

## 4 3 回 IEEE 光起電力専門家会議 (43<sup>rd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2016. 6. 13

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日：2015年6月5日～10日

2. 開催場所：Oregon Convention Center (ポートランド、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 Angus Rocket(イリノイ州立大) で、プログラム委員長は Sarah Kurtz (NREL) であった。

今回は、40 カ国から 1,261 名(前回 1,236 名)の参加者があった。今回は、EU-PVSC の開催月が同じで、参加者数減が心配されたが、例年の参加者数となったようである。欧州の参加者の幾人かは、本会議の方が、EU-PVSEC より、クォリティが高いとの印象を持っていた。図 1 に、国別参加者数を示す。国別では、①米国 790 名(前回 716 名)、②日本 73 名(前回 92 名)、③ドイツ 72 名(前回 65 名)、④オーストラリア 47 名(47 名)、⑤オランダ 29 名(21 名)、⑥台湾 26 名(23 名)、⑦中国 25 名(37 名)、⑧インド 24 名(30 名)、⑨英国 24 名(33 名)、⑩フランス 15 名(27 名)、の順であった。

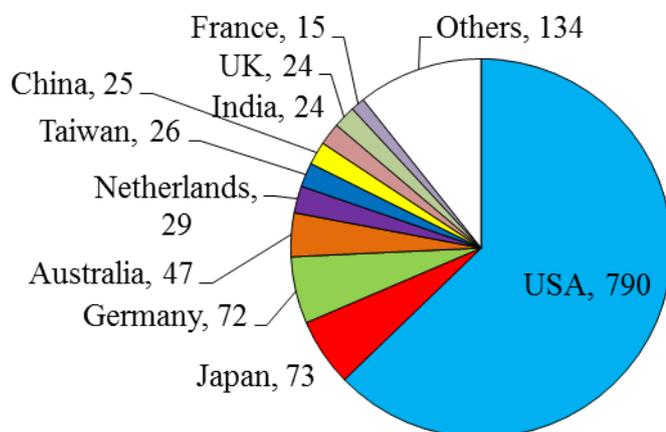


図 1 国別参加者数 (Mr. Adam Kom提供)

図 2 は、国別発表論文件数を示す。40カ国から1038件の論文発表(ここでは、(株)資源総合システム集計の38カ国から、988件の論文発表を引用することとする)があった。国別では、①米国520(前回446件)、②ドイツ64件(前回65件)、③日本63件(前回68件)、④インド40件(52件)、⑤オーストラリア38件(42件)、⑥台湾30件(42件)、⑦オランダ27件(21件)、⑧中国25件(41件)、⑨フランス20件(26件)、⑩韓国19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結晶Si太陽電池177件(前回

138件)、②薄膜化合物系(CIGS、CdTeおよびII-VI族)166件(前回166件)、③基礎および新概念96件(前回113件)、④III-V族および集光87件(101件)、⑤信頼性77件(73件)、⑥太陽電池モジュール、製造、システム応用76件(122件)、⑦キャラクターゼーション72件(92件)、⑧ペロブスカイト、有機太陽電池69件(60件)、⑨パワーエレクトロニクス。系統連系64件、⑩宇宙用太陽電池37件宇宙用太陽電池33件(37件)、⑩政策、市場、普及33件(53件)、⑩日射量測定、予測33件、⑬特別セッション5件の順であった。今回、薄膜Si太陽電池分野は、結晶Si太陽電池分野に併合された。

**Number of Papers to be presented  
at the 43rd IEEE-PVSC  
(Portland, USA, June 5-10, 2016) 988 Papers**

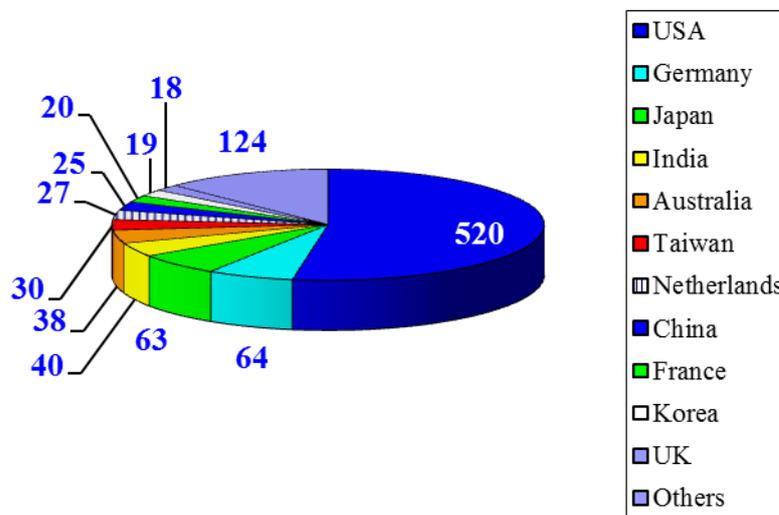


図2 国別発表論文数 ((株)資源総合システム提供)

**Number of Papers to be presented  
at the 43rd IEEE-PVSC  
(Portland, USA, June 5-10, 2016)**

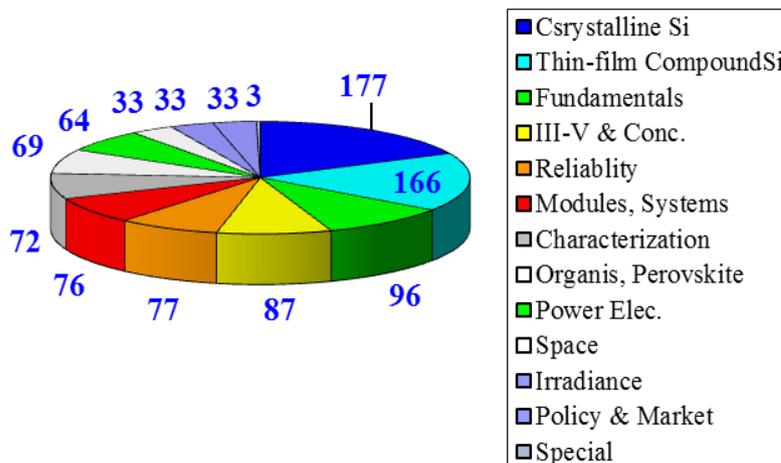


図3 発表論文数の分野別内訳 ((株)資源総合システム提供)

#### 4. Cherry Award受賞者と受賞記念講演

Cherry Award ChairであるK. Emery (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	Dr. Christiana Honsberg 2015

今回の受賞者は、Pierre Verlinden (Trina Solar)で、SunPower 所属時のバックコンタクトセル、集光型セルや Trina Solar での高効率単結晶 Si、多結晶 Si 太陽電池の高効率化への貢献等が評価されたものである。同氏のバックコンタクトセル、集光型セルの高効率化へのアプローチの失敗談、成功談が述べられた。Trina Solar では、スクリーン印刷バックコンタクトセル(面積 238.6 cm<sup>2</sup>)で、効率 23.5% (V<sub>oc</sub>=689.9mV、J<sub>sc</sub>=42.08mA/cm<sup>2</sup>、FF=80.9%)の現状である。今後も、バックコンタクトセルは、高効率化のベースとなろう。Standarization (Tool、材料、プロセス)や国際共同研究や連携の重要性も述べられた。Trina Solar での研究開発については、5.4の結晶 Si 太陽電池分野のプレーナリ講演を参照されたい。

## 5. 本会議のトピックス

プレ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 基調講演：

David Turk (DOE) は、“Accelerating global clean energy research and development under mission innovation” と題して、基調講演を行った。気候変動の抑制は、世界的重要課題で、COP21では、各国のCO2削減目標が提示されている。クリーンエネルギーに関する国際共同研究も重要で、2015.11.30および先週、主要21カ国のリーダーが集まり、Clean Energy Mission Innovationプログラムが議論されている。図4に、クリーンエネルギーに関する投資額の予想を示す。5年間で、総額1500億ドルの投資がなされ、今後5年間でも、毎年300億ドル以上の投資が見込まれる。表3には、各国の研究開発投資分野の内訳を示す。今後は、性能向上、低コスト化に加え、新技術開発が需要で、太陽光発電に期待するとまとめた。

