

## 4 4 回 IEEE 光起電力専門家会議 (44<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2017. 7. 3

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日 : 2017年6月25日～30日

2. 開催場所 : Marriott Wardman Park Hotel (ワシントン DC. 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 Angele Reinders (Univ. Twente) で、プログラム委員長は Seth Hubbard (Rochester Inst. Tech.) であった。

今回は、43 カ国から 1,298 名 (前回 1,261 名、前々回 1,236 名) の参加者があった。例年とほぼ同じ参加者数となった。欧州の参加者の幾人かは、本会議の方が、EU-PVSEC より、クオリティが高いとの印象を持っていた。図 1 に、参加者 1,298 名の国別参加者数を示す。国別では、①米国 752 名 (前回 790 名、前々回 716 名)、②日本 105 名 (前回 73 名、前々回 92 名)、③ドイツ 59 名 (前回 72 名、前々回 65 名)、④オーストラリア 38 名 (前回 47 名)、⑤中国 34 名 (25 名)、⑥インド 31 名 (24 名)、⑦フランス 30 名 (15 名)、⑧英国 30 名 (24 名)、⑨韓国 27 名、⑩オランダ 20 名 (29 名) の順であった。

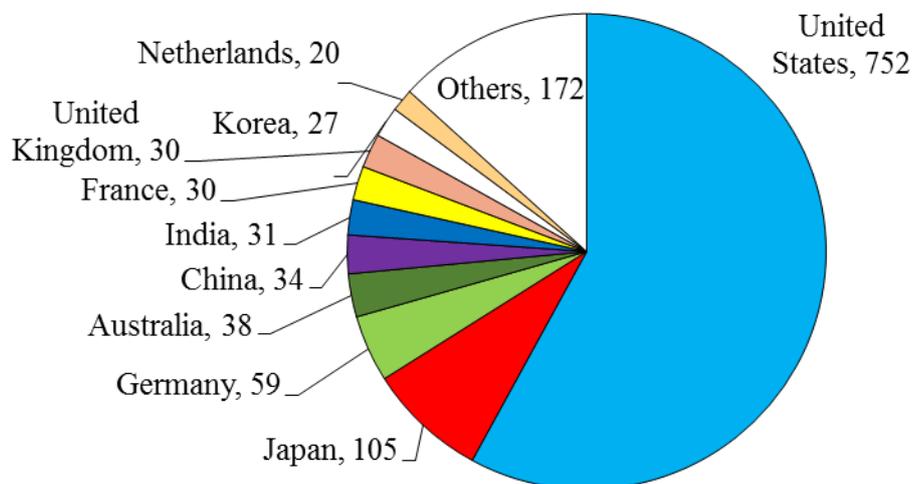


図 1. 国別参加者数 (Mr. Adam Kohm提供)

図 2 は、国別発表論文数を示す。約 40 カ国から 1056 件の論文発表 (ここでは、アブストラクト集計の 43 カ国から、960 件の投稿アブストラクト数を引用することとする。Late News 投稿が 158 件あった。) があった。国別では、①米国 499 件 (前回 520 件)、②日本 61 件 (前回 63 件)、③ドイツ 44 件 (前回 64 件)、④中国 41 件 (25 件)、⑤インド 35 件 (40 件)、⑥オーストラリア 29 件 (38 件)、⑦台湾 26 件 (30 件)、⑧フランス 23 件 (20 件)、⑨英国 20 件、⑩イタリア 14 件、⑩オランダ 14 件 (27 件)、⑩スイス 14 件、の順であった。



# Abstracts by Country PVSC-44

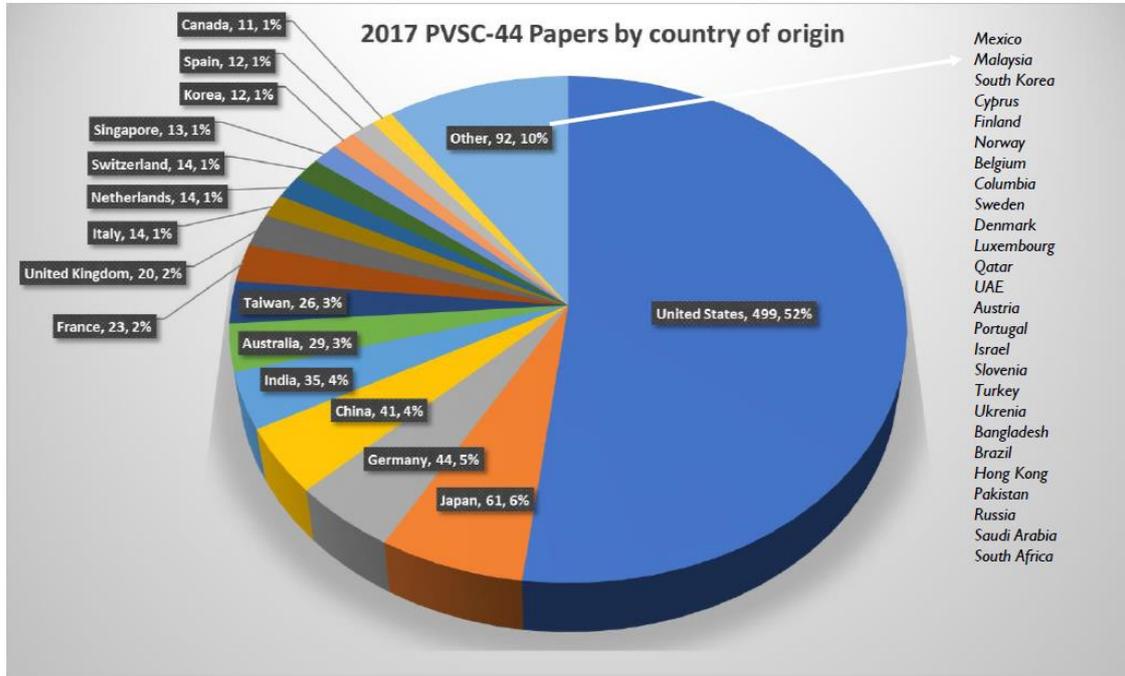


图 2. 国別発表論文数 (Prof. Seth Hubbard提供)



## PVSC-44 vs PVSC-43 by Area

- Contraction in Area 1, Area 2, Area 6
- Growth in Area 3, Area 5, Area 8

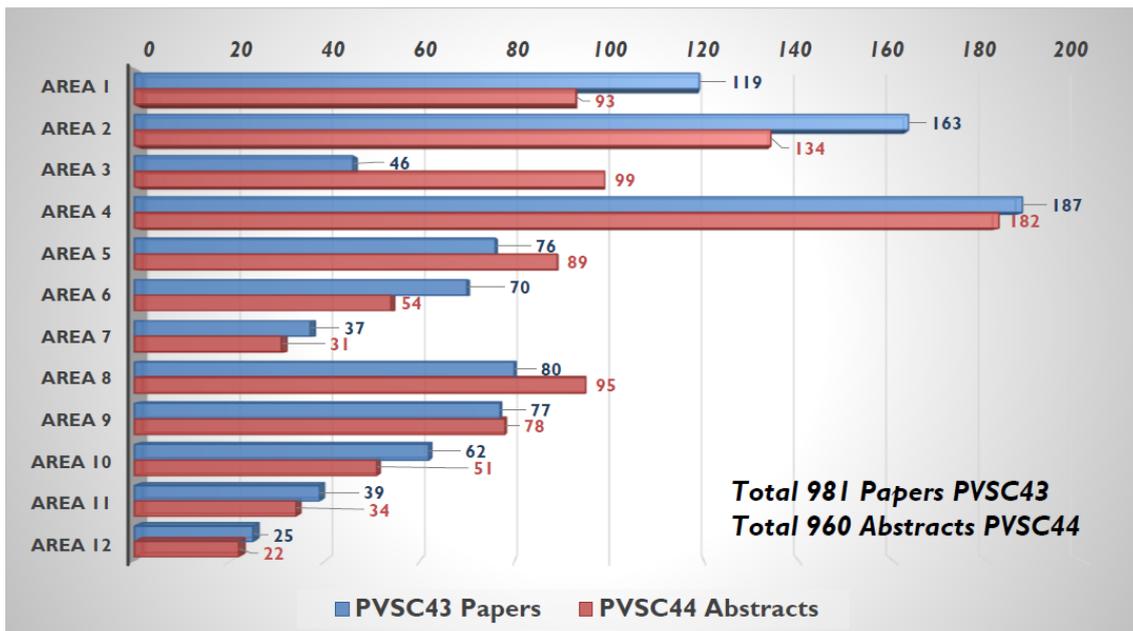


図3. 発表論文件数の分野別内訳 (Prof. Seth Hubbard提供)

図3は、発表論文件数(投稿アブストラクト数)の分野別内訳を示す。分野別では、①AREA 4: 結晶Si太陽電池182件(前回187件)、②AREA 2: カルコゲナイド化合物薄膜系(CIGS、CdTeおよびII-VI族)134件(前回163件)、③AREA 3: III-V族および集光99件(前回46件)、④AREA 8: モジュール、製造、およびシステム95件(80件)、⑤AREA 1: 基礎および新概念93件(119件)、⑥AREA 5: キャラクターリゼーション89件(76件)、⑦AREA 9: 信頼性78件(77件)、⑧AREA 6: ペロブスカイト、有機太陽電池54件(70件)、⑨AREA 10: パワーエレクトロニクス、系統連系51件(62件)、⑩AREA 11: 日射量測定、発生電力量予測34件(39件)、⑪AREA 7: 宇宙用太陽電池31件(37件)、⑫AREA 12: 政策、市場、普及21件(25件)の順であった。今回も、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。

#### 4. Cherry Award受賞者と受賞記念講演

Cherry Award ChairであるR. Sinton (Sinton Instruments) 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	Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994	Dr. Stuart Wenham 2009
Dr. Joseph L. Loferski 1981	Dr. Allen M. Barnett 1996	Dr. Richard King 2010
Prof. Martin Wolf 1982	Dr. Adolf Goetzberger 1997	Dr. Jerry Olson 2011
Dr. Henry W. Brandhorst 1984	Dr. Richard J. Schwartz 1998	Dr. Sarah Kurtz 2012
Mr. Eugene L. Ralph 1985	Dr. Christopher R. Wronski 2000	Dr. Keith Emery 2013
Dr. Charles E. Backus 1987	Dr. Richard M. Swanson 2002	Dr. Ron Sinton 2014
Dr. David E. Carlson 1988	Dr. Ajeet Rohatgi 2003	Dr. Christiana Honsberg 2015
Dr. Martin A. Green 1990	Dr. Timothy J. Coutts 2005	Dr. Pierre Verlinden 2016
Mr. Peter A. Iles 1991	Dr. Antonio Luque 2006	
Dr. Lawrence L. Kazmerski 1993	Dr. Masafumi Yamaguchi 2008	

今回の受賞者は、Prof. Eli Yablonovitch (UC Berkley)で、LEDは半導体レーザ分野でのアイデアや知見を駆使して、太陽電池分野で、光トラップングやSiやGaAsの表面パッ

