

4 2 回 IEEE 光起電力専門家会議 (42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2015. 6. 24

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日：2015年6月14日～19日

2. 開催場所：Hyatt Regency New Orleans (ニューオーリンズ、米国)

3. 本会議の概要：米国電気電子学会 (IEEE) 主催の太陽光発電会議で、2008 年から、毎年開催されることとなった。今回の会議の組織委員長は Steven Ringel(オハイオ州立大) で、プログラム委員長は Alex Freundlich (ヒューストン大) であった。

今回は、46 カ国から約 1,236 名の参加者があった。前回の開催地が、NREL に近いということもあり、例年より約 200 名の参加者増であったが、今回は、例年の参加者数となったようである。図 1 に、国別参加者数を示す。国別では、①米国 716 名、②日本 92 名、③ドイツ 65 名、④オーストラリア 47 名、⑤中国 37 名、⑥英国 33 名、⑦インド 30 名、⑧フランス 27 名、⑨台湾 23 名、⑩オランダ 21 名、の順であった。

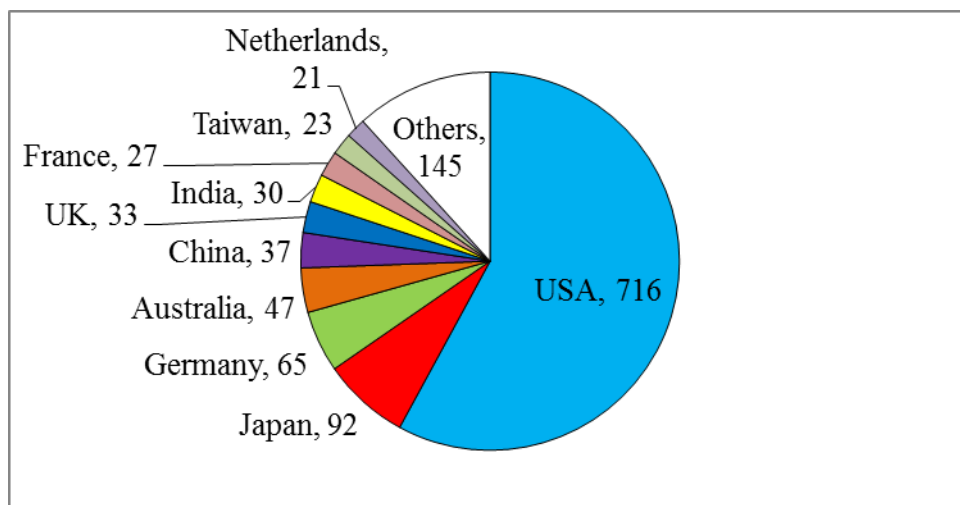


図 1 国別参加者数

図 2 は、国別発表論文件数を示す。44カ国から、986件の論文投稿があった。国別では、①米国446件、②日本68件、③ドイツ65件、④インド52件、⑤オーストラリア42件、⑥台湾42件、⑦中国41件、⑧英国28件、⑨フランス26件、⑩オランダ21件、の順であった。

図 3 は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①薄膜化合物系 (CIGS、CdTe およびII-VI族) 166件、②結晶Si太陽電池138件、③太陽電池モジュール、製造、システムち応用122件、④基礎および新概念113件、⑤III-V族および集光101件、⑥キャラクターゼーション92件、⑦信頼性73件、⑧有機、ペロブスカイト、ハイブリッド太陽電池60件、⑨政策、市場、普及53件、⑩宇宙用太陽電池37件、⑪薄膜シリコン技術31件の順であった。

**Number of Papers to be presented
at the 42nd IEEE-PVSC
(New Orleans, USA, June 14-19, 2015) 986
Papers**

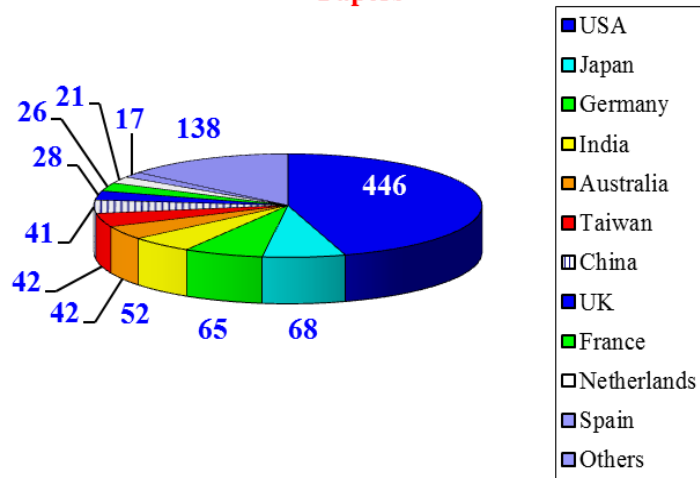


図 2 国別発表論文件数（資源総合システム(株)提供）

**Number of Papers to be presented
at the 42nd IEEE-PVSC
(New Orleans, USA, June 14-19, 2015)**

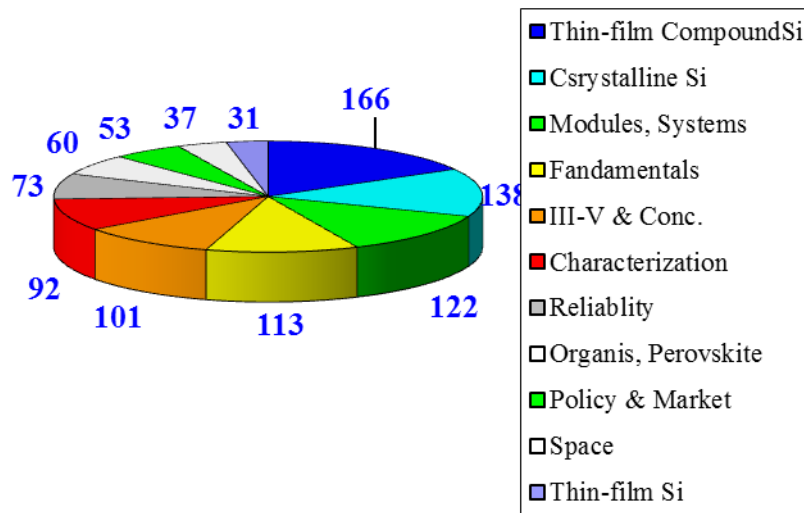


図 3 発表論文件数の分野別内訳（資源総合システム(株)提供）

4. Cherry Award受賞者と受賞記念講演

Cherry Award ChairであるS. Kurtz(NREL)より、William R. Cherry Awardの経緯(表1)、これまでの受賞者(表2)の説明がなされた。

表 1 William R. Cherry Awardの経緯

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

表 2 これまでのWilliam Cherry Awardの受賞者

Dr. Paul Rappaport 1980	Dr. Lawrence L. Kazmerski 1993	Dr. Antonio Luque 2006
Dr. Joseph L. Loferski 1981	Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994	Dr. Masafumi Yamaguchi 2008
Prof. Martin Wolf 1982	Dr. Allen M. Barnett 1996	Dr. Stuart Wenham 2009
Dr. Henry W. Brandhorst 1984	Dr. Adolf Goetzberger 1997	Dr. Richard King 2010
Mr. Eugene L. Ralph 1985	Dr. Richard J. Schwartz 1998	Dr. Jerry Olson 2011
Dr. Charles E. Backus 1987	Dr. Christopher R. Wronski 2000	Dr. Sarah Kurtz 2012
Dr. David E. Carlson 1988	Dr. Richard M. Swanson 2002	Dr. Keith Emery 2013
Dr. Martin A. Green 1990	Dr. Ajeet Rohatgi 2003	Dr. Ron Sinton 2014
Mr. Peter A. Iles 1991	Dr. Timothy J. Coutts 2005	

今回の受賞者は、Christiana Honsberg (アリゾナ州立大)で、中間バンドや量子井戸等の先端 PV 概念に関する先駆的貢献が評価されたものである。米国 DOD の DARPA (国防高等研究開発局) “Very High Efficiency Solar Cell (VHESC)” プロジェクトの共同リーダーとして、効率 42.8%の達成、III-V-N 系太陽電池の研究推進、高性能 Si 太陽電池等に貢献した。また、NSF、DOE のサポートによる PV に関する米国の他機関統合の Engineering Research Center (ERC) のセンター長として、30 数機関の国内、国際学界、産業界にわたる研究開発をリードしている。

5. 本会議のトピックス

プレーナリおよび招待講演を中心に、本会議のトピックスを紹介する。

5.1 基礎、新材料・デバイス分野：

Albert Polman (FOM Institute) は、“High-Efficiency Solar Cells by Nanophotonic Design” と題して、プレーナリ講演を行った。ナノ構造誘電体、金属の metasurface、metamaterial アーキテクチャが、太陽電池の光カップリング、トラッピングおよび変換の制御に有効である。

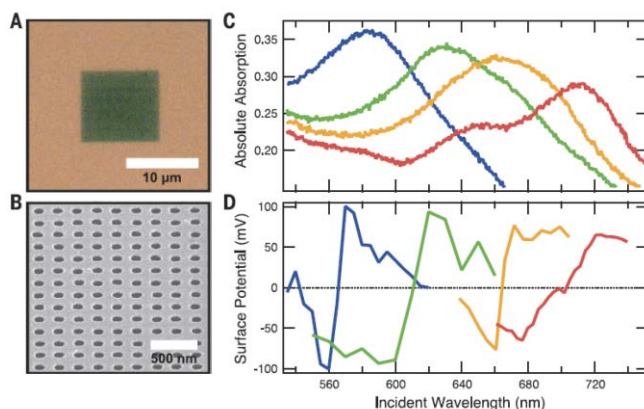


Fig. 4. Plasmo-electric effect on Au nanohole arrays on glass. (A) Bright-field optical microscope image showing a 200-nm-pitch array of 100-nm-diameter holes in a 20-nm-thick Au film on glass. The dark green color directly shows the strong absorption in the hole array. (B) SEM image of a 200-nm-pitch hole array imaged under 52° with respect to the normal. (C) Measured optical absorption spectra for hole arrays with a pitch of 175 nm (blue), 225 nm (green), 250 nm (yellow), and 300 nm (red) (NA = 0.8). (D) Surface potential as a function of excitation wavelength measured using KPFM at 100 mW/cm² for the four-hole arrays in (C) (NA = 0.25).

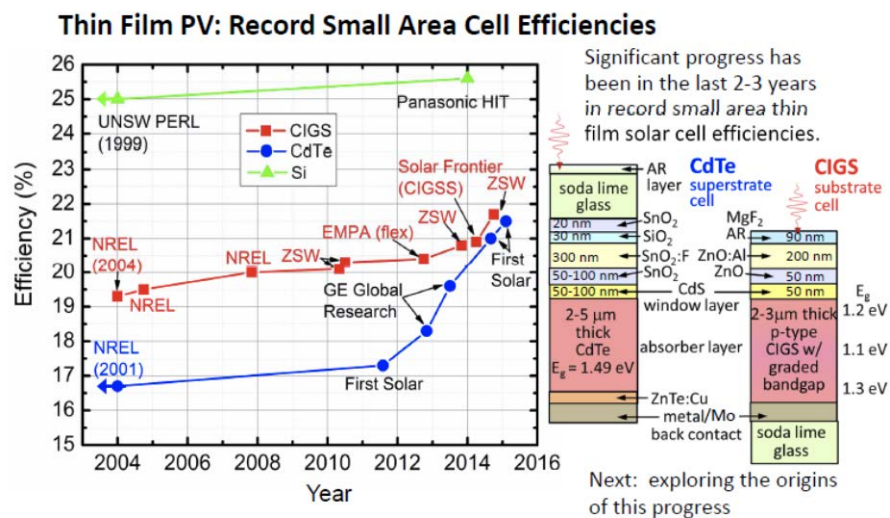
図4 ガラス状の Au ナノホールの Plasmoelectric 効果
(M.T. Sheldon et. al., Science, 346, 828 (2013))

講演では、いくつかの事例が示された。Mie 散乱構造が、IBC-Si や a-Si 薄膜太陽電池の光のカップリングやトラッピングに有効である。Al₂O₃/Si 上の TiO₂ のナノパターンにより、反射率が 32.4% から 1.6% に改善されている。EVA に Si のナノ構造を埋め込むことで、やはり 600~1000nm の波長域の反射率が 2% 以下に改善されている薄膜 CIGS 太陽電池に埋め込みナノスケールの誘電体散乱構造が、光トラッピングを促進させ、表面再結合を軽減させる。また、金属ナノ構造が、ITO の代替として、P3HT-PCBM 有機太陽電池や HIT-Si 太陽電池の透明導電層として作用することを実証している。太陽電池モジュールガラスの効率的な反射防止コーティングとして働くナノパターンゾルゲルコーティングも開発している。先端 soft-imprint 技術が、km 四方の規模で、これらの設計による製造を可能としている。図 4 に示すように、光を直接、光電位に変換する金属ナノ構造による新しいプラズモ電気効果についても述べた。

5.2 CIGS、CdTe、Ⅱ—Ⅵ化合物薄膜セル分野：

CdTe や CIGS 系の化合物薄膜セルは、アモルファス Si および微結晶 Si 薄膜セルと共に、低コストの薄膜太陽電池として期待されている。これらの材料は、真空蒸着やスパッタ法などで、わりと簡単に作製でき、多結晶薄膜でありながら、多結晶粒界が少数キャリアのキラーにはなっていなかったり、不活性化されていったりして、結晶粒径 1 μm でも高効率期待できる。

(1) Robert W. Collins (Univ. Toledo) は、”Polarization Probes Polycrystalline PV Performance Precisely”と題して、プレーナリ講演を行った。図5に示すように、薄膜多結晶太陽電池のレコード効率は増加を続け、ZSWによるCu(In,Ga)Se₂ (CIGS)の21.7%、First SolarによるCdTeの21.5%である。表3に、CdTe、CIGS太陽電池、モジュールの特性比較を示す。顕著な改善は、J_{sc}、V_{oc}であり、窓層の改善や光吸収層の傾斜バンドギャップ、ポスト堆積処理などによる。効率改善に、窓層や光吸収層の改善が大きく効いているので、リアルタイムのインラインの評価ツールの構築が重要である。図6に示すように、高速で非侵入プローブの開発で、インライン評価が可能となり、研究室での性能改善から製造ラインへの適用の可能性が出て来ている。



[1] From: M. A. Green, et al., Solar cell efficiency tables (Versions 24-45), *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 2004-2015.