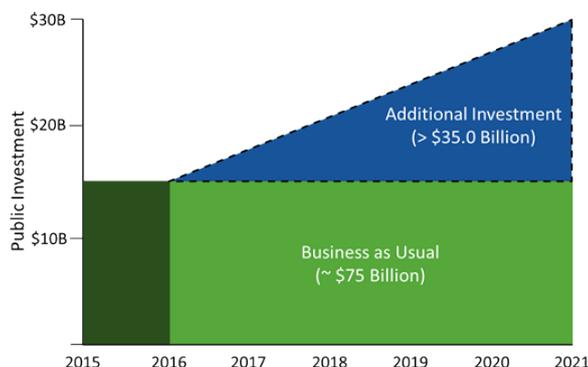


図4 クリーンエネルギーに関する投資額の推移 (Mission Innovation ホームページ)

表3 主要国のクリーンエネルギーの研究開発投資分野 (Mission Innovation ホームページ)

	AUSTRALIA	BRAZIL	CANADA	CHILE	CHINA	DENMARK	EUROPEAN UNION	FRANCE	GERMANY	INDIA	INDONESIA	ITALY	JAPAN	KINGDOM OF SAUDI ARABIA	MEXICO	NORWAY	REPUBLIC OF KOREA	SWEDEN	UNITED ARAB EMIRATES	UNITED KINGDOM	UNITED STATES	
INDUSTRY & BUILDINGS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
VEHICLES & OTHER TRANSPORTATION	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
BIO-BASED FUELS & ENERGY	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SOLAR, WIND & OTHER RENEWABLES	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
NUCLEAR ENERGY	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
HYDROGEN & FUEL CELLS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CLEANER FOSSIL ENERGY	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CO <sub>2</sub> CAPTURE, UTILIZATION & STORAGE	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ELECTRICITY GRID	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ENERGY STORAGE	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
BASIC ENERGY RESEARCH	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Indicators are for key areas of R&D investment, but do not imply a comprehensive representation of a country's full R&D portfolio.

## 5.2 基礎、新材料・デバイス分野：

Victor Klimov (Los Alamos National Lab.) は、“Engineered quantum dots in solar energy conversion: Photovoltaics and beyond” と題して、プレーナリ講演を行った。各種コロイダル量子ドット (QDs) の特性と応用の可能性が述べられた。溶液ベースのプロセスにより CdSe-QDsのサイズ2.1~7.5nmが作製でき、青~赤の色調節が可能で、サムソンのTVに用いられているとの事である。Luminescent Solar Concentrators (LSCs) の検討例も紹介された。フレキシブルなPV壁板、半透明なPV窓等への応用が可能との事である。この他、InP-QDs、CIGaSeS/ZnS-QDs、CdSe/CdS-QDsの特性も報告された。量子ドット太陽電池の進展も紹介された。最初の量子ドット太陽電池は、CdSe-QDsで、2008年にショットキ接合、2010年にpn接合構造で、効率11.3%、2013年には11.6%となっているとの事である。単一光子によるマルチエキシトン生成 (Multi-Exciton Generation: MEG) 効果にも言及した。マルチエキシトン生成の閾値光子エネルギーは、バルクの7.5eVに対して、コアシェル、ナノ結晶、QDs構造で、各々、2eV、2.3eV、2.5eVで、量子ナノ構造の効果が見られている。

## 5.3 CIGS、CdTe、II—VI化合物薄膜セル分野：

(1) Ingrid L. Repins ら (NREL) は、“Wild band edges: The role of bandgap grading and potential fluctuations in making high-efficiency chalcogenide devices” と題して、プレーナリ講演を行った。CdTe、CIGS で、各々、22.1%、22.3%の世界効率が更新されているが、不可思議な事が多い。①Eg グレーディングの効果については、裏面再結合の抑制と考えられていた。Eg グレーディングなしでも、効率17%と20%のセルをEBIC測定で比較すると、各々、0.2 $\mu$ m、8 $\mu$ mであり、Eg グレーディングは、必要ないようにも思う。Eg グレーディングは、良い電子 reflector となっているのでは、ないだろうか。②バンド端の fluctuation も、課題である。V<sub>cu</sub>によるバンド Tail Transition が観測され、Ga ドープによる伝導帯の Tail Transition が言及された。バンド端の fluctuation により、100mV 程度の Voc 減があるとの事である。これまで、プロセス制御、コンタクト、少数キャリア寿命に注力していたが、front graded、back electron-reflector が重要であると述べた。③20.7% CIGS セルのケーススタディについては、KF-PDT 効果による、フォトルミネセンス (PL) ピークの変化を述べた。バンド端発光~1.11eV、浅い準位の発光~1.00eV は、KF-PDT 処理前後で、大きな変化はないが、深い準位に起因する発光~0.95eV は、KF-PDT 処理により、発光強度は減少する。④CdTe セルについても、言及された。CdTe の少数キャリア寿命  $\tau$  は増加し続け、Voc も向上している。 $\tau$ 、Voc は、1997年2000年、2013年、2015年で、各々、0.05ns、610mV、03ns、720mV、2ns、850mV、10ns、900mV と、向上し続けている。効率も、松下の1997年の効率16.0%から、NRELの2004年の16.5%、GEの2012年の18.3%、First Solarの2015年の21.5%と進展している。粒界のCIによるパッシベーション効果が指摘されている。⑤CZTS系では、各種欠陥の形成エネルギーが低いことが、高効率化のネックとなっている。この他、新材料 Cu<sub>2</sub>SnSe<sub>3</sub>、CuSbQ<sub>2</sub>(Q=S、Se)、も紹介された。

(2) Rui Kamada ら (Solar Frontier) は、“New world record Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> thin film solar cell efficiency beyond 22%” と題して、Extended Oral 講演を行った。これまで、Cd フリーバッファ層、表面 S-rich、裏面 Ga-rich の二重 Eg 傾斜層、ZnO:B 窓層の検討により、高 Jsc

化をはかり、2014年には、効率20.9% ( $V_{oc}=686\text{mV}$ 、 $J_{sc}=39.9\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=76.5\%$ )を実現している。今回は、高 $V_{oc}$ 化のアプローチを報告した。光吸収層のK-PDT処理とアニールの予備検討がなされ、処理なしの $V_{oc}=665\sim 683\text{mV}$ から、 $695\sim 705\text{mV}$ に改善されている。

(Zn, Mg)Oの第二バッファ層の $E_g$ 調節もなされ、高 $V_{oc}$ 、高 $J_{sc}$ を目指している。図5に示すように、面積 $0.51\text{cm}^2$ のCdS/ZnO二重バッファ層およびZ(O, S, OH)/(Zn, Mg)O二重バッファ層Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>ルで、各々、効率22.3%、22.0%の世界最高効率が達成されている(FhG-ISE認定)。また、自社測定ではあるが、CdS/ZnO二重バッファ層およびZ(O, S, OH)/(Zn, Mg)O二重バッファ層Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>ルで、各々、効率22.7%、22.8%も得ているとの事であった。

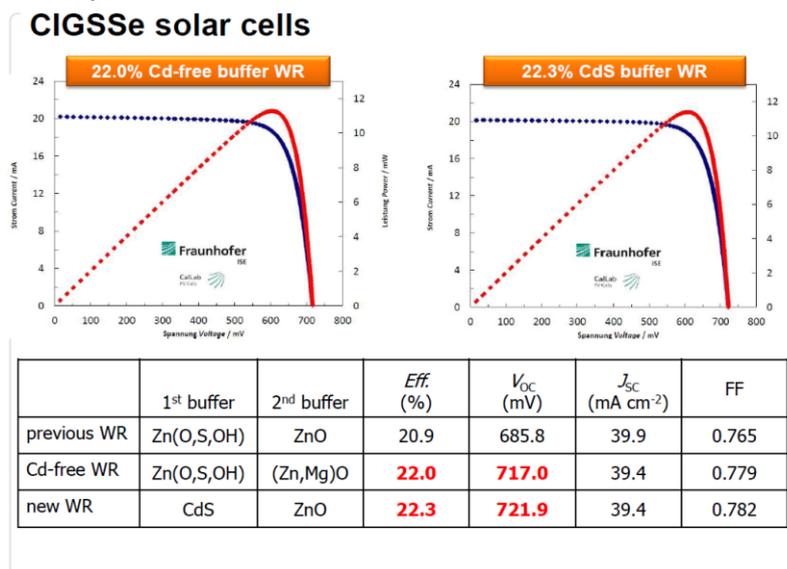
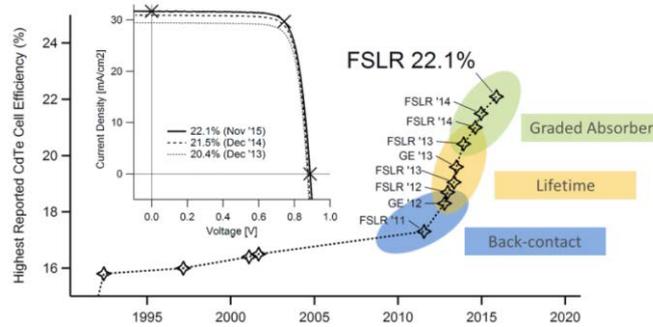


