

第 28 回太陽光発電欧州会議 (28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告

2013. 10. 7
山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日 : 2013年9月30日~10月4日。

2. 開催場所 : Parc des Expositions Paris Nord Villepinte (パリ、フランス)。

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、Amaud Mine (SER - Syndicat des Energies Renouveiables、フランス) で、論文委員長は Arnulf Jager-Waldau (EC-JRC、イタリア) であった。今年は、77 の国と地域から 3,756 名の参加者があった。前回より、270 名程少ないが、太陽光発電に関する最大規模の会議となった。

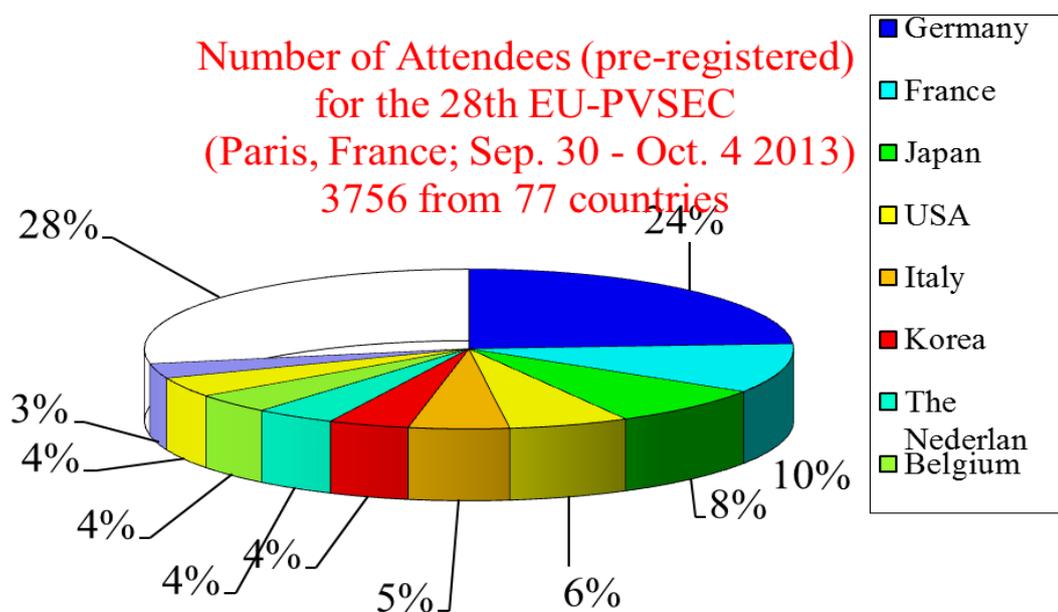


図 1 国別参加者数

図 1 に、国別参加者数 (pre-registered) を示す。国別では、①ドイツ 24%、②フランス 10%、③日本 8%、④米国 6%、⑤イタリア 5%、⑥韓国 4%、⑦オランダ 4%、⑧ベルギー 4%、⑨スイス 4%、⑩中国 3%、の順であった。

図 2 は、国別発表論文件数を示す。74カ国から1,620件の論文発表があった。国別では、①ドイツ376件、②日本118件、③フランス110件、④米国89件、⑤台湾84件、⑥イタリア82件、⑦韓国82件、⑧スペイン68件、⑨スイス59件、⑩オランダ51件、の順であった。

**Number of Papers presented at the 28th EU-PVSEC
(Paris, France; Sep. 30 -Oct. 4, 2013)
1620 Papers**

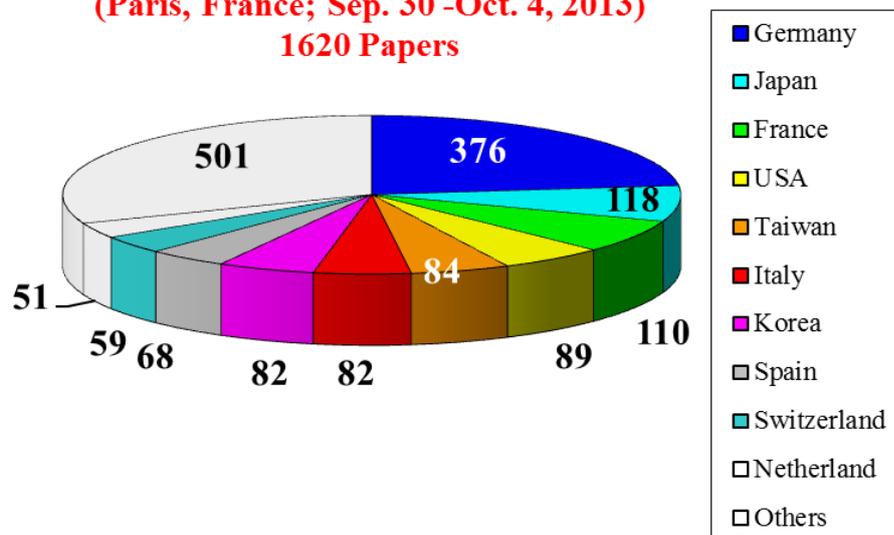


図2 国別発表論文件数 (RTS提供)

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系436件、②薄膜系（薄膜Si、CIGS・CdTe等II-VI、色素・有機）370件、③PVシステム269件、④先端PV（超高効率、集光、宇宙、基礎・新材料・新素子）252件、⑤PVコンポーネント198件、⑥PV普及（国家プログラム・政策・PV市場）95件、の順であった。

**Number of Papers presented
at the 28th EU-PVSEC
Paris, France; Sep. 30 - Oct. 4, 2013)
1620 Papers**

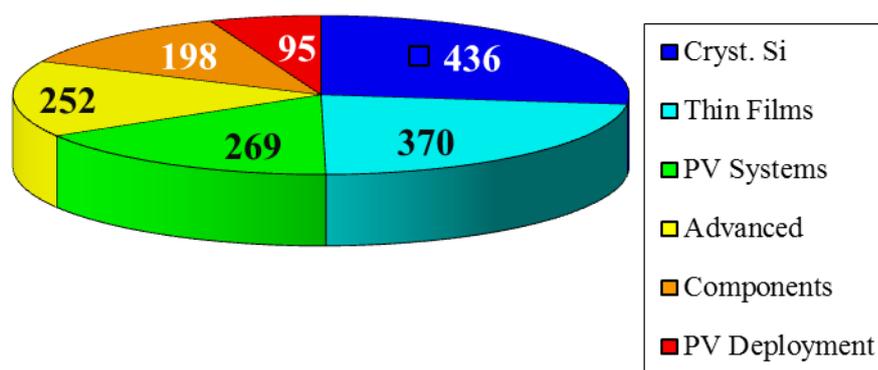


図3 発表論文件数の分野別内訳 (RTS提供)

Becquerel Prizeは、Gabriel Sala（マドリード工大）が受賞した。両面受光セルの開発、集光太陽光発電（CPV）の研究開発への貢献（CPVモジュール用ソーラーシミュレーターや光学レンズ開発、CPVの標準化）、関連産業や産学連携への貢献、などの業績が評価された。

この他、学会併設の展示会には、27 か国 247 社の太陽光発電関連企業、機関が出展した（前回は、35 か国 619 社）。

4. 主な発表論文の概要：

プレーナリ講演を中心に、本会議のトピックスの概要を述べる。

4. 1 先進太陽電池分野（超高効率多接合、集光型、宇宙用、量子・ナノ構造等新型、新材料）：

(1) A. Bett (FhG-ISE) は、“Overview of Technology Perspectives for High Efficiency Solar Cells for Terrestrial and Space Applications” と題して、基調講演を行った。最近、多くの企業が、III-Vベースの集光太陽光発電（CPV）システムの商用化を開始している。その主な理由として、次の点があげられる。①III-V族セルを用いた集光型太陽電池は40%以上の高効率化を実現しており、近い将来、40%以上の高効率モジュールの実現が可能で、非常に効率の良いCPVシステムを提供できる。②PV応用がサイズの上でも成長しており、より大規模なシステムの実現が要望され、CPVシステムが適している。③コスト的にも有効な代替PV技術への関心をもたらしていること。集光型太陽電池は、結晶Si太陽電池を用いた集光倍率3倍以下の低倍集光、結晶Siなどの太陽電池を用いた3~100倍の中倍集光、III-V族多接合太陽電池を用いた400倍以上の高倍集光に分類される。ここでは、高倍集光に言及された。①高効率エネルギー、②高エネルギー生成、③高温動作可能、④次世代革新技術、⑤高速GW製造が可能、⑥低コスト太陽エネルギー、といった集光型太陽光発電（CPV）システムの特徴を述べた後、集光型太陽電池モジュールの現状、FhG-ISEの取り組みが述べられた。研究段階の集光型セルの効率は、Sharpにより44.4%に達し、モジュール効率32~35%、システム効率26~28%の現状であり、他の太陽電池よりも格段に性能が良い。

既に、数社が、1 MW以上のCPVシステム設置に貢献している。図4には、III-V族多接合太陽電池の宇宙用、高集光（HCPV）市場を示す。現状では、CPVの製造コストは、薄膜系や結晶Si系と同等との事である。特に、2500kWh/m²/yr以上の日射条件の良い地域では、他のPV技術よりも電力コスト低減が可能で、8.5セント/kWh以下が期待できる。エネルギーペイバックタイムについても、他のPV技術に比べて有利であり、1年以下の実現が可能である。2012年の宇宙用市場は生産規模は50MWで、2016年頃には、1.2GWのCPVシステム導入を期待している。

図5には、III-V族多接合、集光型太陽電池の高効率化の可能性を示す。多接合太陽電池の集光動作により、50%以上の高効率化期待できる。スペクトルスプリッティングやメカニカルスタックは、システム構成上、コスト高になろうとの見解が述べられた。モノリシックタンデムが妥当で、格子整合系GaInP/GaInAs/Ge 3接合セルが、以前の主流であったが、集光動作でも、効率41.6%程度であった。さらなる高効率化のためには、格子不整合系やIII-V-N化合物の適用が必要である。格子不整合系は、転位発生が課題であるが、シャープは、逆エピ構造InGaP/GaAs/InGaAs 3接合セルで、非集光効率37.9%、250~300倍集光で効率44.4%を達成している。Emcoreは、逆エピ構造InGaP (E_g=1.9eV) /InGaAs (1.4eV) /InGaAs (1.0eV) /InGaAs (0.7eV) 4接合セルで、AM0効率34.2%を実現している。III-V-N系にお