図5 CdTe、CIGS太陽電池の構造と高効率化の進展 (Prof. Collins 提供)

表3 CdTe、CIGS太陽電池、モジュールの特性比較 (Prof. Collins 提供)

CdTe	V _{oc} (mV)	FF (%)	J _{sc} (mA/cm ²)	η (%)		CIGS	V _{oc} (mV)	FF (%)	J _{sc} (mA/cm ²)	η (%)	
NREL (2001)	845	75.5	26.1	16.7	The dominant improvement is in J _{sc} : elimination of absorbance by TCO/window layers	NREL (2004)	701	79.7	34.6	19.3	The dominant improvements are in J _{sc} , V _{oc} : reduction in window layer thickness and improvements in band gap grading (+ post-deposition treatment)
FSLR (2014)	876	79.4	30.3	21.0		ZSW (2014)	748	79.5	36.5	21.7	
% contrib.	15	21	64	100		% contrib.	56	-2	46	100	

Technology & Config.	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	Fill Factor (%)	η (%)	Area (cm ²)	Manufacturer & Details	Test Center & Date
CdTe Superstrate	103.1	1.553	76.6	17.5 ± 0.7	7021 (aperture)	First Solar, monolithic [1]	NREL 2/14
CIGS Substrate	47.6	0.408	72.8	17.5 ± 0.5	808 (designated)	Solar Frontier (70 cells) [2]	AIST 6/14
CIGS Substrate	-	-	-	16	-	Manz AG module format [3]	4/15

[1] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (Version 45)", *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 23:1-9, 2015; DOI: 10.1002/ppa.2573

[2] H. Sugimoto, "High efficiency and large volume production of CIS-based modules", 40th IEEE PVSC (IEEE, New York, 2014); DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925503

[3] <http://www.manz.com/media/news/16-prozent-manz-erzielt-neuen-weltrekord-bei-wirkungsgrad-von-cigs-duennschicht-solarmodulen-615/>

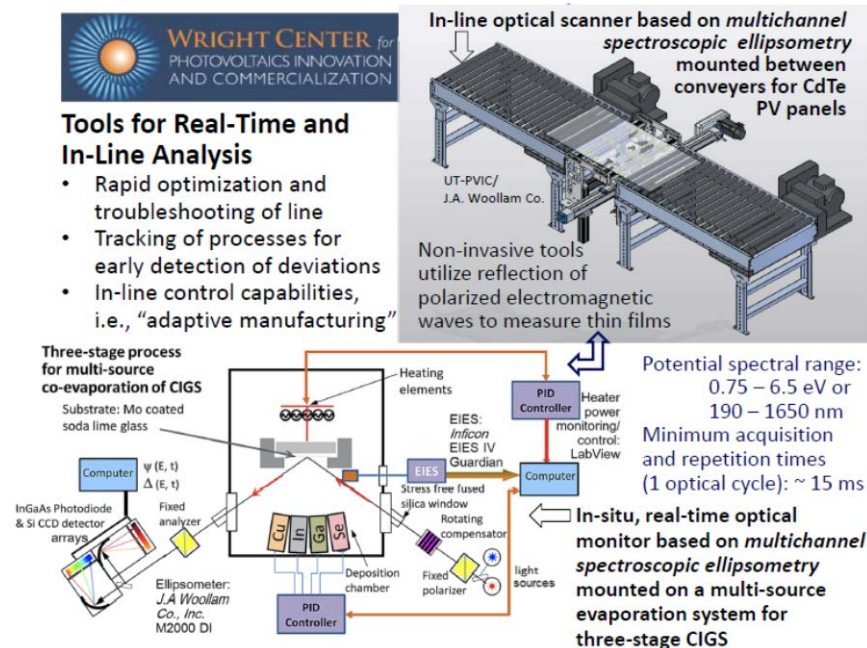


図6 リアルタイム、イン・ライン評価システム (Prof. Collins 提供)

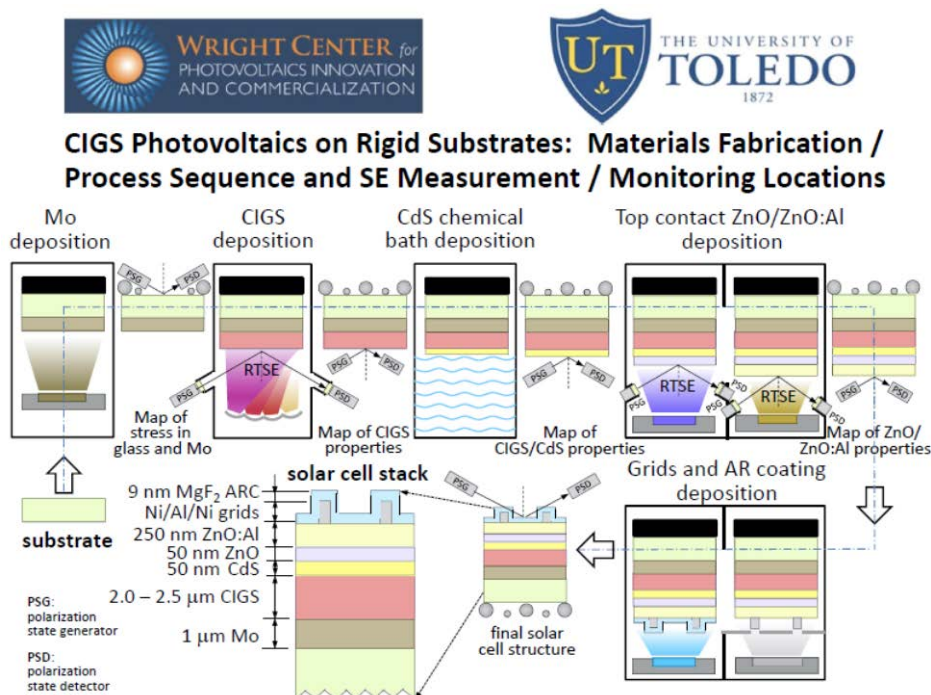


図7 CIGS 太陽電池の製造プロセスと SE 測定モニタリングの位置 (Prof. Collins 提供)

本講演では、マイクロ波 (THz) から紫外光 (フォトンエネルギー: 0.45~6.3meV、0.035~8.86eV) の範囲の偏光電磁波を用いた反射分光エリプソメトリー (SE) の適用による多層構造の解析や詳細な光学的特性の新規解析が述べられた。フォトンエネルギーやキャリア濃度、移動度、組成、粒径、応力などの基礎的特性の関数として光学特性を表現することにより、データ解析により、基礎物性が直接導出できる。これらの解析の適用により、

活性材料の光吸収のフォトンエネルギーにわたる結果や太陽電池の外部量子効率（EQE）が、パラメータを変化させることなしに予測できる。EQE 測定との比較は、これらの予測を正当化でき、収集不足に洞察を提供できる。誘電体アレイを用いたマルチチャンネルエリプソメーターは、開発中の工業材料のリアルタイム評価や製造中の PV パネルのインライン評価において高速測定を可能としている。講演では、図 7、図 8 に示すように、Mo 上の 3 段階 CIGS 共蒸着のリアルタイム評価、CIGS や CdTe 太陽電池の光学データベース開発や EQE シミュレーション、大面積 CdTe パネルやフレキシブル roll-to-roll PV コンポーネント層のインラインマッピング（ガラスを通しての評価と薄膜側の評価共に）にマルチチャンネル SE の広範な適用が述べられた。

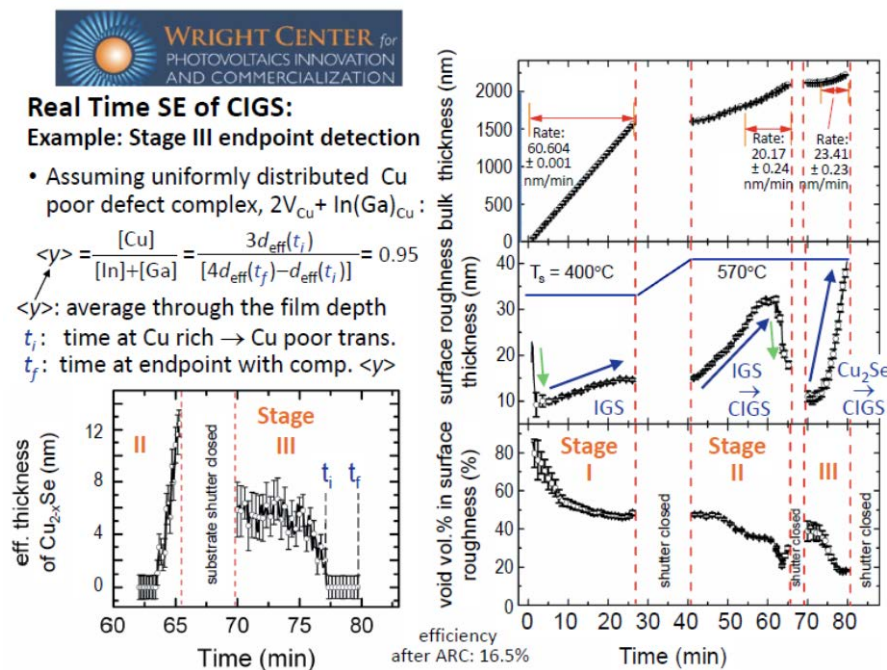


図 8 CIGS 太陽電池製造中の光吸収層成膜過程のリアルタイム SE 測定
(Prof. Collins 提供)

(2) T.M. Friedlmeier ら (ZSW)、“Improved Photocurrent in Cu(In, Ga)Se₂ Solar Cells: from 20.8% to 21.7% Efficiency”と題して、招待講演を行った。表 4 に、CIGS の高効率セルの効率を示す。ZSW は、先に、効率 20.8%を報告していたが、今回、効率 21.7%の世界最高効率を達成した。今後、特性改善により、効率 23.9%が可能で、将来的には、効率 25%が期待できるとしている。講演では、効率 20.8%から 21.7%への改善の道筋が述べられた。① PDT (Post Deposition Treatment) 処理による太陽電池の飽和電流密度 J_0 および n ファクターの改善の結果、 V_{oc} の向上、②CdS バッファ層の薄層化によるブルー領域の量子効率(QE)増加の結果、 J_{sc} 向上、③PDT 処理による CdS 層の均一化の結果、光吸収損の低減、④光吸収層の組成傾斜による J_{sc} 増加、などが効果をあげ、表 4 に示すように、効率 21.7%の世界最高効率が達成されている。CdS フリーバッファ層として、Zn(O,S)も検討され、効率 21.0% ($V_{oc}=717\text{mV}$ 、 $J_{sc}=37.2\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=78.6\%$) が得られている。今後は、バッファ層の光学特性改善による V_{oc} 改善をはかるとしている。企業のための $30\times 30\text{cm}^2$ のプリプロダクションラインの検討もしているとのものである。

表 4 CIGS 太陽電池効率の状況と高効率化の可能性

	ZSW	Solar Frontier	Solibro	ZSW	Potential
Voc (mV)	7578	686	757	748	736.3
Jsc (mA/cm ²)	34.8	39.9	35.7	36.5	39.9
FF (%)	70.1	76.4	77.6	79.4	81.2
η (%)	20.8	20.92	21.0	21.7	23.9

(3) 閉会式の会議ハイライトで、First Solar による効率 18.6% モジュール、H. Hiroi ら（ソーラーフロンティア）による高バンドギャップ ($E_g=1.54\text{eV}$) CIGS セルで効率 15.54%、H. Sugimoto ら（ソーラーフロンティア）による CZTSSe ($\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$) サブモジュールで、効率 11.8%、が紹介された。

(3-1) R. Garabedian (First Solar) は、“Changing our Energy Future Quietly with Utility Scale PV” と題して、基調講演を行った。マレーシア工場でのモジュールコストは、40 セント/W 以下で、最良製造ラインでの CdTe の平均モジュール効率は 15.6% で、現在、効率 16.3% のモジュールを出荷しつつある。講演の中で、CdTe 太陽電池および高効率化の進展を述べた。CdTe 太陽電池の高効率化は、CIGS 太陽電池と同様に、図 9 に示すように、組成制御によるバンドギャップ傾斜がなされ、図 10 に示すように、波長 880nm 以上の赤色の領域での量子効率の改善がはかられている。短絡電流密度 Jsc で、約 $2\text{mA}/\text{cm}^2$ の改善がはかられている。図 10 でもわかるように、青色の波長領域でも、量子効率の改善がはかられているが、窓層の改善によるもので、Jsc で、約 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ の改善がはかられている。また、 E_g 傾斜は、CdTe 層の欠陥パッシベーションに効果があり、キャリア寿命が 6ns から 26ns に向上し、Voc の改善がはかられている。これらの改善の結果、CdTe 太陽電池で、効率 21.5% ($V_{oc}=666\text{mV}$ 、 $J_{sc}=39.3\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=80\%$) の世界最高効率が達成されている。また、面積 0.7m^2 モジュールで、アパーチャ効率 18.6% を実現している。CdTe は、初期劣化等、準安定性があったが、共同研究で、劣化も軽減されつつあるとの事である。