シミュレーションで業績をあげている。特に、光トラッピング因子は、Yablonovitch Limits とも言われている。Photonic Crystal の提案も行っている。光トラッピングの効果は、Alta Devices 社の単接合太陽電池での最高効率 28.8% (面積  $0.9927\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=1.122\text{V}$ 、 $J_{sc}=29.68\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=86.5\%$ ) の GaAs 太陽電池、効率 31.6% (面積  $0.999\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=2.538\text{V}$ 、 $J_{sc}=14.18\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=87.7\%$ ) の GaInP/GaAs 2 接合太陽電池の成果につながっている。講演では、図 4 に示すように、Alta Devices 社によるフレキシブル GaAs 薄膜太陽電池による青色発光がデモンストレーションされた。また、光トラッピングをさらに進めれば、図 5 に示すように、GaAs 単接合太陽電池でも、効率 30% 超えが可能であることが示された。



図 4 . Alta Devices 社製フレキシブル GaAs 薄膜太陽電池の室内光による青色発光 (Prof. Eli Yablonovitch 提供)

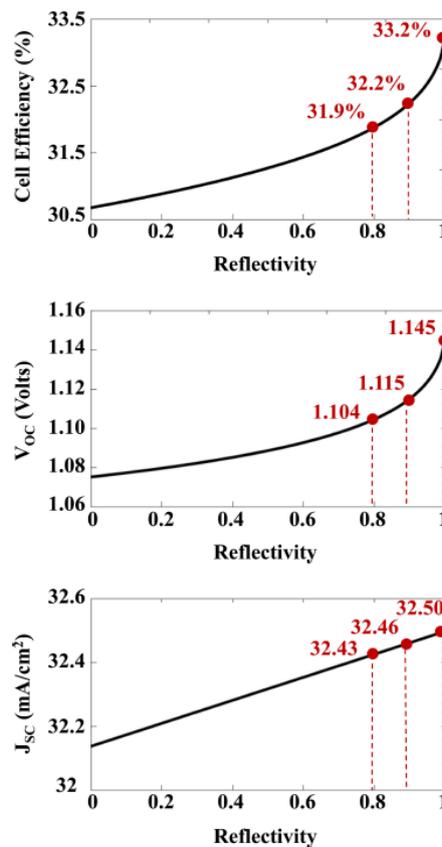


図 5 .  $3\ \mu\text{m}$  厚 GaAs 薄膜太陽電池の裏面反射による高効率化の可能性に関するシミュレーション結果 (O.D. Miller et al, IEEE Journal of Photovoltaics 2, 303 (2012).)

## 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。

### 5.0 基調講演：

Charile Gay (DOE) は、“A roadmap in communicating the PV industry vision” と題して、基調講演を行った。まず、電気、電話、冷蔵庫、エアコン、携帯電話等種々の製品の出荷と成熟期の変遷が述べられた。対比して、PVの成熟には、時間がかかるであろう。太陽電池の歴史の変遷も述べられた。次いで、太陽電池の歴史が紹介された。太陽電池のアイデアは、1940年2月23日のベル研のRussel Ohlであろうと言う。現在の太陽電池の原型の発明は、1954年4月26日のベル研のD. Chapin、C. Fuller、G. Pearsonによるが。1958年3月17日打ち上げのバンガード1号以来の衛星用から始まり、灯台や無線中継所、過疎地、住宅用や最近の系統連携に至り、導入量が飛躍的に伸びている。彼が中心となって進めて来たスミソニアン博物館での歴史的な太陽電池の展示（シャープの「IEEEマイルストーン」認定を含む）は、来年春になるとの事である（実は、展示オープンを、ワシントン開催の本会議に間に合わせようとしたのではあるが）。太陽電池モジュールの累計生産量と価格の学習曲線（21%）が、VLSI（28%）やプロイラーチキン（28%）と比較されている。

SunShot 2030も紹介された。図6に示すように、SunShot 2020のLCOE（levelized cost of electricity）の目標は、6セント/kWhで、米国の平均気象条件では、2016年には、7セント/kWhが実現され、目標達成が見えている。SunShot 2030のLCOEの目標は、3セント/kWhとなっている。

### SunShot 2020 Goal in Reach — What's Next?

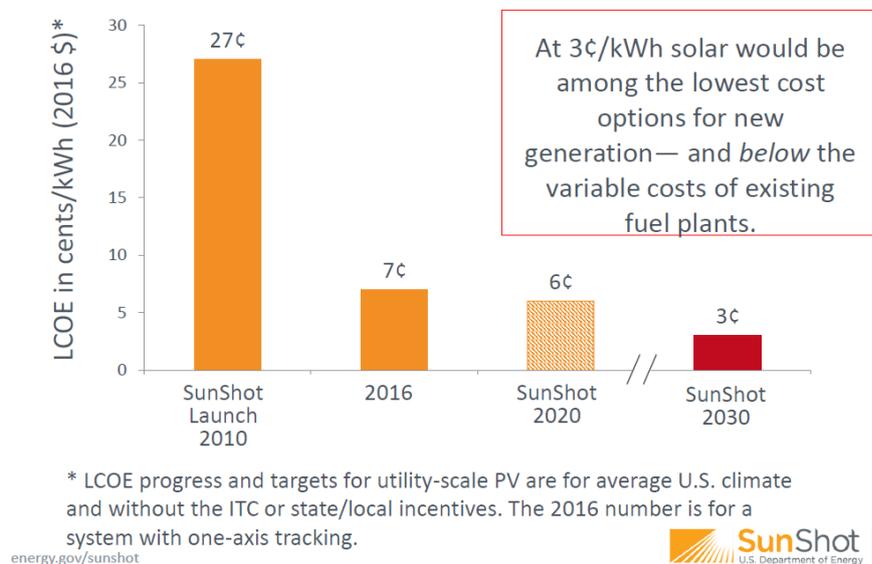


図6. SunShot 2030のゴール (energy.gov/sunshot)

図7に示すように、LCOE 3セント/kWhの実現の道程も示されている。モジュール価格を\$ 0.65/Wから\$ 0.30/Wに低減することで1.2セント削減、BOSコストを\$ 0.85/Wか

ら \$ 0.55/W に低減することで1セント削減、寿命を30年から50年に改善することで1.1セント削減、O&Mも \$ 14から \$ 4/kW・yrに改善することで0.7セント削減の道筋となっている。

### A Pathway To 3 Cents per kWh

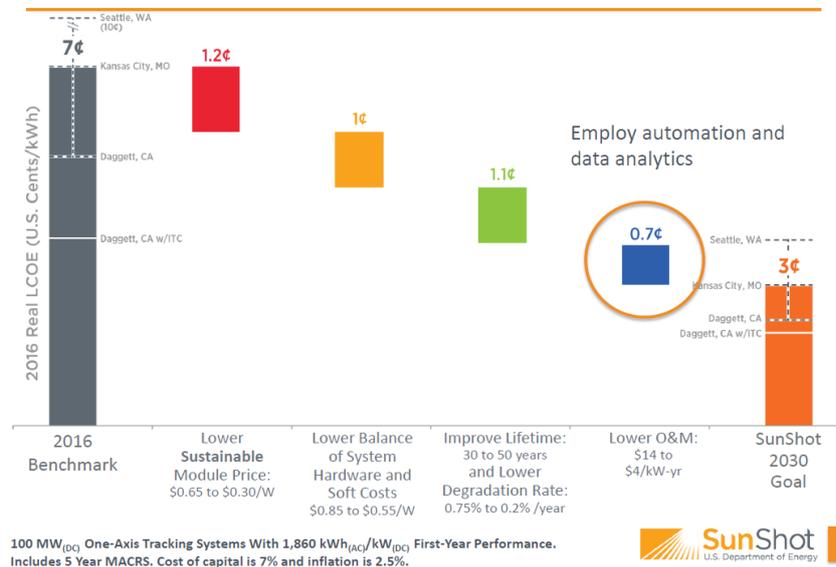
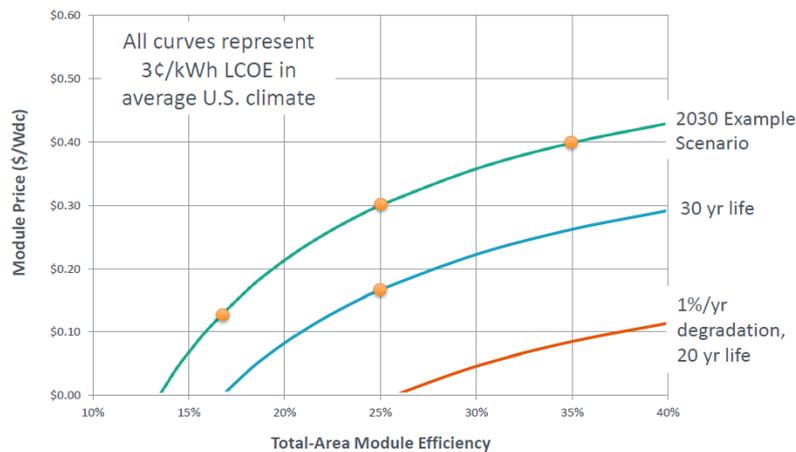


図7. LCOE 3セント/kWhの実現のための道程 (energy.gov/sunshot)

### There are Many Technology Pathways

- Cost and performance tradeoffs open up numerous possible pathways.
- All pathways require sustained, multifaceted innovation.



Unless otherwise noted, all scenarios assume: 7% WACC, 2.5% inflation, \$0.85/W system cost, \$4/kW-yr O&M, 0.2%/yr degradation, 50 yr life, 21% capacity factor

SunShot U.S. Department of Energy 12

図8. 主要技術によるLCOE 3セント/kWh達成時のモジュール価格モジュール効率のトレードオフ (energy.gov/sunshot)

図8は、主要技術によるLCOE 3セント/kWh達成時のモジュール価格モジュール効率のトレードオフを示す。寿命を20年から30年、50年に延ばすことやモジュール効率を17%から25%、35%へと改善することで、許容されるモジュール価格が緩やかに

なる。モジュール効率35%のタンデム太陽電池の実現が期待されている。

図9は、SunShot 2020のLCOE 6セント/kWh、SunShot 2030のLCOE 3セント/kWh および低コストStorageとのハイブリッドによるPVの米国電力に占める比率の増加傾向を示す。2040年、2050年には、各々、PVは、米国電力の約40%、50%を占めることが期待される。

