

第 32 回太陽光発電欧州会議（32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition）報告

2016. 6. 27

山口真史（豊田工大）

1. 開催月日：2016年6月20日～6月24日。

2. 開催場所：International Congress Center Munich（ミュンヘン、ドイツ）。

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、Marko Topic（Univ. Ljubljana）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750名、前々回より、約1,250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。展示を重視するあまり、EU-PVSECをIEEE PVSCと同じ月に開催したことが、裏目に出ている気がする。

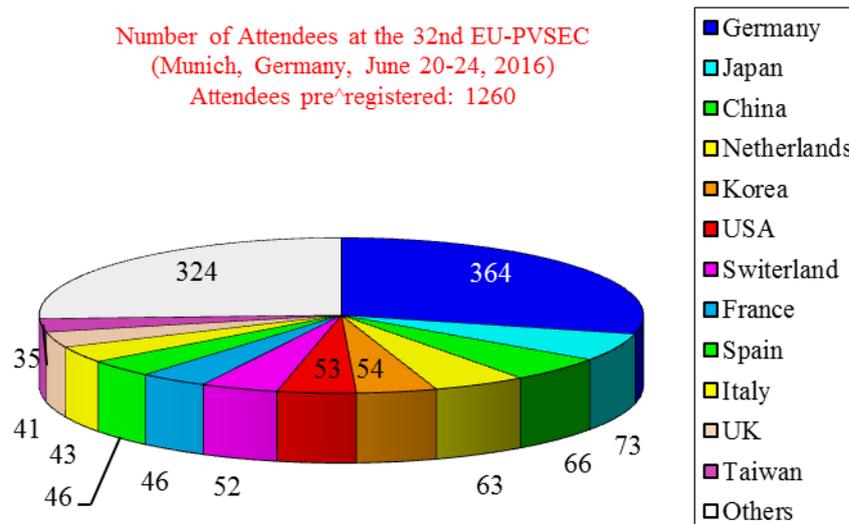


図1 国別事前参加登録者者数（EU-PVSEC配布資料）

図1に、国別事前参加登録者数を示す。事前参加登録者1,260名のうち、国別では、①ドイツ364名、②日本73名、③中国66名、④オランダ63名、⑤韓国54名、⑥米国52名、⑦スイス52名、⑧フランス46名、⑧スペイン46名、⑩イタリア43名、⑪英国41名、⑫台湾35名、の順であった。

図2は、国別発表論文件数を示す。72カ国から、前回会議より61件減、前々回会議より248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215件、②オランダ62件、③中国61件、③インド61件、⑤フランス54件、⑥イタリア51件、⑥韓国51件、⑥スイス51件、⑨日本50件、⑩台湾49件、の順であった。

Number of Papers presented at the 32nd EU-PVSEC
(Munich, Germany; June 20-24, 2016)
1180 papers

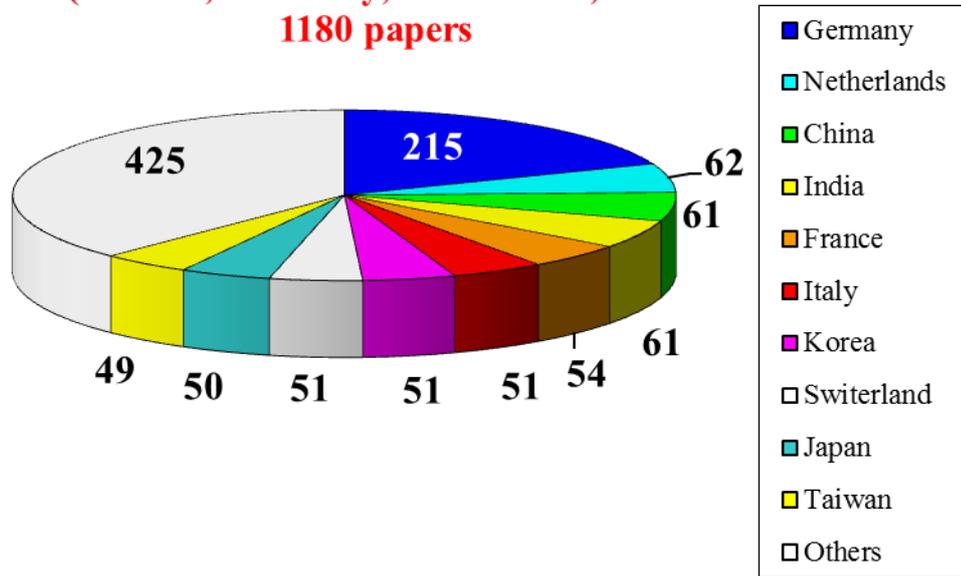


図2 国別発表論文数 (RTS(株)提供)

図3は、発表論文数の分野別内訳を示す。分野別では、①太陽光発電の適用、性能、信頼性303件、②結晶Si系285件、③薄膜系（薄膜Si、CIGS・CdTe等II-VI、色素・有機）229件、④先進太陽電池技術139件、⑤太陽光発電の応用124件、⑥主要電源としてのPV67件、⑦集光太陽光発電33件、の順であった。

Number of Papers presented at the 32nd EU-PVSEC
(Munich, Germany,; June 20-24, 2016) 1180 Papers

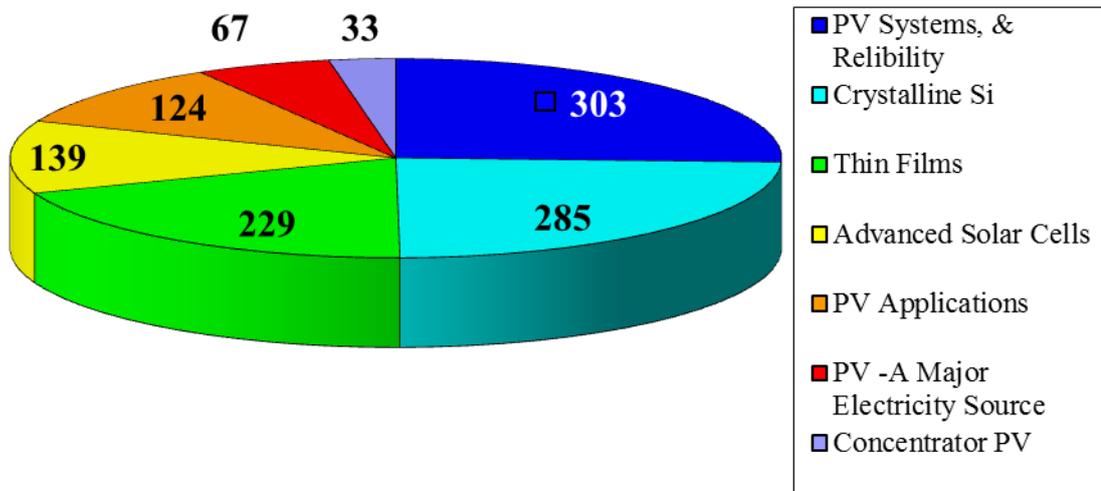


図3 発表論文数の分野別内訳 (RTS(株)提供)

Becquerel Prizeは、Christophe Ballif (EPFL) が受賞した。Si薄膜太陽電池、ヘテロ接合およびpassivated contact結晶Si太陽電池の研究開発への貢献、企業への技術移転、などの業績が評価された。

4. 主な発表論文の概要：

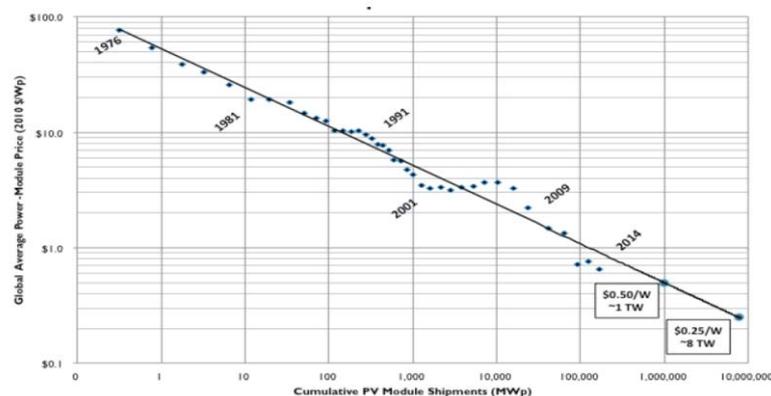
開会式では、組織委員長のMarko Topic (Univ. Ljubljana) の挨拶の後、Giovanni De Santi (EC-JRC)、Claude Turnes (Member, European Parliament)、Osma Benchikh (UNESCO)、Josef Schmid (Mayor, Bavarian Capital Munich) から、PVの重要性および歓迎の挨拶があった。

4. 1 パネル討論：

Paolo Frankl (IEA) がモデレータとなって、“Technology and Market Innovation for PV after Paris COP21” のテーマで、パネル討論がなされ、活発な質疑がなされた。以下に、パネリストの主な意見を紹介する。

(1) E. Weber (FhG-ISE) は、本年6月5日～10日、米国・ポートランドで開催された43rd IEEE PVSCのパネル討論でも述べた持論を披露した。ここでは、43rd IEEE PVSCでの論点を紹介する。図4は、PVモジュールの平均価格のPVモジュールの累積出荷量との関係を示す。 $\$0.5/W$ は見ており、累積導入量1TWの実現は近い。 $\$0.25/W$ になると、8TWということになる。図5は、結晶シリコン太陽電池技術のポートフォリオを示す。図5の結晶Si太陽電池技術に加えて、高効率III-V化合物太陽電池技術やその他の太陽電池技術、バッテリーを含む貯蔵技術も進展している。図6は、TWワークショップで議論されたTWスケールPVの予想を示す。上記低価格化や各種技術開発の進展を踏まえて、年15%の成長で、2030年3TWが可能で、ミニマムターゲットとしている。年25%の成長で、2030年5~10TWが可能としている。9TWは、世界の電力消費の40%に相当し、PVが次代を担えるとしている。最後に、表1に示すように、TWゴールに向けたまとめを行った。

