

第7回太陽光発電世界会議（7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion）報告

2018. 6. 21

山口真史（豊田工大）

1. 開催月日：2018年6月10日～15日

2. 開催場所：Hilton Waikoloa Village（ハワイ、米国）

3. 本会議の概要：4年毎に開催される太陽光発電に関する世界会議で、今回は、米国がホストで、45th IEEE PVSC、PVSEC28、34th EU-PVSEC との合同会議である。今回の会議の組織委員長は Alex Freundlich（ヒュースト大、米国）で、副委員長は Akira Yamada（東工大、日本）と Marko Topic（リュブリャナ大、スロベニア）、論文委員長は Sylvain Marsillac（オールド・ドミニオン大、米国）で、副委員長は Yoshio Ohshita（豊田工大、日本）と Wim Sinke（ECN、オランダ）であった。

63 カ国から 1,304 名の参加者があった。ハワイ開催で、米国本土から参加者は、減ったが、他の国からの参加者は増え、世界会議開催の意義は大きい。また、太陽光発電に対する大きな関心と関連分野に参画する人々の増加も反映していると思われる。図1に、国別参加者数を示す。事前登録 1,220 名のデータを紹介する。国別では、①米国 524 名（前年 752 名）、②日本 143 名（前年 105 名）、③ドイツ 105 名（前年 59 名）、④オーストラリア 75 名（38 名）、⑤中国 65 名（34 名）、⑥韓国 56 名（27 名）、⑦英国 37 名（30 名）、⑧台湾 36 名、⑨インド 34 名（31 名）、⑩オランダ 27 名（20 名）、⑪フランス 25 名（30 名）、⑫イタリア 19 名、⑬シンガポール 13 名、の順であった。

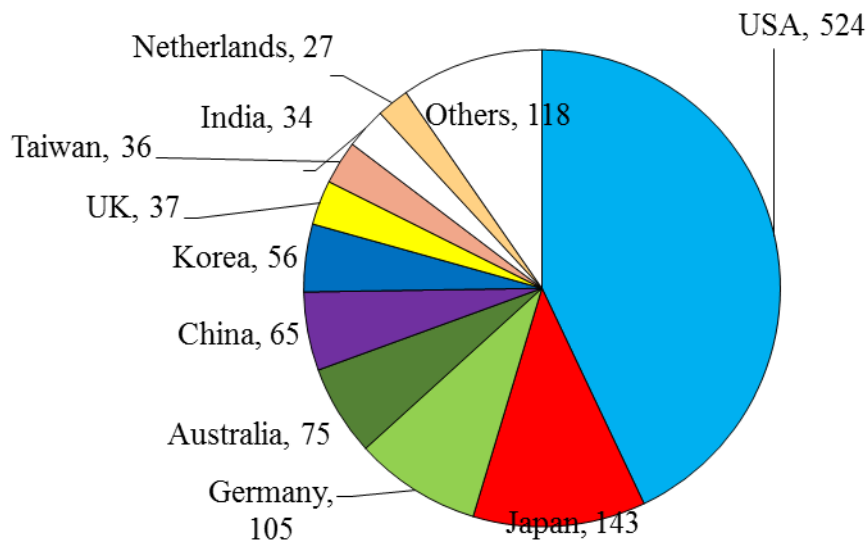


図1. 国別参加者数（Prof. A. Freundlich提供）

図2は、国別発表論文件数を示す。61カ国から、1400件を超える論文投稿があり、1224件の論文発表があった。国別では、①米国436件（前年499件）、②日本118件（前年61件）、③ドイツ107件（前年44件）、④中国67件（41件）、⑤オーストラリア65件（29件）、⑥

韓国57件（）、⑦インド40件（35件）、⑧台湾33件（26件）、⑨英国31件（20件）、⑩オランダ26件（14件）、⑪シンガポール20件、⑪フランス20件（23件）、の順であった。