### Half the Cost, More than Double the Solar

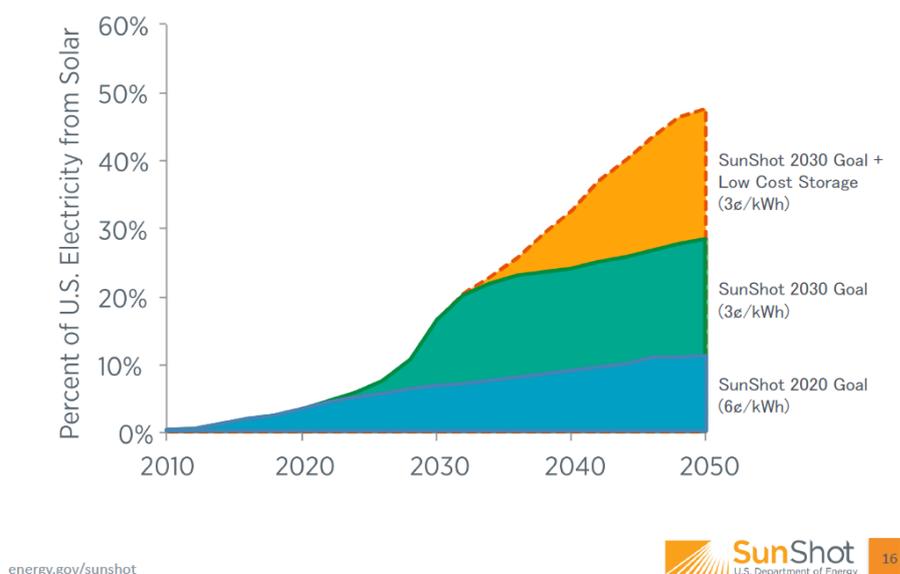


図9. SunShot 2020のLCOE 6セント/kWh、SunShot 2030のLCOE 3セント/kWh および低コストStorageとのハイブリッドによるPVの米国電力に占める比率の増加傾向 (energy.gov/sunshot)

今後は、PVの研究開発は必須で、当面、電圧や周波数制御を含む系統安定化やエネルギーマネジメント、zero energy or energy-efficient building、PV + battery storageや用途開発を進め、2050年までには、スマートで効率的でcost effectiveなカーボンフリーのエネルギーシステムを完成させたいとまとめた。

#### 5.1 基礎・：新概念分野：

(1) Jean-Francois Guillemolesら (CNRS) は、“Hot carrier solar cells: Myths and realities” と題して、プレーナリ講演を行った。表3に、SQ (Schokley-Quisser) limitの太陽電池、多接合太陽電池およびホットキャリア太陽電池の効率限界の比較を示す。単接合太陽電池のいくつかは、SQ limitの効率に近づきつつある。SQ limitを打破する実際的な手法は、多接合太陽電池である。代替概念の一つに、図10に示すホットキャリア太陽電池がある。ホットキャリア太陽電池は、1982年に、RossとNozikによって提案され、新概念を検証するための多くの実験的研究がなされてきた。多重量子井戸 (MQW)、量子ドット (QD)、中間バンド、ナノワイヤ、プラズモン、ペロブスカイト等、である。

表 3. SQ Limit、多接合太陽電池およびホットキャリア太陽電池の効率限界の比較

SQ Limit		多接合太陽電池		ホットキャリア太陽電池	
46,000倍	AM0	46,000倍	AM0	46,000倍	AM0
41%	31%	86.8%	68.2%	86%	67%

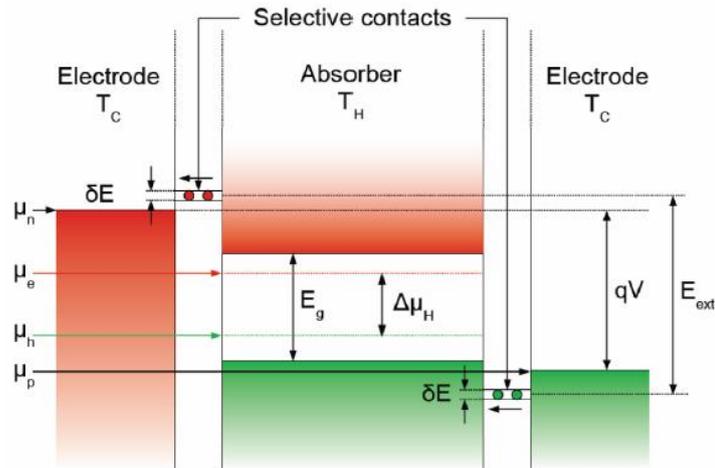


図 10. ホットキャリア太陽電池のバンド構造 (J.-F. Guillemoles, SPIE Newsroom 10.1117/2.1201103.003579, (2011).)

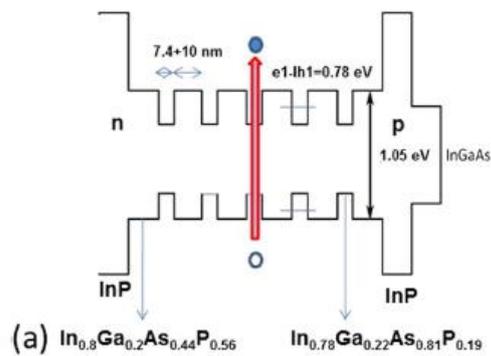


図 11. ホットキャリア動作検証のためのMQW構造 (J. Rodiele et al., Appl. Phys. Lett. 105, 183901 (2015).)

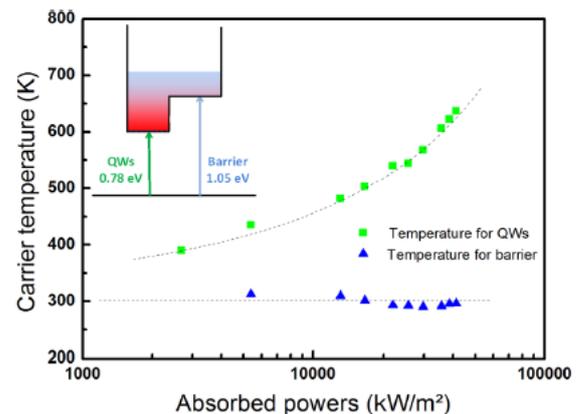


図 12. キャリア温度の励起強度依存性 (J. Rodiele et al., Appl. Phys. Lett. 105, 183901 (2015).)

ホットキャリア太陽電池の課題として、図 10 に示す吸収層内でのホットキャリア（ホットキャリア温度 $T_H$ ）の生成、ホットキャリア抽出のための選択的コンタクトがあり、ホットキャリア動作検証のための実験も紹介された。図 11 に示すように、InPでサンドイッチした $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.44}\text{P}_{0.56}/\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19}$ のMQW構造が作成されている。波長 $980\ \mu\text{m}$ の顕微励起システムとInGaAsの検出システムで、フォトルミネッセンス測定がなされ、Planck則を用いて解析されている。結果の一例を図 12 に示す。40,000-sunの強励起で、キャリア温度630Kのホットキャリアが検証されている。InP上の上記と同様な構造のp-in構造の微小メサダイオード型のMQW太陽電池（厚さ250nm）が作製され、20,000-sunで、効率約11%

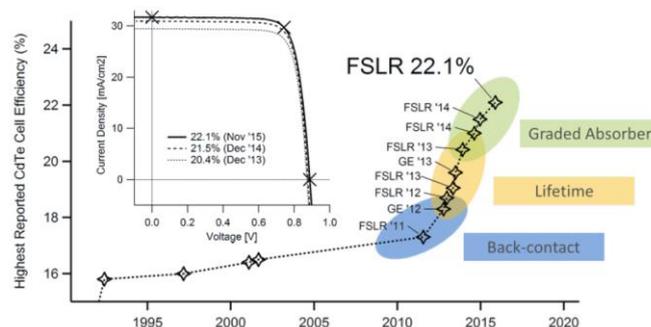
が得られているとの事である。課題は、キャリア温度のさらなる増加が必要で、50,000-sun以上の強励起、厚さ100nm以下の薄膜化、直列抵抗低減、熱放散などとの事である。

(2) 中間バンド太陽電池の高効率化実現の難しさを指摘する発表が東大からあったが、当方の理解が不十分なので、次の機会に譲る。

## 5.2 CIGS、CdTe、II-VI化合物薄膜セル分野：

(1) Markus Gloecker (First Solar) は、“The adolescence of CdTe PV” と題して、プレナリ講演を行った。2015年には、図13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、2005年の効率9%から、2010年11.3%、2012年12.7%、2014年14%と改善がはかれ、2016年時点で16.4%、現在17%との事である。製造コストも、2011年Q1の\$1.59/Wから、2016年Q1の\$0.58/W、2017年Q1の0.37/Wと低減されている。10年間で、17GW以上のモジュールが出荷されている。

### Increasing efficiencies: First Solar



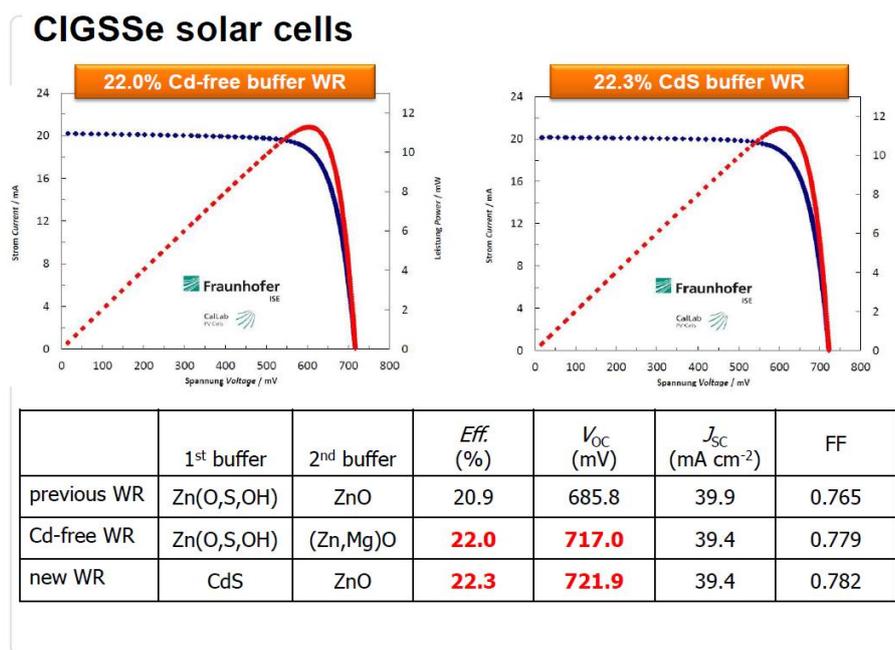
Slide courtesy of Markus Gloeckler

図13. First SolarのCdTe太陽電池の高効率化の変遷(Dr.Sarah Kurtz:前回会議ハイライト)

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800nm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10nsから約100ns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、が検討されている。2011年の効率17.2%から2013年の18.3%への改善は、ZnTe:Cuバックコンタクト層の効果が大きく、2014年の20.3%への改善は、CdTe光吸収層の改善、最近の効率改善は、CdSeTe傾斜組成光吸収層の適用の効果が大きい。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、CdSe<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>傾斜組成光吸収層(バンドギャップボウイングによると思われるが、1.5→1.41→1.5eV)に続き、(1.5→1.3

→1.0→1.7eV) も検討されている。今後は、大学や研究所との共同研究を継続し、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、 $\tau > 1\mu s$ 、 $S < 10\text{cm/s}$ 、 $V_{oc} > 1.1\text{V}$  を実現することにより、効率 $> 25\%$ が可能であるとまとめた。

(2) Takuya Kato ら (Solar Frontier) は、“Enhanced efficiency of Cd-free CIGS minimodule via (Z,Mg)O second buffer layer and Alkali metal post treatment” と題して、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  $J_{sc}$  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。前回会議では、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 Eg 調節もなされ、高  $V_{oc}$ 、高  $J_{sc}$  を目指している。図 1 4 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> セルで、各々、効率 22.7%、22.8% も得ているとの事であった。