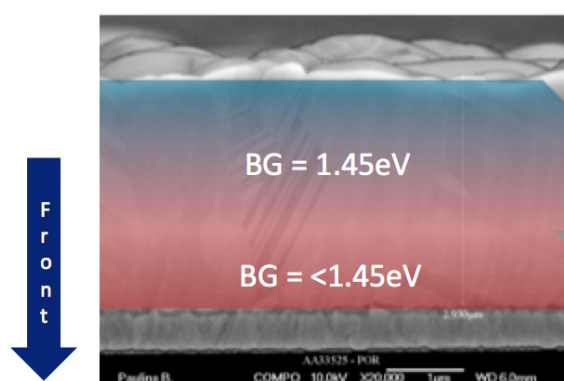


図 9 高効率 CdTe 太陽電池の断面
(Source: First Solar)

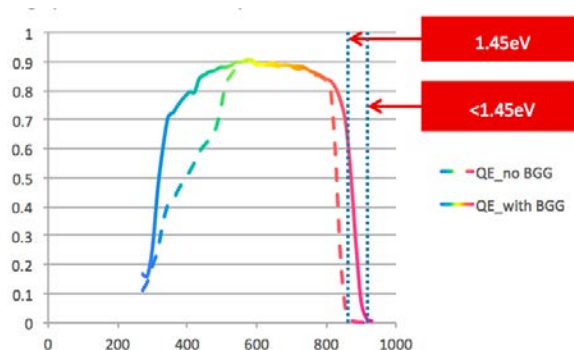


図 10 バンドギャップ傾斜による CdTe 太陽電池の量子効率向上 (Source: First Solar)

(3-2) H. Hiroi ら（ソーラーフロンティア）は、“960mV Open Circuit Voltage Chalcopyrite Solar Cell” と題して、pure sulfide の高バンドギャップ CIGS 太陽電池の高効率化の進展を報告した。H₂S ガスによる硫化中に、光吸収層に Cu_xS 層が形成され、KCN エッチが必要とな

るが、KCN不要なかつ高品質な光吸収層の実現を目指して、結晶成長の高温化が有効であることを見出し、 V_{oc} 、 J_{sc} の改善がはかられ、図11に示すように、高バンドギャップ ($E_g=1.54\text{eV}$) CIGSセルで効率15.54%を達成した。

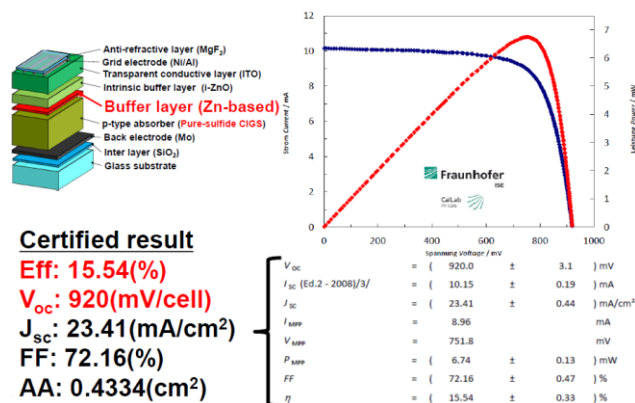


図11 高バンドギャップ ($E_g=1.54\text{eV}$) CIGSセルの構造と効率15.54%の達成
(Dr. H. Sugimo提供)

(3-3) H. Sugimotoら (ソーラーフロンティア) は、“Impact of Buffer Layer on Kesterite Solar Cells” と題して、CZTSSe ($\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$) サブモジュールに関する招待講演を行った。CZTSSeは、豊富な材料で、低コストが期待されている。IBMによる効率12.6% (面積 0.4209cm^2 、 $V_{oc}=513.4\text{mV}$ 、 $J_{sc}=35.21\text{mA/cm}^2$ 、 $\text{FF}=69.8\%$) の現状である。今回、表面側のS組成傾斜による E_g 傾斜が検討され、キャリア再結合の軽減による J_{sc} の改善がはかられている。効率10.8%から、11.4% ($V_{oc}=503\text{mV}$ 、 $J_{sc}=35.0\text{mA/cm}^2$ 、 $\text{FF}=64.6\%$) に改善がはかられている。また、バッファ層の改善に関して、 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{CdS}$ ハイブリッドバッファ層の適用による V_{oc} ($633\text{mV} \rightarrow 686\text{mV}$)、 FF ($50.6\% \rightarrow 56.0\%$) の改善がはかられている。メカニズムとして、CdS上の In_2S_3 堆積後の熱処理により、CdSおよびCZTS層へのInの拡散によるキャリア濃度の増加が考えられている。キャリア濃度増加によるlight soaking効果も期待でき、サブモジュール (面積 10.69cm^2) で、図12に示すように、効率11.8% ($V_{oc}=503\text{mV}$ 、 $J_{sc}=35.1\text{mA/cm}^2$ 、 $\text{FF}=66.8\%$) が達成されている。

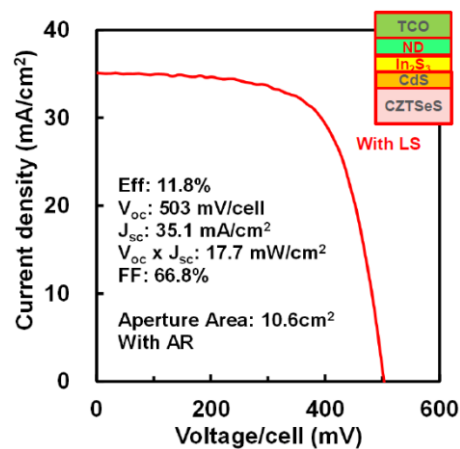


図12 CZTSSe ($\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$) サブモジュールで効率11.8%の達成
(Dr. H. Sugimo提供)

5.3 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野：

(1) A. W. Bett (FhG-ISE) は、” Challenges and Perspectives of CPV Technology” と題して、プレーナリ講演を行った。集光太陽光発電 (CPV) 技術は、太陽光から所定の面積に最も高い電気出力を発生する。高倍集光 (HCPV) は、平板 PV システムに比べ、面積当たり約 2 倍の出力を発生できる。システムレベルの高変換効率は、用いる高効率多接合太陽電池に由来する。これらの太陽電池効率は、図 1 3 に示すように、10 年以上前から、年々増加し続け、絶対効率約 1%/年で増加し、現在、図 1 4 に示すように、レコード効率 FhG-ISE、Soitec、CEA によるダイレクトボンディング 4 接合セルの効率 46.0%、NREL による GaInP/GaAs/GaInAs/GaInAs 逆エピ構造 4 接合セルの効率 45.7% である。しかし、多くの種々の技術プロセスが研究開発中であるから、効率 50% を超えのさらなる向上の余地がある。

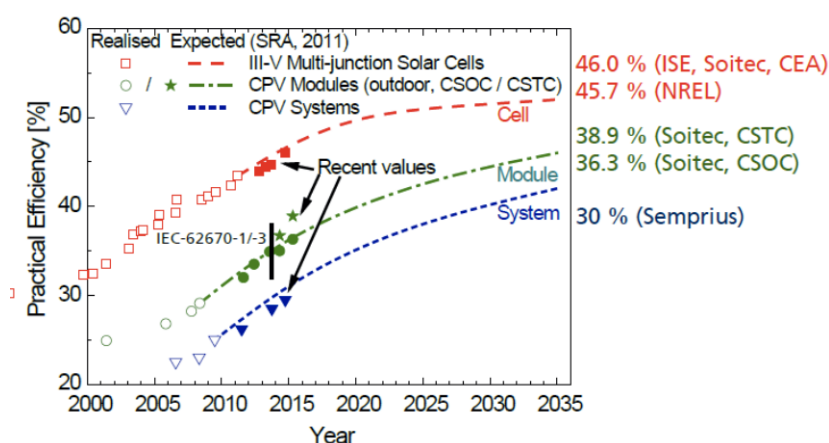


図 1 3 高倍集光 (HCV) のセル、モジュール、システム効率の変遷 (Dr. A. Bett 提供)

Solar Cell Architectures for 4J Cells Achievements

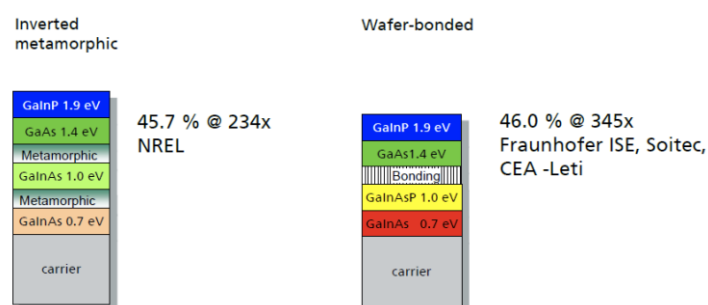


図 1 4 レコード HCPV セルの構造とレコード効率 (Dr. A. Bett 提供)

HCPV モジュール効率も同様に、図 9 に示すように、約 0.8%/年の率で増加している。これは、集光光学系の光学効率の増加も反映している。現在、レコードモジュール効率は 36.7% であるが、40% モジュールの実現が期待できる。従って、HCPV 技術は、図 1 5 に示すように、格段の進歩を示しており、将来も明るいとも見られている。また、図 1 6 に示すように、CPV のシステムコストは、現状、0.95 ユーロ/Wp、ターンキイの設置コストも、1.3 ユーロ/Wp～2.5 ユーロ/Wp と低減されている。しかし、CPV 市場を見ると、異なる構図が生じている。図 1 7 に示すように、2009～2012 年に期間は、

市場成長は印象的に良かったが、現在は、停滞している。いくつかの企業は、ビジネスから撤退し、他は、ちょうど、成長を始めつつある。現況は、流動的で、不安定である。しかし、数 MW 規模の大規模発電に関して堂々とした性能データが得られている。これらのデータは、発電応用において、CPV 技術の魅力と可能性を示している。講演では、CPV 技術および市場の現状をまとめた。また、CPV 技術の今後の挑戦、課題についても言及した

The Efficiency Chain for CPV: Actual Status Commercial Values: Cell - Module - System



図 1 5 HCPV セル、モジュール、システムの研究段階および実用レベルの効率の現状
(Dr. A. Bettt 提供)

Cost of a CPV System

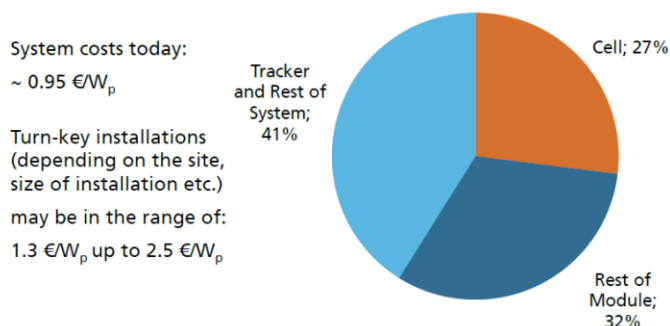


図 1 6 CPV システムコストの現状 (Dr. A. Bettt 提供)

Concentrator Photovoltaic (CPV) – Market Yearly Installed Capacity

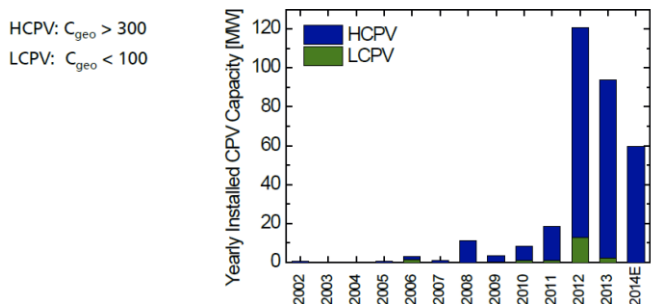


図 1 7 CPV 市場規模の変遷 (Dr. A. Bettt 提供)

(2) F. Dimrothら (FhG-ISE) は、“Four-Junction Wafer Bonded Concentrator Solar Cells”と題して、招待講演を行った。多接合太陽電池の集光動作により、50%以上の高効率化が期待できる。スペクトルスプリッティングやメカニカルスタックは、システム構成上、コスト高になろうとの見解が述べられた。モノリシックタンデムが妥当で、格子整合系 GaInP/GaInAs/Ge 3 接合セルが、以前の主流であったが、集光動作でも、効率41.6%程度であった。さらなる高効率化のためには、格子不整合系やIII-V-N化合物の適用が必要である。格子不整合系は、転位発生が課題であるが、シャープは、逆エピ構造 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルで、非集光効率37.9%、250~300倍集光で効率44.4%を達成している。Emcoreは、逆エピ構造 InGaP ($E_g=1.9\text{eV}$) /InGaAs (1.4eV) /InGaAs (1.0eV) /InGaAs (0.7eV) 4 接合セルで、AM0効率34.2%を実現している。III-V-N系においては、Solar Junctionは、InGaP/GaAs/InGaAsNSb 3 接合セルの集光動作で効率44.1%を実現している。

サブセル材料の組み合わせの柔軟性からは、貼り合わせ技術の適用や、オンSi技術の適用が有効である。Spectrolabは、GaAs基板上的 AlInGaP/InGaP/GaAs 3 接合セルのエピタキシャル・リフトオフ (ELO) したものと InP 基板上的 InGaAsP/InGaAs 2 接合セルの直接ボンディングによる 5 接合セルで、AM1.5G効率38.8%、AM0効率35.1%を達成している。

