

第 36 回太陽光発電欧州会議 (36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告

2019. 9. 17

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日 : 2019年9月9日～9月13日。

2. 開催場所 : Marseille Chanot Convention and Exhibition Centre (マルセイユ、フランス)。

3. 本会議の概要 :

1977年のルクセンブルグでの第1回会議以来、1年半毎に開催され、2005年のバルセロナでの会議からは、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、Florence Lambert (CEA Liten) で、論文委員長は Robert Kenny (EC-JRC) であった。今年は、展示関係者やサイドイベント参加者を含めると、約 2,000 名の参加者との事である。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。56カ国から、前回会議より23件減ではあったが、861件の論文発表があった。国別では、①ドイツ179件、②フランス114件、③オランダ46件、④日本42件、⑤スイス39件、⑤韓国39件、⑦オーストラリア36件、⑧イタリア30件、⑨スペイン29件、⑨米国29件、⑪中国27件、⑫台湾25件、の順であった。

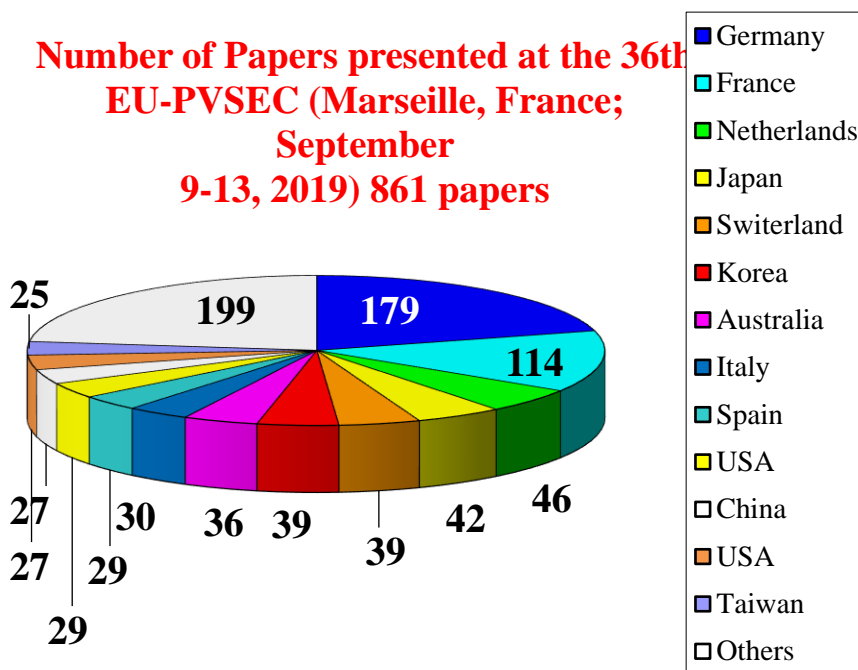


図1. 国別発表論文件数 (RTS(株)提供)

図2は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①Si太陽電池系231件、②太陽電池モジュール、BOSコンポーネント149件、③薄膜系(ペロブスカイト、非Si系、多接合太陽電池)148件、④PVシステムと蓄電、モデリング、設計、運営、性能139件、⑤PVシステ

ム応用、系統連携81件、⑥新材料、新概念69件、⑦太陽光発電の資金調達、市場、政策44件、の順であった。

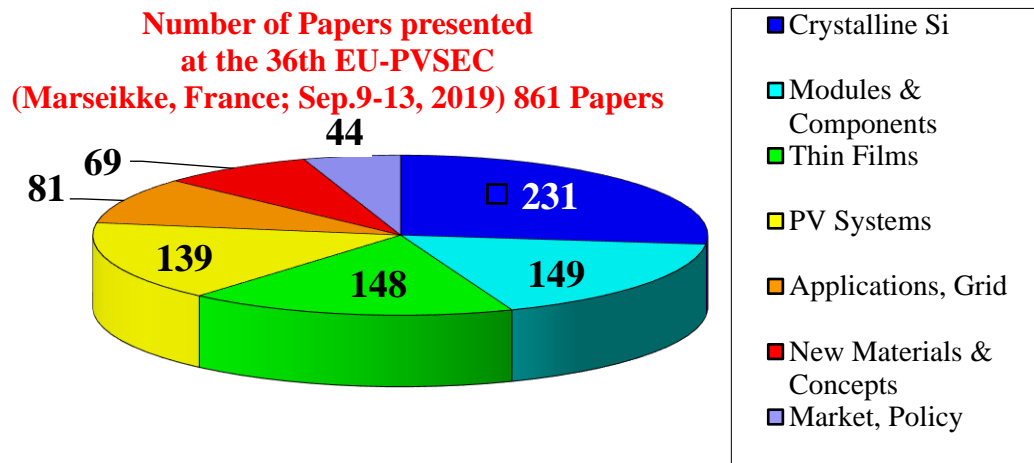


図 2. 発表論文件数の分野別内訳 (RTS(株)提供)

Becquerel Prizeは、Pierre Verlinden(Consultant, Visiting Professor at Sun Yat-Sen University, Guangzhou, China、前Trina Solar) が受賞した。Sunpowerでのバックコンタクト結晶Si太陽電池の実用化、集光型セルの開発、Trina Solarでの、数々のセルおよびモジュール効率の更新などの貢献が評価された。受賞記念講演では、COP21を踏まえ、CO₂削減が必須で、2050年までに、100%RE(再生可能エネルギー)ゴールがあり、2050年には、70-80TWの太陽光発電(PV)の導入が見込まれる。今後の研究開発により、モジュール効率25%以上のSiタンデムセルモジュールが実用化されよう。PVモジュールのリサイクルも必要であるし、あ新たな市場開拓が必要であり、例えば、車載などは、600GWの市場が期待できる。いずれにしても、こうしたビジョンの実現のためには、多くの仕事と努力が必要であると、まとめた。

4. 主な発表論文の概要：

4. 1 Opening Session

(1) 組織委員長の Florence Lambert (Director of CEA Liben) の挨拶があった。紀元前 600 年以来のマルセイユの特色の紹介の後、太陽光発電の現状と今後の方向性を述べた。先端アーキテクチャ、先端製造技術、系統協調性、どこでも使える PV、storage や水素との連携は、エネルギー輸送の視点をもたらし、述べた。こうした始点は、クリーンエネルギー社会の創製につながる。今後も、研究開発は重要で、性能向上やコスト低減に加え、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。特に、BIPV や energy carrier としての mobility の視点での重要性を述べた

(2) Laurent Michel (Director General, Energy and Climate, Ministry for the Ecological and Inclusive Transition, France) は、フランス政府を代表して、歓迎の意を述べた。2050 年には、カーボンフリーの時代が来ることを期待しており、PV を含む再生可能エネルギー、特に、PV と風力が伸びるであろうと述べた。IPVF における PV R&D の概要、ENES や ADEME

における PV プロジェクトの概要が述べられた。水素を含む輸送（移動体）や水上に期待している」とまとめた。

（3）Piotr Szymanski (Director, Energy, Transport and Climate, EC-JRC) は、EC の関連分野での役割、EU solar test installation などの状況が、述べられた。2050 年には、PV がメインになるであろうが、現状では、満足できない。技術開発を通して、performance efficiency の向上に加え、mobility や building など新分野形成が必要であると述べた。

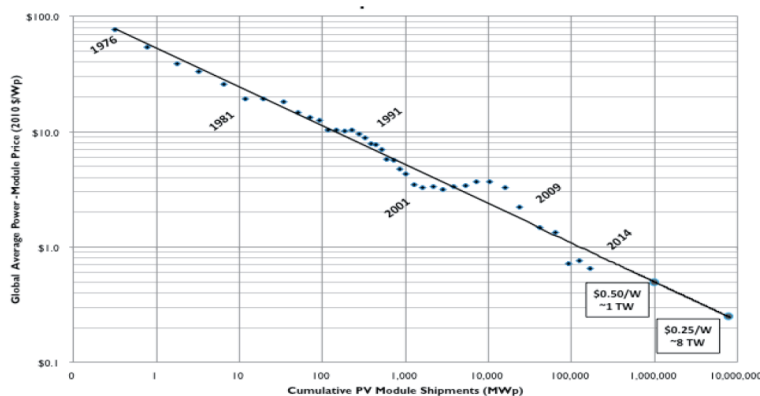
（4）Walburga Hemetsberger (Chief Executive Officer, SolaPower Europe) は、将来、PV を含む再生可能エネルギーが主流になるのは間違いないと確信していると述べた。2018 年の欧州での PV 導入量も 20.3GW と、欧州での PV 導入も復活しつつある。2023 年には、欧州での PV 導入量は、250GW になる。2030 年には、PV が、欧州の電力需要の 20% を提供し、雇用も 50 万人以上、生み出すだろう。SolarPower Europe は、200 メンバーで、100 日以内に、Europe Greatest を基調とする next political goal をまとめたいと述べた。BIPV や輸送などの市場開拓、研究開発の重要性を述べた。

4. 2 パネル討論：

Heinz Ossenbrink (Former EC-JRC) がモデレータ、Arno Smets (Tech. Univ. Delft) がアシスタントとなって、“The Future of PV Manufacturing in Europe”のテーマで、パネル討論がなされ、活発な質疑がなされた。

（1）Eicke Weber (Chair, European Solar Manufacturing Council) は、2016 年に、FhG-ISE、NREL、産総研共同で開催された TW Workshop での講演資料を用いて、話題提供を行った。

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



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

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

図 3 は、PVモジュールの平均価格のPVモジュールの累積出荷量との関係を示す。\$0.5/W は、達成されており、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 4 は、結晶シリコン太陽電池技術のポートフォリオを示す。図 4 の結晶Si太陽電池技術に加えて、高効率III-V化合物太陽電池技術やその他の太陽電池技術、バッテリーを含む貯蔵技術も進展している。図 5 は、TWワークショップで議論されたTWスケールPVの予想を示す。上記低価格化や各種技術開発の進展を踏まえて、年15%の成長で、2030年3TWが可

能で、ミニマムターゲットとしている。年25%の成長で、2030年5~10TWが可能としている。2050年には、50~70TWも、期待できる。今後も、結晶Siが主流だろうが、モジュール効率30%以上の実現に向けた努力が、必要とまとめた。

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

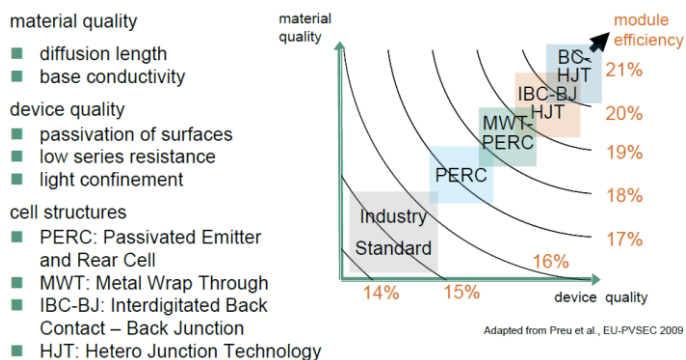
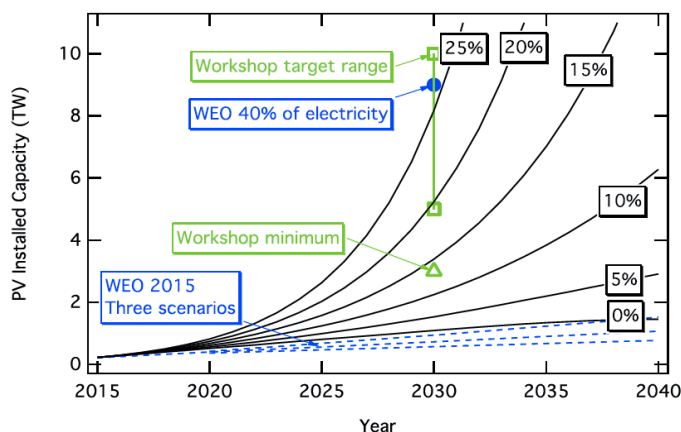


図4. 結晶シリコン太陽電池技術のポートフォリオ (Prof. E. Weber提供)

Projections to TW-scale PV



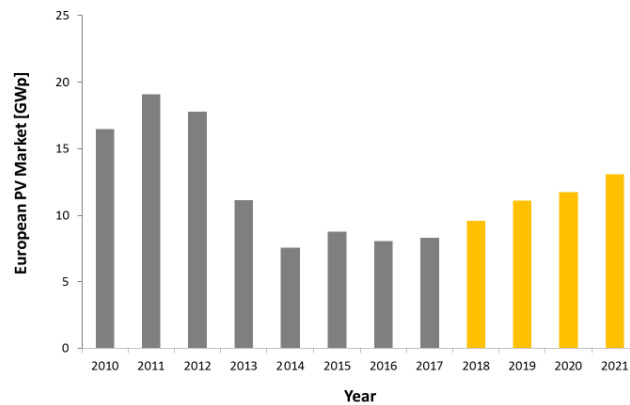
Using simple assumptions, we can project that just maintaining the 2015 deployment rate would reach 1-TW deployment before 2030. A 25%/y growth rate would reach 5-10 TW by 2030.

