25.13

4. 3 薄膜太陽電池分野：

4.3.1 薄膜 Si 太陽電池：

(1) K. Yamamotoら（KANEKA）は、“Progress & Challenges in Thin-Film Silicon Photovoltaics: Heterojunctions & Multijunctions”と題して、プレーナリ講演を行った。薄膜Si PVは、大規模PVに適したものとして期待されていながら、昨今のPV市場の急激な成長に対応できなくなっているが、モジュール効率10%以上で35ユーロ/m²の低コスト化が可

能で、 $>5\text{m}^2$ のアップスケールが可能で、nearly zero energy buildingやBIPVへの応用が期待できる。現状の課題は、言うまでもなく、効率向上、光劣化抑制、コスト低減であり、接合特性改善（p/n接合、トンネル接合、バッファ層、多接合）、高品質TCO、光マネージメント（テクスチャ構造、中間層のチューニング、AR、裏面反射）、SW効果低減、PECVDプロセス改善による膜品質改善、堆積速度対膜質、などが検討対象である。

表6 高効率 a-Si および $\mu\text{c-Si}$ 薄膜 Si 単接合太陽電池特性の認定データ

	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF (%)	効率(%)	機関
a-Si	16.38	896	69.8	10.22	AIST
$\mu\text{c-Si}$	29.39	548	73.1	11.8	AIST
a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ 2 接合	13.45	1342	70.2	12.7	AIST
a-Si/ $\mu\text{c-Si}/\mu\text{c-Si}$ 3 接合	9.92	1901	72.1	13.6	AIST

薄膜Si太陽電池およびモジュールの現状が報告された。表6に、高効率a-Si、 $\mu\text{c-Si}$ 薄膜Si単接合太陽電池、a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ 2接合太陽電池、a-Si/ $\mu\text{c-Si}/\mu\text{c-Si}$ 3接合太陽電池の認定データを示す。a-Siセル、 $\mu\text{c-Si}$ セル、a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ 2接合セル、a-Si/ $\mu\text{c-Si}/\mu\text{c-Si}$ 3接合セルの最高安定化効率は、 1cm^2 程度の小面積セルで、各々、10.22%、11.8%、12.7%、13.6%で、いずれも、AISTによる。今後の方向として、効率16%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、a-Siおよび $\mu\text{c-Si}$ の高品質材料によるVoc向上、HIT構造の適用、高光吸収材料、light trapping、新材料などの検討を必要としている

ヘテロ接合結晶Si太陽電池の取り組みも紹介された。構造的には、パナソニックのHIT太陽電池と同様であるが、Cu Plate electrodeが用いられている。プロセスの最適化、材料の高ライフタイム、パッシベーション品質、光吸収、直列抵抗、などが改善され、表7に示すように、効率23.8%→24.5%→25.1%へと高効率化がはかられている。6x9モジュール（54セル）も作製され、効率20.8%、301W（39.8V、0.81A、FF=79.8%）が実現している。信頼性も確認され、20MW規模の量産を予定しているとの事である。

表7 高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池の特性

面積	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
239.1 cm ²	739	39.9	80.8	23.8
239.0 cm ²	741	40.1	82.5	24.5
151.9 cm ² (160 μm 厚)	738	40.8	83.8	25.1

4.3.2 CIGS、II—VI族化合物薄膜太陽電池：

(1) M. Powalla ら (ZSW) は、”Progress in High-Efficiency Cu(In,Ga)Se₂ Cells and Modules on Glass and Flexible Substrates”と題して、CIGS系薄膜PVに関するプレーナリ講演を行った。粒径は、 $0.5\sim 2\mu\text{m}$ だが、アルカリ post-deposition 処理、CdS層の薄層化による短波長域の改善に加え、吸収層のバンドギャップ E_g の深さ分布の検討もなされ、低 $E_g(1.16\text{eV}\rightarrow 1.13\text{eV})$ 域の拡大により吸収損失の改善がなされ、長波長域の量子効率の改善が図られ

ている。面積 04972cm^2 の CIGS 太陽電池 ($\text{MgF}_2/\text{ZnO}:\text{Al}/\text{i-ZnO}/\text{CdS}/\text{CIGS}/\text{Mo}/\text{ガラス基板}$) で、効率 21.7% ($V_{oc}=746.3\text{mV}$ 、 $J_{sc}=36.59\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=79.3\%$) の世界最高効率を達成している。170セルの平均効率は、21.2%である。 $\text{ZnS}/(\text{Zn},\text{Mg})\text{O}$ の Cd フリーバッファ層も検討され、効率 21.0% ($V_{oc}=717\text{mV}$ 、 $J_{sc}=37.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=78.6\%$) が得られている。MANZ の CIGS 工場での CIGS モジュールの製造コストは、 $\$0.40/\text{Wp}$ の現状だが、長期的には、 $\$0.23/\text{Wp}$ をターゲットとしている。フレキシブルセルの状況に加え、11 機関が参画する EU の GW レベルの製造を狙った GIGS 薄膜技術開発プロジェクトの状況 (6.2M ユーロ (EU 支援は 4.6M ユーロ)) も紹介された。

