4 6 回 IEEE 光起電力専門家会議(46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2019.6.24 山口真史(豊田工大)

1. 開催月日:2019年6月16日~21日

2. 開催場所: Sheraton Grand Chicago (シカゴ、米国)

3.本会議の概要:米国電気電子学会(IEEE) 主催の太陽光発電会議で、2008 年から、 毎年開催されることとなった。今回の会議の組織委員長は Sarah Kurtz (UCMerced) で、 プログラム委員長は Mariana Bertoni (アリゾナ州立大) であった。

今回は、46カ国から1,148名の参加者があった。例年とほぼ同じ参加者数となった。 図1に、国別参加者数を示す。国別では、①米国637名、②日本77名、③ドイツ53名、 ④オーストラリア49名、⑤中国33名、⑥韓国30名、⑦インド26名、⑧英国24名、 ⑨フランス20名、⑨オランダ20名、⑪カナダ19名、⑪スペイン19名、⑬台湾18名、 の順であった。



図1. 国別参加者数 (Mr. Adam Kohm提供)

図2は、国別発表論文件数を示す。53ヵ国から907件の論文発表があった。国別では、 ①米国401件、②日本66件、③インド48件、④中国47件、⑤オーストラリア46件、⑥ ドイツ42件、⑦フランス23件、⑧韓国19件、⑨スペイン17件、⑨台湾17件、の順であっ た。

図3は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①AREA4:結晶Si太陽電池 系124件、②AREA9:信頼性118件、③AREA2:カルコゲナイド化合物薄膜系(CIGS、CdTe およびII-VI族) 116件、④AREA 3: III-V族および集光86件、⑤AREA 1:基礎および新 概念80件、⑥AREA 8:モジュール、製造、システムおよび応用74件、⑦AREA 5:キャラ クタリゼーション66件、⑧AREA 6:ペロブスカイト、有機太陽電池58件、⑨AREA 10: パワーエレクトロニクス、系統連系55件、⑩AREA11:日射量測定、発生電力量予測47 件、⑪AREA 12:政策、普及32件、⑫AREA 7:宇宙用太陽電池31件(37件)、の順であ った。

Number of Papers to be prsented at the 46th IEEE-PVSC (Chicago, USA, June 16-21, 2019) 907 Papers



図2. 国別発表論文件数(㈱資源総合提供)





Csrystalline Si
Reliability
III-VI, CdTe
III-V & Conc.
Fundamental
Module & System
Characterization
Perovskite & Organic
Power Electronics
Solar Resouce & Forecast
Policy & Market
Space

図3. 発表論文件数の分野別内訳(㈱資源総合提供)

4. Cherry Award受賞者と受賞記念講演

Cherry Award ChairであるP. Verlinden (AMROCK) より、William R. Cherry Awardの経 緯(表1)、これまでの受賞者(表2)の説明がなされた。

表1. William R. Cherry Awardの経緯

This award is named in honor of William R. Cherry, a founder of the photovoltaic community. In the 1950's, he was instrumental in establishing solar cells as the ideal power source for space satellites and for recognizing, advocating, and nurturing the use of photovoltaic systems for terrestrial applications. The William R. Cherry award was instituted in 1980, shortly after his death. The purpose of the award is to recognize engineers and scientists who devote a part of their professional life to the advancement of the technology of photovoltaic energy conversion. The nominee must have made significant contributions to the science and/or technology of PV energy conversion, with dissemination by substantial publications and presentations. Professional society activities, promotional and/or organizational efforts and achievements are not considerations in the election for the award.

表2. これまでのWilliam Cherry Awardの受賞者

Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994	Dr. Stuart Wenham 2009
Dr. Allen M. Barnett 1996	Dr. Richard King 2010
Dr. Adolf Goetzberger 1997	Dr. Jerry Olson 2011
Dr. Richard J. Schwartz 1998	Dr. Sarah Kurtz 2012
Dr. Christopher R. Wronski 2000	Dr. Keith Emery 2013
Dr. Richard M. Swanson 2002	Dr. Ron Sinton 2014
Dr. Ajeet Rohatgi 2003	Dr. Christiana Honsberg 2015
Dr. Timothy J. Coutts 2005	Dr. Pierre Verlinden 2016
Dr. Antonio Luque 2006	Prof. Eli Yablonovitch 2017
Dr. Masafumi Yamaguchi 2008	Prof. Vasilis Fthenakis 2018
	Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994 Dr. Allen M. Barnett 1996 Dr. Adolf Goetzberger 1997 Dr. Richard J. Schwartz 1998 Dr. Christopher R. Wronski 2000 Dr. Richard M. Swanson 2002 Dr. Ajeet Rohatgi 2003 Dr. Timothy J. Coutts 2005 Dr. Antonio Luque 2006 Dr. Masafumi Yamaguchi 2008