SOLAR FRONTIER

図 1 4 . 高効率 Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> セルの特性 (廣井氏提供)

今回は、高透明 TCO、光吸収層のバンドプロファイルの改善、第二バッファ層として、広バンドギャップ (Zn,Mg) O の開発、Dead 層の低減、K 処理効果が検討され、近赤外域の量子効率、低ギャップ化による収集電流の増加、短波長域の改善、少数キャリア寿命の改善が図られている。結果、図 1 5 に示すように、ミニモジュール ( $24.2\text{cm}^2$ )、サブモジュール ( $841\text{cm}^2$ ) で、各々、19.8% ( $V_{oc}=724\text{mV}$ 、 $J_{sc}=37.1\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=73.6\%$ )、19.2% ( $V_{oc}=686\text{mV}$ 、 $J_{sc}=19.2\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=73.7\%$ ) の高効率化を実現している。

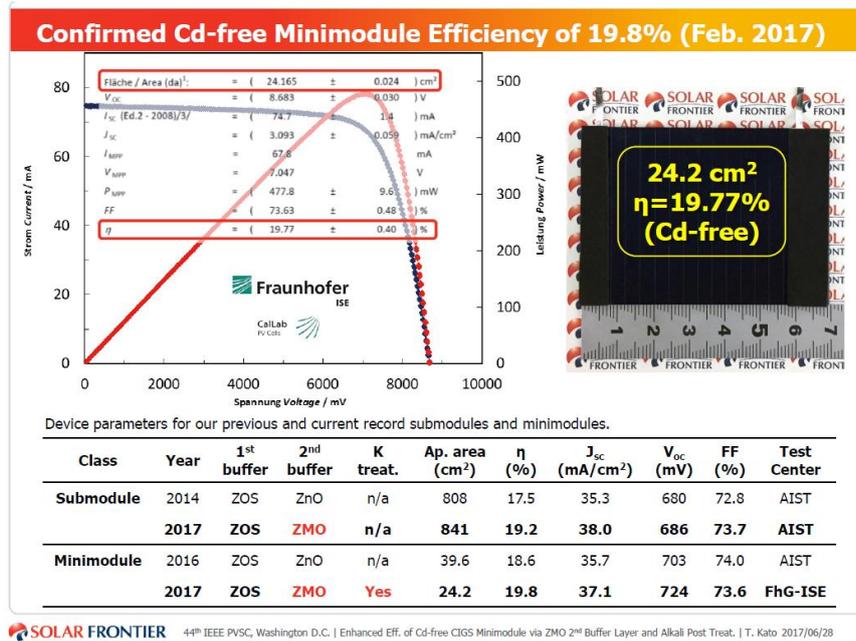


図 1 5 . 高効率 CIGS ミニモジュール、サブモジュールの特性 (加藤氏提供)

### 5.3 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野 :

(1) Stefan H. Myrskog (Morgan Solar) は、” Beyond Fresnel lenses : low-profile, solid CPV modules using total internal reflection” 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 6 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、図 1 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% を超えるさらなる向上の余地がある。

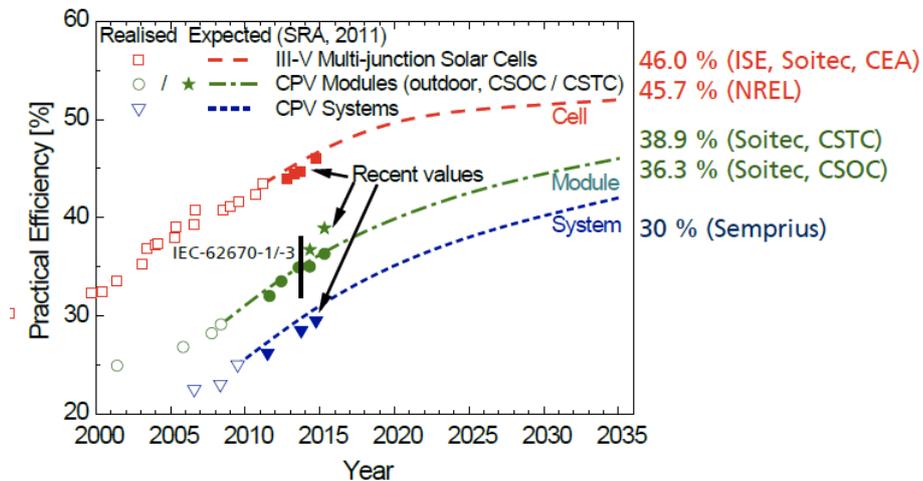


図 1 6 高倍集光 (HCV) のセル、モジュール、システム効率の変遷 (Dr. A. Bettt 提供)

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 1 8 に示すように、CPV のシステムコストは、現状、0.95 ユーロ/W<sub>p</sub>、ターンキイの設置コストも、1.3 ユーロ/W<sub>p</sub>~2.5 ユーロ/W<sub>p</sub> 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 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。

### Solar Cell Architectures for 4J Cells Achievements

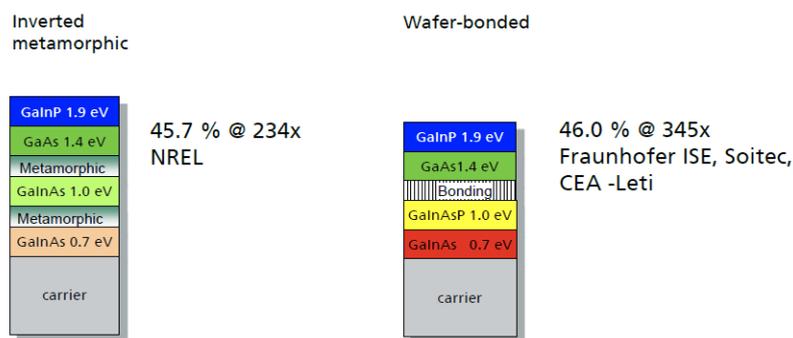


図 1 7 レコード HCPV セルの構造とレコード効率 (Dr. A. Betttt 提供)

### Cost of a CPV System

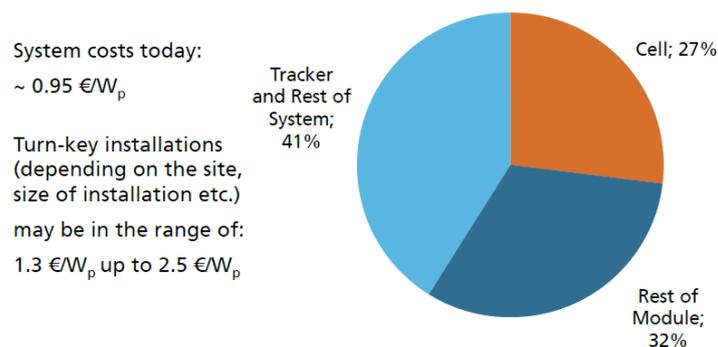
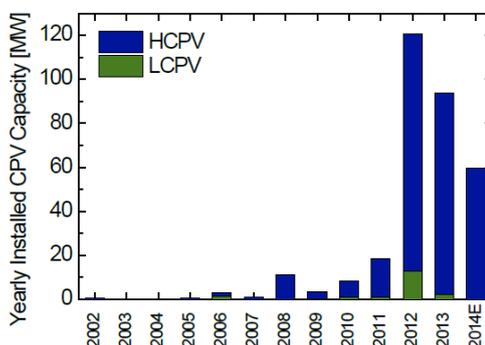


図 1 8 CPV システムコストの現状 (Dr. A. Betttt 提供)

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

HCPV:  $C_{geo} > 300$   
LCPV:  $C_{geo} < 100$



Source: Fraunhofer ISE / NREL, Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology, Nov. 2014

図 1 9 CPV 市場規模の変遷 (Dr. A. Bettt 提供)

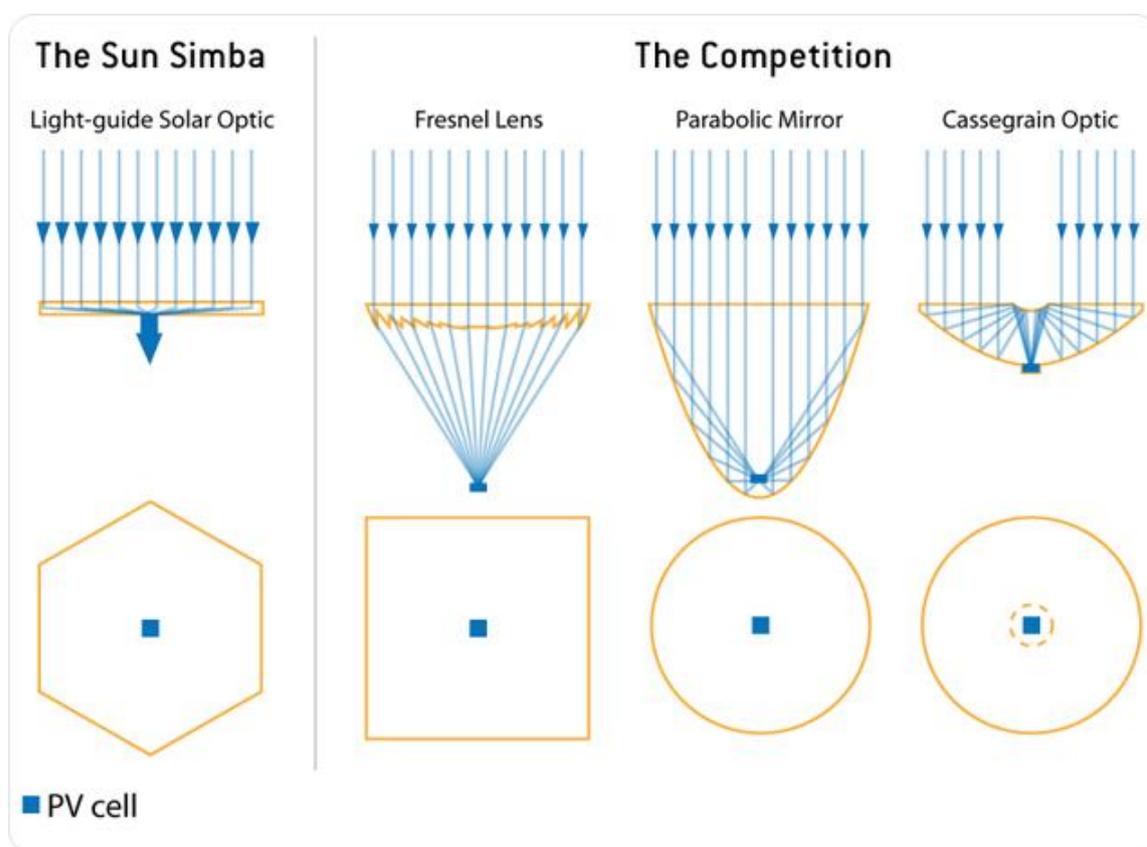


図 2 0 . Sun Simba™ 型とフレネルレンズ型等の集光システムの比較  
(Morgan Solar社情報)

図 2 0 に示すように、Morgan Solar 社によって開発された Sun Simba 型は、導波型光学系で、フレネルレンズ型等の従来構造に比べると、1cm 厚で、軽量、コンパクトで、1100 倍集光が可能との事である。セルアセンブリは、標準の 1ED 製造装置を用いている。Sun Simba モジュールは、高効率 3 接合太陽電池とガラス、高分子材料で構成され、通常の結晶 Si 太陽電池の 2 倍の平均モジュ