図5. TWスケールPVの予想 (Prof. E. Weber提供)

(2) Andreas Bett (Director, FhG-ISE) は、欧州企業が直面している困難を打開するため、GreenFab 構想の話題提供を行った。今後も PV 市場の拡大が期待されるが、図6に示すように、欧州市場は冷え込んでいる。中国企業は、中国政府の支援のもと、一人勝ちである。民主国家では、無理がある。図7に示すように、モジュールコストは、低減の傾向にあり、25セント/W から 20セント/W も見込まれる。しかし、中国から欧州への輸送コストは、1~1.5ユーロ/W で、CO₂ 排出増、エネルギーセキュリティの観点からも、高コストモジュールであっても、欧州でのモジュール製造が、理想的である。図8に示すように、10GW の GreenFab 構想を提案している。電力と輸送などの面で、ライン川を活用する。10GW のモジュール生産は、スケールメリットがあるとしている。

■ Photovoltaics is the essential pillar for the future energy supply

- market will grow rapidly and covers a multi-billion € market volume
- Europe needs increased PV-installations to fulfill the climate goals



Data: IHS

図 6 . 欧州の PV 市場の状況 (Dr. A. Bett 提供)

- Production cost of modules soon at 25€ cents/Wp, even 20 €cents/Wp in reach
- Transport costs from China to Europe: ~ 1-1.5 €cent/W (additional CO₂ emissions!)

→ Costs for logistics will have an increased share in the future

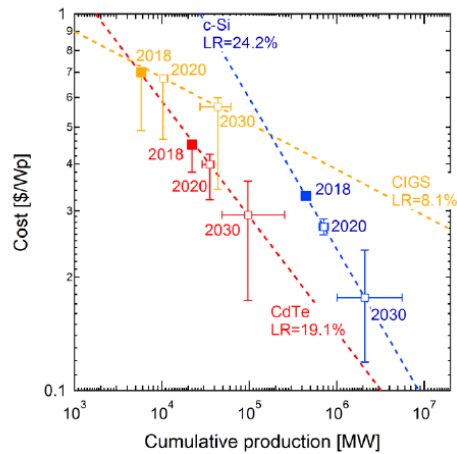


図 7 . モジュールコストの変遷 (Dr. A. Bett 提供)

10GW GreenFab Initiative

Sustainable PV Manufacturing at the Site Fessenheim

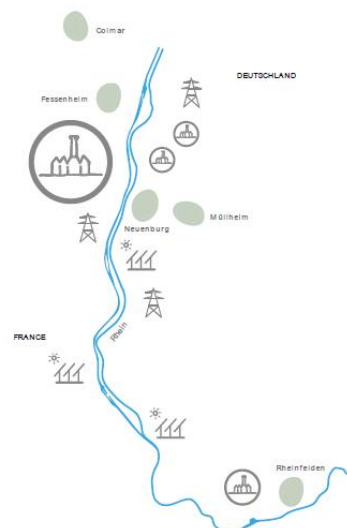
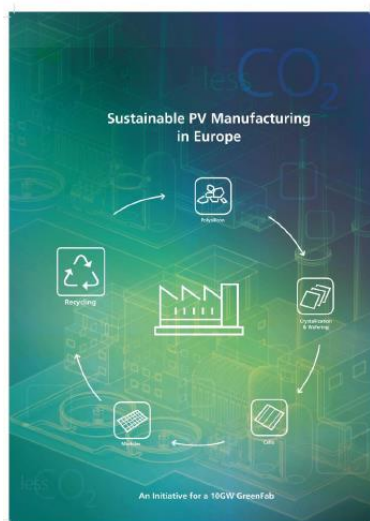


図 8 . 10GW の GreenFab 構想 (Dr. A. Bett 提供)

(3) Paolo Frankl (Head of Renewable Energy Division, IEA) は、中国企業に対して、欧州企業は、Innovationや気候変動に挑戦すべきであると述べた。CO₂低減の視点が重要であり、いずれ、コストは問題にならなくなろう。将来、PVは、間違いなく、No.1になるだろう。戦略的市場創成が必要であり、PV-EVやbuildingなどの市場も魅力的であると述べた。

(4) この他、Lue Marliave (Total)、Roch Drozdowski-Strehl (General Director, IPVF)、Phillipe Malbranche (General Director, CEA INES)、Stefan Rinck (CEO, Singulus) が、パネリストとして、意見を述べた。本題である、欧州企業の come back に向けた課題が議論された。既に、モジュール価格\$0.25/Wの中国企業に、コスト競争するのは難しく、エネルギー性能、信頼性や用途開発や革新的技術等に向けた技術開発が重要であると述べられた。コストが高いリサイクルも、circle economyの視点で取り組むべきであり、エネルギーセキュリティの視点も重要である。継続的な市場成長が必要であり、集中、分散電力の最適化 (regulationを含む) に加え、エネルギーストレージの重要性も指摘された。EV用PV充電ステーションやPV powered vehiclesなど輸送や住宅などの市場やプロダクトが、欧州企業の come back に有効であり、国際連携も需要であると指摘された。最後に、PVを含む再生可能エネルギーは、将来、間違いなく、メインとなるだろう。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。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、まとめられた。

5. 主な発表論文の概要：

5. 1 先進太陽電池技術分野：

(1) K. Makitaら (産総研、FhG-ISE) は、“III-V/Si three-junction solar cells reaching 30% efficiency using smart stack technology”と題して、産総研とFhG-ISEとのIII-V/Siタンデムセルに関する共同研究の成果をプレーナリ講演した。

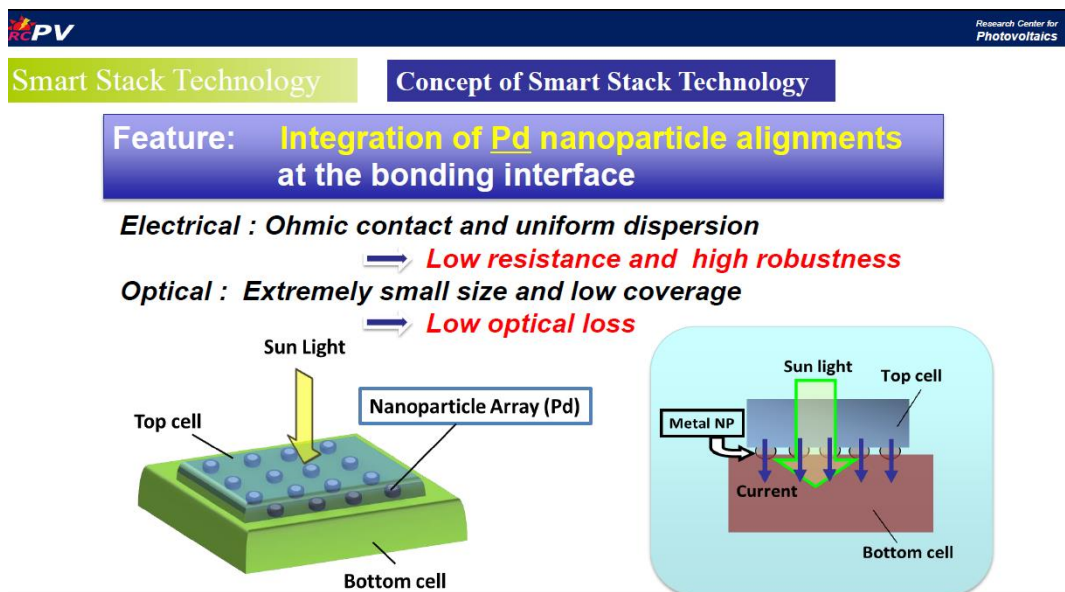


図9. スマートスタック技術 (Dr. K. Makita提供)

NEDO PV Challengeに向けての開発ロードマップが示された。2020年までに効率30%、2030年までに効率の研究開発成果が、2030年までに効率25%、2050年までに効率40%のセル実用化を目指す。III-V/Siタンデムセルにおいては、NREL、CSEM、EPFLによるメカニカルス

タック InGaP/GaAs//Si-HIT 3 接合タンデムセルの効率 35.9% (面積 1.002 cm²、Voc=2.52/0.681V、Jsc=13.6/11.0mA/cm²、FF=87.5/78.5%)、FhG-ISEによるウエハボンディング InGaP/GaAs//Si TOPCon 3 接合タンデムセルの効率 33.3% (面積 3.984 cm²、Voc=3.127V、Jsc=12.7mA/cm²、FF=83.5%) の状況である。図 9 に示すように、パラジウムナノ粒子を接合界面に配した接合化技術で、スマートスタック技術と読んでいる。パラジウムナノ粒子ドメインの直径は、約 50nm、ドメイン密度は、約 1x10¹⁰ cm⁻²、被覆率は、約 12%、接合ギャップは、10~50nm であり、接合抵抗は、約 1 Ωcm²、光損失は、約 2% である。先に、InGaP/GaAs//Si Al-BSF 3 接合タンデムセルで、効率 25.12% (Voc=2.88V、Jsc=10.51mA/cm²、FF=83.0%) を得ていた。今回、FhG-ISE との共同研究の成果として、InGaP/AlGaAs//Si TOPCon 3 接合タンデム太陽電池で、図 10 に示すように、効率 30.8% (Voc=3.03V、Jsc=12.72mA/cm²、FF=80.0%) を得ている。5.5 倍集光で、効率 32.6% の状況である。コスト計算もなされ、モジュール効率 30%、H-VPE による InGaP、GaAs の高速成長、GaAs 基板再利用 10 回、1-sun モジュールコスト \$2.4/W、6-suns で、\$0.5/W 以下との事である。

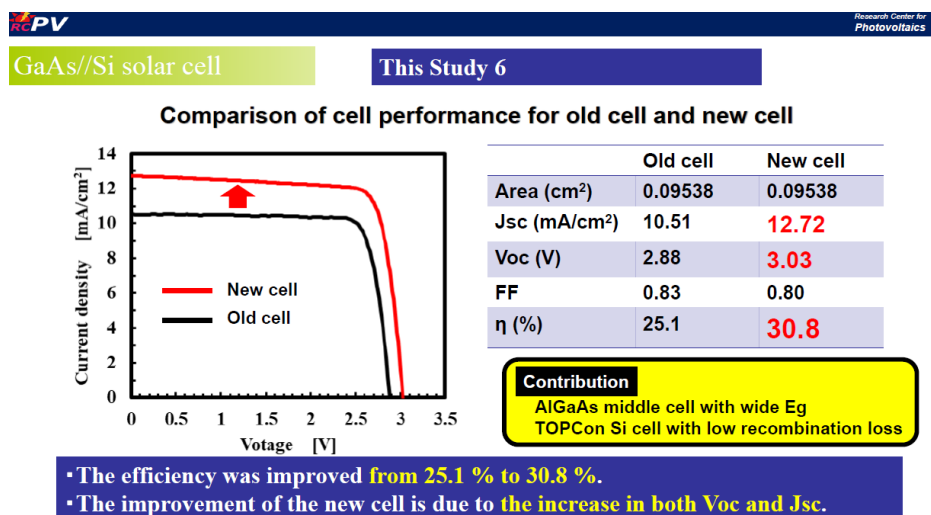


図 10. InGaP/AlGaAs//TOPCON Si₃接合タンデム太陽電池の特性 (Dr. K. Makita提供)

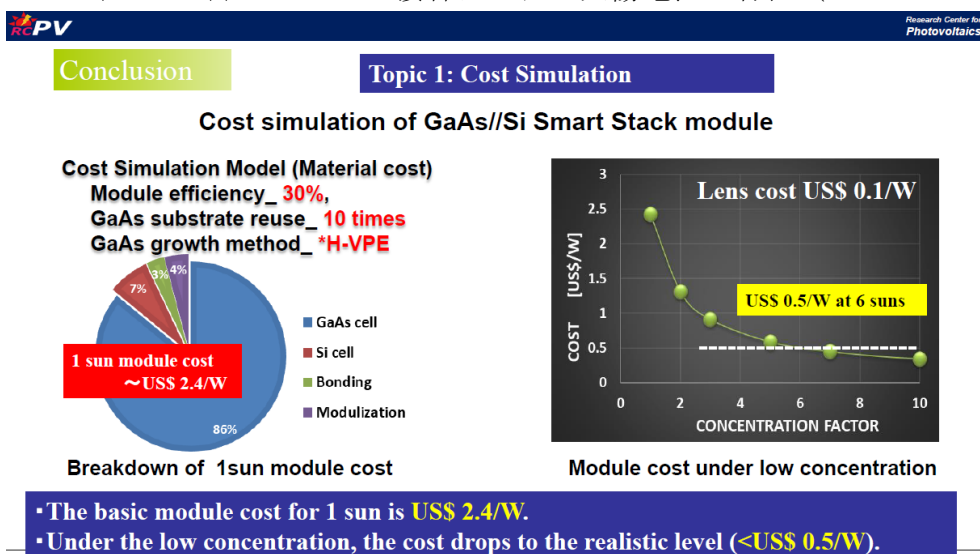
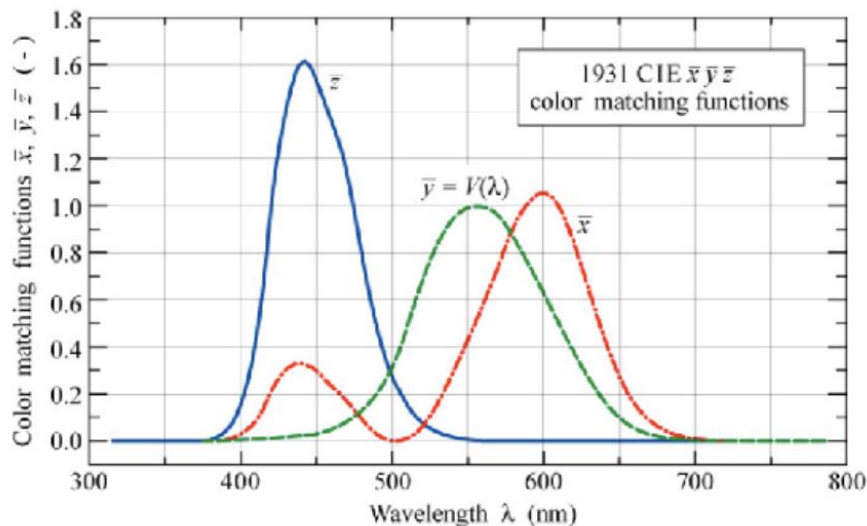


