

第 33 回太陽光発電欧州会議（33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition）報告

2017. 9. 30

山口真史（豊田工大）

1. 開催月日：2017年9月25日～9月29日。

2. 開催場所：RAI Convention & Exhibition Centre（アムステルダム、オランダ）。

3. 本会議の概要：

毎年開催される太陽光発電に関する欧州会議である。今回の会議の組織委員長は、Arno Smets（Tech. Univ. Delft）で、論文委員長は Nigel Taylor（EC-JRC）であった。今年は、77 の国と地域から 1,742 名の参加者があった。前回より、約 120 名増、前々回より、約 630 名程少ないが、太陽光発電に関する最大規模の会議となった。国別参加者数は、入手できていない。

図 1 は、国別発表論文件数を示す。65カ国から、前回会議より70件減、前々回会議より131件減ではあったが、1,180件の論文発表があった。国別では、①ドイツ241件、②オランダ93件、③日本66件、④フランス52件、⑤スイス47件、⑥中国46件、⑦イタリア43件、⑧米国42件、⑨韓国41件、⑩スペイン33件、⑪台湾33件、⑫モロッコ33件の順であった。

**Number of Papers presented at the 32nd EU-PVSEC
(Amsterdam, The Netherlands; September 25-29, 2017, 1110 papers)**

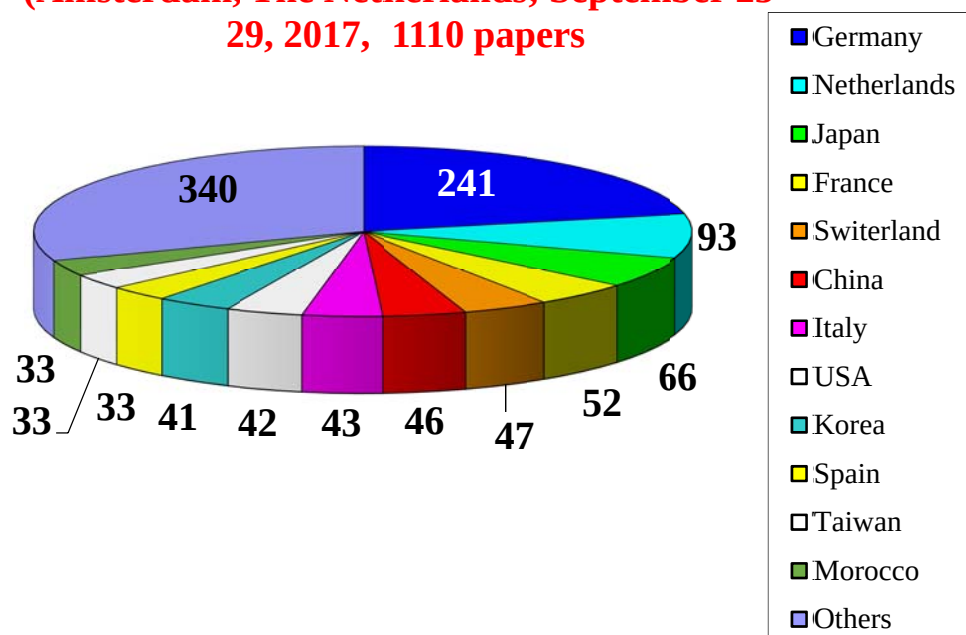


図 1. 国別発表論文件数（RTS(株)提供）

図2は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①結晶Si系285件、②PVシステム、系統連携238件、③薄膜系（薄膜Si、CIGS・CdTe等II-VI、色素・有機）205件、④モジュール、信頼性186件、⑤先進太陽電池技術106件、⑥市場、政策54件、⑦集光太陽光発電、宇宙34件、の順であった。

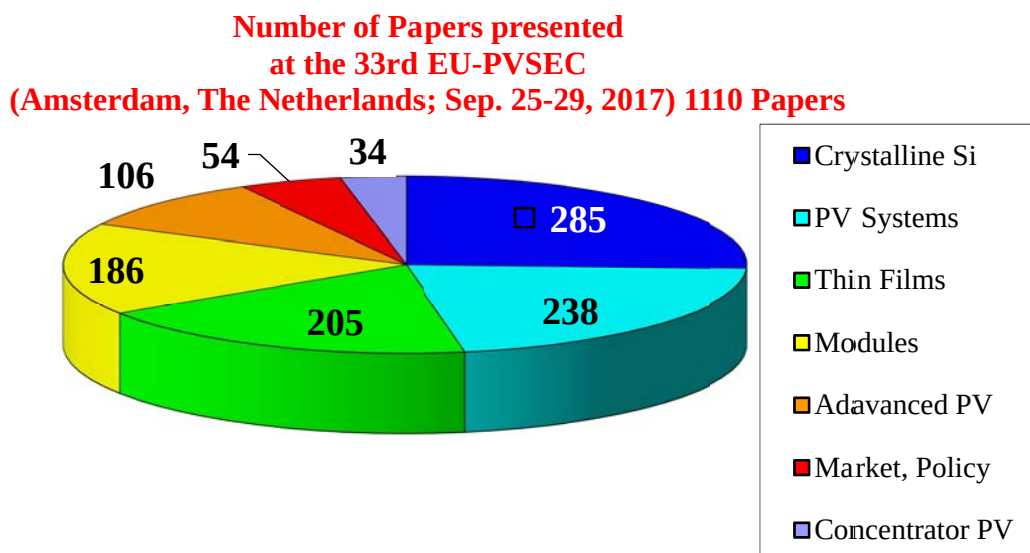


図2. 発表論文件数の分野別内訳（RTS(株)提供）

Becquerel Prizeは、Stefan Nowak(Nowak Energy & Technology) が受賞した。2001年異以来、IEA-PVPSの議長、2003～2013年のEU PV Technology Platformの副議長、第27回EU-PVSECの組織委員長、その他、各種PVネットワークのコアメンバーなど、長年にわたる太陽光発電への貢献などの業績が評価された。受賞記念講演では、・grid integration、・PV & storage、・PV & building、・PV & mobility、・PV & energy systems、など、太陽光発電の今後の方向性が示された。

4. 主な発表論文の概要：

開会式では、（1）組織委員長のArno Smetsの挨拶があった。オランダの特色の紹介の後、BIPVやenergy carrierとしてのmobilityの視点の重要性が示された。（2）Ed Nijpels（Chairman Standing Committee of the National Agreement on Energy for Sustainable Growth, The Netherlands）は、前大臣の視点で、①consistent energy policy、②cooperation of many organizations、③financing、④to establish energy sectorが、重要で、PVのInnovationを期待すると述べた。（3）Mark Van Stiphout（European Commission, Directorate General Energy）は、クリーンエネルギー社会の創製に向け、研究開発は重要で、性能向上やコスト低減に加え、BIPVやバッテリーとの連携、新機能、サービスや市場開拓が必要であると述べた。（4）Jan Marc Luchies（Chief Technology Officer, Tempress, Amtech Systems, The Netherlands）は、1967年創立のオランダ企業TEMPRESSの電気炉、PECVDやLPCVDなどの取り組みや成功談を述べた。（5）Wim Sinke（Director TKI – Top consortium for Knowledge and Innovation, Topsector Energy, Manager Development ECN Solar Energy）は、PVの研究開発の重要性を述べると共に、上記（3）と同様の今後の方向性を示した。

4. 1 パネル討論：

Paolo Frankl (IEA) がモデレータとなって、“T Multi-Terawatt Photovoltaics - Going Beyond Wholesale Electricity” のテーマで、パネル討論がなされ、活発な質疑がなされた。Paolo Franklは、IEAのPVロードマップの紹介の後、PVのみならず、building、EVや水素などモビリティの視点でのパネル討論の方向性を示した。以下に、パネリストの主な意見を紹介する。(1) Georgina Grenon (Director, 100%RE Solutions ENGIE, France) は、輸送分野でのグリーン化が重要で、electricityとの連携が重要であり、可能性の基づく政策が必要であると述べた。(2) Nicola Melchionti (Head of European Public Affairs and Regulation, Enel, Belgium) は、PVを含む再生可能エネルギーは、将来、間違いなく、メインとなろう。今は、過渡期で、ビジネスモデルや市場設計が求められている。基礎に基づき政策が必要であると述べた。(3) Thomas Nowak (Secretary General European Heat Pump Association AISBL (EHPA), Belgium) は、buildingに関して、システムインテグレーション、信頼性や性能に関して、意見が述べられた。可能性の基づく政策が必要であると述べた(4) Michael Schmela (Executive Advisor Solar Power Europe (SPE) and Global Solar Council (GSC)) は、グリーンエネルギー社会の創製に向け、アンビシャスを持ち、挑戦することが重要で、アンビシャスターゲットの設定と政策立案が必要であると述べた。(5) Marko Topič (Chairman of European Technology & Innovation Platform Photovoltaics ETIP PV) は、将来、PVは、間違いなく、No.1になるだろう。輸送についても、バッテリー対水素の競合もあるが、benefitに基づき政策が必要であると述べた。

4. 2 先進太陽電池技術分野：

III-V/Si、ペロブスカイト/Siなど、Siタンデムセルが、ホットトピックスとなっている。(1) J. Benick ら (FhG-ISE) は、“Monolithic III-V//Si Multi-Junction Solar Cell Exceeding an Efficiency of 31%” と題して、プレーナリ講演を行った。近年、シリコンベースのタンデム太陽電池が、結晶シリコン太陽電池の 29.4%の理論限界を超える可能性を有することで、注目を集めている。先に、GaInP/GaAs 2 接合セルと TOPCon 結晶 Si ボトムセルとのウェハボンディングによる GaInP/GaAs/Si 3 接合セル (面積 3.98 cm^2) で、効率 32.3% ($V_{oc}=3.085\text{V}$ 、 $J_{sc}=12.6\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=83\%$) が報告してきた。図 3 に、ウェハボンディングによる GaInP/AlGaAs/Si 3 接合タンデム太陽電池の作製フローを示す。Si 下部太陽電池の V_{oc} 向上、電流整合の改善が課題であった。Si 下部セルの再結合低減のため、 SiO_2 、n-poly Si、p-poly Si による passivated contacts、P イオン注入エミッタ層の最適化により、 V_{oc} は、628mV から 692mV に、改善されている。light trapping による電流整合も改善され、図 4 に示すように、2 端子構造としては、世界最高の効率 33.3% (面積 3.127 cm^2 、 $V_{oc}=3.127\text{V}$ 、 $J_{sc}=12.7\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=83.8\%$) を達成している。本会議のハイライトとしても、高い評価を得ている。