ソーラーフロンティアの小面積セル (0.5182cm^2) の効率は、20.9% ($V_{oc}=685.8\text{mV}$ 、 $J_{sc}=39.91\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=76.4\%$) であり、 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ のミニモジュールでは、2010年の効率 15.7%から 2011年の 17.2%、2012年の 17.8%と、改善がはかられている。これらの研究開発成果が、2011年の 150W モジュール (モジュール効率 12.2%)、2013年の 160W モジュール (モジュール効率 13.0%) 製造につながっている。2014年、170W モジュール ($97.7\text{cm}\times 125.7\text{cm}$ 、モジュール効率 13.8%)、2015年、180W モジュール (モジュール効率 14.6%) の製造を予定している。また、200Wモジュール (モジュール効率 16.3%) も視野に入れている。

(2) Z. Zhaoら (First Solar) は、“Unlocking High Performance Potential of CdTe Based Thin-Film Solar Devices” と題して、CdTe太陽電池、モジュールに関するプレーナリ講演を行った。生産レベルのモジュール効率は、16.3%である。小面積効率は、2011年の17.3%から、①表面、界面のエンジリング、光吸収層の改善、新バックコンタクト導入、により、2012年の効率18.7%、②ライフタイム向上 (2~5ns) により、2013年の20.4%、③グレーデッドバッファ層の導入により、小面積セル (0.3455cm^2) の効率は、21.5% ($V_{oc}=877.4\text{mV}$ 、 $J_{sc}=30.94\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=79.2\%$) に向上している。2013年8月から、GEと提携している。R&D予算は、2013年、2014年、2015年、各々、 $\$134\text{M}$ 、 $\$130\text{M}$ 、 $\$140\text{M}$ である。表8は、First SolarによるCdTeセルの現状とGaAsセルをヒントにした高効率化の見通しを示す。低コスト化については、First Solarが、CdTe太陽電池モジュールで、2013年の平均モジュールコスト $\$0.63/\text{W}$ 、ベスト $\$0.53/\text{W}$ を実証しており、モジュールコスト $<\$0.5/\text{W}$ 、システムコスト $<\$1/\text{W}$ が見えている。First Solarの年産規模は、2.2GWで、これまで、10GW以上、設置されているとのことである。

表8 CdTe 太陽電池の効率の現状と高効率化の見通し

	現状	中期見通し	長期見通し
Voc (mV)	877	916	950
Jsc (mA/cm ²)	30.9	30.9	31.5
FF (%)	79.2	81.8	83.0
η (%)	21.5	23.1	24.8

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 $\$0.38/\text{W}$ 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。

4. 4 高効率III-V多接合、集光型および宇宙用太陽電池分野：

(1) A. V. Marti ら (UPM) は、“NGCPV: A New Generation of Concentrator Photovoltaic Cells, Modules and Systems (a Final Review)”と題して、集光太陽光発電(CPV)に関する日欧共同研究開発プロジェクトの基調講演を行った。

今回、日欧の研究機関がお互いの強みを生かせるようなコンソーシアムを締結して共同で提案を行った。図18は、日欧の参画機関を示す。日本側は、筆者が研究開発責任者とするグループ、欧州側はマドリッド工科大学の Luque 教授を責任者とするグループとなっている。日本側は、豊田工大、東大、産総研、シャープ、大同特殊鋼の他、宮崎大、神戸大、旭化成、タカノの9機関が参画し、欧州側は、マドリッド工大(スペイン)、フランホーファー太陽エネルギー研究所(ドイツ)、インペリア・カレッジ(英国)の他、新技術・エネルギー環境庁(イタリア)、BSQソーラー(スペイン)、PSE(ドイツ)、CEA 国家エネルギー研究所(フランス)の7機関が参画している。

表9には、本プロジェクトの研究開発目標を示す。世界最高効率の集光型太陽電池(効率45%以上)、世界最高効率モジュール(効率35%以上)の実現、50kWの集光型太陽光発電システムの実証、集光型太陽電池およびモジュール特性の標準測定技術に加え、将来に備え、新材料、新型、新構造太陽電池の研究も行う。現在は、3接合太陽電池の実用フェーズであるが、図19に示すように、4接合、5接合太陽電池の集光動作により、50%以上の高効率化の実現が可能である。図19には、多接合太陽電池の理論効率および実現効率の接合数依存性を示す。4、5接合化のためには、InGaAsNなどのIII-V-N化合物など新材料の研究開発、量子ドット等量子効果を利用したキャリア・光閉じ込め効果の利用、III-V/Siモノリシックタンデム、などに挑戦する必要がある。魅力ある研究開発テーマが含まれている。一方で、集光型太陽電池およびモジュール特性の標準測定技術など、地味ではあるが、ぜひとも確立すべき技術もある。また、集光型太陽電池およびモジュールの電気的設計、光学的設計、放熱設計に加え、信頼性評価と高信頼度化など、重要な技術課題もある。

