第 37 回太陽光発電欧州会議(37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition)報告

2020.9.14 山口真史(豊田工大)

1. **開催月日**: 2020年9月7日~9月11日。

2. 開催場所: Virtual Conference

3. 本会議の概要:

新型コロナの影響で、Virtual Conference となった。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、Nicola Pearsall
(Northumbria Univ.)で、論文委員長は Robert Kenny (EC-JRC)であった。今年は、約1,500名の参加登録との事である。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。57カ国から、891件の論文発表があった。当初のプロ グラムでは、1,082件の論文発表が予定されていたので、約190件のキャンセルがあったも のと思われる。国別では、①ドイツ213件、②フランス73件、③スイス53件、④オランダ49 件、⑤イタリア43件、⑤スペイン43件、⑦米国40件、⑧日本26件、⑨中国25件、⑩ベルギ -23件、⑪韓国19件、⑪モロッコ11件、の順であった。



図1. 国別発表論文件数

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179件、②薄膜系(ペロブスカイト、非Si系、多接合太陽電池)176件、③太陽電池モジュール、BOSコンポーネント173件、④PVシステムと蓄電、モデリング、設計、運営、性能157件、⑤PVシステム応用、系統連携98件、⑥新材料、新概念66件、⑦太陽光発電の資金調達、市場、政策42件、の順であった。



図2. 発表論文件数の分野別内訳

Becquerel Prizeは、Henry J. Snaith (Univ. Oxford) が受賞した。ペロブスカイト太陽電池の研究開発に関する貢献が認められたものである。ペロブスカイト太陽電池は、T. Miyasaka (横浜桐蔭大)のグループ2009年のProf. Miyasakaグループの効率3.8%から、24.2%へと高効率化が進んでいる。T. Miyasakaも、今回の受賞者Prof. SnaithやProf. Graetzelのグループとの共同研究を行った経緯がある。この分野では、N-G. Park (Sungkyunkwan Univ.)グループの貢献も大きい。2012年の固体デバイス化、TiO2層厚の低減、などであり、効率6.5%から22.6%の高効率化に貢献している。受賞記念講演では、1892年のペロブスカイトから2009年の太陽電池、研究開発進展が述べられた。

また、Oxford PVは、Prof. H. Snaith が、2011年に、Oxford大からスピンオフし て、設立された。ペロブスカイト/Siタン デム太陽電池に注力している。10cm角ペ ロブスカイト/Si2接合太陽電池モジュ ールも試作されている。2 接合、3 接合タ ンデム太陽電池で、各々、32~34%、37~ 39%の高効率が期待できる。これまで、1 cm²セルで、効率28% (Voc=1.809V、 Jsc=20.37mA/cm2、FF=76%)を実現してい る。Siボトムセルして、ヘテロ接合や TopCONセルが検討されている。1.6eVのペ ロブスカイト単接合太陽電池で、 Voc=1.32Vも可能で、Jsc、Voc、FFを、各々、 1mA/cm2、150mV、5%改善することにより、 効率33%が可能としている。3接合タン デムセルにより、効率33%から37%、39% を目指すとしている。図3に示すように、 2015年から、10cm角、30角モジュールも試 作されている。2016年には、ドイツのブラ

ンデンブルグに、モジュールのパイロッ トライン (17.000 m²)の工場が建てられ ている。2021年中に、100MW以上の生産を 計画中であり、タンデムセル効率23%の 360Wモジュール生産を目指しているとの 事である。



図3. ペロブスカイト/Si2接合太陽電 池モジュール (Prof. T. Miyasaka提 供)

4. 主な発表論文の概要:

4. 1 Opening Session

(1)組織委員長のNicola Pearsall (Emerita Professor、Northumbria Univ.)の挨拶があった。若い人達へのメッセージが述べられた。研究キャリアを太陽光発電で過ごしてきた。 EU PVSECは、彼女の若い研究員時代から財産となっている。 博士号を取得した時、すで に太陽エネルギーに興味を持っていたが、研究が持続することに気付かなかった。太陽電 池作りから、PV システムのモニタリングや分析、PV デバイスの製造や環境への影響の研究 など、PV 研究の多くの分野で働いてきた。 毎年楽しみにしている EU PVSEC には 2 つの重 要な側面がある。まず、会期中にカバーされるトピックの範囲は、様々な分野での overview を知る良い機会である。第二に、専門家や研究者との情報や意見交換を通じて、友人や同 僚に追いつき、将来に向けて新しい道を作る良い機会である。皆さんが、この機会を利用 して、通常の研究領域外のいくつかのトピックを探求することを奨励する。 それはあなた の研究のための将来の課題と興味を明確にするのに役立つと思う、と述べた。

(2) プログラム委員長の Robert Kenny (EC-JRC) は、プログラムの概要を述べた。Si タンデム などタンデム太陽電池が、トッピクスで、storage とのハイブリット化が、重要な状況となってい る。PV 利用による CO₂排出削減が、必要で、mobility sector への貢献などが、重要な側面となって いる、と述べた。また、閉会式で、本会議のハイライトをまとめた。

(3) Elias De Keyser (Next Kraftwerke、Belgium)は、"Virtual Power Plants for the transition to 100% renewable"と題して、太陽光発電の今後の方向性を述べた。特に、PV の virtual power plant としての考え方は、ユニークなものであった。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そうと、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ろう。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。

4. 2 パネル討論:

Heinz Ossenbrink (Former EC-JRC) がモデレータとなって、"The role of PV in the Green Deal and the EU Recovery Package - Perspectives and chances for a sustainable future?"のテーマで、パネル討論がなされ、活発な質疑がなされた。Walburga Hemetsberger (CEO、SolarPower Europe)、Gunter Erfurt (CEO Meyer Burger)、Marko Topič (Chair of ETIP PV)、Paolo Rossi (Director of AEM SA)が、パネリストで、意見を述べた。

昨年の会議にパネル討論でも、議論されたように、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) Anders Hagfeldt (EPFL) は、"State of the art in perovskite photovoltaics"と題して、 プレーナリ講演を行った。ペロブスカイト太陽電池は、KRICT による効率 25.2%(面積 0.0937cm²、 Voc=1.1805V、Jsc=25.14mA/cm²、FF=0.848)、21.6%(面積 1.025cm²、Voc=1.193V、Jsc=21.64mA/cm²、 FF=0.836)、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 ンデム太陽電池の効率は、各々、HZB による 29.15%(面積 1.06cm²、Voc=1.897V、Jsc=19.75mA/cm²、 FF=0.778)、HZB による 24.2%(面積 1.045cm²、Voc=1.768V、Jsc=19.24mA/cm²、FF=0.729)、Nanjing Univ. による 24.2%(面積 1.041cm²、Voc=1.986V、Jsc=15.93mA/cm²、FF=766)、と高効率化の状況 がレビューされた。EPFL による研究状況も報告された。FAPbI₃で、効率 20.4%、Cs/MA/FA 系で、効 率 23.5%を得ている。特に、Cs 系では、効率 23.5%が得られており、電圧損失が、65mV との事で、 再結合損失が抑えられている。トラップクラスタのパッシベーションが議論されている。また、裏 面反射など、フォトンリサイクリングが効いている可能性もある。

(2) C. Messmer ら (FhG-ISE) は、"The race for the best silicon bottom cell: Efficiency and cost evaluation of perovskite-silicon tandem solar cells"と題して、プレーナリ講演を 行った。結晶 Si 太陽電池の Auger limit は、29.4%であり、タンデム化が、今後の方向性である。 ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池が、検討されている。ボトムセルとして、ヘテロ接合 (SHJ) 太陽電池が検討されているが、他の太陽電池も候補である。技術的フィージビリティ、光学的・電 気的性能、コスト、製造のアップスケーリングの視点が重要である。性能のシミュレーションがな され、ボトムセルとして、PERC セル、TOPCon セル、TOPCon 2 セル、SHJ セルを用いた場合の 2 接合 タンデムセル効率は、各々、29%、30%、30.2%、30.3%と試算されている。ボトムセルコストは、 各々、48.1、48.1、57.3、65.2 ユーロセント/Wと試算されている。

(3) I. Ramiroら(UPM)は、"Intermediate Band Solar Cells: Present and Future"と題し て、中間バンド太陽電池に関するプレーナリ講演を行った。多接合太陽電池やホットキャリア太陽 電池と共に、中間バンド太陽電池が、高効率太陽電池として、期待されている。中間バンド太陽電 池として、量子ドット、深い準位の不純物バンド、ナノ構造混晶、有機分子、などのアプローチが あるが、量子ドット(QD)に関する研究が盛んである。しかし、効率はあがっていない。①非輻射 再結合、②QD 密度が低い、③高価な製法、などが課題である。低コスト化を狙いとして、コロイダ ル QD は、自己組織化ナノ結晶で、低温の化学プロセスによる Pb S-QD に関する試みが、報告され た。

しかし、東大、豊田工大の共同研究の成果として、量子ドット太陽電池の高効率化の限界が報告 されている。本論文(Lin Zhu et al., "Analysis of nonradiative recombination in quantum dot solar cells and materials", Progress in Photovoltaics, **27**, 971 (2019).)の概要を紹介 する。太陽電池特性は、少数キャリア寿命(拡散長)に依存する。放射再結合寿命 τ_{rad} は、次式で 与えられる。

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

ここで、Nは、キャリア濃度、Bは、放射再結合確率で、Si、GaAsでは、各々、2 x 10^{-15} cm³/s、2 x 10^{-10} cm³/s 、である。実効寿命 τ_{eff} は、次式で与えられる。

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

ここで、τ_{nonrad}は、非放射再結合寿命で、次式で表される。

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

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

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

ここで、kは、ボルツマン定数、Tは、絶対温度、qは、電子電荷、J_Lは、光生成電流密度、 J₀は、飽和電流密度である。Vocの改善のためには、飽和電流密度 J₀の低減が必要である。





図5. QD 太陽電池の効率と計算値の外部 発光効率(ERE)依存性(L. Zhu et al., Progress in PV, **27**, 971 (2019)

図4は、量子ドット(QD)および多重量子井戸(MQW)太陽電池のバンドギャップエネル ギーEgに対する開放端電圧損失(Eg/q-Voc)と非放射再結合開放端電圧 Voc (Voc, nrad)の 外部発光効率(ERE)依存性と GaAs 太陽電池との比較を示す。開放端電圧 Voc は、ERE に対 して、次式で表される。

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

依存性(M. Yamaguchi et al, Progress in PV,

26, 543 (2018))

ここで、第二項は、非放射再結合電圧損失であり、放射再結合電圧 Voc, rad は、次式で与えら

れる。

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

ここで、 $J_L(V_{oc,rad})$ は、放射再結合のみの場合の開放端での光生成電流密度で、 $J_{0,rad}$ は、放

射再結合のみの場合の飽和電流密度である。図9の $\Delta V_{oc, rad} = E_g / q - V_{oc, rad}$ の値は、太陽電池

の外部量子効率(EQE)の報告データから、算出された。図4に示すように、MQW やQD太陽電池は、非放射再結合損失が多くあり、少数キャリア寿命改善や各種再結合損失の低減 により、さらなる高効率化が可能であると言える。解析では、開放端電圧損失(Eg/q-Voc) は、外部発光効率(ERE)を尺度として、また、抵抗損失は、曲線因子 FF に組み込んだ。