いては、Solar Junctionは、InGaP/GaAs/InGaAsNSb 3 接合セルの集光動作で効率44.1%を実現している。

サブセル材料の組み合わせの柔軟性からは、貼り合わせ技術の適用や、オンSi技術の適用が有効である。Spectrolabは、GaAs基板上のAlInGaP/InGaP/GaAs 3 接合セルのエピタキシャル・リフトオフ（ELO）したものとInP基板上のInGaAsP/InGaAs 2 接合セルの直接ボンディングによる5 接合セルで、AM1.5G効率37.8%、AM0効率35.1%を達成している。

The Main Markets for III-V Multi-Junction Solar Cells Space and HCPV on Earth



図4 III-V族多接合太陽電池の宇宙用、高集光（HCPV）市場（Dr. A. Bett提供）

Detailed Balance Calculations More Junctions Enable Higher Efficiencies

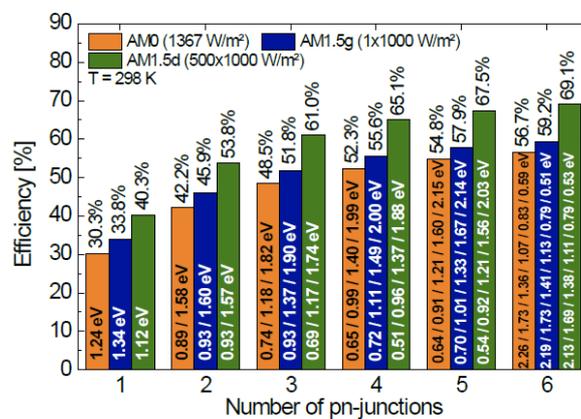


図5 III-V族多接合、集光型太陽電池の高効率化の可能性（Dr. A. Bett提供）

本講演で、FhG-ISE、Soitec、HZB、CEA-Letiの共同開発により、4 接合セルの297倍集光で、44.7%の世界最高効率を達成した事を発表した。これまでは、SharpのInGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルの250~300倍集光での効率44.4%が世界最高効率であった。今回、図6に示すように、GaAs基板上のInGaP/GaAs 2 接合セル（FhG-ISE製）とInP基板上のInGaAsP/InGaAs 2 接合セル（HZB製）とをウエハボンディングで貼り合わせるメカニカルスタック法（Soitec）により、モノリシック（2端子）4 接合セルを実現したものである。

格子整合型で、古くから、理想的構造と言われていたが、2枚の化合物基板を使用することで、高価であることから、本格的検討はなされてはいなかった。昨今の高効率化の競争の中で陽の目を見たような気がする。図7は、世界最高効率4接合セル、4接合セルの外部量子効率の波長特性、297倍集光下での動作特性、を示す。

Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell

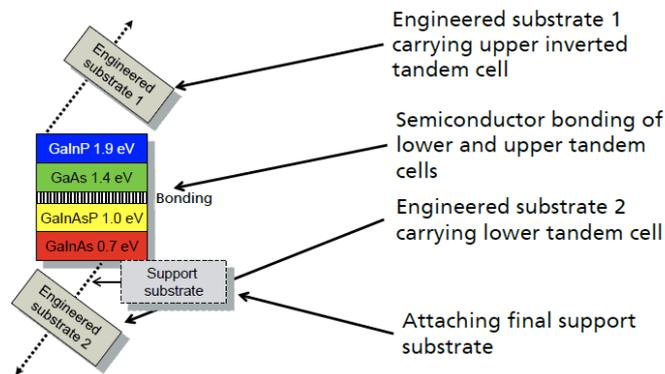
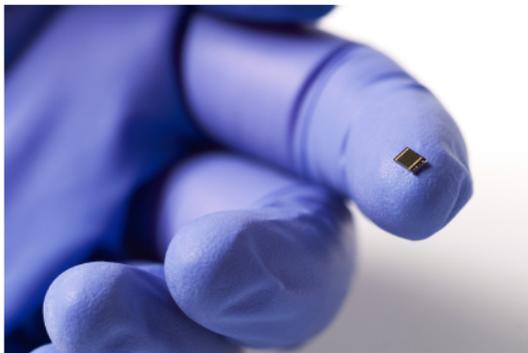


図6 4接合セルの作製プロセス (Dr. A. Bett提供)

Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell



Calibrated efficiency of 44.7% under AM1.5d (297 suns) realized!
(measurement confirmed by ISE CalLab)

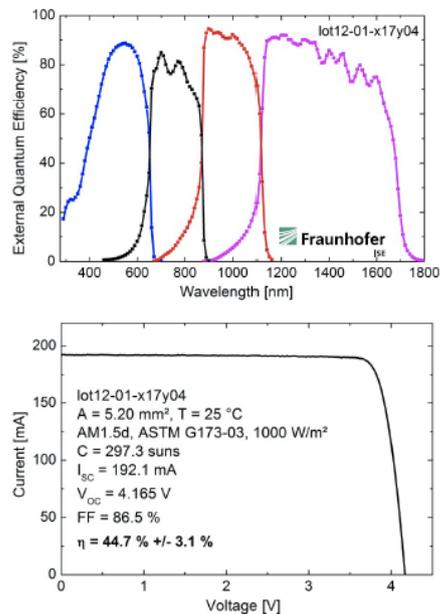


図7 世界最高効率4接合セル、外部量子効率の波長特性、297倍集光下での動作特性 (Dr. A. Bett提供)

現状の生産段階のセルのAM1.5D集光効率38~40%、AM0効率29~31%を、中長期的には、AM1.5D集光効率45~50%、AM0効率33~38%としたいと結んだ。

(2) M. A. Greenら (UNSW) は、“Silicon Wafer-Based Tandem Cells: The Ultimate Photovoltaic Solution?” と題して、プレーナリ講演を行った。UNSWグループは、結晶Si太陽電池で、最高効率25.0%の実績を有し、結晶Si系にこだわりを持っている図8に示すように、Si系3接合タンデムセルで効率47.5%が期待できる。

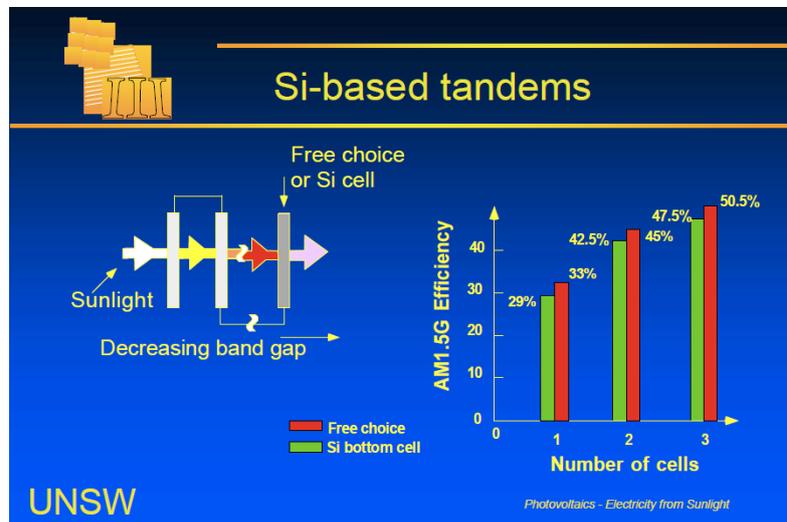


図8 Si系タンデムセルの高効率化の可能性 (Prof. A. Green提供)

今回、オハイオ州立大 (OSU) やNRELとの共同研究をベースにしたアプローチが紹介された。OSUとの共同研究では、III-VオンSiタンデムセルのアプローチ (GaAsP/Siタンデム) が述べられ、高効率化の可能性はあるが、低コスト化が課題である。NRELとの共同研究では、CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) オンSiタンデムセルのアプローチが紹介され、低コスト化の可能性はあるが、高効率化が課題であるとした。CZTSとSiは、格子定数が近い点で有利であり、結晶粒界の評価結果も述べられた。ペロブスカイト/Siタンデムでは、効率27%が期待できるとしている。低コスト化の可能性はあるが、信頼性や毒性が未知である。

(3) L. Samuelson (Lund Univ.) は、“Nanowire Array Solar Cells” と題して、プレーナリ講演を行った。ナノワイヤ構造により、単接合で効率18%、3接合で効率35%を、薄膜PVのコストレベルで提供できる可能性がある。GaAsやInPのナノワイヤが、MOCVD (GaAsの場合、TMGa、 As_2H_3 を用いて) とナノインプリント・リソにより、作製されている。ナノワイヤの核形成と成長の過程が述べられた。図9に示すように、MOCVDとナノインプリント・リソにより、InPナノワイヤ太陽電池で、効率13.8%が得られている。ナノワイヤがないInPセルでは、効率22.1%が得られており、ナノワイヤ12%被覆により、効率が低下しているとも見られる。また、低コスト化には、集光技術の適用は必須で、10倍、50倍集光で、コストが1/10、1/50になると仮定しており、ナノワイヤ概念のコストパフォーマンスが不明確である。

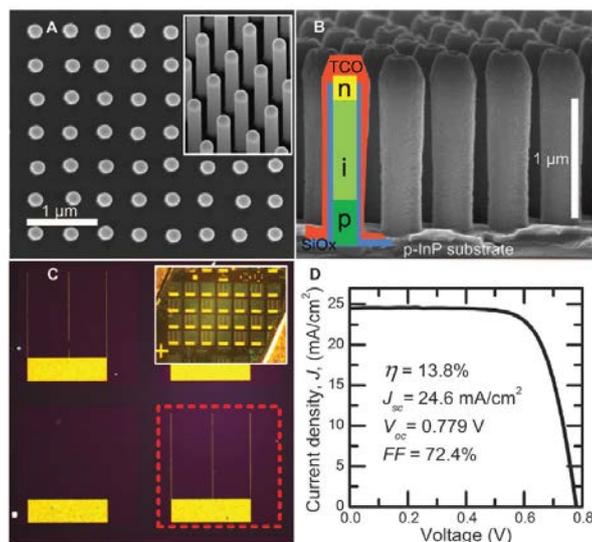


Fig. 1. Characterization of NW-array solar cells: (A) 0° and 30° (inset) tilt scanning electron microscopy (SEM) images of as-grown NWs with a surface coverage of 12%, (B) SEM image of processed NWs. The superimposed schematics illustrate the silicon oxide (SiO₂, blue), TCO (red), and the p-i-n doping layers in the NWs. (C) Optical microscope image of NW solar cells. The dashed red line highlights the border of a 1-mm-by-1-mm cell. (Inset) A sample with four-by-seven cells. (D) The 1-sun J-V curve for the highest-efficiency cell (sample A).