ール効率 31.5%ができています。電氣的光学特性、温度特性や信頼性試験などの状況が報告された。結晶 Si 太陽電池モジュール価格と累積生産量の学習曲線を用い、本集光モジュールは、結晶 Si 太陽電池モジュール価格の 50%を実現できると述べた。市場としては、Building integration などがあるとの事である。

(2) Tatsuya Takamotoら (シャープ) は、“IMM triple-junction solar cells and modules optimized for space and terrestrial conditions” と題して、Extended Oral講演を行った。図 2 1 に示すように、逆エピ構造格子不整合 (IMM) 系 InGaP/GaAs/InGaAs 太陽電池の宇宙用、地上用に関する検討結果が述べられた。宇宙用に関しては、ELO (エピタキシャル・リフト・オフ) を用いた薄膜型、放射線耐性、信頼性試験結果が報告された。

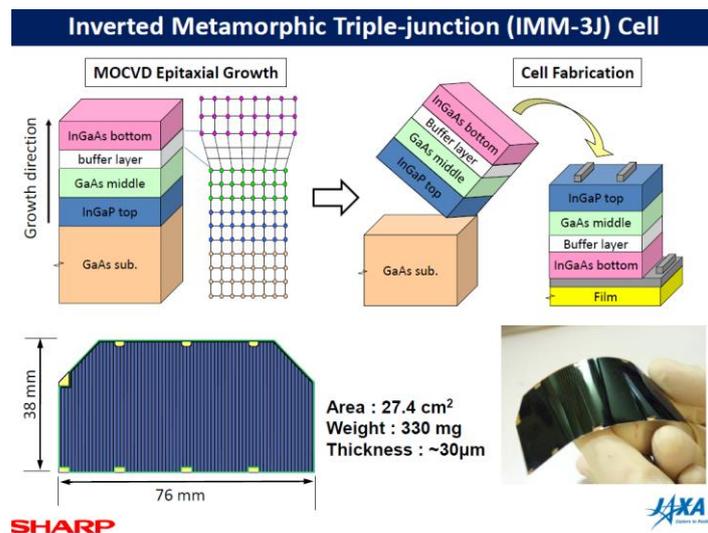
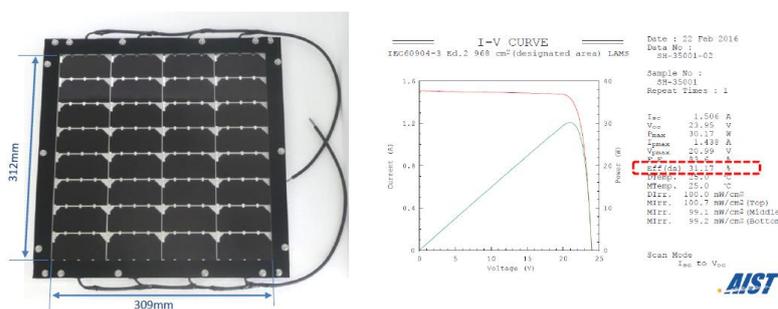


図 2 1. 逆エピ構造格子不整合 (IMM) 系 InGaP/GaAs/InGaAs 太陽電池 (高本氏提供)

### Demonstration of over 30% Module (NEDO PJ)

New Record Module Efficiency: 31.2%



Size (cm <sup>2</sup> )	I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>oc</sub> (V)	F.F. (%)	P <sub>max</sub> (W)	η (%)
968	1.506	23.95	83.6	30.2	31.2

SHARP

図 2 2. 効率31.2%の3接合太陽電池モジュールと特性 (高本氏提供)

地上型については、1.05cm<sup>2</sup>、27.4cm<sup>2</sup>セルで、各々、効率 37.9% (Voc=3.065V、

$J_{sc}=14.27\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=86.7\%$ ）、 $34.5\%$ （ $V_{oc}=3.008\text{V}$ 、 $J_{sc}=13.96\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=82.1\%$ ）、  
 図 2 2 に示すように、 $968\text{cm}^2$ モジュールで、効率 $31.2\%$ の世界最高効率が得られている。  
 宮崎大での屋外試験結果も述べられた。応用分野として車載応用が考えられ、低コスト化  
 のアプローチとして、セル膜厚低減、InGaP/GaAs//Siメカニカルスタックの検討例が述べ  
 られた。

(3) Naval Res. Lab. から、重量比出力の高い ( $>3\text{kW}/\text{kg}$ ) 宇宙用およびポータブルな太  
 陽電池の開発を目指して、各種太陽電池の比較がなされた。結果を、表 4 に示す。ここ  
 でも、シャープの逆エピ構造 3 接合薄膜型太陽電池の優れた性能が実証されている。

表 4. 各種太陽電池の特性比較

Manufacturer	Cell type	Area ( $\text{m}^2$ )	Output (W)	Efficiency
Sunpower	Si IBC	0.534	85	22%
Alta Devices	GaAs-1J	0.506	52	24%
Microlink Devices	IMM-3J	0.48	118	26%
Solearo	LM-3J (Ge-thin)	0.463	116	30%
Sharp	IMM-3J	0.462	152	33%

(4) この他、III-V/Siタンデムセル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 2 接合セルとTOPCon 結晶Siボトムセルとのウエハボンディングに  
 よるInGaP/GaAs//Si 3 接合セル（面積 $3.98\text{cm}^2$ ）で、効率 $32.3\%$ （ $V_{oc}=3.085\text{V}$ 、 $J_{sc}=12.6\text{mA}/\text{cm}^2$ 、  
 $FF=83\%$ ）が報告された。ヘテロエピ成長によるInGaP/GaAs/Si 3 接合セルでは、効率 $19.7\%$   
 （ $V_{oc}=2.52\text{V}$ 、 $J_{sc}=10.0\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=84.3\%$ ）で、転位密度が、 $2.8 \times 10^7\text{cm}^{-2}$ と高いことが課  
 題である。NRELは、シャープ、豊田工大は、4端子メカニカルスタックによるInGaP/GaAs//Si  
 セルで、各々、効率 $35.9\%$ 、 $33.0\%$ 、 $28.2\%$ の状況にある。当面、効率 $37\%$ 以上の実現を  
 目指している。

#### 5.4 結晶Si太陽電池分野：

(1) Pietro P. Altermatt ら (Trina Solar) は、“High-performance p-type  
 multi-crystalline Silicon materials: Its characterization and projected performance  
 in different solar cell configuration” と題して、プーナリ講演を行った。前回会議で、  
 p-type単結晶PERC構造太陽電池で、効率 $22.13\%$ （面積 $243.68\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=680.3\text{mV}$ 、  
 $J_{sc}=40.53\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=80.21\%$ ）、製造プロセスで、効率 $21.40\%$ （面積 $244.11\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=672.1\text{mV}$ 、  
 $J_{sc}=39.65\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=80.31\%$ ）の状況であることを報告した。p-type多結晶PERC構造太陽  
 電池で、図 2 3 に示すように、効率 $21.25\%$ （面積 $242.74\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=667.8\text{mV}$ 、 $J_{sc}=39.78\text{mA}/\text{cm}^2$ 、  
 $FF=79.97\%$ ）の状況である。

Increasing efficiencies: Trina Solar  
Multi-crystalline Silicon p-type i-PERC Cell

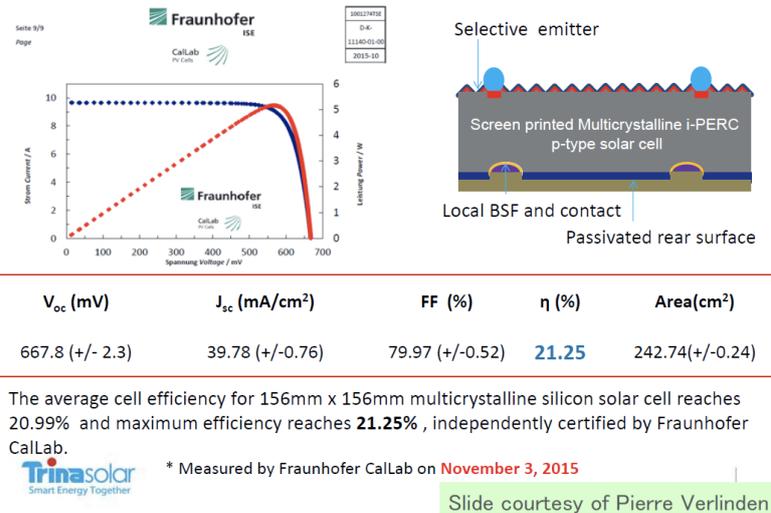


図 2 3 . p-type i-PERC多結晶Si太陽電池の構造とI-V特性 (Dr. Pierre Verlinden提供)

High-performance multi



3 distinct regions in mc-Si materials

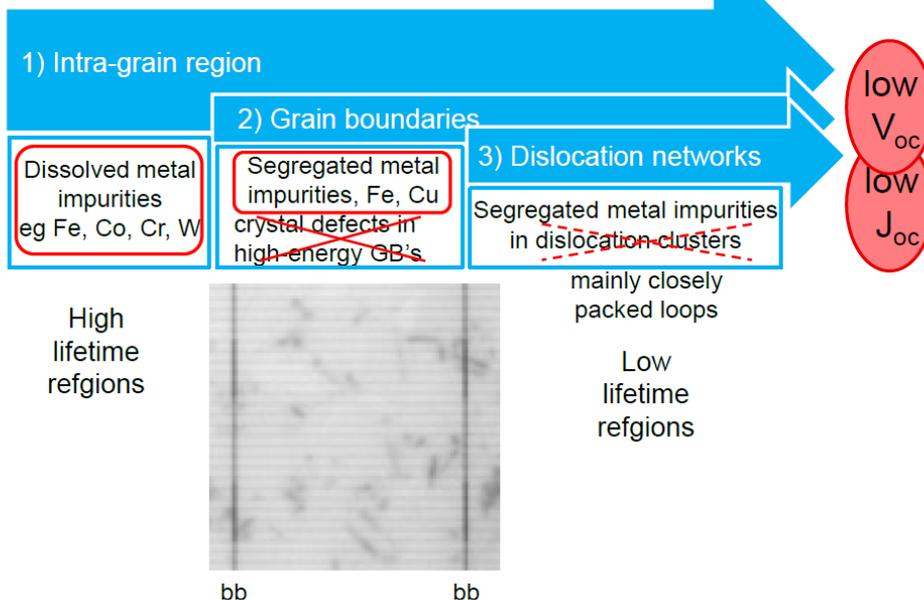


図 2 4 . 多結晶Si太陽電池特性に及ぼす重金属、結晶粒界、転位の影響 (Dr. Pietro Altermatt提供)

最近、多結晶Siでも、2ms近い小数キャリア寿命が得られている。今回の発表では、オーストラリア国立大、Fraunhofer CSP、Univ. Konstanz、Max-Planck-Inst. of Microstructure Physics, MIT, and Ohio State Univ.との共同研究の成果が報告された。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、図 2 4 に示すように、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