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



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

図4 PVモジュールの平均価格のPVモジュールの累積出荷量との関係 (Prof. E. Weber提供)

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

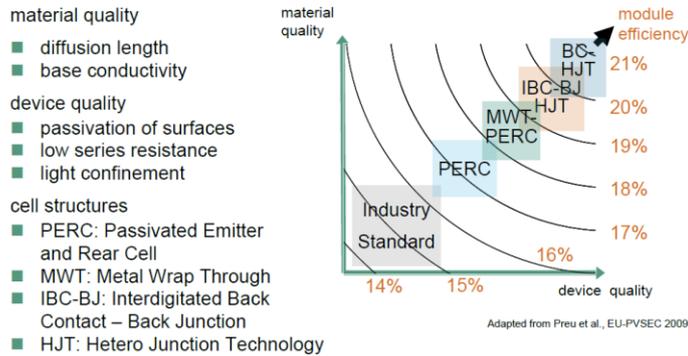
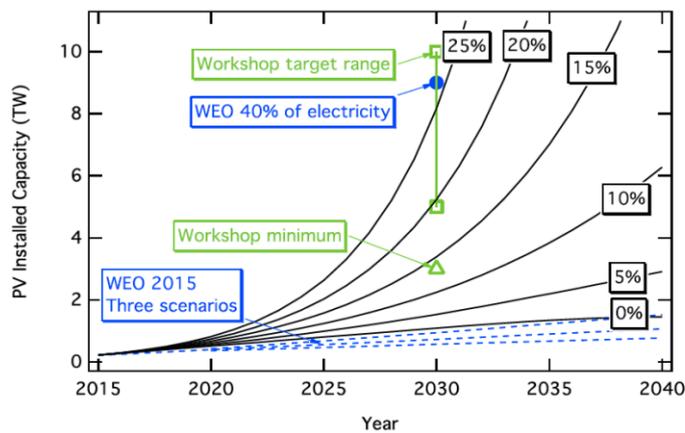


図5 結晶シリコン太陽電池技術のポートフォリオ (Prof. E. Weber提供)

Projections to TW-scale PV



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

図6 TWスケールPVの予想 (Prof. E. Weber提供)

表1 TWゴールに向けたまとめ (Prof. E. Weber提供)

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

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

High penetrationの現在、自己消費が重要で、バッテリーシステムとのハイブリッド化や super gridが必要であると述べた。

(2) Marko Topic (Univ. Ljubljana) は、R&Dの重要性を述べた。

(3) Patrick Hofer-Noser (Meyer Burger Tech.) は、技術的には、将来、PVが主要電源となることは可能で、R&Dに加えて、電力マネジメント、マーケット形成、financeが重要であると述べた。

(4) Oliver Schafer (SolarPower Europe) は、kWhコストよりもマーケット形成が重要で、上記(3)の意見に賛同するとの見解を述べた。

(5) Giovanni De Santi (EC-JRC) は、R&D、Innovation、Competition、ビジネスモデルの重要性を述べた。PVやwindは、十分cost effectiveだが、バリアとして、こうした事が、policy makerの頭に入っていない事があると、述べた。

(6) F. Colvilleは、Technology Innovation、Political Decision Makingが重要であると述べた。国によっては、製造企業をサポートしており、貿易の難しさを皮肉った。今後も、結晶Siが主力を続けよう。コスト、性能が需要だが、やはり、コストがdriving forceとなろうと、述べた。まだまだ、課題はある。

(7) Claude Turnes (European Parliament) は、policy makingが重要と言われているが、PVやwindは、間違いなく、将来、主流となるのだから、障壁を取り除き、化石燃料や原子力をクローズすべきである。今後は、gridと違う方向、バッテリーとのハイブリッド、revolution of mobility、教育が重要であると、述べた。

4. 2 太陽電池およびモジュールの新材料、新概念分野：

(1) M. A. Greenら (UNSW) は、“37% efficient one-sun mini-module and over 40% efficient concentrator sub-modules” と題して、基調講演を行った。

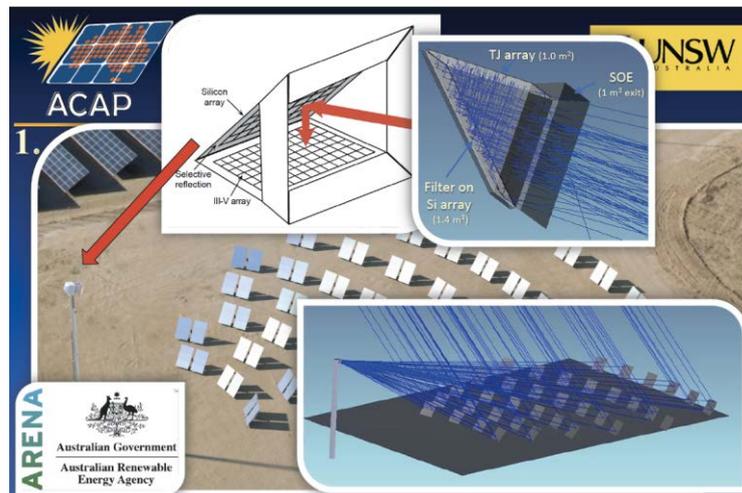


図7 反射系による波長スプリッティング (Prof. M. A. Green提供)

本研究の動機は、Ge基板上の3接合太陽電池の集光下で、効率40%以上が達成されているが、Geボトムセルでは、電流不整合があり、Siボトムセルを使いたい。即ち、III-V+Siタンデムセルのアプローチ、反射系(図7)やプリズム(図8)使用による波長スプリッティング、および集光応用である。これまでの1-sunでの大面積高効率セルモジュールの状

況も紹介された。Alta Devicesの面積 860cm^2 の効率 24.1% のGaAsセルモジュール、SunPowerの面積 1.57m^2 の効率 24.1% のSiセルモジュール、Sharpの面積 968cm^2 の効率 31.2% のIII-V 3 接合セルモジュール、である。図9に示すように、図7のタイプの光学系を用い、NRELによるAM2.53測定で、SpectrolaのGaInP/GaAs/Ge 3 接合セル+SunPowerのSiセルを用いたアパーチャ面積 287cm^2 の集光サブモジュールにおいて、効率 40.6 が得られている。今後は、基板選択やウエハボンディングの適用による柔軟性、誘電体ミラー、ARおよびフィルターの光学損失の低減が課題としている。また、Si-HJTセル+ペロブスカイトセルの波長分割スプリティングで、 $20.5\%+7.5=28.0\%$ も得られている。

さらに、図9に示すように、図7のタイプの光学系を用い、AZUR Space製III-V 3 接合宇宙用セル+Trina Solar製Siバックコンタクトセルの 30cm^2 ミニモジュールにおいて、AM1.5Gで、効率 $31.9\%+2.25\%=34.2\%$ が得られている（最近の結果は、効率 34.5% ）。光学系やARの改善により、1-sun効率 36% 、さらには、効率 40% の実現が可能との事である。

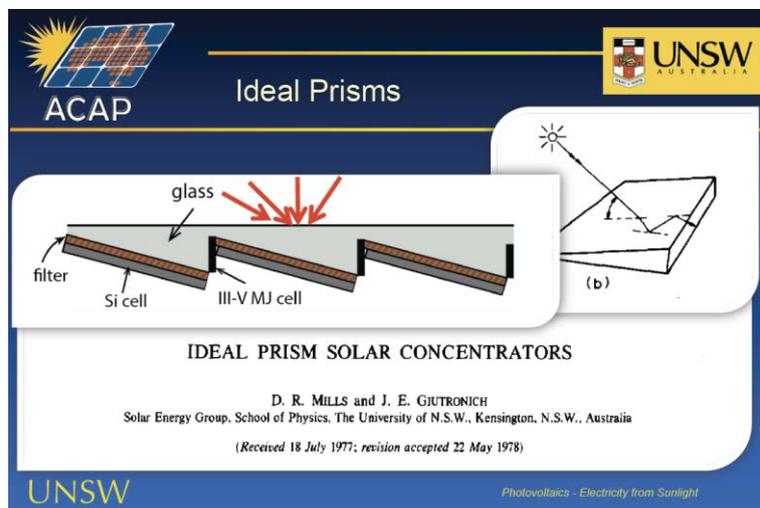


図8 理想プリズム使用による集光型III-V/Si太陽電池構造 (Prof. M. A. Green提供)

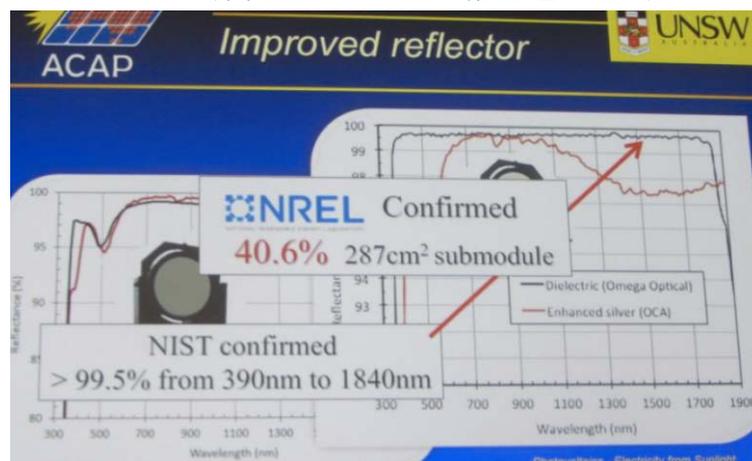


図9 図7の光学系を用いたIII-V 3 接合セル/Siセルのタンデム構造太陽電池の特性 (中上明光氏提供)



図 1 0 図 8 の光学系を用いたIII-V 3 接合セル/Siセルのタンデム構造太陽電池の特性
(Prof. M. A. Green提供)