図5に、QD 太陽電池の効率と計算値の外部発光効率(ERE)依存性を示す。規格化抵抗 (r_s + 1/r_{sh}) < 0.15 において、外部発光効率(ERE)を 0.1%から、10%に改善することによ り、24%、規格化抵抗(r_s + 1/r_{sh}) < 0.05 において、25.8%の高効率化が期待できる。

図6に示す QDの光吸収係数の2ステップ関数モデルを用い、QD太陽電池特性の詳細平 衡モデルに基づく計算がなされ、QDの真性損失である放射再結合損失が評価され、上記外 部発光効率に基づく外因性損失である非放射再結合損失も議論された。



図 6. QDの光吸収係数の2ステップ関数モデ ル (L. Zhu et al., Proc. 44th IEEE PVSC (2017).)



図7.QD太陽電池の短絡電流密度Jscの光吸収 度a₁依存性の計算結果と実験値の比較(L. Zhu et al., Progress in PV, **27**, 971 (2019))

図7に示すように、予想(A. Luque and A. Marti, Phys. Rev. Lett., **78**, 5014 (1997)) 通り、QD 太陽電池の短絡電流密度 Jsc は、光吸収度 a₁の (QD の結合エネルギーEb、量子 ドット密度) 増加と共に、増加している。

しかし、図8に示すように、QD太陽電池の開放端電圧 Voc のトータルの損失は、光吸収 度 a1(QDの結合エネルギーEb、量子ドット密度)の増加と共に、増加し、特に、真性損失 (放射再結合損失)よりも外因性損失(非放射再結合損失)が、大きくなっており、高効 率化の大きな壁となっている。結果、図9に示すように、QD太陽電池の変換効率は、光吸 収度 a1(QDの結合エネルギーEb、量子ドット密度)の増加と共に、減少することとなる。 事実、QDの結合エネルギーEb=0.1eV、光吸収度 a1=0.05の薄い量子ドット密度の QD 太 陽電池で、効率 18.3% が得られている。



図8.QD太陽電池の開放端電圧Vocの真性およ び外因性損失の光吸収度a₁依存性の計算結果 と実験値の比較(L. Zhu et al., Progress in PV, **27**, 971 (2019)



図 9.QD太陽電池の変換効率の光吸収度a₁依存 性の計算結果と実験値の比較(L. Zhu et al., Progress in PV, **27**, 971 (2019)

QD 太陽電池の課題は、QD の形成に、格子不整合効果を用いていることであり、高効率化のためには、格子不整合に伴う非放射再結合損失を低減する必要がある。非放射再結合率 Rnr は、次式で近似できる。

 $R_{nr} = \alpha$ ($\Delta a/a_0$) N/h、(7) ここで、 α は、材料依存の係数、($\Delta a/a_0$)は、格子不整合率、N は、QD の層数、h は、 層厚、である。



図10. QD太陽電池の外部発光効率 (ERE) の非放射再結合率 r_{nr} 依存性 (L. Zhu et al., Progress in PV, **27**, 971 (2019)

図10は、量子ドット太陽電池の外部発光効率(ERE)の(7)式の $\alpha = 1$ とした場合の r_{nr} (= α ($\Delta a/a_0$) N/h)依存性を示す。格子不整合に伴う非放射再結合損失の増加と共に、ERE は、低下

し、高効率化の壁となっている。図10に示すように、SBL(歪補償層)技術などにより、非放射再 結合損失を低減する必要がある。

(4) D. Baran (KAUST) は、"High Performance Organic Photovoltaics"と題して、有機太陽電 池に関するプレーナリ講演を行った。A. Distler ら (ZAE Bayern) による"New World Record Efficiency for Organic Photovoltaic Modules"と共に、本会議のハイライトであった。図11に、 有機太陽電池の効率向上の推移を示す。2006 年頃は、効率 5%程度で、11~12%が、有機太陽電池の 効率限界と考えられていた。その後、フラーレンや、活性層材料の LUMO-HOMO 制御による電荷発生や 収集などの改善、非輻射再結合損失の低減がはかられ、効率向上につながっている。図12に、未公 認ではあるが、効率 18.2%のデータを示す。活性層の広帯域光収集が効率向上につながっている。 面積 26.129cm²、203.98cm²、802cm²、のミニ、サブモジュールで、効率、各々、12.6%、11.7%、8.7%, の状況である。プリント印刷による半透明有機太陽電池の開発による各種応用を検討していると、ま とめた。



図12. 効率18.2%の有機太陽電池の構成材料と太陽電池特性

(Q. Liu et al, 18% efficiency organic solar cells, *Science Bulletin* (2020), doi: https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.01.001)

5. 2 結晶 Si 太陽電池分野:

結晶Si太陽電池の現状については、下記の発表がまとまっているので、紹介する。 (1) 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13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14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





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]



図14. PERCセルの効率限界 (Dr. D. De Ceuste提供)

TOPCon (Tonnel 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。。

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



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

図15. 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 from J. Rentsch, PVCellTech 2019 Assuming PERC at 22%, TOPCon at 23%

図16. PERC、SHJ、TOPConのセルコスト比較 (Dr. D. De Ceuste提供)