今回の受賞者は、Prof. Harry Atwater (CALTEC)で、太陽電池ばかりでなく、半導体デバイス 分野でも、貢献している。超高効率化のための spectral-splitting など、材料との光相互作用 や太陽電池の光マネージメントに実績がある。6つの会社の共同創始者でもある。その一つが、 Alta Devices である。光トラッピングの効果は、Alta Devices 社の単接合太陽電池での最高効 率 29.1%(面積 0.998cm²、Voc=1.12272V、Jsc=29.78mA/cm²、FF=86.7%)の GaAs 太陽電池、効 率 25.1%(面積 866.45cm²、Voc=11.08V、Isc=2.303A、FF=85.3%)の GaAs 陽電池モジュールの 成果につながっている。

"New avenues for high efficiency photovoltaics via photonic design"と題して、受賞 記念講演がなされた。図4に、太陽電池の損失要因と解決策を示す。太陽電池の高効率化のため には、多接合化に加え、光トラッピングの活用が、有効である。

図5は、SQ (Shockley-Queisser) -limit 値に対する種々の太陽電池の Jsc と FF x Voc 積の実験値の比を示す。図5は、種々の材料のキャリア収集 (Jsc/J_{SQ}) とキャリアマネージメント (Voc x FF/(V_{SQ}xFF_{SQ}))の重要性を示している。Alta Devices の例に示されるように、GaAs 太陽電池

では、光トラッピングの効果が実証され、29.1%の高効率が実現している。SQ-limit は 33.7% であり、改善の余地がある。



(A. Polman et al., Science **352**, 307 (2016).)

5. 基調講演:

Ronald A. Sinton (Sinton Instruments)は、"The Path Towards a Major Utility Commitment for 100% Carbon-Free Electricity"と題して、基調講演を行った。



図 6.米国における石炭、天然ガス、原子力および再生可能エネルギー、再生可能エ ネルギーのうち、太陽光発電、風力、地熱、水の現状と今後の変遷の予測

(www.eia.gov/aeo)



図7. 2023 年の米国の各地域における Levelized Cost Of Electricity (LCOE) と Levelized Avoided Cost Of Electricity (LACE) との相関 (www.eia.gov/aeo)

まず、360万の顧客を有する主要な電力会社 Xcell(ミネアポリスに本社、コロラド、 ミシガン、ミネソタ、ニューメキシコ、ノースダコタ、サウスダコタ、テキサス、ウィ スコンシンの8州で事業)が、2050年までに、C02排出量を100%削減すると宣言した 最初の電力会社の例が紹介された。2018年初頭には、2030年までに 2005年比 60%の C02削減を主張していた。このためには、石炭火力を50%閉鎖し、再生可能エネルギー (RE)を55%レベルに増加する計画であったが、最近、2030年までに、80%の C02 削減も宣言された。U.S. Energy Information Administration の Annual Energy Outlook 2019 (www.eia.gov/aeo)でも、図6に示すように、米国における石炭、原子力のシェアは、2018年の 28%、19%から、2050年、17%、12%に減少するのに対し、再生可能エネルギーは、2018年の 18%から、2050年、31%に増加する。天然ガスは、2018年の 34%から、2050年、39%に微増するとの事である。図7は、2023年の米国の各地域における Levelized Cost Of Electricity (LCOE)と Levelized Avoided Cost Of Electricity (LACE)との相関を示す。図7に示すように、2023年段階では、太陽光発電と改良型天然ガス combined-cycleが、他の電力(原子力、carbon captured coal や風力)よりもコスト的に有利であることが予測されている。こうした背景で、図6に示すように、これら二つの技術が成長を遂げるだろうとの見方である。特に、Xcell が事業しているコロラド州は、太陽光、風力に適した地域である。太陽光発電は、安くなっているが、太陽光を中心としたクリーンエネルギー社会基盤の構築のためには、ブレークスルーによる変革が必要で、研究開発の加速と政治的な feasibility 考察も必要であるが、今日、\$100Bの成長産業であるとまとめた。

6. 国際連携特別セッション

Kelsey Horowitz (NREL) とM. Yamaguchi (豊田工大) がオーガナイザーとなり、 "Understanding the Value of Efficiency in Mainstream PV Market"の特別セッションが企 画された。



図8. 高効率化のインパクト (Dr. K. Horowitz 講演資料)

(1) オーガナイザーの一人である Kelsey Horowitz (NREL) は、" Perspectives on the value of efficiency and market growth "と題して、導入講演を行った。図8に示すように、太陽電池およびモジュールの高効率化は、LCOEの低減、市場拡大や新たな用途拡大に 有効であると述べた。一例として、図9に示すように、モジュール効率の向上は、PV