(2) E.Voroshaziら (IMEC) は、“An innovative approach to interconnect crystalline Si back-contact cells” と題して、基調講演を行った。セルとモジュールの効率ギャップがある。IMECでの面積 $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$ のバックコンタクトセルの平均効率21.8% (ベスト22.9%) に対して、モジュールの効率は、17.6%で、ギャップがある。損失分析によれば、セル間隔など幾何学的低下分が2.8%、光吸収、反射や光学的不整合など光学的低下分が0.7%、セルインターコネクトなど電氣的低下分が0.7%である。新モジュール材料、cell metallization、バスバー、インターコネクトが検討されている。直列抵抗と機械的ストレス低減を狙ったmetallization、銅タブ、soldering、導電性接着剤、パンチホール付き封止、導電性バックシート等も検討された。バックコンタクトの4セル直列で、効率21.81%が得られている。

4. 3 結晶Si太陽電池分野：

(1) B. Kloterら (Hanwha Q Cells) は、“Current status of high-efficiency Q. Antum technology” と題して、基調講演を行った。市場の91%が、結晶Siであり、62%が多結晶Siである。また、90%以上が、簡易なAl-BSF構造セルであり、low complexityの高効率セルが望まれている。電力コストの低減のためには、セルの高効率化、throughput向上等生産性向上、信頼性向上が重要である。低コスト化の基準は、多結晶p型SiのAl-BSFセル(効率18.5%)であり、Levelized Cost of Electricity (LCOE) は、約10ユーロセント/kWhである。図 1 1 に示すように、セルの高効率化は、許容セル製造コストの点で有利となる。Q. Antum技術は、図 1 2 に示すように、PERC技術をベースに、dielectric passivated rear、ポイントコンタクト、メタリゼーション、などが特徴である。Light trappingや二重パッシベーション等の改善がなされ、製造レベルの平均セル効率は、2011年の17%から19%以上となっている。また、Ag消費も、50%削減されている。同社のQ. Antumセルの製造Capacityは、3 GWとの事である。2015年12月時点では、平均セル効率は19.7% (Voc=655mV、Jsc=37.7mA/cm²、FF=79.7%) で、ベストセル効率は20.9% (Voc=659mV、Jsc=39.4mA/cm²、

FF=80.4%)である。標準的なsoldering技術、高品質ARCガラス、バックシートを用いた60セルモジュールの効率も、セルレイアウト、halfセルの採用により、面積15349cm²のモジュールのベスト効率も17.9%から19.5% (Voc=41.5V、Isc=9.30A、FF=77.4%)に、モジュール出力も、280Wから301Wに改善されている。来年中に、平均セル効率>21%、モジュール出力>320Wを実現したいとまとめた。

Why Going to High Efficiencies? Levelized Cost of Electricity (LCOE)

- What really matters are the Levelized Cost of Electricity (LCOE)
- To rate new solar cell concepts, they have to be compared with the LCOE of the **p-type mc Al-BSF cell**
- Reference system:
 - p-type mc Al-BSF cell
 - Cell efficiency 18.5 %
 - 900 kWh/kWp, 25 years

LCOE-10 €ct/kWh



図 1 1 基準となる多結晶p型Al-BSFセル (Dr. M. Hermle提供)

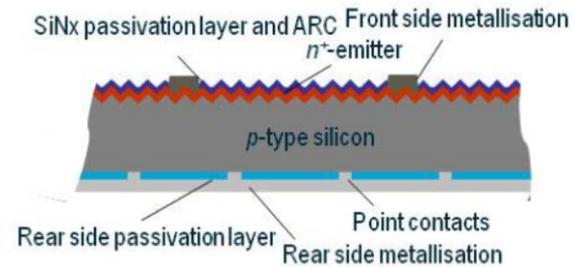


図 1 2 Q. Antum技術におけるセル構造 (P. Engelhart et al., Proc. 26th EU-PVSEC (2011)p. 821)

(2) 高効率結晶Si太陽電池のIndustrial Productionセッションもあった。

J. Zhaoら (Meyer Burger) は、同社におけるヘテロ接合結晶Si太陽電池の状況を報告した。PVDやPWCVDを用いたbi-facial構造である。2013年のR&Dレベルの効率22.0%から、2015年のパイロットラインでの23.0%まで改善がはかられている。2015年の生産規模は、15MWで、一日当たりセル生産枚数は、1,200~1,800枚との事である。30日間の生産の結果も報告された。41698枚のセルの平均効率は22.54%、ベストセルの効率は23.3% (面積239.5cm²、Voc=742.5mV、Jsc=38.64mA/cm²、FF=81.3%)である。課題は、直列抵抗依存、ITO形成前後のτ、PL測定も検討されている。ベストτは、10msecである。60セルモジュール出力は、322.16Wである。

S. Harrisonら (CEA Tech.) は、パイロットラインでの薄型ヘテロ接合結晶Si太陽電池の状況を報告した。薄型セルに関しては、パナソニックの98μm厚セルの効率24.7%、ISFHの43μm厚セルで19.16%の状況である。同社でのbi-facialの70μm、120μm厚のベストセルの効率は、各々、20.9% (VocC=742mV)、22%である。薄型セルを用いたモジュールも試作され、セル厚180μm、110μm、100μm、85μmのセルを用いたモジュールの効率は、各々、19.03%、19.27%、19.23%、17.58%である。セルのbreakageが課題であった。セル厚85μm、93μm、100μm、120μm、140μmのbreakage rateは、各々、>95%、25%、5~10%、<5%、<3%であったが、カセットや自動化で、改善され、セル厚75μm、85μm、100μmの140μmのbreakage rateは、各々、20%、7%、<3%に改善されている。

L. Liら (ENN Solar Energy) は、同社における薄膜Si太陽電池の製造ラインを活用したヘテロ接合結晶Si太陽電池の状況を報告した。ピラミッドのサイズや一様性の改善、a-Si堆積の改善、ITOの改善等により、セルのベスト、平均効率は、各々、23.4%、22.9%との事である。6インチセルの60セルモジュールのベスト、平均効率は、各々、22.6%、21.6%

である。317Wモジュールの生産規模は、400MWとの事である。

X. S. Wangら (Canadian Solar) は、同社におけるPERC構造結晶Si太陽電池の状況を報告した。PECVDやALDを用いたAlOxによる裏面パッシベーション、Al-BSF等が検討され、抵抗率 $2\Omega\text{cm}$ の $190\mu\text{m}$ 厚のp型Siベースの多結晶、単結晶PERCセルの効率は、各々、19.1~19.6%、20.5~22.2%である。平均効率21.1%を21.6%に上げたいとの事である。光劣化の取り組みも紹介され、光照射と温度の選定により、光劣化を低減できるとした。

C-C. Chungら (Motech) は、同社におけるCuプレートPERT構造結晶Si太陽電池の取り組みを紹介した。同社の結晶Si太陽電池の生産規模は、2015年、3.2GWである。今回、表面電極用にCuプレートを適用した。Ni/Cu/Sn構造などが検討され、プレーティング技術、コンタクトopening技術、メタルフィンガー技術等の改善により、低コンタクト抵抗(Agの $1\sim 3\text{m}\Omega\text{cm}^2$ より低い $\sim 0.1\text{m}\Omega\text{cm}^2$)が実現している。6インチCuプレートPERT構造セルで、従来のAg電極の場合の効率20.9% ($V_{oc}=658\text{mV}$ 、 $J_{sc}=39.84\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=80.0\%$)と遜色ない効率21.3% ($V_{oc}=634\text{mV}$ 、 $J_{sc}=40.80\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=79.84\%$) が得られている。

T. Pernauら (Centrotherm) は、40kHz-PECVDを用いたAlOx/SiNxスタック構造PERC構造結晶Si太陽電池の状況を報告した。PECVDのサイクルタイムは、45~50分で、2年間クリーニング不要との事である。AlOxは、TMAで形成され、AlOx/SiNx構造を用いた場合の固定電荷密度、界面準位密度は、各々、 $-8.5\times 10^{11}\sim -1.1\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 、 $3\sim 8\times 10^{10}/\text{cm}^2\text{eV}$ で、 $S<10\text{cm/s}$ が得られている。 τ の平均は、1.1msecである。多結晶、単結晶セルのベスト効率は、各々、21.18%、19.66%である。

(3) S. De Wolfら (EPFL) は、“Impact of solar cell architecture on the temperature dependency of electrical performance” と題して、プレーナリ講演を行った。米国のフェニックスなどでは、モジュール温度が 60°C 以上にもなり、太陽電池の温度特性は、モジュール特性の上で重要で、温度依存性の理解が必要である。面積 220cm^2 以上のp型ベースBSF、PERC、n型ベースPERT、PERT-a、SHJの種々のセルの温度特性が検討された。 $25^\circ\text{C}\sim 75^\circ\text{C}$ のI-V特性から得られた温度特性の結果を表2にまとめる。高 V_{oc} のSHJの温度特性が良く、総じて、高 V_{oc} セルの温度特性は良いと言える。少数キャリア寿命 τ_{eff} も、温度と共に増加する。P型ベースBSF、p型ベースPERC、n型ベースSHJのセルの効率の温度特性 $-0.39\%/^\circ\text{C}$ 、 $-0.36\%/^\circ\text{C}$ 、 $-0.26\%/^\circ\text{C}$ に対して、モジュールの温度特性は、各々、 $-0.41\%/^\circ\text{C}$ で、 $-0.39\%/^\circ\text{C}$ 、 $-0.30\%/^\circ\text{C}$ である。温度特性を知る上で、直列抵抗、少数キャリア寿命 τ 、接合障壁を考えるべきであるとまとめた。

表2 種々の結晶Si太陽電池の温度特性比較

	V_{oc} (mV)	効率(%/°C)	J_{sc} (mA/cm ² /°C)	V_{oc} (mV/°C)	FF (%) (/°C)
p型ベースBSF	638.6	-0.39	+0.0184	-1.94	-5.2
p型ベースPERC	653.5	-0.36	+0.0133	-1.85	-4.9
n型ベースPERT	675.9	-0.32	+0.0173	-1.81	-4.6
n型ベースPERT-a	688.1	-0.33	+0.0153	-1.82	-4.4
n型ベース	677	-0.35	+0.0142	-1.89	-4.2
n型ベースSHJ	731.1	-0.26	+0.0159	-1.76	-4.7