図15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年以来大量生産を開始し、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。装置やタンキィラインは、 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、PECVDPVD、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見ている。図16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

(2) X. Zhangら (Trina Solar) "A Roadmap to Reach 24% Efficiency PERC Cell Based on Screen Printing for Mass Production"と題して、大量生産レベルのPERCセルの高効 率化のアプローチについて講演した。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17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。 $\tau = 1.5ms$ 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考えている。



図17. 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))

大量生産レベルのPERCセルの平均効率22.9%、平均Vocは690mVであった。今回、30~35 μ m wideの front metal finger、BSF深さ4 μ m→5 μ m、マルチバスバー→9バスバー、選択エミッタ改善、Gaドー プウエハ(プロセス後の実効キャリア寿命>500 μ sec)、水素処理の改善により、PERCセルで、平均 効率23.39%(面積252cm²、Voc=690.1mV、Jsc=41.20mA/cm²、FF=0.8226)のレベルに達している。ス クリーン印刷でも、24%PERCは、可能とまとめた。

(3) Bernd Steinhauserら (FhG-ISE) は、"Plating on TOPCon as a way to reduce the fabrication costs of i-TOPCon solar cells"と題して、B. Kafleら (FhG-ISE) は、"TOPCon - Technology Options for Cost Efficient Industrial Technology"と題して、TOPCon (Tonnel Oxide Passivated Contact)太陽電池の低コスト化のアプローチについて、講演を行った。TOPConセルの工業化のアプ ローチが、本会議のハイライトの一つである。図18は、FhG-ISEのTOPCon太陽電池の構造と特性を 示す。効率25.8% (Voc=724mV、Jsc=42.9mA/cm²、FF=0.831) が得られている。工業化に向け、銀ペー ストのスクリーン印刷(SP)の代替金属化技術として、TOPCon上のニッケルと銅のプレーティング(PL) を検討している。コスト分析結果も紹介され、SP/SP、PL/SP、SP/PL、PL/PLで、各々、2.48、2.08、 2.05、1.46ユーロセント/Wであり、プレーティングが有利である。TOPCon層の厚さ低減も、低コスト 化に必要であり、性能とのトレードオフとなる。TOPCon層厚、30~200nm、のTOPConセルのfiring後 のパッシベーション性能が検討された。当初、J_{0,metal}評価で、150nm厚の200fA/cm²に対して、50nm厚 では10,000 fA/cm²だった。J_{0,metal}は、Vocに効く。プロセスの最適化が検討され、TOPConセル特性と して、TOPCon層厚30、50、70、90nmのTOPConセルで、平均効率は、各々、21.0% (Voc=660mV、 Jsc=39.93mA/cm²) 21.1% (Voc=665mV, Jsc=40mA/cm²) 21.4% (Voc=675mV, Jsc=41mA/cm²) 21.7% (Voc=680mV、Jsc=41mA/cm²) となっている。最終的には、SP/SPのTOPConセルのベスト効率22.7% (Voc=690mV、Jsc=39.9mA/cm²、FF=0.823)、平均効率22.4%(Voc=686mV、Jsc=39.9mA/cm²、FF=0.818) に対して、PL/PLのTOPConセルで、ベスト効率22.7% (Voc=690mV、Jsc=40.4mA/cm²、FF=0.814)、平 均効率22.4% (Voc=687mV、Jsc=40.3mA/cm²、FF=0.807) と、遜色のない値を得ている。TOPCon層厚60



図18. FhG-ISEのTOPCon太陽電池の構造と特性(36th EU-PVSECにて、中上明光氏提供)

(4) J. Baoら(Jolywood)は、"Towards 24% Efficiency for Industrial n-Type Bifacial

Passivating-Contact Solar Cells with Homogeneous Emitter"と題して、パッシベート コンタクト太陽電池の工業レベルの取り組みについて、講演した。本会議のハイライト の一つである。パッシベートコンタクト太陽電池は、高効率の可能性と既存のPERCおよ びPERTプロセスフローとの高い互換性を有し、太陽電池産業で、注目を集めている。 Jolywoodは、2GW以上のキャパシティのパッシベーションコンタクト太陽電池およびモ ジュールの生産メーカーである。本研究は、均質なエミッタ、リンイオン注入、LPCVD や酸化などのプロセスを用いて、251.99 cm²のn型 bifacial太陽電池の最新成果を報告 した。再結合電流密度の低減のため、P-tailプロファイルおよびホウ素エミッタプロフ ァイルの検討により、Jo,metal=666fA/cm²、Jo,emitter=25 fA/cm²を得ている。最適化された プロセスにより、698.2 mVの優れたVocで、23.22%の平均効率(講演では、23.85%)を 生産ラインで得ている。最高効率23.82%(Jsc=40.6 mA/cm²の、Voc=710.2 mV、FF=82.6%) (講演では、24%)である。

(5) J. Dreonら (EPFL) は、 "Final Study of MoOx Thickness Variation Influence on Partial Dopant-Free Silicon Heterojunction Solar Cells"と題して、ヘテロ接 合 (SHJ) 太陽電池について、プレーナリ講演を行った。SHJにおいて、1.9~2.8 mA/cm² のSiコンタクト損失がある。研究の動機は、ドーパントフリーのコンタクト形成である。 まず、Siフリーコンタクトの現状が報告された。1層 (TCO、TiNx) は、効率18.6%の現 状。2層 (MOx/TCO) は、効率14.3~17.6%の現状。3層((i)a-Si:H/MoOx/ITO) は、効 率23.5%の現状。4層 (SiNx/TiOx/LiFx/A1) は、効率23.1%の現状。3層コンタクトに 注力している。MoOxのサブギャップの寄生吸収があり、これまでのMoOx厚は、9nmだっ たが、層厚の最適化が検討されている。MoOx厚の増加と共に、当然、Jscは低減するが、 Vocは、層厚が厚い方が良い。効率の観点で、層厚4nmが最適である。効率23.5% (Jsc=39.4 mA/cm²の、Voc=734mV、FF=81.07%) の現状である。Siフリーコンタクトは、工業化の高 いポテンシャルを有するとまとめた。