システムの設置コストの低減をもたらすという NREL の解析結果を紹介した。



図 9. モジュールの高効率化による設置コスト低減のインパクトに関する NREL の解析
 結果(Dr. K. Horowitz 講演資料)



図10. Moo PERC/Bifacial PERC のメリット (Dr. H. Fang 講演資料)

(2) Hongbin Fang (Longi Solar), "The Case for Expansion of Mono-Crystalline Silicon" と題して、short presentation を行った。図10に示すように、高効率モジュールは、モジュールコストの低減、BOSコスト低減、高 energy yield をもたらし、LCOEコスト低減につながると述べた。

(3) Qi Wang (Jinko Solar), "The Case for Continued Dominance of Multi-Crystalline Silicon" と題して、short presentation を行った。図11に示すように、セル の高効率化が、セルの低価格化に有効であり、多結晶 Si PERC は、まだ、単結晶 Si PERC よりも、価格的に、有利であると述べた。

Cell cost analysis





図11. 多結晶 Si セルと単結晶 Si セルの効率と価格のトレンド

(Dr. Qi. Wang 講演資料)

The Value of Eta for BIPV Glass Facades

Allowable Additional Costs for PV Integration in ∆€/m² as Criterion



(Dr, A. Bett 講演資料)

今後は、市場拡大と新たな市場開拓が、必要であり、下記の二つの話題提供がなされた。

(4) Andreas Bett (FhG ISE), "Do zero-energy building requirements motivate use of higher efficiency solar cells?" と題して、short presentation を行った。図12に示すよう に、BIPV システムにおいても、モジュールの高効率化が、PV integration のコスト低減 に有効であると述べた。

(5) Tatsuya Takamoto (Sharp), "Vehicle Applications that Place High Value on Very High Efficiency Solar Cells" と題して、short presentation を行った。図13に示すよう に、車載用 PV においては、モジュールの高効率化が、必須で、PV 搭載自動車の走行

距離の拡張にインパクトがあり、効率30%モジュール搭載の自動車の実証予定であり、 将来的には、効率40%以上の超高効率モジュールの実現を期待すると述べた。



図13. PV 搭載自動車のモジュール効率と走行距離の関係(Dr. T. Takamoto 講演資料)

その後、Arnurf Jaeger-Waldau (EC-JRC) が、モデレーターとして入り、パネル討論 がなされた。話題提供者として、Pierre Verlinden (AMROCK) は、図14に示すように、 結晶 Si 太陽電池モジュールの高出力化、高効率化のトレンドを紹介した。今後の方向 として、図15に示すように、ペロブスカイト/Si など、Si タンデム太陽電池に期待す ると述べた。



図14. 結晶 Si 太陽電池モジュールの高出力化、高効率化のトレンド (Dr. P. Verlinden 講演資料)

Manufacturing Cost and Power Output. Tandem Structures will be the new winning technologies !

Assumptions: 0.55 Top cell efficiency: 16% Si/Perovskite Manufacturing Cost July 2018 Additional Perovskite cost: Tandem 0.5 \$38/module Structures Additional Passivation cost: 0.45 \$10/module (PERC/PERT) IBC (M/\$S∩) 0.35 Additional 4T/2T converter: \$20/module (IBC only) H.I M4 PERT 0.3 PERC 0 Topcon 0.25 0.2 250 270 290 310 330 350 370 390 410 60-cell Module Power (W)

AMROCK

図15. 結晶 Si 太陽電池モジュールの出力と製造コストの関係、Si タンデム太陽電池 への期待 (Dr. P. Verlinden 講演資料)

Copyright AMROCK Pty Ltd © 2018

最後に、オーガナイザーの一人である M. Yamaguchi (豊田工大) が、セッションを まとめた。前述の話題提供者の主張をまとめると共に、今後の方向性について、コメン トされた。P. Verlinden が主張したように、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16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35%、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。



Potential of Si 2-junction and 3-junction tandem solar cells (M. Yamaguchi et al., J. Phys. D. 51, 133002 (2018).)

図16. 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) T. Takamoto が述べたように、車載など限られた面積への適用のためには、効率 30% 以上の高効率モジュールが必要であり、多接合タンデム太陽電池モジュールの開発が必 須である。図17に示すように、4~6接合タンデム太陽電池は、効率 47%以上の高 効率化が可能で、効率 40%モジュールの実現も期待される。事実、今回の会議で、NREL のグループから、非集光効率 39.2%、集光効率 47.1%の世界最高効率 6 接合タンデム太 陽電池が報告されたことが紹介された。太陽光発電の市場拡大、新たな市場開拓、さら には、太陽光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まとめた。



Potential and present status of tandem solar cells

(M. Yamaguchi, Phys. Status Solidi. 12, 489 (2015)., updated)

図17. 多接合太陽電池の高効率化の現状と高効率化の可能性 (M. Yamaguchi, Phys. Status Solidi. 12, 489 (2015)., updated)