図5 世界最高効率Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>セルの特性 (廣井氏提供)

(3) Markus Gloecker (First Solar) は、“CdTe solar cells in 2016: Realization of potential of CdTe thin-film PV”と題して、Extended Oral講演を行った。2015年には、図6に示すように、セル効率22.1% ( $V_{oc}=887\text{mV}$ 、 $J_{sc}=31.7\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=78.5\%$ )、面積 $0.7\text{m}^2$ モジュールで、アパーチャ効率18.6%を実現している。製造レベルのモジュール効率は、16.4%である。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、組成制御によるバンドギャップ傾斜がなされ、波長 $800\text{nm}$ 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 $J_{sc}$ で、約 $2\text{mA/cm}^2$ の改善がはかられている。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、 $J_{sc}$ で、約 $1\text{mA/cm}^2$ の改善がはかられている。また、Clパッシベーションや $E_g$ 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 $\tau$ が $10\text{ns}$ から約 $100\text{ns}$ に向上し、 $V_{oc}$ の改善がはかられている。 $4\mu\text{m}$ 以上の粒界成長、ZnTe:Cuバックコンタクトも検討されている。これらの改善の結果、CdTe太陽電池で、効率22.1%の世界最高効率が達成されている。また、 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ 傾斜組成光吸収層( $1.5\rightarrow 1.3\rightarrow 1.0\rightarrow 1.7\text{eV}$ )も検討されている。今後は、単結晶による高効率化の可能性追求、バルク欠陥の理解と低減、パッシベーション、ドーピング等の検討により、 $\tau > 1\mu\text{s}$ 、 $S < 10\text{cm/s}$ 、 $V_{oc} > 1.1\text{V}$ を実現することにより、効率 $> 25\%$ が可能であるとまとめた。

## Increasing efficiencies: First Solar



Slide courtesy of Markus Gloeckler

図6 First Solar の CdTe 太陽電池の高効率化の変遷 (Dr. Sarah Kurtz:本会議ハイライト)

### 5.4 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野：

(1) Geoffrey Kinsey (DOE) は、”CPV in the next decade: zombie and superhero?” 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 7 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 7 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%、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。

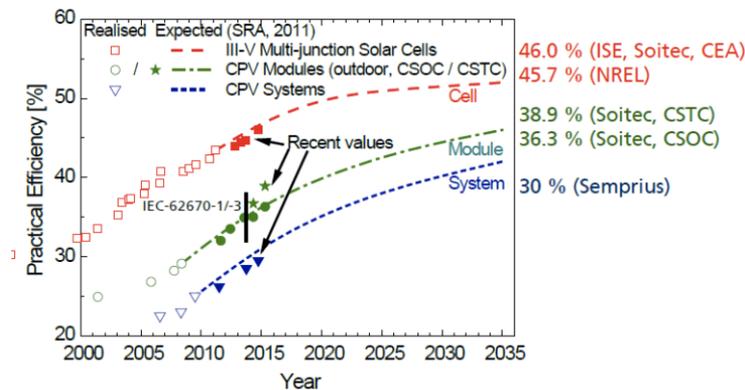


図7 高倍集光 (HCV) のセル、モジュール、システム効率の変遷 (Dr. A. Bettt 提供)

HCPV モジュール効率も同様に、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、格段の進歩を示しており、将来も明るいとも見られていた。また、図 8 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 9 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。2015年のPVの累積導入量234GWに対して、CPVは350MWと、三桁減のレベルである。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。数MW~30MW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とも報告された。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、高効率・低コスト・高信頼モジュール開発、追尾系など課題についても言及し、スーパーヒーロとして、期待しているとまとめた。

### Solar Cell Architectures for 4J Cells Achievements

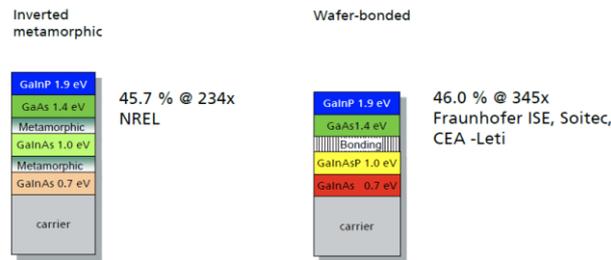


図8 レコードHCPVセルの構造とレコード効率 (Dr. A. Bettt 提供)

### Cost of a CPV System

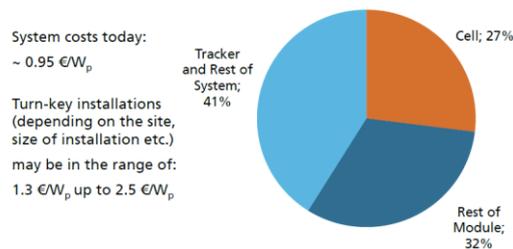


図9 CPVシステムコストの現状 (Dr. A. Bettt 提供)

### Concentrator Photovoltaic (CPV) – Market Yearly Installed Capacity

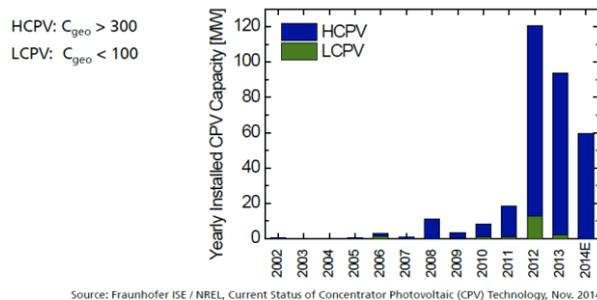


図10 CPV市場規模の変遷 (Dr. A. Bettt 提供)

(2) John Simonら (NREL) は、“Upright and inverted single junction GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy” と題して、Extended Oral講演を行った。III-V族化合物太陽電池は、高出力密度 ( $W/m^2$ )、高重量比出力 ( $W/kg$ ) だが、高価格 ( $\$30,000 \sim 50,000/m^2$ ) であり、HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) による低コスト化のアプローチが述べられた。表4に示すように、HVPEは、MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) に比べて、高成長速度、Gaコスト低減等が期待でき、低コスト化の可能性を有する。昨年、p-GaAs基板上のn-GaAs:Se(50nm)/p-GaAs:Zn ( $2.5 \mu m$ ) のホモ接合太陽電池で、効率16.5% ( $V_{oc}=0.96V$ ,  $J_{sc}=20.5mA/cm^2$ ,  $FF=84\%$ ) を報告した。今回は、n-InGaP/n-GaAs:Se (100nm)/p-GaAs:Zn ( $2.5 \mu m$ ) ヘテロフェイス太陽電池が検討された。格子整合InGaP成長、エミッター層は低速度成長、GaAsベース層はの成長速度は  $1 \mu m/min$ 、金属汚染などが検討された。金属汚染は、太陽電池の $V_{oc}$ 低減につながる。金属汚染は、DLTS測定で、Ni、Feと思われる。成長炉の清浄化で、改善がはかれているが、まだ不十分との事である。太陽電池層は、エッチングによりGaAs基板から剥離され、inverted構造太陽電池が作製された。n-InGaP/n-GaAs:Se (100nm) /p-GaAs:Zn ( $2.5 \mu m$ ) ヘテロフェイス太陽電池で、効率23.8% ( $V_{oc}=1.05V$ ,  $J_{sc}=27.4mA/cm^2$ ,  $FF=82.6\%$ ) が、得られている。 $E_g/q-V_{oc}=0.36V$ で、比較的良い特性が得られている。