4. 4 薄膜太陽電池分野：

4.4.1 薄膜 Si 太陽電池：

(1) J. Poortmansら (IMEC) は、“Advanced Si epi-foil-based PV devices” と題して、プレーナリ講演を行った。Kerfless 薄型Siのアプローチが述べられた。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。Smart cut等のkerf-free wafering、EFG等のmeltからのdirect crystallization、Crystal Solar等のガスからのdirect crystallizationが紹介された。IMECでは、図13に示すように、電気化学的にSi基板表面に多孔質Si層を形成し、多孔質Si上のSiのCVDエピ成長、レーザスクライブでSiフォイルをliftoffの後、太陽電池作製、Si基板は再利用される。レーザグループ時のピラー、ヒーロック等の欠陥が問題だったが、ストレス低減等により改善されている。基板にFZ-Siを用いた4x4cm²のヘテロ接合バックコンタクトSi太陽電池が作製され、50 μm厚エピSiフォイルを用いたもので、効率16.1% (Voc=671mV、Jsc=35.0mA/cm²、FF=68.5%)、190 μm厚FZ-Siを用いたもので、効率22.9% (Voc=729mV、Jsc=41.6mA/cm²、FF=75.3%)の状況である。

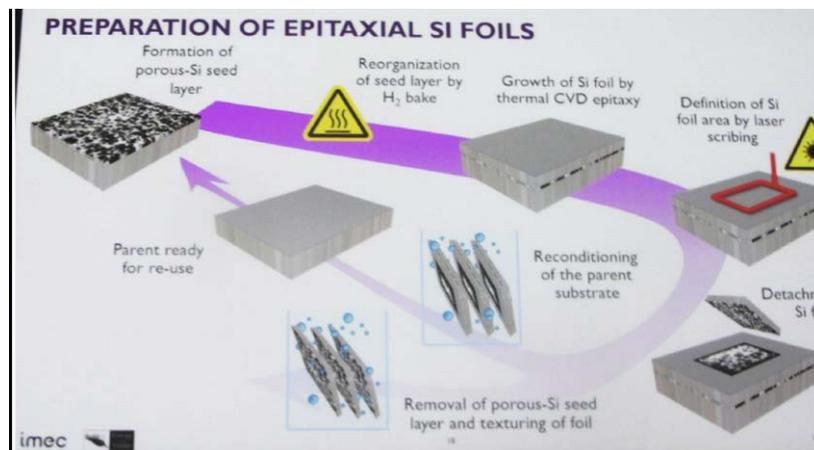


図13 Si箔のエピ成長プロセス (中上明光氏提供)

RESULTS ON SHJ-IBC AND ON EPITAXIAL FOILS?

See also 2B0.3.3 Process Development of Silicon Heterojunction Interdigitated Back-Contacted (SHJ-IBC) Solar Cells Bonded to Glass, X. Menglei et al.

Cell	Patterning rear a-Si	J _{sc} [mA/cm ²]	V _{oc} [mV]	FF [%]	Eta [%]
Freestanding After anneal	Dry etch	41.6	729	75.3	22.9
Bonded After anneal	Dry etch	40.8	734	73.1	21.7
Bonded After anneal	Dry etch	40.0	724	69.8	20.2
Bonded After anneal	Wet etch	38.6	740	71.7	20.0
Bonded After anneal	Dry etch	35.0	671	68.5	16.1

← 190 μm Fz-Si
← 190 μm Fz-Si
← 56 μm Fz-Si
← 56 μm Fz-Si
← 50 μm epifoil

図14 Si HBCセルの特性 (中上明光氏提供)

4.4.2 CIGS、II—VI族化合物薄膜太陽電池：

(1) A.N. Tiwari (EMPA) は、“Advances and opportunities in CIGS thin film photovoltaics

R&D”と題して、CIGS 系薄膜 PV に関するプレーナリ講演を行った。BIPV 応用等には、フレキシブルセルモジュールが有効で、EMPA における検討状況報告した。先に、高効率 CIGS 太陽電池 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。TCO の光損失低減に加え、Ga グレーデフィングや 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、界面欠陥パッシベーションが効率向上の鍵と考えている。2019 年までに、セル効率 25%、モジュール効率 20%を実現したいと述べた。スピンオフ企業として、チューリッヒに、Flism が設立され、50cm ロールで m^2 モジュールが作製され、生産規模は 15MW との事である。2016 年 6 月、ZSW は、図 1 5 に示すように、効率 22.6%の世界最高効率 22.6% ($V_{oc}=741\text{mV}$, $J_{sc}=37.8\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=80.6\%$) を達成したとの事である。また、EPFL との連携により、ペロブスカイト/CIGS の 4 端子タンデム太陽電池で、効率 21.4%を得ているとの事である。

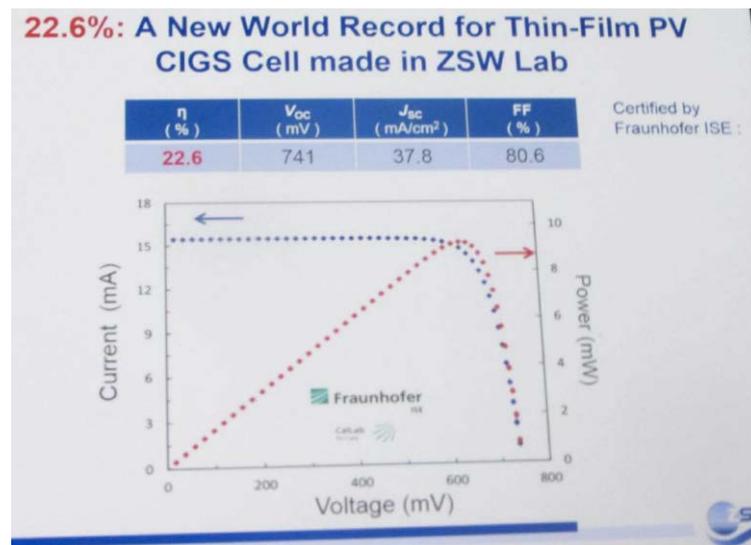
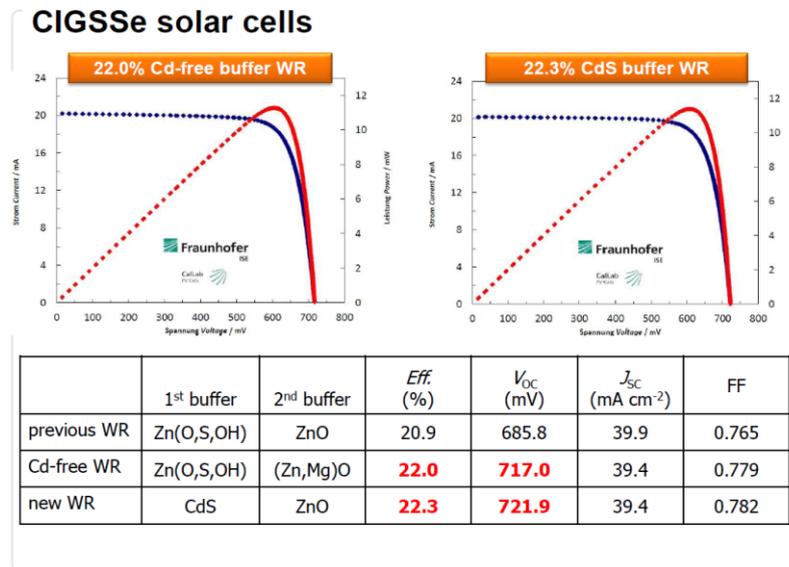


図 1 5 ZSWによる世界最高効率CIGS太陽電池の特性 (中上明光氏提供)

ソーラーフロンティアの状況も紹介された。これまで、Cdフリーバッファ層、表面 S-rich、裏面 Ga-rich の二重 E_g 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% ($V_{oc}=686\text{mV}$, $J_{sc}=39.9\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=76.5\%$) 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 $V_{oc}=665\sim 683\text{mV}$ から、 $695\sim 705\text{mV}$ に改善されている。(Zn, Mg) 0 の第二バッファ層の E_g 調節もなされ、高 V_{oc} 、高 J_{sc} を目指している。図 1 6 に示すように、面積 0.51cm^2 の CdS/ZnO 二重バッファ層および $Z(0, S, OH)/(Zn, Mg)0$ 二重バッファ層 $\text{Cu}(\text{In, Ga})(\text{Se, S})_2$ ルで、各々、効率 22.3% ($V_{oc}=721.9\text{mV}$, $J_{sc}=39.38\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=78.24\%$)、22.0%の世界最高効率が達成されている (FhG-ISE 認定)。また、自社測定ではあるが、

CdS/ZnO 二重バッファ層および Z(O, S, OH)/(Zn, Mg)O 二重バッファ層 Cu(In,Ga)(Se,S)₂ 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 6 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)

(2) J. Palm (Avancis) は、“The future of CIGS technology: Production standardization and product differentiation” と題してプレナリ講演を行った。表 3 に示すように、CIGS太陽電池の各社の生産状況が紹介された。Avancisは2006年に設立され、ドイツ、韓国共、100MWの生産規模である。面積 30x30cm²のサブモジュールの効率も、2006年の14.0%から、2010年、2014年、2016年、各々、15.5%、16.6%、17.9%と改善され、2019年のゴールは、効率20%である。図 1 7には、結晶Si、CdTeおよびCIGS太陽電池モジュールの価格と累積生産量を示す。CIGS太陽電池は、さらなる低コストの可能性はあるが、課題は、モジュール効率が、図 1 8 に示すよう、面積拡大と共に、低下する事であり、CIGS技術は複雑で、標準化が望ましいとまとめた。

表 3 CIGS太陽電池の生産規模 (中上明光氏提供)