こうした日欧共同研究開発の結果として、図20に示すように、変換効率40%以上、モジュールコスト50円/W以下の集光型太陽電池モジュールの実用化が可能である。汎用電源の発電コストを下回る7円/kWh以下の達成も期待できる。今回のプロジェクトは、7円/kWh以下を達成するためのプロジェクトの一翼を担っており、今後継続して研究開発を進めることで、エネルギー問題の解決と日本の産業競争力強化に資すると考えている。

次世代太陽電池として、III-V/Siタンデム、III-V-N希釈系新材料、量子・ナノ構造太陽電池が有望であるが、欠陥挙動の理解と制御が課題である。本プロジェクトで、原子レベルでの評価解析ツールが検討された。旭化成、豊田工大、宮崎大との連携により、III-V/Siタンデムセルの高効率化の可能性が示された。



図18 共同研究パートナー

表9 本プロジェクトの研究開発目標

- World-record efficiency CPV cells (more than 45%)
- World-record efficiency CPV modules (more than 35%)
- Standard measurements of CPV cells and modules established
- Demonstration of 50kW CPV system and estimation of power generation from CPV systems
- New materials, new types and new structures for high-efficiency III-V solar cells

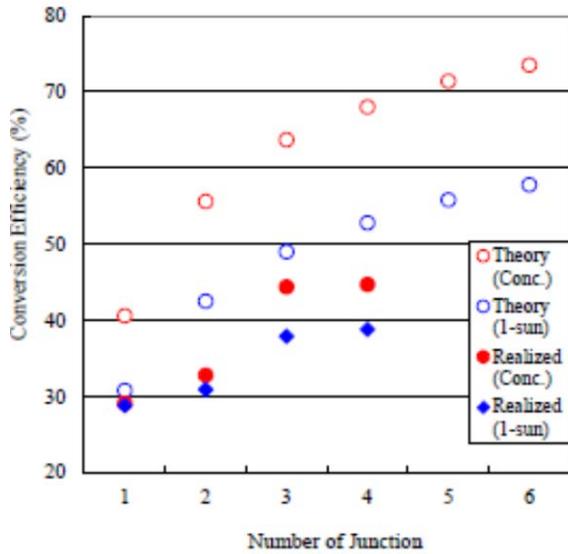


図 1 9 太陽電池の多接合構造および集光動作による高効率化の可能性

東大とマドリッド工大 (UPM) の連携による量子ドット太陽電池では、1-sun、70-suns で、各々、効率 20.3%、26.9%が得られている。インペリアル・カレッジと東大との連携により、多重量子井戸 (MQW) セルの多接合太陽電池用ミドルセルとしての有効性が示された。

図 2 1 に、本プロジェクトで検討した多接合太陽電池の構造とフランホファー太陽エネルギー研究所 (FhG-ISE) により計算された理論効率 (AM1.5D の 500 倍集光下での現実的に達成し得る効率) を示す。図 2 1 の Ge 基板上の 4 接合セルでは、理論効率 49.1%だが、GaSb や InP 基板上の 4 接合セルでは、効率 50.5%以上が期待できる。シャープは、先に、逆エピ構造格子不整合系 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池で 37.9%と、3 接合セルの非集光動作下での世界最高効率を達成しているが、電極設計等、直列抵抗および光損失の低減をはかって、集光下でも、3 接合セルの世界最高効率を達成している。このデータは、日欧の共同研究開発プロジェクトにおいて、FhG-ISE により測定され、図 2 2 に示すように、246~302 倍集光下で 44.4%の 3 接合セルでの世界最高効率が実現している。

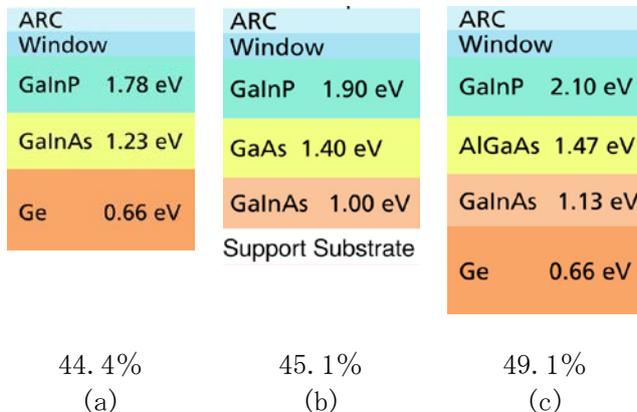


図 2 1 本プロジェクトで検討した多接合太陽電池の構造と理論効率 (AM1.5D の 500 倍集光下で)