ヘテロエピ成長による InGaP/GaAs/Si 3 接合セルでは、効率 19.7% ($V_{oc}=2.52\text{V}$ 、 $J_{sc}=10.0\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=84.3\%$) 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。EPFL と NREL、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。

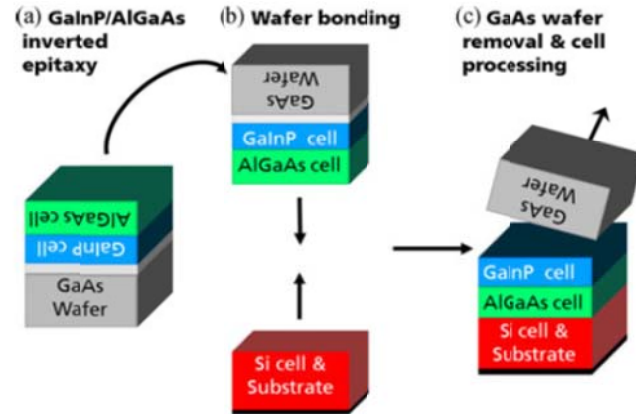


図 3. ウエハボンデフィングによる GaInP/AlGaAs/Si 3 接合タンデム太陽電池の作製フロー (R. Cariou et al., *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7, 367 (2017)).

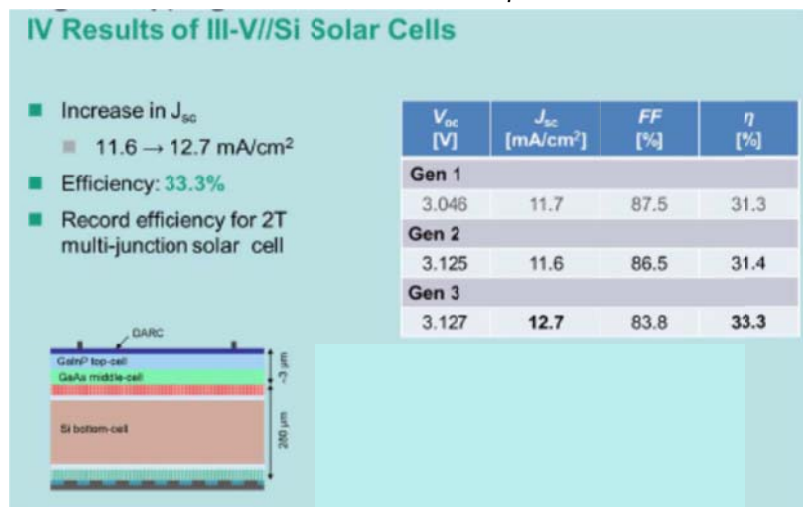


図 4. GaInP/GaAs/Si 3 接合太陽電池の構造と特性 (Dr. N. Taylor, 33rd EU-PVSEC のハイライト)

(2) M. Riennacker ら (ISFH) は、NREL との共同研究の成果として、“Maximum Power Extraction Enabled by Monolithic Tandems Using Interdigitated Back Contact Bottom Cells with Three Terminals” と題して、プレーナリ講演を行った。これまで、Si 下部セルとして、バックコンタクト構造を採用し、4 端子構成の GaInP/Si 2 接合、GaInP/GaAs/Si 3 接合タンデム太陽電池で、各々、効率 31.5%、35.4%を達成している。今回、4 端子構成の実装面での課題を克服するため、TCO コンタクトによる 3 端子、2 端子構成が検討されている。Si 下部セルのパッシベーションや電流整合に関する結果も紹介された。

(3) B. Ehrler ら (AMOLF) は、“Indirect to Direct Bandgap Transition in Methylammonium Lead Halide Perovskite” と題して、プレーナリ講演を行った。有機-無機ハイブリッド型太陽電池、4 端子構成のペロブスカイト/Si 2 接合タンデム太陽電池は、効率 26.4% の状況にある。講演者のグループは、効率 22%を、2013 年に達成しているとの事である。今回、ペロブスカイト太陽電池材料のバンド構造に関する検討結果が紹介された。長い間、メチルヨウ化鉛ペロブスカイト(MAPI)は、直接バンドギャップ半導体を考えられていた。ただ

し、直接バンドギャップとスピン軌道結合 Rashba 分裂 (50~75 meV) の結果として、理論計算が MAPI のわずかな間接バンドギャップを予測している。今回、圧力印加による直接、間接バンド構造の変化をフォトルミネッセンス測定で解析した結果が紹介された。

(4) M, Yamaguchi ら (豊田工大) は、“Analysis for Efficiency Potential of High Efficiency Solar Cells and Next Generation Solar Cells” と題して、各種太陽電池の高効率化の可能性について、考察した結果が述べられた。太陽電池特性は、少数キャリア寿命 (拡散長) に依存する。放射再結合寿命 τ_{rad} は、次式で与えられる。

$$\tau_{\text{rad}} = 1/\text{BN} \quad (1)$$

ここで、N は、キャリア濃度、B は、放射再結合確率で、Si、GaAs では、各々、 $2 \times 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ [3]、である。実効寿命 τ_{eff} は、次式で与えられる。

$$1/\tau_{\text{eff}} = 1/\tau_{\text{rad}} + 1/\tau_{\text{nonrad}} \quad (2)$$

ここで、 τ_{nonrad} は、非放射再結合寿命で、次式で表される。

$$1/\tau_{\text{nonrad}} = \sigma v N_r \quad (3)$$

ここで、 σ は、非放射再結合中心による少数キャリアの捕獲断面積、 v は、少数キャリアの熱速度、 N_r は、非放射再結合中心密度、である。従って、太陽電池の高効率化のためには、結晶性の改善、非放射再結合中心として働く点欠陥、転位、結晶粒界、界面準位、表面準位、不純物準位など欠陥密度の低減が必要である太陽電池の高効率化のためには、短絡電流密度 J_{sc} 、開放端電圧 V_{oc} および曲線因子 FF の改善が必要である。開放端電圧 V_{oc} は、次式で与えられる。

$$V_{\text{oc}} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_L}{J_0} + 1 \right) \quad (4)$$

ここで、 k は、ボルツマン定数、 T は、絶対温度、 q は、電子電荷、 J_L は、光生成電流密度、 J_0 は、飽和電流密度である。 V_{oc} の改善のためには、飽和電流密度 J_0 の低減が必要である。

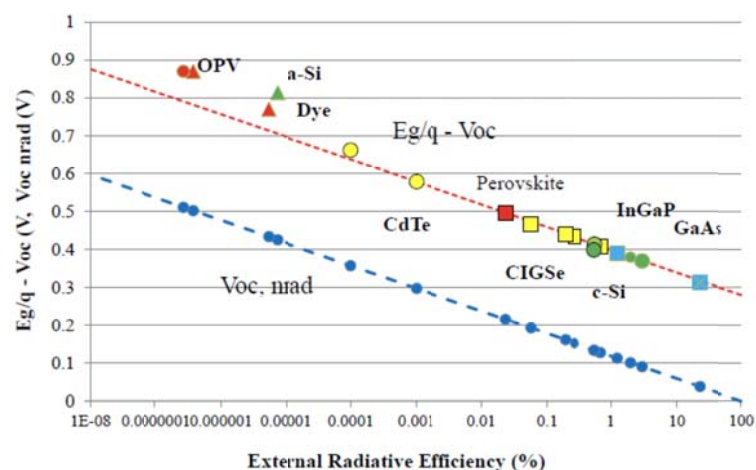


図5. 各種太陽電池のバンドギャップエネルギー E_g に対する開放端電圧損失($E_g/q - V_{\text{oc}}$)と非放射再結合開放端電圧 V_{oc} ($V_{\text{oc, nrad}}$)の外部発光効率(ERE)依存性
(M. Yamaguchi et al, J. Mater. Res. (2017) (in press).)

図5は、種々の太陽電池材料のバンドギャップに対する電圧損失($E_g/q - V_{\text{oc}}$)および非放

射再結合電圧損失 ($V_{oc, nrad}$) を外部発光効率 (external radiative efficiency (ERE)) の関数として示す。開放端電圧 V_{oc} は、ERE に対して、次式で表される。

$$V_{oc} = V_{oc, rad} + \frac{kT}{q} \ln(ERE) \quad (5)$$

ここで、第二項は、非放射再結合電圧損失であり、放射再結合電圧 $V_{oc, rad}$ は、次式で与えられる。

$$V_{oc, rad} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_L(V_{oc, rad})}{J_{0, rad}} + 1 \right) \quad (6)$$

ここで、 $J_L(V_{oc, rad})$ は、放射再結合のみの場合の開放端での光生成電流密度で、 $J_{0, rad}$ は、放射再結合のみの場合の飽和電流密度である。図 5 の $\Delta V_{oc, rad} = E_g / q - V_{oc, rad}$ の値として、

0.28V が用いられた。図 5 に示すように、結晶 Si 太陽電池においてさえ、まだ、非放射再結合損失が多くあり、少数キャリア寿命改善や各種再結合損失の低減により、さらなる高効率化が可能であると言える。解析では、開放端電圧損失 ($E_g / q - V_{oc}$) を外部発光効率 (ERE) を尺度として、また、抵抗損失は、曲線因子 FF に組み込んだ。

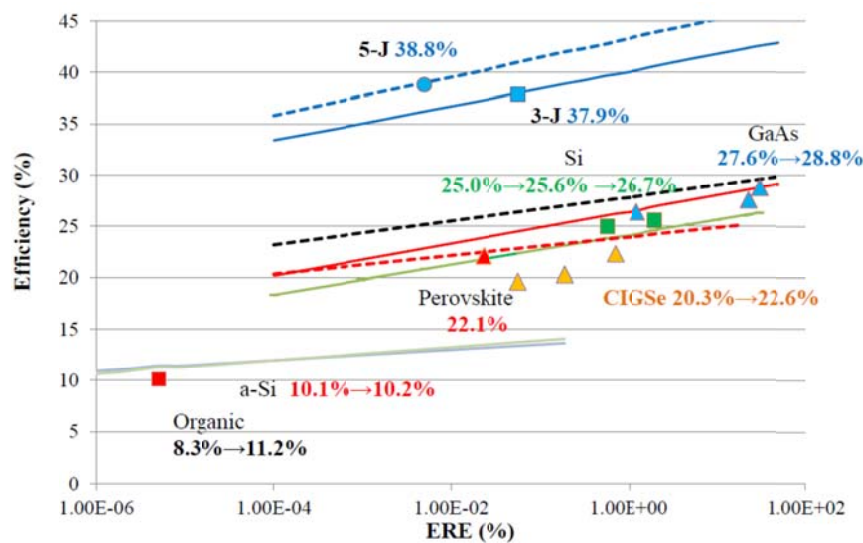


図 6．各種太陽電池の効率と計算値の外部発光効率 (ERE) 依存性 (M. Yamaguchi et al, Prog. in PV, (2017) (to be published).)