5. 3 non-Si 薄膜太陽電池分野:

結晶 Si 太陽電池は、効率限界 29.4%であり、効率 30%を超える次の太陽電池として、 タンデム太陽電池の研究開発が盛んになっている。

(1) E. Köhnen ら(HZB) は、"Perovskite/Silicon Tandem Cells: Self-Assembled Monolayer as HTL for 29.2% Efficiency and Progress in Upscaling to Large Areas" と題して、Introductory Talk を行った。本会議のハイライトの一つである。過去 10 年間 で、ペロブスカイト太陽電池の効率は、急速に伸び、大きな注目を集めている。ペロブスカ イトは、バンドギャップ制御が容易で、ペロブスカイトと他の太陽電池と組み合わせて多 接合セルにすることで、可能性を広げたい。市場をリードし、確立された Si 太陽電池とペ ロブスカイト太陽電池を組み合わせたペロブスカイト/Si タンデム太陽電池は、個々のセル の効率限界を超えることができることが実証されている。オックスフォード PV によって 提示されたモノリシックペロブスカイト/Si タンデム太陽電池の 28%で、タンデム効率はシ リコンとペロブスカイトの両方の単一接合セルの記録値をすでに上回っている。多くのセ ルのサイズは 1cm²と報告されており、この技術の拡大が依然として大きな課題であること を示している。

昨年の 36th EU-PVSEC で、HZB は、2 端子ペロブスカイト/Si、ペロブスカイト/CIGS、2 接合タンデム太陽電池に関して、報告した。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%の状況であった。HZB では、図19に示すように、LiF/IZO/SnO₂/C60/perovskie //PTAA/ITO/Si-HJ 構造の2 接合タンデム太陽電池(1.03cm²)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20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19. ペロブスカイト/Si2接合タンデム太陽電池の構造と特性 (36th EU-VSEC にて、中上明光氏提供)



図20. ペロブスカイト/CIGSe2接合タンデム太陽電池の構造と特性 (36th EU-PVSECにて、中上明光氏提供)

今回、基板制御のペロブスカイト成長の重要な役割を強調し、効率を向上させるだけで なく、大面積や粗面またはテクスチャ表面にもコンフォーマルに堆積できるペロブスカイ ト太陽電池用の新しい自己組織化単分子膜(SAM)について言及した。 SAM の優れた特 性により、1cm²のタンデム太陽電池で 29.15%の世界記録の効率を実現している。ペロブ スカイト/Si、ペロブスカイト/CIGS 2 接合タンデム太陽電池の世界最高効率は、各々、HZB による 29.15%(面積 1.06cm²、Voc=1.897V、Jsc=19.75mA/cm²、FF=0.778)、24.2%(面 積 1.045cm²、Voc=1.768V、Jsc=19.24mA/cm²、FF=0.729)である。61 cm²で高効率のタンデ ム太陽電池にスケールアップを目指すとまとめた。

(2) R. R. Müller, ら(FhG-ISE)は、 "Silicon-Based Monolithic Triple-Junction Solar Cells with Conversion Efficiency >34%"と題して、wafer bondingによる高効率 GaInP/AlGaAs/Si タンデムセルについて、講演した。本会議のハイライトの一つである。2017年に、効率 31.4%、2018年、33.3%を達成していたが、先に、効率 34.1%(面積 3.987 cm²、Jsc=12.4mA/cm²、Voc=3.177V、FF=86.4%)を達成したことを報告した。図21、22 に、GaInP/AlGaAs/Si3接合タンデム太陽電池の構造と特性を示す。IIII-V 族化合物太陽電池は、宇宙用がメインで、市場規模が小さく、今後、技術開発によるコストダウンと自動車等の用途開拓により、効率 35%モジュールで、 \$1/Wp 以下をターゲットとしている。



図21 ウエハボンディングによる GaInP/AlGaAs//Si3 接合タンデム太陽電池の構造 (D. Lackner et al., Sol. PRL, 4, 2000210 (2020).)



図22 GaInP/AlGaAs//Si3接合タンデム太陽電池の量子効率および I-V 特性 (D. Lackner et al., Sol. PRL, 4, 2000210 (2020).)

今回の太陽電池構造は、front contact/cap layer/n+-AlInP window layer/n-GaInP p-AlGaInP hetero-structure top cell/p+-AlGaP n+-GaInP tunnel diode/n/p GaInAsP middle cell/p+-AlGaAs n+-GaInP tunnel diode/n+- GaAs bond layer//wafer bond//SiOx tunnel oxide/poly-Si coated layer/p-Si base and substrate/SiOx tunnel oxide/poly-Si contact layer/nanostructure/back contact、からなる。III-V 化合物層厚は、4.8µm である。高効率化をはかるため、前回のバンドギャップ 1.51eV の AlGaAs ミドルセルに代 えて、1.48eV の GaInAsP ミドルを採用した。Si ボトムセルの端面パッシベーションにも配 慮している。今回、効率 34.5% (面積 3.987 cm²、Jsc=12.8mA/cm²、Voc=3.230V、FF=83.2%) を達成したことを報告した。2021 年には、効率 36~37%が得られるだろうとの事である。 直接成長では、効率 25.9%が得られている。車載用太陽電池としてのメリットも試算され ている。Electric Mileage 15km/kWh では、結晶 Si セルを用いた場合、2800km/年 (屋根の みに搭載)、10200km/年(ほぼ全面)に対して、III/V/Si タンデムセルを用いた場合、42000km/ 年 (屋根のみに搭載)、14300km/年 (ほぼ全面) と、有利であるとまとめた。

