47回 IEEE 光起電力専門家会議(47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2020.7.8 山口真史(豊田工大)

 開催月日:2020年6月15日~8月21日 (ライブイベントは、6月15日~6月30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。米国電気電子学会(IEEE) 主催の 太陽光発電会議で、1960年の第1回以来、1年半毎に開催され、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 Seth Hubbard (Rochester Inst. Tech.) で、 プログラム委員長は Arno Smets (Delft Tech. Univ.) であった。

今回は、60カ国から約1,200名(その後の情報では、1,216名)の参加登録があったとの事である。46%が学生である。図1に、参加登録者の国別内訳を示す。国別では、①米国 523名、②ドイツ 75名、③日本 62名、④オーストラリア 60名、⑤英国 59名、⑥カナダ 52名、⑦インド 51名、⑧中国 36名、⑨フランス 29名、⑩オランダ 24名の順であった。



図1. 国別参加者数 (Prof. Seth Hubbard 提供)

図2は、国別発表論文件数を示す。55ヵ国から753件のアブストラクト投稿があった。 国別では、①米国278件、②中国65件、③ドイツ56件、④インド34件、⑤日本31件、⑥オー ストラリア30件、⑦カナダ24件、⑧フランス22件、⑨英国20件、⑩オランダ17件、⑪スペ イン16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、①AREA 4:結晶Si太陽電池87 件、②AREA 2:カルコゲナイド化合物薄膜系(CIGS、CdTeおよびII-VI族)72件、③AREA 3: III-V族および集光61件、④AREA 6:ペロブスカイト、有機太陽電池59件、⑤AREA 9:信頼 性58件、⑥AREA 8:モジュール、製造、およびシステム55件、⑦AREA 1:基礎および新概 念47件、⑧Joint Session45件、⑨AREA11:日射量測定、発生電力量予測44件、⑩AREA 5: キャラクタリゼーション38件、⑪AREA 12:政策、市場、普及35件、⑫AREA 10:パワーエ レクトロニクス、系統連系30件、⑬AREA 7:宇宙用太陽電池15件、の順であった。

Number of Abstracts Submitted at the 47th IEEE-PVSC (753)



図2. 国別発表論文件数 (Prof. Seth Hubbard提供)

Number of Papers to be prsented at the 47th IEEE-PVSC (646)



図3. 発表論文件数の分野別内訳((Prof. Seth Hubbard提供)

4. Cherry Award受賞者と受賞記念講演

Cherry Award ChairであるProf. Eli Yablonovitch (UC Berkley)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

Dr. Paul Rappaport 1980	Dr. Allen M. Barnett 1996	Dr. Jerry Olson 2011
Dr. Joseph L. Loferski 1981	Dr. Adolf Goetzberger 1997	Dr. Sarah Kurtz 2012
Prof. Martin Wolf 1982	Dr. Richard J. Schwartz 1998	Dr. Keith Emery 2013
Dr. Henry W. Brandhorst 1984	Dr. Christopher R. Wronski 2000	Dr. Ron Sinton 2014
Mr. Eugene L. Ralph 1985	Dr. Richard M. Swanson 2002	Dr. Christiana Honsberg 2015
Dr. Charles E. Backus 1987	Dr. Ajeet Rohatgi 2003	Dr. Pierre Verlinden 2016
Dr. David E. Carlson 1988	Dr. Timothy J. Coutts 2005	Prof. Eli Yablonovitch 2017
Dr. Martin A. Green 1990	Dr. Antonio Luque 2006	Prof. Vasilis Fthenakis 2018
Mr. Peter A. Iles 1991	Dr. Masafumi Yamaguchi 2008	Prof. Harry Atwater 2019
Dr. Lawrence L. Kazmerski 1993	Dr. Stuart Wenham 2009	
Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994	Dr. Richard King 2010	

今回の受賞者は、Prof. James Sites (Colorado State Univ.)で、多結晶薄膜太陽電池のデ バイス物理、特に、CIGS や CdTe 薄膜太陽電池の損失メカニズムの解析に貢献があったと 紹介された。

受賞記念講演は、"Comments Focus on Thin-Film PV"と題して、行われた。CIGS や CdTe 太陽電池を例にして、バンドギャップの異なる材料の多層のヘテロ接合であること、界面 や結晶粒界の理解が重要である。CIGS の場合の各界面の課題が述べられた。薄膜太陽電池 の高効率化の方向についても言及された。①a-Si では、Cや Sn 合金によるスタック化、② CIGSe では、Cuを Ag で、SeをS で置き換えによるタンデム化、③CdTe では、CdSeTe によ る低ギャップ化、CdZnTe や CdMgTe による高ギャップ化、④CZTS 系では、いくつかのバリ エーション、⑤ペロブスカイト系では、多数のバリエーションが、あると述べた。今後の 方向性についても、コメントがなされた。今後、①低コスト生産、材料削減や非晶質の利 用、②粒界、界面、再結合や抵抗損失の解析、③透明パネル、フレキシブル基板、roll-to-roll 法、Si タンデムを含むタンデム化が、重要であるとまとめた。

5. 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。

5.0.1 基調講演:

Christian Breyer (LUT Univ.) は、"Dawn of Solar Age: On the History of PV in 100% Renewable Energy Scenarios and Future Prospects"と題して、基調講演を行った。1839年の Becquerelの光電効果に始まり、1940年2月23日のベル研のRussel Ohl の太陽電池のアイデ ア、1954年のBell研の現在の太陽電池の原型に至る太陽電池に関わる歴史が述べられた。 各種太陽電池の高効率化の変遷やモジュールやシステムコストの変遷が述べられ、現在、 システムコストは、110~210ユーロ/kWp (ベース164ユーロ/kWp)の現状である。2050年 のPVの累積導入量予測も10TW、20TW、60TWなど、幅がある。今後は、bifacial PVやSi タンデムが有望であり、2050年には、効率30%の太陽電池モジュールも実現しよう。



*: Solar energy received by emerged continents only, assuming 65% losses by atmosphere and clouds