表4 HVPE、MOCVDの特性比較

	MOCVD	HVPE
Growth rate ( $\mu m/min$ )	0.1~0.15	1~2
Ga cost ( $\$/g$ )	>4	0.3
V/III ratio	60~80	3~4
Source utilization(%)	?	70

(3) Taizo Masudaら (Toyota Motor Co.) は、“Next environment-friendly cars: Application of solar power as automobile energy source” と題して、太陽電池の車載応用に関するLate News Paper発表を行った。図11に示すように、予備検討段階で、Solar EVで、一日32kmの走行が可能で、64%の $CO_2$ 放出削減が期待できる。将来的には、燃料不要、充電不要のSolar EVが実現すると期待される。

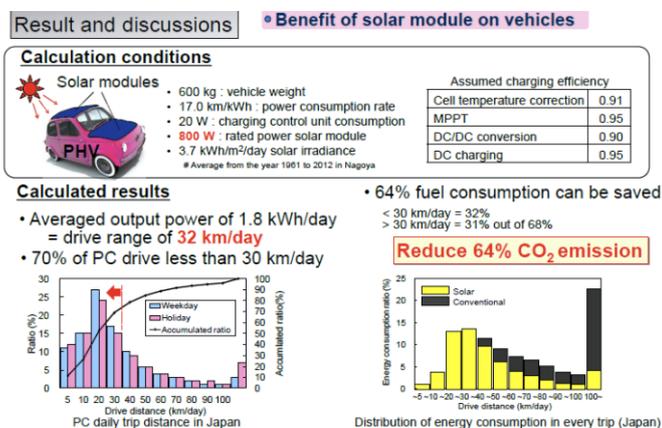


図11 太陽電池の車載によるメリット (増田氏提供)

(4) この他、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。FhG-ISE が、InGaP/GaAs//Si ウエハボンディングによる効率 30.1%、豊田工大が、4 端子メカニカルスタックによる InGaP/GaAs//Si セルで、効率 27.4%を報告した。

### 5.5 結晶Si太陽電池分野：

(1) Pierre J. Verlindenら (Trina Solar) は、“Mass production of high efficiency p-type PERC solar cells: how high can we go?” と題して、プーナリ講演を行った。現状、p-type単結晶PERC構造太陽電池で、効率22.13% (面積243.68cm<sup>2</sup>、V<sub>oc</sub>=680.3mV、J<sub>sc</sub>=40.53mA/cm<sup>2</sup>、FF=80.21%)、製造プロセスで、効率21.40% (面積244.11cm<sup>2</sup>、V<sub>oc</sub>=672.1mV、J<sub>sc</sub>=39.65mA/cm<sup>2</sup>、FF=80.31%) の状況である。p-type多結晶PERC構造太陽電池で、図 1 2 に示すように、効率21.25% (面積242.74cm<sup>2</sup>、V<sub>oc</sub>=667.8mV、J<sub>sc</sub>=39.78mA/cm<sup>2</sup>、FF=79.97%) の状況である。

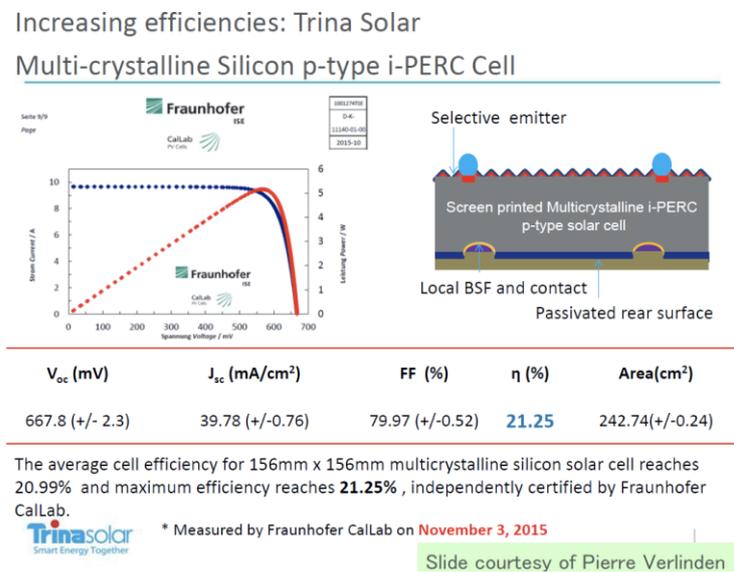


図 1 2 p-type i-PERC多結晶Si太陽電池の構造とI-V特性  
(Dr. Sarah Kurtz:本会議ハイライト)

高効率化に向けた取り組みが紹介された。キャスト多結晶では、転位、不純物偏析、粒界、結晶端、底の不純物汚染が課題である。高品質多結晶Siには、粒界成長が、転位密度低減には、むしろ粒径が小さい方が、今の所良い。小粒界では、局部的応力の低減による転位密度低減の効果と考えている。2.2 Ω cm多結晶のAl<sub>2</sub>O<sub>x</sub>(ALD)パッシベーションにより、少数キャリア寿命  $\tau > 1150 \mu s$  が得られている。p-type、n-type Si多結晶のShockley-Read-Hall寿命 (SRH  $\tau$ ) の注入キャリア濃度依存性のCo、Cu、Ni、Cr、Fe、B-O複合欠陥やWの効果、言及されている。p-type多結晶では、Cr > Co > Fe > Ni > Cu、n-type多結晶では、Co > Cr > Ni > Fe > Cuの順で、SRH  $\tau$  に効く。効率18%を得るには、p-type多結晶で、Cr、Co < 1x10<sup>9</sup>cm<sup>-3</sup>、Fe、W < 5x10<sup>9</sup>cm<sup>-3</sup>、Ni < 1x10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup>、Cu < 5x10<sup>12</sup>cm<sup>-3</sup>、が必要との事である (Sio et al., JAP 57, 033523 (2001).)。20 Ω cm FZ-SiのCOS仕様は、 $\tau > 1ms$  を得るには、Fe < 2x10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>、Ni < 1x10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>、W < 1x10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>、Ti < 1x10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup>、が必要だが、太陽電池仕様の方が厳しいケースがある。p-type多結晶PERC構造太陽電池で、効率21.25%

( $V_{oc}=667.8\text{mV}$ 、 $J_{sc}=39.78\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=79.97\%$ )の現状だが、転位密度を低減すると、MITによるシミュレーションでは、効率 $21.44\%$ ( $V_{oc}=667.2\text{mV}$ 、 $J_{sc}=40.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=79.9\%$ )が期待できる結果が出ている。今後、Fe汚染の低減やB-O複合欠陥の不活性化により、効率 $21.83\%$ 、deeper Al-BSFの改善により、効率 $22.33\%$ 、また、passivated contactsの適用により、 $22.5\%$ 以上の効率が期待できるとまとめた。