(3) B. Abdollahi (Karlsruhe Inst. Tech.) らは、"High-Efficiency All-Perovskite Tandem Solar Cells via Vacuum-Assisted Growth Control"と題して、ペロブスカイト系 タンデム太陽電池について、講演した。オールペロブスカイトタンデム太陽電池は、費用対 効果が高いが、高効率太陽電池実現の道である。本研究では、真空アシスト成長制御(VAGC) を、低バンドギャップ(LBG) 1.2~1.3eV の FA_xMA_{(1-x}) Pb_{0.5}Sn_{0.5}I₃ペロブスカイト薄膜成長 に、用いている。VAGC 法で作製した LBG ペロブスカイト太陽電池(PSC)では、効率 18.2% (Jsc=30.0mA/cm²、Voc=0.81V、FF=75%)が得られている。最終的に、LBG PSC(Eg~1.27 eV)とワイドバンドギャップ(WBG) PSC(Eg~1.63 eV)による全ペロブスカイトタンデム 太陽電池で、図 2 3 に示すように、4 端子構成で、効率 23%を得ている。2 端子構成では、 効率 22.2%(Jsc=14.8mA/cm²、Voc=1.9V、FF=79%)が得られているとの事である。効率 25.4% は、達成可能と見ている。



図23.4端子構成ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池と特性 (B. Abdollahi et al., Advanced Energy Materials, **10**, 1902583 (2020).)

(4) CIGS 系太陽電池の講演は、聴講できなかったので、前回の 36th EU-PVSEC のM.
Edolf (Uppsala Univ.) による基調講演"Research and innovation in CIGS and its alloys –Which are the next bottolenecks?"を紹介する。表1に、ソーラーフロンテフィアを含む高効率 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。

	ソーラーフロン	Solibro	ZSW	EMPA
	ティア			
Voc (mV)	734	739	741	734
Jsc (mA/cm2)	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

表1 CIGS 太陽電池効率の状況

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 Voc 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、10³~10⁴ 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/cm² 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。

(5) Arno Smetsら (TU Delft、HyET Solar) は、"Flamingo PV Project: Recent Advances towards high-efficiency, reliable lightweight and flexible Thin-Film silicon Solar Cells and Modules" と題して、Delft工大とHyET Solarとの共同研究プロジェクトに関して、プレーナリ講演を行った。薄膜Si太陽電池モジュールへの回帰で、関心がもたれた。図24に、各種太陽電池およびモジュール効率の面積依存性を示す。薄膜Si太陽電池は、小面積(約1cm²)では、効率は低い。a-Si、微結晶Si単接合太陽電池、2接合、3接合タンデムセルの安定化効率は、各々、産総研の10.2%、11.9%、12.7%、14.0%である。初期効率では、講演者のグループの2接合タンデムセルの効率14.8%

(面積1cm²、Jsc=14.0mA/cm²、Voc=1.424V、FF=74.4%)の例がある。薄膜Si太陽電池は、図24に示すように、大面積モジュールでも、効率は下がらない。2接合タンデムセルモジュールで、TELによる安定化効率12.34%(面積14300cm²、Isc=0.902A、Voc=280.1V、FF=69.9%)の実績

17

がある。



図24 各種太陽電池およびモジュール効率の面積依存性 (Prof. A. Smets提供)



図25 結晶Si、化合物薄膜および薄膜Si太陽電池モジュールの価格の累積生産量依存性 (Prof. A. Smets提供)



図26 薄膜Si太陽電池モジュール製造の過去の実績例 (Prof. A. Smets提供)

図25に、結晶Si、化合物薄膜および薄膜Si太陽電池モジュールの価格の累積生産量依存性を示 す。薄膜Si太陽電池モジュールは、低コストの実績を有する。図26には、薄膜Si太陽電池モジュ ール製造の過去の実績例を示す。多くの薄膜太陽電池企業は、結晶Si太陽電池の隆盛のせいで、リ タイアしている。

> Thin-film silicon PV in large scale utility* Tracking Rooftop Fixed Floating 1.40 <u>100 MW</u>_p 10 ha 100 MW 100 MW, **Fixed Costs BoS Transport** 1.20 BoS Plant area Normalized price **BoS Electrical** 1.00 **BoS Mechanical** 0.80 **PV Module** 0.60 0.40 0.20 0.00 c-SiTF Si c-SiTF Si c-SiTF Si c-Si TF Si 18%12% 18% 12% 18%12% 18% 12% **TU**Delft * Source: HyET Solar and Solliance





ルとの比較 (Prof. A. Smets提供)

HyET Solar Flexible Module Processing







図28 HyET Solar社のフレキシブル薄膜太陽電池モジュールのプロセス (Prof. A. Smets提供)