図9 InPナノワイヤセルの構造と太陽電池特性

4. 2 結晶Si太陽電池分野：

やはり。現在の太陽電池市場を支配する結晶シリコン系太陽電池に関する発表が多かった。

(1) R. Brendelら (ISFH) は、“The Future of Crystalline Silicon Solar Cells” と題して、基調講演を行った。実際は、ISFHにおける結晶Si太陽電池の研究開発の状況が報告された。ISFHにおける結晶Si太陽電池の研究開発は、①企業レベルの技術開発として、PERCやPERTモジュール、②先端研究開発として、IBCやSHJモジュール、③将来用として、薄型Si、カーブレスSiモジュール、④材料技術、BSF、パッシベーションやメタリゼーションなどのプロセス技術、信頼性技術、評価解析技術、シミュレーション技術、などで構成される。

PERCセルでは、選択エミッターやgas phase etch backを採用し、233cm²セルで、効率20.3% (J_{sc}=38.09mA/cm²、V_{oc}=660mV、FF=80.9%) の現状である。N型Siを用いたIBC (Integrated Back Contact) セルに関しては、SunPowerが24.6%、Samsungは5インチサイズで効率22.4%の状況である。ISFHは、Boshとの共同開発で、イオン注入などを採用したII-IBBCセル (241cm²) で、効率22.1% (J_{sc}=41.6mA/cm²、V_{oc}=676mV、FF=78.8%、5.32W) の現状である。SHJ (Si Hetero Junction) セルについては、Panasonic/Sanyoの24.7%、Kanekaの23.4% (>200cm²) の状況である。ISFHは、SHJセル (100cm²) で、効率20.1% (J_{sc}=36.3mA/cm²、V_{oc}=730mV、FF=76.3%) の現状である。a-Si:H/c-Siの代わりに、poly-Si/c-Siのヘテロ接合も検討されている。n⁺-poly-Si/p-c-Siヘテロ接合では、V_{oc}=690mV (J₀=4fA/cm²)、p⁺-poly-Si/n-c-Siヘテロ接合では、V_{oc}=719mV (J₀=15fA/cm²) の状況である。

結晶Si太陽電池のモジュールコスト配分は、Si：16%、インゴットスライス：13%、セル：22%、モジュール：49%であり、ウエハのコスト比率が30%を占める。ISFHでは、PERC、PERT、IBC、SHJ等のセルで、効率21%～25%を維持しつつ、ポリSiの再利用を含む薄型カ

ーフレスSi技術の検討を進めている。面積 $156 \times 158 \text{ cm}^2$ の $43 \mu\text{ m}$ 厚IBCセルで、効率 20.1% が得られているので、この試みは可能と見ている。常圧CVD (1100°C 、 SHCl_3) を用いたいくつかの試みが紹介された。 $130 \mu\text{ m}$ 厚や $675 \mu\text{ m}$ 厚の p^+ -ポリSi基板上に $1.2 \mu\text{ m}$ 程度の多孔質Si層を形成し、その上に $30 \mu\text{ m}$ の p 型エピ層が形成される。その後、PERLやPERCセルを作製し、異種基板に転写される。基板は、再利用される。これにより、ウエハコスト比率を 29% から、条件によるが、 $5\sim 12\%$ に低減できるはずと言う。エピSi層の実効少数キャリア寿命 $762 \mu\text{ s}$ を得ている。テクスチャ $\text{TCO}/\text{n}/\text{i-a-Si}/\text{p-Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}/\text{Alミラー}/\text{ガラス}$ 構造のSHJセル (4 cm^2) で、効率 19.1% の状況である。今後は、プロセス技術の高度化と、モジュール効率 20% 以上を目指すまとめた。

結晶Si太陽電池の研究開発の現状については、前回の第27回欧州太陽光発電会議 (2012年24日~28日、フランクフルト、ドイツ) でのS. Glunzの基調講演がまとまっているので、紹介させて頂く。

(2) S. Glunz (FhG-ISE) は、第27回欧州太陽光発電会議で、“Overview of High Efficiency c-Si Solar Cell Development in Research and Production” と題して、基調講演を行った。 $160 \mu\text{ m}$ 厚の単結晶Si太陽電池では、短絡電流密度 J_{sc} として、理論値には、最大 $43.6\text{ mA}/\text{cm}^2$ が得られるはずである。種々の損失があるが、 p-Si のAl-BSFセルでは、光学損失分 $-5\text{ mA}/\text{cm}^2$ 、表面再結合損失分 $-1.1\text{ mA}/\text{cm}^2$ 、ベース再結合損失分 $-0.8\text{ mA}/\text{cm}^2$ 、裏面再結合損失分 $-1.1\text{ mA}/\text{cm}^2$ があり、 $35.6\text{ mA}/\text{cm}^2$ で、 $V_{oc}=627\text{ mV}$ 、効率 18.4% である。損失低減に向けた種々のアプローチが紹介された。

①裏面の再結合速度は高く、メタリゼーションの改良が有効である。Alペーストの改良によるAl-BSF改良型では、 J_{sc} は $35.7\text{ mA}/\text{cm}^2$ に改善され、 $V_{oc}=633\text{ mV}$ で、効率 $\eta=18.7\%$ である。裏面再結合損失分は、 $-1.1\text{ mA}/\text{cm}^2$ から $-0.8\text{ mA}/\text{cm}^2$ に改善されているが、高濃度ドーピングによる表面再結合や表面パッシベーションが不十分であることが、課題である。

②表面層の改良として、選択リンエミッタ構造が有効である。PSGからのlaser-over dopingや高濃度エミッタ拡散層の化学的エッチバックが検討され、選択エミッタを用いた p-Si ベースのAl-BSFセルでは、 $J_{sc}=36.2\text{ mA}/\text{cm}^2$ で、 $V_{oc}=643\text{ mV}$ 、 $\eta=19.0\%$ となっている。表面再結合損失分が $-1.1\text{ mA}/\text{cm}^2$ から $-0.4\text{ mA}/\text{cm}^2$ に大きく改善されているが、ベース層および裏面での再結合が課題である。

③裏面再結合の低減に、裏面パッシベーションが有効である。裏面パッシベーションを用いたQ-CellsのQ-ANTUM技術 ($\text{a-SiN}_x:\text{H}$ のAR、スクリーン印刷表面コンタクト、laser firedポイントコンタクトなど) による p 型ベースの単結晶および多結晶セル ($156 \times 156\text{ mm}^2$) の特性を表1に示す。 $38.9\text{ mA}/\text{cm}^2$ の高い J_{sc} が得られている。CMOSのゲート絶縁膜として用いられている Al_2O_3 は、負電荷、化学パッシベーション、電界効果パッシベーションが特徴である。表面再結合速度の増加につながる熱的安定性が課題である。 $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$ のダブル裏面パッシベーションも検討されている。表2に、Trinaによる $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$ の裏面パッシベーションを用いた p 型cast-monoのPERCセル ($156 \times 156\text{ mm}^2$) の特性を示す。表3に、Schottの p 型CZ-SiのPERCセル ($156 \times 156\text{ mm}^2$) の最新の特性を示す。スタック裏面パッシベーションが用いられ、光劣化後の特性で、選択エミッタを用いずに、 $38.9\text{ mA}/\text{cm}^2$ の高い J_{sc} が得られている。抵抗率は $2\sim 4\ \Omega\text{ cm}$ のものが用いられている。表4に、 $170 \mu\text{ m}$ 厚のMCZ- p 型Si ($0.9\ \Omega\text{ cm}$) を用いたメタルラップスルー (MWT) PERCセル ($156 \times 156\text{ mm}^2$) の特性を示す。光劣化抑

制のため、低 O_2 濃度のMCZ結晶が用いられ、laser overdopingによる選択エミッタ、熱酸化 SiO_2 パッシベーションなどが用いられている。PERCセルは、MWT技術と整合性が良い。

表1 Q-CellsのQ-ANTUM技術によるセル (156x156mm²) の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
CZ-Si	652	38.9	78.9	20.2
mc-Si	652	38.9	76.7	19.5

表2 TrinaによるAlO_x/SiN_xの裏面パッシベーションを用いたp型cast-monoのPERCセル (156x156mm²) の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Best	649	38.1	79.6	19.6
Average	647	38.1	78.8	19.4
Al-BSF	635	36.8	78.1	18.3

表3 Schottのp型CZ-SiのPERCセル (156x156mm²) の最新の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
CZ-Si	664	39.9	79.2	21.0

表4 170 μ m厚のMCZ-p型Si (0.9 Ω cm) を用いたメタルラップスルー (MWT) PERCセル (156x156mm²) の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Median	652	38.9	78.9	20.2
Best cell	652	38.9	76.7	19.5

まとめると、p-Siベースの裏面パッシベーションセルでは、 $J_{sc}=37.2\text{mA/cm}^2$ で、 $V_{oc}=651\text{mV}$ 、 $\eta=20.0\%$ となっている。裏面パッシベーションにより、裏面再結合損失分が -1.1mA/cm^2 から -0.3mA/cm^2 に大きく改善され、かつ、内部反射の改善により、光学損失成分が、 -5mA/cm^2 から -4.6mA/cm^2 に改善されているが、ベース層での再結合、光劣化による寿命制限が課題である。

④ベース層の改善に向け、n型基板の導入も増えている。表5に、Yingli/ECNによるPanda技術を用いたn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性を示す。表6に、Boschによるn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性を示す。Boschの検討によれば、n型Siのトップとテールで、ドーピング濃度は、6倍異なるが、セルの変換効率は、ほぼ一定との事である。

まとめると、n-SiベースのP-BSFセルでは、 $J_{sc}=37.1\text{mA/cm}^2$ で、 $V_{oc}=648\text{mV}$ 、 $\eta=19.7\%$ となっている。n型ベースにより、ベース再結合損失分が -0.8mA/cm^2 から -0.2mA/cm^2 に大きく改善されているが、裏面再結合が課題である。

表5 Yingli/ECNによるPanda技術を用いたn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Average	648	39.2	78.0	19.8
Maximum	649	39.3	78.3	20.0

表6 Boschによるn-SiベースP-BSF構造bifacialセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Gold coated	648	39.1	79.5	20.1
Black coated	647	38.7	79.4	19.9

⑤n型Siベースセルの裏面再結合の抑制が検討されている。表7に、Q-Cellsによるn型Siベース、B裏面エミッタP-FSFセルの特性を示す。裏面Bドープエミッタの裏面接合で、裏面パッシベーションがなされている。表8に、FhG-ISEによるn型SiベースのPERLセルの特性を示す。表面BエミッタのAl₂O₃パッシベーション、SiNxのAR、n⁺⁺-BSF、SiO₂裏面パッシベーションが用いられ、高いVoc=705mV、アパーチャ効率23.9%が得られている。Pの局所拡散の代わりに、レーザドーピングなど、本技術の工業化も検討されている。表9は、工業化に向けたn型SiベースのPERLセルの特性を示す。表8、表9の結果は、FhG-ISEの認定データである。