図 6 に、各種太陽電池の効率と計算値の外部発光効率 (ERE) 依存性を示す。結晶 Si 太陽電池は、規格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.05 において、外部発光効率 (ERE) を 1% から、30% に改善することにより、28.8% の高効率化が期待できる。GaAs 太陽電池は、規格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.025 において、ERE を 28.8% から、40% に改善することにより、30.0% の高効率化が期待できる。III-V 族 3 接合太陽電池は、ERE を 0.05% から 10% へ改善することにより、規格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.025 で、非集光効率 37.9% から、42% へと、高効率化が可能である。5 接合太陽電池の場合、ERE を 0.005% から 1% へ改善することにより、規

格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.025 で、非集光効率 38.8% から、43% へと、高効率化が可能である。CIGaSe 太陽電池は、規格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.05 において、ERE を 0.5% から、10% に改善することにより、26.5% の高効率化が期待できる。CdTe 太陽電池は、規格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.05 において、ERE を 0.1% から、5% に改善することにより、26.4% の高効率化が期待できる。次世代太陽電池についても考察した。CZTS(Se) 太陽電池は、ERE を 0.001% から 1% に改善することにより、20% 以上の高効率化が可能である。量子井戸・ドット太陽電池は、ERE を 0.1% から 10% に改善することにより、効率 25.8% の実現が期待できる。ペロブスカイト太陽電池は、ERE を 0.02% から 10% に改善することにより、効率 24.9% の実現が期待できる。

(5) J.E.M. Haverkort ら (Eindhoven Univ. Tech.) は、“Efficiency Limit of 117.8% Efficiency Nanowire Solar Cells” と題して、ナノワイヤ太陽電池の現状と効率向上の見通しを述べた。上辺 90nm、底辺 270nm、長さ $3\mu m$ の InP ナノワイヤ太陽電池で、効率 17.8% ($V_{oc}=0.766V$ 、 $J_{sc}=29.3mA/cm^2$ 、 $FF=79.4\%$) を得ている。1-sun、6000 倍集光で、各々、効率 33.5%、46.7% が期待できるとしている。被覆率の低いナノワイヤ構造太陽電池では、 $V_{oc}=0.85V$ を得ているとの事である。プレーナ構造の InP 太陽電池で、効率 24.2% ($V_{oc}=0.939V$ 、 $J_{sc}=31.15mA/cm^2$ 、 $FF=82.6\%$) の現状であり、ナノワイヤ太陽電池は、見劣りする。ナノワイヤ構造により、光反射損は軽減されるが、ナノワイヤ構造挿入により、界面再結合に起因する非輻射再結合損失による電圧低減が課題と考えられる。上記 (4) の外部発光効率 (ERE) で比較すると、プレーナ構造の InP 太陽電池で $ERE=2\%$ 、ナノワイヤ構造太陽電池で $ERE=0.0002\sim 0.02\%$ で、課題は明白のように思う。

4. 3 結晶 Si 太陽電池分野：

(1) K. Yamamoto ら (カネカ) は、“Record-Breaking Efficiency Back-Contact Heterojunction Crystalline Si Solar Cell and Module” と題して、プレーナリ講演を行った。高効率太陽電池の研究開発状況が述べられた。2014年のパナソニックのバックコンタクトヘテロ接合単結晶太陽電池で、効率 25.6%、2015年のSunPowerのバックコンタクト太陽電池で、効率 25.2%、2017年のFhG-ISEのTOPcon n-Siベースの単結晶Si太陽電池、効率 25.7%、多結晶Si太陽電池で、効率 21.9% (面積 $4cm^2$ 、 $V_{oc}=0.6726V$ 、 $J_{sc}=40.76mA/cm^2$ 、 $FF=79.7\%$) の状況にある。カネカのバックコンタクトヘテロ接合単結晶Si太陽電池およびモジュールでの最高効率の更新の発表がなされた。図 7 に、バックコンタクトヘテロ接合単結晶Si太陽電池の構造を示す。バルク再結合損失の低減による V_{oc} や FF の改善、a-Si を用いた結晶Si 表面パッシベーション技術による表面再結合速度の低減、TCO や a-Si の光吸収低減による短波長域の外部量子効率の改善、光反射損失低減、垂直および横方向の抵抗損失低減、裏面反射の活用、などの適用により、効率 26.7% (面積 $79cm^2$ 、 $V_{oc}=0.738V$ 、 $J_{sc}=42.65mA/cm^2$ 、 $FF=84.9\%$) の世界最高セル効率の更新がなされた。理論限界セル効率 29.3% ($V_{oc}=0.753V$ 、 $J_{sc}=43.6mA/cm^2$ 、 $FF=89.2\%$) に対して、 FF の改善が課題であり、 FF の改善により、効率 27.1% が可能と述べた。温度特性は、 $-0.26\%/^{\circ}C$ で、ヘテロ接合太陽電池と同等である。また、メタライズ技術等の改善により、世界最高モジュール効率 24.4% (面積 $13177cm^2$ 、 $V_{oc}=79.5V$ 、 $I_{sc}=5.04A$ 、 $FF=80.1\%$) も実現している。モジュールの新しい結果は、本年11

月19日～24日、大津で開催予定のPVSEC-27で、発表予定との事である。本会議のハイライトとしても、高い評価を得ている。

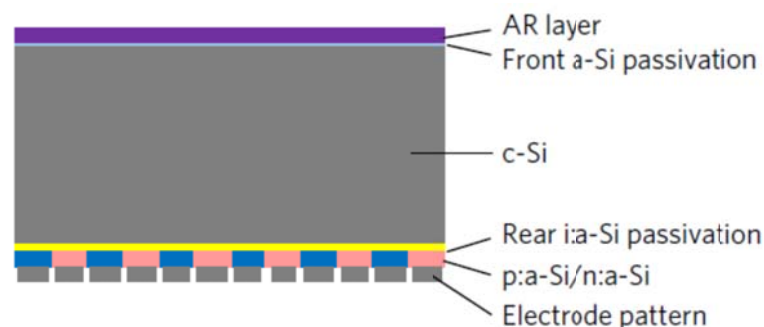


図7. バックコンタクトヘテロ接合単結晶Si太陽電池の構造
(K. Yoshikawa et al., Nature Energy, 2, 17032 (2017))

(2) I. Ceser ら (ECN) は、“Pilot Line Results of n-Type IBC Cell Process in Mass Production Environment” と題して、プレーナリ講演を行った。ECN、Yingli Solar、TEMPRESS の共同開発の成果であるバックコンタクト (IBC) bifacial 型セルモジュールで、高性能、低コストを狙うものである。ITRPV によれば、2027 年には、結晶 Si 太陽電池の 30% が、両面受光セルで、bifacial factor は、83% 以上である。n 型 PERT 技術をベースに、6 インチ n 型 CZ ウェハ (180 ~ 200 μm 厚) を使い、SiNx 表面パッシベーション + AR、表面電界層、n 型ベース層、BBBr₃、POCl₃ を用いたエミッタ層および裏面電界 (BSF) 層、SiNx 裏面パッシベーション + AR、スクリーン印刷、fire-through バックコンタクトから構成されている。Yingli の大量生産 PANDA 生産ラインで試作されている。2016 年第三四半期末、効率 19.3% だったが、メタリゼーションの改良により、第四四半期末、20.5% (面積 242,8cm²、Voc=657mV、Jsc=40.4mA/cm²、FF=77.4%) を達成した。表面パッシベーション等の改良により、2017 年第二四半期末、効率 20.9% (面積 242,8cm²、Voc=663mV、Jsc=40.5mA/cm²、FF=78.0%) に至っている。拡散パターンの最適化、BSF 層と裏面エミッタ層のアイソレーション等により、現在、効率 21.6% の状況である。2 次元モデリングによる損失解析の結果、今年末、効率 22% 達成の見通しである。コンタクト抵抗の低減、コンタクト層の飽和電流密度低減が課題で、80 μm フィンガー、>500 μm のワイド BSF 層の適用により、効率 23.5%、40 μm フィンガー、>300 μm の BSF 層の適用により、効率 23.7%、の達成の見通しである。マルチワイヤ技術や伝導性バックシートを用いたモジュール化も検討中との事である。す。

(3) R. Russell ら (IMEC) は、“Simultaneous Fabrication of n & p Contacts for Bi-Facial Cells by a Novel Co-Plating Process” と題して、プレーナリ講演を行った。Cu プレーティングプロセスをベースとした両面受光型結晶 Si 太陽電池において、コスト (LCOE) 低減に向け、n、p コンタクトの同時形成と Ag 使用量の削減 (<5mg/セル) を目指している。p-PERT、n-PERT、n-SHJ のデバイス構造におけるコンタクト形成の課題が分析されている。Ni/Cu の light induced plating、field induced plating も比較検討されている。Al₂O₃/SiN、SiO₂/SiN₄ の表面、裏面パッシベーション、セルの平均効率 22.4% (Voc=691,2mV、Jsc=40.4mA/cm²、FF=80.3%)、ベストセルで、効率 22.9% (Voc=694.2mV、Jsc=40.5mA/cm²、FF=81.1%) の状況である。熱サイクル試験