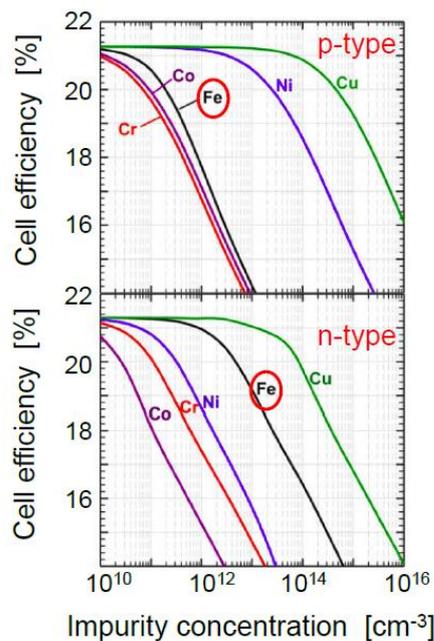
低減には、むしろ粒径が小さい方が、今の所良い。小粒界では、局所的応力の低減による転位密度低減の効果と考えている。2.2Ωcm多結晶のAl<sub>2</sub>O<sub>x</sub>(ALD)パッシベーションにより、少数キャリア寿命τ>1150μsが得られている。粒界は、それほど、効率には効かず、転位密度やB-OやFeiなどの重金属が、効率に効いている。

図25は、結晶Si太陽電池効率におよぼすFe等重金属濃度の効果を示す。p-type、n-type Si多結晶のShockley-Read-Hall寿命(SRHτ)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、SRHτ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).)。20Ωcm FZ-SiのCOS仕様は、τ>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21.3% (Voc=667.8mV、Jsc=39.8mA/cm<sup>2</sup>、FF=80.0%)の現状だか、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% (Voc=667.2mV、Jsc=40.2mA/cm<sup>2</sup>、FF=79.9%)が期待できる結果が出ている。

### Impurities in p- and n-type Si



- Metal impurities tend to be donor-like
- Therefore, metal states are more active in p-type Si than in n-type



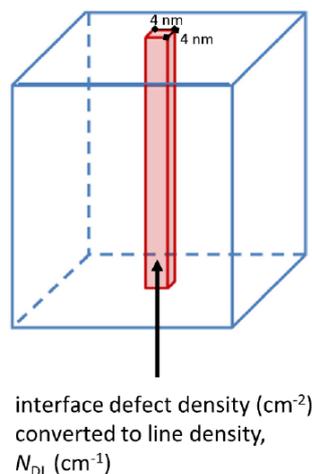
Simulated cell efficiency

Schmidt, Lim, Walter, Bothe, Gatz, Dullweber, Altermatt, IEEE J PV 3, 114 (2013)

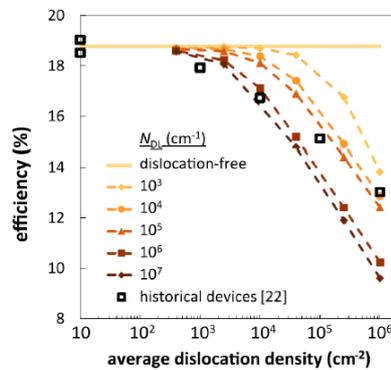
28

図25. 結晶Si太陽電池特性に及ぼす重金属の効果 (Dr. Pietro Altermatt提供)

図26は、結晶Si太陽電池効率におよぼす転位密度の効果を示す、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、エミッタやL-BSFの改善、τ>2ms等により、22.5%以上の効率が期待できるとまとめた。



Modeling dislocations with different recombination strengths (Sentaurus Device)



Needleman, Buonassis, MIT

Needleman, Wagner, Altermatt, Xiong, Verlinden, Buonassisi, Sol En Mat &amp; SC 158, 29 (2016) 31

図 2 6 . 結晶Si太陽電池効率におよぼす転位密度の効果 (Dr. Pietro Altermatt提供)

(2) この他、カネカから、バックコンタクトヘテロ接合単結晶太陽電池で、26.7%の世界最高効率太陽電池の更新、Fraunhofer-ISEから、TOPcon n-Siベースの単結晶Si太陽電池、多結晶Si太陽電池で、各々、効率25.3%、21.1%の発表があった。

### 5.5 キャラクターゼーション :

David S. Gingerら (Univ. Washington) は、“Probing nanoscale heterogeneity in thin-film PV: Perovskite to polymers” と題して、プレーナリ講演を行った。PVによるクリーンエネルギーのさらなる展開のためには、製造のスケールアップ、デバイスキャラクターゼーション、システムインテグレーションが重要である。キャラクターゼーションに関しては、図 2 7 に示すように、ナノスケールの構造に敏感な次世代太陽電池CIGS、CZTS、量子ドットやペロブスカイトや有機太陽電池等、次世代太陽電池のナノスケールの評価解析が必要である。講演では、走査型プローブ顕微鏡と10nmスケールの分解能の電氣的光学的評価（光収集電流やキャリア寿命評価）の複合評価解析によるプロセス、構造やデバイス特性、特に、局所構造や特性との相関研究の可能性を言及している。ペロブスカイト太陽電池の評価解析の事例が紹介された。405nm励起によるフォトルミネンスが測定され、14.5%（ $V_{oc}=1.00V$ 、 $J_{sc}=18.3mA/cm^2$ 、 $FF=79.3\%$ ）太陽電池の外部発光効率（ERE）は、 $10^{-4}\%$ との事である。最高効率22.1%のペロブスカイト太陽電池でさえ、EREは、0.02%であり、GaAs太陽電池のERE22.8%、結晶Si太陽電池のERE約1%に比べて、低く、課題は多い。

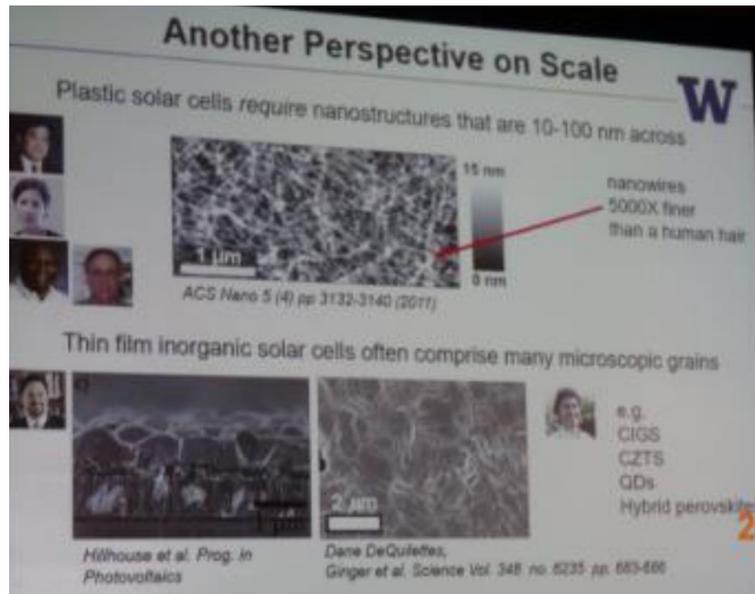


図 2.7. ナノスケールの評価解析の一例（石村氏提供）

## 5.6 ペロブスカイトおよび有機太陽電池分野：

(1) Michael D. McGehee (Stanford Univ.) は、“Making perovskite tandem solar cells efficient and stable enough to be a gamechanger” と題して、プレーナリ講演を行った。ペロブスカイト太陽電池が最近のトピックスの一つとなり、多くの研究者、技術者が参入している。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、1.56eV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、5~16meV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22.1%（面積  $0.0946\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=1.105\text{V}$ 、 $J_{sc}=24.97\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=80.3\%$ ）の変遷、最近の研究開発の状況が述べられた。図 2.8 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).）。

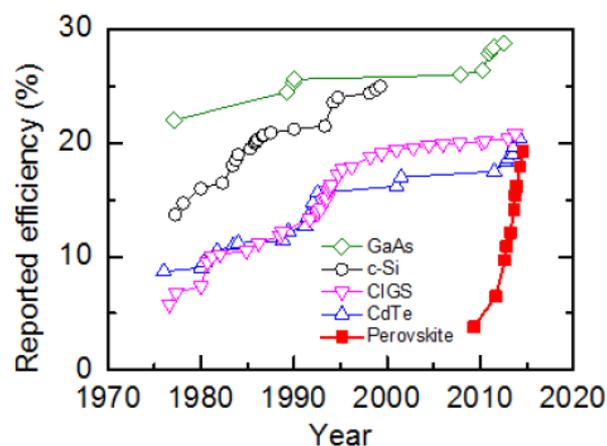


図 2.8 ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷と他の太陽電池の効率変遷（29<sup>th</sup> EU-PVSEC会議ハイライト：Dr. A. Jaeger-Waldau提供）

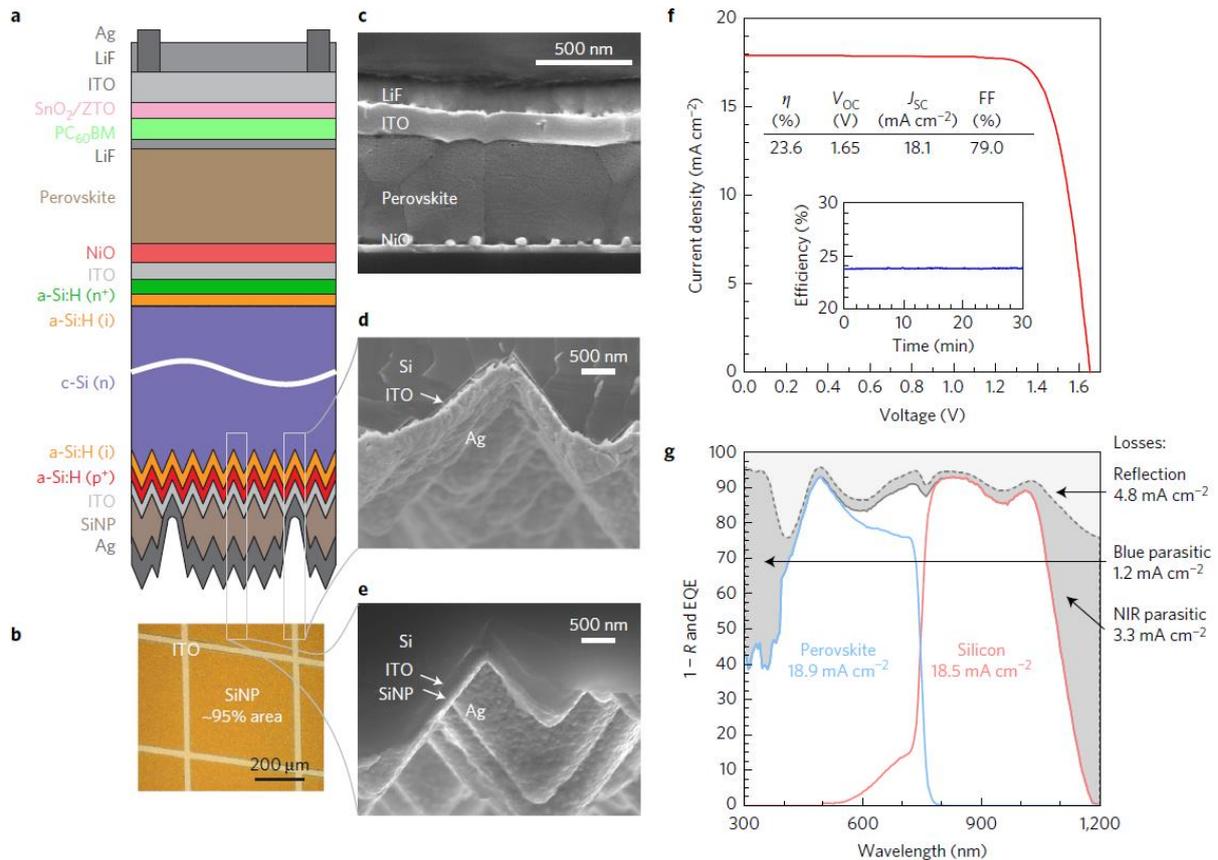


図 29. ペロブスカイト/ヘテロ接合SiタンデムセルのI-V特性 (K. A. Bush et al., Nature Energy 2, 17009 (2017).)