先に、FhG-ISE、Soitec、HZB、CEA-Letiの共同開発により、4 接合セルの297倍集光で、44.7%の世界最高効率を達成した事を発表した。図 1 8 に示すように、GaAs 基板上的 InGaP/GaAs 2 接合セル (FhG-ISE製) と InP 基板上的 InGaAsP/InGaAs 2 接合セル (HZB製) とをウエハボンディングで貼り合わせるメカニカルスタック法 (Soitec)により、モノリシック (2 端子) 4 接合セルを実現したものである。格子整合型で、古くから、理想的構造と言われていたが、2 枚の化合物基板を使用することで、高価であることから、本格的検討はなされてはいなかった。昨今の高効率化の競争の中で陽の目を見たような気がする。①GaInP トップセルのエミッタ改良による高収集電流化、②GaInP/AlGaAs トンネルダイオードの透明化、③GaAs系サブセルの E_g 、層厚の増加による高 V_{oc} 、 J_{sc} 化、④GaInPAs サブセルの E_g 低減によるサブセルの電流整合、改善がなされ、345.4倍集光下で、効率46.5%を達成していた。図 1 9 は、世界最高効率 4 接合の構造、4 接合セルの345.4倍集光下での動作特性、を示す。その後、後述する集光太陽光発電に日欧共同研究開発プロジェクトで、AIST による測定がなされ、効率46.0%が認定されている。

今回、①エピタキシイの改善による表面ラフネスの改善、②エピタキシイの改善による各サブセル層の欠陥低減、③ウエハボンディング界面の清浄化を含めた技術改良、④界面抵抗の低減 ($3.29\text{m}\Omega\text{cm}^2 \rightarrow 1.32\text{m}\Omega\text{cm}^2$) と電圧損の低減 (300倍集光で10mV以下)、等により、図 2 0 に示すように、ウエハボンディング GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs 4 接合セルの312倍集光下で、効率46.1%を実現している。今後、AIST、NRELでの測定により、認定データが決まろう。

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%としたいと結んだ。

Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell

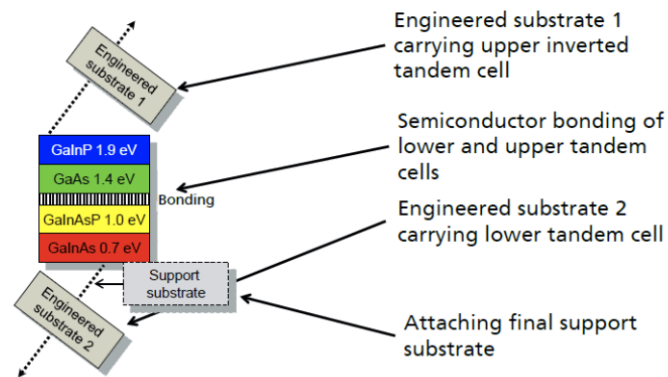


図 1 8 4 接合セルの作製プロセス (Dr. F. Dimroth提供)

4-Junction Cell Efficiency Under Concentration

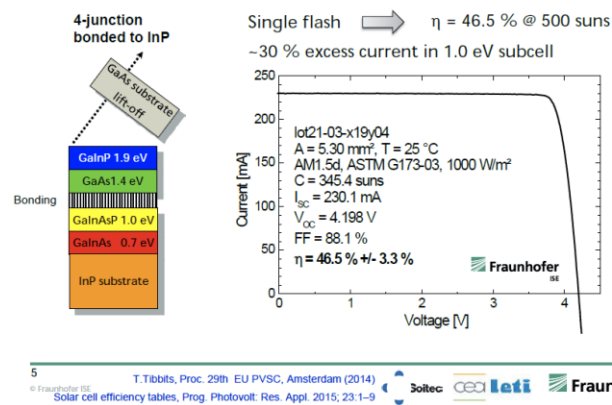


図 1 9 世界最高効率 4 接合セルの構造、345.4倍集光下での動作特性 (Dr. F. Dimroth提供)

InP based 4-Junction Solar Cell Results on Engineered Substrate

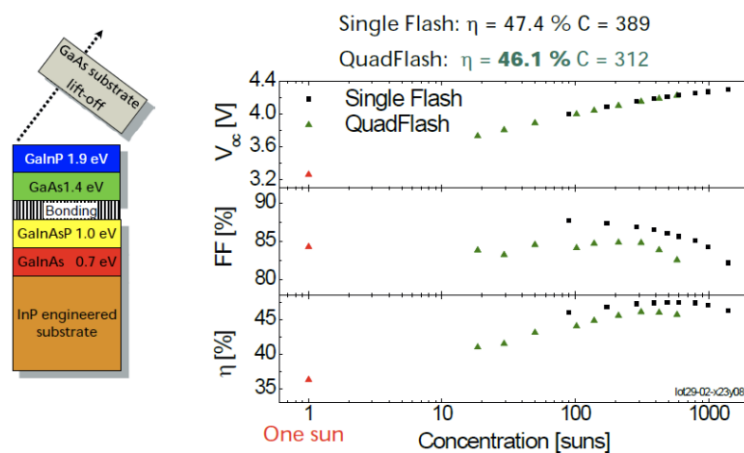


図 2 0 今回の 4 接合セルの集光動作特性 (Dr. F. Dimroth提供)

(3) M. Yamaguchi (豊田工大)、A. Luque (UPM) は、“Summary of Europe-Japan Collaborative Research on Concentrator Photovoltaics” 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総合報告を行った。

シャープは、先に、図2-1に示すように、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、250~300 倍集光下で 44.4%の3 接合セルでの世界最高効率を実現している。

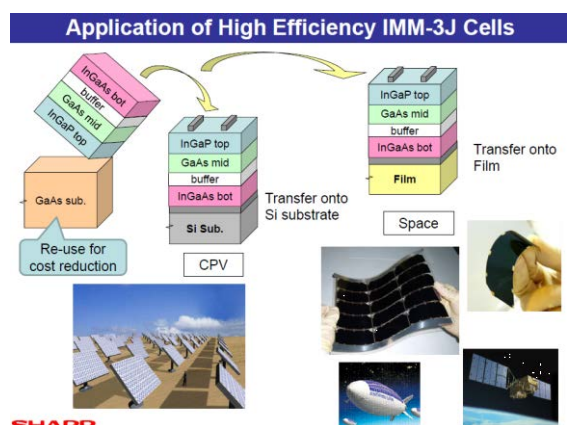


図2-1 逆エピ構造格子不整合系3接合太陽電池の宇宙および集光太陽光発電応用 (Dr. T. Takamoto 提供)

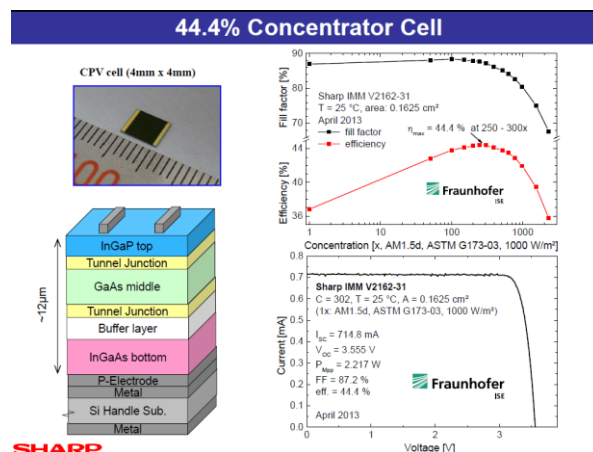


図2-2 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルの集光特性 (Dr. T. Takamoto 提供)

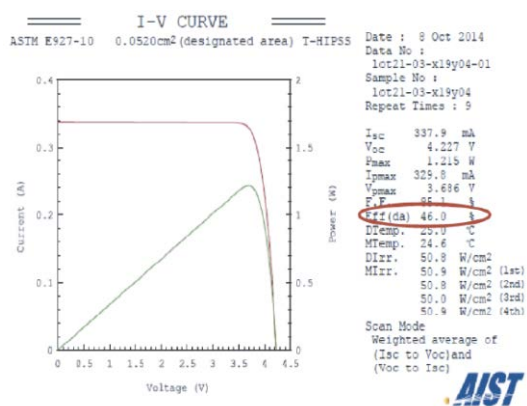


図2-3 FhG-ISE グループの世界最高効率4接合セルのAISTによる測定結果

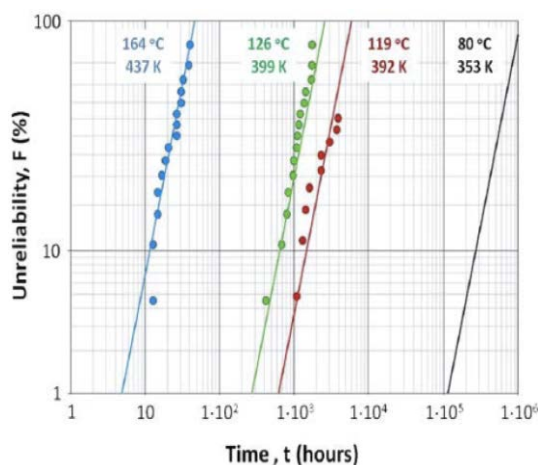


図2-4 CPVセルの加速寿命試験結果

逆に、先に、FhG-ISE が報告した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 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℃で 820 倍の動作条件では、寿命 113

年が推定されるが、100℃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。この他、改良4接合セルで、効率44.7%、CPVミニモジュールで、効率34.6%、大同特殊鋼とBSQ-Solarによりスペインに設置したCPVシステムで、平均システム効率27.8%、III-V/Siタンデムセルの高効率化の可能性、多重量子井戸(MWQ)セルの多接合用ミドルセルとしての有効性、量子ドット(QDs)セルの可能性、原子スケールの評価解析、などの成果が得られている。

(4) 本会議のハイライトでは、III-Vおよび集光セル、モジュールの高効率化の進展、III-V/Siタンデムや低コスト化が最近のトピックスとなっていることが紹介された。

5.4 結晶Si太陽電池分野：

(1) A. Cuevasら(ANU)は、“Skin care for healthy solar cells - Surface passivation to passivated contacts”と題して、プレーナリ講演を行った。電子と正孔が再結合しないように、絶縁膜等により表面を不働態化するパッシベーションが、結晶Si太陽電池の高効率化に重要である。現状では、表面パッシベーションは十分とは言えず、改善の余地がある。パッシベーション膜について、図25に示すように、種々の膜があり、化学的パッシベーションによる界面準位密度 D_{it} の低減と膜中の固定電荷密度 Q_f の効果利用がある。図26は、パッシベーション膜による少数キャリア寿命の改善とドナー濃度依存性を示す。 Al_2O_3/SiN_x は、47msのキャリア寿命、 $a-Si:H(i)$ は、100msのキャリア寿命が限界である。新しいパッシベーション膜である GaO_x は20ms、 MoO_x は7ms程度との事である。

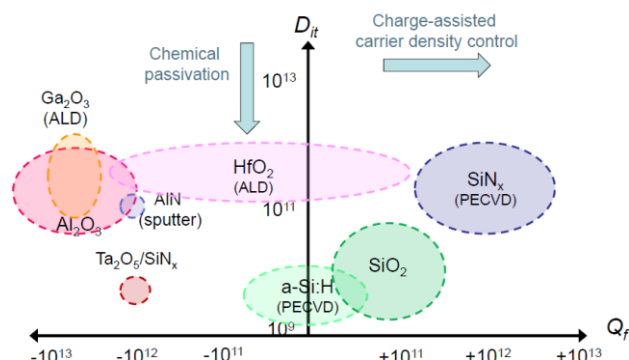


図25 種々のパッシベーション膜の界面準位密度 D_{it} と固定電荷密度 Q_f (Prof. A. Cuevas提供)

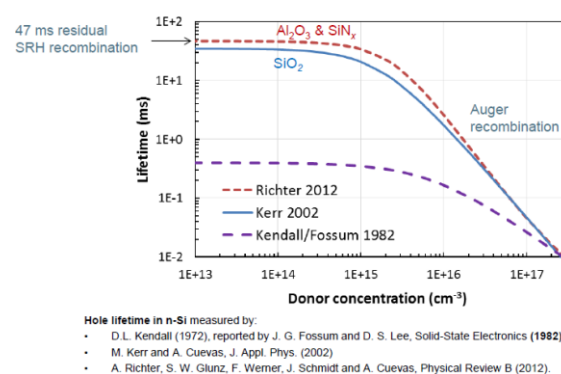


図26 パッシベーション膜による少数キャリア寿命の改善とドナー濃度依存性 (Prof. A. Cuevas提供)

コンタクト部の再結合抑制には、選択コンタクトがあり、図27に示すように、タイプA(MIS構造)タイプB(MSIS構造)がある。タイプAとして、P拡散+ SiO_x 又は $a-Si:H$ 層がある。この構造では、コンタクト抵抗 ρ_c と再結合電流 J_{0c} とのトレードオフではあるが、 $n-Si$ ベース太陽電池の $n+$ 拡散/ $SiO_x/a-Si:H/Al$ のmixed metallic Phase構造で、効率21%($V_{oc}=666mV$ 、 $J_{sc}=39.3mA/cm^2$ 、 $FF=80\%$)が得られているとの事である。タイプBとして、ポリSi($n+$)/ SiO_x が検討され、 $\rho_c \leq 10f\Omega/cm^2$ 、 $J_{0c} \leq 20m\Omega/cm^2$ が得られている。図28に示

すように、ポリSi (n+) /SiO_xコンタクト太陽電池で、FhG-ISEにより、効率24.0%が得られている。新しい材料として、透明、キャリア選択と導電膜MoO_xでは、効率16.7%の状況である。複合技術として、EPFLによるMoO_x/a-Si:H(i)正孔コンタクト、n+ a-Si:H/a-Si:H(i)電子コンタクト構造のa-Si:H/Siヘテロ接合太陽電池で、効率20.7% (V_{oc}=720mV) や、ISFHによるPEDOT:PSS/SiO_x正孔コンタクト、n+ P拡散構造の有機/Siヘテロ接合太陽電池で、効率20.6% (V_{oc}=657mV) の状況である。図29は、選択コンタクトのコンタクト抵抗 ρ_c と再結合電流J_{0c}との現状を示す。図30に示すように、太陽電池の薄型化によるV_{oc}の向上が可能である。