や高温高湿試験結果も報告された。さらなる改善を目指して、PERT、PERC 構造セルに関して、Ni/ドーパポリ Si コンタクトも、検討されている。

(4) W. Kwappl ら (FhG-ISE) は、“Understanding Light-Induced Degradation in Multicrystalline Silicon: Possible Complex Formation Mechanisms” と題して、プレーナリ講演を行った。多結晶 Si 太陽電池の高温光誘起劣化 (LeTID) 現象に関する検討結果が、報告された。光誘起劣化は、n 型 Si では、起こらず、p 型多結晶 Si、CZ-Si、FZ-Si で、起こる。シリコンの欠陥反応の背後にある物理的なメカニズムの理解を可能にします。温度依存性と注入強度依存性、フォトルミネッセンス測定から、欠陥の荷電状態の変化、キャリアの捕獲断面積と活性化エネルギー (0.94eV) が求められている。SiNx:H 層の fast firing で、欠陥が活性化し易く、B-O 欠陥や Cu、Ni、C 等の不純物起因でもなく、空孔 (V) -H 対を考えている。今後は、FZ-Si で、さらなる検討を進めるとの事である。本会議のハイライトとしても、高い評価を得ている。

(5) D. Amkreutz ら (HZB) は、“Influence of the Precursor Layer Composition and Deposition Processes on the Electronic Quality of Liquid Phase Crystallized Silicon Absorbers” と題して、プレーナリ講演を行った。バルク結晶 Si 太陽電池のプロセス工程の複雑さ、コスト低減の必要性が述べられた後、Kerfless 薄型 Si の研究状況が紹介された。ホウケイ酸塩またはボロ/アルミノ珪酸塩ガラス基板上に中間層、さらに、a-Si/nc-Si 層が堆積され、CW 半導体レーザや電子ビームなどのライン状のエネルギー源を用いた液相結晶化 (liquid phase crystallization) がなされ、5~40 μm 厚の mc-Si 層が形成される。残留応力、転位や積層欠陥に加え、C や O 濃度も高く、少数キャリア寿命は、0.5~5 μs である。a-Si:H(i/p+) および a-Si:H(n)を用いたバックコンタクト ヘテロ接合太陽電池 (厚さ 13 μm) の面積 10x6mm、10x1mm のセルで、各々、効率 14.2% ($V_{oc}=654\text{mV}$, $J_{sc}=29\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=75\%$)、15.9% ($V_{oc}=650\text{mV}$, $J_{sc}=31.7\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=77\%$) が得られている。薄膜の高品質化や light trapping の改善により、効率 18% ($V_{oc}=660\text{mV}$, $J_{sc}=36\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=76\%$) が可能としている。

(6) この他、FhG-ISE は、2x2cm² の多結晶 n 型 Si 太陽電池で、ニューレコード効率 22.3% ($V_{oc}=674.2\text{mV}$, $J_{sc}=41.1\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=81.6\%$) を達成した。図 8 に、多結晶 n 型 Si 太陽電池の構造と特性を示す。本会議のハイライトとしても、高い評価を得ている。

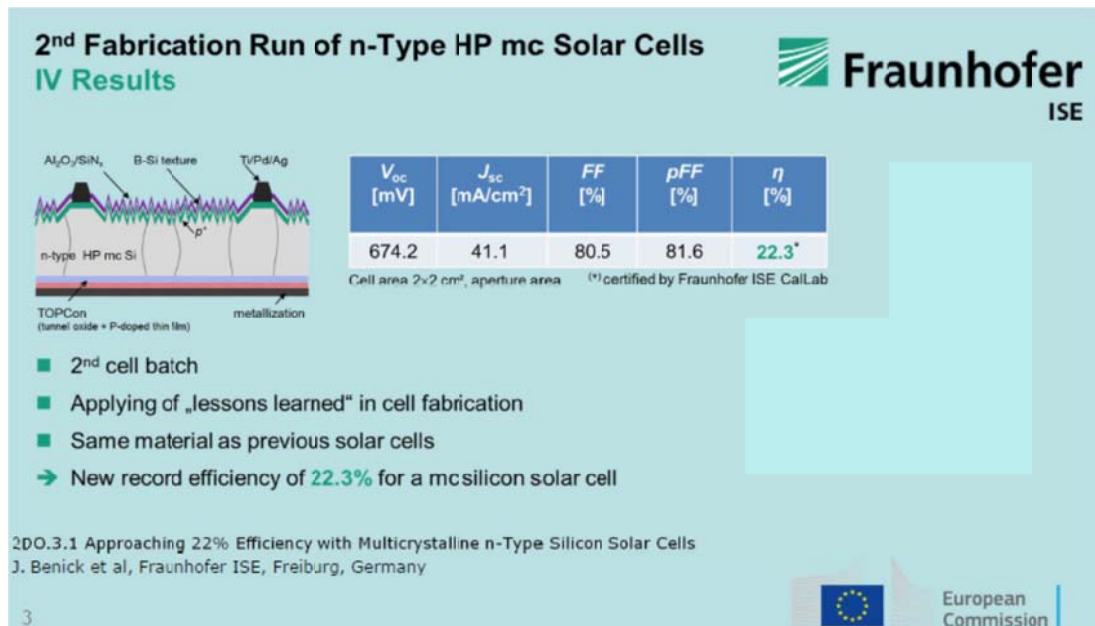


図 8. 多結晶 n 型 Si 太陽電池の構造と特性 (N. Taylor、33rd EU-PVSEC のハイライト)

4. 4 薄膜太陽電池分野：

(1) V. Bermudez ら (Solar Frontier) は、“Present Status of Solar Frontier Cu(In,Ga)(Se,S)₂ Record Efficiencies and Overall Progress” と題して、基調講演を行った。

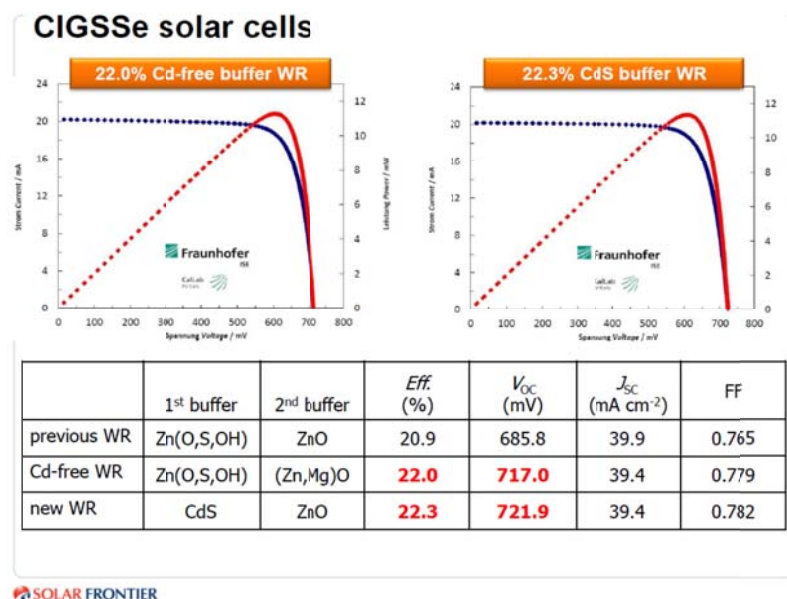


図 9. 世界最高効率 Cu(In,Ga)(Se,S)₂ セルの特性 (R. Kamada et al., 43rd IEEE PVSC, 2016)

ソーラーフロンティアは、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} =686mV、 J_{sc} =39.9mA/cm²、FF=76.5%) を実現している。先の 43rd IEEE PVSC では、高 V_{oc} 化のアプローチが報告された。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} =665~683mV から、695~705mV 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 9 に示すように、面積

0.51cm² の CdS/ZnO 二重バッファ層および Z(0, S, OH)/(Zn, Mg)O 二重バッファ層 Cu(In,Ga)(Se,S)₂ ルで、各々、効率 22.3% (Voc=721.9mV、Jsc=39.38mA/cm²、FF=78.24%)、22.0%の世界第二位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(0, S, OH)/(Zn, Mg)O 二重バッファ層 Cu(In,Ga)(Se,S)₂ ルで、各々、効率 22.7%、22.8%も得ているとの事であった。

今回、30 cmx30 cm(841cm²)の CIS サブモジュールで、効率 19.2%、7cm x 5cm サイズのミニモジュールで、19.8% の世界最高効率が報告された。2020 年に、200W モジュールの出荷を予定している。太陽電池特性向上に向け、低 Eg (1.08eV) CIS 組成傾斜光吸収層、低 Eg 層の拡大、透明 TCO 層、高 E g の ZnMgO 第二バッファ層、アルカリ処理などの改善の結果が、高効率化につながっている。アルカリ処理により、少数キャリア寿命も 50ns から 182ns に改善され、Voc 増加につながっている。多結晶 Si 太陽電池に比べて、温度係数も低いとの事である。ベストの値として、-0.23%/℃が得られているとの事で、ヘテロ接合結晶 Si 太陽電池の温度係数に匹敵する。本会議のハイライトとしても、高い評価を得ている。

(2) P. Kratzert ら (Solibro) は、“Total Area Efficiency at Commercial Size CIGS Module” 題して、プレーナリ講演を行った。Solibro は、2003 年に設立され、累積出荷量は、300MW である。モジュール効率も、2010 年 4 月の平均効率 10% (ベスト 11.7%) から、最近の平均効率 15% (ベスト 16.5%) へと改善されている。1cm²セルで、効率 21.0% の状況である。今回、CIGS 系の生産技術についての検討結果が報告された。1 m² モジュールで、total area 効率 16.0% (アパーチャエリア効率 17.0%) が得られている。シート抵抗、セル面積、dead エリア割合、封止 AR、TCO 上の金属グリッドなどの効果が言及された。金属グリッドの改善による FF 損失の 3%改善がはかられ、Jsc の 10%損失の内訳として、AZO の吸収損 1.3mA/cm²、dead 領域の損損失 1.1mA/cm²、封止部の吸収および反射損 1.1mA/cm²、と分析されている。30x30cm² のサブモジュールで、自社測定ではあるが、アパーチャ効率 18.8%が得られている。また、0.94m² モジュールで、17.6%が得られているとの事である。今後は、モジュールの大面積化 (0.94m²→1.88m²) も進め、出力 140~150W モジュールから、300~320W モジュールにつなげたいとまとめた。本会議のハイライトとしても、高い評価を得ている。