図 11. InGaP/AlGaAs//Si₃接合タンデム太陽電池モジュールのコスト試算 (Dr. K. Makita提供)

(3) J. Haimeら (Aalto Univ.) は、“Approaching maximum efficiency of colored opaque photovoltaics with ideal photonic structures”と題して、プレーナリ講演を行った。世界のエネルギー需要の40%がビルディングで消費されており、気候変動を緩和するためには、ビルディング環境で再生可能エネルギーの発電量を増加させることが、重要である。建物一体型太陽光発電(BIPV)は、建築材料として太陽電池モジュールを導入することで、気候変動緩和に貢献することができる。しかし、広範なアプリケーションのためには、PVモジュールの視覚的な外観は、他の建築材料と互換性がある必要がある。色付き太陽電池モジュールは、PVの美学を調整する効果的な方法だが、基本的な光学損失のために、黒いモジュールと比較して、常に低い変換効率になってしまう。講演者らの理論的研究は、この損失は、可視領域の1つまたは2つの鋭い波長帯内のすべての光を反射することによって、エネルギー的に最適な方法で生成された場合、10%未満である可能性があることを示している。図12に示すように、CIE 1931 XYZ標準のX、Y、Z座標標記によるhuman colourの記述がなされている。図13は、Y=0の場合のCIE1931色空間xyと種々の色のダイアグラムを示す。x、y値は、図中の式で導出される。図中の三角は、RGB色空間を示し、黒点は、CIE D65に対応するとの事である。AM1.5G 1000W/m²、25℃の標準条件で、単接合太陽電池の限界効率が、計算されている。図14は、Y=0.25、Y=0.5の場合のCIE1931色空間における対応する色と単接合太陽電池の限界変換効率を示す。図15は、単接合太陽電池の効率限界33.77%に対する種々の色の場合の理論的限界効率とY値(効率の上に記載)を示す。ほとんどの色に関して、光学損失は、10%以下に抑えられている。黒色は、低損失だが、黄緑色が、低光学損失で、人間の視感度のピークが、555nmであり、興味深い。

XYZ tri-stimulus values



$$X = \frac{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} R(\lambda) P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad Y = \frac{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} R(\lambda) P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad Z = \frac{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} R(\lambda) P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

図12. CIE 1931 XYZ標準のX、Y、Z座標標記によるhuman colourの記述 (J. Haime and P. Makinen, *Energy Environ.. Sci.* 12, 1274 (2019).)

CIE xyY Colour Space

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Y : relative luminosity or average visible reflectance

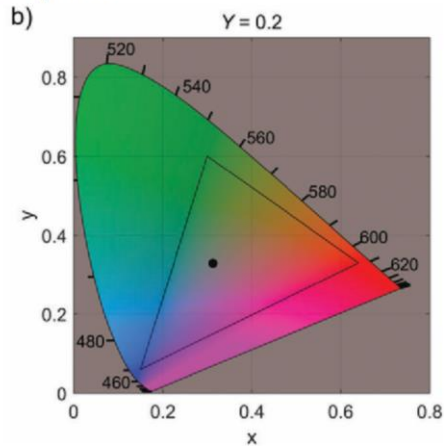


図 1 3 . Y=0の場合のCIE1931色空間xyと種々の色のダイアグラム (J. Haime and P. Makinen, Energy Environ.. Sci. 12, 1274 (2019).)

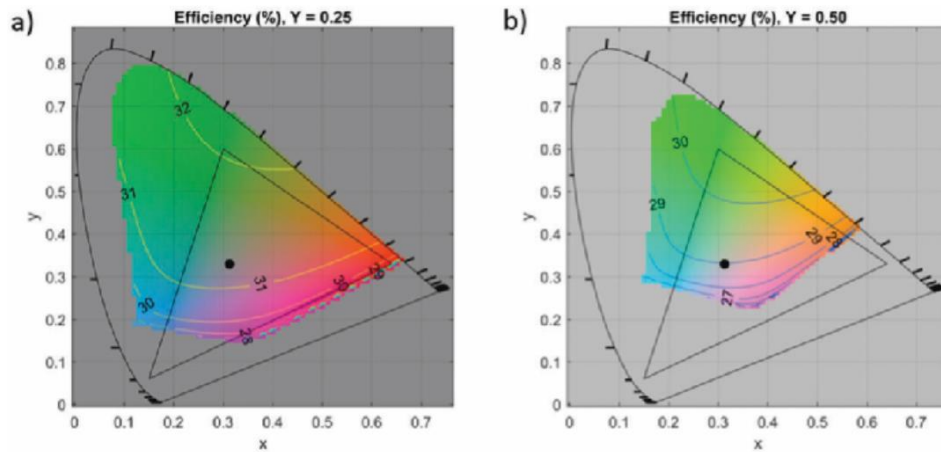


図 1 4 . Y=0.25、Y=0.5の場合のCIE1931色空間における対応する色と単接合太陽電池の限界変換効率 (J. Haime and P. Makinen, Energy Environ.. Sci. 12, 1274 (2019).)

Dark skin 0.103 32.7 %	Light skin 0.354 30.6 %	Blue sky 0.185 31.8 %	Foliage 0.133 32.6 %	Blue flower 0.233 31.3 %	Bluish green 0.418 30.2 %
Orange 0.311 30.9 %	Purplish blue 0.114 32.2 %	Moderate red 0.199 31.6 %	Purple 0.064 32.9 %	Yellow green 0.444 30.5 %	Orange yellow 0.436 30.1 %
Blue 0.057 32.7 %	Green 0.230 32.0 %	Red 0.126 32.2 %	Yellow 0.607 28.9 %	Magenta 0.200 31.4 %	Cyan 0.189 31.7 %
White 9.5 0.909 24.1 %	Neutral 8 0.585 28.4 %	Neutral 6.5 0.357 30.6 %	Neutral 5 0.191 32.0 %	Neutral 3.5 0.089 32.9 %	Black 2 0.032 33.4 %

図 1 5 . 単接合太陽電池の効率限界33.77%に対する種々の色の場合の理論的限界効率とY値 (効率の上に記載) (J. Haime and P. Makinen, Energy Environ.. Sci. 12, 1274 (2019).)

5. 3 結晶 Si 太陽電池分野：

(1) H.C. Sioら (ANU) は、“Bulk defects in mono-crystalline silicon, multi-crystalline silicon and mono-like silicon materials”と題して、プレーナリ講演を行った。表1に示すように、Si ウエハ価格、抵抗率、バルクライフタイム、太陽電池特性の状況を示す。Si太陽電池のバルクライフタイムや太陽電池特性は、粒界、転位クラスタ、粒界内欠陥などの欠陥や不純物に、影響される。

表1. Si ウエハ価格、抵抗率、バルクライフタイム、太陽電池特性の状況 (Dr. Q. Wang提供)

	Price (\$/w)	Resistivity (Ωcm)	Bulk lifetime (μs)	Eff
mc-Si	0.26	1 - 3	~ 30	18.7
cm-Si	0.40	0.3 - 0.6	~ 200	21.7
c-Si (p)	0.46	0.3 - 0.6	~ 260	~ 22.0
c-Si (n)	0.50	1 - 3	> 1500	>22.5

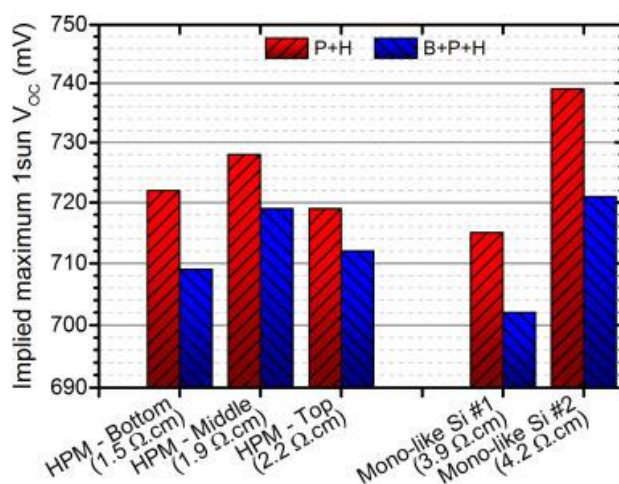


図16. 多結晶Siおよびmono-like SiのB拡散、P拡散によるimplied Vocの変化 (S.P. Phang et al., Jpn. J. Appl. Phys. 56, 08MB10 (2017).)

単結晶Si、特に、CZ p-Siでは、B0欠陥が関与した光劣化により、キャリア寿命の劣化と太陽電池特性の低下が知られている。また、太陽電池作製プロセス中の酸素析出物の生成が、課題でもある。熱プロセス中のV-N複合欠陥生成の可能性も指摘された。多結晶の粒界は、水素パッシベーションにより、不活性化されているが、転位は、不活性化されていない。多結晶Siおよびmono-like SiのB拡散、P拡散によるimplied Vocの変化も報告された。図16に示すように、B拡散により、Vocは低下し、P拡散により、回復する。多結晶Si太陽電池の高温光誘起劣化 (LeTID)現象に関する議論もなされた。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が必要である。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、水素誘起欠陥（FhG-ISEのグループは、空孔（V）-H対を考えている）が考えられる。結果をまとめて、図17に示す。

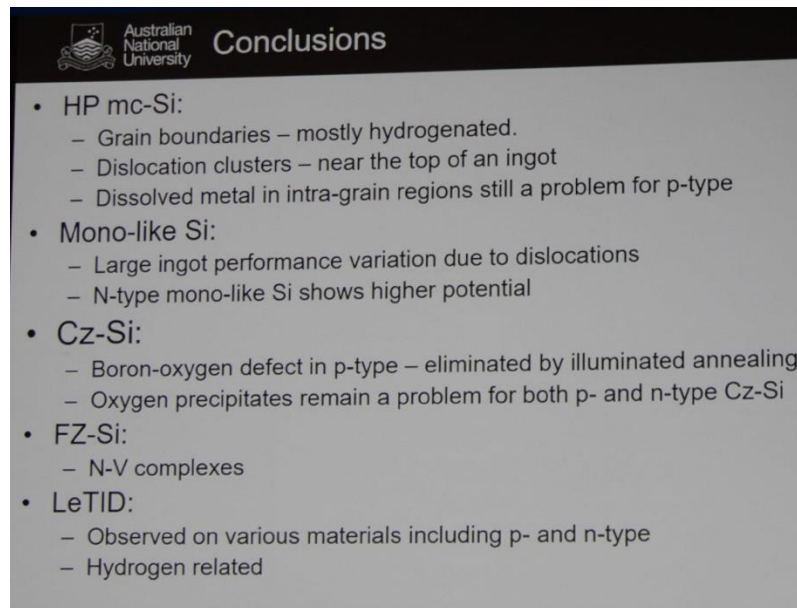


図17. ANUグループによる結晶Si中の欠陥挙動のまとめ（中上明光氏提供）

(2) A. Richterら（FhG-ISE）は、“Both sides contacted Silicon solar cells: Options for approaching 26% efficiency”と題して、プレーナリ講演を行った。図18に示すように、結晶Si太陽電池は、GaAsやGaInP太陽電池に比べて、電圧損失、FF損失が多く、改善の余地がある。光およびキャリアマネージメントが必要である。図19は、FhG-ISEのTOPCon太陽電池の構造と特性を示す。効率25.8%が得られている。図20は、TOPcon太陽電池のキャリアマネージメント面での損失要因の解析結果を示す。図21は、TOPcon太陽電池の光マネージメント面での損失要因の解析結果を示す。これら損失要因の改善、特に、①Siウエハ（抵抗率、厚さ）、②フロントエミッタおよびコンタクトグリッドの改善、③ライトトラッピングの改善により、TOPCon太陽電池においても、26.5%以上の高効率化が可能であると、まとめた。