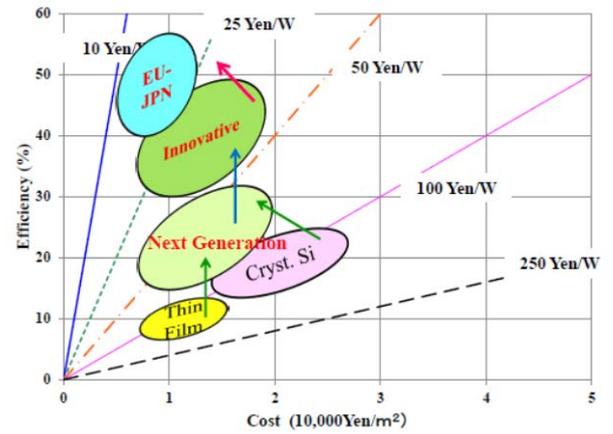


図 2 0 NEDO の太陽光発電研究開発ターゲット

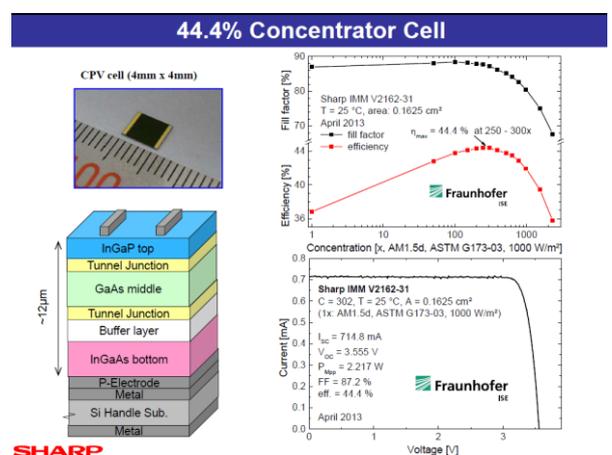


図 2 2 世界最高効率 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルの集光特性

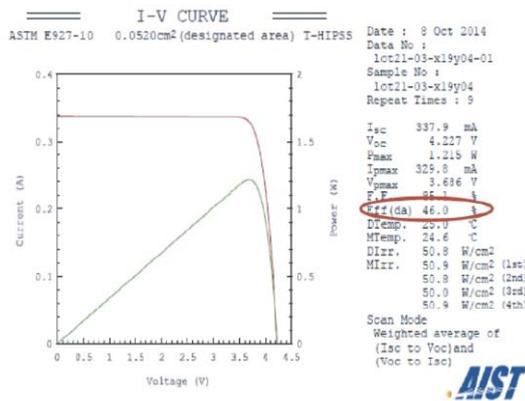


図 2 3 FhG-ISE グループの世界最高効率 4 接合セルの AIST による測定結果

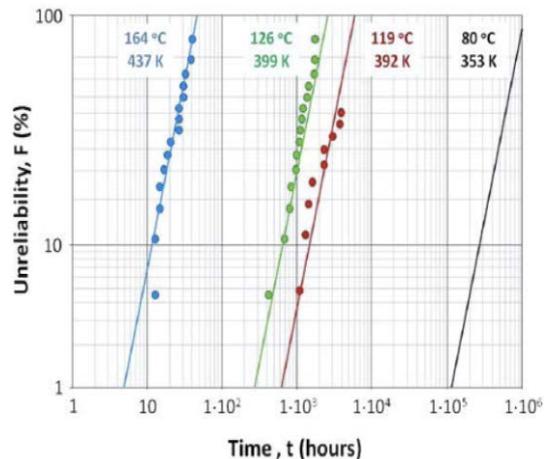


図 2 4 CPV セルの加速寿命試験結果

逆に、先に、FhG-ISE が、345.4 倍集光下で効率 46.5 % と報告した Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs/Ga_{0.16}In_{0.84}As_{0.31}P_{0.69}/Ga_{0.47}In_{0.53}As 4 接合セルに関して、日欧共同研究開発プロジェクト下において、FhG-ISE と産総研 (AIST) による CPV セル、モジュールの標準測定の取り組みがなされ、AIST が測定し、図 2 3 に示すように、508 倍集光下で、効率 46.0% が得られ、この値が、世界最高効率として、認定されている。

図 2 4 は、CPV セルの加速寿命試験結果である。UPM、FhG-ISE、大同特殊鋼、シャープによる共同研究がなされた。5% の特性劣化を容認するとして、80 °C で 820 倍の動作条件では、寿命 113 年が推定されるが、100 °C で 820 倍の動作条件では、寿命 7 年と推定され、後者のようなケースは、温度上昇低減が要求され、CPV セル、モジュール、システムのさらなる高度化が必要である。

UPM と大同特殊鋼の連携により、ドーム型 Fresnel Koeler 光学レンズが改善され、光学効率 85% が得られている。市販の CPV セル (平均効率 37.7%) を用いた CPV モジュールが、大同特殊鋼と欧州側との連携により作製され、図 2 5 に示すように、ミニモジュール (302.8 cm²) では、効率 34.6%、大面積 (面積 1m²) CPV モジュールでは、効率 32.3% (平均効率 31.3%) が得られている。