(2) R. Haoら (Crystal Solar) は、“Kerfless epitaxial mono crystalline PERx cells”と題して、Extended Oral講演を行った。エピ成長薄膜Si太陽電池の動向が述べられた後、「Direct Gas to Wafer」技術が紹介された。Si基板→ポーラスSi層形成→TCSガス成長→ウエハ分離→Si基板のサイクルで、Si基板再利用をはかっている。①陽極エッチによるポーラスSi形成(ポーラス層厚さの一様性 $\sim 5\%$ )、②高利用効率のTCSリアクターを用い、TCS/H<sub>2</sub>比、H<sub>2</sub>フロー、基板温度等の最適化により、成長速度が $6.5\sim 7.5\mu\text{m}$ 分で、膜厚も $204\sim 216\mu\text{m}$ におさまっており、平均比抵抗は $2.0\Omega\text{cm}$ である。③ $1100^\circ\text{C}$ でのH<sub>2</sub>アニールで、ポーラス層にボイドが形成され、エピ成長層とSi基板が分離される。高温アニール中に、格子不整合のため、転位が発生し、少数キャリア寿命の減少を示す。成長条件の最適化により、転位密度が $10^3\text{cm}^{-2}$ 以下になっているとの事である。 $10\sim 50\mu\text{m}$ のDeepエミッタ(キャリア濃度 $10^{17}\sim 3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )セル( $156\text{mm}$ 角)が検討された。キャリア濃度 $< 1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、層厚 $> 10\mu\text{m}$ で、 $J_{0e}< 20\text{fA}/\text{cm}^2$ だが、 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 以上では、オーグエ再結合のため、層厚の増加と共に、 $J_{0e}$ が増加する。IMECで、Ni/Cu/Agプレーティングnp<sup>+</sup>エピPERTセルが検討された。FhG-ISE認定で、面積 $238.45\text{cm}^2$ セルで、効率 $22.5\%$ ( $V_{oc}=694.2\text{mV}$ 、 $J_{sc}=40.3\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=79.3\%$ )が得られている。基板再利用でも、効率は、 $22.0$ 、 $21.4$ 、 $21.6$ 、 $22.3$ 、 $21.9$ 、 $22.0$ 、 $20.6$ 、 $21.8\%$ と、平均的な値が得られている。Si基板として、市販のCZウエハが持たれ、30回の基板再利用の実績がある。n-Siの実効少数キャリア寿命は、 $3\text{msec}$ である。0回のSi基板厚 $1050\mu\text{m}$ から、5回、10回、15回、18回で、基板厚は、各々、 $980$ 、 $930$ 、 $885$ 、 $870\mu\text{m}$ となっている。Hanwha Q Cellsでも、QUANTUM製造ラインを用い、スクリーン印刷np<sup>+</sup>エピPERTセル作製が検討され、効率 $21.4\%$ ( $V_{oc}=670.7\text{mV}$ 、 $J_{sc}=40.1\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=79.8\%$ )が得られている。CZセルでは、効率 $21.0\%$ ( $V_{oc}=661.7\text{mV}$ 、 $J_{sc}=40.1\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=79.0\%$ )に対して、 $V_{oc}$ は $10\text{mV}$ 、 $FF$ は $0.6\%$ 、効率は $0.4\%$ 、改善されている。FF改善は、直列抵抗減による。今後は、金属コンタクト、表面パッシベーション、バルクライフタイム等の改善により、効率 $22.5\%$ から、 $22.9\%$ 、 $23.15\%$ 、 $23.5\%$ 、 $23.8\%$ への効率向上のロードマップも示された。

## 5.6 ペロブスカイトおよび有機太陽電池分野：

(1) Michael Graetzel (EPFL) は、“Mesoscopic photovoltaics and 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

$\text{CaTiO}_3$ 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 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}+\text{PbI}_2$ (PbCl<sub>2</sub>)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 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は、 $1.56\text{eV}$ 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 $7.5\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、正孔 $12.5\sim 66\text{cm}^2/\text{Vs}$ ）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、 $5\sim 16\text{meV}$ 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。

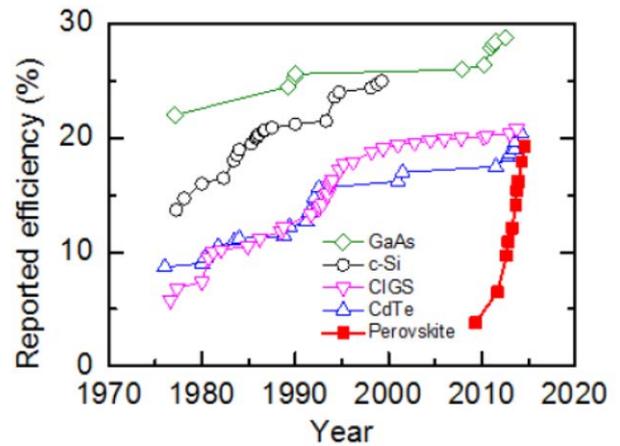


図1.3 ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷と他の太陽電池の効率変遷  
(29<sup>th</sup> EU-PVSEC会議ハイライト：  
Dr. A. Jaeger-Waldau提供)

図1.3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、 $\text{TiO}_2$ の代わりに、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 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 $0.0955\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=1.059\text{V}$ 、 $J_{sc}=24.65\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=77.0\%$ )、NIMSによる効率15.6%、(面積 $1.020\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=1.074\text{V}$ 、 $J_{sc}=19.29\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=75.1\%$ )である。課題として、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n因子低下、構造不安定性、熱的不安定性、湿気感性や紫外光耐性、などが予想されるが、例えばCsを含有されることにより、安定性が50時間以下から1000以上に改善され、問題ないと述べている。 $\text{CsPbI}_3$ 、 $\text{CsFAPbI}_3$ などが検討され、効率21.17%で、Rb含有により効率21.9%を得ているとのことである。 $V_{oc}\sim 1.18\text{V}$ を得ているケースもあり、ERE (External Radiative Efficiency) は、0.5%と結晶Si並みの値で、驚きの値である。上記のように、拡散長は低いので、光学的促進効果が働いているとの見方もあるようだ。

(2) 本会議でも、B. Niesenら (EPFL) は、ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池に関する発表をしている。ペロブスカイトセル/ヘテロ接合Siセルの4端子構造で、効率24.4%、図1.4に示すように、モノリシック2端子構造の小面積 ( $0.17\text{cm}^2$ ) で、効率21.2%、面積 $1.22\text{cm}^2$ セルで、効率19.2%の状況である。

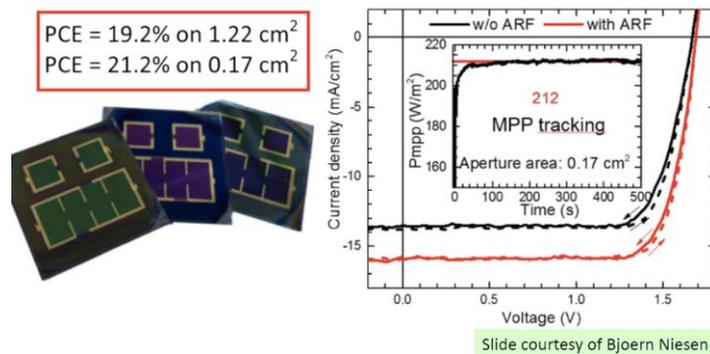


図 1.4 ペロブスカイト/ヘテロ接合SiタンデムセルのI-V特性

### 5.7 宇宙用太陽電池およびシステム分野：

Greg Carr (JPL) は、“End-to-end system level trade considerations for deep space PV systems” と題して、プレーナリ講演を行った。科学的惑星探査の対象として、火星 (1.6AU：天文単位 (1AU=1.5X10<sup>8</sup>km))、小惑星 (2.7~3.3AU)、木星の月 (5~5.5AU)、土星の月 (9.1~10AU) など、低日射強度となるので、衛星用電力源として、太陽電池と放射性同位元素の競争となる。Deep space missionの電力源に関する考察が報告された。講演は、①Deep space solar array mission considerationに始まり、②Mission design approach、③Science definition consideration、④Thermal design approach、⑤Solar array performance、⑥Power control optimization、⑦Overall system performance evaluation、⑧Future opportunitiesから成った。低日射強度に加え、放射線劣化も課題である。温度調節のためのパワーの節約も重要で、部品の排熱利用も検討されている。PVアレイ性能は、製造業者のカタログ値から初期決定するが、セル試験と試験データからのスクリーニングがなされ、アレイ、ミッション設計がなされる。Solar concentratorsも検討対象で、余程のことがない限り、PVアレイを採用したいとの事である。

### 5.8 キャラクターゼーション：

Thorsten Trupke (UNSW) は、“Progress with photoluminescence characterization in photovoltaics” 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きている。本講演では、単結晶、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示している。line scanning PL、spectral PLの特徴が述べられた。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<sub>i</sub>、BO<sub>i</sub>、Cr<sub>i</sub>、O<sub>i</sub>) 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相関も検討されている。P-type多結晶Siのバルク少数キャリア寿命  $\tau_b$  は、0.2~60  $\mu$ s、n-type CZ-Siの  $\tau_b$  は、20msのものがある。効率24~24.5%以上のためには、 $\tau_b > 10$ msが、必要である。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。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。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。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。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。今後は、モジュールの品質管理、屋外のPLイメージング、コンタクトレス各種評価を進めたいと結んだ。

## 5.9 モジュール、製造、信頼性分野：

(1) モジュール技術の現状については、前回会議のプレーナリ講演がまとまっているので、紹介する。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、良いクルーンルーム、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15、図16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。