1.5℃ Worldシナリオの実現のためには、再生可能エネルギー100% (RE 100)の実現が 必要である。太陽エネルギーは、他のエネルギーに比べて、図4に示すように、3桁多い ポテンシャルを有する。Solar PVは、電力、熱、輸送分野でも、損失低減に貢献できる。 2016年11月に、Marrakechで開催されたCOP-22では、48か国が、RE100のターゲットを決定 している。ノルウェー、コスタリカ、ウルグアイ、アイスランドでは、既に、RE100が実 現している。2050年のPVシェアに関する予測も、5~10年前は、5~50%だったが、現在、 30~80%と見直されている。課題は、PVおよびバッテリのコスト、power-to-Xの欠如であ る。水素、メタン、液体燃料、移動体、燃料化学、熱、鉄鋼、水の分野に加え、エネルギ ーシステムとの結合、エネルギーキャリア、electricity、green hydrogenなどが言及された。 図5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

図4.太陽エネルギーの他のエネルギーに対するポテンシャル比較 (Prof. Christian Breyer講演資料)

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RE100シナリオ において、Solar PVは、69%を占め、主力となるだろう。2019年のPVの累積導入量も627GW だが、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。



(Prof. C. Breyer 提供)

5.0.2 Special Session-1:

"Towards 100% Renewable Energy" と題して、Special Sessionが行われた。

(1) Nancy Haegel (NREL) は、"Toward 100% Renewable Energy: Trajectories and Challenges to Terawatt Scale Electricity Generation with PV"と題して、TWスケールへの挑戦について、 言及した。表3に、一次エネルギー、電力およびPVの現状を示す。PVは、最大の貢献がで きるはずだが、されていない。TWスケールの挑戦が必要である。コスト、性能、信頼性は、 進展している。今後は、Schockley-Queisser Limt超え、第3世代太陽電池、低コストタンデ ム、低コスト溶液ベースプロセスに、期待する。TWスケールに向けては、コスト、信頼性 の継続的追求、材料利用の有効性、PVの循環技術、材料効率の向上とyield、ストレージの 役割、インフラの統合集積、が重要である。図4に、TWチャレンジのシナリオと導入サイ ズを示す。TWスケールになると、PV廃棄物の増大やend of life マネージメント設計に関 するcircular economy、Ag使用削減や置き換えやリサイクルなど、材料の有効利用、投資や 成長に関わるsustainableが、需要になってくる。

		2017	2018
Primary Energy (all fues)	Energy delivered	157,000 TWh	161,000 TWh
	Average Power	17.9TW	18.4TW
	European de l'accurat	25,700 TWh	26,600 TWh
Electricity	Energy delivered	16.3% of total	16.5% of total
	Average Power	2.9TW	3.0TW
		454TWh	585TWh
PV	PV energy delivered	2.0-2.4% of	2.2-2.5% of
		electricity	electricity
	PV average power	0.052TW	0.06TW

表3.一次エネルギー、電力およびPVの現状(Dr. Nancy Haegel講演資料)

表4. TWチャレンジのシナリオと導入サイズ (MRS Bulletin 45, 159 (2020).)

			2	050 ESTIMATE	S	
SCENARIO		IDEALISTIC	3.2 ± 0.5	10 billion people 3.2 ± 0.5 kW/person for baseline		
	LABEL	ASSUMPTIONS	Energy demand relative to baseline	TW Challenge (average power)	PV needed* to provide 50% of the energy	
A	Baseline (business as usual)	Extrapolate past data.	100%	$32 \pm 5 \text{TW}$	$100 \pm 20 \text{TW}$	
B	Total electrification (lower bound on energy requirements)	 Electrify everything. Supply all electricity from renewable electricity. Deliver 100% of electricity directly to end use. 	37%	12 TW	37 TW	
C	Current infrastructure (upper bound on energy requirements, example of many scenarios using long-term energy storage)	 Retain ICE transportation. Retain natural-gas infrastructure for industrial processes, heating, etc. Retain most of today's power plants. Use renewable electricity to make hydrocarbons from CO₂ in air to replace all fossil fuels used today (assume 50% efficiency). 	180%	58 TW	180 TW	

Table II. Definition of scenarios and associated size of the TW Challenge.

Gridのアップグレードには、stability with inverter-based resources (パワーエレクトロニ クスの材料科学) mtransmission、storage (バッテリ、pumped hydro、solar fuels)、が重要 であると述べた。最後に、TWチャレンジに向けて、demand management、new infrastructure と統合集積、policy、研究開発が、重要であるとまとめた。 (2) Marta Victoria (Aarhus Univ.) は、 "Synergies between Solar and Wind: the key to decarbonizing the European energy systemと題して、欧州のエネルギーシステム関する検討結果を述べた。検討結果の一例を図6に示す。ストレージ、インターコネクションやネットワークを含む風力、PVのシステムに関して、コストを仮定した、経済的最適化のモデル計算がなされている。



Results: sensitivity to wind and PV cost

Even for very cheap PV, no 100% solar system is optimum as it would requires large (expensive) battery capacity.

図 6. 風力とPVのコストと(M. Victoria et al., Progress in PV, 27, 483 (2019).)

(3) Keiichi Komoto (みずほ情報総研)は、"Decarbonizing Transport: IEA/PVPS Task17 PV and Transport "と題して、輸送分野の低炭素化について言及した。IEA/PVPSのタスク17の活動状況やNEDOの「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」の活動状況を述べた。



図 7. 代表的走行パターン (NEDO「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」中間 報告書。www.nedo.go.jp/english/index.html)

表 5. 自動車ユーザーの代表的使用パターン(NEDO「太陽光発電システム搭載自動車 検討委員会」中間報告書。www.nedo.go.jp/english/index.html)

Pattern	Туре	Driving distance per journey (km)	User image
	A-1: Long-distance weekend leisure	150 km for 2 days (Sat. and Sun.)	Use only on weekends (Sat./Sun.) for visiting distant locations for leisure, etc.
A. Weekend use	A-2: Short-distance weekend leisure	50 km for 2 days (Sat. and Sun.)	Use only on weekends (Sat./Sun.) for visiting nearby locations for leisure, etc.
B. Weekday	B-1: Active use	50 km for 4 days (Mon., Wed., Fri., and Sun.)	Use actively on weekdays and weekends
/weekend use	B-2: Suburban use	5 km for 4 days (Mon., Wed., Fri., and Sun.)	Use for visiting shops and local destinations, on weekdays and weekends
C. Weekdey use	C-1: Long-distance commuting	50 km for 5 days (weekdays)	Use only on weekdays for commuting to distant workplace, etc.
C. Weekday use	C-2: Short-distance commuting	15 km for 5 days (weekdays)	Use only on weekdays for commuting to nearby workplace, etc.