Objectives



Wet chemical etching

- Targeted values:
- Correlation length (L_c) = 3-4 μ m







Optimization of lab-recipe bound by machine constraints

TUDelft

Flamingo PV Projectの目的 (Prof. A. Smets提供) 図29

図27に、HyET Solarによる薄膜Si太陽電池のモジュール価格の試算結果と結晶Si太陽電池モジュ ールとの比較を示す。図28は、HyET Solar社のフレキシブル薄膜太陽電池モジュールのプロセス を示す。以上の結果を踏まえて、薄膜Si太陽電池モジュールに再挑戦する意向である。図29に、 Flamingo PV Projectの目的を示す。光マネージメント、テクスチャリング、多接合モデリングやキ ャラクタリゼーションの取り組みが紹介された。

(6) この他、NICE Solar Energyによる薄膜太陽電池モジュール生産のための大面積スクリーン印 刷コンタクトメタリゼーション、MIcroquanta SemiconductorのIEC6146 Aging Testによるペロブス カイトミニモジュールの安定性、NRELによるモノリシック3端子タンデム、が本会議のハイライト であった。

5. 4 PV モジュール、BOS コンポーネント分野:

(1)前回36th EU-PVSECのM. VanIseghem (EDF R&D) による基調講演 "An overview of module reliability"が、まとまっているので、紹介する。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ヵ国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30に、PV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。



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

図31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31. PVモジュールの要因別劣化率 (IEA/PVPS-Task13 Report)

(2) I. Kaaya ら (FhG-ISE) は、"Assessing the Effects of Photovoltaic Modules Long-Term Performance Degradation on Lifetime Energy Yield Predictions"と題して、 PV システムの投資リスクの軽減のためには、長期的なエネルギー収量を確実に予測するこ とが不可欠である。しかし、これは通常、日射や環境条件、システム設計、コンポーネント 品質、システム性能の長期的な変化(劣化)など、多くの異なる影響を受ける。予測精度を向 上させるためには、これらの効果のそれぞれを個別に検討する必要がある。本研究の主な 目的は、長期の低下が長期の収量予測に及ぼす影響を評価することである。これを実現す るために、35 年以上現場にあった PV システムのモジュールデータを用いる。これにより、 劣化モデルを提案し、これらのデータを使用して校正し、検証することを目指す。次に、歩 留り予測に異なる劣化評価シナリオを適用し、実際の劣化と測定された収量と比較するこ とによって、劣化による不確実性を探る。モジュールの normalized power は、P(t)/Po=1kt [k:劣化係数、t:時間] ①式で、近似できるとすると、4.2 年後の劣化率は 0.3%/年で も、8.4 年後の劣化率は 0.6%/年と、違う劣化率を示す。①式の線形近似ではなく、1-exp[-{B/(kt)) *]、1-exp[-(B/(k(t)t)*] など。非線形近似のケースもある。CdTe や CIGS 太 陽電池モジュールの長期試験データが分析されている。劣化パターンは、モジュール技術 にも依存し、長期予測のためには、さらなる検討が必要である。

(3) D.C. Jordanら (NREL) は、"High Efficiency Silicon Module Degradation - from Atoms to Systems"と題して、 高効率 Si 太陽電池モジュールの劣化について、講演した。 従来のエネルギー源とのコスト競争力を持つ太陽光発電にとって、信頼性は非常に重要で ある。従来、PV の信頼性は、劣化モードと故障モードがパッケージングに直接リンクされ ていたため、モジュールパッケージに焦点を当ててきた。現状では、PERC、IBC、SHJ 太陽 電池モジュールの劣化率は、 (1/3) %/年、 (1/3.6) %/年、 (1/6) %/年、との事である。 今日、モジュールパッケージング加えて、セルに関係した信頼性の問題が観察されている。 ここでは、界面の roughness は、TEM で、水素分などは、SIMS で、評価されている。Si テ ロ接合(SHJ)劣化が、a-Si と Si バルクの界面付近の水素の再分布に直接関連していることを 示す。PERC モジュールは、パッケージングではなく、太陽電池がフィールド暴露中にも変 化していることを示すキャリア寿命の同様の減少を示す。ストレス下の PERC セルの検討 は、太陽電池内で同様の H 再分布を示した。原子レベルで劣化メカニズムを理解すること は、メカニズムをより理解し、より正確に性能予測をする上で重要である。

(4) この他、IAHW による PV-Thermal ハイブリッドコレクター、UNSW による高精度 Energy Yield のアプローチ、RSE による Maximum Power Point (MPPT) アルゴリズム、PCCL の IEC61215 の適用による BOM (Bill of Materials) の重要性、UNSW による Si PV の remanufacturing の現状アナリシス、が本会議のハイライトであった。

5.5 PV システム、性能、応用、インテグレーション分野:

用途開発が、今回の会議でも、新しい潮流であることが、示された。今回、車載、BIPV やソーラーシェリングなどの発表があった。

(1) M. Yamaguchi ら(豊田工大、トヨタ、日産、シャープ、NEDO)は、"Development of high-efficiency and low-cost solar cells for 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。本会議のハイライトの一つであっ たので、紹介する。図32に示すように、輸送分野でも CO_2 削減が必須で、2030年まで は、ガソリンカー(IEC)は、ゼロになると予想される。しかし、ハイブリッド車(HEV)、 燃料電池車(FCV)や電気自動車(BEV)も、 CO_2 削減の点は、不十分で、PV-EV(RE-EV) など、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33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。図34は、トヨタ、 豊田中研の調査(約5,000件の顧客ニーズ)に基づくPV-EV導入に対する太陽電池の 効率およびコストのインパクトを示す。PV-EVの飛躍的導入のためには、太陽電池モジ ュールの高効率化、低コスト化が必要である。



図32. 日本および米国における種々の自動車の1km走行当たりの CO2 削減排出の比



図33. 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(M. Yamaguchi 講演資料)