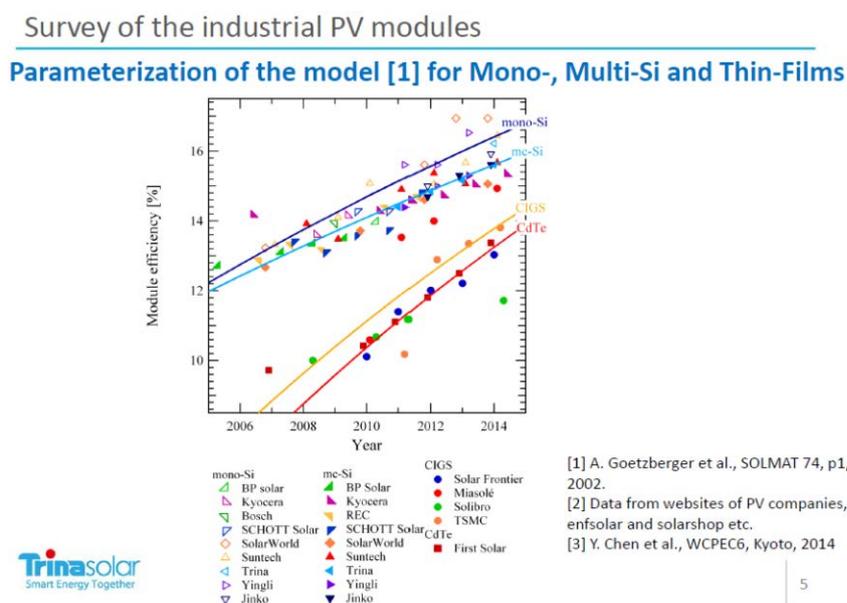
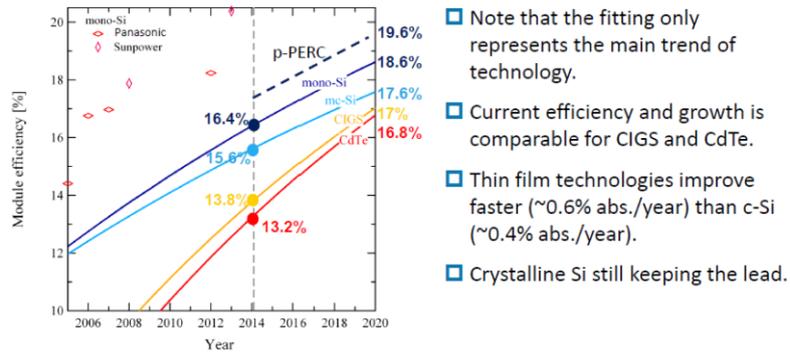


図 1 5 結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールの高効率化の進展 (Dr. P. Verlinden提供)

## Modeling of module efficiency



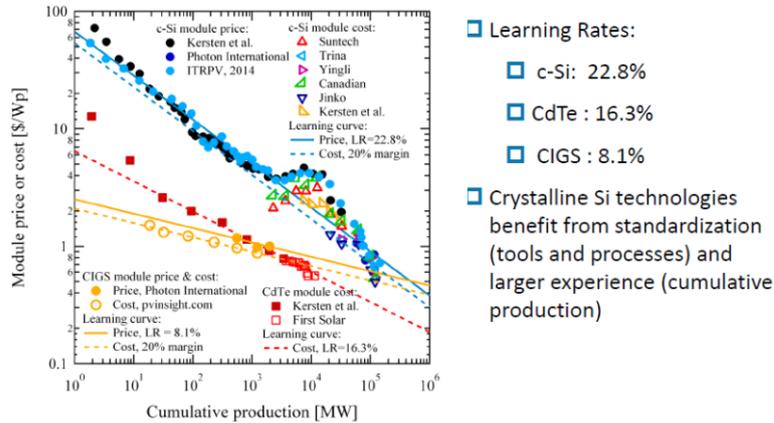
- Note that the fitting only represents the main trend of technology.
- Current efficiency and growth is comparable for CIGS and CdTe.
- Thin film technologies improve faster (~0.6% abs./year) than c-Si (~0.4% abs./year).
- Crystalline Si still keeping the lead.

[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 1 6 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



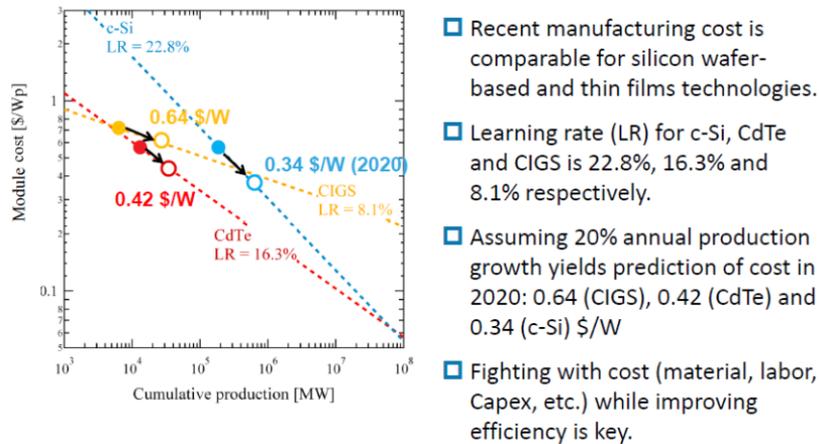
- Learning Rates:
  - c-Si: 22.8%
  - CdTe: 16.3%
  - CIGS: 8.1%
- Crystalline Si technologies benefit from standardization (tools and processes) and larger experience (cumulative production)

[1] Kersten et al., 26<sup>th</sup> 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. 29<sup>th</sup> EUPVSEC, 2013



図 1 7 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)



- Recent manufacturing cost is comparable for silicon wafer-based and thin films technologies.
- Learning rate (LR) for c-Si, CdTe and CIGS is 22.8%, 16.3% and 8.1% respectively.
- Assuming 20% annual production growth yields prediction of cost in 2020: 0.64 (CIGS), 0.42 (CdTe) and 0.34 (c-Si) \$/W
- Fighting with cost (material, labor, Capex, etc.) while improving efficiency is key.

図 1 8 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)

また、図17、図18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。

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、モジュールコスト0.56\$/W、0.76\$/W、0.58\$/Wから、2020年には、各々、モジュールコスト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244.11cm<sup>2</sup>、Voc=672.1mV、Jsc=39.65mA/cm<sup>2</sup>、FF=80.31%）、20.76%（面積243.89cm<sup>2</sup>、Voc=662.6mV、Jsc=39.03mA/cm<sup>2</sup>、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239.31cm<sup>2</sup>、Voc=683mV、Jsc=41.58mA/cm<sup>2</sup>、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19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。

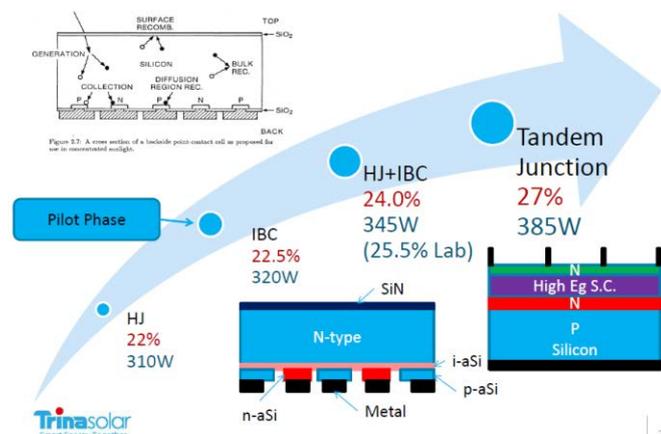


図19 今後の結晶太陽電池の高効率化技術の展望(Dr. Verlinden提供)

(2) SunPowerから、1.13m<sup>2</sup>の世界最高効率（アパーチャ効率）24.1%（面積11310cm<sup>2</sup>、Voc=52.77mV、Jsc=6.306A、FF=81.9%）に関する発表があった。