Table 2-1 Representative car usage patterns and user images for evaluating introduction of onboard PV

NEDO「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」の調査活動の成果の一例として、 図7に、代表的走行パターン、表5に、自動車ユーザーの代表的使用パターンを示す。PV 充電ステーションやpv-powered vehicleの開発等、輸送分野へのPV導入により、CO₂削減や PV市場の飛躍的拡大が期待される。太陽光発電は、電力部門に比べて、運輸部門では、少 し遅れて成長するが、C. Breyerグループの試算によれば、2050年のPV要求80TWのうち、 電力部門22TW、運輸部門19.1TWと、同等の導入が期待される。新しいサービスとして、 V2G(vehicle to grid)、V2H(vehicle to home)I2H(Infrastructure to home)、プラス、PV-powered vehicles to Xが、あると述べた。

(4) Matt Stocks (ANU) は、"Renewable Electricity as an Enabler of Urban Decarbonisation" と題して、space coolingやheatingに対する再生可能エネルギーの貢献に関する検討結果を 述べた。地球温暖化の影響で、coolingの要求が増えており、solar PVが適合する。一方、space heatingは、solar PVとマッチしない。冬場には、wind speedは強く、風力がマッチする。

(5) Christian Breyer (LUT Univ.) は、"Decarbonizing Industrial Processes – the how stuff" と題して、工業界のCO₂放出の現状と将来を述べた。工業界のCO₂放出は、27%を占める。 化学工業界では、2050年に、25,000TWh_{el}になろう。メタノールやアンモニア(green hydrogen)が、担おう。セメント業界では、REベースの天然ガスや水素が、燃料置き換え になるだろう。鉄鋼、スチール業界では、2050年に、5,000TWh_{el}になろう。CO₂放出は、 避けられるだろう。green hydrogenが、担おう。Al業界では、2050年に、2,000TWh_{el}になろ う。REベースの天然ガスやgreen hydrogenが、担おう。パルプ、紙業界では、CO₂放出は、 避けられるだろう。REベースの水素が、担おう。図5に示したように、PVは、2050年には、
 一次エネルギーの69%を占めるだろう。工業界全体で、2050年には、25,000TWhelになるが、
 70%は、Solar PVが担うことになろう。

5.0.3 Special Session-2:

タンデム太陽電池は、今後の研究開発の一翼を担うと期待されており、"Battle Royale on Hybrid Tandem Solar Cells"と題して、特別セッションが行われた。

(1) Marko Jostら (Univ. Ljubljana) は、 "Perovskite/CIGS Tandem Solar Cells – Can they catch up with Perovskite/Si tandems? "と題して、ペロブスカイトベースのタンデムセルについて、講演した。



図 8. Best Research-Cell Efficiency Chart (NREL): https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

図8に示すように、perovskite/Si、perovskite/CIGSタンデム太陽電池の最高効率は、HZBの29.1%、24.2%である。ボトムセルとして、Si、CIGSは、バンドギャップが1.1eV、 それぞれに特長がある。多くの結晶Si太陽電池は、表面テクスチャ構造で、CIGSは、rough な表面なので、ペロブスカイトトップセルのHTL膜を堆積するのが課題である。 perovskite/CIGSタンデム太陽電池において、原子層堆積NiOx 膜(約10nm)を用いること で、効率21.6%が得られている。Self assembly monolayer (SAM)も検討されている。 Dip-coating MeO-ZPACzのSAMを用いることで、ボトムセル効率17%のCIGSとバンドギャッ プ1.68eVのペロブスカイトのタンデムで、HZBにより、効率24.2%(Jsc~19.5mA/cm²、Voc ~1.76V)が、得られている。低シャント抵抗のため、曲線因子FFが低いが、課題である。 シミュレーションもされていて、perovskite/double texture Si、perovskite/back texture Si、perovskite/CIGSeタンデム太陽電池で、効率、各々、32.5%(Jsc~20.6mA/cm²、Voc ~1.97V、FF~0.80)、31.4%(Jsc~20.01mA/cm2、Voc~1.96V、FF~0.80)、31.0%(Jsc ~19.7mA/cm²、Voc~1.97V、FF~0.80)を試算している。

(2) Frank Dimrothら (FhG-ISE) は、"34.1% GaInP/AlGaAs//Si Tandem Cell"と題して、 高効率GaInP/AlGaAs/Siタンデムセルについて、講演した。2017年に、効率31.4%、2018年、 33.3%を達成していたが、今回、効率34.1%(面積3.987cm²、Jsc=12.4mA/cm²、Voc=3.177V、 FF=86.4%)を達成したことを報告した。III-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、図9に示すように、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。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 AlGaAs 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。さらなる高効率化を目指して、AlGaAsミドルセルに代えて、 GaInAsPミドルを検討中である。これにより、ミドルセルのJscを39.4mA/cm²から40.2mA/cm² に改善し、200μm厚Siボトムセルで、Jscを42.9mA/cm²に改善する予定である。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。



図 9. The 2020 Photovoltaic Technology Roadmap (J. Phys. D: Appl. Phys. 53 (2020).)