(3) J.R. Site ら (Colorado State Univ.) は、“Enhancements to CdTe Cell Efficiency” と題して、プレーナリ講演を行った。まず、First Solar 社の状況が報告されたので、前回会議の D. Weiss ら (First Solar) による、“Delivering on the promise of thin-film PV” と題する CdTe 太陽電池、モジュールに関するプレーナリ講演を紹介する。CdTe 太陽電池の製造工程での CO₂ 放出量は、14 CO₂ g /kWh で、CIGS、多結晶 Si 太陽電池の各々17、19CO₂ g /kWh で、有利であること。太陽電池モジュールの累積出荷量は、18GW であり、ガラス入んから 1 パネルの生産時間は、3.5 時間以下である。0.72m² パネルから 2.4m² パネルへの大面積化に移行中である。2015 年には、図 10 に示すように、セル効率 22.1% (Voc=887mV、Jsc=31.7mA/cm²、FF=78.5%)、面積 0.7m²モジュールで、アパーチャ効率 18.6%を実現している。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

トップ傾斜がなされ、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 $2\text{mA}/\text{cm}^2$ 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 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 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 τ が 10ns から約 100ns に向上し、 V_{oc} の改善がはかられている。4 μm 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

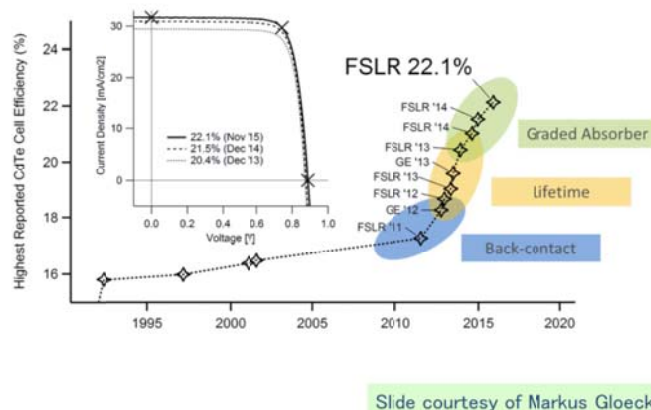


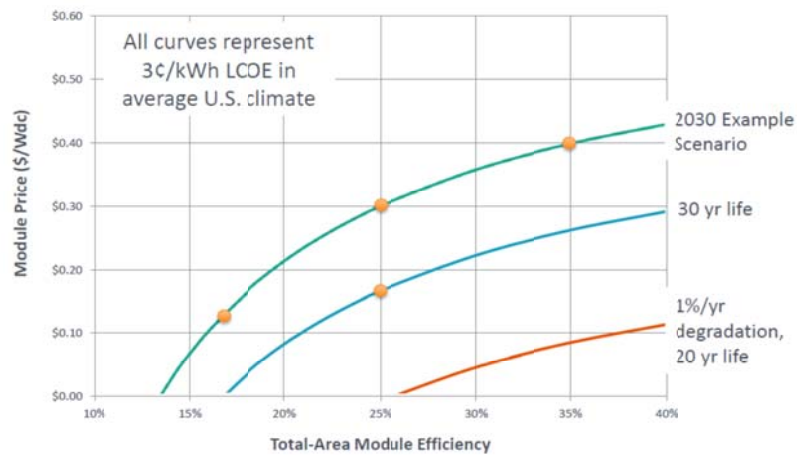
図 10. First Solar の CdTe 太陽電池の高効率化の変遷
(Dr. Sarah Kurtz:43rd IEEE PVSC のハイライト)

コロラド州立大での研究状況も報告された。①CdS バッファ層を MgZnO バッファ層で置き換え、短波長域の量子効率改善と J_{sc} 改善、②高温成長による CdTe の結晶性改善と V_{oc} 改善、③Cu に代わる裏面コンタクトとして Te 層の採用による V_{oc} 改善、である。面積 0.777cm^2 セルで、効率 19.16% ($V_{oc}=854\text{mV}$ 、 $J_{sc}=28.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=79.1\%$) の状況である。

(4) M.A. Green ら (UNSW) は、“Progress with Perovskite/Silicon and All-Perovskite Tandem Solar Cells” と題して、プレーナリ講演を行った。太陽光発電のさらなる導入・普及のためには、太陽電池のさらなる高性能化、低コスト化、長寿命化が求められている。図 11 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。従って、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。

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



図 1 1. 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)

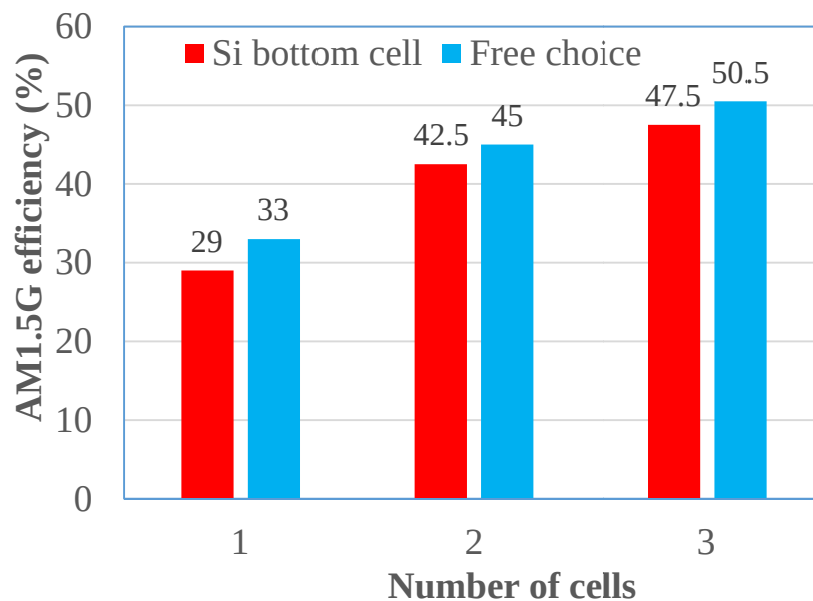


図 1 2. Si タンデム太陽電池の高効率化の可能性 (Prof. M.A. Green 提供、2012 年)

このような高効率を達成するために最も有望なアプローチは、タンデム電池である。図 1 2 は、Si タンデム太陽電池の高効率化の可能性を示す。2 接合 Si タンデム、3 接合 Si タンデム太陽電池で、理論変換効率は、各々、42.5%、47.5% であり、実用的には、3 接合 Si タンデム太陽電池で、効率 41% の実現が期待される。2 端子構成、4 端子構成の利害得失が述べられた。効率的には、III-V/Si タンデム太陽電池で、高効率が実現しているが、著者らは、低コスト化を狙いとして、ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池、ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム、ペロブスカイト/CIS タンデム太陽電池に着目している。まず、

最近のペロブスカイト太陽電池の進展が紹介された。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、1.55eV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 $7.5\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、正孔 $12.5 \sim 66\text{cm}^2/\text{Vs}$)などの物性を有する。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%の変遷の状況が述べられた。現状では、大面積セルでの低効率、信頼性などに、課題はあるものの多くの研究者が参画している。ペロブスカイト/Si 2 接合タンデム太陽電池で、Stanford Univ. グループが、効率23.6%の状況である。4 端子構成では、認定値ではないが、面積 0.17cm^2 セル、 1.43cm^2 セルで、各々、効率25.2%、20.5%の状況である。UNSWのspectral splitting法で、28% (0.2cm^2 ペロブスカイトセル7.5%+ 4cm^2 結晶Siセル20.5%)の状況である。同方法で、III-V/Siタンデムでは、効率34.5%の状況にある。

4. 5 高効率III-V多接合、集光型および宇宙用太陽電池分野：

T. Masudaら(トヨタ自動車、豊田工大)は、“Solar powered vehicles with static concentrator photovoltaics”と題して、車載用高効率太陽電池モジュールの研究開発に関する講演を行った。

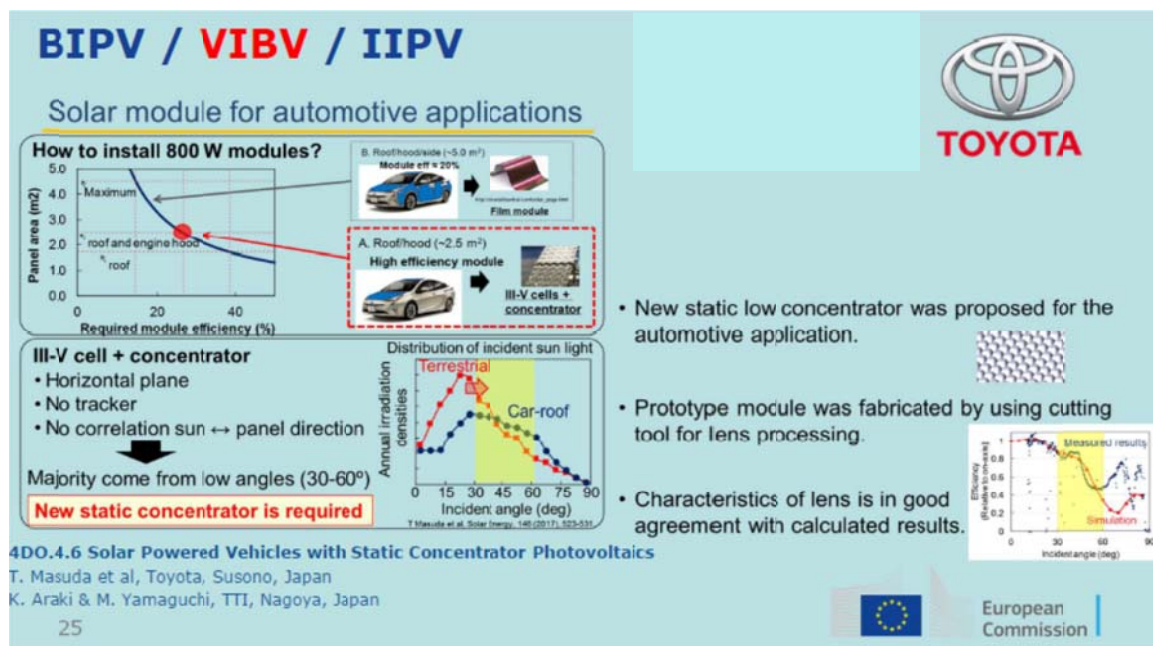


図 1 3. 車載用高効率太陽電池開発の必要性(左上図)、静的低倍集光太陽電池開発の必要性(左下図)、静的低倍集光III-V多接合太陽電池モジュールの特性(右下図)