Manu- facturer	Nominal Capacity	Technology	Generation	Module Power & Total Area Efficiency
Solar Frontier	1 GW (Japan)	H ₂ Se/H ₂ S Selenization Cd-free	4 (2015) 5 (2016)	145W to 170W, 11.8% to 13.8%
AVANCIS	200MW (Germany/ S. Korea)	RTP-SEL Selenization Cd-free	2 (2012)	11.4% to 13.3% 120W to 140W
Hanergy Miasole	100MW + 60MW (USA)	PVD CIGS Flexible substr. CdS	2 (2012)	150-175W (Glass) 14.4%-16.3%
Hanergy Solibro	130MW (Germany)	Co-Evaporation CdS Buffer	2 (2012)	115W-135W 12.2% to 14.4%
Stion	100MW (USA)	H ₂ Se/H ₂ S Batch Sel. CdS Buffer	1 (2012)	w/o frame, CdS 140W-150W 13%-14%
Hulket	50MW (Taiwan)	Selenization Cd-free	1 (2012)	100-110W, 310-325W 12%-13.8%

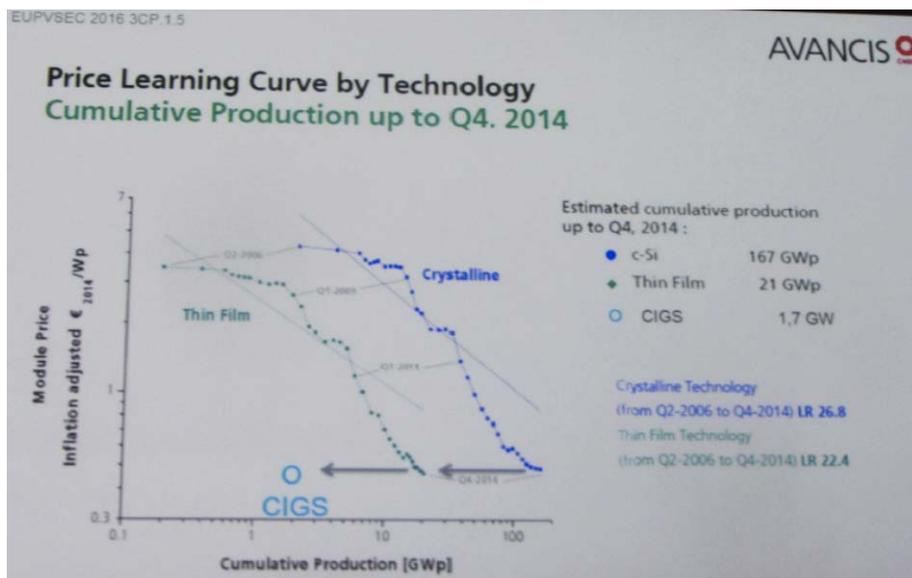


図 1 7 結晶Si、CdTeおよびCIGS太陽電池モジュールの価格と累積生産量（中上明光氏提供）

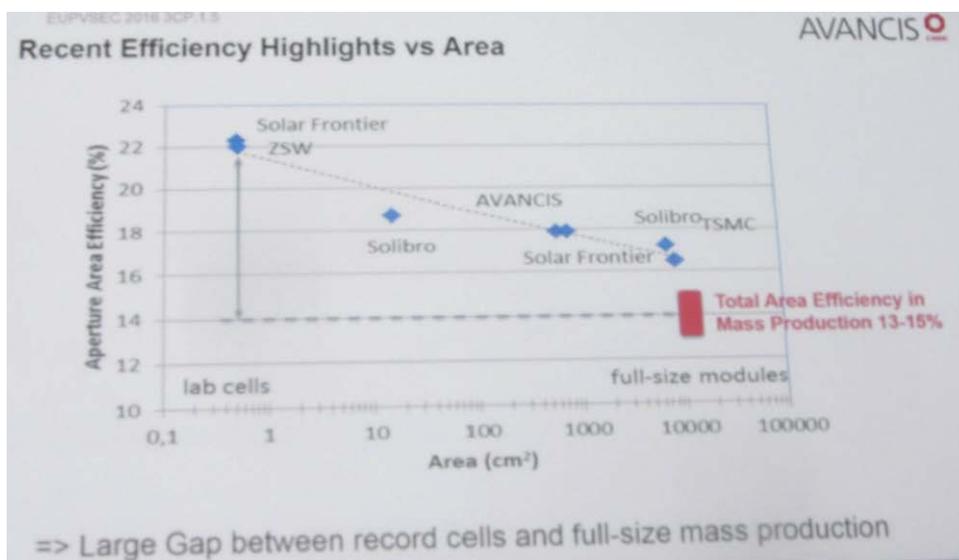


図 1 8 CIGS太陽電池およびモジュールの効率と面積（中上明光氏提供）

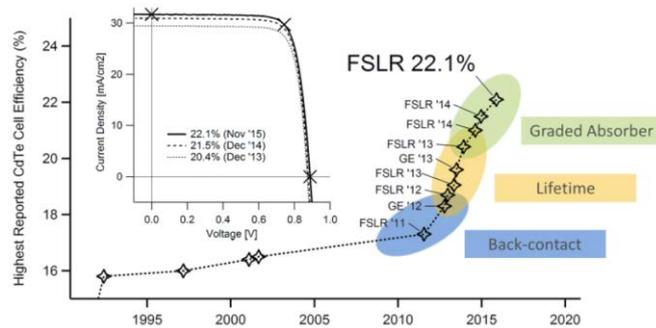
(3) D. Weissら (First Solar) は、“Delivering on the promise of thin-film PV” と題して、CdTe 太陽電池、モジュールに関するプレーナリ講演を行った。CdTe 太陽電池の製造工程での CO₂ 放出量は、14 CO₂ g /kWh で、CIGS、多結晶 Si 太陽電池の各々17、19CO₂ g /kWh で、有利であること。現状、表 4 に示すように、First Solar のみが、収支状況が良い事が紹介された。2015 年には、図 1 9 に示すように、セル効率 22.1% (Voc=887mV、Jsc=31.7mA/cm²、FF=78.5%)、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。製造レベルのモジュール効率は、16.4%である。2016 年内に、各々、19.0%、16.7%を達成したいとの事である。講演の中で、CdTe 太陽電池およびモジュールの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 Jsc で、約 2mA/cm²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。 $4\mu\text{m}$ 以上の粒界成長、 $\text{ZnTe}:\text{Cu}$ 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、 $\tau > 1\mu\text{s}$ 、 $S < 10\text{cm}/\text{s}$ 、 $V_{oc} > 1.1\text{V}$ を実現することにより、効率 $> 25\%$ が可能であるとまとめた。

表 4 太陽電池企業の収支状況

企業	First Solar	SunPower	JA Solar	Jinko	Trina Solar	Canadian Solar	Santech	Yingli	Sun Edison	LDK
収支状況	+\$16M	-\$42M	-\$39M	-\$60M	-\$49M	-\$37M	default	-\$155M	-\$636M	default

Increasing efficiencies: First Solar



Slide courtesy of Markus Gloeckler

図 19 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)

4.4.3 有機およびペロブスカイト太陽電池

(1) A. Hagfeldt (EPFL) は、“Progress on making Perovskite solar cells viable products” と題して、プレーナリ講演を行った。最近、ペロブスカイト太陽電池がトピックスとなり、多くの研究者、技術者が参入している。1839年のロシアの鉱物学者により発見された CaTiO_3 に代表されるペロブスカイトの結晶構造の紹介の後、溶媒 (DMF) 中での $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I} + \text{PbI}_2$ (PbCl_2) の形成プロセス、二段階堆積法、dual-source thermal evaporation などの形成方法が紹介された。今日、ペロブスカイト太陽電池に用いられている $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は、 1.55eV 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 ($100 \sim 1000\text{nm}$) を持ち、高光吸収係数 (GaAsに近い光吸収係数)、 $\epsilon \sim 6.5$ 、移動度 (電子 $7.5\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、正孔 $12.5 \sim 66\text{cm}^2/\text{Vs}$) などの物性についても述べられた。励起子の結合エネルギーは、 $5 \sim 16\text{meV}$ であり、無機系太陽電池の様相を示す。2009年の効率 3.8% から最近の効率 20.1% の変遷、最近の研究開発の状況が述べられた。

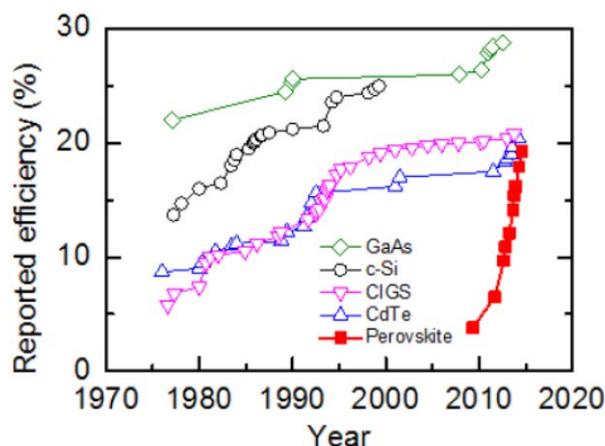


図 2 0 ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷と他の太陽電池の効率変遷
(29th EU-PVSEC会議ハイライト : Dr. A. Jaeger-Waldau提供)