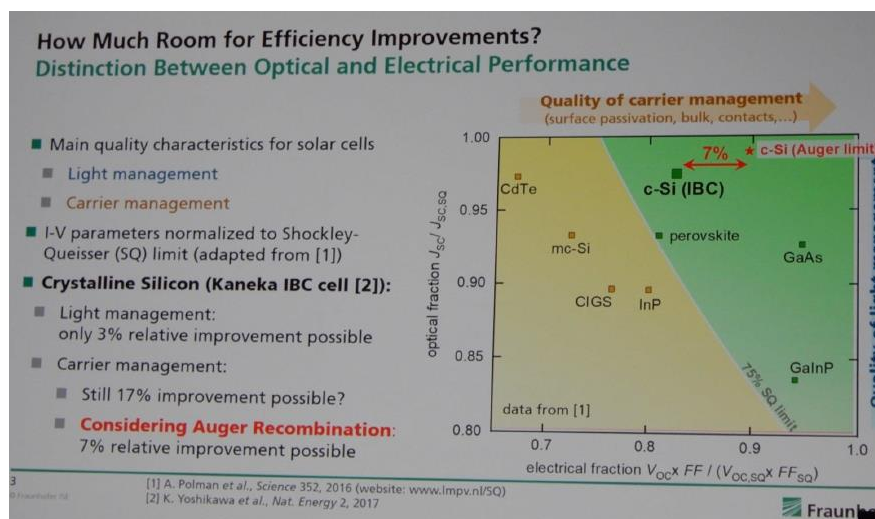


図18. 各種太陽電池の高効率化の現状と改善の可能性（中上明光氏提供）

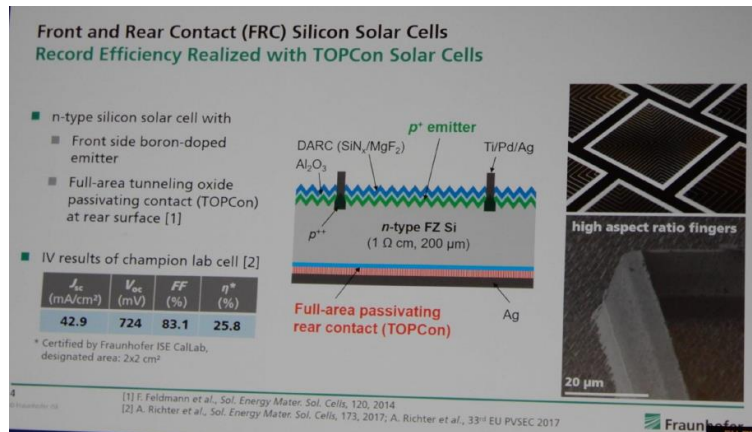


図 1 9. FhG-ISEのTOPCon太陽電池の構造と特性 (中上明光氏提供)

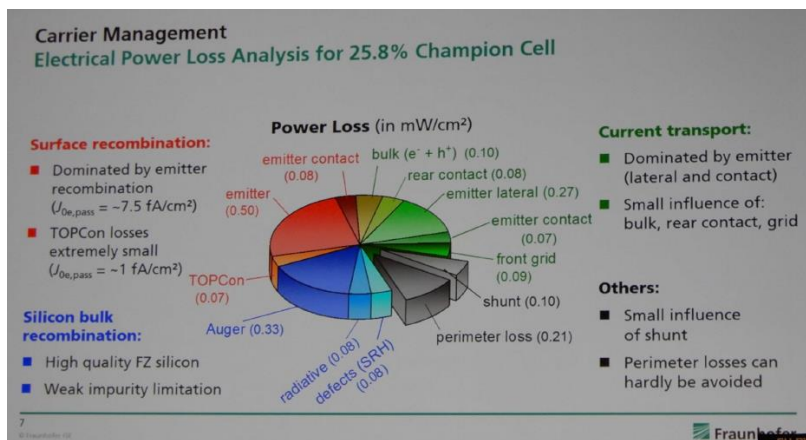


図 2 0. TOPcon太陽電池のキャリアマネージメント面での損失要因の解析結果 (中上明光氏提供)

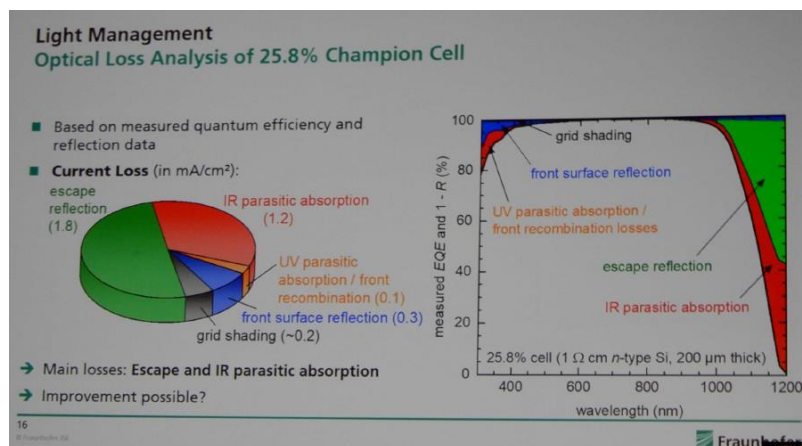


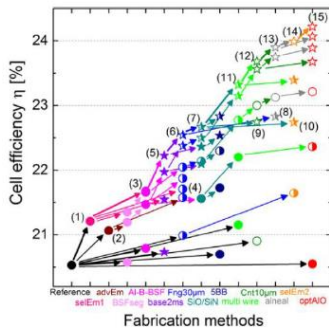
図 2 1. TOPcon太陽電池の光マネージメント面での損失要因の解析結果 (中上明光氏提供)

結晶Si太陽電池の現状については、下記の二つがまとまっているので、紹介する。

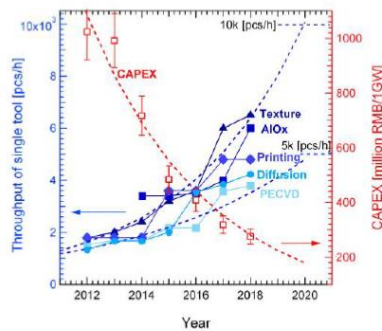
(3) Denis De Ceuste (DDC Solar) による先の46h IEEE PVSCでのプレーナリ講演 “Passivating contacts: Prospects for high volume manufacturing” がまとまっているので、紹介する。図 2 1 に示すように、PERC構造が、結晶Si太陽電池の現在の主流である。種々の技術開発によるセル効率構造、スループット向上がなされている。Longi は、24.06%のPERCセルの記録を出している。しかし、PERCセルの効率限界が指摘され

ている。図 2 2 に示すように、A1-BSFセルは、セル効率20%が限界で、PERCセルは、23.5%が、効率限界である。Passivating contactsが、次世代太陽電池として、最も期待されている。

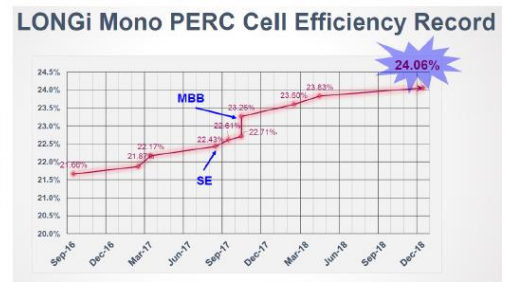
PERC is the benchmark



Byungsul Min, IEEE JPV, 2017



Yifeng Chen, IEEE JPV, 2018

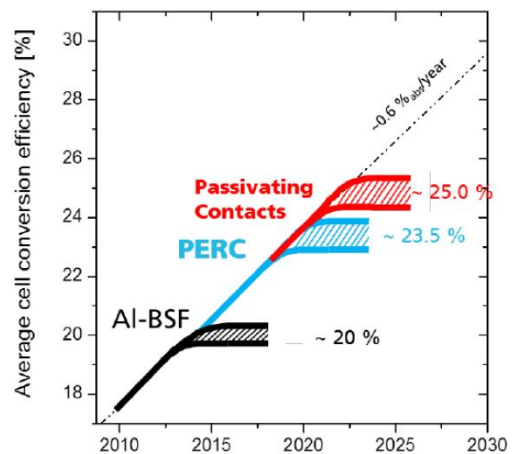


Hongbin Fang
PVCellTech 2019

図 2 1 . PERCが現在の主流 (Dr. D. De Ceuste提供)

PERC limitations

- PERC efficiency is limited by recombination in silicon and under the contacts
 - Aluminum as localized BSF excludes the use of better N-type material
 - BSF and selective emitter can only partially shield the recombination at the silicon/metal interfaces
- **Passivating contacts** is the most credible candidate for next generation solar cells after PERC [1]



[1] M. Hermle, nPV workshop, 2019

図 2 2 . PERCセルの効率限界 (Dr. D. De Ceuste提供)

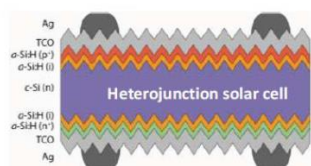
TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) が、次世代結晶太陽電池の有力な候補であると見ている。図 2 3 に、TOPConとヘテロ接合 (SHJ) 構造太陽電池の比較を示す。TOPConとSHJの比較がなされた。SHJは、光劣化なし、低温度係数、bifacial、短プロセスフローの特長を有する。パナソニックは、1997年以來大量生産を開始し、製造スケールの効率は、23%以上である。技術開発は、ASU、CSEM/EPFL、CEA/INESなどでなされている。装置やタンキラインは、Meyer Burger、AMAT、INDEOtec、Von Ardenneなどから入手できる。大量生産も、CIE、Hevel Solar、Sunpreme、3SUN/ENEL、Hanergy、REC、Jinergyなどで、計画中である。一方、TOPConは、光劣化なし、bifacialの特長を有し、

Trinaが、24.58%を達成し、パイロットラインの効率率は23%以上である。研究開発は活発で、種々の技術オプション（LPCVD、PECVD/PVD、APCVD、イオン注入など）がある。装置は、Meyer Burger Schmid、Tempress、Indeotec、Centrothem、OLT、Von Ardenne、Semco、Intvacなどから入手できる。Trina、GCL、Jollywodなどが、パイロットライン、技術開発ステージである。TOPConは、現在のPERCラインをアップグレードでき、種々のツールを活用できる可能性があるとしている。図24に示すように、ヘテロ接合（SHJ）太陽電池よりも、低コストで、将来の改善の見通しがある。究極のゴールは、真のpassivating contactsを持つ両サイドTOPConである。課題は、メタリゼーションのインテグレーション、低コストプレーティング、パッシベーションを劣化させないペーストなどである。

Passivating contacts – carrier selective contacts

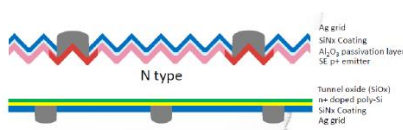
Includes a thin layer that separates the absorber from the metal electrodes and shields the bulk from the infinite surface recombination at the metal contacts

- Intermediate Passivating Layer (IPL) provides chemical passivation to the interface [1]
- Carrier Separation layer (CSL) provides carrier selectivity from differences in Fermi-levels, bandgaps or work functions



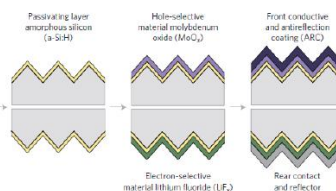
SHJ cross-section
C. Ballif, 2018 IEEE-WCPEC

$$S_{10,e} = 14.1 ; S_{10,h} = 13.5$$



(Hybrid) TOPCon cross-section
--Yong Liu, Jollywood, 2017

$$S_{10,e} = 16.4 ; S_{10,h} = 14.3$$



Dopant-free asymmetric hetero-contacts
--J. Bullock, Nature Energy, 2016

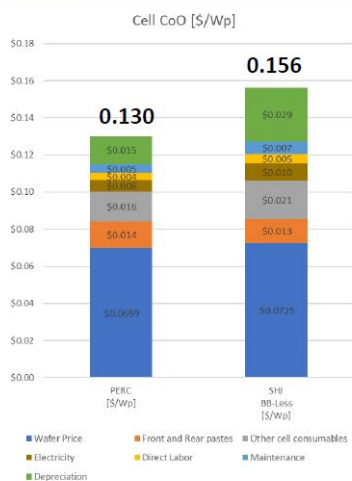
$$S_{10,e} = 13.3 (TiO_2) \quad S_{10,h} = 12.5 (MoOx)$$

[1] Glunz, 2017 IEEE PV Conference

Selectivity values from J. Schmidt, Solar Energy Materials, 2018

図23. TOPConとヘテロ接合（SHJ）構造太陽電池の比較（Dr. D. De Ceuste提供）

Cell Cost-of-Ownership



Re-drawn and adapted from M. Woodhouse (NREL) 2019



Re-drawn from J. Rentsch, PVCellTech 2019
Assuming PERC at 22%, TOPCon at 23%

TOPCon+ assumes:

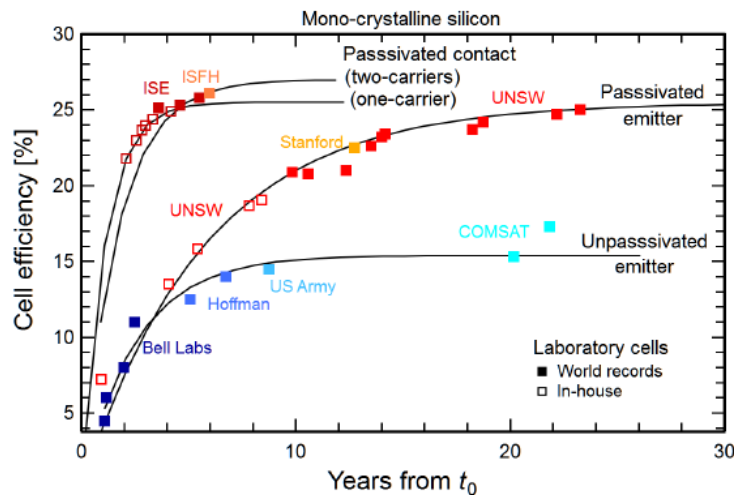
- N-wafer price drop (10% to 5% from P-type)
- APCVD or PVD for passivation, in-line anneal
- Poly from 120 to 30nm
- NiCu plating

図24. PERC、SHJ、TOPConのセルコスト比較（Dr. D. De Ceuste提供）

(4) P.P. Altermattら (Trina Solar) による前回の35th EU-PVSECのプレナリ講演 “Learning from the Past to Look Beyond the Roadmap of PERC Si Solar Cell Mass Production” が、まとまっているので、紹介する。



Patterns in the past



Götzberger fit:

$$\eta(t) = \eta_{\text{limit}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_0 - t}{c}\right) \right]$$

c: loss decay constant [years]
years for loss-decay by 1/e

The shorter the faster is progress

2.5 unpassivated emitter

5.7 passivated emitter (and rear)

1.7 passivated contacts

Exponential saturation pattern:

Initial progress quick, but efficiency hurdles on the way.