図 1 3 に、車載用高効率太陽電池開発の必要性、静的低倍集光太陽電池開発の必要性と静的低倍集光III-V多接合太陽電池モジュールの特性を示す。CO₂エミッションを低減するためにも、車載用高効率太陽電池モジュールの開発が必要である。出力800Wがあれば、1日30km走行できる。出力800Wのためには、面積 2.5m^2 の場合、25%以上の高効率太陽電池モジュールが必要となる。乗用車のCO₂エミッションの64%削減が期待される。今回、新しい

静的低倍集光太陽電池モジュールが提案された。4倍集光のレンズ設計と共に、4mm角のInGaP/InGaAs/Ge 3 接合セルの3×3直列、3並列の低倍集光型太陽電池モジュールが試作され、屋内評価で、モジュール効率27.6%が得られている。モジュール特性、特に、許容角特性の実測値とシミュレーション値との一致をみている。また、屋内評価よりも屋外評価で、効率増加が見られ、散乱光の効果と考えられる。効率の損失解析もなされ、電流不整合や光学損失の改善により、モジュール効率30%の実現の見通しを得ている。本会議のハイライトとしても、高い評価を得ている。

4. 6 PV システム、性能、信頼性分野（産総研、千葉恭男氏作成）：

Topic5 のプレナリーセッションでは、4人の研究者によってモジュールの特性評価・信頼性・耐久性などについて最近のトピックスが報告された。

（1）TÜV Rheinland Energy GmbH の W.Harmann 氏は、“PV Module Performance Characterization - Challenges from Recent Technology Advances and Demands from Energy Yield Perspective”と題して、基調講演を行った。最近の技術の進歩の観点、エネルギー収率の見通しの観点からPVモジュールの特性評価について重点的な取り組みを報告した。それらの取り組みは6つ指摘した。1. Procedures for electrical stabilization of PV modules 2. Measurement procedure for bifacial PV modules 3. Mandatory validation of nominal power as stated on type label 4. Importance of wavelength range and long pulse length of solar simulation, 5. Test conditions of IEC 6153-1 (G-T matrix) vs. “real world” operation, 6. Extension of product data sheet with specific performance data)について説明された。例えば、電気的特性においては、試験結果が、LID(光誘起劣化)やCID(電流誘起劣化)、TID(温度誘起劣化)によって変化するため、データを比較しながら評価手法を確立することが重要であると説明した。

（2）NREL の S.R.Kurtz 氏は、“Qualitative versus Quantitative Reliability Testing of PV - Gaining Confidence in a Rapidly Changing Technology”と題して、基調講演を行った。日々急速に変化しているPVの技術の中の信頼性を得る戦略を報告した。その戦略は、定性・定量性の保証をもとに、標準データの収集、データの分析、リスクアセスメントを行っていくことである。現在、様々な規格の制定に取り組んでいるが、特に標準データの収集の際には、過剰な環境での試験方法の標準化(例えば IEC61215 の x2x3 など)が必要であり、現在 IEA に提案中である。

（3）OKE-Services の H.Oldenkamp 氏は、“Google’ s Little Box Challenge and the Development of the True AC-Module”と題して、プレナリ講演を行った。パワーコンディショナー(PCS)の構成部品の縮小化を図ることで、数センチ角サイズ(WxDxH : 7 cm x 3 cm x 5 cm程度)のPCSを試作したことを報告した。このPCSの用途は、サイズが非常に小さいため両面受光モジュールに使用することを想定している。

（4）最後の First solar の A.Wade 氏は、“The Product Environmental Footprint (PEF) of Photovoltaic Modules - Lessons Learned from the Environmental Footprint Pilot Phase on the

Way to a Single Market for Green Products in the European Union”と題して、プレーナリ講演を行った。ヨーロッパでの太陽電池に対する製造環境負荷(PEF)に対する IEA PVPS Task12 の取り組み内容について報告した。

前回会議の報告もまとまっているので、紹介する。M. Kontges ら (ISFH) は、“Mean degradation rates of PV systems for various kinds of PV modules failures”と題して、前回会議で、プレーナリ講演を行った。PV 産業の拡大と共に、PV モジュールの信頼性は、益々、重要となり、PV の安定性と長期信頼性は、PV の成功に重要な課題である。まず、IEA/PVPS Task13 の活動の概要が報告された。20 カ国 36 機関、60 名の専門家が参画している。

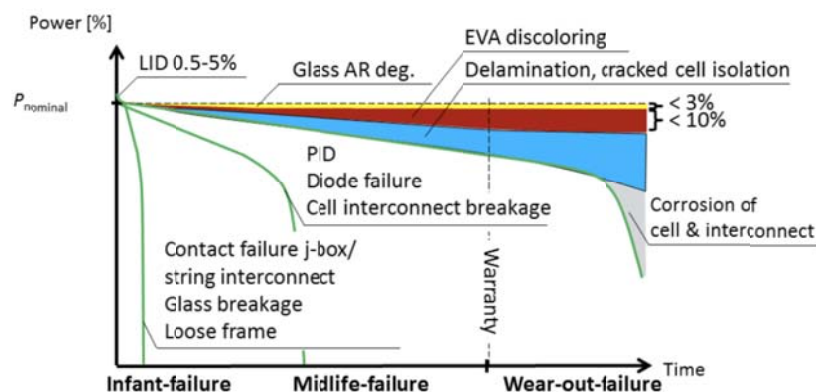


Fig. 3.1: Three typical failure scenarios for wafer-based crystalline photovoltaic modules are shown. Definition of the used abbreviations: LID – light-induced degradation, PID – potential induced degradation, EVA – ethylene vinyl acetate, j-box – junction box.

図 1 4 . P V モジュールの典型的経年劣化モード (IEA/PVPS-Task13 Report)

最大25年間のデータによれば、統計的には、PVモジュールの劣化率は、結晶Siで、平均0.8%~0.9%/年の劣化率である。HITで、約1%/年、薄膜は1.4%/年である。モジュールの劣化は、コストに関わり、これまでは、IEC61215や61646に準拠して、加速ストレス試験やQualificationがなされている。新しい製品開発のためには、コスト/性能比、耐用年数、信頼性などが重要となる。Qualification testは確立されていず、製造者のQuality Management System、システム設計や設置品質が重要となる。PVモジュールの劣化が、レビューされた。図 1 4 に、P V モジュールの典型的経年劣化モードを示す。1~2年では、セルクラックやglass breakageなど、3~4年すると、PID劣化、長期的には、EVA discoloringなどが、劣化要因となっている。図 1 5 に、PVモジュールの要因別劣化率を示す。

①UV照射による封止材のdiscoloration、②インターコネクトリボンや溶接結合部の故障、③封止材のdelamination、④セルの割れやクラック、⑤PVモジュール製造、輸送、設置および動作中のストレス、⑥Potential Induced Degradation(PID)、⑦catastrophic failure、などが紹介された。今後は、PVモジュールの信頼性向上のさらなる技術的努力、PV製造Quality Management Systemガイドラインの開発に加え、アレイ設計・設置・メンテナンスの向上、製造コントロール、加速ストレス試験の向上、フィールドでの観測技術、などが重要とまとめた。

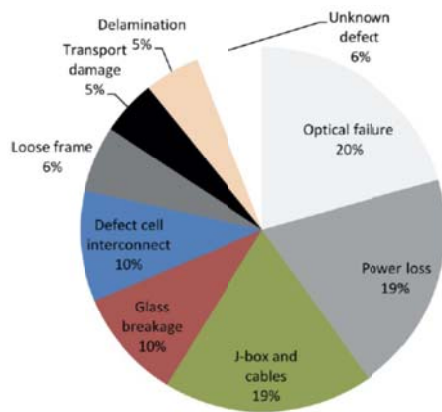


Fig. 3.2: Failure rates due to customer complaints in the first two years after delivery. The rate is given relative to the total number of failures. The PV modules are delivered by a German distributor in the years 2006-2010 [redrawn from Richter11]. The statistic is based on a total volume of approximately 2 million delivered PV modules. Categories not found in other module failure statistics are drawn in grey scale.

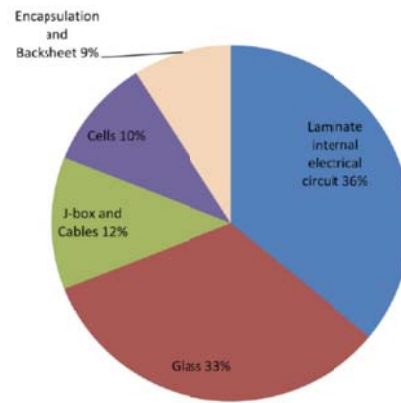


Fig. 3.3: Field study of PV module failures found for various PV modules of 21 manufactures installed in the field for 8 years [redrawn from DeGraaff11]. The rate is given relative to the total number of failures. Approximately 2% of the entire fleet are predicted to fail after 11-12 years (do not meet the manufacturer's warranty).