(3) Christian Hagendorfら（FhG-CSP）は、“Potential induced degradation (PID) of p-type silicon: How atomistic defects can cause module degradation”と題して、プレーナリ講演を行った。2014年IECのTest Sequence（PID試験前後のI-V、シャント抵抗、dark I-V、EL）が述べられた。PID劣化後のマイクロ構造が検討されている。EBICやTOF-SIMSにより、SiNとSi界面に、Na蓄積が認められている。また、TEM観察の結果、Na蓄積は、結晶欠陥を生成していると考えられる。PID劣化モデルとして、高電界下で、SiN層をNaイオンはドリフトし、シャント欠陥が生成していると考えている。250℃3時間のアンールで、

回復が認められる。また、ガラスがNaのソースではなく、Naのソースとして、Siの表面汚染を考えている。シャント欠陥として、酸化プロセス誘起表面欠陥（積層欠陥<20nm）を考えている。本当にそうなら、HIT太陽電池モジュールは、PID劣化しないのではないだろうか。

#### 5.10 PVシステム、パワーエレクトロニクス、系統連系、応用、日射量測定、予測分野：

(1) Thomas Reindall (SERIS) は、“LCOE reduction of PV electricity - does technology still matter?” と題して、プレーナリ講演を行った。SERISの紹介の後、LCOE低減に関して、講演した。世界的に見ると、2015年単年度で55GW、累積で238GWのPVシステムが設置されている。シンガポールの日射量は、1630kWh/m<sup>2</sup>で、住宅用PVは、134USD/MWhとの事である。LCOE低減の種々の要素が説明された。LCOE低減の新しい傾向として、光シャドー損低減を狙ったナローバスバー、FF改善を狙ったHalf-cut cells、bi-facial cells、などが述べられた。LCOEのさらなる低減には、システムレベルのインパクトより、セルおよびモジュールレベルのインパクトが大きいという私見が述べられた。Quantative risk assessment、Categorization of risks、The True Power Projectも紹介された。

(2) G. Bell (DN VGL) は、“Rooftop PV and firefighters” と題して、プレーナリ講演を行った。130万のPVシステム（約30GW）が調査された。PVアレイの火事が約400件あり、このうち、PVアレイに起因する火事は、約180件だったとの事である。事故を防ぐため、rapid shut down要求NEC2014 (NEC610.12) に加えて、2017年のrapid shut down要求（10、30秒以内に、80Vにおとす）があるが、まだ、標準はない。長期信頼性とコストを含めて、PV市場への影響も述べられた。火事の事例も紹介された。NEC2017が、実効的にスタートするのは、2019年初めと見ている。

(3) Jan Kleisel (UC San Diego) は、“Solar energy forecasting advances and impacts on grid integration” と題して、プレーナリ講演を行った。気象予測、日射量予測による太陽光発電システムの発生電力予測技術の向上が必要である。Sky imagingは、高解像度で、PVの発生電力分布の予測を可能としている。過大予測の事例もあり、精度向上が必要である。気象予測、日射量予測による太陽光発電システムの発生電力予測に関する研究開発の状況も紹介された。予測手法として、統計的手法72% (ANN24%、SVR18%、Regressive14%、k NN6%、RF5%)、物理的手法11%、ハイブリッド法17% (hybrid-statisca11%、hybrid-physical6%) となっている。2010年から、5年間の間、dynamic aerosols and cloud interactionが明らかになりつつあり、赤外域チャンネル利用、確率予測が可能となり、solar forecastが広く用いられつつある。今後は、2016年10月打ち上げ予定のGOES-R衛星の利用が期待できる。現衛星に比べて、①full disk image 30分→5分、②イメージバンド5→16、③可視域1km→0.5~1km、④近赤外域 なし→1~2km、⑤赤外域4~8km→2km、⑥ bit depth 10bits→12 bits (可視域)、14bits (赤外域) と改善が期待される。

#### 5.11 政策、市場、普及分野：

(1) Stefan Nowak (NET) は、“IEA PVPS - Global co-operation towards sustainable deployment of photovoltaic power systems” と題して、プレーナリ講演を行った。24カ

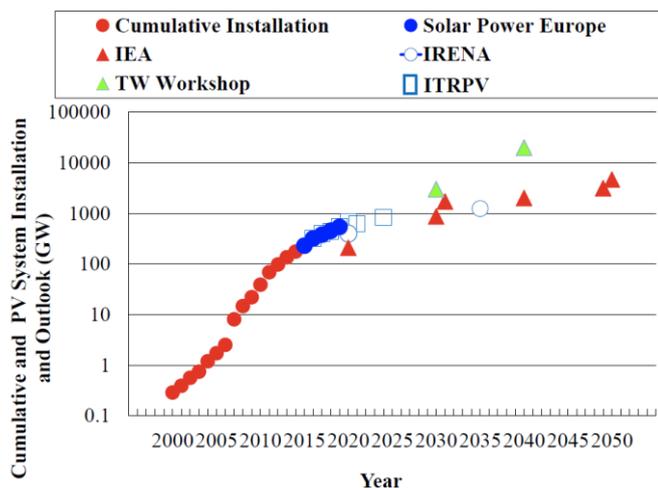
国、29メンバー機関が参加している。現在、下記の6タスクに、150名以上の専門家が参画している。

表5 IEA/PVPSのタスク

- Task 1 – Strategic PV Analysis & Outreach
- Task 9 – Deploying PV Services for Regional Development
- Task 12 – PV Environmental Health & Safety Activities
- Task 13 – Performance and Reliability of PV Systems
- Task 14 – High Penetration PV in Electricity Grids
- Task 15 – Enabling Framework for the Acceleration of BIPV

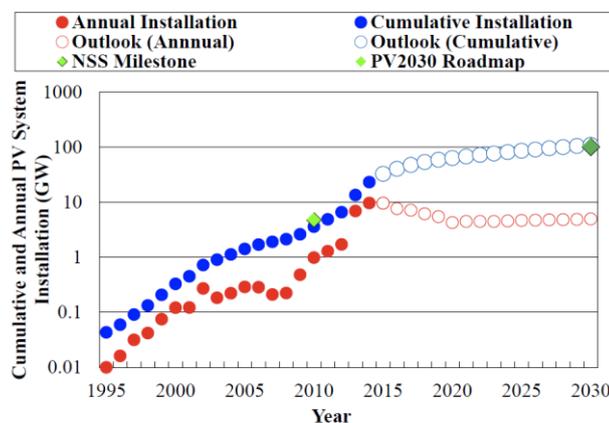
各タスクの活動状況が報告された。詳しくは、IEA-PVPS Annual Reportを参照されたい。

(2) Special Sessionとして、” International Collaboration Towards TW-Scale PV”の特別セッションが企画され、約100名の参加者があった。



### World's PV Installation Outlook

図20 種々のロードマップによる世界のPVシステムの累積導入量の推移



### Japan's PV Installation Outlook

(RTS, PV Market 2015, 2015.7)

図21 日本におけるPVシステムの累積導入量のRTSによる予測

### Important issues towards future PV

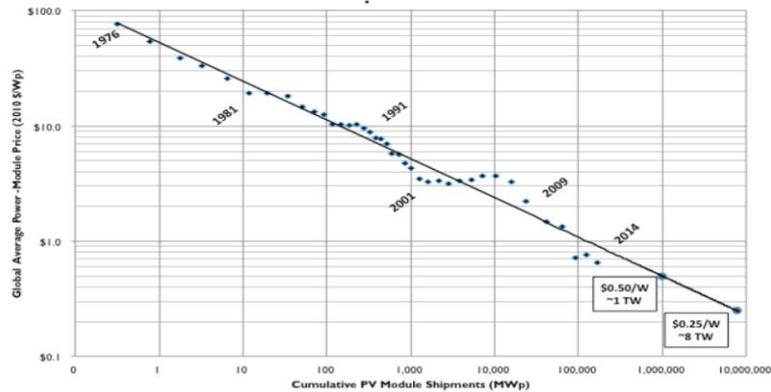
1. *Creation of international vision and roadmap towards creation of future clean energy infra-structures.*
2. *Recommendation of energy policy to United Nations, regional and national governments.*
3. *International collaboration to develop high performance, low cost and highly reliable PV materials, cells, modules and systems in cooperation with battery technologies towards creation of future clean energy infra-structures.*
4. *International collaboration to develop new application fields such as automobile and agriculture applications towards creation of future clean energy infra-structures.*