Progress has become quicker → drawing from past experience

Data: M.A. Green, Prog PV 17, 183 (2009); M.A. Green et al, Prog PV, solar cell efficiency tables.

In-house data: author (UNSW), F. Feldmann (ISE). Fit: A. Götzberger et al., Sol. En. Mater. Sol. Cells 74, 1 (2002)

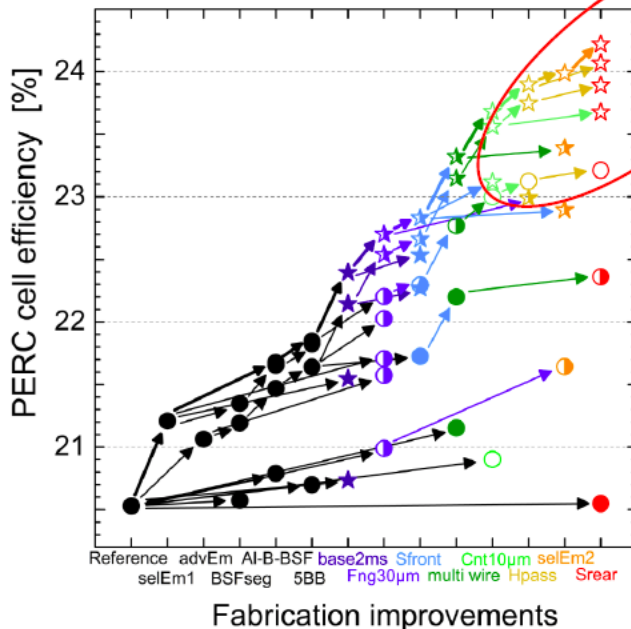
図 2 5. 各種結晶Si太陽電池の高効率化の変遷と予想曲線 (Dr. P.P. Altermatt提供)

図 2 5 に示すように、PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 構造結晶Si太陽電池が、主流となっている。PERC太陽電池の生産規模も、2017年の28.9GWから、2018年には、65.7GWになる見通しである。2050年までに、100%の再生可能エネルギーの実現のためには、累積導入量22TWが必要で、III-V化合物、II-VI化合物、カルコパイライト化合物やペロブスカイでの実現は、難しいだろう。結晶Siが主力になろう。結晶Si太陽電池モジュール価格も、2018年の\$0.3/Wから、2030年には、\$0.17/Wになろう。PERCモジュール効率も、2004年の約14%から、2018年には、19.1%となっている。Ag、Ga、Snの資源制約もあり、結晶Si太陽電池では、Ag使用量を、40mg/セルから20mg/セルに、削減する見通しである。unpassivatedセル、passivatedセル、HIT-IBCなど、各種結晶Si太陽電池の高効率化の変遷が、図 2 5 に示すように、分析されている。

PERCの今後のための技術開発の取り組みが紹介された。高ライフタイムτ基板 (n型またはFZ)、エミッタ構造の改善、BSF構造の改善、メタリゼーションの改善、表面パッシベーションの改善に加え、ポリSi passivated contact、トンネル酸化物、反転層の利用などが対象で、計算シミュレーションによる太陽電池の損失がなされ、高効率化の可能性に関する解析結果が報告された。図 2 6 に、種々の技術の適用による結晶Si PERC太陽電池の高効率化の可能性に関するシミュレーション結果を

示す。τ = 1.5msの基板の場合、効率24.35%の実現が期待できる。研究開発成果の適用により、高効率PERC太陽電池の大量生産が可能とまとめた。

Beyond PERC



tandems
passivated contacts
hetero structures
hetero emitters
PERT, IBC, HJT
n-type
etc.

Above about 23% (?) other device structures and materials may become competitive to PERC

Presently, no single target for R&D. No standardization of equipment.

PERC is a suitable platform for other materials and device features to come into mainstream

Integrate such features into PERC cell process

altermatt@trinasolar.com

B. Min et al, IEEE J-PV 7, 1541 (2017)

35th EU PVSEC 2018 – page 12

図 2 6 . 種々の技術の適用による結晶Si PERC太陽電池の高効率化の可能性に関するシミュレーション結果 (Dr. P.P. Altermatt提供、B. Min et al., IEEE J-PV, 7, 1541 (2017))

5. 4 non-Si 薄膜太陽電池分野 :

(1) M. Edolf (Uppsala Univ.) は、“Research and innovation in CIGS and its alloys –Which are the next bottlenecks?”と題して、基調講演を行った。表 2 に、ソーラーフロンティアを含む高効率 CIGS 太陽電池の特性を示す。モジュール効率も、ソーラーフロンティアの面積 841cm² で、効率 19.2%、Avancis の 30cmx30cm で、効率 19.0%、Niesole の面積 1.085cm² で、効率 17.4% の状況である。

表 2 CIGS 太陽電池効率の状況

	ソーラーフロンティア	Solibro	ZSW	EMPA
Voc (mV)	734	739	741	734
Jsc (mA/cm ²)	41.3	37.0	37.8	36.7
FF (%)	80.4	79.6	90.6	77.2
η (%)	23.35	22.9	22.6	20.9

CIGS 太陽電池の高効率化に向け、損失メカニズム、界面再結合、バンドオフセット、TCO やバッファ層の光吸収、CIGS 吸収層の粒界等のバルク再結合、裏面コンタクト等に関する研究開発の概要がまとめられた。CIGS 光吸収層の Post Deposition Treatment (PDT) が検討されている。PDT なしに比べて、Na や KF の PDT により V_{oc} 向上がはかられている。さらに、RbF や CsF の PDT で、性能向上の効果があることが見出されている。例えば、PDT なし、KF-PDT、Rb-PDT、CsF-PDT で、各々、効率が、17.7%、18.6%、19.1%、19.0%と報告されている。PDT により、光吸収特性の Urbach energy の現象がわかっており、PDT による欠陥低減が、一つの効果であろう。RbF-PDT、薄い溶液成長 CdS 層およびスパッタ (Zn,Mg)O 層の適用により、ZSW が、効率 22.6%を達成している。粒界の再結合速度は、 $10^3 \sim 10^4$ cm/s であり、GaAs 基板上の格子整合単結晶 CIGS 太陽電池も検討されているが、転位が効いているらしく、効率は 20%程度である。CIGS 光吸収層の表面、裏面パッシベーションも検討されている。デバイスモデリングによれば、裏面反射による light trapping の有効性がわかっている。裏面反射の予備検討により、短絡光電流密度 0.46mA/cm^2 のゲインも得られている。In の資源量に関しても、言及されていたが、年産 70GW は、大丈夫との事である。

(2) S. Albrecht ら (HZB) は、“Towards highly efficient monolithic tandem sdevices with perovskites”と題して、プレーナリ講演を行った。2 端子ペロブスカイト/Si、ペロブスカイト/CIGS、ペロブスカイト/ペロブスカイト 2 接合タンデム太陽電池で、効率は、各々、28%、24%、23.5%の状況である。HZB では、図 2 7 に示すように、LiF/IZO/SnO₂/C60/perovskite //PTAA/ITO/Si-HJ 構造の 2 接合タンデム太陽電池 (1.03cm^2) で、効率 27.4%を得ている。バンドギャップの最適化 1.66~1.69eV、反射損の低減がはかられている。図 2 8 に示すように、HZB におけるペロブスカイト/ペロブスカイト、ペロブスカイト/CIGS 2 接合タンデム太陽電池の効率は、各々、23.3%、23.26%の状況である。タンデム太陽電池のモジュール効率として、2030 年、30%、2050 年、35%を目指すとしている。

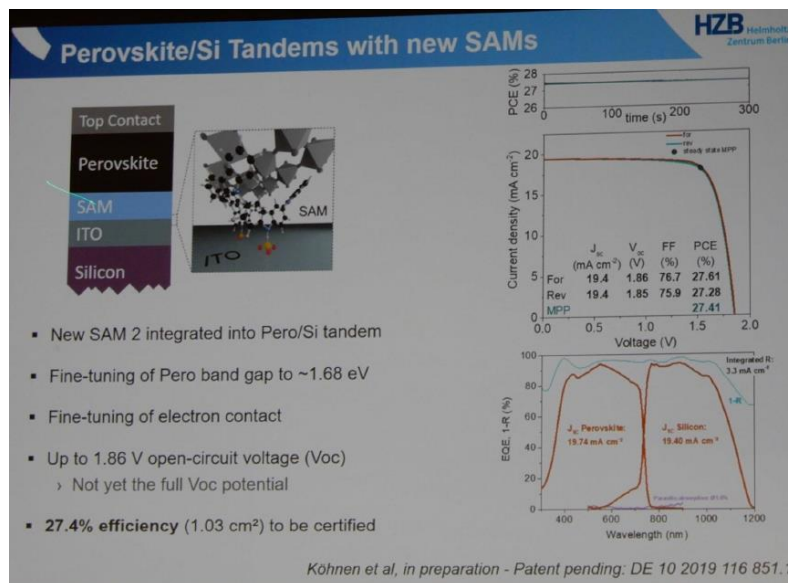


図 2 7. ペロブスカイト/Si 2 接合タンデム太陽電池の構造と特性 (中上明光氏提供)

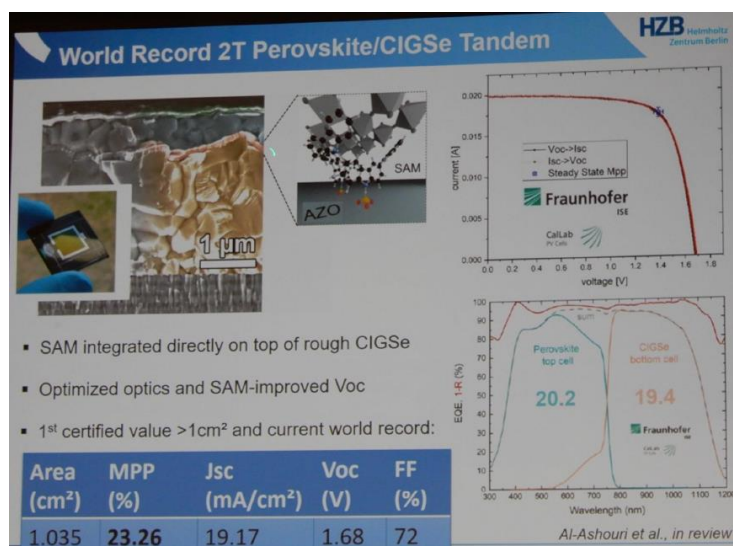


図 2 8 . ペロブスカイト/CIGSe 2 接合タンデム太陽電池の構造と特性 (中上明光氏提供)

5. 5 高効率III-V多接合、集光型および宇宙用太陽電池分野 :

(1) R. van Leest ら (Azur Space1、FhG-ISE) は、“Recent progress of solar development for CPV applications at AZUR Space”と題して、プレーナリ講演を行った。同社の宇宙用 InGaP/InGaAs/Ge 3 接合セルは、BOL 効率 29.5 %、EOL 効率 26.5 %、AlInGaP/AlGaAs/InGaAs/Ge 4 接合セルは、BOL 効率 31.8%、EOL 効率 28.8%の状況である。AlInGaP (1.95eV) /InGaP (1.65eV) /AlGaAs (1.40eV) /InGaAs (1.15eV) /Ge (0.67eV) 5 接合セルも検討され、765 倍集光で、42.8%が得られている。

CPV Installations

Triple-Junction Cells and Silicone on Glass Lenses



Photo sources: companies

6

© Fraunhofer ISE
FHG-5K-ISE-PUBLIC

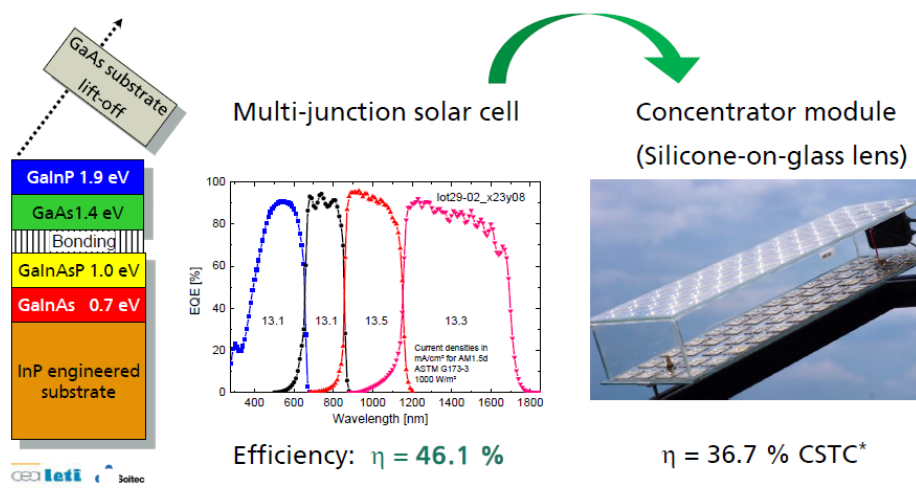


図 2 9 . CPV システムの設置例 (Dr. G. Siefer 提供)