(3) Zhengshan J. Yuら (ASU) は、 "Blade-coated Perovskite on Textures Si for 26% Perovskite/Si Tandem Solar Cells"と題して、Perovskite/Siタンデムセルについて、講演した。
図8に示すように、perovskite/Siタンデム太陽電池の最高効率は、HZBの29.1%である。
今回、効率26.2% (Jsc=19.2mA/cm²、Voc=1.82V、FF=75.3%)を達成したことを報告した。
これまで、トップセル/ボトムセルのJsc=18.2mA/cm²/18.1mA/cm²で、効率24.0%だったが、
反射低減のため、光散乱層、blade coating (サブミクロンのピラミッド構造) が、採用され、

19.3mA/cm²/19.4mA/cm²に改善されている。構造は、ペロブスカイトCs_{0.1}MA_{0.4}Pb(I_{0.9}Br_{0.1})₃/ 結 晶 Si ヘ テ ロ 接 合 の Si タ ン デ ム 太 陽 電 池 で 、 PDMS/Ag/ITO/SnO₂ C₆₀/PTAA/ITO/a-Si:H(n⁺)/a-Si:H(i)/n-Si/a-Si:H(i)/a-Si:H(p⁺)/ITO/silica/Ag、からな る。

(4) Daniel Lepkowskiら (OSU) は、"Loss Analysis and Design Strategies Enabling >23% GaAsP/Si Tandem Solar Cells "と題して、直接成長GaAsP/Siタンデムセルについて、講演し た。直接成長III-V/Siタンデムセルの課題の一つは、転位密度である。2019年には、転位密 度2x10⁷ cm⁻²で、効率22%だったが、今回、転位密度1x10⁷ cm⁻²で、効率23.35%(面積1.026 cm²、Jsc=17.792mA/cm²、Voc=1.732V、FF=77.7%)を達成したことを報告した。構造は、 GaAsP (1.72eV) /A1-BSF結晶SiのSiタンデム太陽電池で、n⁺-AlInP window/n⁺-GaAsP emitter/p-GaAsP base/p⁺-GaInP BSF/p⁺/n⁺ (Al)GaInP tunnel junction/GaAs_vP_{1-v} graded buffer/n+-GaP nucleation window/n+-Si emitter/p-Si base substrate/p+-Si BSF/Al, אין らなる。効率改善は、転位密度低減、FF改善、電流整合による。面積4 cm²で、効率22.99% が得られている。GaAsおよびSi上のGaInPサブセルの特性比較がなされている。Si上の GaAsP(転位密度2x10⁷ cm⁻²)セルは、Voc=1.16V、Jsc=11.9mA/cm²、FF=79.2%で、GaAs 上のGaAsP(転位密度2x10⁶ cm⁻²)セルのVoc=1.284V、Jsc=14.0mA/cm²、FF=86.0%に比べ て、Voc 124mV、Jsc 2.1mA/cm²、FF 6.8%、劣る。最近、転位密度3x10⁶ cm⁻²が、得られて いる。報告者らのモデル(M. Yamaguchi et al. J. Appl. Phys. 59, 1751 (1986).)が引用され、 転位密度3x10⁶ cm⁻²では、理想的には、効率31%、最適、効率27~29%が得られるであろう とまとめた。

(5) Shizhao Fanら (Univ. Illinois) は、"25%-Efficient Epitaxial GaAsP/Si Tandem Solar Cells"と題して、直接成長GaAsP/Siタンデムセルについて、講演した。直接成長III-V/Si タンデムセルの課題の一つは、転位密度である。2019年には、転位密度2x10⁷ cm⁻²で、効率22%だったが、今回、転位密度1x10⁷ cm⁻²で、効率23.35% (面積1.026 cm⁻², Jsc=17.792mA/cm²、 Voc=1.732V、FF=77.7%) を達成したことを報告した。構造は、GaAsP (1.72eV) /A1-BSF 結晶 Si の Si タンデム太陽電池で、n⁺-AlInP window/n⁺-GaAsP emitter/p-GaAsP base/p⁺-GaInP BSF/p⁺/n⁺ (A1)GaInP tunnel junction/GaAs_yP_{1-y} graded buffer/n⁺-GaP nucleation window/n⁺-Si emitter/p-Si base substrate/p⁺-Si BSF/A1、からなる。効率改善は、転位密度低減、FF改善、電流整合による。面積4 cm⁻²で、効率22.99%が得られている。GaAsおよびSi上のGaInPサブセルの特性比較がなされている。Si上のGaAsP (転位密度2x10⁶ cm⁻²) セルのVoc=1.16V、Jsc=11.9mA/cm²、FF=79.2%で、GaAs上のGaAsP (転位密度2x10⁶ cm⁻²) セルのVoc=1.284V、Jsc=14.0mA/cm²、FF=86.0%に比べて、Voc 124mV、Jsc 2.1mA/cm²、FF 6.8%、劣る。最近、転位密度3x10⁶ cm⁻²が、得られている。報告者らのモデル (M. Yamaguchi et al. J. Appl. Phys. 59, 1751 (1986).) が引用され、転位密度3x10⁶ cm⁻² では、理想的には、効率31%、最適、効率27~29%が得られるであろうとまとめた。

5.1 基礎·:新概念分野:

(1) Shanhui Fan (Stanford Univ.) は、 "Thermodynamics of light and the implication for harvesting solar energy and the coldness of the universe" と題して、プレーナリ講演を行った。

図10に、種々のケースのエネルギーハ ーベスティングのSQ (Schokley-Quisser) limitを示す。太陽放射からのエネルギー ハーベスティングの効率限界、SQ limit は、図10aに示すように、また、M. Green の「第3世代太陽電池」でも、述べられ てように、40.7%である。同様に、 Blackbody (thermo-photovoltaic) 、 Multi-color (Multi-junction)、Landsbergの thermodyanamic limitは、各々、85.4%、 86.8%、93.3%である。以下、図10b、 c、d、e、fのケースのthermodyanamic limitが、述べられている。結果をまとめ て、表6に示す。

実用的なアプローチもなされている。 図11に示すように、 α 石 英 /SiC/MgF₂/TiO₂/Agから成るフォトニッ ク構造を用いることで、環境温度で、正 味100W/m²を超える冷却能力を得ている。



equilibrium temperature of 2601 K 図10. 種々のケースのエネルギーハー ベスティングのSQ効率限界(W. Li et al., Light Science and Application, 9, 68 (2020).

illumination and negative illumination. The system is thermally insulated from the ambient environment, and the temperature is purely determined by the radiative heat exchange, with an 表 6. 種々のケースのエネルギーハーベスティングシステムのthermodyanamic limit (W. Li et al., Light Science and Application, 9, 68 (2020).)。.