図 2 0 に、ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷を示す。2009年に、宮坂らのグループが、色素増感太陽電池のsensitizerとして、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ を導入し、効率3.8%を得たのが最初である (A. Kojima et al., J. Am. Chem. Soc. **131**, 6050 (2009).)。mesoporous 金属酸化物として、 TiO_2 の代わりに、 Al_2O_3 が提案されているが、高効率は達成されていない。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ 構造では、効率12.8%が得られ、プレーナ構造も検討され、Graetzelのグループは、効率15.45%を得ている。その後、Seokのグループは、効率17.9%が実現し、UCLAのグループは、効率19.3%を得ている。公認されている最高効率は、KRICTによる効率20.1% (面積 0.0955cm^2 、 $V_{oc}=1.059\text{V}$ 、 $J_{sc}=24.65\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=77.0\%$)、最近、同グループにより、効率22.1%が達成されている。NIMSによる効率15.6%、(面積 1.020cm^2 、 $V_{oc}=1.074\text{V}$ 、 $J_{sc}=19.29\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=75.1\%$)もある。課題として、ヒテリシス特性などの不安定性、膜厚を厚くした場合の直列抵抗による曲線n因子低下、構造不安定性、熱的不安定性、湿気敏感性や紫外光耐性、などが予想されるが、例えばCsを含有されることにより、安定性が50時間以下から1000時間以上に改善され、問題ないと述べている。しかし、 75°C での試験では、効率19.4%が5%程度まで低下し、相転移が起こっている可能性がある。CsPbI₃、CsFAPbI₃などが検討され、効率21.17%で、Rb含有により効率21.9%を得ているとのことである。 $V_{oc}\sim 1.18\text{V}$ を得ているケースもあり、ERE (External Radiative Efficiency) は、0.5%と結晶Si並みの値で、驚きの値である。上記のように、拡散長は低いので、光学的促進効果が働いているとの見方もあるようだ。16cm²ミニモジュールで、効率14.2%の状況である。ペロブスカイトセル/ヘテロ接合Siセルの4端子構造で、効率24.4%、モノリシック2端子構造の小面積 (0.17cm²) で、効率21.2%、面積1.22cm²セルで、効率19.2%の状況である。

(2)ペロブスカイトや有機太陽電池の信頼性に関する発表もあった。有機太陽電池では、14か月の屋外試験で、直列抵抗は、30~50%増加し、効率も初期の40%まで低下するケースもある。当面、屋内用途にしか使用できない印象である。ペロブスカイト太陽電池においても、まだ評価方法が確立されているとは言えない印象である。

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：

G. He (AltaDevices) は、“Advances in thin-film III-V technology” と題して、薄膜 GaAs 太陽電池に関するプレーナリ講演を行った。図 2 1 に示すように、MOCVD 成長と AlAs リリース層の選択エッチを用いたエピタキシャル・リフト・オフ (ELO) で、図 2 2 に示すように、薄型 GaAs 単接合太陽電池、InGaP/GaAs 2 接合太陽電池で、各々、効率 28.8% (面積 0.9927cm²、Voc=1122mV、Jsc=29.68mA/cm²、FF=86.5%) の単接合セルでの世界最高効率、31.58% の高効率が達成されている。2.5 μm 以下に薄型することで、図 2 3 に示すように、フォトン・リサイクリングと非輻射再結合の抑制が期待でき、太陽電池製作の制御により、低い飽和電流密度 $J_{01}=6 \times 10^{-21} \text{A/cm}^2$ (n=1)、 $J_{02}=1 \times 10^{-12} \text{A/cm}^2$ (n=2) を実現し、従来より 100mV 高い Voc を実現したことで、高効率化につながっている。図 2 4 に示すように、宇宙用太陽電池として、従来太陽電池に比べて、面積比出力、重量比出力の面で有利であるとしている。GaAs 基板の再利用も可能で、高性能、低コストの薄膜太陽電池による地上に適用が可能であるとしている。

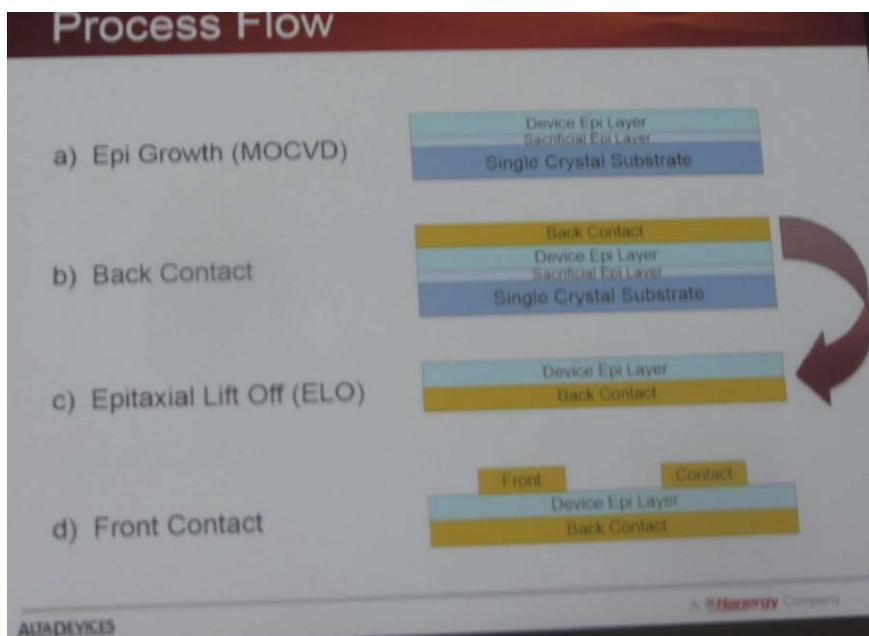


図 2 1 GaAs 薄膜太陽電池の作製プロセス (中上明光氏提供)

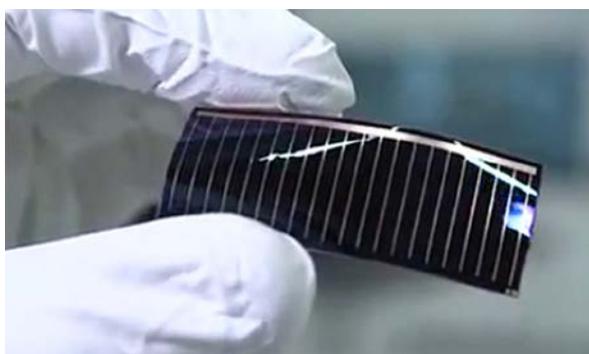


図 2 2 薄膜GaAs太陽電池

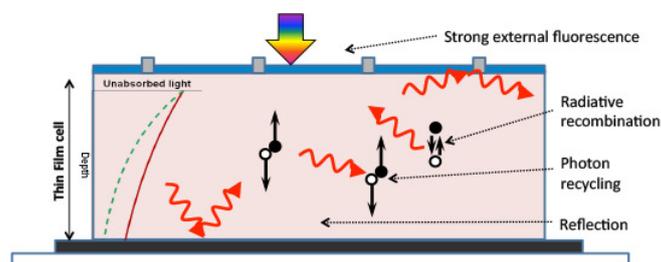


図 2 3 薄膜化による photon recycling と非輻射再結合の抑制

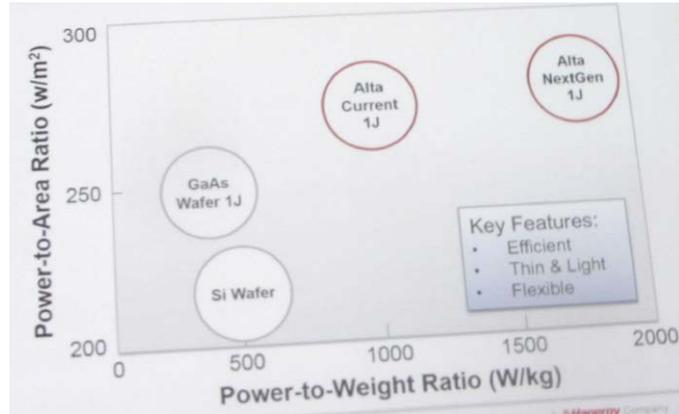


図 2 4 GaAs薄膜太陽電池の宇宙用太陽電池への適用のメリット（中上明光氏提供）

4. 6 PV システム、性能、信頼性分野：

(1) D. Moserら (Eurec research) は、“Identification of technical risks in the value chain and quantification of the economic impact on the business model” と題して、基調講演を行った。PVモジュールやインバーターの劣化は、PVシステムのLCOEコストに、関係する。5年間のデータ収集に基づき、ビジネスモデルに影響する技術的リスクやその経済的インパクトの定量化に言及した。

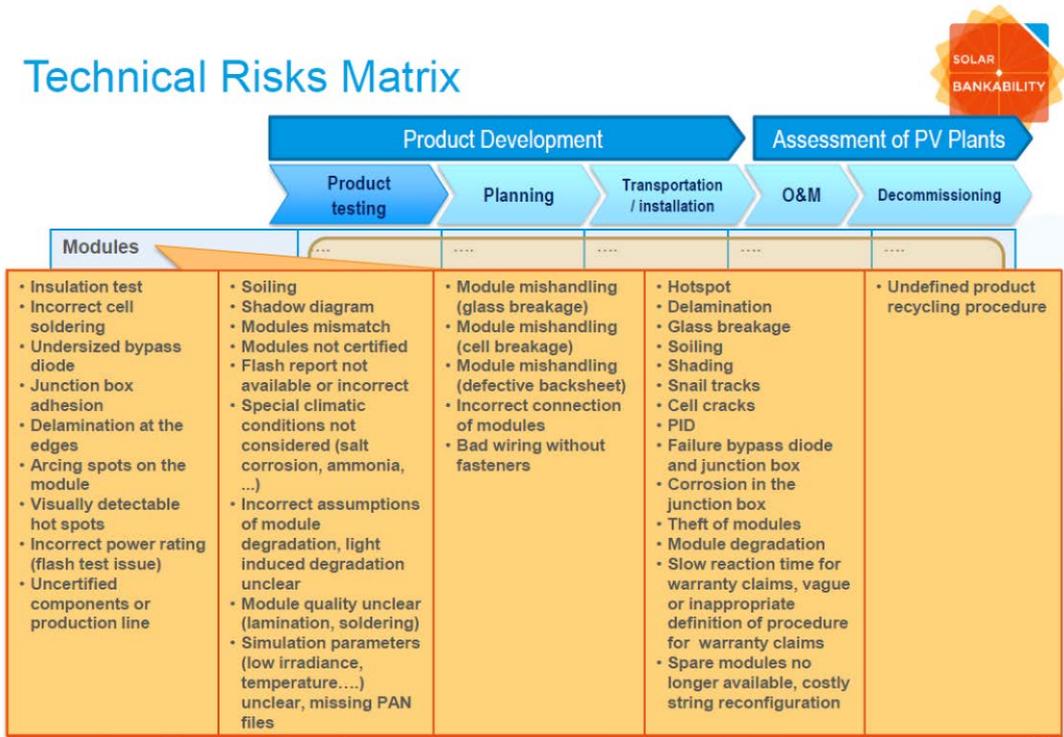


図 2 5 PVモジュールの技術的リスクのマトリックス (www.solarbankability.eu)