前回の 35th EU-PVSEC での G. Siefer ら (FhG-ISE) によるプレナリ講演“Final Results of CPVMatch - Concentrating Photovoltaic Modules Using Advanced Technologies and Cells for Highest Efficiencies”がまとまっているので、紹介する。図 29 に、集光太陽光発電 (CPV) システムの設置例を示す。これまで、400MW の CPV システムが設置されている。結晶 Si 太陽電池は、効率 26.7% で、Auger Limit の 29.4% に近づいている。CPV セルは、効率 46% の状態で、CPV は、最高効率のセル、モジュール、システムである。また、追尾架台上の設置は、土地の二重利用を可能としている。

講演では、CPV に関する共同研究開発プロジェクトの状況が報告された。EU の Horizon 2020 の支援で、2015 年 5 月に開始し、3 年のプロジェクトである。予算は、4.95 M ユーロである。集光太陽光発電モジュールを開発し、高度な技術開発と最高効率の実現を目指す。コンソーシアムは、フラウンホーファー ISE、RSE、CEA、Tecnalia の 4 つの研究機関、1 大学 (UPM)、2 つの企業 (AZUR (宇宙太陽光発電)、AIXTRON と 2 つの中小企業 (ASSE Cycleco) で、構成されている。

From the Laboratory to the real Sun Highest efficient CPV Modules



* Concentrator Standard Testing Conditions, 1000 W/m², 25 °C_{cell}

15

© Fraunhofer ISE
FHG-SIK-ISE-PUBLIC

F. Dimroth et al. IEEE JPV, 2016. 6(1)
M. Steiner et al. Prog. Photovolt., 2014. 23(10)



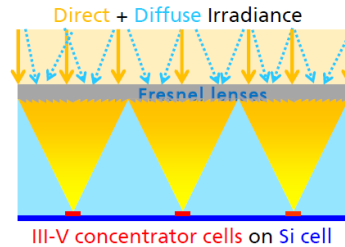
図 30. CPV 共同研究プロジェクトの CPV セルおよびモジュールの成果 (Dr. G. Siefer 提供)

図 30 に、CPV 共同研究プロジェクトの CPV セルおよびモジュールの成果を示す。ウェハボンディング GaInP(1.9eV)/GaAs(1.4eV)//GaInAsP(1.0eV)/GaInAs(0.7eV) の CPV セルの約 300 倍集光で、効率 46.1%、CPV モジュールで、効率 36.7% が実現している。図 31 に、Si セル上の III-V 多接合セルのハイブリッド集光セルモジュールを示す。これは、III-V 族多接合セルは、直達光を利用するのに加えて、結晶 Si セルが、拡散光と散乱光を利用し、出力増加を狙っている。図 32 に、Si セル上の III-V 多接合セルのハイブリッド集光セルモジュールによる出力増大効果を示す。III-V 多接合セルは、直達光 587W/cm² で、効率 38.9%、

結晶 Si セルは、拡散光 $63\text{W}/\text{cm}^2$ で、効率 17.4% 、合わせて、効率 36.8% が実現している

Outlook beyond CPVMatch CPV Modules capturing diffuse Sunlight - EyeCon Module

- Multi-junction solar cell utilizes direct radiation
- Silicon solar cell utilizes diffuse, scattered radiation + works as heat spreader
- Increase of power output of the module



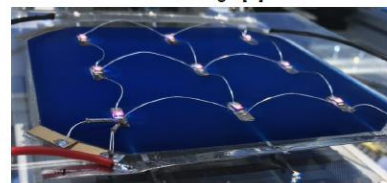
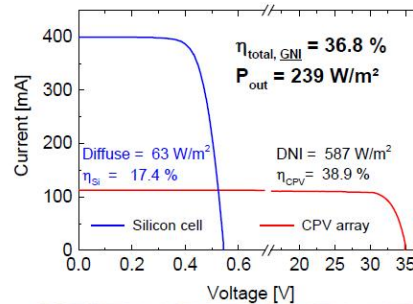
31 Yamada N, Okamoto K. Optics Express 2014
© Fraunhofer ISE J.F. Martinez, AIP Conference Proceedings 2012, 090005 (2018)



図 3 1 . Siセル上のIII-V多接合セルのハイブリッド集光セルモジュール (Dr. G. Siefer提供)

Outlook beyond CPVMatch CPV Modules capturing diffuse Sunlight - EyeCon Module

- Multi-junction solar cell utilizes direct radiation
- Silicon solar cell utilizes diffuse, scattered radiation + works as heat spreader
- Increase of power output of the module
- Combined efficiency rated to global normal irradiance: **36.8 %**



33 © Fraunhofer ISE J.F. Martinez, AIP Conference Proceedings 2012, 090005 (2018)



図 3 2 . Siセル上のIII-V多接合セルのハイブリッド集光セルモジュールによる出力増大 (Dr. G. Siefer提供)

(2) A.J. Ptakら (NREL) は、“Status and recent results from the development of dynamic hydride vapor phase epitaxy toward low-cost, high-efficiency III-V solar cells” と題して、ハイドライド気相エピタキシー (H-VPE) による高速成膜、GaAsおよびGaInP単接合、GaInP/GaAs 2 接合タンデム太陽電池の状況を報告した。

Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE)

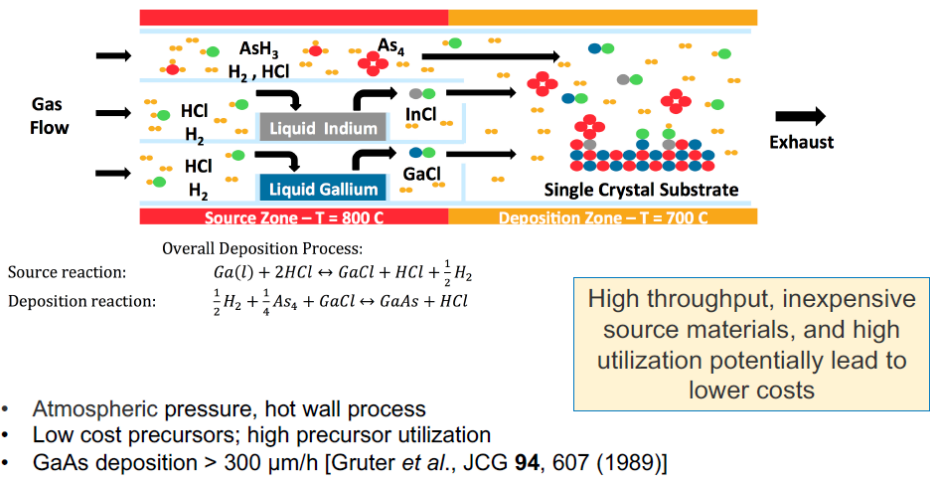


図 3 3 . ハイドライド気相エピタキシー (H-VPE) と特長 (Dr. A.J. Ptak提供)

図 3 3 に、H-VPEと特長を示す。低コストプリカーサー使用とプリカーサーの高利用効率、高スループットと高速成膜が期待できる。GaAsを例にとると、300 $\mu\text{m/hr}$ 以上が可能である。

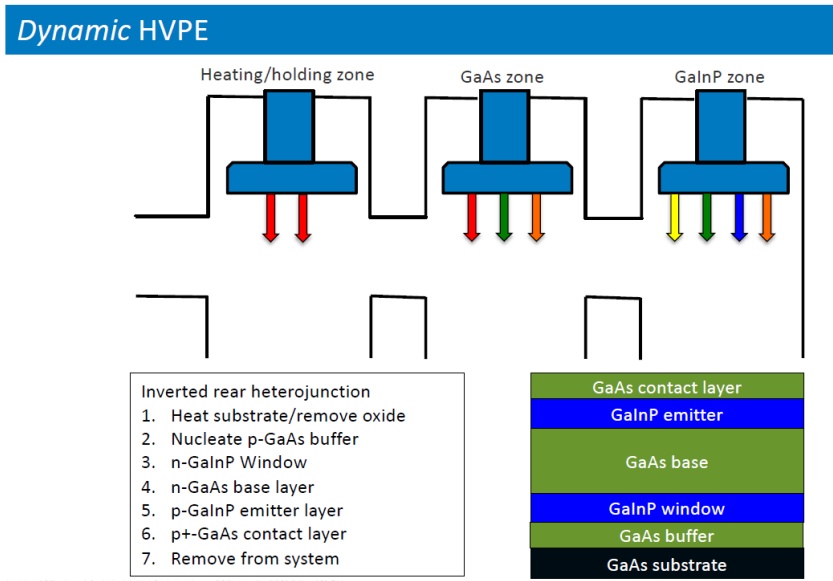


図 3 4 . Dynamic H-VPEによる逆構造ヘテロ接合形成のフロー (Dr. A.J. Ptak提供)

H-VPE による高速成膜と高効率太陽電池実現のための急峻な界面形成に向け、Dynamic H-VPE (D-HVPE) が、提案されている。図 2 8 は、Dynamic H-VPE による逆構造ヘテロ接合形成のフローを示す。図 2 9、図 3 0、図 3 1 は、D-HVPE 成長 GaAs 単接合セル、GaInP 単接合セルおよび GaInP/GaAs 2 接合タンデム太陽電池の特性を示す。効率は、各々、25.31%、15.02%、23.7%の状況である。通常の MOCVD 成長 GaAs 単接合セル、GaInP 単接合セル、GaInP/GaAs 2 接合タンデムセルのトップデータは、効率、各々、29.1%、21.4%、32.8%であり、H-VPE 成長による太陽電池特性は劣り、特に、H-VPE 成長 GaInP 太陽電池は、MOCVD 成長のものに比べて、電圧損失が、0.14V 大きく、さらなる改善が必要である。また、図 3

2に示すように、HVPEによるIII-V2接合太陽電池の低コスト化のシナリオが示された。
\$0.78/Wの低コスト化が期待される。

D-HVPE-grown GaAs solar cells exceeding 25% efficiency

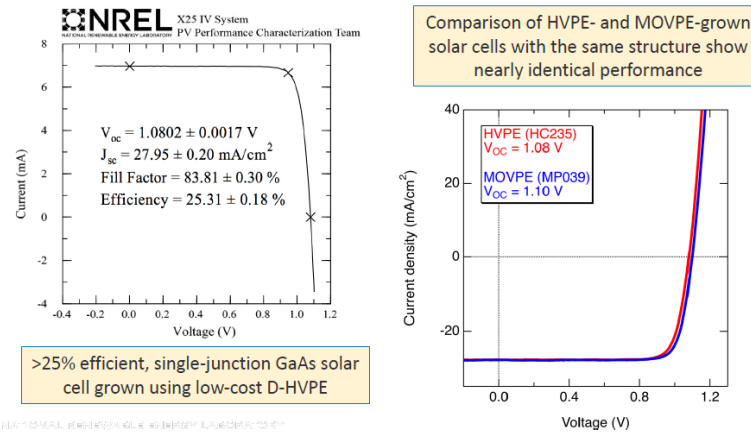


図 3 5 . D-HVPE により成長された GaAs 太陽電池の特性 (Dr. A.J. Ptak 提供)

Tandem Component Development

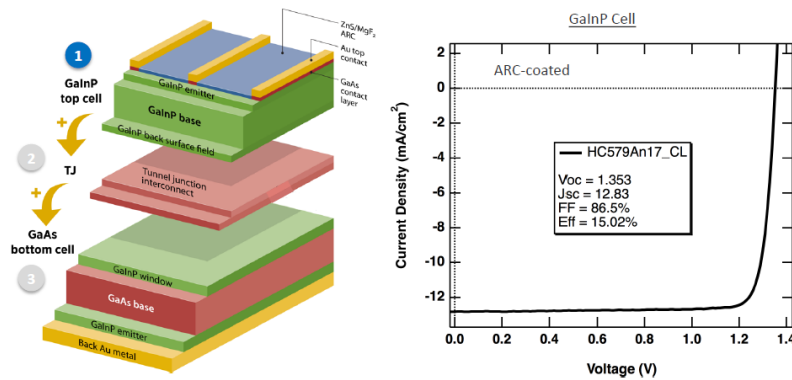


図 3 6 . D-HVPE により成長された GaInP 太陽電池の特性 (Dr. A.J. Ptak 提供)

World's first HVPE-grown multijunction devices!