講演では、Siボトムセルとのタンデム太陽電池のアプローチが紹介された。トップセル太陽電池用トップセルの候補として、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $E_g=1.6\text{eV}$ )、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  ( $E_g=1.6\text{eV}$ )、 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$  ( $E_g=1.48\text{eV}$ )、 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbBr}_3$  ( $E_g=1.48\text{eV}$ )、の化合物がある。バンドギャップ1.68eVのペロブスカイトトップセルとアリゾナ州立大学の単結晶Siボトムセルのモノリシック構造2接合タンデム電池(1cm<sup>2</sup>)で、図29に示すように、効率23.6% ( $V_{oc}=1.65\text{V}$ 、 $J_{sc}=18.1\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=78.0\%$ ) が得られている。効率30%の実現の可能性がある。ペロブスカイト同士の2接合タンデム太陽電池も作製され、効率17.0%の状況である。ガラスでサンドイッチし、端面をゴムで封止したペロブスカイト単接合太陽電池の85℃、85%の高温高湿試験1000時間、85℃～-40℃の熱サイクル試験200サイクルがなされ、劣化は10%程度との事である。

(2) ANUは、バンドギャップ1.73eVのCs系ペロブスカイト単接合太陽電池で、効率17.4%を得ており、Cs系ペロブスカイトトップセルと効率23.9%の単結晶Si太陽電池のメカニカルスタック4端子2接合タンデム太陽電池で、効率26.4% (Siボトムセルの寄与は、10.4%)を得ているとの事である。

## 5.7 宇宙用太陽電池およびシステム分野：

Christophe C. Allaud (JPL) は、“Low cost applied to large constellations” と題して、プレーナリ講演を行った。2012年、Greg Wylerによって設立された米国のベンチャー企業OneWebは、人工衛星から電波を飛ばし、通信インフラの届かない地域にもインターネットを届ける技術を開発している。世界銀行の調査によれば、全世界74億人のうち、インターネットを使っているのは32億人と半数にも満たないとの事であり、先進国とこうした地域の間には、教育やビジネスの機会が限られてしまうデジタル・デバイド（情報格差）が生まれているので、必要性はあるであろう。クアルコムやエアバスといった通信会社やメーカーに加え、2016年12月、ソフトバンクが同社に10億米ドルの投資をするというニュースもあった。OneWebでは、上記企業から得た資金をもとに、米国フロリダ州に、大量衛星製造工場を建設している。2年間につき900基もの衛星を従来よりもかなり低コストで製造する計画である。OneWebが開発しているような小型衛星は、過去10年で1480基だった打ち上げ数が、今後10年で9000基にまで伸びるという予測もあるとの事である。今後10年を見据えている。GaAs系3接合太陽電池アレイのコストターゲットは<\$100/W、出力比重量は<100g/W、打ち上げコストターゲットも\$20K/kgであると述べられた。衛星設計、自動アセンブリラインに加え、-100°C~100°Cの熱サイクル試験、振動試験、衝撃試験を進め、当面、第一世代の1800枚の太陽電池パネルの性能充足を目指すとの事である。

## 5.8 モジュール、製造、分野：

(1) Chrisophe Ballif (EPFL) は、“Novel designs and materials for durable PV modukes” と題して、プレーナリ講演を行った。彼の講演ファイルを入手したが。公知しないようにとの条件があり、省略させて頂く。

(2) モジュール技術の現状については、前々回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30、図31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。

Survey of the industrial PV modules

Parameterization of the model [1] for Mono-, Multi-Si and Thin-Films

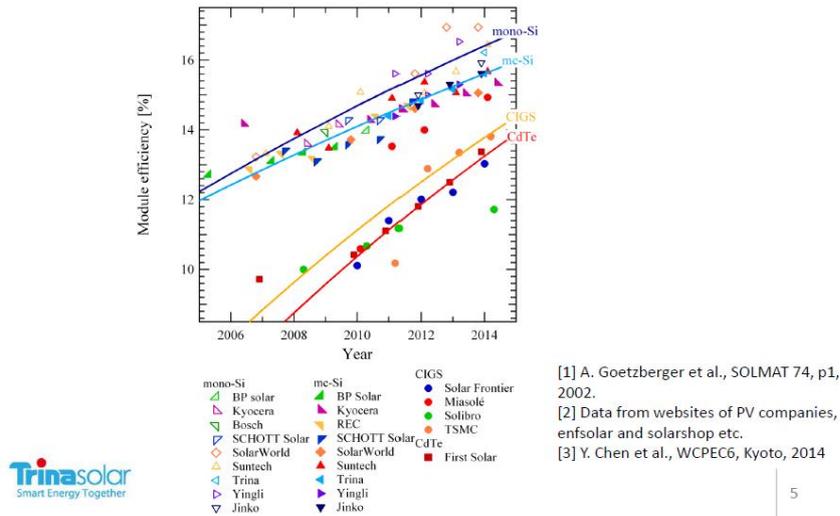
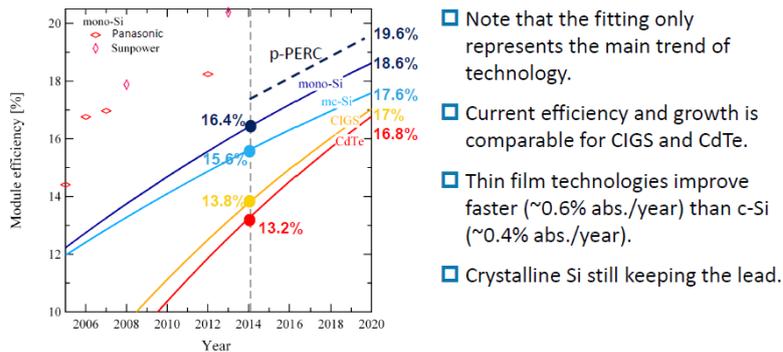


図 3 0 . 結晶Siおよび薄膜太陽電池モジュールの高効率化の進展 (Dr. P. Verlinden提供)

Modeling of module efficiency



[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 3 1 . 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)

また、図 3 2、図 3 3 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。

## Cost of PV modules

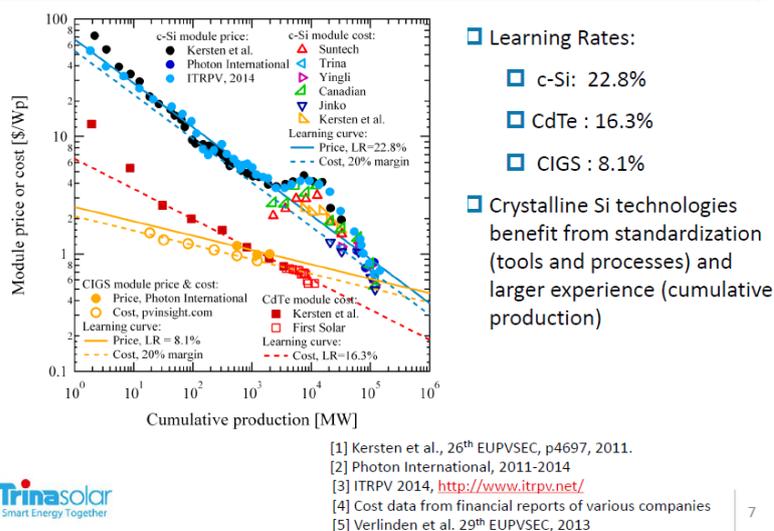


図 3 2 . 結晶Si、薄膜太陽電池モジュールの低コスト化の進展 (Dr. P. Verlinden提供)

## Cost of PV modules (Projection to 2020)

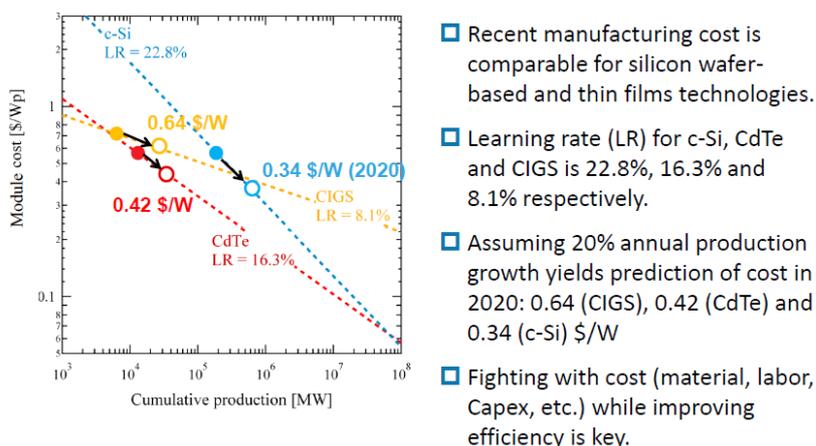


図 3 3 . 結晶Si、薄膜太陽電池モジュールの低コスト化の今後の予想 (Dr. Verlinden提供)

### 5.9 信頼性分野 :

(1) T. John Trout (DuPont PV Solutions) は、“Module durability - Connecting field results accelerated testing, and materials” と題して、プレーナリ講演を行った。講演では、DuPontのフィールド試験、UV、湿度、温度、熱サイクルなどの加速試験に基づく太陽電池モジュール、コンポーネント、材料の劣化に関する評価解析結果が述べられた。フィールド試験に関しては、197のフィールド、1,919,050の太陽電池パネル、453MWで、平均動作期間3.4年の結果が報告された。劣化なしが、78%、劣化の内、セル劣化11.3%、バックシート劣化7.5%、EVA劣化2.7%、その他劣化0.5%である。これらの内11.7MWの屋根モジュールに関しては、劣化なしが、63%、劣化の内、セル劣化11.3%、バックシート劣化25.3%、EVA劣化0.2%、その他劣化0.1%である。バックシート劣化に関する材料の違いも述べられた。測定は、出力損失、IV特性測定、コンタクト抵抗、ELイメージング、目視、などである。年間劣化率は、平均0.5~0.8%/年だが、サイトに依存し、砂漠が1.2%/年と大きい。