PVシステムの技術的リスクの一例として、図 2 5 に、PVモジュールの技術的リスクのマトリックスを示す。技術リスクの高いものとして、製品試験における incorrect power rating、計画における soiling、輸送や設置における module mishandling (glass breakage)、

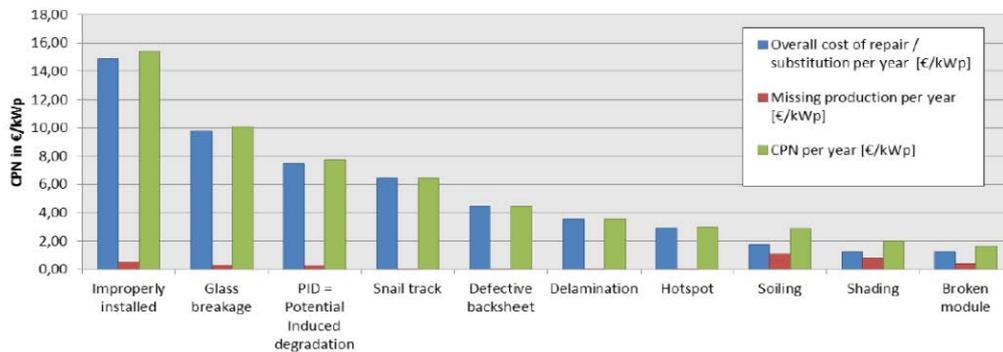
module mishandling (cell breakage) 、 module mishandling (defective backsheet) 、 運転およびメンテナンス中のhotspot、delamination、glass breakage、soiling、shading、 cell cracks、PID、failure bypass diode and junction box、theft of modules、モジュール劣化、warranty claims、vague or inappropriate definition of procedure for warranty claims、spare modules no longer available、costly string reconfiguration、未検討項目として、undefined product recycling procedureがあるとまとめられた。

CPN Results - Components and Market Segments



• PV modules - Total

Modules - top 10 risks



- Highest risk consists of a group of installation failures (mishandling, connection failures, missing fixation, etc.)

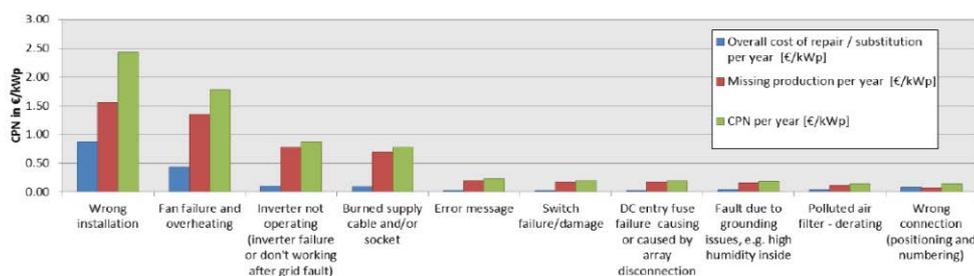
図 2 6 PVモジュールの10リスクに関するCPN指標の結果 (www.solarbankability.eu)

CPN Results - Components and Market Segments



• Total – Inverters

Total - inverter - top 10 risks



- Highest risk is related again to a group of installation failures.
- Production losses are higher than the overall repair/substitution loss.
- The same trend applies to the other market segments.

図 2 7 PVインバーター10リスクに関するCPN指標の結果 (www.solarbankability.eu)

技術的リスクに関する経済的インパクトの尺度として、CPN (Cost Priority Number) [Euro/kWp] が提案されている。導出手順は、www.solarbankability.euを参照されたい。図 2 6 に、PVモジュールの10リスクに関するCPN指標の結果、図 2 7 に、PVインバーター10

リスクに関するCPN指標の結果を示す。技術的リスクに対する経済的インパクトが、定量的に示されている。CPN評価結果の比較研究もなされている。今後は、CPNの評価も必要で、コンポーネント試験、設計、設置や性能のモニタリング、運転などを通して、技術的リスクの最小化をはかる必要があるとまとめた。

(2) M. Kontgesら (ISFH) は、“Mean degradation rates of PV systems for various kinds of PV modules failures” と題して、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。

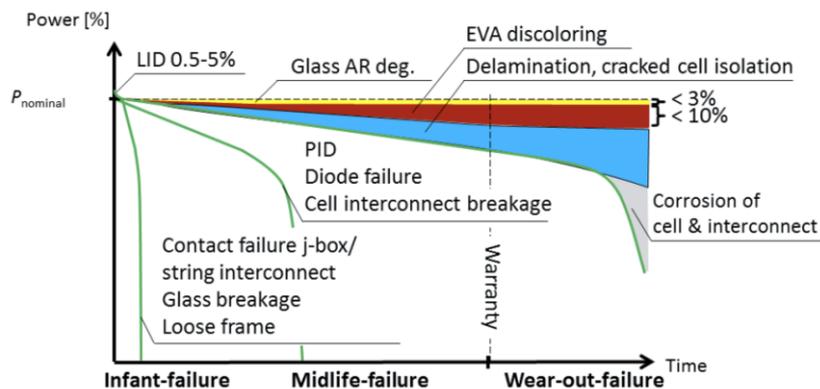


Fig. 3.1: Three typical failure scenarios for wafer-based crystalline photovoltaic modules are shown. Definition of the used abbreviations: LID – light-induced degradation, PID – potential induced degradation, EVA – ethylene vinyl acetate, j-box – junction box.

図 2 8 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 2 8 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 2 9 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。

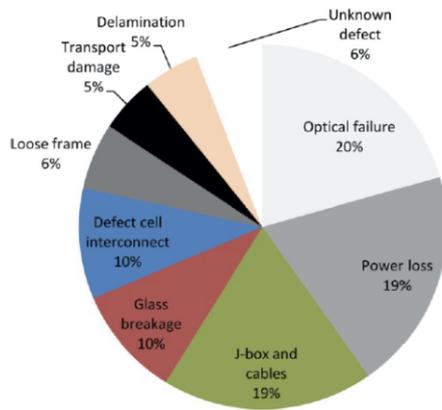


Fig. 3.2: Failure rates due to customer complaints in the first two years after delivery. The rate is given relative to the total number of failures. The PV modules are delivered by a German distributor in the years 2006-2010 [redrawn from Richter11]. The statistic is based on a total volume of approximately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

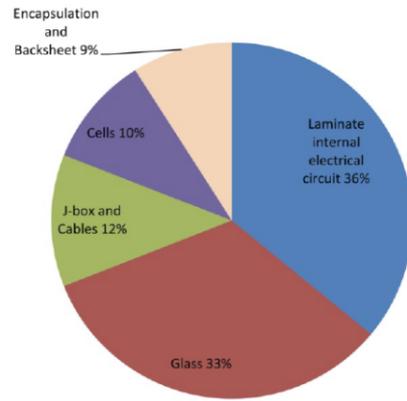


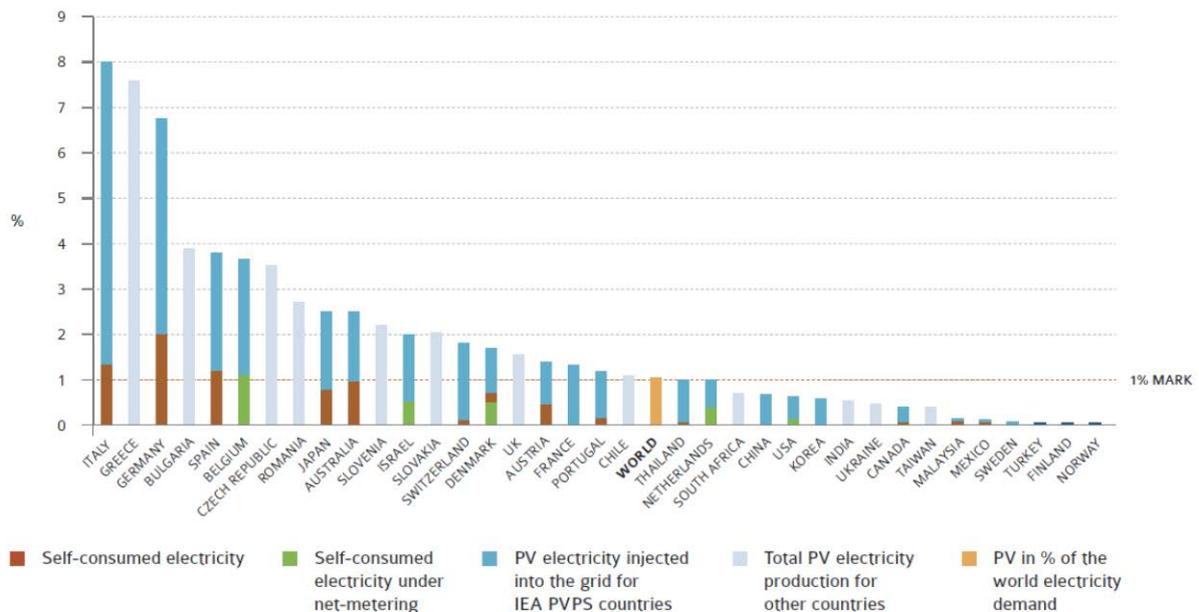
Fig. 3.3: Field study of PV module failures found for various PV modules of 21 manufacturers installed in the field for 8 years [redrawn from DeGraaff11]. The rate is given relative to the total number of failures. Approximately 2% of the entire fleet are predicted to fail after 11-12 years (do not meet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

図 2 9 PVモジュールの要因別劣化率 (IEA/PVPS-Task13 Report)

4. 7 PV 応用分野 :

(1) T. Tjadenら (TW Berlin) は、“Emerging performance issues of photovoltaic battery systems” と題して、基調講演を行った。

FIGURE 22: PV CONTRIBUTION TO THE ELECTRICITY DEMAND IN 2014



SOURCE IEA PVPS.