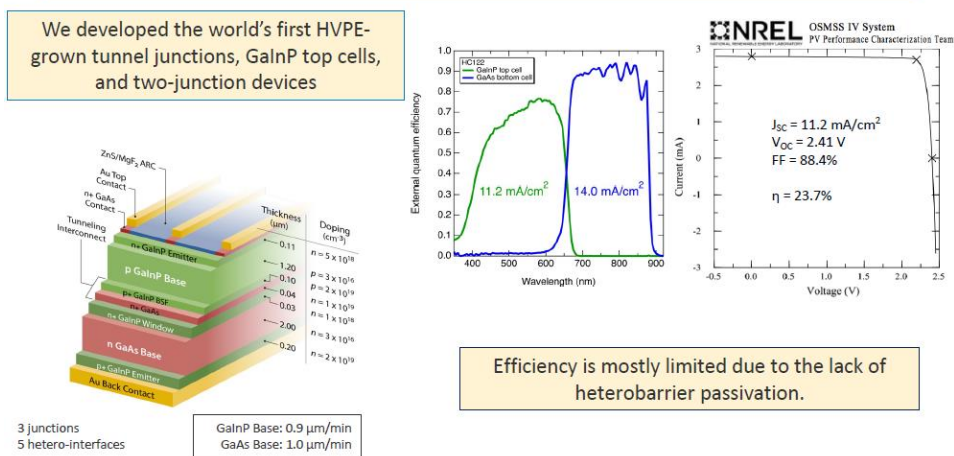


図 3 7 . D-HVPE により成長された GaInP/GaAs 2 接合タンデム太陽電池の特性 (Dr. A.J. Ptak 提供)

Putting it all together: Roadmap for a 2J Cell with HVPE

<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72103.pdf>

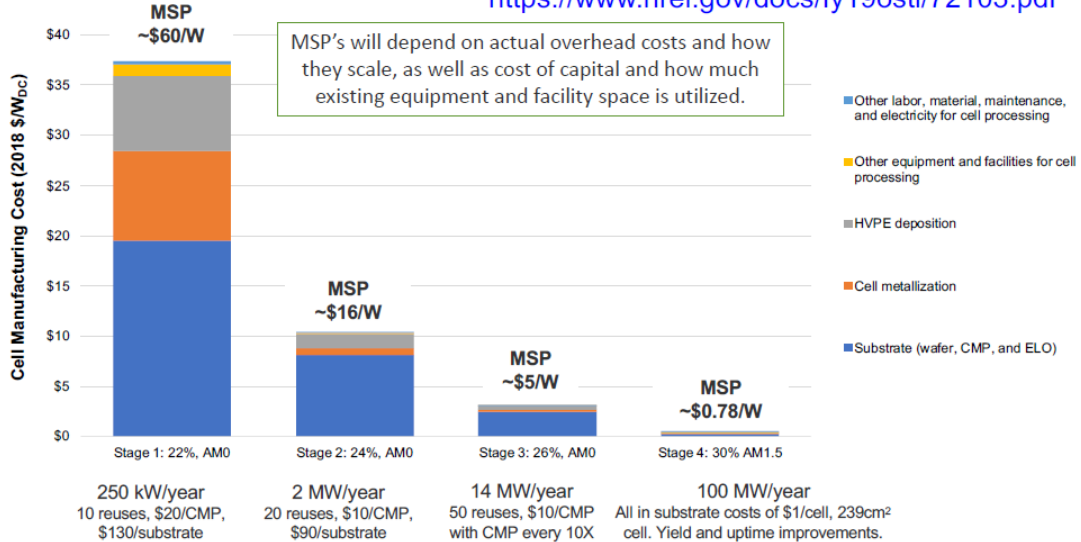


図 3 8 . HVPE による III-V 2 接合太陽電池の低コスト化のシナリオ (Dr. A.J. Ptak 提供)

5. 6 PV モジュール、BOS コンポーネント分野:

(1) M. VanIseghem (EDF R&D) は、“An overview of module reliability”と題して、基調講演を行った。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。

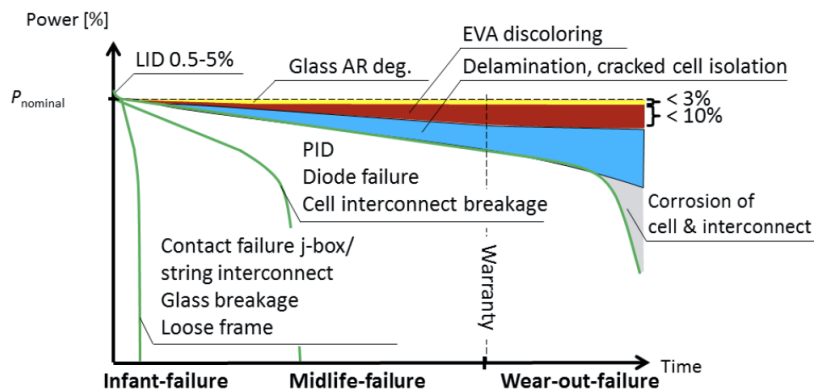


Fig. 3.1: Three typical failure scenarios for wafer-based crystalline photovoltaic modules are shown. Definition of the used abbreviations: LID – light-induced degradation, PID – potential induced degradation, EVA – ethylene vinyl acetate, j-box – junction box.

図 3 9 . PV モジュールの典型的経年劣化モード (IEA/PVPS-Task13 Report)

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。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 3 9 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 4 0 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、⑤Potential Induced Degradation (PID)、⑥catastrophic 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。

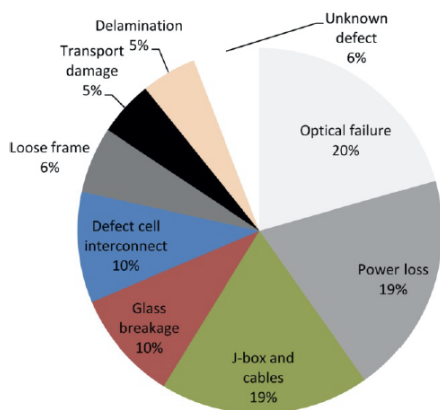


Fig. 3.2: Failure rates due to customer complaints in the first two years after delivery. The rate is given relative to the total number of failures. The PV modules are delivered by a German distributor in the years 2006-2010 [redrawn from Richter11]. The statistic is based on a total volume of approximately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

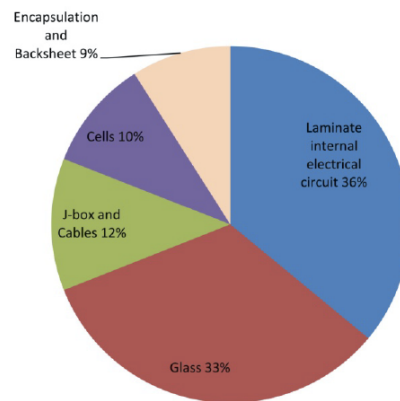


Fig. 3.3: Field study of PV module failures found for various PV modules of 21 manufactures installed in the field for 8 years [redrawn from DeGraaff11]. The rate is given relative to the total number of failures. Approximately 2% of the entire fleet are predicted to fail after 11-12 years (do not meet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

図 4 0 . PVモジュールの要因別劣化率 (IEA/PVPS-Task13 Report)

(2) J.F. Martinez-Sanchezら (FhG-ISE) は、“Development and outdoor characterization of a hybrid bifacial HCPV module”と題して、プリーナリ講演を行った。5. 5の(1)図31、図32を参照されたい。

5. 7 PVシステム、性能、応用、インテグレーション分野：

(1)用途開発が、今回の会議の新しい潮流であることが、H.A. Aulich (Sustainable Concepts)によるプリーナリ講演“Solar electricity and safe drinking water: global opportunities and challenges”で、指摘されている。今回、車載、BIPV やソーラーシェアリングなどの発表があ

った。

(2) T. Masuda (トヨタ、豊田工大、シャープ、NEDO) は、“Some approaches of PV-powered vehicles applications”と題して、車載用太陽電池、モジュールに関する取り組みが報告された。図4-1に示すように、輸送分野でもCO₂削減が必須で、2030年までは、ガソリンカーは、ゼロになると予想される。しかし、HVやEVも、CO₂削減の点は、不十分で、太陽光発電等再生可能エネルギーの導入が必要である。

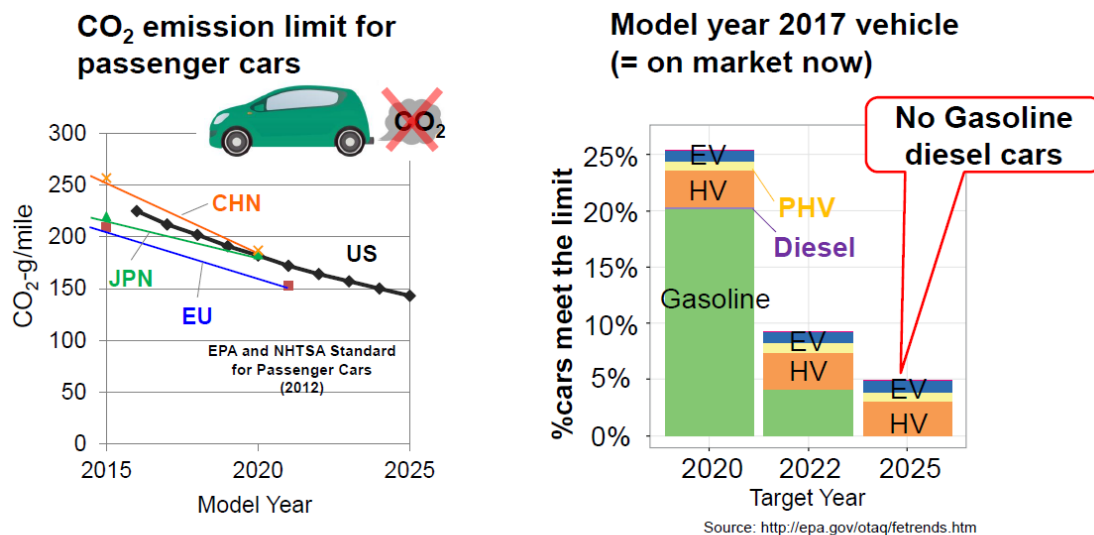
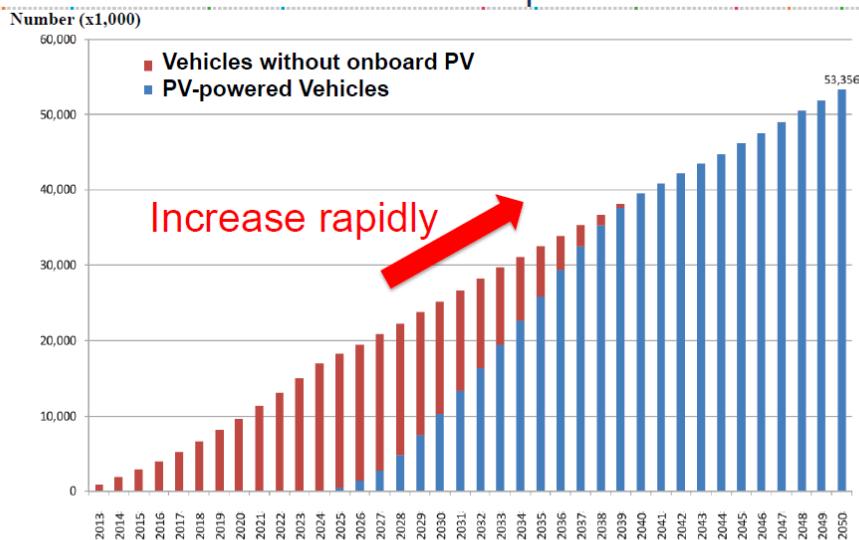


図4-1. 輸送分野におけるCO₂削減の動向と太陽電池搭載等クリーンな次世代自動車の開発の必要性 (Dr. T. Masuda 講演資料)

Prediction of a number of PV-powered vehicles



NEDO's Interim Report "PV-Powered Vehicle Strategy Committee" released on Jan. 31st 2018.

https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100358.html

図4-2. NEDO「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」による太陽電池搭載自動車の導入予測 (Dr. T. Masuda 講演資料)

Solar module for automotive applications

Required area/eff. for installing 800 W modules.

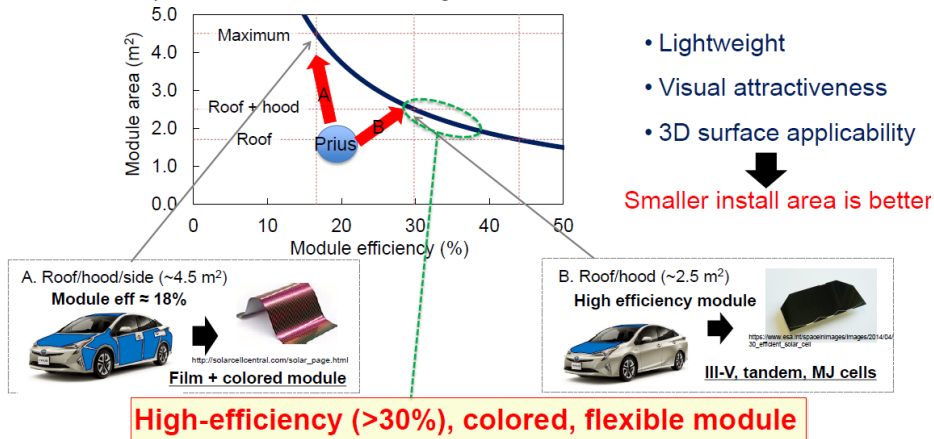
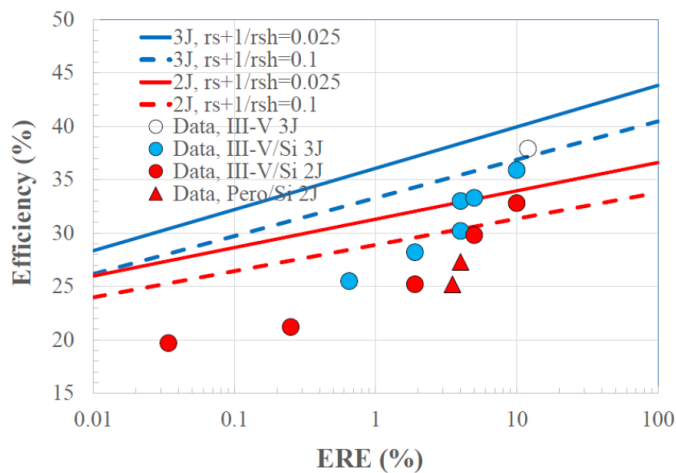


図 4 3 . 効率 30% 以上の車載用高効率太陽電池モジュールの必要性 (Dr. T. Masuda 講演資料)

表 3 .

Status of practical phase PV-powered vehicles

Auto company	Module	Output power	Driving range	Sales start year
TOYOTA	Si (HIT)	180 W	~6.1 km/day	2017
HYUNDAI	Si	NA	NA	NA
LIGHTYEAR	Si (IBC)	1000 W	~50 km/day	2021
SONO MOTORS	Si (IBC)	1204 W	~34 km/day	2020
Hanergy	GaAs	NA	NA	NA



Potential of Si 2-junction and 3-junction tandem solar cells

(M. Yamaguchi et al., J. Phys. D. 51, 133002 (2018).)