Table 1 Summary of simultaneous energy harvesting systems and a comparison with systems that only utilize one resource

	Shockley–Queisser	Multicolor	Blackbody	Landsberg
Positive illumination @ 300 K	40.74%	86.8%	85.4%	93.3%
Negative illumination @ 300 K	54.8 Wm ⁻²	55.0 Wm ⁻²	48.4 Wm ⁻²	153.1 Wm ⁻²
Positive illumination + radiative cooling	40.53%	89.67%	88.36%	95.9%
Negative illumination + solar heating	86.99%	88.71%	88.36%	24.99%
Positive illumination + negative illumination	86.99%	90.01%	88.36%	97.21%
Positive illumination + negative illumination @ 300 K	44.16%	90.08%	88.37%	102.89%



Figure 1. (a) Optimized daytime radiative cooler design that consists of two thermally emitting photonic crystal layers comprised of SiC and quartz, below which lies a broadband solar reflector. The reflector consists of three sets of five bilayers made of MgF₂ and TiO₂ with varying periods on a silver substrate. (b) Emissivity $\varepsilon(\lambda,0)$ of the optimized daytime radiative cooler shown in (a) at normal incidence (black) with the scaled AM1.5 solar spectrum (yellow) and atmospheric transmittance $t(\lambda)$ (blue) plotted for reference. The structure has minimal absorption throughout the solar spectrum and has very strongly selective emission in the atmospheric transparency window, as is desirable and necessary for a high-performance daytime radiative cooler.

図11. 金属-誘電体フォトニック構造による放射冷却 (E. rephaeli et al.. Nano Lett. 13, 1457 (2013).)

5.2 CIGS、CdTe、Ⅱ—Ⅵ化合物薄膜セル分野:

 (1) "Thin Film Chalcogenide Photovoltaics Roadmap 2020"と題して、パネル討論がなされた。パネリストは、W.K. Metzger (NREL)、L.M. Mansfield (NREL)、G. Xiang (First Solar)、
 B.J. Stanbery (Heloovolt)、X. Wu (Advanced Solar Power) であった。パネリストの主張の 要点は、表7~10にまとめられている。

表7.パネル討論の主張点(1

Current and Future Challenges

- CdTe
- Efficiency
- Carrier concentration
- Group-V dopants
- Front (p-n junction) interface
- Enhanced energy yield
- Carrier lifetime
- Back contact passivation/reflected field
- Transparent back contact for bifacial and tandem cells
- Critical mass

表8.パネル討論の主張点(2)

Advances Needed: Synthesis & Materials

Cross-Cutting

- Chemical passivation & field manipulation of buried interfaces
- Innovative materials for passivated carrier selective contact heterostructures

CdTe

- Improved dopant activation
- Enhanced bandgap engineering
- Nucleation methods for large grain growth w/o CdCl2
- New structure (n-type IBC)
- Transparent back contacts for tandem or bifacial module

CIGS

- High rate & uniformity
 - Absorber synthesis
 - Buffer deposition
- Ag alloying
 - SAS precursor inclusion
- S alloying
 - Co-deposition incorporation

表9.パネル討論の主張点(3)

Advances Needed: Characterizations

Cross-Cutting

- Metrologies for buried junction interfaces
 - Band alignment and carrier density
 - Recombination velocity
- Sensitive high-throughput and non-destructive metrologies to accelerate discovery
 - Recombination
 - Intra-grain potential fluctuations

- CdTe
- Correlation between defect chemistry and electronic states
- Characterizing growth and end states of unactivated dopants CIGS
- Rapid inter-grain homogeneity assessment
- More in-situ process control metrologies for absorber codeposition

- CIGS
 Efficiency gap cells/modules
 - Large-area uniformity
- Diffusion-limited process rates
- High throughput and yield process tools.
- Direct input materials utilization efficiency
- Alkali sequestration for meta-stability mitigation & long-term durability

表10.パネル討論の主張点(4)

Advances Needed: Theory

Cross-Cutting

- Interfacial defect chemistry/ electronic states correlations

- Phase segregation at grain boundaries and extended defects

CdTe

- Dopant/impurities (eg. Cl) interactions
- Dopant (de) activation mechanisms

CIGS

- (Ag,Cu)(In,Ga)(Se,S) alkali-doped alloy density states
 Ag/alkali interactions
 S crystallographic structure influence
- Secondary phase segregation threshold

(2) Andrea Cattoni (CNRS) の講演 "Ultra thin Cu(In,Ga)Se2 solar cells with Ag-based reflective back contact "が、会議のハイライトで紹介された。結論と展望を、表11に示す。

表11. 講演の結論と展望(本会議のハイライトより)

Conclusions and Perspectives

 Novel reflective back contact (RBC) for direct deposition of COGS (full passivation is still missing)

2) 500nm-thick CIGS on a RBC
 η = 13.5%, Jsc = 28.5mA/cm², Voc = 644mV, FF = 72.7%

(no ARC)

 \triangle Jsc = + 2.7 mA/cm², vs as compared to Mo

- 540nm-thick ACIGS ((Ag,Cu)(in,Ga)Se₂) on Mo
 η = 14.9%, Jsc = 24.5mA/cm², Voc = 741mV, FF = 81.8%
- 4) Light trapping designs compatible with RBC
 Jscth = 37.2 mA/cm² with 300nm thick CIGS



Figure 1 – SEM cross section of a 500 nm-thick CIGSe solar cell grown on RBC.

5.3 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野:

(1) Ignacio Anton (UPM) は、"Static Concentrator Modules with Integrated Tracking" と題して、プレーナリ講演を行った。III-V化合物の6接合セルでは、143倍集光で、世 界最高効率47.1%が達成されているが、集光技術は、100MW規模でも、\$2/Wの低コスト化が 可能だが、追尾が課題である。モジュールが動かないintegrated micro-tracking(追尾内 蔵型)が有望である。豊田工大(D. Sato et al., IEEE J-PV, 9, 147 (2019).)やパのソ ニックの検討例も紹介された。StaticとIII-VとSiの部分集光(Hybrid)の検討結果が紹介 された。Hybridでは、効率35.8%のIII-V3接合と効率20%の結晶Siが用いられている。



図12. 豊田工大のstatic部分集光の構成例 (D. Sato et al., Progress in PV, 27, 501 (2019).)