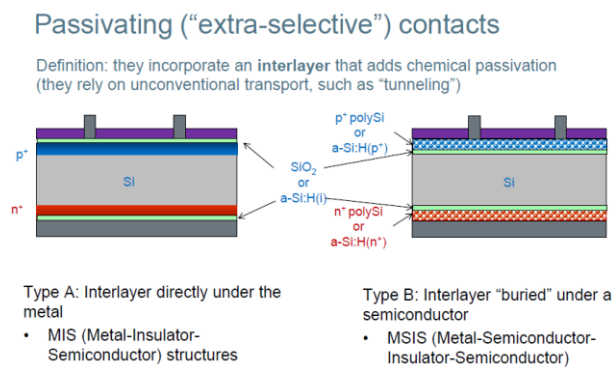


図27 選択コンタクトによるコンタクトの不働態化 (Prof. A. Cuevas提供)

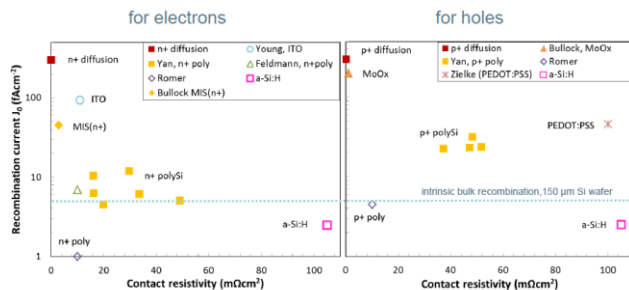
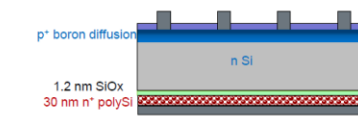


図29 選択コンタクトのコンタクト抵抗 ρ_c と再結合電流J_{0c}との現状 (Prof. A. Cuevas提供)

n⁺ polySi/SiO_x contact solar cells



	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Eff. (%)
ANU (polySi)	675	38.4	80.4	20.8
Fraunhofer ISE (Si film)	703	41.4	82.5	24.0 ← not the best!

Di Yan et al., Solar Energy Materials (2015)

Feldmann et al., Solar Energy Materials (2014).

図28 ポリSi (n+) /SiO_xコンタクト太陽電池の構造と特性 (Prof. A. Cuevas提供)

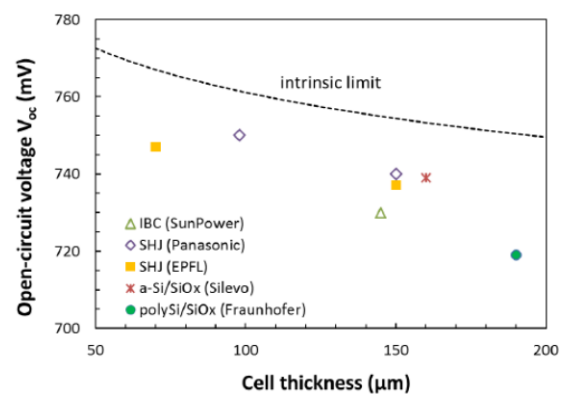


図30 太陽電池の薄型化によるV_{oc}の向上 (Prof. A. Cuevas提供)

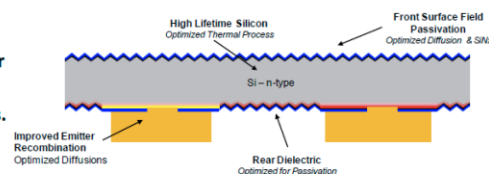
(2) 前回の会議で、結晶Si太陽電池の世界最高効率の更新があったので、紹介する。

(2-1) Sunpowerは、図31に示すように、面積121cm²セルのバックコンタクトセルで、効率25.0% (V_{oc}=730.3mV, J_{sc}=41.22mA/cm², FF=82.96%およびV_{oc}=725.6mV, J_{sc}=41.53mA/cm², FF=82.84%) を実現している。

SunPower 25 % IBC cell efficiency

Wednesday, 11:00, Mile High Ballroom 1EF

- Two external measurements of 25 %.
- Both tested at Fraunhofer ISE cal-lab.
- SunPower Gen III process.



Area	Voc (volts)	Jsc (mA/cm ²)	FF	Efficiency (%)	Note
121 cm ² (ap)	730.3	41.22	82.96 %	25.0 %	January 2014
121 cm ² (ap)	725.6	41.53	82.84 %	25.0 %	Feb 2014, DLAR

図 3 1 Sunpowerの効率25.0%のバックコンタクトセルの構造と特性
(Dr. R. Swanson提供)

(2-2) パナソニックは、前回会議で、世界最高効率25.6%の発表を行った。これまで、UNSWのPERLセル（面積4cm²）の効率25.0%（Voc=706mV、Jsc=42.7mA/cm²、FF=82.83%）が世界最高だったが、15年振りに記録を塗り替え、注目を浴びた。先に、98μm厚の101.8cm²のヘテロ接合（HIT）セルで効率24.7%（Voc=750mV、Jsc=39.5mA/cm²、FF=83.2%）を達成している。パッシベーション効果と薄型化等により、高い開放端電圧Voc=750mVが達成している。24.7%セルの損失分析がなされ、表面電極によるシャドー損、表面a-SiやTCOの吸収損による光損失が約60%、再結合損失約23%、抵抗損失約17%となっている。図 3 2に示すように、バックコンタクト構造の適用をはかり、表面のシャドー損や光吸収損の低減をはかった。a-Si層のパターニング、成長条件の最適化、エレクトロブレーティングによる約40μ厚の裏面金属電極形成、を検討した。図 3 3に示すように、表面a-SiとTCOの吸収損低減による短波長域の量子効率の改善、表面電極のシャドー損の消去により広い波長域での約3%の量子効率の改善がはかられ、77%の光損失の低減がはかられ、Jsc向上につながった。

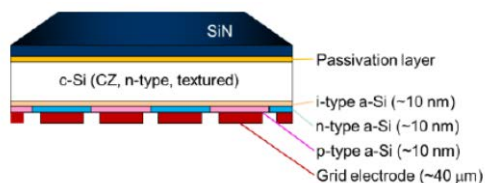


Figure 1: Structure of crystalline silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contact

図 3 2 ヘテロ接合バックコンタクトセルの構造 (K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

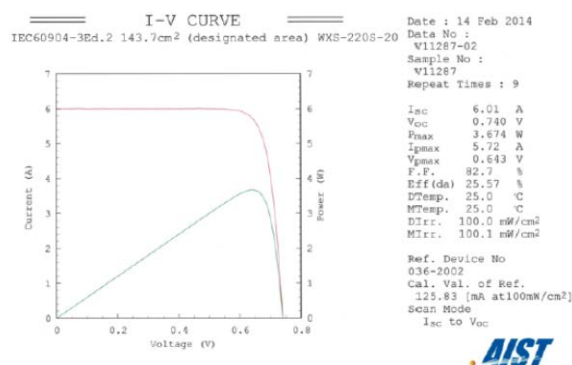


Figure 2: I-V characteristics of 25.6% efficiency solar cell at research level (certified by AIST)

図 3 3 世界最高効率25.6%のヘテロ接合バックコンタクトセルのI-V特性
(K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

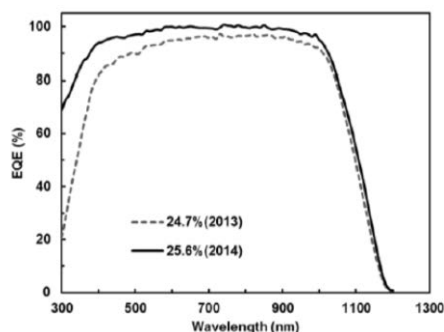


Figure 3: EQE spectra of solar cells with efficiency of 24.7% (dashed line) and 25.6% (solid line)

図 3 4 24.7%セルと今回の25.6%の外部量子効率の比較 (K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

表 5 24.7%セルと今回の25.6%の特性の比較 (K. Masuko et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

Table 1: Progress in cell parameters

Year	2013	2014	Improvement
Area [cm ²]	101.8	143.7	
Thickness [μm]	98	150	
Voc [V]	0.750	0.740	-1.3%
Jsc [mA/cm ²]	39.5	41.8	+5.8%
F.F. [%]	83.2	82.7	-0.6%
E _{ff} [%]	24.7	25.6	+3.6%

図 3 3 に、世界最高効率25.6%のヘテロ接合バックコンタクトセルのI-V特性を示す。150 μm厚の143.7cm²のヘテロ接合バックコンタクトSi (CZ成長n-Si) セルで、効率25.6% (Voc=740mV、Jsc=41.8mA/cm²、FF=82.7%) の世界最高効率が達成された。図 3 4、表 5 には、24.6%セルと今回の25.6%の特性の比較を示す。24.7%セルに比べて、Vocが1.3%、FFが0.6%下がったが、Jscは5.8%改善され、効率3.6%の向上につながった。

(2-3) シャープは、前回会議で、世界第二位の効率25.1%に関する成果を発表した。ヘテロバックコンタクト (HBC) セルは、25%以上の高効率化を達成できる構造と期待される。バックコンタクト (BC) 構造により、表面電極のシャドー損失の削減による高Jscが、ヘテロ接合により、良好な表面パッシベーションによる高Vocが可能である。シャープでは、2003年から、BCセルの研究開発を開始し、2011年から、生産を開始している。

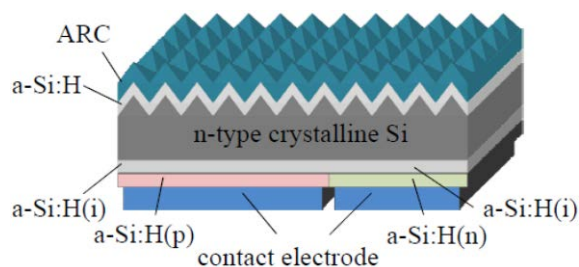


Fig. 1. Structure of HBC cell.

図 3 5 HBCセルの構造 (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

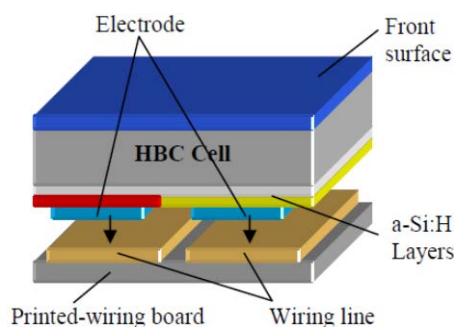


Fig. 2. Schematic configuration of SMT concept.

図 3 6 SMT (Surface-Mount Technology) のコンセプト (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

図 3 5 は、HBCセルの構造を示す。CZ成長n-Si(100)基板を用いた。片面は、アルカリ処理によるテクスチャ形成、表面クリーニングの後、PE-CVDを用いたa-Si層堆積がなされる。a-Si/c-Si界面特性、a-Si層のパターニングに関して、検討がなされた。I-V特性測定には、図 3 6 に示す、SMT (Surface-Mount Technology) が用いられた。図 3 7 は、HBCセルのI-V

特性を示す。表 6 には、HBC構造セルの特性を示す。効率25.1% ($V_{oc}=736\text{mV}$ 、 $J_{sc}=41.7\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=81.9\%$ 、 $V_{oc}=729\text{mV}$ 、 $J_{sc}=42.0\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=82.0\%$) が得られている。さらなる高効率化は、可能と結んだ。

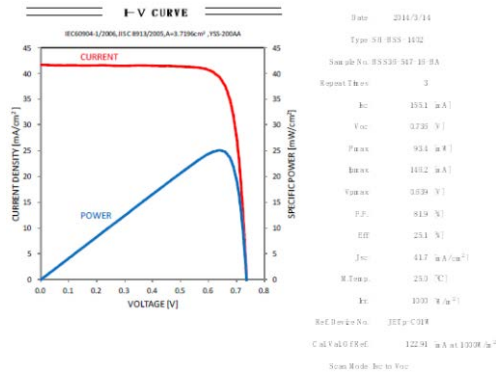


Fig. 3. IV curve of the HBC structure cell.