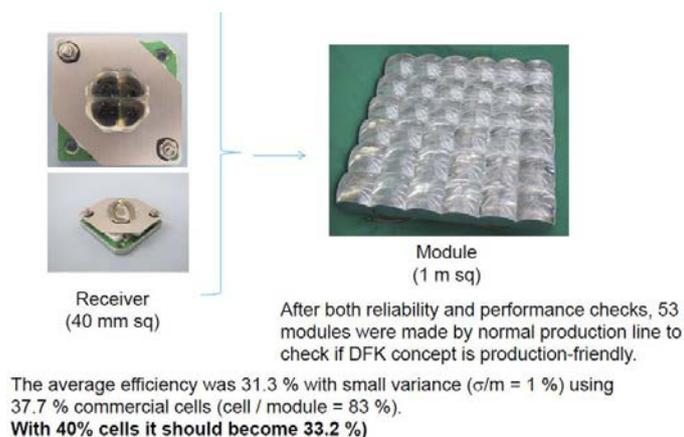
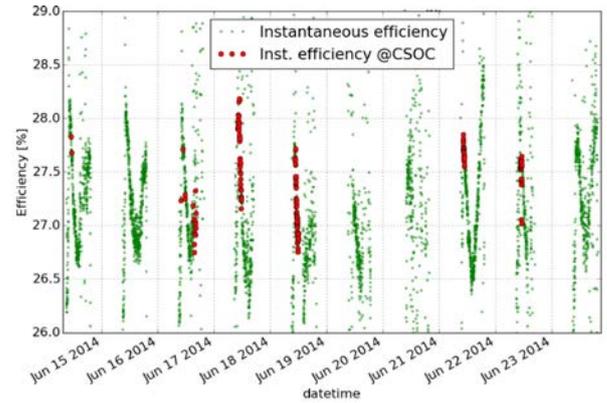


図 2 5 大面積 (面積 1m²) CPV モジュールで、平均効率 31.3% を実現

大同特殊鋼と BSQ-Solar によりスペイン・トレド近郊および UPM に設置した CPV システムで、図 2 6 に示すように、平均システム効率 27.8%、などの成果が得られている



(a)



(b)

図 2 6 (a)UPM キャンパス内に設置された CPV システム、(b)システム効率データ

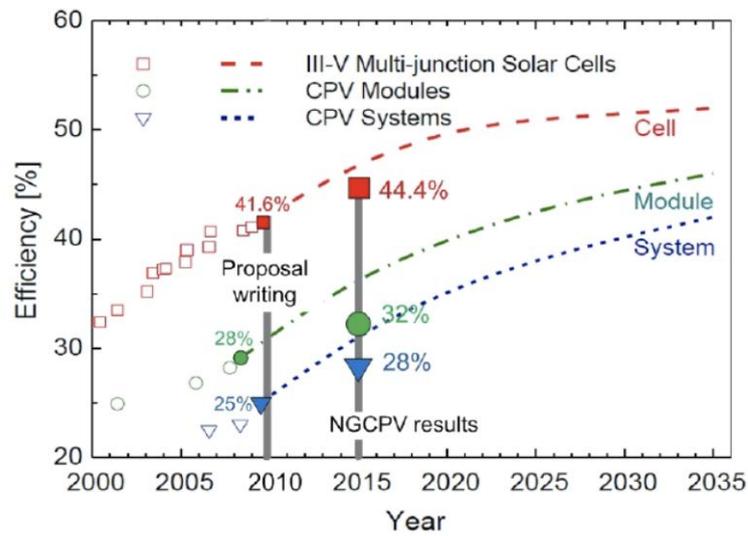


図 2 7 本プロジェクトによるセル、モジュールおよびシステム効率の向上

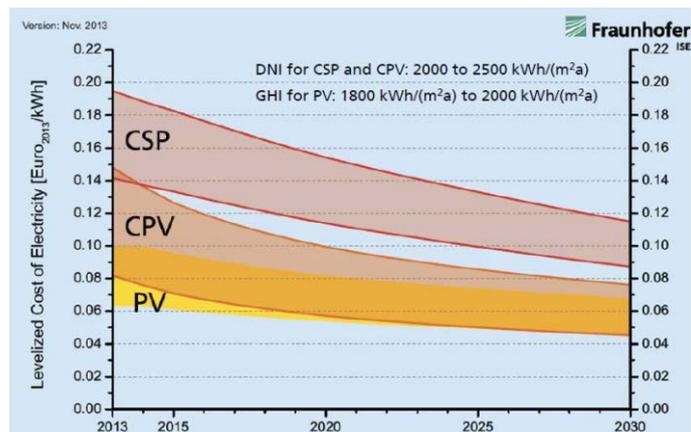


図 2 8 平板太陽光発電 (PV)、集光型太陽光発電 (CPV)、集光型太陽熱発電 (CSP) の LCOE コスト低減の予想 (Dr. A. Bett 提供)