図12に、豊田工大のstatic部分集光の構成例を示す。マドリッド、パルムスプリングス (カルフォルニア)、ローザンヌ(スイス)の3地点での実証データ比較がなされている。 結晶Siに比べて、エネルギー密度(kWh/m²)比較で、マドリッド、パルムスプリングス、 ローザンヌで、staticは、各々、24%、39%、10%増、hybridは、各々、45%、55%、35% 増のデータが得られている。また、EUのHiperionプロジェクトも紹介された。9か月前に開 始され、2023年までのプロジェクトで、総予算13Mユーロ、UPM、FhG-ISE、Insolightなど、 16機関が参画している。パイロットラインの構築、リアルタイムの実証や技術開発がなさ れている。180倍集光で、屋外評価で、効率34.6%の実績である。今後は、屋根、EVや充電 ステーションなどへの展開を考えていると、まとめた。

(2) W. Metaferiaら(NREL)は、"Growth of Al Containing III-V Materials in Dynamic Hydride Vapor Phase Epitaxy"と題して、ハイドライド気相エピタキシィ(H-VPE)による 高速成膜、GaAsおよびGaInP単接合、GaInP/GaAs2接合タンデム太陽電池の状況を報告した。昨年9月の36th EU-PVSECのA.J. Ptakら(NREL)の講演"Status and recent results from the development of dynamic hydride vapor phase epitaxy toward low-cost, high-efficiency III-V solar cells"がまとまっているので紹介する。図13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 µ m/hr以上が可能である。



GaAs deposition > 300 µm/h [Gruter et al., JCG 94, 607 (1989)]

図13. ハイドライド気相エピタキシィ(H-VPE)と特長(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14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15、図16、図17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%の状況であった。今回、効率は、各々、25.5%(Voc=1.08V、 Jsc=27.8mA/cm²、FF=85.1%)、15.2%(Voc=1.35V、Jsc=13.0mA/cm²、FF=86.7%)、27% (AR つけた場合の期待値)に改善されている。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、 MOCV 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。特に、 GaInP セルは、窓層なしであり、窓層 AlInP 等の形成に向けて、Al ソースとして、AlCl₃ が、検討されている。また、図18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。



図14. 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)



図15. D-HVPE により成長された GaAs 太陽電池の特性(Dr. A.J. Ptak 提供)



図16. D-HVPE により成長された GaInP 太陽電池の特性(Dr. A.J. Ptak 提供)



図17. 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)



図18. HVPE による III-V2 接合太陽電池の低コスト化のシナリオ (Dr. A.J. Ptak 提供)

5.4 結晶Si太陽電池分野:

(1) Gabriela Bunea (GAF Energy) は、"It's time to Integrate Roof and Solar"と 題して、プーナリ講演を行った。GAF Energyの紹介がなされた。2019年の創業で、米国 Standardの傘下企業の一つである。約180の製造施設(欧州126、北米30、アジア、アフリ カ28)と3つの研究開発センターがある。米国では、3,200名の従業員がおり、米国の住宅 用の屋根の1/4は、GAFによるとの事である。PV一体型屋根に関しては、PVは、金属レール の上に設置される。屋根の欠損部分への設置には、注意を要する。屋根水のリークも、PV 設置の課題となる。グループ企業BMIのドイツのおける屋根一体型結晶Siパネル設置例も紹 介された。GAFは、①Direct to deck、②Utilize roofing best practices、③Integrated and interlocking panels、④Water shedding、⑤Class A Fire、⑥Aesthetics、⑦Simple design、⑧Warrantyに。留意している。屋根一体型PVは、PV/Shingles/Protective underlayments/Roof deck、からなる。裏面の保護材も含むキットとして、出荷および摂津 を容易にしている。最後に、これまでのものに比べて、 GAF Energy は 、 ① Convenience、②Beauty、③Protection、④Reliability and warranty、⑤Support、⑥ Expertise、に優れているとまとめた。

(2)本会議のハイライトとして、S. Singh(IME)Cの"Development of 2-sided polysilicon passivating contacts for co-plated bifacial n-PERT solar cells"が、紹介された。
 Ni/Agの両面メッキを用いた両面passivating contactsによるn-PERTで、低損傷laser ablation、platingプロセスで、低コンタクト抵抗(<1mΩcm²)を実証している。

(3) R. Woods-Robinson (UC Berkley)の "Evaluating materials design parameters of hole-selective contacts in Si HJ solar cells and nickel oxide base case study"も、 本会議のハイライトとして紹介された。Siヘテロ接合太陽電池のp-type top contactの寄 生光吸収の低減に向けたシミュレーションがなされ、NiOxのケーススタディによるp層設 計がなされ、FF向上の指針を得ている。

(4) S. Jafari (UNSW) の "Boron-oxygen related light-induced degradation in Si solar cells: Transformation between minority carrier trapping and recombination active centers" も、本会議のハイライトとして紹介された。B-0関与欠陥が、結晶Si太陽電池の 光劣化に関与していることは、良く知られている。今回、BドープCZ-Siの光劣化後に除去 されるアニール状態のトラップがあり、B0欠陥の前駆体として働き、B0欠陥が発生すると、 このトラップは、同じレートで除去される。ドーピング依存性の測定から、トラップは、 ーつ以上のレベルを持つ、などの興味ある知見が得られている。

5.5 キャラクタリゼーション:

(1) Teresa Barnes (NREL) は、"DuraMAT: Leveraging field data, advanced characterization, multi-scale modeling, accelerated testing and material development to improve module reliability" と題して、プレーナリ講演を行った。DuraMAT (Durable Module & Materials Consortium) は、米国の4つの国立研究所 (NREL、サンディア研、バークレー研、SLAC) の太陽電池モジュールの信頼性に関わるコンソーシアムである。2016年9月15日からの5年間のプロジェクトで、DOE予算は、\$ 30Mである。大学、企業も、国研と連携して、参画している。モジュールの劣化率は、0.5~0.7%/年に対して、システムの劣化率は、0.6~0.8%/年で、近年、1.0~1.3%/年と、モジュールの倍の劣化率となっている。図19は、PV の累積導入量、設置2年以下の比率、保証の年数を示す。Fieldの大部分のモジュールは新しく、一方、製造開発サイクルは、速い。太陽電池モジュールは、PERCからヘテロ接合、bifacialと、高効率化、低コストの方向性で、新しい劣化メカニズムも出てくる。セルレベルの劣化として、セルクラック、PID (potential-Induced Degradation) 、LeTID (Light and

elevated Temperature Induced Degradation)、grid finger corrosion & delamination、などがあ る。モジュールレベルの劣化として、バックシートクラックや湿気侵入、バイパスダイオ ードやJ-Box劣化、などがある。システムレベルの劣化として、インバーターやトラッカー の劣化、他のBOS劣化、shading、soiling、などがある。データやセンサーの質も重要であ る。図20に、DuraMATの主要目的を示す。個々の取り組みの状況が紹介された。最後に、 ①ビッグデータ分析、高性能計算機、最先端のキャラクタリゼーションや加速試験法を組 み合わせることで、太陽電池モジュールやシステムの信頼性改善の習熟サイクル時間を短 縮できるだろう、②信頼性に関わる課題の明確化と新材料探査の習熟サイクルのスピード アップをはかることで、迅速に、材料ソリューションを開発できるだろう、とまとめた。 詳しくは、DuraMAT FY2019 Annual Report (NREL/BR-SK00-77076) を参照されたい。



Figure 1. Cumulative installed PV capacity from 1976 to 2019 (blue, left axis). Percentage of installations installed for 2 years or less (red, right axis) and longest warranty (green, rightmost axis).

図19. PVの累積導入量、設置2年以下の比率、保証の年数 (J. Phys. D: Appl. Phys. 53 (2020).)



図20. DuraMATの主要目的 (DuraMAT FY2019 Annual Report, June 2020, NREL/BR-SK00-77076)

5.6 ペロブスカイトおよび有機太陽電池分野:

(1) Michael D. McGeheeら (Stanford Univ.、CU、NREL、ASU) は、"Perovskite-Si tandem solar cells: Band gap tuning of Perovskite semiconductors and insights from a device

simulator that includes affects associated with mobile ions"と題して、extended oral 講演を行った。Siタンデム太陽電池が最近のトピックスの一つとなり、その一つに、ペロ ブスカイト/Siタンデム太陽電池がある。



Fig. 2 | Losses in wide-bandgap perovskite solar cells. a, Spectral

図 2 1. ペロブスカイト太陽電池のバンドギャップとVoc損失 (T. Lejtens et al., Nature Energy, 3, 828 (2018).)



講演では、Siボトムセルとのタンデム太陽電池のアプローチが紹介された。トップセル 太陽電用トップセルの候補として、CH₃NH₃PbI₃(Eg=1.6eV)、CH₃NH₃PbBr₃(Eg=1.6eV)、 CH(NH₂)₂P b I₃(Eg=1.48eV)、CH(NH₂)₂P b Br₃(Eg=1.48eV)、の化合物があった。トップ セル用として、バンドギャップ1.68eV程度が、必要だが、図21に示すように、ペロブス カイト太陽電池のバンドギャップの増加と共に、Voc損失が増える。Cs_xFA_{1-x}Pb(Br_yI_{1-y})₃ + z% MAPbCl3が、検討されている。Brは、格子収縮し、Clを格子に入りやすくしているようで、 Cl添加により、Eg増と欠陥の不働態化に移動度改善が期待できる。1.67eVのペロブスカイ トトップセルとアリゾナ州立大学の単結晶Siへテロ接合ボトムセルのモノリシック構造2 接合タンデム電池(1cm²)で、図22に示すように、効率27.1%(Voc=1.89V、Jsc=19.1mA/cm2、 FF=75.3%)が得られている。効率30%の実現の可能性がある。ASUでは、ITOの寄生光吸 収低減、裏面テクスチャによるlight trapping、Siナノ粒子による裏面反射が検討されている。 ペロブスカイト単接合太陽電池の85℃、85%の窒素雰囲気中、85℃、1000時間の試験では、 効率の96%は維持されているが、窒素雰囲気中1-sun照射下では、60℃、800時間の試験で も、約30%の劣化が、起こっている。金属一ハライドの反応よるものと考えられ、改善が 必要である。

(2)この他、ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池については、Special Session 5.0.3
 の(1)および(3)を参照されたい。

5.7 宇宙用太陽電池およびシステム分野:

Jim Kinnison (Johns Hopkins Univ.) は、"Parker Solar Probe: A Mission to Tough the Sun"と題して、プレーナリ講演を行った。まず、太陽探査の歴史が、概説された。1958 年のNASAの提案に始まり、1958年~2007年の50年にわたる概念研究(Solar Probe)がなさ れた。2007年に、"Solar Probe Plus"と命名され、フライト・プロジェクトとなった。 2008年7月から、10年間、Pre-Phase、Phase A~Dのミッション開発がなされた。2017年に "Parker Solar Probe"と、名称変更された。太陽探査の科学的目標として、①太陽 は、 風の元となる磁場の構造と変遷、②太陽コロナを熱するエネルギーの流れと太陽風の加速 の追跡、③エネルギー性粒子の加速と運搬の仕組み、④太陽周辺の多粒子プラズマ、その 太陽風への影響、がある。これまでのミッションは、太陽高度Rs(太陽半径)、63以遠だ ったが、Rs~10を目指す。高光強度(~475-sun)、高温、放射線、charging、電磁干渉、 などが、課題である。2018年8月12日に、ケネディ宇宙センターから打ち上げられた。近世 軌道のやや外側を航行する楕円軌道で、接近通過を繰り返し、2024年12月24日には、9.86Rs の最近接点(590万km)の予定である。ペイロードは、1.0mx3.0mx2.3m、約50kgである。耐 熱シールドは、炭素繊維強化炭素複合材料で作られており、1370℃に耐える。探査システ ムや観測機器は、太陽の直接入射を避け、耐熱シールドの影の部分に配置されている。太 陽電池アレイも二対あり、直接と間接に、使い分ける。太陽電池アレイは、III-Vの3接合 太陽電池で、ITOコートCeドープボロシリケートガラス(厚さ0.5mm)/DC 93-500(0.1mm) /太陽電池(0.14mm)/CV-2942シリコーン(0.15mm)/ceramic electric insulator and thermal conductor/ CV-2942シリコーン (0.15mm) /水冷Ti基板 (3.05mm) 、で構成されている。