図 3 7 HBCセルのI-V特性 (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

表 6 HBC構造セルの特性 (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

Table I IV parameters of the HBC structure cell				
No.	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{mV})$	FF	Efficiency(%)
1	41.7	736	0.819	25.1
2	42.0	729	0.820	25.1

Note. Aperture area: $19.3\text{mm} \times 19.3\text{mm}$ (3.713cm^2).
Measured at AM1.5, $1000\text{W}/\text{m}^2$, 25°C by JET

(3) W. Dengら (Trina Solar) は、“20.7% Efficient PERC Solar Cells on p-Type Multi-Crystalline Silicon Substrate”と題して、Trina Solarにおけるp型多結晶SiによるPERC構造太陽電池で、効率20.76%の発表があったが、5.9の同社のDr. P. Verlindenの講演の項を参照されたい。

5.5 アモルファス、ナノ／マイクロ結晶薄膜Si太陽電池分野：

(1) E. Hamers (HyET Solar) は、“The Future of Thin Film Silicon Solar”と題して、プレーナリ講演を行った。薄膜Si PVは、BIPVに適したものとして期待されているが、昨今のPV市場の急激な成長に対応できなくなっている。課題は、言うまでもなく、効率向上、光劣化抑制、コスト低減である。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 7 に、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を示す。a-Siセル、 $\mu\text{c-Si}$ セルの最高安定化効率は、 1cm^2 程度の小面積セルで、各々、10.2%、11.8%で、AISTによる。Kanekaは、a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ 2接合タンデムの小面積セル (0.962cm^2)、サブモジュール (14.23cm^2) の安定化効率、各々、12.3%、11.7%を以前、達成している。小面積セルの最高安定化効率は、EPFLによる12.6%である。Hanenergyは、a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ 2接合タンデムの $1245\text{mm} \times 635\text{mm}$ モジュールの初期効率12.8%、安定化効率11.1%を実現している。TELは、 $1100\text{mm} \times 1300\text{mm}$ モジュールで、安定化効率11.7%を達成しており、12%以上も可能で、効率13%も期待できるとしている。

a-Siセルの劣化抑制やバンドギャップの最適化、ARコーティング、表面テクスチャーやlight trapping、裏面反射、透明導電膜の光吸収抑制、導電率向上 (高移動度IPCVD-ZnO) やナノインプリントグラステクスチャに関する検討が述べられた。高スループットG5のVHF-CVD装置開発 (成膜速度 $2.3\text{nm}/\text{sec}$ で、 $\text{uniformity} < \pm 8.5\%$) も紹介された。TELは、

a-Si/ μ c-Si 2 接合タンデムの1100mmx1300mmモジュールで、安定化効率11.7%を達成しており、12%以上も可能で、効率13%も期待できるとしている。現在、安定化効率10.5%の151Wモジュールが生産されているが、安定化効率11.7%、12.4%、13.1%で、各々、出力167W、177W、188Wの大出力モジュールの生産が可能としている。当面、roof-tileなど、roof-top市場、シースルーモジュールを適用対象としているとの事である。

課題は、モジュールの安定化効率15%以上、CVDコスト低減、スループット、yield、a-Siの光劣化抑制、などである。

表 7 高効率 a-Si および μ 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	16.36	896	69.8	10.2	AIST
a-Si	16.75	886	67.8	10.10	TEL Solar
μ c-Si	29.39	548	73.1	11.8	AIST
μ c-Si	26.55	549	73.3	10.69	EPFL

(2) 会議のハイライトで、H. Saiら(AIST)が、a-Si:H/nc-Si:H/nc-Si:H 3 接合タンデム太陽電池で、効率13.6%の世界最高効率を達成した事が紹介された。H. Saiらは、“High-Efficiency Thin-Film Silicon Solar Cells on Honeycomb Textures”の発表論文に対して、Outstanding Technical Achievement Awards を受賞した。

5.6 有機太陽電池分野：

(1) H. Snaith(Univ. Oxford)は、“From Nanostructured to Thin-film Perovskite Solar Cells”と題して、プレーナリ講演を行った。最近、ペロブスカイト太陽電池がトピックスとなり、多くの研究者、技術者が参入している。1839年のロシアの鉱物学者により発見されたCaTiO₃に代表されるペロブスカイトの結晶構造の紹介の後、溶媒(DMF)中でのCH₃NH₃I+PbI₂(PbCl₂)の形成プロセス、二段階堆積法、dual-source thermal evaporationなどの形成方法が紹介された。今日、ペロブスカイト太陽電池に用いられているCH₃NH₃PbI₃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)、 $\epsilon \sim 6.5$ 、移動度(電子7.5cm²/Vs、正孔12.5~66cm²/Vs)などの物性についても述べられた。励起子の

結合エネルギーは、5~16meVであり、無機系太陽電池の様相を示す。2009年の効率3.8%から最近の効率20.1%の変遷、最近の研究開発の状況が述べられた。

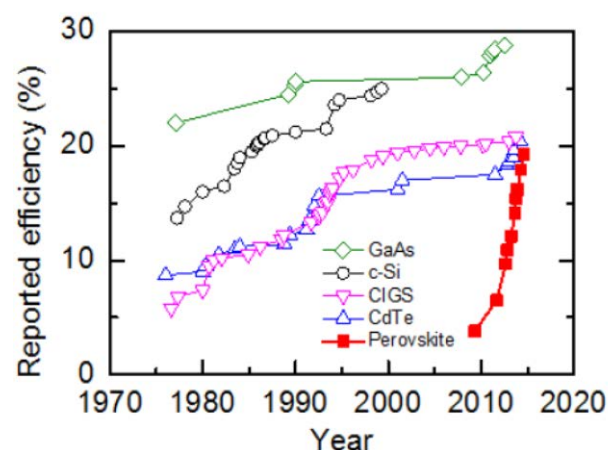


図 3.8 ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷と他の太陽電池の効率変遷

(29th EU-PVSEC会議ハイライト：

Dr. A. Jaeger-Waldau提供)

図38に、ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷を示す。2009年に、宮坂らのグループが、色素増感太陽電池のsensitizerとして、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ を導入し、効率3.8%を得たのが最初である(A. Kojima et al., J. Am. Chem. Soc. **131**, 6050 (2009).)。mesoporous金属酸化物として、 TiO_2 の代わりに、 Al_2O_3 が提案されているが、高効率は達成されていない。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ 構造では、効率12.8%が得られ、プレーナ構造も検討され、Graetzelのグループは、効率15.45%を得ている。その後、Seokのグループは、効率17.9%が実現し、UCLAのグループは、効率19.3%を得ている。公認されている最高効率は、KRICTによる効率20.1% (面積 0.0955cm^2 、 $V_{oc}=1.059\text{V}$ 、 $J_{sc}=24.65\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=77.0\%$)、NIMSによる効率15.0% (面積 1.017cm^2 、 $V_{oc}=1.090\text{V}$ 、 $J_{sc}=20.61\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=66.8\%$) である。ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池にもアプローチしており、効率21.3% (面積 0.7cm^2 、 $V_{oc}=1.80\text{V}$ 、 $J_{sc}=16.0\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=74\%$) を得ていると述べた。企業との共同研究開発なので、詳細は言えないとの事である。課題は、ヒテリシス特性などの不安定性、膜厚を厚くした場合の直列抵抗による曲線因子低下、構造不安定性、熱的不安定性、湿気感受性や紫外光耐性、などである。

5.7 宇宙用太陽電池分野：

B. R. Spence (Deployable Space Systems Inc.) は、“Flexible Blanket Array: Next-Generation Game-Changing Technology” と題して、プレーナリ講演を行った。多接合太陽電池の最適化により、やや重量のかさむカーボンコンポジットハネカムを用いているが、リジッド太陽電池アレイは、重量比出力 $75\text{W}/\text{kg}$ (BOL)、体積比出力 $10\text{kW}/\text{m}^3$ に達している。NASAやDODの次世代ミッションは、重量比出力、体積、高出力、強度、軽量、剛性や価格の面で、先端的な太陽電池アレイを要求している。Solar Electric Propulsion (SEP) ミッションは、上記仕様要求に加え、高電圧で動作し、広範な宇宙環境や誘起されるプラズマ環境にも適用できることが求められている。フレキシブルブランケットを組み入れた太陽電池アレイが開発され、重量比出力 $120\text{W}/\text{kg}$ (BOL) 以上、体積比出力 $30\text{kW}/\text{m}^3$ 以上が達成されている。講演では、過去、現在のフレキシブルブランケット太陽電池アレイ技術の企業の取り組みが紹介された。

5.8 キャラクターゼーション：

前回会議では、B. Michiら (FhG-ISE) は、“Luminescence imaging for quantitative solar cell analysis” と題して、プレーナリ講演を行った。結晶シリコン太陽電池、結晶、モジュールの研究開発や製造段階で、フォトルミネッセンス (PL) が広範囲に使われるようになっていく。本講演では、多結晶Si太陽電池を例にして、損失解析にPL等イメージング技術が有効であることを示している。①バルク再結合損失 (約30%の損失) の解析には、PLイメージングが有効で、メタステーブル欠陥 (Fe_i 、 B_i 、 Cr_i 、 O_i) のイメージングにも有効で、バルクキャリア寿命や太陽電池効率との関連も検討されている。また、原料、るつぼの純度やドーパント (伝導型) の影響も検討されている。②表面再結合損失 (約20%の損失) の解析には、吸収深さは、量子効率、波長依存PL、FS/BS法 (表面および裏面評価) が、再光吸収は、エレクトロルミネッセンス (EL) /PLイメージングが、注入依存性は、飽和電流密度 J_0 イメージングが、用いられている。今回、FS/BS法が紹介された。実効キャリア寿命が両

面で評価され、Cz-Siや多結晶Siの表面、裏面再結合速度が求められている。③光損失（約40%の損失）の解析には、spectrally resolved light-beam induced current (SR-LBIC) 法が用いられ、短絡電流密度 J_{sc} マッピングがなされ、I-V特性による値との比較もなされている。④直列抵抗 R_s 損失（約5%の損失）の解析には、PLイメージングが用いられ、 R_s マッピングと暗電流マッピングができ、曲線因子FF損失に変換されている。I-V特性から求まるFF損失および効率損失と比較されている。⑤シャント損失（約5%の損失）の解析には、dark lock-in thermography (DLIT) が用いられ、種々の電圧でのDLITイメージと局所I-V特性から得られる開放端電圧 V_{oc} およびFFマッピングとの比較がなされている。全ての損失を評価する完全な方法はないが、個々の損失を評価する（完全な）方法はあると結んだ。

5.9 モジュール、製造、システム、応用分野：

P. J. Verlinden (Trina Solar) は、“Challenges and Opportunities of High-Performance Solar Cells and PV Modules in Large Volume Production” と題して、プレーナリ講演を行った。高性能PVコンポーネントの開発は、電力コスト低減に必須である。PVコンポーネントの効率向上は、energy yieldに加え、材料消費、資本的経費、製造コスト、BOSコスト、輸送および設置コスト、kWp当たりのメンテナンスコストに顕著なインパクトを持つ。しかしながら、企業環境における高効率色の実行は、長期間を要し、企業のR & D、技術開発に、実験と理論研究のより良い統合、良いクリーンルーム、装置設計や改良ウエハ操作技術を含む新しいアプローチを必要とする。本講演では、まず、図39、図40に示すように、結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールの高効率化の進展と今後の予想が述べられた。2020年における結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールの効率予想もなされ、p-PERC、mono-Si、CIGS、CdTeで、各々、モジュール効率19.6%、18.6%、17.9%、17.0%、16.8%になるだろうとの事である。

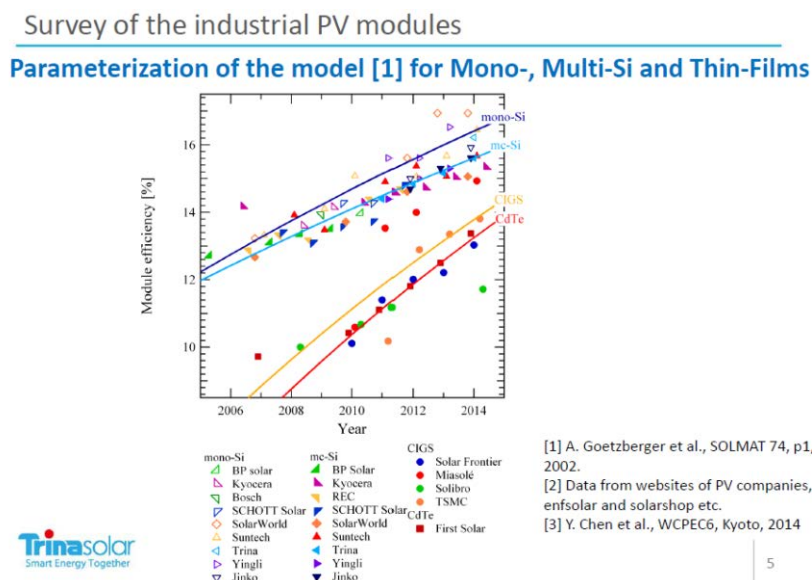
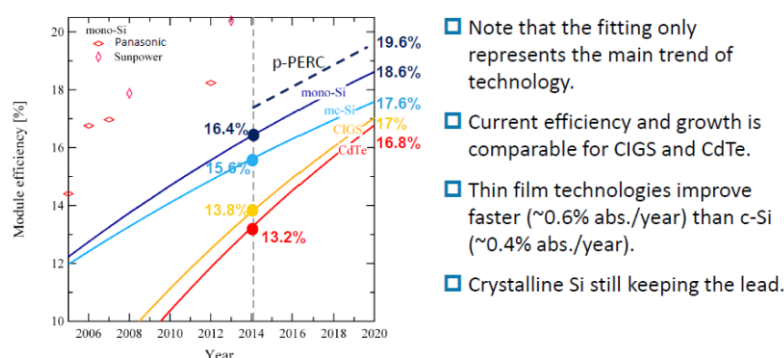


図39 結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールの高効率化の進展 (Dr. P. Verlinden提供)

また、図41、図42に示すように、結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールの低コスト化の進展と今後の予想、が述べられた。

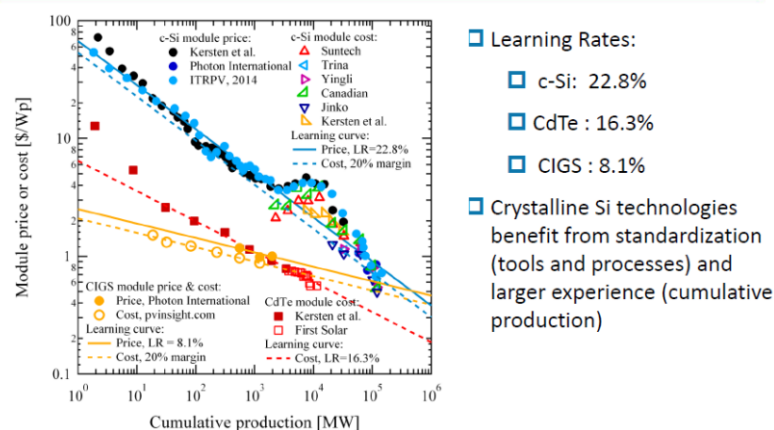
Modeling of module efficiency



- [1] A. Goetzberger et al., SOLMAT 74, p1, 2002.
 [2] Data from websites of PV companies, enfsolar and solarshop.com
 [3] Y. Chen et al., WCPEC6, Kyoto, 2014