まとめると、n-SiベースのPERLセルでは、Jsc=37.3mA/cm²で、Voc=682mV、η=21.3%となっている。n型ベースにより、表面再結合損失分、ベース再結合損失分、裏面再結合分が、各々、-0.8mA/cm²、-0.3mA/cm²、-0.5mA/cm²と、再結合損失はかなり改善されているが、光学損失低減が課題である。

表7 Q-Cellsによるn型Siベース、B裏面エミッタP-FSFセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Maximum	667	39.6	79.18	20.9

表8 FhG-ISEによるn型SiベースのPERLセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Best	705	41.1	82.5	23.9

表9 工業化に向けたn型SiベースのPERLセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Best	701	39.8	80.1	22.4

⑥光学損失低減のため、裏面コンタクトセルが検討されている。裏面コンタクトセルも最近の傾向である。この分野では、Sunpowerが実績を有し、2002年の20.6%から、2010年の24.2%へと、効率向上をはかってきている。表10は、SiIFab/ISC Konstanz、Bosch Solar/Varian/ISFH、Samsung SDI/Varianによる裏面コンタクトセルの特性を示す。SiIFab/ISC Konstanzのセルは、BBBr₃+POCl₃拡散、SiNxパッシベーション、レーザパターニング、スクリーン印刷メタリゼーションを用いたBifacialセルである。熱拡散に代わるイオン注入も注目されている。Varianとの共同研究開発が進められている。課題は、コストとスループットである。Bosch Solar/Varian/ISFHでは、シャローマスクを用いた選択ドーピングがなされている。Samsung SDI/Varianでは、イオン注入による選択ドーピング加え、SiO₂熱酸化パッシベーションが用いられている。

まとめると、n-Siベースの裏面コンタクトセルでは、Jsc=39.2mA/cm²で、Voc=699mV、η

=23.0%となっている。裏面コンタクトにより、光学損失分が、 $-2\text{mA}/\text{cm}^2$ と大きく改善され、また、n型ベースにより、表面再結合損失分、ベース再結合損失分が、各々、 $-0.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $-0.3\text{mA}/\text{cm}^2$ とかなり改善されているが、裏面再結合分が、 $-1.6\text{mA}/\text{cm}^2$ と多く、課題である。

表10 SiIFab/ISC Konstanz、Bosch Solar/Varian/ISFH、Samsung SDI/Varian
による裏面コンタクトセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
SiIFab/ISC Konstanz	646	41.2	79.1	21.0
Bosch Solar/Varian/ISFH	685	41.3	75.0	21.2
Samsung SDI/Varian	676	40.1	81.0	22.4

⑦ヘテロ接合型も最近の傾向である。Panasonic（三洋電機）は、HIT太陽電池で、モジュール効率20.6%の状況で、前回会議で、98 μm 厚の10cmx10cmセルで効率23.7%の達成を発表している。a-Siによる両面コンタクトパッシベーションにより高いVoc747mVが実現している。裏面コンタクトセルとヘテロ接合の併用により、高いJscの実現が期待できる。表11に、a-Siによるヘテロ接合を併用したn型ベース裏面コンタクトセルの特性を示す。裏面に、n型a-Si、p型a-Siによるヘテロ接合を用いられている他、表面も、a-SiによるFSF層が用いられている。

表11 a-Siによるヘテロ接合を併用したn型ベース裏面コンタクトセルの特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
n型FZ-Si 4cm ²	723	41.8	77.4	23.4
n型CZ-Si 239cm ²	692	38.4	77.9	20.7

表12 裏面コンタクトパッシベーションを用いた
Sunpowerのn型ベース裏面コンタクトセル（155cm²）の特性

	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Peak	721	40.5	82.9	24.2
Median	727	40.0	81.2	23.6

表12に、裏面コンタクトパッシベーションを用いたSunpowerのn型ベース裏面コンタクトセル（155cm²）の特性を示す。最高効率24.2%（平均効率23.6%）、モジュール効率21.2%の状況であり、2013年初頭から、50MW程度の本仕様のモジュール生産を開始するとの事である。

まとめると、裏面コンタクトパッシベーションを併用したn-Siベースの裏面コンタクトセルでは、Jsc=39.4mA/cm²で、Voc=721mV、 η =24.1%となっている。損失解析がなされ、バルク再結合損失が3.5%と多く、表面再結合損失1.1%、裏面再結合損失0.8%の、計5.4%である。

今後の方向として、フォトニック構造などによるlight trappingなどが、高効率化に有効で、低コ

スト化に向け、高効率・低コストセル構造、単純な低コストプロセスなどの開発が必要であるとまとめられた。

4.3 薄膜太陽電池分野：

4.3.1 薄膜Si太陽電池：

(1) B. Rech (HZB) は、”Recent Progress in Thin-Film Silicon Solar Cells: From Amorphous Towards Large-Grained Polycrystalline Silicon” と題して、薄膜Si太陽電池に関する基調講演を行った。薄膜Si太陽電池の特徴として、①低材料コスト、②高速成膜、③エネルギーペイバックタイムが短い、④BIPVに適用性、⑤フレキシブル、などがある。タンデム太陽電池は、TCO層、a-Si層、中間反射層、 μc -Si層、裏面反射層、などで構成される。薄膜Si太陽電池の高効率化のキー技術として、新材料、light trapping、ナノ・インプリント技術、モデリング、新概念が重要としている。新材料として、a-SiO₂、s-SiC、 μc -SiGeなどがある。単接合セルでは、a-Si:Hセル (1cm²) で、効率10.1% (TEL Solar)、 μc -Si:Hセル (1cm²) で、効率10.7% (TEL Solar)、SPC-poly Siセル (64cm²) で、効率10.4% (CSG Solar)、の状況である。a-Si:H/ μc -Si:H 2 接合タンデムについては、Kanekaの小面積セル (1cm²) で、効率12.3%を報告している。light trappingとAR等の適用により、1cm²セルで、効率12.1% (J_{sc}=12.6mA/cm², Voc=1411mV, FF=67.8%) が得られている。840cm²サブモジュールの安定化アパーチャエリア効率8.9%の状況である。57m²モジュールで、効率9.7%であり、50MWの生産ラインを用いた製造では、平均効率9.7%であるとの事である。3 接合タンデムセルについては、UniSolarによる初期効率16.3%、LG電子の安定化効率13.4%、の状況である。57m²実用モジュール効率6~10%の状況である。図10に、UniSolarによる3 接合タンデムセルの初期効率16.3%を示す。課題は、モジュールの安定化効率15%以上、CVDコスト低減、a-Siの光劣化抑制、などである。

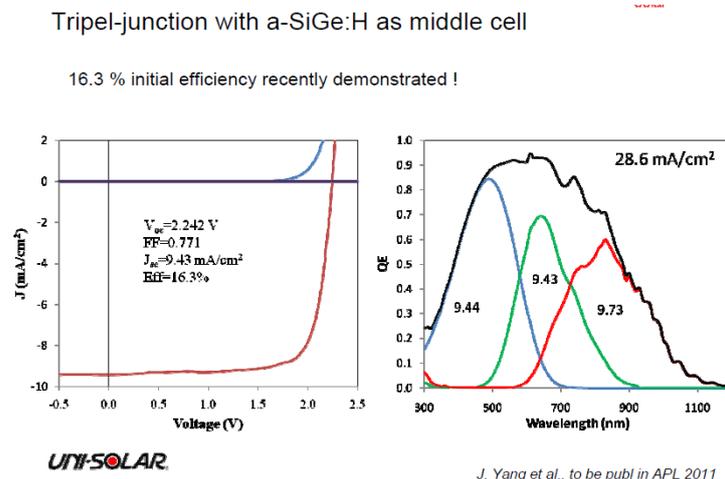


図10 UniSolarによる3 接合薄膜SiタンデムセルのI-V特性と分光感度特性

BIPVの例も紹介された。長期的テーマとして、液相結晶化の試みも紹介された。EB蒸着とレーザーによる結晶化が検討され、2 μ m厚の薄膜Si太陽電池で、効率10.4% (Voc=492mV) が得られている。EB結晶化も検討され、実効拡散長は、数10 μ mで、EPR測定による欠陥密度も、10¹⁴~10¹⁶cm⁻³、である。UNSWとSUNTECHでは、10 μ m厚薄膜Si太陽電池で、効率11.7%

($J_{sc}=27.6\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=585\text{mV}$, $FF=72.4\%$) が得られている。今後、ケースAでは、効率14.7% ($J_{sc}=33\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=600\text{mV}$, $FF=75\%$)、ケースA+では、効率17.1% ($J_{sc}=35\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=650\text{mV}$, $FF=75\%$) が期待できるとしている。HIT構造の適用による高 V_{oc} 化、フロントガラス、light trapping用ナノ・インプリント技術、EB蒸着、結晶化の高度化、が必要である。

今後の方向として、効率20%以上の実現を目指して、4接合タンデム、a-Siの光劣化抑制、a-Siおよび $\mu\text{c-Si}$ の高品質材料による V_{oc} 向上、HIT構造の適用、高光吸収材料、light trapping、新材料などの検討が必要としている。

4.3.2 CIGS、II—VI族化合物薄膜太陽電池：

(1) A.N. Tiwari (EMPA) は、”Advances in Thin Film PV: CIGS & CdTe”と題して、CIGS系とCdTe系の薄膜PVに関する基調講演を行った。その中で、CIGS系の公認最高効率20.4% (0.5203cm^2 , $J_{sc}=3508\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=0.7363\text{V}$, $FF=0.789$) を報告した。450°C以下の低温プロセスで、フレキシブルポリイミド基板上に成膜されている。構造は、スパッタ蒸着 ZnO 表面コンタクト層/chemical bath deposition による n 型 CdS バッファ層/低温共蒸着 p 型 CIGS 吸収層/スパッタ蒸着 Mo 裏面コンタクト層/ポリイミド基板、から成る。Ga グレーディングや NaF の post deposition 処理 (PDT) が検討された。NaF-PDT CIGS に KF が導入され、Na と K のイオン交換がなされている。XPS 測定により、CIGS 表面 (<30nm) には、Cu と Ga が欠乏した層が形成されている事がわかる。これにより、CIGS 表面層は、Cd 拡散が促進され、 Cd_{Cu} 欠陥の形成、CIGS 表面層に反転層形成、すなわち、埋め込み n-p 接合形成、が今回の効率向上の鍵と考えている。図 1 1 には、CIGS 技術の可能性：ポリ Si 太陽電池との効率向上の進展の比較を示す。タンデム化や集光技術の導入により、効率 25% の可能性があるとしている。図 1 2 に示すように、フレキシブルサブモジュールも作製されている。