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

2038 2040 2041 2041 2043 2043 2045 2045 2045 2045 2045 2048 2048 2048 2049 2049 2049

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

2013 2014 2015 2015 2017 2017 2019 2019 2020 2021 2021 2022

2023 2024



トヨタ、豊田中研の調査に基づく PV-EV 導入に対する太陽電池の効率および 図34 コストのインパクト (M. Yamaguchi 講演資料)



図35. 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 (M. Yamaguchi 講演資料)

わが国の乗用車の一日あたりの平均走行距離は、約 24km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35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。太陽電池搭載自動車の開発動向も紹介された。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35に示すように、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。太 陽電池モジュールの低コスト化も必要で、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36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/Si3接合タンデム太陽 電池、ペロブスカイト/Si2接合タンデム太陽電池で、効率、各々、35.9%、29.15%の現 状である。



Potential of Si 2-junction and 3-junction tandem solar cells (M. Yamaguchi et al., J. Phys. D. 51, 133002 (2018).) 図36. 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37に示すように、実証試験用シャープの InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池搭載トヨ タ Prius PHV と特性も紹介された。平均セル効率は、34%で、太陽電池出力は、860W であ る。太陽えねるぎーで、約44 km/日の走行が期待できる。図38は、InGaP/GaAs/InGaAs3 接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV の東京・銀座四丁目走行の模様を示す。走行試験の preliminary データも紹介された。図39は、InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池搭載(860W) 実証車(トヨタ Prius PHV) および Si-HIT 太陽電池搭載(180W)トヨタ Prius PHV の走行 距離の日射量依存性に関する計算結果と実測値との比較を示す。今回の実証車は、4.1 およ び 6.2kWh/m²/日の日射条件で、各々、29.1 km/日、36.6 km/日の走行が示されている。一方、 Si-HIT 太陽電池搭載のトヨタ Prius PHV は、発生電力が180W でもあり、8~9kWh/m²/日の 日射条件で、6.1 km/日の走行ができる状況である。

PV-powered car for "Public Road Test" 12/19



Stated public road test to show effectiveness

図37. 実証試験用 InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV (M. Yamaguchi 講演資料)



図38. InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV の東京・銀座四丁目走行の模様 (M. Yamaguchi 講演資料)



図39. InGaP/GaAs/InGaAs3接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV および Si-HIT 太陽電池 搭載トヨタ Prius PH の走行距離の日射量依存性に関する計算結果と実測値との比較 (M. Yamaguchi 講演資料)

講演では、図40に示すように、3接合太陽電池の静的低倍集光モジュール(効率32.84%) の研究成果も報告された。



図40. InGaP/GaAs/InGaAs3接合静的低倍集光モジュールと特性(効率32.84%) (M. Yamaguchi 講演資料)

(2)この他、PV システム、性能分野では、National Center for Atmosphreic Research や Univ. Pisa による solar radiation と発生電力の予測、Eindhoven Univ.によるモニタリングにおける ビッグデータ解析、CEA によるフィールドにおける PID 劣化の早期検出、Univ. Evora によ る自己消費における storage の重要性、UFSC によるハイブリッドプラントにおける storage の重要性、が、本会議のハイライトになっていた。

(3) 応用分野では、BIPV、Fraunhofer IMW による Agriculture PV や KU Leuven による Ecological PV が、本会議のハイライトとなっていた。

6. PV 経済、市場、政策等分野:

(1) NRELによる"Sustainability of PV for the TeraWatt Era"、Swisssolarによる "Only PV Can Deliver Enough Power to Decarbonize"、European Commissionによる "Potential Regulatory Approaches on the Environmental Impacts of Photovoltaics: Expected Improvements and Impacts on Technological Innovation"、Hi ERNによる"The Value of Efficiency"、CEAによる"First Economic Benchmark of PV Technologies for ATAMOSTEC in the Atacama Desert Chile"が本会議のハイライトとなっていた。

6. 感想:

今回、コロナウイルスの影響で、virtual conferenceとなった。気楽に、講演を聞ける し、メリットも感じられるが、質疑応答も不十分で、一方通行であり、種々の情報交換から も、face-to-faceの会議が、必要と考えられる。特に、学生や若い人達にとっては、後者の 機会が重要と思う。6月のIEEE PVSCのvirtual conferenceと比べると、今回は、全てライ ブで、良いと思う。講演の方は、事務局のWIPのスタッフのサポートもあり、スムーズに進 んでいたと思う。ただ、IEEE PVSCに比べると、聴講の際、音声が途切れるケースが多かっ たように思う。また、IEEE PVSCの方は、講演を何度も聞けるメリットがあった。

今回の会議は、NED0プロジェクトの過渡期で、日本からの発表や参加者が少なかった。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、国の支援が必要であり、研究開発 のさらなる推進が必要である。太陽電池や太陽光発電のさらなる高性能化、低コスト化、長 寿命化の流れにあり、技術開発のさらなる強化と産官学連携が必要である。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。 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、smart gridやself-consumptionが 重要であり、バッテリ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38th EU-PVSECは、2021年9月6日~10日、ポルトガルのリスボンで開催予定である。 PVSEC-30は、2020年11月8日~13日、韓国の済州島で、PVSEC-31は、2021年12月12日~17日、 オーストラリアのシドニーで、開催予定である。48th IEEE PVSCは、2021年6月19日~24日、 米国のマイアミで、49th IEEE PVSCは、2022年6月5日~10日、米国のフィラデルフィアで 開催予定である。

(以上)