図 4-0 結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールの高効率化の今後の予想
 (Dr. P. Verlinden提供)

Cost of PV modules



- [1] Kersten et al., 26th EUPVSEC, p4697, 2011.
 [2] Photon International, 2011-2014
 [3] ITRPV 2014, <http://www.itrpv.net/>
 [4] Cost data from financial reports of various companies
 [5] Verlinden et al. 29th EUPVSEC, 2013

図 4-1 結晶Si、薄膜太陽電池モジュールの低コスト化の進展 (Dr. P. Verlinden提供)

Cost of PV modules (Projection to 2020)

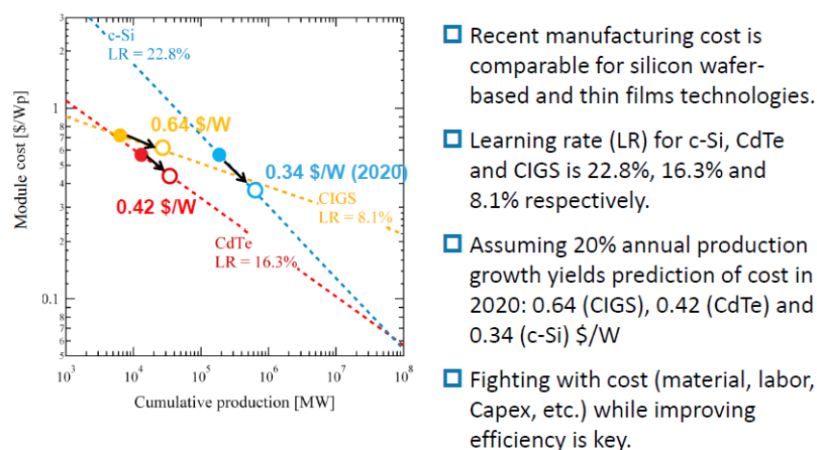


図 4-2 結晶Si、薄膜太陽電池モジュールの低コスト化の今後の予想 (Dr. Verlinden提供)

2020年における結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールのコスト予想もなされ、結晶Si、CIGS、CdTeで、2014年の各々、モジュールコス0.56\$/W、0.76\$/W、0.58\$/Wから、2020年には、各々、モジュールコス0.34\$/W、0.64\$/W、0.42\$/Wになるだろうとの事である。

次いで、光トラッピング構造を含む新しいPVモジュールの概念や新しい高信頼性両面ガラスモジュールに加え、高効率結晶Si太陽電池の開発が述べられた。p型i-PERC単結晶、多結晶Si太陽電池のチャンピオン効率は、各々、21.40%（面積244.11cm²、Voc=672.1mV、Jsc=39.65mA/cm²、FF=80.31%）、20.76%（面積243.89cm²、Voc=662.6mV、Jsc=39.03mA/cm²、FF=80.26%）に達した。ハーフセルと光トラッピング技術を含む60枚の単結晶i-PERC6インチセルから成る高出力PVモジュールは、出力335.2Wに到達した。6インチInterdigitated Back Contact（IBC）セルのチャンピオン効率は22.9%（面積239.31cm²、Voc=683mV、Jsc=41.58mA/cm²、FF=80.6%）に達し、60枚のIBCモジュールは、出力320.4Wの状況である。両面ガラスモジュールは、マイクロクラック形成やPotential Induced Degradation（PID）への耐性を実証している。PID試験では、85℃-85%R.H.環境で、1000Vバイアスで、表面は、両面Cu箔つきで、600時間での耐性が改善されている。両面ガラスモジュールの使用は、メンテナンスの改善に加え、日射不整合やpartial shading等のモジュールへの影響を低減でき、PVシステムのエネルギー効率を向上させるとの事である。図43に示すように、今後の結晶太陽電池の高効率化技術の展望が述べられ、タンデム構造で、効率27%、モジュール出力385Wを狙いとしている。

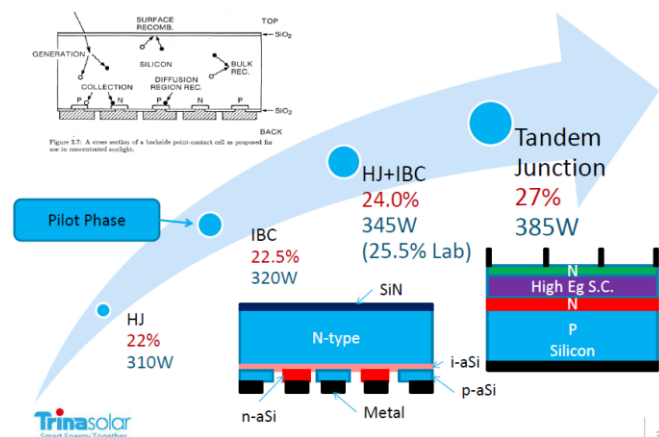
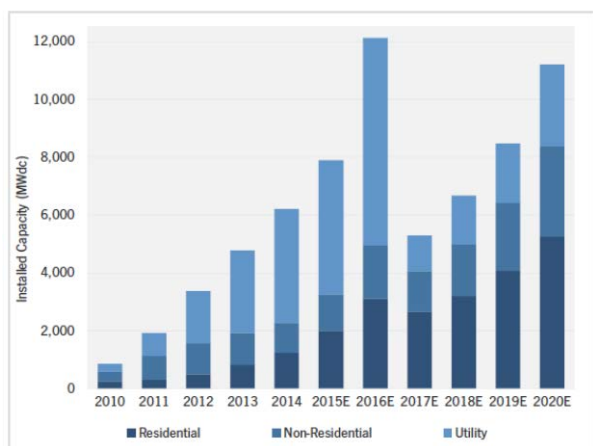


図43 今後の結晶太陽電池の高効率化技術の展望(Dr. Verlinden提供)

5.10 政策、市場、普及分野：

(1) R. Margolis (NREL) は、“US PV market development trends：Where we are today and where we are going”と題して、プレーナリ講演を行った。B. Jones-Albertus (DOE) は、“A Changing Vision for U.S. PV Research”と題して、特別講演を行った。

米国市場は、図44に示すよう、住宅用、商用、電力用の全ての市場で進展し、図45に示すように、米国における市場毎の平均システムコストも低減しつつある。講演では、最近の進展、これらの市場での価格変動を述べ、顕著な傾向を議論した。米国のPV市場の短期的、長期的成長の可能性を探った結果が述べられた。



Source: GTM Research

図 4-4 米国のPV設置の進展と予想

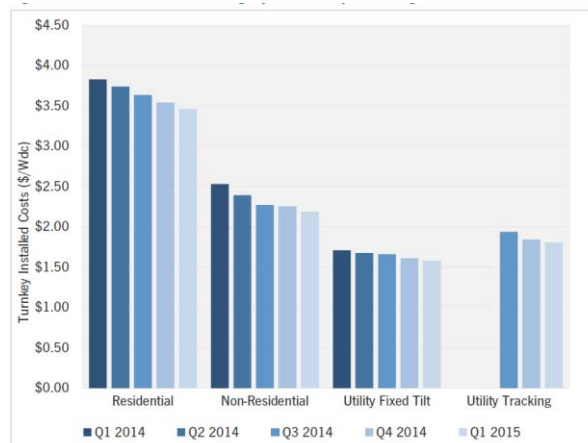


図 4-5 米国における市場毎の平均システムコストの変化 (GTM RESEARCH)

2011年に、DOEによるSunShotプログラムがスタートし、図4-6に示すように、2010年のシステムコスト\$3.8/Wから、2016年の\$2.2/W、さらに2020年の\$1/Wを目指すとしている。これは、5~6セント/kWhに等価である。従って、モジュールコストも\$0.5/Wの達成を目指す。図4-7は、モジュールコスト\$0.5/W、システムコスト\$1/W実現のための施策を示す。モジュールコスト\$0.5/Wの達成のためには、理論効率に近い変換効率の高い太陽電池の開発、セル製造コストの低減、30年以上も特性維持する長寿命が要求される。図4-8には、種々の太陽電池技術に関して、現行の製造モジュールの効率、研究室レベルのセル効率、理論効率を示す。図4-9には、コストターゲット達成のための研究開発ターゲットと線表を示す。研究開発対象として、単結晶・多結晶Si、CIGS、CdTe、III-V族多接合太陽電池がある。有機・色素は、まだ、性能、寿命の点で課題が多く、NSF等の基礎研究フェーズである。

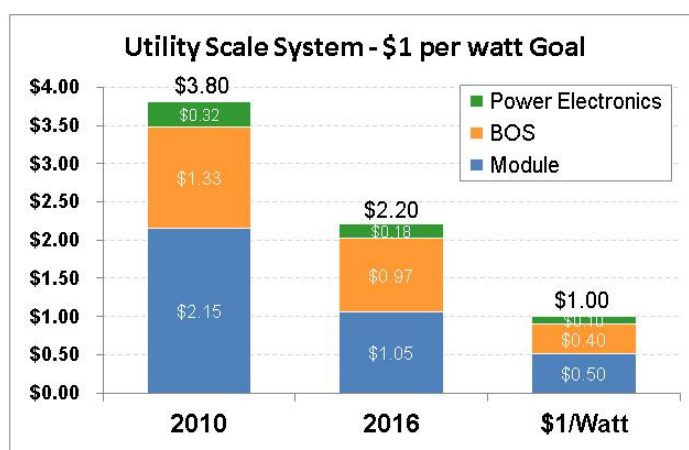


図 4-6 SunShotプログラムのシステムコスト目標
(モジュールコスト、BOSコスト、パワーエレクトロニクスコスト)

Fundamental Targets for \$1.00/Wp Initiative

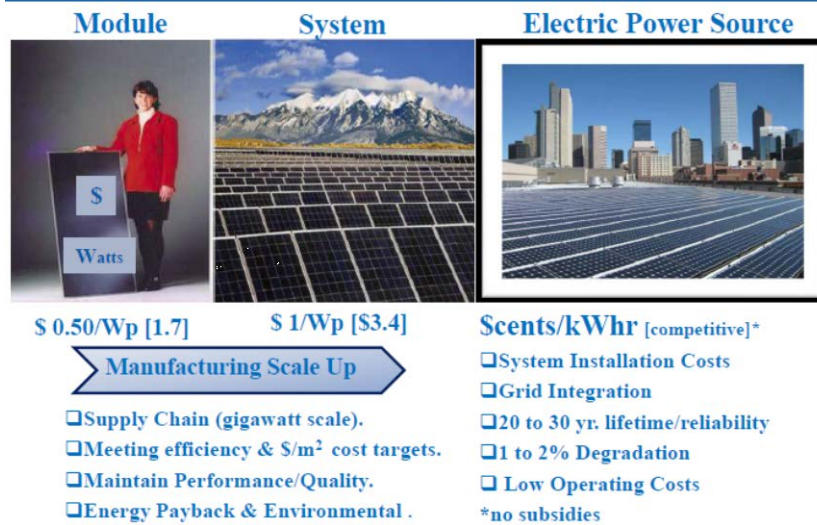


図 4 7 モジュールコスト\$0.5/W、システムコスト\$1/W 実現のための施策

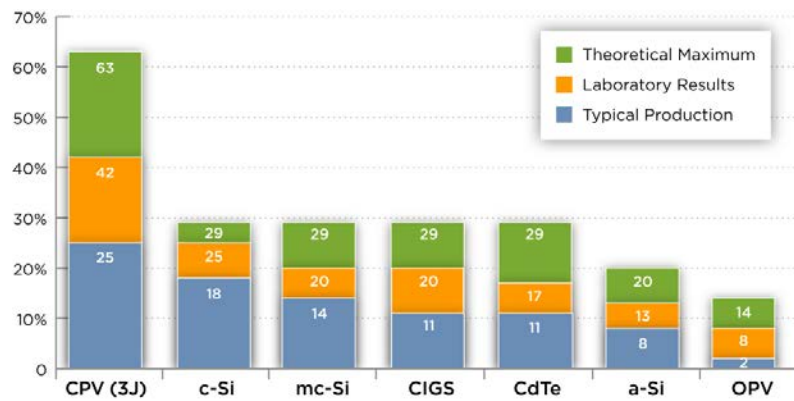


図 4 8 種々の太陽電池技術に関する、現行の製造モジュールの効率、研究室レベルのセル効率、理論効率

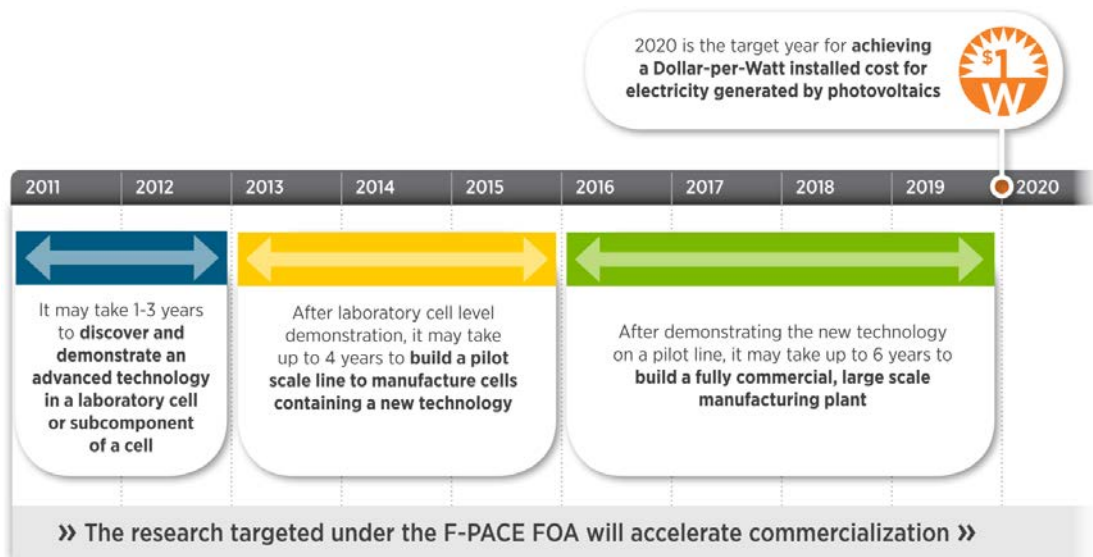


図 4 9 コストターゲット達成のための研究開発ターゲットと線表

Figure 3-1. Annual and Cumulative Installed Capacity for Rooftop PV, Utility-Scale PV, CSP, and All Solar Technologies