図 2 7 は、本プロジェクトによるセル、モジュールおよびシステム効率の向上を示す。セル効率は、41.6%から 44.4%へ、モジュール効率は、28%から 32%へ、システム効率も、25%から 28%へと向上させることができた。図 2 8 は、平板太陽光発電 (PV)、集光型太陽光発電 (CPV)、集光

型太陽熱発電（CSP）の LCOE コスト低減の予想を示す。講演後の質問が出たように、CPV は、平板 PV に比べて、まだ、コストが高く、さらなる低コスト化に加え、高効率化、長寿命化が必要である。現状の生産段階のセルの AM1.5D 集光効率 38~40%、AM0 効率 29~31%を、中長期的には、AM1.5D 集光効率 45~50%、AM0 効率 33~38%とする必要がある。モジュール効率、システム効率も、中長期的には、40%超え、35%超えがターゲットである

4. 5 PV システム、性能、信頼性分野：

(1) J. Wohlgemuthら（NREL）は、“PV Module Reliability: How Can We Improve It?”と題して、基調講演を行った。PV産業の拡大と共に、PVモジュールの信頼性は、益々、重要となり、PVの安定性と長期信頼性は、PVの成功に重要な課題である。25年間のデータによれば、統計的には、PVモジュールは、0.8%/年の劣化率である。モジュールの劣化は、コストに関わり、これまでは、IEC61215や61646に準拠して、加速ストレス試験や Qualification がなされている。新しい製品開発のためには、コスト/性能比、耐用年数、信頼性などが重要となる。Qualification testは確立されていず、製造者の Quality Management System、システム設計や設置品質が重要となる。

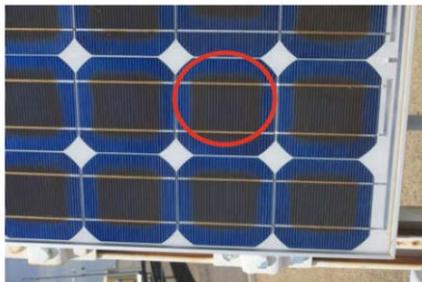


Figure 1: Discoloration of PV encapsulant. One of the discolored regions has been circled for identification

(a) 封止材の discoloration

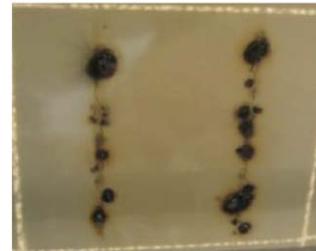


Figure 2: Burn marks in backsheet indicating failure of solder bonds

(b) 溶接部の劣化



Figure 3: Delamination of encapsulant and corrosion of cell metallization

(c) 封止材の delamination 等

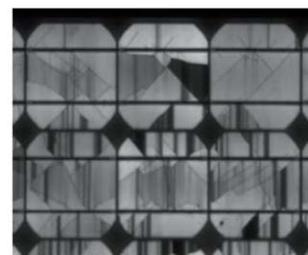


Figure 4: Electroluminescence picture of portion of module with cracked cells.

(d) セルの割れの EL 像



Figure 5: Modules broken by snow load.

(e) 雪荷重によるモジュール破壊



Figure 6: Thin film module with broken front glass.

(f) 薄膜モジュールのフロントガラス破壊

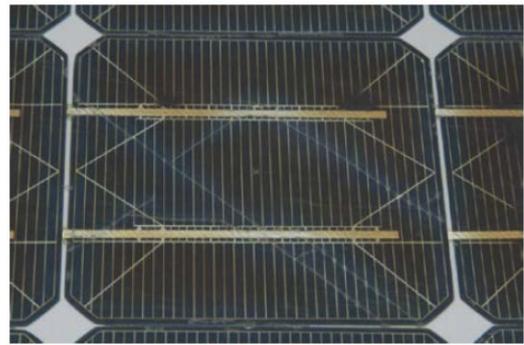
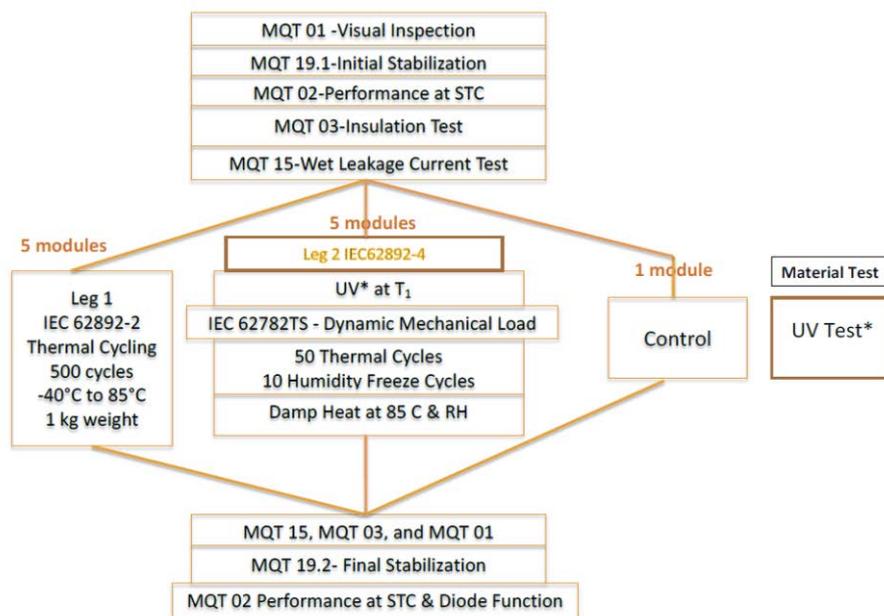