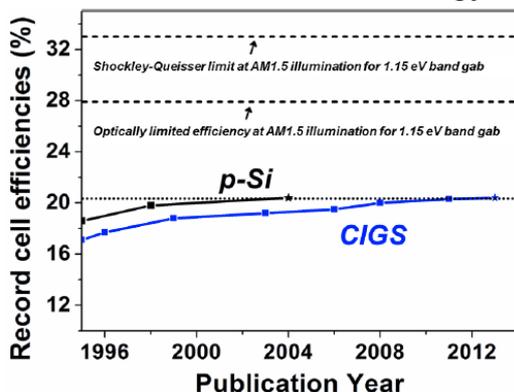


図 1 1 CIGS 技術の可能性：ポリ Si 太陽電池との効率向上の進展の比較 (Dr. A.N. Tiwari 提供。非公開希望により、会議ハイライトより)

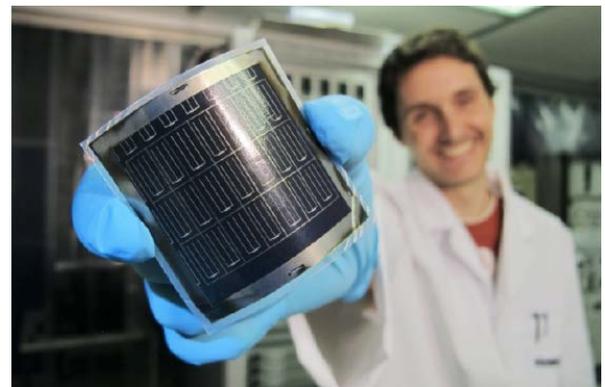


図 1 2 フレキシブル CIGS サブモジュール (Dr. A.N. Tiwari 提供。非公開希望により、ホームページより)

小面積セルの効率は、CIGS セルで 20.4%、CdTe セルで 19.6% であり、モジュール効率は、CIGS で 17.8%、CdTe で 14% である。表 1 3 に、CIGS の高効率セルの効率を示す。ベストの特性を組み合わせると、効率 21.8% が可能で、将来的には、効率 25% が期待でき

るとしている。表 1 4 に、CIGS、CdTe 太陽電池モジュールの実用効率の進展の予測を示す。

2012 年の生産規模は、CIGS 系では、ソーラーフロンティアの 1000MW を筆頭に、計 2170MW、CdTe 系では、First Solar の 2700MW を筆頭に、計 3100MW である。今後は、効率向上、高信頼性と同時に、モジュールコストの低減が必要である。モジュールコスト \$ 0.5/W 以下に向けた薄膜系のコストダウンのためには、高スループットなどプロセス改良、ガラス、封止などの改善が必要である。また、コスト低減には、生産量拡張が有効である。投資と同時に市場拡大が必要であり、BIPV や軽量・フレキシブルモジュール用適用領域の発掘が望まれる。今後の高効率化のためには、層堆積、接合形成、界面特性、ワイドギャップ材料での高効率化、などが重要であるとしている。長期的には、多接合化による高効率化 (> 25%)、太陽電池の損失メカニズムや大面積モジュールの非一様性の理解等、基礎的理解が重要であると考えられる

表 1 3 CIGS 太陽電池効率の状況と高効率化の可能性

	NREL	ZSW	EMPA	Potential
Voc (mV)	691.8	720.4	736.3	736.3
Jsc (mA/cm2)	35.74	36.33	35.08	36.5
FF (%)	81.03	76.78	78.9	81.2
η (%)	20.0	20.3	20.4	21.8

表 1 4 CIGS、CdTe 太陽電池モジュールの実用効率の進展の予測

	2012	2015	2020	2025
CIGS	13	14-15	15-16	16-17
CdTe	10-12.5	13	13.5	14-15

(2) H. Hiraga ら (東芝) は、“Photovoltaic Properties of Homojunction CIGS Solar Cells Using Various Divalent N-Type Dopants” と題して、ホモ接合 CIGS 太陽電池の試みを報告した。3 段階蒸着法が用いられ、室温での n 型ドーピングが検討された。表に示すように、

種々のドーパントが検討され、 V_{cu} の置き換えの観点から、Formal Valence ($V = \sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{r_0 - r_i}{B_f}\right)$ 、

n : 最近接数、 r_0 : 結合係数、 r_i : 結合長、 B_f : 経験定数) の指標で、評価されている。

表 1 5 各種ドーパントと CIGS 層の PL 強度、CIGS 太陽電池効率との相関

Divalent Dopant	V	Efficiency (%)	Relative PL intensity	Electron Shell
Mg	2.40	13.4	0.47	Closed
Ca	4.59	13.4	0.35	Closed
Mn	2.40	14.1	0.44	Opened
Fe	2.15	8.6	0.38	Opened
Co	1.93	=	0.05	Opened
Ni	1.48	=	0.02	Opened
Cu	1.41	=	0.00	Opened
Zn	1.83	11.0	0.52	Closed
Cd	2.98	17.7	0.93	Closed

各種ドーパントとCIGS層のPL強度、CIGS太陽電池効率との相関が検討されている。結果を表15に示す。表15の結果から、Formal Valence $V=3$ のドーパント (Cd) は、PL強度、効率も高く、安定なドーパントと見ている。 $V(Ca) \geq 3$ 、 $V(Mg, Zn) \leq 3$ のドーパントは、不安定と考えている。自社測定で、20.7%の高効率を実現したとの新聞発表があったが、詳細については、次の機会にこの事であった。

(3) CdTeセルに関しては、2013年6月の第39回 IEEE 光起電力専門家会議で、M. Gloeckler (First Solar) は、“CdTe Solar Cells at the Threshold to 20% Efficiency” と題して、CdTe 太陽電池のニューレコード効率 19.05%を達成したことを報告した。ここでは、最近の GE による高効率 19.6%の実現と合わせて紹介する。

1993年～2003年のCdTeセル効率のターゲット 19.0% ($V_{oc}=900\text{mV}$ 、 $J_{sc}=27\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=76.5$) に対して、2010年段階では、セル効率 16.5% ($V_{oc}=845\text{mV}$ 、 $J_{sc}=25.9\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=75.5\%$)、量産ベースのモジュール効率 ($V_{oc}=791\text{mV}$ 、 $J_{sc}=19.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=62.2\%$) であった。その後、2012年に、セル効率 17.3%を達成したが、すぐに、GE が、効率 18.3%を実現した。2013年4月には、First Solar は、セル効率 18.7%、つい最近、19/05%のニューレコードのセル効率を達成した。さらに、つい最近、GE が、19.6%の高効率を達成している。最近の高効率 CdTe 太陽電池の特性をまとめて、表6に示す。

IBM の 19.05%の例では、TCO の改良で、短波長域 (300nm～400nm) の光透過が改善され、 $J_{sc}=28.6\text{mA}/\text{cm}^2$ が得られている。 V_{oc} 改善に向け、粒界、界面、ドーピング、空乏層が検討され、GE の $V_{oc}=857\text{mV}$ に対して、872mV に改善されている。少数キャリア寿命の改善が V_{oc} の向上にもつながり、903mV も得られているとの事である。 V_{oc} 改善は、 FF 改善にもつながる。モジュール効率は、16.1%が認定され、量産ベースのモジュール効率も、12%から、12.3%、13%へと改善予定である。モジュール効率向上には、直列抵抗損、面積損、スクライプ損等の改善が必要である。次のターゲットは、セル効率 22% ($V_{oc}=920\text{mV}$ 、 $J_{sc}=30\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=60\%$) であろう。

表 1 6 最近の高効率 CdTe 太陽電池の特性とターゲット効率との比較

	GE	First Solar	First Solar	GE
V_{oc} (mV)	857	852	872	857.3
J_{sc} (mA/cm ²)	27.0	28.6	28.0	28.59
FF (%)	79.0	77.7	78.0	80.0
η (%)	18.3-	18.7	19.05	19.6

4.3.3 有機・色素太陽電池：

(1) J. Hummelen (Univ. Groningen) は、“Advances in Organic Photovoltaics” と題して、有機系太陽電池に関する基調講演を行った。有機系太陽電池は、①低価格、②軽量、③フレキシブル、④カラフル、⑤半透明、⑥大量生産性、などの特徴を有する。図13に示すように、有機系太陽電池の高効率化には、バルクヘテロ接合 (BJT) やタンデムの概念が有効で、P3HTの他に、35以上の高分子系で効率5%以上が実現している。有機系太陽電池の高効率化の変遷を出荷されている有機系太陽電池の効率は、3%のオーダーである。三菱化学は、低分子系で効率11.1% (0.159cm^2 、 $J_{sc}=17.8\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $V_{oc}=0.807\text{V}$ 、 $FF=0.657$)

を実現している。Heliatekは、有機系タンデムで効率12.0%、UCLA/住友化学は、高分子系タンデムで効率10.6%を達成している。有機系太陽電池の効率向上が必要である。2011年に、P3HT/PC60BM、PVNTNT/PC60BMの組み合わせで、効率7%、P3HT/PC71BM、TC60BA/PBDTT-DPPの組み合わせで、効率9.36%だった。2012年には、UCLAでは、P3HT、住友化学の高分子/吸収端波長900nm材料の構成で、効率10.61%を得ている。3接合タンデムの試みも紹介され、Rene Janselグループでは、PMPPPST、PCDTBTなどを用い、効率8.9~9.6%を得ている。無機系では、 $E_g/q-V_{oc}=0.4\sim 0.5V$ だが、有機系では、低 E_g 系で、 $E_g/q-V_{oc}=0.7V$ 、高 E_g 系で、 $E_g/q-V_{oc}=1V$ と、大きく、高効率化の障害となっている。

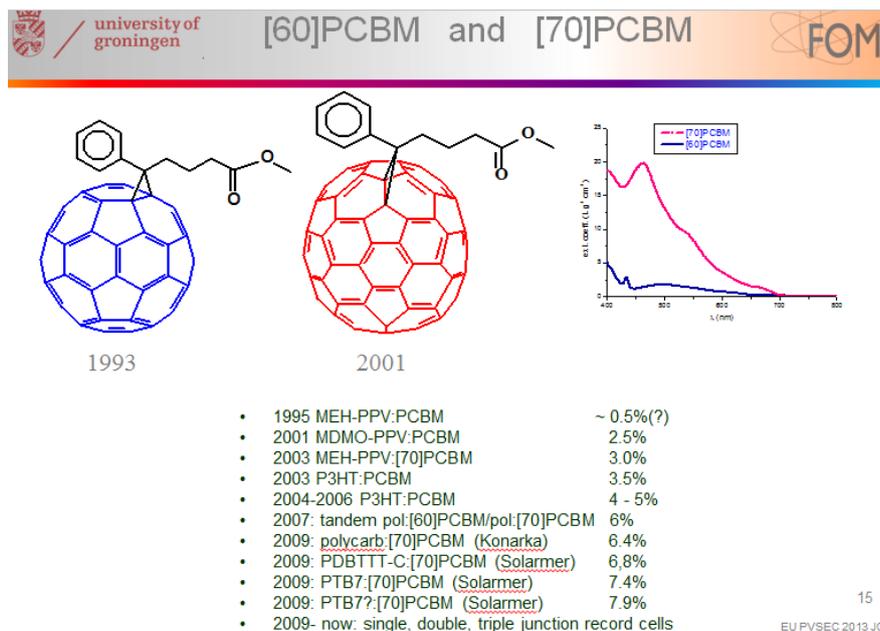


図 1 3 有機系太陽電池の高効率化の変遷 (会議ハイライトより)