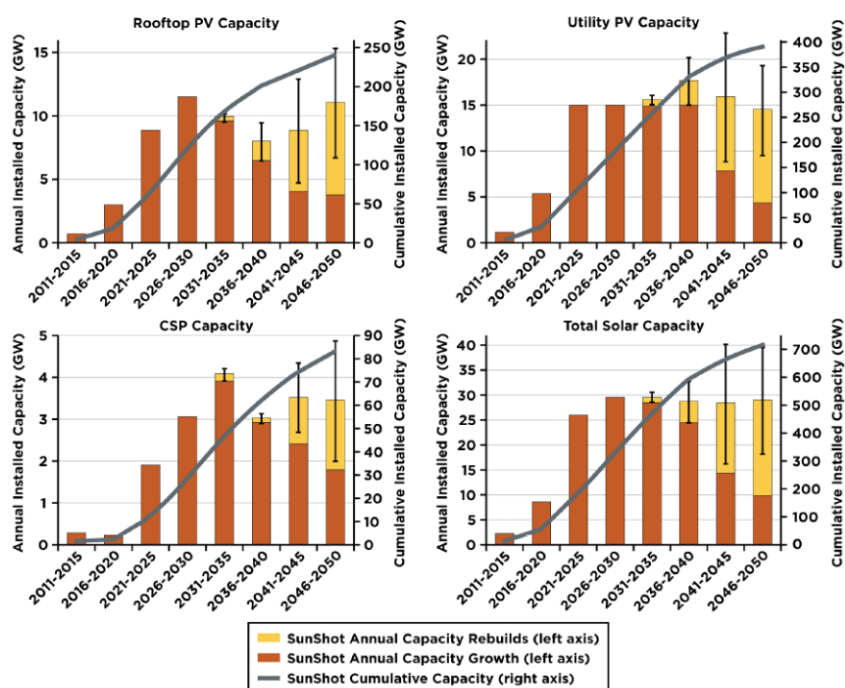


図 5 0 米国におけるPV、CSPおよび総計の単年度、累積導入量の予測 (DOE、SunShot Vision Study, DOE/GO-102012-3037, 2012.2)

Figure 1-10. Annual Electric-Sector CO₂ Emissions under the SunShot and Reference Scenarios

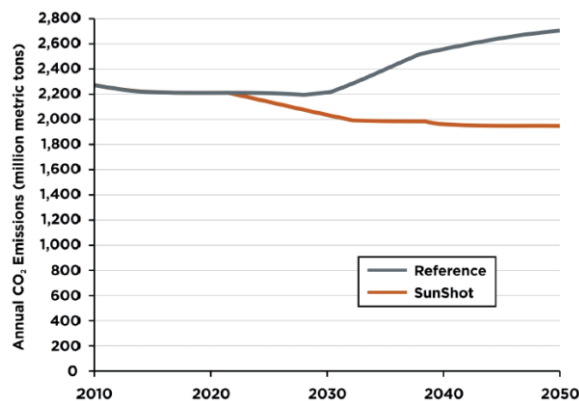


図 5 1 米国におけるCO₂放出量のSunShotシナリオの削減効果 (DOE、SunShot Vision Study, DOE/GO-102012-3037, 2012.2)

SunShot価格低減目標の達成の道程、障壁、予想、結果としての市場浸透レベルを検討したSunShot Vision Studyを含む長期予想を述べた。SunShot Vision Studyによれば、もしSunShot Initiativeのターゲットが達成されると、図 5 0 に示すように、太陽エネルギーは、2030年、2050年までに、各々、330GW (PV302GW、CSP28GW)、715GW(PV632GW、CSP83GW)が導入され、各々、14%、27%の米国電力需要を満たすことになる。結果として、PVは、図 5 1 に示すように、2050年に、炭素放出を28%減少できることになる。また、太陽光エネルギー関係の雇PV4.5万人、CSP. 45万円用は、2010年の5.1万人 (PV4.5万人、CSP0.45万円)

から、2030年の34.3万人（PV28万人、CSP.45万円）、2050年の44.4万人（PV36.34.3万人（PV28万人、CSP.45万円）328万人、CSP.45万円）PV4.5万人、CSP.45万円と、増加することが予想されている。送電網の拡充、環境、土地使用、系統統合、大規模製造、投資などの課題がある。多くの課題はあるが、SunShot価格低減目標の達成は、太陽エネルギー技術が、次の20年、40年後には、米国の発電システムに顕著な貢献をすることが可能となろう。

（2）Special Sessionとして、“International Cooperation”の特別セッションが企画され、約450名の参加者があった。前半は、NEDO、NREL、NSF、インド代表から4件のプレーナリ講演がなされた。

（2-1）H. Yamada（NEDO）は、“Overview of Photovoltaic R&D in Japan and International Activities of NEDO”と題して、プレーナリ講演を行った。

（2-2）G. Wilson（NREL）は、“Advancing of PV as a Climate Change Mitigation Tool: The Need for Greater International Collaboration”と題して、プレーナリ講演を行った。

（2-3）E. Abed（NSF）は、“NSF International Activities and Opportunities in Solar Energy Research”と題して、プレーナリ講演を行った。

（2-4）A. Contractor（Kiran Energy）は、“India with Recent Large Scale PV Installations - Learnings and Experiences”と題して、プレーナリ講演を行った。

（2-5）後半は、オーガナイザーであるM. Yamaguchi（豊田工大）、S. Ringel（OSU）の司会のもと、上記4名のプレーナリ講演者に加え、R. Walters（NRL）、A. Bett（FhG-ISE）がパネリストに加わり、写真1に示すように、“International Cooperation”に関する活発なパネル討論がなされた。



写真1 “international Cooperation”に関するパネル討論の様様

図 5 2 に示すように、今回の “international Cooperation” に関するパネル討論のまとめがなされた。

Summary

- * **Importance and Effectiveness of International Collaboration for Development of High Performance, Low Cost and Highly Reliable PV Materials, Cells, Modules and Systems**
ex) NSF Programs, E. Abea, DOD Programs, R. Walters, NGCPV Project, A. Bett, International PVQAT, S. Kurtz, NREL-FhG-ISE-AIST Cooperation, H. Yamada, G. Wilson
Establishment of International Standards, ex) G. Wilson, S. Kurtz
Individual International Collaboration, ex) M. Yamaguchi
- * **Importance of International Cooperation for Educating Younger Generations and Others for Supporting R&D&D in Developing Countries and Supporting No-Electrified Section**
for Organizing High Quality PV Conferences and Exchanging Information
ex) Continuation of World PV Conference (WCPEC), M. Yamaguchi
- * **Needs for Greater International Cooperation and Collaboration for Advancing PV as a Climate Change Mitigation, ex) G. Wilson for Creation of Future Infra Structures based on Renewable Energies including PV, ex) G. Wilson, ICSU-ISPRES, M. Yamaguchi**

図 5 2 “international Cooperation” に関するパネル討論の様様

5.11 信頼性分野

S. Kurtz (NREL) は、“Quantifying Reliability - The Next Step for a Rapidly Maturing PV Industry” と題して、プレーナリ講演を行った。PVモジュールは必需品になりつつあるが、消費者は、“不良モジュールに遭遇する機会を如何に減らせるか”、“高級モジュールや付加価値を如何に定量化できるか”、“PVシステムが正常に動作していることをどのように確信できるか”といった問いをする。PVQAT (the International PV Quality Assurance Task Force) と連携機関は、こうした全ての疑問に答えるべく、働いている。PVモジュール品質を最少に許容できる標準化法の定義、環境に耐性のある付加価値を提供できるモジュールの差別化、設計から設置や動作にわたるPVシステムの評価プロセス（例えば、IECREを通して）の創製は、タフなタスクであるが、これらの標準化のアプローチは、信頼を高めることになるし、コストも削減でき、やがて、円熟した企業の創立になるだろう。本講演では、国際標準の開発に向けたいくつかの鍵となる取り組み、新試験法の確立に向けた挑戦、寿命予測の標準化を確立するには何が必要か、ついて述べられた。

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 5 3 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が設立された。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。

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

>200 volunteers

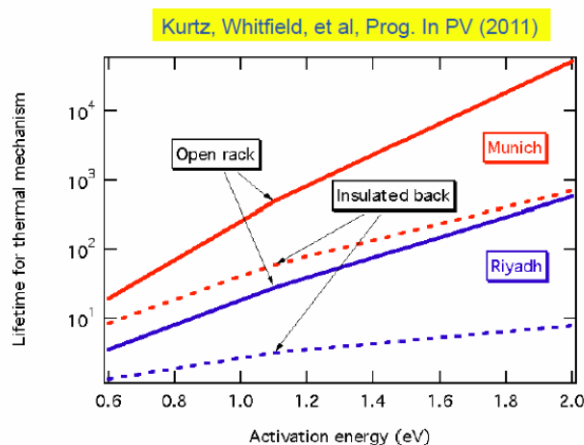
- Task Group 1:** PV QA Guideline for Manufacturing Consistency
(leader Ivan Sinicco)
- Task Group 2:** PV QA Testing for Thermal and mechanical fatigue including
vibration (leader Chris Flueckiger)
- Task Group 3:** PV QA Testing for Humidity, temperature, and voltage
(leaders John Wohlgemuth and Neelkanth 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/ipvmtqa_forum/index.cfm

図 5 3 International PV QA Task Forceの概要 (Dr. S. Kurtz提供)

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 5 4 に示すように、低寿命となるであろう。図 5 4 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)



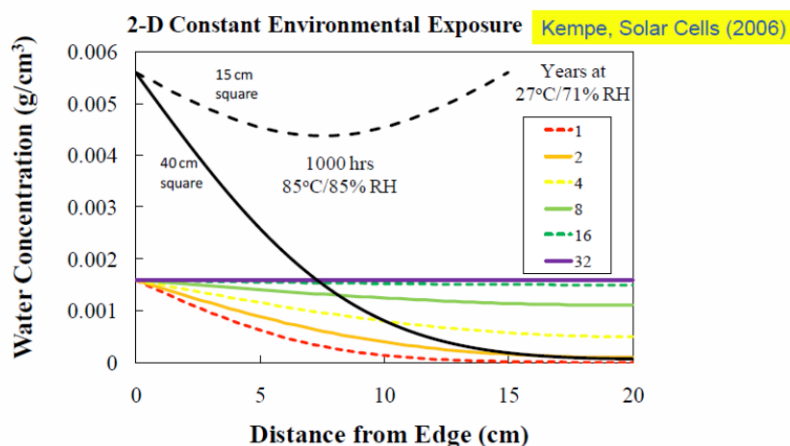
A module that lasts 30 y in Munich might last 1-3 y in Saudi Arabia
Aging rate can vary by a factor of 10 - 1000 depending...

図 5 4 100℃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) (Dr. S. Kurtz提供)

図 5 5 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 5 5 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（Dr. S. Kurtz提供）

6. 感想

前回の会議では、15年振りに、パナソニックおよびシャープが、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、盛り上がった会議の印象であったし、今回の会議では、世界最高効率に関する発表も10件以上あったと紹介された。しかし、今回の会議では、日本企業からの参加者は、少なく、今後が危惧される。今後の太陽光発電の発展や市場拡大のためには、図56に示すように、まだまだ、国の支援が必要と言える。図56は、データは古いが、主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算（研究開発費を含む）との相関を示す。PVの市場拡大とPVに関する国家予算は、線形関係にあり、市場拡大のためには、国の支援がまだまだ必要であり、研究開発のさらなる推進が必要である。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官学連携が必要である。

Correlation between PV budget and PV system installation

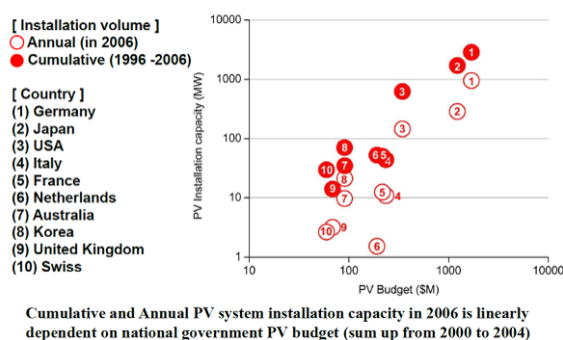


図 5 6 主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算（研究開発費を含む）との相関（ICSU-ISPRES Report）

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。

次回の43rd IEEE PVSCは、2016年6月5日～10日、米国のポートランドで開催予定である。31st EU-PVSECは、2015年9月14日～18日、ドイツのハンブルグで、PVSEC-25は、2015年11月15日～20日、韓国の釜山で、開催予定である。