## 5.10、11 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：

Ateve J. Steffel (Pepeco) は、“Distribution grid innovation driven by PV solar integration” と題して、プレーナリ講演を行った。PVの技術開発で、太陽電池パネルの性能向上、長寿命化、コスト低減がなされ、同様に、インバータ分野でも、同様な開発がなされている。Electricityの立場から、将来のPVの大量導入に向け、信頼性の高い、安全な電気系統の実現のための課題や新しい機能の創製が述べられた。結論は、表5に、まとめられる。

表5. Smart Energyの創製に向けての方向性

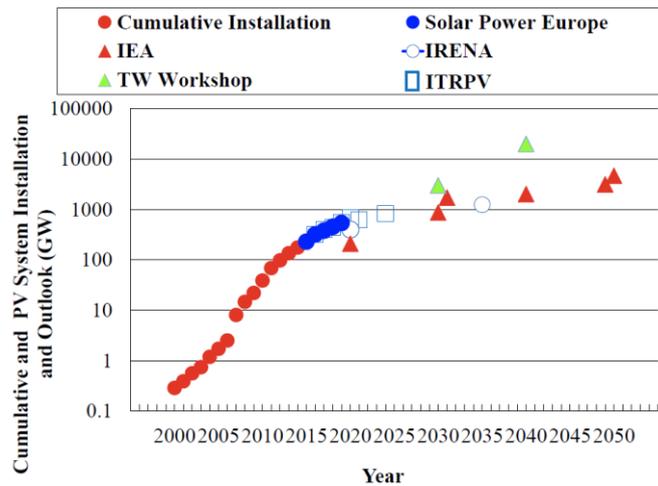
Smart grid	Independent system operation, Local distributed company, Micro grids
Smart distributed energy resource (DER)	Voltage and frequency disturbance, Autonomous & centralized control, With battery
Smart promise	Home energy management system, DER, EV, Remote Access & control, Energy efficient & control, Direct use of DC, Participation in micro grids

## 5.12 政策、市場、普及分野：

(1) Becca Jones-Albertus (DOE) は、“SunShot2030” と題して、プレーナリ講演を行った。詳細は、同じDOEのCharile Gayによる基調講演5.0を参照されたい。

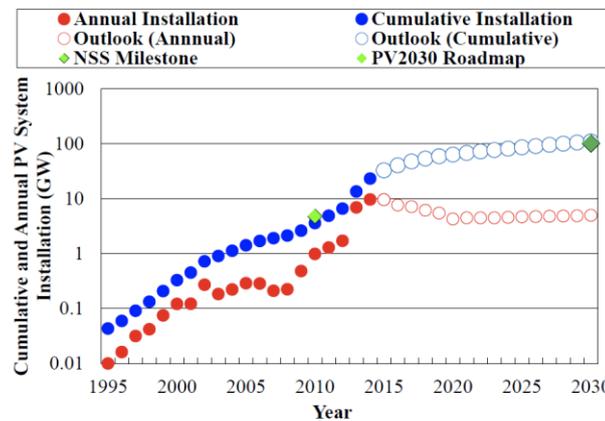
(2) Joint Special Sessionとして、“International Collaboration and PV’s Role in Creating a ‘Smart Mobility Society’” の特別セッションが企画され、約150名の参加者があった。

冒頭、オーガナイザーの一人であるM. Yamaguchi (豊田工大) からIntroductory talkがなされた。図34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。前回会議のEicke Weber (FhG-ISE) の特別講演にあるように、昨年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35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35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36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。今回は、用途開拓を含め、モビリティ社会構築に向けたPVの役割を討論テーマとした。



### World's PV Installation Outlook

図 3 4 . 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 (山口講演資料)



### Japan's PV Installation Outlook (RTS, PV Market 2015, 2015.7)

図 3 5 . 日本におけるPVシステムの累積導入量のRTSによる予測 (山口講演資料)

### 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.*

11

図 3 6 . 将来のPVの発展のために重要な事項 (山口講演資料)

Akinori Satou (Toyota Motor Co.) は、“Toward new mobility society by using solar energy” 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 3 7 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<sub>2</sub> 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。

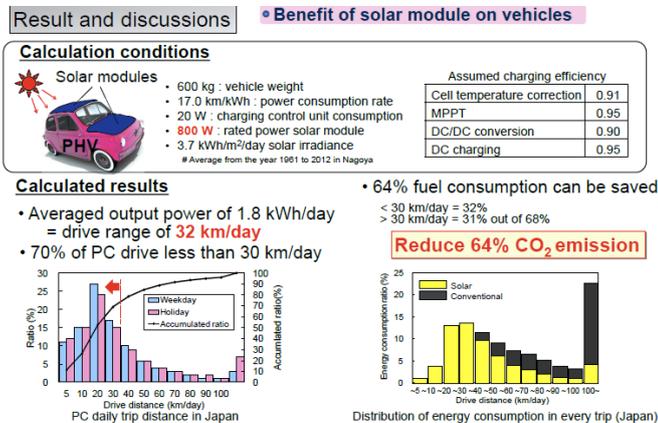


図 3 7. 太陽電池の車載によるメリット (佐藤氏提供)

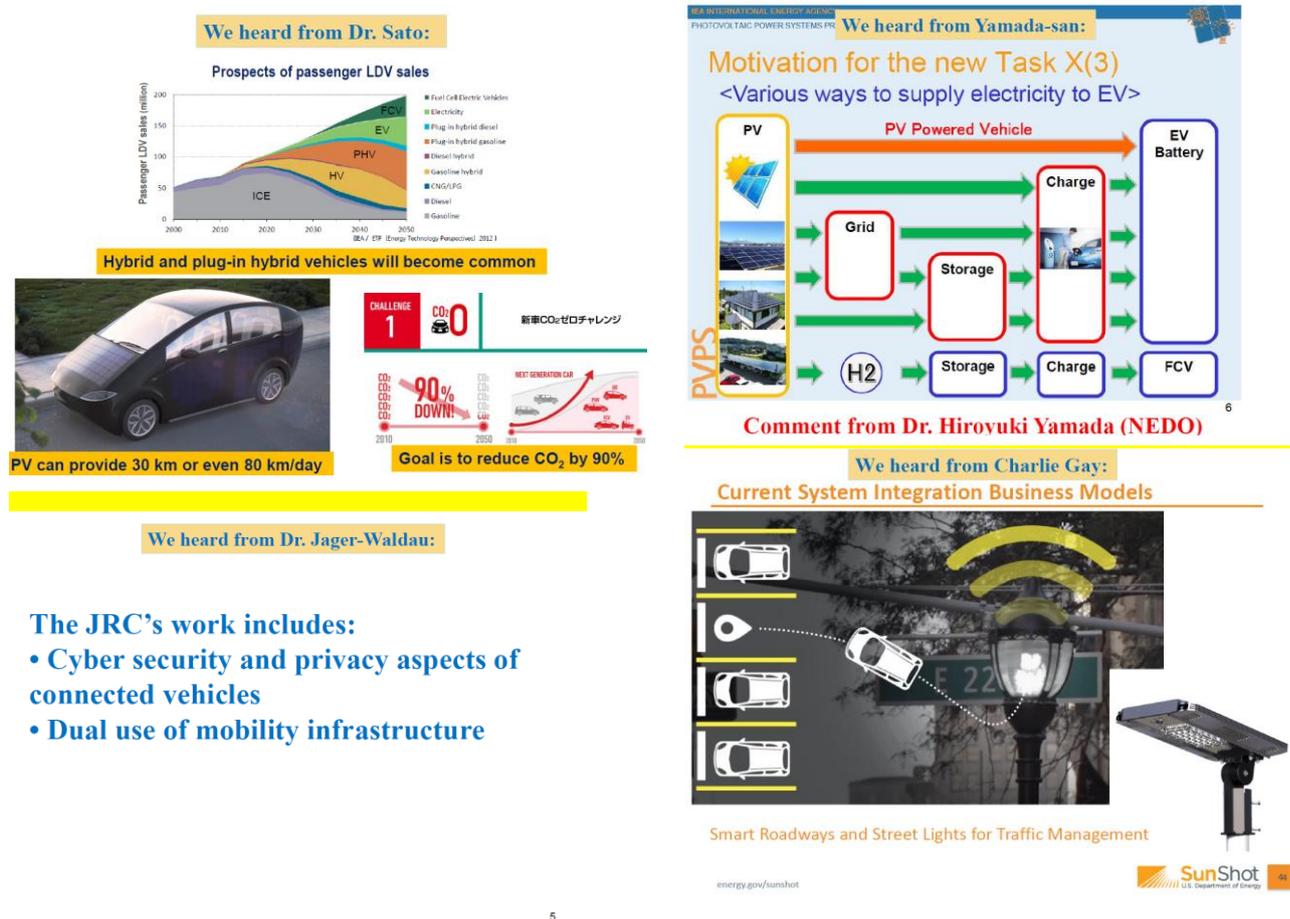


図 3 8. 特別セッションのまとめ (Dr. Sarah Kurtz提供)

Larry Kazmerski (NREL)とAngele Reinders (Univ Twente)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Charie Gay (DOE)、Arnulf Jaeger-Waldau (EC-JRC)、Hiroyuki Yamada (NEDO)から8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。PV-powered vehiclesの市場、研究開発、国際共同研究や連携の可能性に加えて、車載用太陽電池の具体的な候補について、特別セッションテーマが“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、活発なパネル討論や聴衆との意見交換がなされた。まとめは、オーガナイザの一人であるSarh Kurtz (NREL)からなされた。図38に、まとめを示す。

## 6. 感想

他のEU-PVSECやPVSECに比べて、本会議の質の高さを感じる。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39に示すように、まだまだ、国の支援が必要と言える。図39は、データは古いですが、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さらなる高性能化、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 and PV’s Role in Creating a ‘Smart Mobility Society’”に示すように、車載等用途開発や、Dr. C. Gay (DOE)の基調講演にあるように、Siタンデムを含む効率35%超えの超高効率太陽電池モジュールの研究開発、バッテリーとのハイブリッド化が、今後の方向性と考えられる。2030年の3TW、2040年の20TWの実現のためには、信頼性やリサイクル等も課題である。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。

Correlation between PV budget and PV system installation

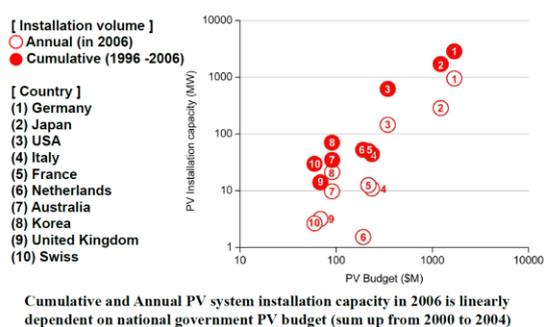


図39. 主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算（研究開発費を含む）との相関（ICSU-ISPRES Report）

次回の45<sup>th</sup> IEEE PVSCは、2018年6月10日～15日、PVSEC-28と34<sup>th</sup> EU-PVSECとの合同会議WCPEC-7として、米国・ハワイ島のHilton Waikoloa Villageで開催予定である。32<sup>nd</sup> EU-PVSECは、2017年9月25日～29日、オランダのアムステルダムで、PVSEC-27は、2017年11月12日～17日、大津で、開催予定である。

(以上)