7. 本会議のトピックス

プレーナリおよび招待講演を中心に、本会議のトピックスを紹介する。

7.1 基礎·:新概念分野:

Tom Markvart (Univ. Southampton) は、 "Can Thermodynamics Guide us to Make Better Solar Cells?" と題して、プレーナリ講演を行った。太陽電池の高効率化の指針を示すた め、古典的なthermodynamicsで議論している。太陽光ビーム (angular size $\omega_s = 6.85 \times 10^{-5}$ sterad) から、Planck則により、黒体輻射thermal raiationのideal emission Φ_{bb} & chemical potential μ を用い、 Φ_{bb} (T_s) =2 ω_s (ν/c)²[1/{exp(h $\nu - \mu$)/k_BT_s-1}]、 Φ_{bb} (T_o) =2 π (ν/c)²[1/{exp(h $\nu - \mu$)/k_BT₀-1}]、と示し、古典的なchemical potentialは、太陽電池の 損失解析に有効であるとしている。また、太陽電池をheat engineと見て、電圧損失を 説明している。Heat rejection、beam expansion、photon cooing/thermalizationの電 圧損失要因がある。図18に示すように、詳細平衡のSQ (Shockley-Queisser) -limit の開放電圧に対する電圧損失は、内部発光効率に依存する。即ち、高効率化のためには、 非輻射再結合損失の低減やフォトンリサイクリングが有効である。ホットキャリア太陽 電池は、thermoelectricityに基づくが、次世代太陽電池の方向性に致しているか?、 と結んだ。



図18. 詳細平衡の(Shockley-Queisser)-limitの開放電圧に対する電圧損失 と内部発光効率の関係(Prof. T. Markvart提供)

7.2 CIGS、CdTe、Ⅱ-Ⅵ化合物薄膜セル分野:

(1) Raffi Garabedian (First Solar) は、"First Solar's Amazing Progress on CdTe"と題 して、プレーナリ講演を行った。同社の CdTe 太陽電池の現状は、セル効率 22.1%(面 積 0.4798 cm²、Voc=887.2mV、Jsc=31.69mA/cm2、FF=78.5%)、面積 7038.8 cm²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、2005 年の効率9%から、2010年11.3%、2012年12.7%、2014年14%と改善がはかれ、2016 年時点で16.4%、現在、420420~445Wの高出力モジュール(効率17%~18%)も出荷 されている。製造コストも、2011 年 Q1 の \$ 1,59/W から、2016 年 Q1 の \$ 0.58/W、2017 年 Q1 の \$ 0.37/W、現在、\$0.2/W のレベルに低減されている。累積で、約 20GW のモジ ュールが出荷されている。結晶 Si よりも、コスト的有利であると主張している。 図19に、solar stock market の状況を示す。中国における 2018 年の subsidies の低減の アナウンスは、中国企業の太陽電池セルおよびモジュールの過剰供給をもたらし、2018 年は、solarの株価は、下落した。2018年12月以降、回復傾向にある。このように、PV 市場は、流動的だが、石炭より低コストで、grid parity から lowest cost new generation エネルギーに向かっている。今後は、インテグレーション→grid reliability & stability→ flexible generation→dispatchable (PV+storage)の流れにある。高速高周波応答の電力変 換による grid stability も進みつつある。技術的には、高効率、extreme durability (25 年)、 製造の scaling、environmental-friendly 技術、などがあり、大学や国研との共同基礎研究 によるイノベーションも必要で、こうした展開により、市場拡大と新たな市場開拓が進 もうとまとめた。



図19. Solar stock market の状況 (https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73234.pdf)

(2) M. Nakamura ら (ソーラーフロンティア) は、"Cd-free Cu(In, Ga)(Se, S)₂ thin-film solar cell with a new world record efficacy of 23.35%"と題して、世界最高効率 23.35%の Cd フリーCu(In, Ga)(Se, S)₂ 太陽電池の発表を行った。高効率化に向け、CsF 処理、Ga/(Ga+In) and S/(S+Se)比の制御によるバンドギャッププロファイルの最適化がなされている。ミニマムバンドギャップ 1.0~1.2eV の領域で、効率 22%以上が可能との事である