図 1 5 . PVモジュールの要因別劣化率 (IEA/PVPS-Task13 Report)

4. 7 系統連携、システムインテグレーション、応用分野：

(1) W. Schram ら (Utrecht Univ.) は、“Optimal Sizing of Batteries for PV Self-Consumption: Usage for Peak Shaving” と題して、基調講演を行った。太陽光発電 (PV) の電力発生と住宅での電力消費の不整合を緩和する一つの解は、バッテリー使用である。今後、自己消費が進むと考えられ、住宅レベルでのバッテリーサイズの最適化が必要である。オランダの Amersfoort 市内の 79 世帯について、295 日以上の日において、10 秒毎のデータを基に、系統からの住宅の電力消費に及ぼすバッテリーサイズの効果が、解析されている。自己消費とピークカットを結合している。Net Present Value (NPV) 解析から、経済的に有利なバッテリーの平均最適サイズは、3.4 kWh であることが、わかった。NC (Net Metered Consumption) (MWh/year) を尺度として、Optimal Storage Size (OSS) (kWh) は、下式で、表記される。

$$OSS \text{ (kWh)} = -0.03 + 1.5 \times PV \text{ size (kWp)} - 0.19 \times NC \text{ (MWh/year)}$$

世帯毎の最適バッテリーサイズの大きな違いがあり、0.5kWh～7kWh に及ぶ。バッテリー当りの平均コストは、640 ユーロとの事である。バッテリーを使用することにより、平均すると、PV 電力発生 の 52.8% をカバーしている。

自己消費に関しては、前回の会議の報告がまとまっているので、紹介する。T. Tjaden ら (TW Berlin) は、“Emerging performance issues of photovoltaic battery systems” と題して、前回会議で基調講演を行った。

FIGURE 22: PV CONTRIBUTION TO THE ELECTRICITY DEMAND IN 2014

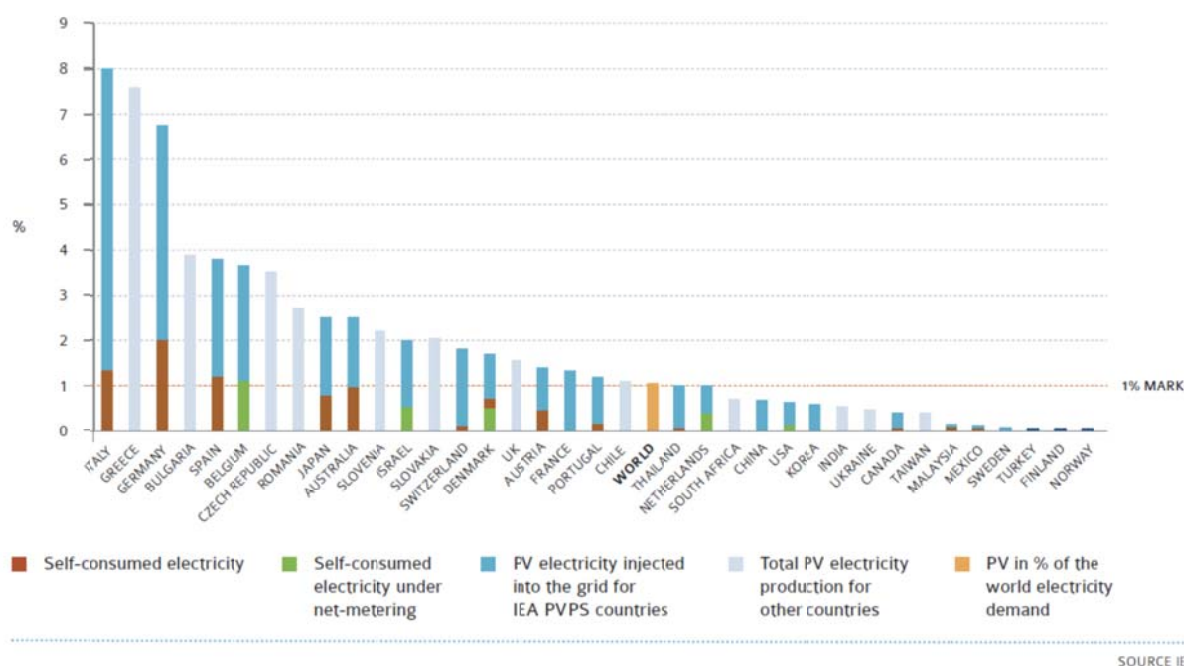


図 1 6 . 各国の電力に対するPVの割合 (IEA/PVPS Trends 2015)

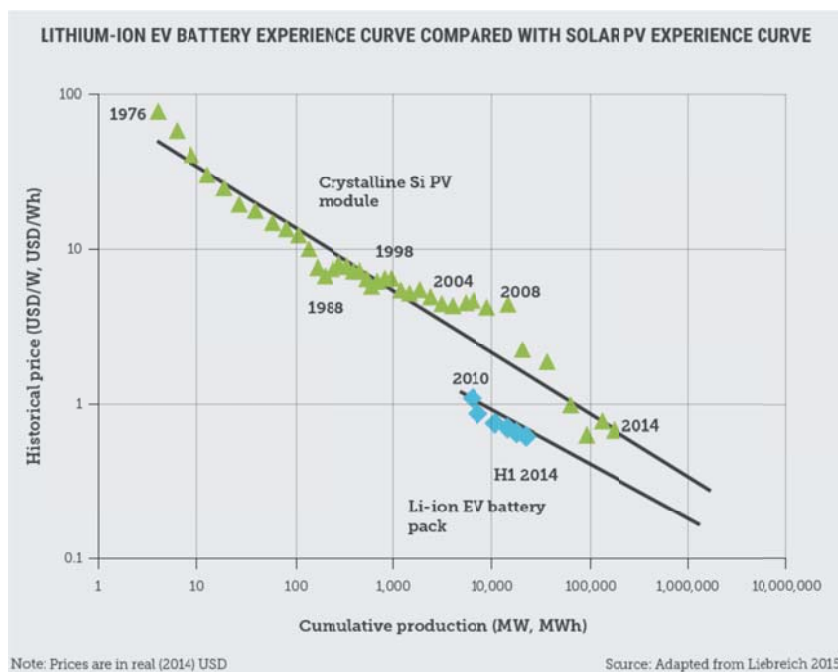


図 1 7 . Liイオン電池とPVモジュールの価格低減の状況

(ISBN: 978-0-9944195-3-8 (web), Climate Council of Australia Ltd 2015)

世界的に、系統に占めるPVの比率が増加しつつある。イタリア、ギリシャ、ドイツなどでは、図 1 6 に示すように、2014年時点で、PVの比率は6%を超えている。今後、集中発電から分散発電へ、スマートグリッドが重要となろう。系統連携は、電圧や周波数変動をもたらし、系統の安定化のためには、PVシステムのsmart integrationが必要である。一解決策として、PV+バッテリーなどがあり、系統の安定化のためにも、バッテリーの重要性が増し

ている。系統に頼らず、自己消費のシステムの方が進むと考えられる。

図 1 7 には、Liイオン電池とPVモジュールの価格低減の状況を示す。今後、両者の価格低減がはかられ、PV+バッテリーシステムも、グリッドパリティを実現できるとしている。PV+バッテリーシステムの性能評価手法、試験法、シミュレーション法、電力損失等が言及された。バッテリー容量、利用率と経済的メリットも述べられた。一例として、図 1 8 に、PVシステムサイズ、使用するバッテリー容量と自己消費率との関係を示す。

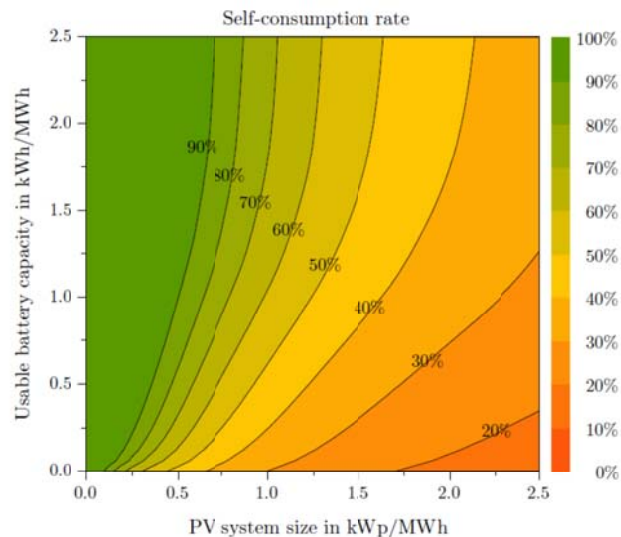


Fig. 3.5: Annual self-consumption rate of a typical household with a PV battery system [19].

図 1 8. PVシステムサイズ、使用するバッテリー容量と自己消費率との関係
(H. Vollenweider, Grid Integration of PV Systems and Local Storage in Distribution Networks”,
EEH-PSL 1413, 2014)

(2) T. Minderhound (UNStudio) は、“Aesthetics and Performance of” と題して、プレーナリ講演を行った。UNStudio は、1988 年に設立され、約 200 名位で、color architecture design を行い、89 のプロジェクトに参画した。現在、93 プロジェクトが進行中であるとの事である。

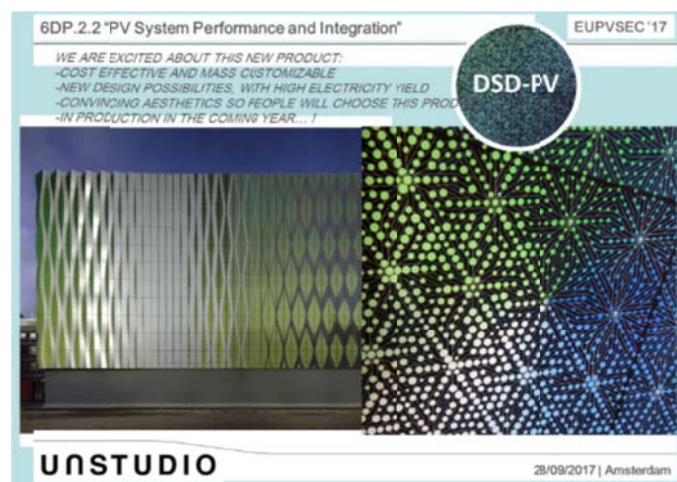


図 1 8 .デザインの例 (N. Taylor、33rd EU-PVSEC のハイライト)



図 1 9. HANWHA 本社ビル（UNStudio 社のホームページより）

Industrial grade PV から、integrated PV design に進み、PV power station や BIPV がその成果例であり、図 1 8 に示すような、魅力的なデザインの例、図 1 9 の HANWHA 本社ビルディングなどが紹介された

（３）G. Makrides ら（Univ. Cyprus）は、“PV Production Forecasting Model Based on Artificial Neural Network (ANN)”と題して、プレーナリ講演を行った。系統連携 PV システムの増加は、発生電力の制度良い予測を求めている。既存の電力システムにおいても、本技術の最適インテグレーションが必要であり、系統およびプラントの管理者にも重要である。本研究は、入力パラメータ、トレーニング期間や隠れた階層の数に従って最適された人工的なニューラル・ネットワーク（ANN）をベースに開発されたノンパラメトリックモデルを用いて、種々の技術による系統連携 PV システムの DC 出力の予測の方法論を提案することである。我々のゴールは、入力パラメータと構成に基づいた最適ネットワークを特定することによって、用いているマシン・ラーニングモデルの精度向上にある。本研究は、PV 発生電力予測のため、数値的気象予測（NWP）をもとに動作するマシン・ラーニングアルゴリズムの精度向上に焦点を合わせている（トレーニングやテストとして、過去のデータで、実行される）。従って、本研究は、PV 発生電力予測における NWP に起因する誤差を考察するのもではない。単結晶 Si PV の系統連携システムに関する最初のマシン・ラーニング結果が、晴天時に測定された一連の DC 出力データに比べて、平均二乗誤差の平均値（RMSE）が 1% 以下であることを示している。