図 2 2 将来のPVの発展のために重要な事項

冒頭、オーガナイザーであるM. Yamaguchi (豊田工大) からIntroductory talkがなされた。図 2 0 に、種々のロードマップによる世界のPVシステムの累積導入量の推移を示す。Eicke Weber (FhG-ISE) の特別講演にあるように、本年3月17日、18日、ドイツ・フライブルグで開催されたThe TW Workshopでは、最少ターゲットとして、2030年、2040年、各々、3TW、20TWと、非常に魅力的なターゲットが提示されている。図 2 1 に、日本におけるPVシステム累積導入量のRTSによる予測を示す。しかし、図 2 1 に示すように、ドイツや日本では、単年度のPVシステムの導入量は、減少傾向にある。ターゲットとの大きな飛躍、バリアが感じられる。図 2 2 に、将来のPVの発展のための重要事項に関する私見が述べられた。①国際的なビジョンやロードマップの策定、②国際連合、各国政府への提言、③将来の社会基盤の構築に向けた国際共同研究によるバッテリーとの連携を含めたPV技術(材料、セル、モジュール、システム等)のさらなる強化、④将来の社会基盤の構築に向けた国際共同研究による自動車用や農業用等、用途開拓。自動車用の事例として、太陽エネルギーによるモビリティ社会構築に向けた、ソーラーステーションや車載の取り組みの状況も紹介された。

Eicke Weber(FhG-ISE)は、“PV on the way to the Terawatt level:GA-SERI Workshop sets TW goals - starting the second cycle of PV”と題して、特別講演を行った。図 2 3 は、PVモジュールの平均価格のPVモジュールの累積出荷量との関係を示す。 $\$0.5/W$ は見えており、累積導入量1TWの実現は近い。 $\$0.25/W$ になると、8TWということになる。図 2 4 は、結晶シリコン太陽電池技術のポートフォリオを示す。図 2 4 の結晶Si太陽電池技術に加えて、高効率III-V化合物太陽電池技術やその他の太陽電池技術、バッテリーを含む貯蔵技術も進展している。図 2 5 は、TWワークショップで議論されたTWスケールPVの予想を示す。上記低価格化や各種技術開発の進展を踏まえて、年15%の成長で、2030年3TWが可能で、ミニマムターゲットとしている。年25%の成長で、2030年5~10TWが可能としている。9TWは、世界の電力消費の40%に相当し、PVが次代を担えるとしている。最後に、表 6 に示すように、TWゴールに向けたまとめを行った。

## Price Experience Curve of Solar Energy (c-Si Photovoltaics)



Source: Terawatt-Scale Photovoltaics: Trajectories and Challenges (2016), to be publ.

図 2 3 PVモジュールの平均価格のPVモジュールの累積出荷量との関係 (Prof. E. Weber提供)

## Crystalline Silicon Technology Portfolio c-Si PV is not a Commodity, but a High-Tech Product!

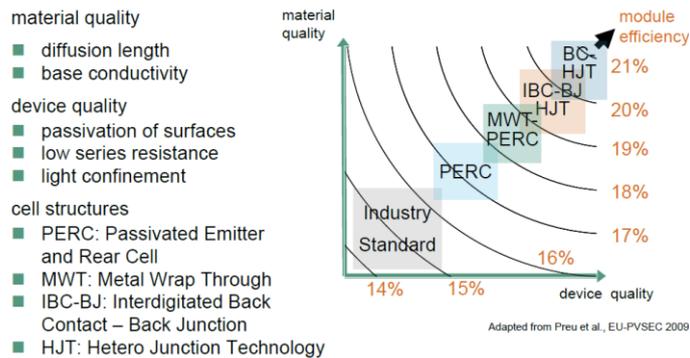
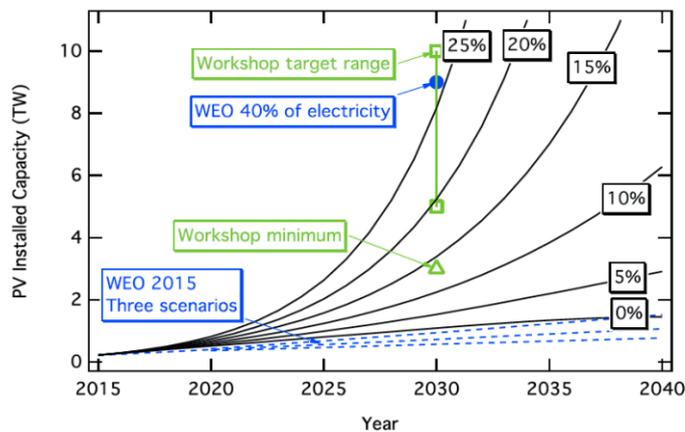


図 2 4 結晶シリコン太陽電池技術のポートフォリオ (Prof. E. Weber提供)

## Projections to TW-scale PV



Using simple assumptions, we can project that just maintaining the 2015 deployment rate would reach 1-TW deployment before 2030. A 25%/y growth rate would reach 5-10 TW by 2030.

図 2 5 TWスケールPVの予想 (Prof. E. Weber提供)

表6 TWゴールに向けたまとめ (Prof. E. Weber提供)

## PV on the way to the Terawatt level: GA-SERI Workshop sets TW goals - starting the second cycle of PV

- PV has become a cost-efficient, rapidly growing element of the electricity supply in many countries, driven by political incentives, technology improvements, and related cost reductions:
  - 8-10 ct/kWh in Germany
  - 5-8 ct/kWh in sun-rich countries,
  - 3 ct/kWh recently announced for auction in Dubai!
- The cost of PV systems will decrease further, making PV the lowest-cost form of electricity production in many regions of the world → 2-4 ct/kWh!
- This will be driven by further technology advancements, accompanied by supportive financial and regulatory environments!
- A stable energy system based on RE will link the electricity, heat and transport sectors, including storage and a smart grid!
- In 2016, we can announce PV entering the Terawatt region, the start of the second cycle of photovoltaic growth, requiring substantial new PV production capacities in the next five years!

Greg Wilson (NREL)とRoland Schindler (FhG-ISE)がモデレータとなって、パネル討論がなされた。パネリストであるHiroyuki Yamada (NEDO)、Rebecca Jones-Albertus (DOE)、Shigeru Niki (AIST)、Armin Froitzheim (Solarworld)、Pierre Verlinden (Trina Solar)から5分間程度のスピーチがなされた後、会議参加者との意見交換がなされた。テーマが“International Collaboration”なので、具体的な国際共同研究の可能性などについて、活発なパネル討論がなされた他、5~10TWターゲット実現の課題、バッテリー等貯蔵技術、水素社会、モビリティ社会などについても、意見交換がなされた。

## 6. 感想

同じ6月に、本会議と32nd EU-PVSECが開催されるため、参加者減が懸念されたが、前回よりも多い位で、本会議の質の高さが要因かも知れない。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26に示すように、まだまだ、国の支援が必要と言える。図26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。

特別セッション”International Collaboration Towards TW-Scale PV”は、良い試みと見え、次回会議でもやって欲しいとのコメントを頂いた。2030年の5~10TWの実現のためには、信頼性も課題で、モビリティ社会を考慮すると、Siタンデムや自動車応用、などが、国際共同研究のテーマになりそうである。

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。

### Correlation between PV budget and PV system installation

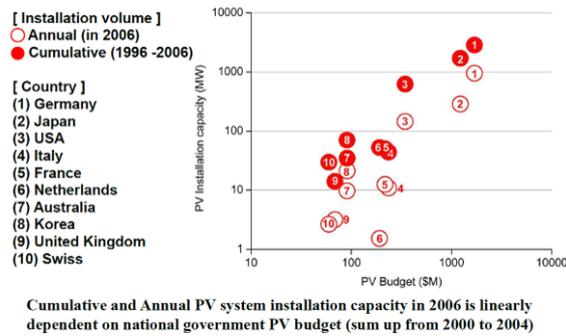


図 2 6 主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算（研究開発費を含む）との相関（ICSU-ISPRES Report）

次回の44<sup>rd</sup> IEEE PVSCは、2017年6月25日～30日、米国のワシントンDCで開催予定である。32<sup>nd</sup> EU-PVSECは、2016年6月20日～24日、ドイツのミュンヘンで、PVSEC-26は、2016年10月24日～28日、シンガポールで、開催予定である。

（以上）