図 4 4 . Si タンデム太陽電池の現状と高効率化の可能性 (M. Yamaguchi et al., J. Phys. D. 51, 133002 (2018). updated)

図 4 2 は、NEDO「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」による太陽電池搭載自動車の導入予測を示す。再生可能エネルギーのうち、太陽光発電が、有望と考えられ、2050 年には、約 50GW、累積約 1TW の市場形成が、期待される。わが国の乗用車の一日あたりの平均走行距離は、約 24 km である。乗用車の屋根やボンネットの面積は、狭く、30km/日以上以上の走行距離を実現するには、30%以上の効率太陽電池モジュールの開発が要求される。図 4 3 は、効率 30%以上の車載用高効率太陽電池モジュールの必要性を示す。表 3 に示すように、太陽電池搭載自動車の開発動向が紹介されている。現状では、車載用太陽電池として、高効率結晶 Si 太陽電池モジュールが用いられているが、効率 25%が、限界と考えられる。図 4 3 に示すように、豊田工大では、車載用太陽電池モジュールの効率ターゲットは 30%としている。現状では、集光と III-V 族化合物タンデム太陽電池モジュールのみが、性能要求条件を満たしている。さらなる研究開発が必要である。今後の重要な技術開発の一つとして、Si タンデム太陽電池がある。図 4 4 に示すように、2 接合および 3 接合 Si タンデム太陽電池で、各々 36%、42%以上の高効率化が可能であるが、InGaP/GaAs/Si 3 接合タンデム太陽電池、ペロブスカイト/Si 2 接合タンデム太陽電池で、効率、各々、35.9%、28.0%の現状である。


PV-powered car for “Public Road Test”

12 / 19

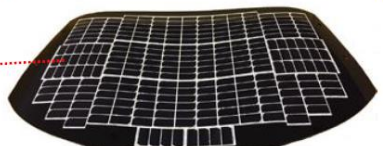
Collaboration with Sharp and NEDO



Prius PHV



InGaP/GaAs/InGaAs 3-junction (Sharp)



Module	InGaP/GaAs/InGaAs
Cell Efficiency	34%
Module output	860 W
Module area	3 m ² (roof, hood, hatch)
Driving range	~ 44 km/day

<https://global.toyota/en/newsroom/corporate/28787347.html>

Stated public road test to show effectiveness

図 4 5 . 実証試験用 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV
(Dr. T. Masuda 講演資料)

図 4 5 に示すように、実証試験用シャープ成長 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV と特性も紹介された。講演では、III-V/Si タンデム、3 接合太陽電池の静的低倍集光モジュール、III-V/Si ハイブリッド部分集光太陽電池モジュールおよび色彩制御の研究成果も報告された。

(2) サイドイベントとして、“Solar Mobility Forum”も開催された。A. van der Ham (Lightyear) は、同社の太陽電池搭載自動車の状況を報告した。同社は、Solar Team “Eindhoven” のメンバーにより、2016 年に設立され、前身を含め、2013 年、2015 年、2017 年と、World Solar

Challenge に優勝している。図 4 6 に示すように、効率 20%以上のバックコンタクト結晶 Si 太陽電池を搭載した自動車を開発中である。車体の軽量化、バッテリー容量の最適化、太陽電池搭載面積の拡大 (5 m²) 等により、年 11,000~20,000km の走行も可能との事である。予想売り出し価格は、149,000~170,000 ユーロと、高級車指向である。



図 4 6 . 結晶 Si 太陽電池搭載自動車 (Lightyear 社ホームページ)

5. 8 PV 経済、市場、政策等分野：

M.A. Green (UNSW) は、“PV technologies: How might these evolve?”と題して、太陽電池技術の今後の方向性に関して、プレーナリ講演を行った。図 4 7 は、再生可能エネルギー導入の現状 (2015 年) と 2050 年の導入予測を示す。2015 年の再生可能エネルギー導入は、22%で、Solar PV は 1%に過ぎない。2050 年の再生可能エネルギー 100%シナリオにおいて、Solar PV は、69%を占め、主力となるだろう。2050 年の再生可能エネルギー 100%の実現に向け、さらなる技術開発が、必要である。2018 年の PV の累積導入量も 506GW で、モジュール価格も \$ 0.3/W 以下になっている。

Electricity Generation in 2015 and 2050

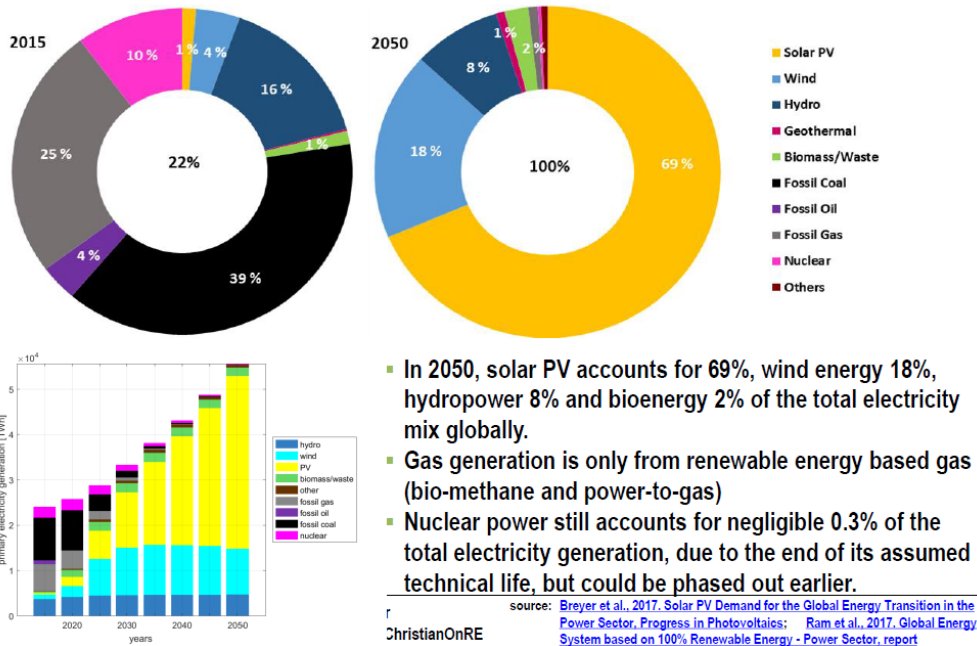


図 4.7. 再生可能エネルギー導入の現状（2015年）と2050年の導入予測（Prof. C. Breyer 提供）

Trend: market share of cell concepts

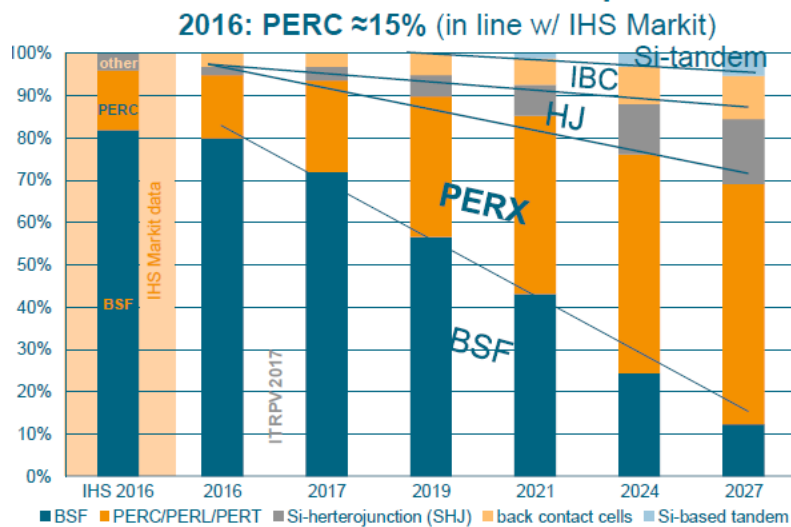


図 4.8. 結晶 Si 太陽電池の市場シェアの変遷と予測（ITRPV 2018、[ITRPV Ninth Edition 2018 including maturity report 20180904.pdf](#)）

太陽電池としては、今後も、結晶 Si 系が主力であろう。図 4.8 に示す ITRPV (International Technology Road for Photovoltaic) ロードマップマップによれば、今後、PERC セルの市場浸透が進むだろう。次の 10 年以降は、Si タンデムに期待が高まろう。Si タンデムセルは、効率 40% 超えの効率化が期待できる。2 端子構造で、InGaP/GaAs/Si 3 接合タンデムセルで、効率 33.3%、ペロブスカイト/Si 2 接合タンデムセルで、効率 28.0% の現状である。図 4.9

に示すように、各種太陽電池の効率のバンドギャップ E_g 依存性に言及した後、トップセル材料として、種々の材料が適用の可能性がある。表4に示すように、III-V、II-VI、I-III-VI₂、I₂-II-IV-VI₄、II-IV-V₂など、ハイドライド、カルコパイライト、ケステライト系があり、高ギャップ CZTS や NZTS に関心があるとのことである。今後 15 年以降は、3 接合タンデムから 4 接合タンデムになろうとまとめた。

What comes after PERC?

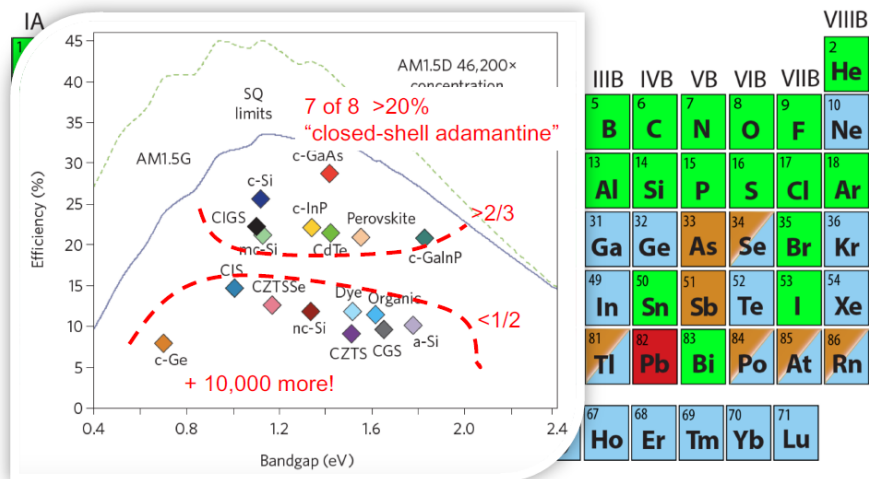


図 4.9. 各種太陽電池効率とバンドギャップの関係、トップセル材料の可能性 (Prof. M.A. Green 提供)

表 4. Si タンデム太陽電池のトップセル、ミドルセルの候補材料(Prof. M.A. Green 提供)

What comes after PERC?

Table 1: Families of Potential Closed-Shell Adamantine Semiconductors

	BINARY	TERNARY	QUATERNARY	QUINTERNARY		
IA 1 H 3 Li 11 Na 19 K 37 Rb 55 Cs	I-VII	(I ₂ -VII ₂)	0-II-VII ₂		VIIIB 2 He 10 Ne 18 Ar 36 Kr 54 Xe 86 Rn	
		(I ₃ -VII ₃)*	(0 ₂ -III-VII ₃)	(0-I-II-VII ₃)		Halides
	II-VI	(I ₄ -VII ₄)	0 ₂ -IV-VII ₄	0-I ₂ -II-VII ₄		
				0 ₂ -I-III-VII ₄		
IV	II-VI	(II ₂ -VI ₂)	0-IV-VI ₂		Chalcogenides	
			I-III-VI ₂			
	(II ₃ -VI ₃)*	(0-III ₂ -VI ₃)	(0-I-V-VI ₃)			
		(I ₂ -IV-VI ₃)	(0-II-IV-VI ₃)			
	(II ₄ -VI ₄)	I ₃ -V-VI ₄	0-II-III ₂ -VI ₄	0-I-II-V-VI ₄		
			0-II ₂ -IV-VI ₄	0-I-III-IV-VI ₄		
	III-V	(III ₂ -V ₂)	II-IV-V ₂			Pnictides
		(III ₃ -V ₃)*	(I-IV ₂ -V ₃)	(II-III-IV-V ₃)		
(III ₄ -V ₄)	0-IV ₂ -V ₄	I-III-IV ₂ -V ₄				
		II-III ₂ -IV-V ₄				
IV-IV						

*Anions surrounded by different cation combinations



6. 感想：

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。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必要がある。世界的に、Siタンデム太陽電池が、今後の研究開発のメインテーマの一つとなろう。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。総じて、太陽光発電は、電力、エネルギーの主力になるのは、間違いなく、将来のクリーンエネルギー創製に向けた、展開が必要と思う。今後の技術開発テーマとしては、Siタンデム、BIPVや車載、リサイクル等の展開が、重要であろう。太陽光発電の市場拡大、新たな市場開拓、さらには、太陽光発電等の利用による将来のクリーンエネルギー社会の構築のためには、研究開発の加速が必要であると考えられる。

次回の37th EU-PVSECは、2020年9月7日～11日、ポルトガルのリスボンで開催予定である。PVSEC-29は、2019年11月4日～8日、中国の西安で開催予定である。また、47th IEEE PVSCは、2020年6月16日～21日、カナダのカルガリーで開催予定である。

(以上)