Figure 7: Photograph of cracked cell from module after 27 years of field exposure.

(g) 27年経過モジュールのセルの割れ

図 29 モジュールの劣化事例 (Dr. J. Wohlgemuth提供)

PVQAT (PV Quality Assurance Task Force) が設立され、PVモジュールの加速ストレス試験のガイドライン策定やPV製造者のQuality Management Systemガイドラインの策定に向け、Field実証の観測を通して、故障や劣化モードの評価解析を進めてきた。これらのうち、図 29 に示すように、①UV照射による封止材のdiscoloration、②インターコネクトリボンや溶接結合部の故障、③封止材のdelamination、④セルの割れやクラック、⑤PVモジュール製造、輸送、設置および動作中のストレス、⑤Potential Induced Degradation(PID)、⑥catastrophic failure、などが紹介された。また、これまでのField試験の観測から、PVQATが、図 30 に示すように、モジュールの加速ストレス試験の手順のドラフトを提案している。



* UV Exposures TBD

Figure 8: Accelerated Stress Test Sequence from Committee Draft of IEC 62892-1.

図 30 PVQATが提案しているモジュールの加速ストレス試験の手順 (Dr. J. Wohlgemuth提供)

今後は、PVモジュールの信頼性向上のさらなる技術的努力、PVQAT等の努力、PV製造 Quality Management Systemガイドラインの開発に加え、アレイ設計・設置・メンテナンスの向上、製造コントロール、加速ストレス試験の向上、フィールドでの観測技術、などが重要とまとめた。

4. 6 PV 応用分野：

(1) C. Brabec (EUniv. Erlangen-Nuremberg) は、“Smart Grid Solar Bavaria Project”と題して、基調講演を行った。PVの電力コストは下がっているが、PVのさらなる導入・普及のためには、低電圧ネットワーク、蓄電を含めスマートグリッド技術の向上が必要である。2012年に、約800万ユーロの予算で、14機関によるプロジェクトが開始された。2012年は計画、2013年、2014年は設計、設置、2015年、2016年は評価解析、2017年は議論のスケジュールとなっている。目的は、実証データと蓄積、シミュレーションと最適化による蓄電使用の向上にある。試験センターには、①130kWhレドックスフロー蓄電池、30kW-PVシステム、②289kWhLOHC、56+30kWh燃料電池、75kW-PVシステム、③120kW-PVシステムのみ、が設置されている。住宅用storageシステムの研究開発から、LCOEは30～45セント/kWhレベルになっているとの事である。

今後、短期的には、気象予測、特に、sky image活用による短期予想が必要である。予想が的確にできれば、storage freeに近づく。低電圧グリッドには、storageが必要であり、長期的には、水素貯蔵で、LOHCや燃料電池のcombineが可能となる。

(2) S. Klerksら (TNO) は、“Solar Road Operating Efficiency and Energy Yield - a Case Study”と題して、プレーナリ講演を行った。Solar Roadは、新しい道路の概念である。特に、オランダでは、住宅の屋根200-250km²に対して、道路は、400-500km²と、魅力的である。2014年10月に、Province Noord-Hollandのサポートのもと、TNO、Ooms、Imtechによるコンソーシアムが組織され、11月に、オランダKrommenieの集落に、図3-1に示すように、70mのテストコースを敷設された。80セル/モジュールの54モジュールによる16kWpである。表面は厚さ1センチの安全ガラスで保護されているが、ガラスには滑り止め加工が施されているので、自転車だけでなく歩行者も安心して通ることができるとの事である。2014年11月12日以来、稼働し、このテストコースが想定よりも多くのエネルギー、すなわち6カ月で3,000kWhの電力を生み出し、75kWh/m²の発電量になるとの事であり、これは1軒の家に1年間供給する電力に相当するとのことである。また、これまでにソーラーロードを自転車で利用した人の数は15万人を超えたという。悪天候や気温の変化が原因で保護ガラスのコーティングがはがれるというハプニングもあったが、現在は修復されて表面に改良が加えられている。データはまだごくわずかで、まだ改善すべき側面がいくつかある。例えば、パネルの表面が摩耗しやすいことと、高い維持コストである。しかし、実験は大きな希望を抱かせてくれる。このため、実験はさらに2年半進められ、今後は、自転車ロードの規模拡大から、将来的にはソーラーロードで生み出したエネルギーを、街灯や交通システム、電気自動車の動力源にしたいとの事である。