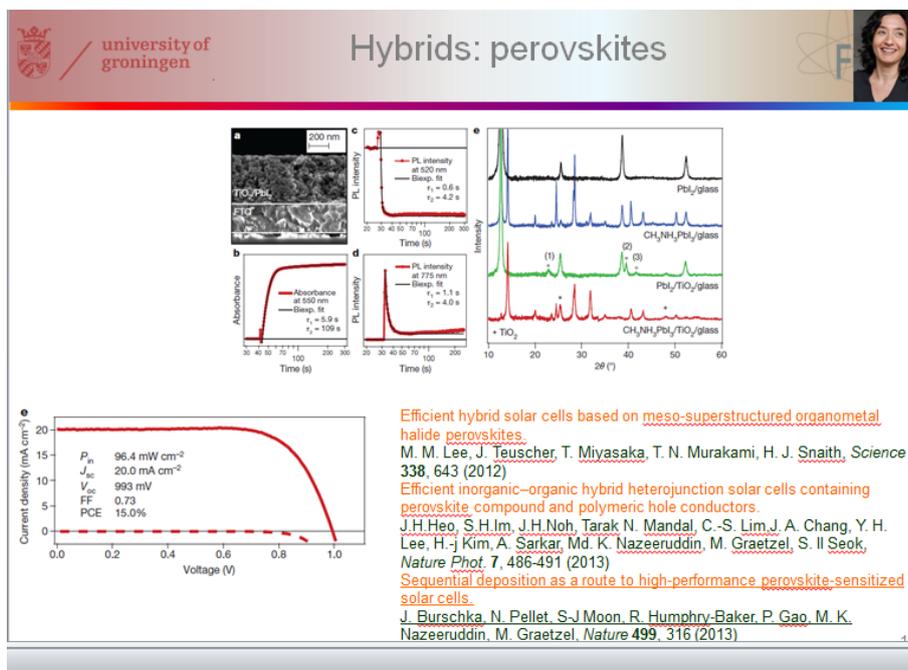


図 1 4 色素-ペロブスカイトハイブリッド太陽電池 (会議ハイライトより)

次世代OPVとして、stretchable OPVの試み、モフォロジーと効率との相関、Quantum Chain解析などの基礎的研究についても触れた。60℃、85%RHの高温・高湿試験もなされ、1000時間後でも、10%以内の低下におさまっているとの事である。

最近の話題は、色素ペロブスカイトのハイブリッド太陽電池で、図14に示すように、効率15.0%（入射光強度96.4mW/cm²で、Jsc=20.1mA/cm²、Voc=993mV、FF=0.73）が報告されている。公認データは、EPFLの14.1%（0.209cm⁻²、Jsc=21.34mA/cm²、Voc=1.007V、FF=0.657）であり、これまでのシャープの色素太陽電池の効率11.9%（1.005cm⁻²、Jsc=22.47mA/cm²、Voc=0.744V、FF=0.712）に比べて、開放端電圧が高く、そのメカニズム解明が今後の高効率化に有効と考える。

また、色素・有機太陽電池の分野では、効率18%を目指したセルの高効率化、高信頼度化の検討が必要であり、公立の公的機関による効率測定の認定が必要であることが指摘されている。

次の4.5のPVコンポーネント、4.5のPVシステムの基調講演については、報告者が、10月3日（木）、CNRS本部で開催されたUNESCOイベント「Renewable energies in the service of humanity: the current challenges and prospects by 2030 and 2050」に出席していたため、聴講できなかった。お許し願いたい。参考のために、前回の第27回欧州太陽光発電会議（2012年24日～28日、フランクフルト、ドイツ）での基調講演を紹介させて頂く。

4.4 PVコンポーネント：

(1) J. H. Wohlgemuth(NREL)は、第27回欧州太陽光発電会議で、“Standards for PV Modules and Components - Recent Developments and Challenges”と題して、基調講演を行った。IEC TC82は、PVにおける国際連携をリードし、国際標準を発行している。1980年初頭に設置されたモジュールに関する標準化を進めているWG2の活動の概要が報告された。5つのサブWGから成る。

①Measurement Principlesは、IEC60891、60904～10にまとめられ、今後は、CPVに関するWG7（IEC60904-3）と連携し、ダイレクトスペクトラムやCPVデバイス用のソーラーシミュレーターに関わるIEC60904-9のアップデートが必要である。

②Qualification and Safety Testingに関しては、IEC61215（結晶Si）、61646（薄膜系）、61730（PVモジュール）にまとめられている。追加修正として、ホットスポットや温度係数などがある。

③Power and Energy Ratingsに関しては、IEC61853-1（irradiation and temperature performance）および-2（spectral response, cycle of incidence and module temperature）にまとめられている。現在、61853-3（module energy rating calculation）を開発中である。

④Specialized Stress Testsに関しては、IEC617（salt-mist corrosion testing of PV modules）にまとめられている。現在、IEC62719（transported testing）、62712（dynamic mechanical load testing）、62716（corrosion testing）2804（system-voltage durability testing）を開発中である。

⑤Module Componentsに関しては、IEC62790（junction box）、62109-2（safety for power

convertors)、connectors for PC applications in P systems - safety requirement testing、PV cablesなどを開発中である。Module Materialsは、Encapsulants、Back Sheets and Front Sheets、Adhesives、Pottants、Edge Sealから成り、IEC62775、62788-1-2 (EVA)、62788-1-4 (encapsulants and back sheets)、62788-1-5(encapsulation optimization)、62805-1-1、1-2を開発中である。

PVモジュールの25年間動作中で、最大劣化率は、約0.8%/年である。25～30年保証のためには、PVモジュールの加速ストレス試験に基づく寿命推定が要求される。PVモジュールは多岐にわたり、信頼性試験の難しさがある。初期出力の保証、20年後の出力が予測と異なるケースがあり、消費者が損をすることとなる。現時点では、寿命は予測し難い。PVモジュールの劣化モードとして、熱サイクルによるインターコネクターやハンダの破断、ガラスを通してのリーク電流、水の浸透、などがあり、多岐にわたる。図15に示すように、PVの品質保証に向けた国際標準の開発のため、International PV QA Task Forceの設立が、紹介された。6つのWGがあり、さらに3つのWG(wire loading、testing of TF modules、testing of CPV modules) が組織されている。



International PV Module Quality Assurance Forum

The PV QA Task Force was formed last July by AIST, NREL & JRC to develop international standards for ensuring PV quality >200 volunteers

- Task Group 1:** PV QA Guideline for Manufacturing Consistency (leader Ivan Sinicco)
- Task Group 2:** PV QA Testing for Thermal and mechanical fatigue including vibration (leader Chris Flueckiger)
- Task Group 3:** PV QA Testing for Humidity, temperature, and voltage (leaders John Wohlgemuth and Neelkanth Dhere)
- Task Group 4:** PV QA Testing for Diodes, shading and reverse bias (leaders Vivek Gade and Paul Robusto)
- Task Group 5:** PV QA Testing for UV, temperature and humidity (leader Michael Köhl)
- Task Group 6:** Communication of PV QA ratings to the community (leader David Williams)

http://www.nrel.gov/ce/ipvmtqa_forum/index.cfm

図15 International PV QA Task Forceの概要 (Dr. S. Kurtz提供)

この他、Y. Hishikawa (AIST) の “Traceable Performance Characterization of State-of-the-Art PV Devices”、J. Sutterfluetiら (Oerlikon Solar) の “Bos Costs: Status and Optimization to Reach Industrial Grid Parity” と題する基調講演、があった。

4. 5 PV システム :

(1) F.P. Baumgartnerら (ZHAW Univ.) は、第27回欧州太陽光発電会議で、” integration and Management of PV Mattery Systems in the Grid” と題して、プレーナリ講演を行った。ドイツなどでは、系統に占めるPVの比率が増加しつつある。ドイツの場合、図16に示すように、2011、2012、2017、2020年に、各々、24GW (4%)、29GW (5%)、51GW (9%)、68GW (12%) と予測されている。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+EV+バッテリーの solar home storage system (図 1 7) 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。図 1 8 には、市場における種々のバッテリーの現状をまとめて示す。いくつかのケーススタディが述べられた。図 1 9 は、PV、バッテリー、グリッドのコストシナリオを示す。2017、2018年頃に、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。

1% PV market growth Germany, simple model

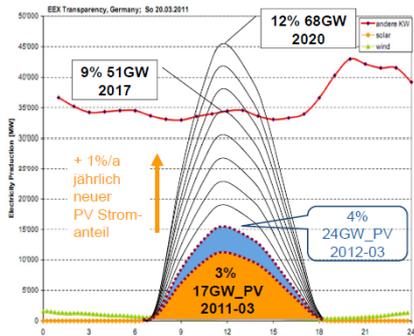


図 1 6 ドイツにおける系統に対する PV の割合

PV –EV- and Battery Storages at Home

- Sharp nutzt im Demonstrationsprojekt Eco House die Batterie des Elektroauto iMiEV, um die Leistung von 8 kW dem Hausstromnetz zur Verfügung zu stellen. (z.B. über DC Hausstromnetz) Gleichzeitig ist die Sharp Leistungselektronik fähig, 4 kWh PV Energie in 30 Minuten wieder in die Autobatterie zu laden.