(4) A. Betli ら (i-EM) は、“Predictive Maintenance in Photovoltaic Plants with a Big Data Approach”と題して、プリーナリ講演を行った。長年にわたり、PV プラントの高い技術的、経済的性能を保つためにも、メンテナンス戦略策定が重要となってきた。それ故、世界的にも、PV 性能評価を通して不具合の原因となる種々の要因を検出するために、解析モニタリングシステムが設置されている。しかしながら、一般的に、高カスタマイズ費用、膨大な物理的変数の収集やインターネット接続の必要性が、解析モニタリングシステムの有効性、特に、信頼性の劣る通信インフラストラクチャでリモートモニタリングの有効性を制限している。メンテナンス戦略における予測コンポーネントの欠如もコストの最小化の障害となっている。設置コストやモデルの複雑さを低減させるため、障害の予測と早期検出の両方に非常に有望なアプローチとして、データマイニングに基づく統計的手法が、最近浮上している。しかし、一方、文献によると、風力発電プラントにおける装置レベルに焦点を合わせているケースもあるが、PV プラントでの研究は、まだ、初歩段階にある。図20に示すように、本会議のハイライトでも、ビッグデータ処理の重要性が指摘されている。

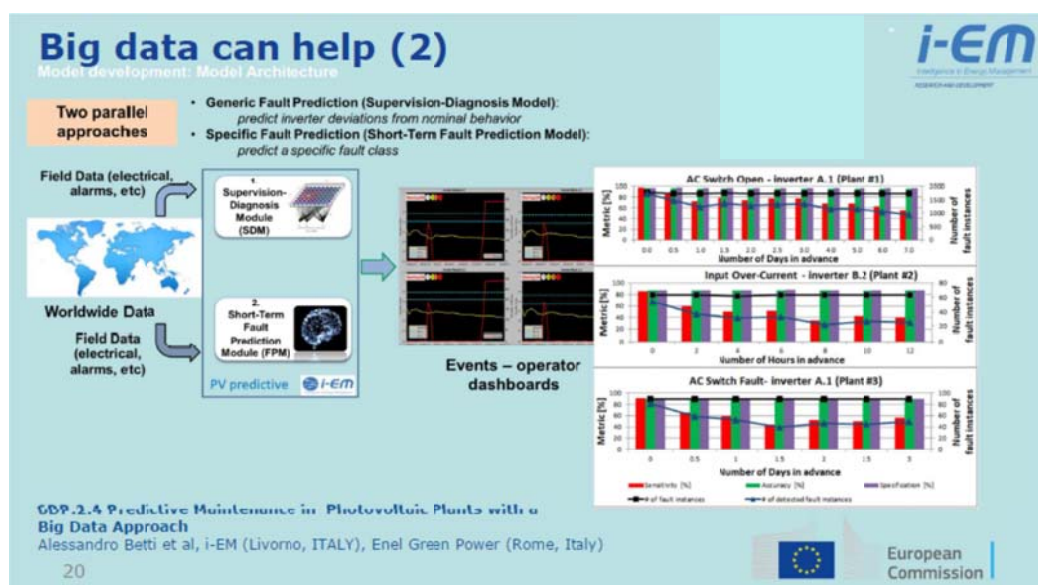


図20．ビッグデータ処理の重要性
(N. Taylor、33rd EU-PVSEC のハイライト)

4. 8 市場、ビジネス、政策等：

(1) L. Benedetti (GSE) は、“PV market, Business and Price Developments in Italy”と題して、プリーナリ講演を行った。イタリアのPVを含む再生可能エネルギーの状況が報告された。2016年、イタリアのPV累積導入量は、19.3GWである。2016年のPVシステムコストは、10kW以下の住宅用で、1.55ユーロ/W、産業用で1.32ユーロ/Wである。蓄電池の必要性は増している。2030年には、PVが50GW、水力38GW、風力17GWで、再生可能エネルギーは、全電力48～50%になろう。既存のPVプラントの最適化や経済性に加えて、PV市場の価値の向上が必要であるとまとめた。

(2) S. Kurtz (NREL) は、D. Feldman (NREL) に代わり、” New Business Models in PV” と題して、プレーナリ講演を行った。米国のPV市場は、2010年の1GWから2016年の15GWとなっている。PVは、米国の全電力の1.4%に過ぎないが、カリフォルニア州15.3%、ネバダ州11.4%、ハワイ州10%など、7州で、6.3%以上の導入が進んでいる。一方、カリフォルニア州など、バッテリー技術が必要となっている。今後、市場拡大に向け、価格低減、高性能化や長寿命化に加え、革新的技術、用途開発が、重要であるとまとめた。

(3) G.C. Werlings (ISA) は、” The International Solar Alliance - Creating Momentum for New Global Solar Markets” と題して、プレーナリ講演を行った。図21に示すように、 $5\text{kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ 以上の日射量の多い、PV供給可能なゾーンと、日射量 $3.5\text{kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ 以下の電力需要の多いゾーンがあり、需要と供給の不整合がある。The International solar Allianceプログラムが紹介された。上記供給と需要の整合を狙いとして、新たなグローバル市場の創製を狙いとしている。300兆米国ドルの市場が見込まれる。Cooperationとcoordinationを検討中で、供給者として、インド、ブラジル、アフリカ9カ国など、17カ国が手を上げている。さらに、需要側を含めて、54カ国になりそうである。第一ステップは、ISAプログラムへの参画、実働、貢献を明確にすることである。次のステップは、①ISAのプロモートプログラムの明確化、②ISAプログラムの有用性、貢献度のvisibility、③sunny countryと需要国との連携のcoordination actionの進展、である。2017年12月9日に、stateレベルの会議を予定している。詳細は、www.isolaralliance.orgで、参照されたい。

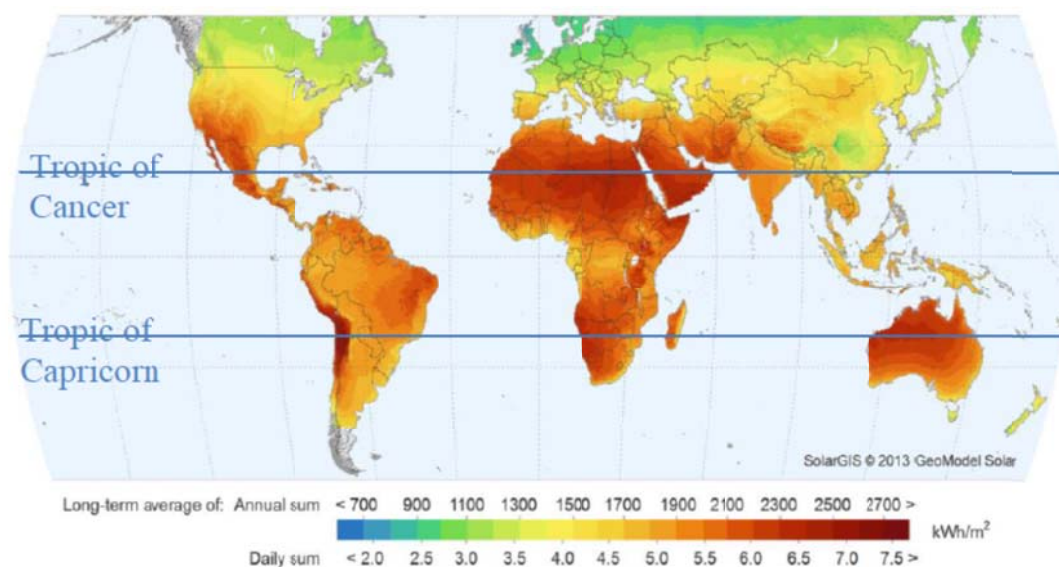


図21. 世界の日射量分布 (www.isolaralliance.org)

5. 感想：

展示が、欧州市場の冷え込みを反映して、出展企業数が減少している。参加者は、前回よりも少し増えた印象で、本会議参加者は、1,864名、展示関係者やサイドイベント参加者を含めると、2,516名との事であった。

今後10年も結晶Si系が主流であり続けることが期待される。勿論、そのためにも、研究開発の一層の強化が重要なポイントの一つであると言えよう。結晶Si太陽電池セッションでは、欧米からの研究成果発表が盛んだが、日本企業からの参加は少なく、今後の危惧を感じる。また、欧州で産学連携が進んでいる。わが国でも、NEDOプロジェクトで、結晶Si太陽電池の研究開発のコンソシアムが進展して、優位な成果が出つつある。今後も、NEDOプロジェクト等での発展を期待するし、結晶Si太陽電池を含む太陽光発電の研究開発者人口を増やし、さらにレベルを上げることが必要である。わが国には、太陽光発電に関し、他国が真似をできない高度な研究開発を行うことが求められている。もう一度、世界の生産量と市場の創製の実現をしたいものである。

しかし、今後の太陽光発電の発展や市場拡大のためには、まだまだ、国の支援が必要と言える。太陽電池や太陽光発電の高性能化、低コスト化、長寿命化の流れにあり、技術開発のさらなる強化と産学連携が必要である。幸い、日本は、各分野で世界最高の技術力を有していると言える。固定電力買い取り制度の後の展開も重要であり、smart gridやself-consumptionが重要であり、バッテリー等の貯蔵技術とのハイブリッド化が必要であろう。また、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。自動車応用や農業利用も期待したい。このためにも、車載のプロジェクトや国際共同研究の離陸も期待したい。

今回の34th EU-PVSECは、45th IEEE PVSCとPVSEC-28の合同で、2018年6月10日～15日、ハワイ島で、WCPEC-7として、開催予定である。来年は、35th EU-PVSECも開催するとの事で、2018年9月に、ベルギーのブリュッセルで開催予定である。日程は、調整中で、日程確定は、2週間後になるとの事である。また、PVSEC-27は、2017年11月19日～24日、大津で、開催予定である。

(以上)