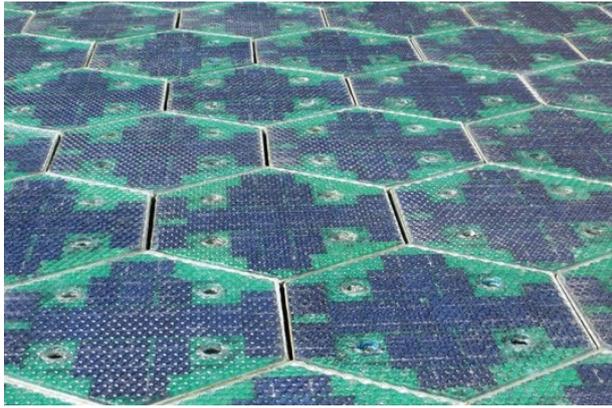


図 3 1 オランダ・クロメニーの自動車専用道路に埋め込まれた太陽電池モジュール
(2014年11月12日、<http://www.afpbb.com/articles/-/3031665>)

4. 7 市場、ビジネス、政策等：

(1) 組織委員長のStefan Rinck から、悲観的な市場予測からpositiveな市場予測に転じたIEAの代表として、紹介されたP. Frankl (IEA) は、閉会式のパネル討論の場で、モデレータとしてのIntroductionとして、“Solar Photovoltaic Energy Technology Roadmap”も紹介した。2019年には、global electricityの2%、2050年には、再生可能エネルギーは65~79%、PVは16%になるだろうと述べた。IEAのロードマップも紹介された。PVシステムの累積設置量も、2030年、2050年には、各々、1721GW、4674GWになるだろう。モジュール価格も、2013年の約\$0.8/Wから、2020年、2025年、2030年、2035年には、各々約\$0.7/W、約\$0.5/W、約\$0.45/W、約\$0.4/Wになるだろうと予想されている。今後は、flexible power systemの構築が必要で、policy makerに将来のインフラ構築の視点を期待したい。

5. 感想：

今回の会議は、前回より、参加者数が減ったとはいえ、相変わらず、太陽光発電に関する最大規模の会議となった。展示の方も、欧州市場の冷え込みを反映して、出展企業数は、減少した。

今後10年も結晶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。わが国でも、NEDOの高性能次世代プロジェクトで、結晶Si太陽電池の研究開発のコンソーシアムが進展して、優位な成果が出つつある。今後も、NEDOの後継プロジェクトでの発展を期待するし、結晶Si太陽電池を含む太陽光発電の研究開発者人口を増やし、さらにレベルを上げることが必要である。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。もう一度、世界一の生産量と市場の創製の実現をしたいものである。

ここに来て、薄膜Si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。

パナソニックおよびシャープが、昨年、結晶Si太陽電池の世界最高効率を更新し、その

他の分野でも、高効率化が進展している。しかし、今後の太陽光発電の発展や市場拡大のためには、まだまだ、国の支援が必要と言える。太陽電池や太陽光発電の高性能化、低コスト化、長寿命化の流れにあり、技術開発のさらなる強化と産学連携が必要である。幸い、日本は、各分野で世界最高の技術力を有していると言える。経産省（通産省）、NEDOが推進してきたPVに関する研究開発のお陰と言える。今後は、40th IEEE PVSCでのR. Swansonのプレナリ講演に示されているように、GTM RESEARCHの“PV TECHNOLOGY AND COST OUTLOOK, 2013-2017”によれば、2017年までに、モジュールコストは、\$0.36/Wに下がると見ており、技術向上60%、他の消耗品22%、スケールアップ17%、ポリSi 1%と、技術向上の効果は大きいとみており、技術開発が、太陽電池モジュールおよびシステムの低コスト化にも有効であり、オールジャパンで連携して、総合力で、直近の壁を打破する必要があるだろう。

今回、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発の成果も報告されたが、さらなる高性能化、低コスト化、長寿命化が必要である。モジュールやシステムの信頼性やスマートグリッド、システムの安定化、プラグインハイブリッド等、システム研究開発の強化も必要であり、自動車応用や農業利用も期待でき、日欧共同研究開発と同様に、日米共同研究開発も期待したい。

次回の32nd EU-PVSEC は、2016年6月20日～24日、ドイツのミュンヘンで、Inter Solar EUとの合同会議として、開催予定である。展示会の不振から、今回は、Inter Solar EUとの合同会議となり、しかも、43rd IEEE PVSCと同じ、2016年6月開催となり、IEEE PVSC側は、不信感を抱く状況となっている。また、PVSEC-25は、2015年11月15日～20日、韓国の釜山で、43rd IEEE PVSCは、2016年6月5日～10日、米国・ポートランドで、開催予定である。

(以上)