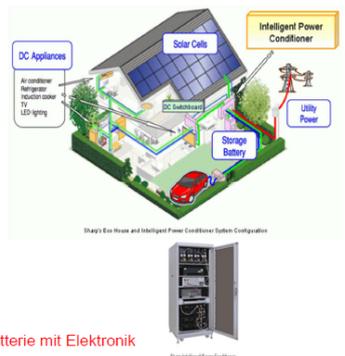


図 1 7 PV-EV-Batteryホームシステム

Storage technologies on the market

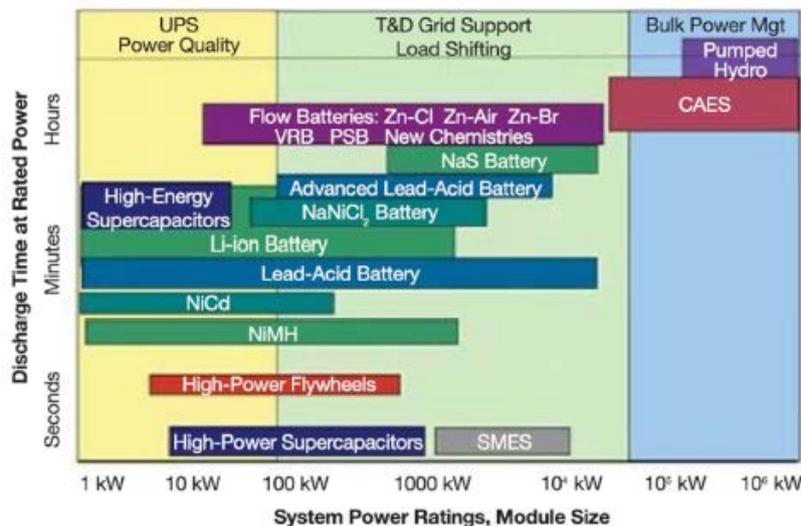


Figure 2. A comparison of grid-level energy storage technologies. UPS, uninterruptible power supply; T&D, transmission and distribution. Source: Electric Power Research Institute.

MRS BULLETIN • VOLUME 36 • MARCH 2011 • www.mrs.org/bulletin • Energy Quarterly

図 1 8 市場における種々のバッテリーの現状

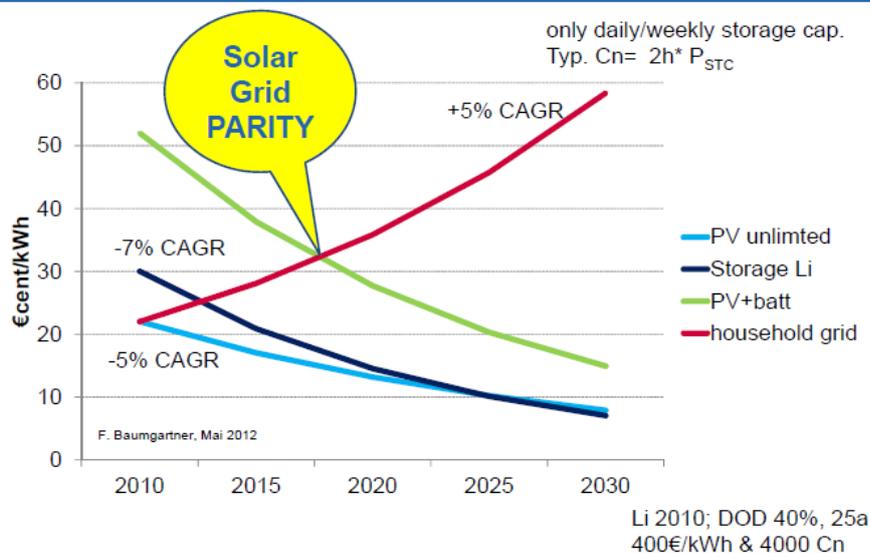


図 1 9 PV、バッテリー、グリッドのコストシナリオ

この他、H. Ossenbrikら (EC-JRC) の“New Opportunities for PV Systems”と題する基調講演、A. Umlondら (SMA Solar Tech.) の“Industrial Solutions for Large PV Integration in the Smart Grid”、H. Schumacher (FH Erfurt) の“Sustainable Development of the Local and Natural Scenery with Renewable Energy Sources”と題するプレナリ講演、があった。

4. 6 市場、政策等：

(1) 開会式セッションで、Moderated Opening Panelとして、M. Crane (Deutsche Welle) がモデレーターで、“Policy and Research for PV in a Global Market”に関するパネル討論がなされた。冒頭、J. Chase (Bloomberg New Energy Finance) が、“Setting the Scene: Investments along the Solar Value Chain”と題して、話題提供を行った。図 2 0 は、世界におけるPVの投資額の変遷を示す。2000年の \$ 2. 4B、2005年の \$ 16. 4B、2010年の \$ 99. 9B、2011年の \$ 158. 1Bと順調に伸びたが、2012年の \$ 140. 4Bと昨年は下がった。しかし、今後も、太陽光発電は伸びて行くであろう。2012年の30. 5GW、2013年の36. 9GW、2014年の48. 9GW、2015年の53. 9GWと伸び、EPIAによれば、2020年には390GWになると予想されている。雇用も24. 7人年/MWということだから、75万人程度の雇用が確保されており、今後も伸びて行くであろう。今後も、太陽光発電のさらなる導入・普及、市場の拡大のためには、政策、投資やR&Dの強化が重要である。ただ、図 2 1 に示すように、売上額に対する太陽光発電でのR&D予算は、2%程度と、半導体産業の~16%、薬品業界の~14%、自動車産業の~3. 5%に比べて低く、R&Dの強化が望まれる。

C. Turmes (EU) 、G. De Santi (EC-JRC) 、M. Le (DOE) 、A. Mine (SER) 、M. Konagai (東工大) 、P. Verlindem (Trina Solar) 、S. Rinck (欧州工業会) がパネリストとして、コメントが述べられた。折角の試みながら、参加者との意見交換がなかったのは残念であ

った。

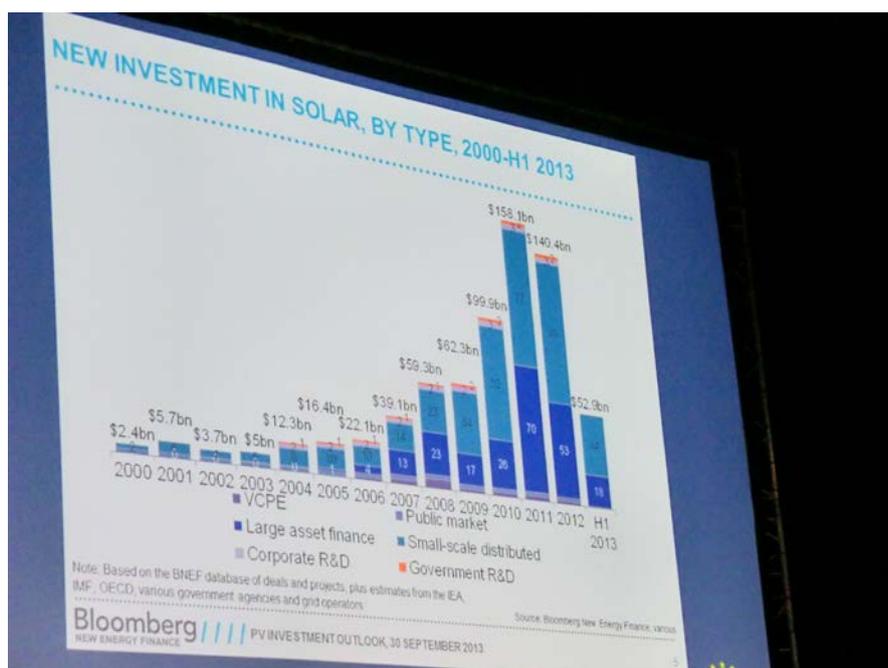


図 2 0 世界におけるPVの投資額の変遷 (RTS松川氏提供)

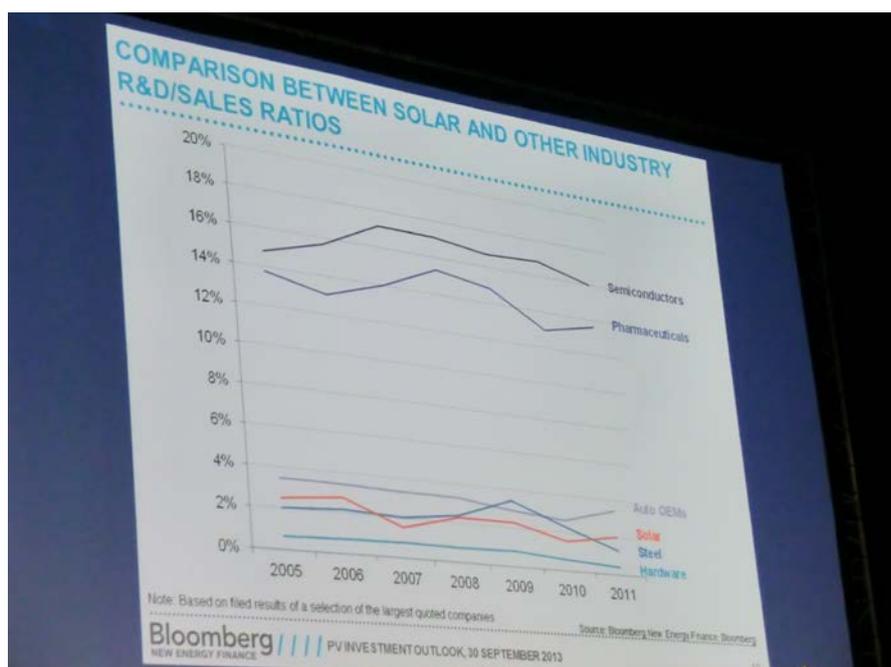


図 2 1 太陽光発電の売上額に対する予算額の変遷と他の産業のそれとの比較 (RTS松川氏提供)

(2) 閉会式セッションで、W. Sine (ECN)、“Photovoltaics: Creating new opportunities for Europe”と題して、欧州におけるPV技術のこれまでの総括と今後の方向性が述べられた。これからのPV時代に対するコメントが述べられた：①market- and application-driven developments、②self-sustained commercial markets within a sustainable market design、③major contribution to energy system、④growth

limited primarily by integration, not by cost、⑤Europe has company and strong competition in PV.