7.3 III-V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野:

Stock Market Activity

(1) Brendan Kayes (Alta Devices) は、"Empowering Autonomy with Thin-Film III-V Solar Cells"と題して、プレーナリ講演を行った。光トラッピングの効果は、Alta Devices 社の単接合太陽電池での最高効率29.1%(面積0.998cm²、Voc=1.12272V、 Jsc=29.78mA/cm²、FF=86.7%)のGaAs太陽電池、効率25.1%(面積866.45cm²、Voc=11.08V、 Isc=2.303A、FF=85.3%)のGaAs陽電池モジュールの成果につながっている。また、光 トラップングをさらに進めれば、図20に示すように、GaAs単接合太陽電池でも、効率 32%超えが可能であることが示された。Alta Devicesの技術は、70%以上のプリカーサ の利用効率で、高スループットの自動MOCVD(有機金属気相体積)技術、ELO(Epitaxial Lift Off)技術とモジュールアレンブリィ、に特長がある。高高度の長期ミッション、 車載や充電ステーション等の市場への参入に向け、製造のスケールアップに注力してい る。宇宙用には、InGaP/GaAs/Ge3接合太陽電池が用いられているが、約250/Wと高価で ある。GaAs系2接合薄膜太陽電池は、低コスト、高効率、低温度係数、放射線耐性の特 長を有し、軽量(>1W/kg)、フレキシブルも可能である。自動車向け太陽電池も技術開 発中である。トヨタ自動車の「プリウスPHV」のルーフに搭載されている太陽光発電モ ジュールは、パナソニックのHITモジュールで、HITはシリコン結晶太陽電池の中では最 高レベルの変換効率を誇るが、その値は20%ほどで、Alta DevicesのGaAs薄膜太陽電池

は、25%以上の高効率を提供できるとしている。



図 2 0.3 μm 厚 GaAs 薄膜太陽電池の裏面反射による高効率化の可能性に関するシミ ユレーション結果 (O.D. Miller et al, IEEE Journal of Photovoltaics **2**, 303 (2012).)

(2) Ryan M. Franceら(NREL)は、"High efficiency 6-junction solar cells for the global and direct spectra"と題して、世界最高効率6接合太陽電池に関する発表を行った。図21は、6接合太陽 電池の構造を示す。Invertedmetamorphic6接合で、2.1eVAlGaInP/1.7eVAlGaAs./1.4eVGaAs 格子整合系/1.1eVGaInAs/0.9eVGaInAs/ 0.7eVGaInAs 格子不整合系からなる。

図21に示すように、格子不整合系では、GaInP(Sb)組成傾斜バッファ層が用いら れ、サブセルのインターコネクションとして、AlGaAsQW(量子井戸)TJ(トンネル接 合)とGaInAsTJが用いられている。サブセルのスペクトルチューニングを考慮して、 サブセル厚の最適化がなされている。1-sunで、39.2%の世界最高効率が達成されてい る。これまでの世界最高効率は、Spectrolabの4接合セルの効率38.8%であった。図2 1には、各サブセルの電圧損失とERE(外部発光効率)が示されているが、第1、2、 6接合の電圧損失の改善余地があり、効率40%以上は、実現しよう。6接合の集光動 作のためには、抵抗損失の低減が課題であった。トンネル接合からのZn拡散の抑制、 スペーサ層の挿入がはかられている。図22は、6接合セルの集光特性を示す。144倍 集光で、効率47.1%が達成されている。これまでの世界最高効率は、FhG-ISEの4接合 セルで、効率46.1%、シャープの3接合セルで、効率44.4%であった。図24に示すよ うに、Best Efficiency Chart が更新されている。

6J IMM structure

6-junction inverted metamorphic multijunction



図 2 1.6 接合太陽電池の構造(Dr. R. France 提供)



図22.6接合太陽電池の1-sunでのI-V特性(Dr.R.France提供)

6J IMM record concentrator efficiency

175

▼

 \bigtriangledown

8 4 8

38.2



Highest reported concentrator efficiency

Independently certified by NREL cell measurements team





図24. Best Efficiency Chart (Dr. R. France提供)

結晶Si太陽電池分野: 7.4

(1) Denis De Ceuste (DDC Solar) は、"Passivating contacts: Prospects for high volume manufacturing"と題して、プーナリ講演を行った。図25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26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26. 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。図27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28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



```
S_{10,e} = 13.3 (TiO_2) S_{10,h} = 12.5 (MoOx)
```

S_{10,e} = 14.1 ; S_{10,h} = 13.5 [1] Glunz, 2017 IEEE PV Conference

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

図27. 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



図28. PERC、SHJ、TOPConのセルコスト比較 (Dr. D. De Ceuste提供)

7.5 キャラクタリゼーション:

Uwe Rau (RWTH Aachen .²Forschungszentrum Julich) は、"From the Cradle to the Grave-Characterization of Photovoltaic Materials, Solar Cells and Modules"と題して、プレー ナリ講演を行った。同氏は、"Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells (Wiley、2011)"の共同編者でもある。太陽電池材料およびデバイスのキャラクタ リゼーションにおいて、共通の原理があり、themodyamic (SQ: Shockley-Queisser) limit と結びつけて、考えると良いとコメントした。図29は、種々の太陽電池の効率のトッ プデータとShockley-Queisser limitに対する比率を示す。種々の損失が、見えてくる。GaAs 太陽電池は、高品質化やフォトンリサイクリングによる再結合損失の低減や抵抗損失の 低減がなされ、高効率化が進んでいる。ペロブスカイト、CZTS、QDなど、新しい太陽 電池は、まだ多くの損失をかかえていることがわかる。図30に示すように、太陽電池 において、Shockley-Queisser limitに追加される放射再結合損失、非放射再結合損失、抵 抗損失などデバイスレベルでの損失があり、まずは、光学的な解析と考察、次に、比放 射再結合の解析と考察、抵抗損失など電気的特性の解析と考察、が必要である。太陽電 池の効率計算には、第一に、光吸収係数、内部発光量子効率、outcoupling、外部発光量 子効率が考慮される。電圧損失については、Shockley-Queisser limitに放射再結合損失、 非放射再結合損失が追加される。図31では、各種太陽電池の損失について、要約して いる。種々の太陽電池において、まだまだ非放射再結合損失が多いことがわかる。有機 系太陽電池においては、放射再結合損失がばらついているが、有機系材料の物性の特徴 によるものと思われる。

JÜLICH





Guillemoles, Kirchartz, Cahen, Rau, in print

図29. 種々の太陽電池の効率のトップデータとShockley-Queisser limit に対する比率(Prof. U. Rau提供)



図30.太陽電池におけるShockley-Queisser limitに追加される放射再結合損失、非放射 再結合損失、抵抗損失などデバイスレベルでの損失(Prof. U. Rau提供)



図31. 太陽電池の各種損失のサマリー (Prof. U. Rau提供)

その後、材料レベルでは、ペロブスカイトの時間分解フォトルミネッセンス、などが 紹介された。デバイスレベルでは、結晶Si太陽電池、CIGSやGaAsのエレクトロルミネ ッセンス(EL)イメージング、収集効率マッピング、などが紹介された。モジュール レベルでは、InGaAsとSiの2つのELカメラを用いた例が紹介された。

7.6 ペロブスカイトおよび有機太陽電池分野:

David Cahen (Bar-IIan Univ.) は、"Putting Halide Perovskite Solar Cells in Perspective"と題して、プレーナリ講演を行った。

State of the Art for tandem junctions

GaAs-GaInF	2T, monolithic	32,8% LG Electronics (2017)	
Si-GaAs	4T mecanically stacked	32,8 % NREL/CSEM/EPFL (2016)	
Si-GaAsP	2T monolithic,	20,1 % OSU/SolAero/UNSW (2018)	
Si-PRX	2T Monolithic	28% Oxford PV (2019)	
CIGS-PRX,	2T, mecanically stacked 2T monolithic 2T monolithic	23,9 % H. Shen et al (2018) 22.4% Q.Han et al,UCLA(2017) 21.6% Jost et al HZB (2019)	With low band gap CIG: 1,15 eV

Si-CIGS studies remain very limited : The efficiency issue

Daniel Lincot, MRS,23 rd April 2019

図32. 種々の2接合タンデム太陽電池の高効率化の状況 (Prof. D. Lincot提供)

ペロブスカイト太陽電池が最近のトピックスの一つとなり、多くの研究者、技術者が 参入している。ハイドライドペロブスカイト材料のサーベイ結果が述べられた。今日、 ペロブスカイト太陽電池に用いられているCH₃NH₃PbI3は、1.56eVの直接遷移型のバンド ギャップを有する。小結晶粒界だが、少数キャリア拡散長(100~1000nm)を持ち、高 光吸収係数(GaAsに近い光吸収係数)、 $\epsilon \sim 6.5$ 、移動度(電子7.5cm²/Vs、正孔12.5~ 66cm²/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、5~16meVで あり、無機系太陽電池の様相を示す。2009年の効率3.8%から最近の効率23.7%(面積 0.0739cm2、Voc=1.1697V、Jsc=25.4mA/cm2、FF=79.8%)の変遷、最近の研究開発の状 況が述べられた。講演では、タンデム太陽電池の進展も紹介された。ペロブスカイト/Si 2 接合タンデム太陽電池に関しては、Oxford PVが、面積1.09 cm²セルで、効率27.3% (Voc=1.813V、Jsc=19.99mA/cm2、FF=75.4%)を報告してきたが、図32に示すように、 最近、1 cm²セルで、効率28%(Voc=1.809V、Jsc=20.37mA/cm2、FF=76%)が報告され ている。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 池では、効率、各々、23.9%、18.5%の状況である。

7.7 宇宙用太陽電池およびシステム分野:

(1) Yannick Combet (Stratobus) は、"Stratobus[™] - Energetic challenge toward lighter than air innovation"と題して、プレーナリ講演を行った。図33に示す Stratobus airship は、High Altitude Pseudo Satellite (HAPS)に分類され、高度18~20km、140km長、 32m 径で、民生、軍用の通信、航行、観測サービスを提供する。Stratobus は、250~450kgの payload