図 3 0 各国の電力に対するPVの割合 (IEA/PVPS Trends 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30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す、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。

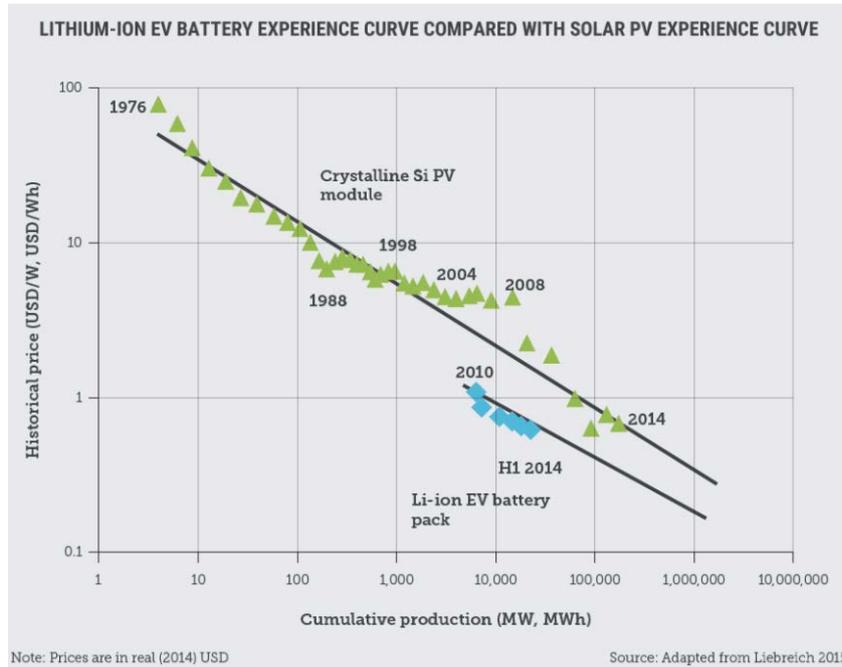


図31 Liイオン電池とPVモジュールの価格低減の状況 (ISBN: 978-0-9944195-3-8 (web), Climate Council of Australia Ltd 2015)

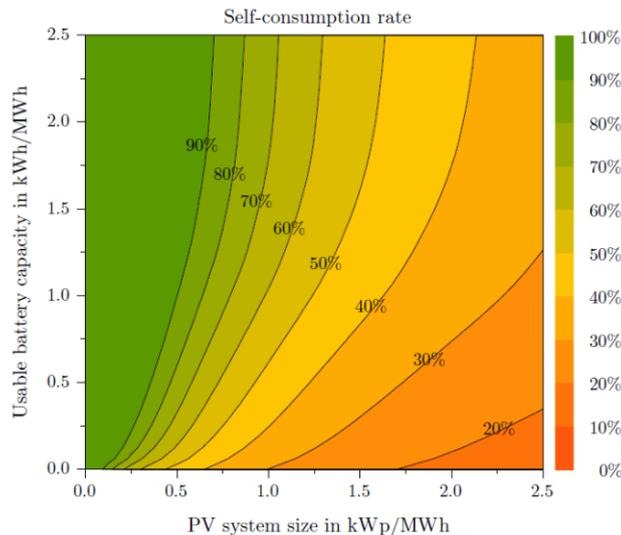


Fig. 3.5: Annual self-consumption rate of a typical household with a PV battery system [19].

図32 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)

図31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32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。

(2) A. Scognamiglioら (ENEA) は、“BIPV - Getting the technology and integration balance right” と題して、プレーナリ講演を行った。建材一体型 (BIPV) は、例えば、イタリアのPVの累積導入量18.622GWのうち、2.672GW (ground8.722GW、BAPV7.185GW、CPV0.03GW) で、今後の伸びが期待される。市場の要望として、ニーズおよび設計の多様性が求められている。BIPVの適用例が紹介された。主要アプリケーション分野にて結晶Si代替が進まない中、薄膜太陽電池メーカーは薄膜太陽電池の柔軟性、軽量、外観の良さなどを活かすことで、BIPV、船舶・車両一体型 (TIPV) などへの事業拡大が期待される。

4. 8 市場、ビジネス、政策等：

Y. Matsuyama (METI) は、“Japan’s renewable policy & FIT reform 2016 - PV century vision” と題して、プレーナリ講演を行った。まず、図33に示すように、日本における再生可能エネルギーに関する固定電力買い取り (FIT) 制度の導入状況が報告された。FITが導入された2012年以降、年33%の急な伸びで、特に、太陽光の導入が著しい。

2. Status of Renewable Energy Deployment in Japan

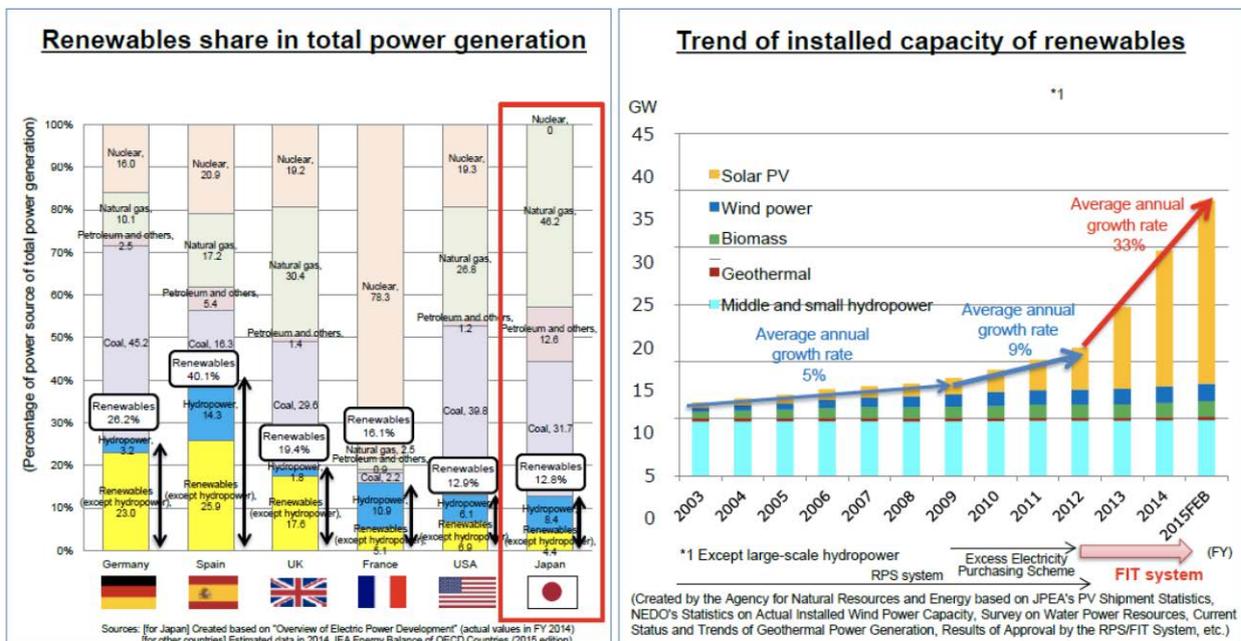


図33 日本における再生可能エネルギーの導入状況 (Y. Matsuyama, 32nd EU-PVSEC)

2030年の電力の内、再々可能エネルギー（RE）の導入ターゲットは、22～24%（PVは7%）だが、こうしたターゲットの実現のためのFIT改正の目的は、①balance among RE resources、②cost effective FIT tariff、③reflection of electricity system reform、であると述べた。持続的発展のための課題は、①reduces cost for post FIT generation、②changes for grid access & integration、③harmonize with local residence & community、である。日本のPV産業の貢献も期待している。PVの世紀に向けた今後に対する期待として、図34に示すように、①innovation of technologies and costs、②innovation of systems、③innovation of players、があるとしてまとめた。

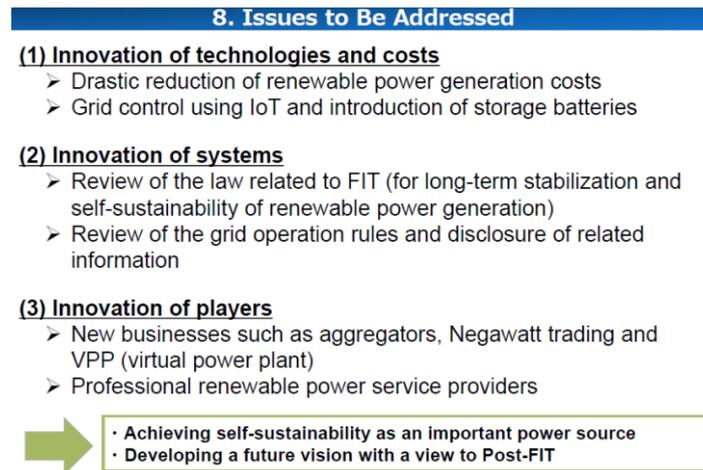


図34 PVの世紀に向けた重要なポイント（Y. Matsuyama, 32nd EU-PVSEC）

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ことから、今夏は、Inter Solarと連携し、IEEE PVSCと同じ月に開催することとなった。前回より、約750名、前々回より、約2,000名程少ない参加者となった。展示を重視するあまり、EU-PVSECをIEEE PVSCと同じ月に開催したことが、裏目に出ている気がする。

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、国際共同研究の離陸も期待したい。

次回の33rd EU-PVSECの開催地および時期について、今回のInter Solar EUとの連携が効果がなかったようで、夏頃決まるとのことである。また、PVSEC-26は、2016年10月24日～28日、シンガポールで、44th IEEE PVSCは、2017年6月25日～30日、米国・ワシントンDCで、開催予定である。

(以上)