(3) C. Lins (REN21) は、“Global Renewable Energy Development and Outlook with a Particular Focus on PV”と題して、プレーナリ講演を行った。関連資料は、www.ren21.netで入手できる。

(4) P. Meniaら (European Commission) は、“Photovoltaics in Europe: Reality, Potentiality and Responsibility”と題して、欧州PVプログラムの狙い、役割等について、講演を行った。

(5) I. Kaizukaら (RTS) は、“Impacts of FIT on the PV Market in Japan”と題して、我が国における固定電力買取制度 (FIT) の概要が述べられた。FITに関して、2012年度は、20.022GWが認定されたが、実際の設置量は、1.67GWであった。しかし、2013年の日本市場は、4.5～5GWであろうと述べられた。2014年度は、消費税も上がるし、FIFは減り、小規模のPVが飛躍的に伸びるだろうと見ている。PVモジュールも改良されているし、PV価格も、我が国でも、電力価格並みになるだろう。住宅における自己消費モデルへの移行、新たなビジネスモデルの創生、系統容量の確保、電力の供給構造の見直し、等も求められている。

(6) M. Yamaguchiら (豊田工大) は、“Importance of Photovoltaics Learned from the Fukushima Nuclear Power Plant Accident in Japan”と題して、福島原発事故を踏まえて、太陽光発電の重要性が述べられた。特に、太陽光発電の導入・普及、市場拡大のためには、研究開発が重要であり、我が国における太陽光発電の研究開発の概要が述べられた。

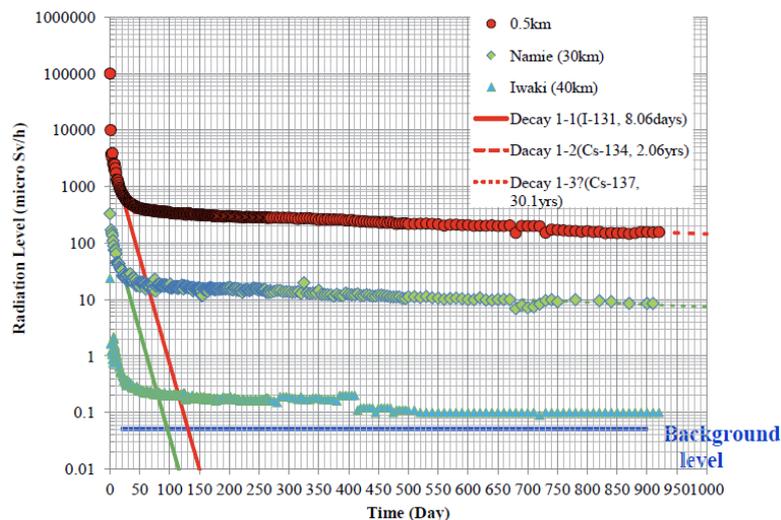


図 2 2 福島原発敷地内 (炉心から500m)、浪江市 (30km)、いわき市 (40km) における放射線量 (福島原発事故に伴う) の時間経過

図 2 2 は、福島原発敷地内 (炉心から500m)、浪江市 (30km)、いわき市 (40km) における放射線量 (福島原発事故に伴う) の時間経過を示す。半減期30年のCs-137が効いて、

放射線量の減衰は飽和しており、現在より放射線量を一桁下げるためには、約100年待たねばならない。放射能除染も有効だが、福島県の2000km²の地域の放射能除染が必要で、最悪80兆円かかるとも言われている。福島原発事故は、今後、原子力発電を再稼働することで、使用済み核燃料や放射性廃棄物の処理や貯蔵をどうするのかの早期結論も求めている。今のままでは、後世に負の遺産を残し、大きな倫理的な問題を生じていると言えよう。図24は、太陽光発電導入の加速化による原子力発電代替の可能性を示す。PV2030+ロードマップによれば、2030年までに、PVの累積導入量100GW（日本の総電力の1割に相当）のターゲットがある。図24に示すように、太陽光発電導入の加速化により、2035~2040年に、原子力発電の代替も可能と言える。

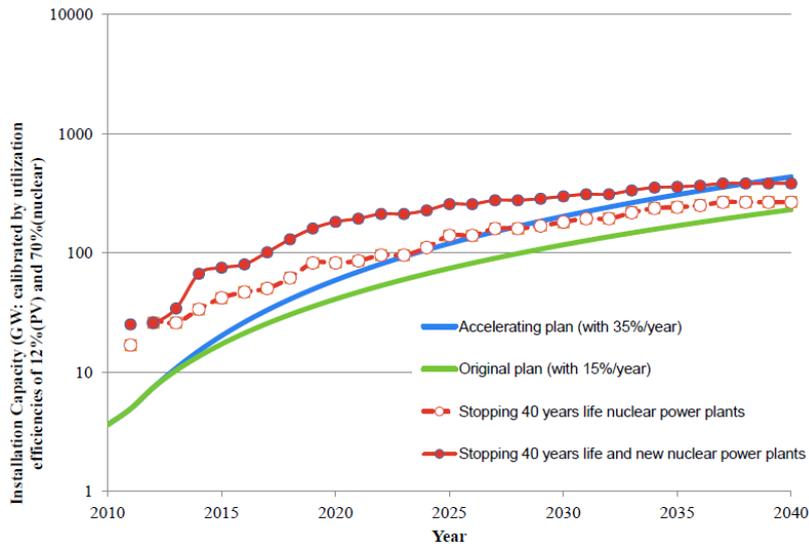


図24 太陽光発電導入の加速化による原子力発電代替の可能性

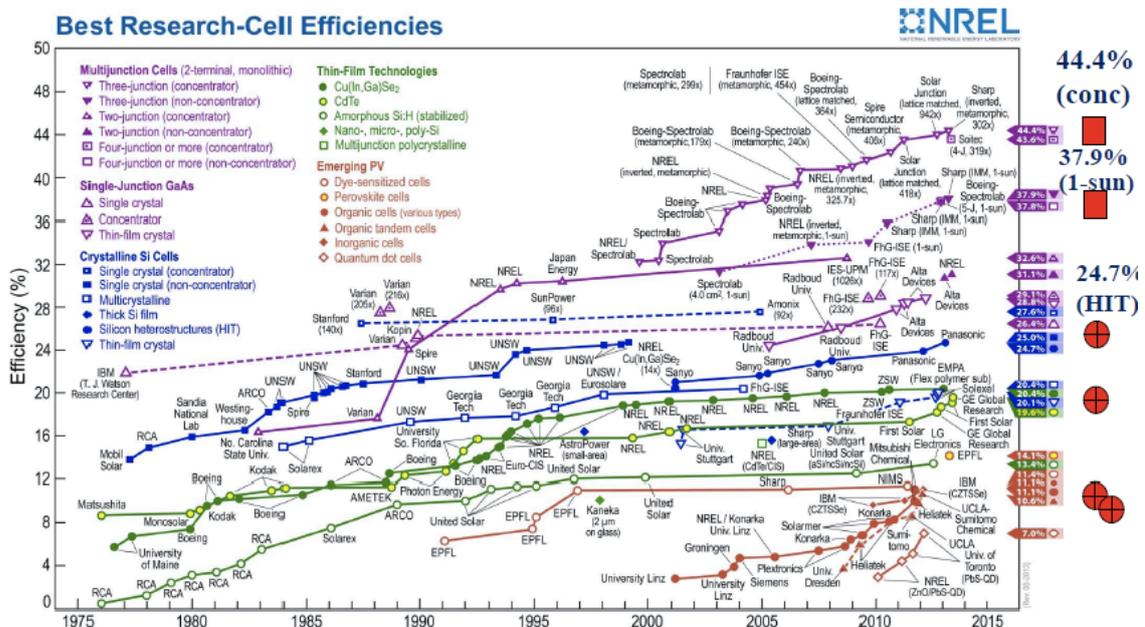


図25 各種太陽電池の高効率化の変遷と最近の我が国の貢献 (右端に赤い四角、丸で示す)

太陽光発電の導入・普及の加速化のためには、将来エネルギービジョンの創生、政策立案、市場モデルの創生、投資等と同時に、太陽光発電に関する研究開発の強化が重要であると述べられた。我が国における太陽光発電の研究開発の概要が紹介された。図25には、各種太陽電池の高効率化の変遷と最近の我が国の貢献を示す。NEDOの「集光太陽光発電に関する日欧共同研究」で、シャープが、InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の250~300倍集光で、効率44.4%の世界最高効率（上記したように、つい最近、FhG-ISEが、44.7%を達成）を達成する共に、同構造で、非集光での世界最高効率37.9%を達成している。この他、パナソニック/サンヨーのHIT構造結晶Si太陽電池で効率24.7%、ソーラーフロンティアのCIS太陽電池効率19.7%、シャープの色素増感太陽電池で効率11.9%、三菱化学の有機太陽電池効率11.1%など、誇れる成果がある。今後も、太陽電池およびシステムの高性能化、低コスト化、長寿命化に関する研究開発が、太陽光発電の将来の主要なエネルギーへの発展、市場のさらなる拡大、主要産業への展開、雇用の確保や人材の育成に需要であると結んだ。

5. 感想：

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

現在主流の結晶Si系は、本会議での発表論文件数が436件と多く、企業や大学、研究所による研究開発の裾野の広がり是他分野を圧倒しており、今後10年は結晶Si系が主流であり続けることが期待される。勿論、そのためにも、研究開発の一層の強化が重要なポイントの一つであると言えよう。結晶Si太陽電池セッションでは、欧米からの研究成果発表が盛んだが、日本企業からの参加は少なく、今後の危惧を感じる。また、欧州で産学連携が進んでいる。わが国でも、NEDOの高性能次世代プロジェクトで、結晶Si太陽電池の研究開発のコンソシアムが進展して、優位な成果が出つつある。今後も、NEDOの後継プロジェクトを期待するし、結晶Si太陽電池を含む太陽光発電の研究開発者人口を増やし、さらにレベルを上げることが必要である。わが国には、太陽光発電に関し、他国が真似をできない高度な研究開発を行うことが求められている。もう一度、世界一の生産量と市場の創製の実現をしたいものである。

ここに来て、薄膜Si系の元気のなさも気にかかる。産学連携を強化し、結晶Si太陽電池に対して、性能、コスト、寿命等でも優れたものを開発することが求められている。

一昨年6月から、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米での集光型太陽光発電システムの重要性が再認識されており、わが国における超高効率太陽電池・材料、集光モジュールおよびシステムに関する研究開発の再強化の良い機会となろう。また、欧米と日本におけるIII-V族多接合、集光型太陽電池の超高効率化の競争が進められており、日本の研究開発のレベルをさらに高め、大規模太陽光発電への道を切り開きたいものである。

欧米の専門家達と話す中で、わが国での有機・色素にかけるリソースの多さに驚かれる。性能や信頼性に課題が多く、基礎にたちかえる必要があるだろう。

なお、プログラム委員長が閉会式で紹介した今会議のハイライトが、下記のホームページで入手できる。

http://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/28th/2_conference/EUPVSEC2013_highlights_.pdf

次回の29th EU-PVSECは、2014年9月22日～26日に、オランダのアムステルダムで開催予定である。第23回太陽光発電国際会議(PVSEC-23)は、2013年10月28日～11月1日、台湾・台北で、40th IEEE PVSCは、2014年6月8日～13日、米国コロラド州デンバーで、開催予定である。また、PVSEC-24、41st IEEE PVSC、30th EU-PVSECの合同会議となる第6回太陽光発電世界会議(WCPEC-6)は、2014年11月23日～27日、京都で開催予定である。

(以上)