重量で、100,000km²の領域をカバーできる。太陽電池アレイは、面積 1100m²で、電圧 1200V、出 力 30 k W_pで、540~800kWh のバッテリに充電される。この出力は、airship の 1 年間以上の航行 に十分との事である。このプロジェクトは、現在、feasibility stage で、太陽電池ついて、n 型ベ ースのバックコンタクト Si 太陽電池の紫外線、オゾン、放射線などの各種劣化試験がなされて いる。2024 年まで実証フェーズ、2027 年から、実働予定である。



図 3 3.Stratobus airship (Stratobus ホームページ)

(2) M. Yamaguchi ら(豊田工大、JAXA、JAEA)は、"Analysis for Radiation Degradation of Advanced Si Space Solar Cells"と題して、Si 宇宙用太陽電池の高効率化、放射線耐性の強化に関して、報告した。太陽電池の歴史は、宇宙用に始まる。宇宙用太陽電池は、図34に示すように、単結晶 Si 太陽電池に始まり、GaAs 太陽電池、InGaP/GaAs 系 3 接合太陽電池が実用化され、現在は、3 接合太陽電池が主流となっている。結晶 Si 太陽電池は、宇宙用太陽電池としては、忘れさられた感があった。



図34. 宇宙用太陽電池の高効率化の変遷 (C. Fetzer et al., NASA/CP-2017-214494 (2007).)



図35.地上用および宇宙用 Si 太陽電池の高効率化の変遷(M. Yamaguchi 講演資料)

最近、短期ミッションや低コスト化等の点から、結晶 Si 太陽電池への関心も高まっ ている。宇宙用 Si 太陽電池の技術開発は、NASA,JPL、ESA、NASDA の機関やシャー プ等の企業に、先導されてきた。図35に、宇宙用 Si 太陽電池の高効率化の変遷を地 上用 Si 太陽電池の変遷と比較して示す。宇宙用太陽電池には、高効率化に加えて、放 射線耐性が要求され、初期(BOL)効率ばかりでなく、EOL(End Of Life)効率の向上 が要求される。n型ベースの放射線耐性は、p型ベースのものに比べて劣り、歴史的に、 p型ベースの Si 太陽電池が、宇宙用として、用いられて来た。太陽電池構造も、ホモ接 合から、BSF、BSR、BSFR 構造と改良されてきた。高効率化の変遷を、電圧損失およ び抵抗損失の点から概説する。電圧損失および抵抗損失の低減により、宇宙用 Si 太陽 電池のさらなる高効率が可能である。また、放射線耐性の点から、ベース層抵抗率の最 適化、薄型化がはかられて来た。



図36. PERL 構造 Si 太陽電池と宇宙用 Si BSF 構造の放射線耐性の比較(M. Yamaguchi 講演資料)

宇宙用 Si 太陽電池のさらなる高効率化の要求があり、PERL(Passivated Emitter Rear Localized)構造、ヘテロ接合、バックコンタクト構造等の先端 Si 太陽電池の適用に関心が向け られている。今回、上記先端 Si 太陽電池の放射線耐性に関する解析結果を報告した。一例とし

て、図36に、PERL構造Si太陽電池と宇宙用SiBSF構造の放射線耐性の比較を示す。総じて、 先端Si太陽電池は、初期効率は、宇宙用Si太陽電池に比べて、優れているが、放射線耐性は、 図35に示すように劣る。PERL構造Si太陽電池の場合、宇宙用Si太陽電池と同様のバルク放 射線損傷が予想されるが、放射線照射による表面再結合損失の増加が課題である。取り合えず、 浅い接合深さが、高効率かつ耐放射線性太陽電池の実現に、有効と考えられる。勿論、PERL構 造等、先端高効率結晶Si太陽電池の放射線劣化機構の理解と放射線耐性の向上が必要である。

図37に、n型ベースとp型ベース結晶Si太陽電池の放射線耐性の比較を示す。ヘテロ接合、 バックコンタクト構造太陽電池には、n型ベースが用いられているが、放射線耐性の点からは、 p型ベースが良い。講演では、放射線照射欠陥の導入率、キャリア捕獲断面積の点から、解析し た結果を報告した。図38に、バックコンタクト結晶Si太陽電池の放射線耐性のセル厚効果と 宇宙用Si太陽電池との放射線耐性の比較を示す。バックコンタクト構造太陽電池は、本質的に、 放射線耐性に劣ると言える。



因 5 7. h至マ スとp至マ ス結晶 31 太陽 電 池 の 放 射 線 耐 性 の 比 較 (M. Yamaguchi講演資料)