これまで、5回、観測を実施している。最初の観測結果のいくつかが紹介された。35太陽 半径(2434万キロメートル)付近で観測された太陽の自転に沿って回転する太陽風の速度 が、これまでの標準的なモデルで考えられていた毎秒数km/sの20倍にも達する35-50 km/s に及ぶことが報告された。この観測結果は、太陽の自転速度低下に関する従来の予想や、 コロナ質量放出の予測精度に影響を与える可能性があるとの事である。また、36-54太陽 半径(2505万-3757万km)の距離からの観測により、黄道面に近い低緯度領域で見られる 低速太陽風の発生源が、赤道付近の小さなコロナホールであることを示す結果を得ている との事である。

5.8 モジュール、製造、分野:

(1) Itai Suezら(Silfab Solar)は、"The Emergence of Back-Contact, Electro-Conductive Backsheet (ECBS) PV manufacturing Technology"と題して、プレー ナリ講演を行った。同社が開発した導電性バックシート(ECBS)を用いた太陽電池モジュ ール技術に関するものである。メタルラップスルーバックコンタクト太陽電池モジュール で、p型PERCの技術基盤が使える。①高出力密度、②自動化、回路のカスタマイズが可能、 ③熱・機械的ストレスが軽減できる、④熱特性が良い、などの利点を述べた。図23に、 ITRPV 2020によるセル技術およびインターコネクション材料の動向予測を示す。ITRPVは、 保守的だが、2024年には、ECBSを用いたバックコンタクトセルモジュールは、130GWの5%、
5GWの市場が期待できる。セルサイズは、M12(210mmx210mm)の試みもあるが、2022年に は、M6(166mmx166mm)が、35%のシェアを占めよう。





(www.itrpv.vdma.org)



Different Cz-mono-Si wafer sizes

図24. ITRPV 2020による単結晶Siウエハサイズの動向予測

(www.itrpv.vdma.org)

同社の検討状況が報告された。ECBS/G1の太陽電池モジュールは、効率20.5%、出力密度 19.0W_p/ft₂で、IBC/M4の効率20.8%、出力密度19.4W_p/ft₂に匹敵する。特性の温度係数も、 -0.4%/℃である。通常のセルインターコネクションは、220℃以上のsolderが必要だが、 ECBSセルでは、150℃の形成温度で済む。Dynamic mechanical load試験(25℃、1000Pa、 1000サイクル)、TC50(-40℃~85℃で、50サイクル)、-40℃~80℃、85% RHでの10サイ クル試験、を実施し、パスしている。最後に、①ECBS太陽電池モジュールは、多くの利点 があり、GWスケールの生産に適している、②JVのPharos Solarが、北米で事業、③他のモ ジュールより高出力、④設計、自動化が容易、⑤通常のモジュールより、熱・機械的スト レスの点で、有利、⑥特性も、温度係数を含め、高価なヘテロ接合太陽電池に匹敵する、 とまとめた。

5.9 信頼性分野:

(1) Arathi Gopinath (Next Tracker) は、"Reactive versus proactive in the air mass solar deployment: re-imaging"と題して、プレーナリ講演を行った。大規模太陽光発電 所は、気象に影響されるが、特に、維持管理が、重要であると述べた。最後に、Asset Managementとして、①Field Automation1、②Advanced Controls (lot of energy)、③ Interactive Grid Integration、④Manage Cost to Serve vs. Value of Production、⑤ Site Cyber Security、⑥Integration with Storage Systems、⑦Improving Asset Production on Existing Plants、とまとめた。

(2)本会議のハイライトとして、Dirk Jordan (NREL)の講演が紹介された。太陽光発電 システムの80~90%は、想定通り稼働しており、太陽電池モジュールの故障は、0.02~0.2% と低い。インバーターに起因する故障が見られ、installation qualityが信頼性に影響を 与えているケースもあるとの事である。

5.10、11 PVシステム、パワーエレクトロニクス、系統連系、応用、日射量測定、予測分野:

5.12 政策、市場、普及分野:

3 セッションのジョイントで、特別セッション "Towards 100% Renewable Energy"が、 開催された。5.0.2 Special Sessionを参照されたい。

6. 感想

今回、コロナウイルスの影響で、virtual conferenceとなった。何度も、講演を見える し、講演スライドのコピーも可能で、メリットも感じられるが、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。本会議のno photo、no recordの精神が損なわれている と、本会議の上級委員会(Cherry Committee)でも、議論となった。

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。

特別セッション" "Towards 100% Renewable Energy""に示されたように、TWスケー ルに向けては、コスト、信頼性の継続的追求、材料利用の有効性、PVの循環技術、材料効 率の向上とyield、ストレージの役割、インフラの統合集積、が重要である。TWスケールに なると、PV廃棄物の増大やend of life マネージメント設計に関するcircular economy、Ag使 用削減や置き換えやリサイクルなど、材料の有効利用、投資や成長に関わるsustainableが、 需要になってくる。車載等用途開発やSiタンデムを含む効率35%超えの超高効率太陽電池 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。信 頼性やリサイクル等も課題である。

次回の48th IEEE PVSCは、2021年6月19日~24日、米国のマイアミで開催予定である。次々 回の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。 36th EU-PVSECは、2020年9月7日~11日、ポルトガルのリスボンで、開催予定であったが、 新型コロナウイルスの影響で、Virtual Conferenceになる予定である。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。

(以上)