図38. バックコンタクト結晶Si太陽電 池の放射線耐性のセル厚効果と宇宙用 Si太陽電池との放射線耐性の比較(M. Yamaguchi講演資料)

7.8、7.9 モジュール、製造、信頼性合同分野:

Chris Deline (NREL) は、"Bifacial PV system performance: Separating Fact from Fiction"と題して、プレーナリ講演を行った。



図39. 種々の材料で構成される地面の反射率と照度 (C. Deline et al., IEEE J-PV 7, 575 (2017).)

bifacial moduleは、これまで、累積2GW設置されており、International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) でも、世界におけるbifacialセルのシェアは、2019 年15%から、2029年60%と予想されている。図39、図40に示すように、bifacial モジュールのirradiance モデル解析およびフィールド試験結果などが紹介された。



図40. 屋外の裏面照度と表面のみの出力に対するbifacialモジュールの出力 (C. Deline et al., IEEE J-PV 7, 575 (2017).)

7.10 PVシステム、パワーエレクトロニクス、系統連系、日射量測定、予測分野:

Patrick Chapman (Enphase Energy) は、"The Emergence of Microinverters and Alternating Current Photovoltaic Modules"と題して、プレーナリ講演を行った。まず、経歴の自己紹介があった。2010年まで、イリノイ大学の准教授だったが、イリノイ大学の技術をベースに、マイクロインバーターを主とするSolarbridge社を共同設立した。2014年のSunPowerとの共同ビジネスを経て、昨年、Enphase Energy社に売却した。Enphase Energy社のプロダクトに言及した。MOSFETやASIC部品で構成され、効率 97.5%で、40年寿命であり、交流モジュールとして、コスト、信頼性、ACモジュールを含むPVシステムの設置の容易さの面で有利と述べた。

7.11、7.12 応用、政策、市場、普及合同分野:

Andrew Blakers (ANU) は、"100% Renewable Energy"と題して、プレーナリ講演を 行った。図41は、世界における年あたりの新導入容量を示す。太陽光発電と風力がエ ネルギーレースの勝者となっている。これは、図42に示すように、石炭は、価格的に 無理があり、太陽光発電と風力が、価格的にも有利になり、70%以上の新電力の容量を 持つことが期待される。同時に、図43に示すように、地球温暖化ガスの3/4の削減が 可能である。100%再生可能エネルギーの実現のためには、送電とストレージが、課題 である。

ストレージの有力候補として、pumped hydroのサーベイ結果を報告した。616.000の off-riverサイトがあり、23百万GWhのストレージ容量があり、図44に示す再生可能エネルギ ーに必要な容量に匹敵するストレージ容量である。pumped hydroは、成熟した技術で、copy & pasteで、多くの候補サイトがり、低コスト、設置が容易(2~4年)、環境リスクも少ないと述 べた。





図43.再生可能エネルギー導入による地球温暖化ガス放出低減の可能性 (Prof. A. Blakers講演資料)

National Universit

How much storage is needed?

Rule of thumb for 100% renewable electricity

- Large-area (1 million km²) system
- Both PV & wind deployed

Storage requirement ~ one day of consumption

Storage (TWh)	World	China	USA	Japan	India
Required (2018)	70	19	10	3	4
Available	23,000	3,800	1,400	53	560

re100.eng.anu.edu.au

図44. 再生可能エネルギーに必要なストレージ容量(Prof. A. Blakers講演資料)

8. 感想

他のEU-PVSECやPVSECに比べて、本会議の質の高さを感じる。Ron SintonのKeynote Speechに示されたように、Xcel1は、2050年までに、C02排出量を100%削減すると宣言 した最初の電力会社の例が紹介された。図7に示したように、2023年段階では、太陽光 発電と改良型天然ガスcombined-cycleが、他の電力(原子力、carbon captured coal や風力)よりもコスト的に有利であることが予測されている。ただ、太陽光を中心とし たクリーンエネルギー社会基盤の構築のためには、ブレークスルーによる変革が必要で、 研究開発の加速と政治的なfeasibility考察も必要である。特別セッション" Understanding the Value of Efficiency in Mainstream PV Market"で示されたように、車載 やBIPV (ZEB、ZEH)等用途開発やSiタンデムを含む効率35%超えの超高効率タンデム太陽 電池モジュールの研究開発、バッテリとのハイブリッド化が、今後の方向性と考えられ る。2030年の3TW、2040年の20TWの実現のためには、信頼性やリサイクル等も課題であ る。モビリティ社会を考慮すると、Siタンデムや自動車応用、などが、国際共同研究の テーマになりそうである。次回の47th IEEE PVSCは、2020年6月14日~19日、カナダ・ カルガリで開催予定である。36th EU-PVSECは、2019年9月9日~13日、フランス・マルセ イユで、PVSEC-29は、2019年11月4日~9日、中国・西安で、開催予定である。

(以上)