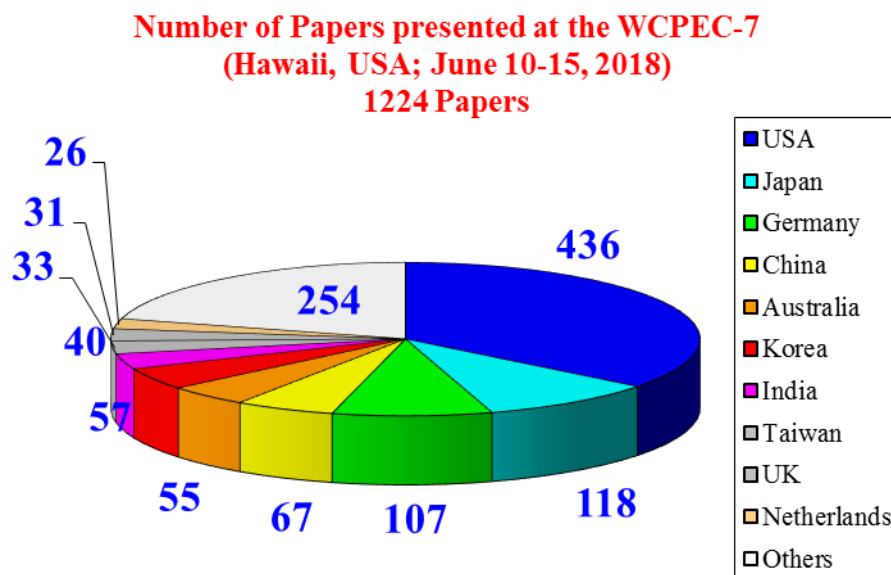


図 2．国別発表論文件数（RTS提供）

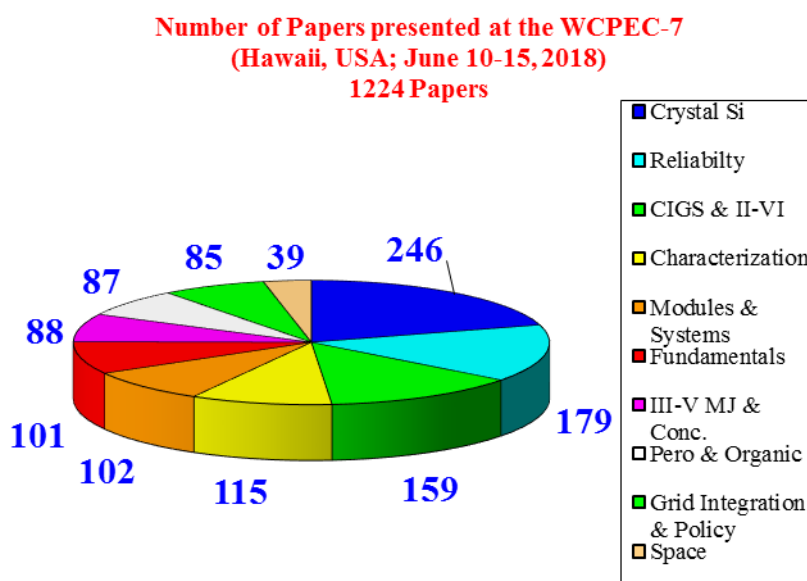


図 3．発表論文件数の分野別内訳（RTS提供）

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246件（前年182件）、②AREA9：信頼性および発電量予測179件（前年112件）、③AREA 2：カルコゲナイド化合物薄膜系（CIGS、CdTeおよびII-VI族）159件（前年134件）、④AREA5：キ

キャラクターゼーション102件(89件)、⑤AREA8:モジュール、システム102件(95件)、⑥AREA 1:基礎および新概念101件(93件)、⑦AREA 3:III-V多接合および集光88件(99件)、⑧AREA 6:ペロブスカイト、有機太陽電池87件(54件)、⑨AREA 10:系統連携および政策85件(83件)、⑩宇宙用太陽電池およびシステム39件(31件)、の順であった。

4. 各賞受賞者の紹介と受賞記念講演

(1) World Photovoltaic Energy Award:

WCPEC Award ChairであるL. Kazmerski (NREL) より、WCPEC Awardの経緯、受賞者D. Flood (Natcore Co.) が、紹介され、受賞理由が説明された。宇宙用太陽電池およびシステムの研究開発および推進、WCPEC創立の立役者の一人であり、1994年に開催されたWCPEC-1の組織委員長としての貢献も評価された。受賞記念講演として、宇宙用太陽電池、アレイ、システム技術の進展と同氏の貢献が述べられた。また、WCPEC創立の経緯、国際連携の苦労話も紹介された。

(2) 2018 IEEE EDS Celebrated Member :

IEEE EDSのPresidentであるF. Guarinから、IEEE EDS Celebrated Memberの意義、これまでのメンバーが紹介された。ノーベル物理学賞受賞者G.E. Smith, H. Kroemer、L. Esaki など、著名なメンバーが紹介された。2018 IEEE EDS Celebrated Member として、M. Green (UNSW) が選ばれた。同氏から、受諾記念講演がなされた。特に、結晶Si太陽電池の高効率化に関する貢献や人材育英、中国の太陽電池企業の発展への貢献が、述べられた。

(3) William Cherry Award :

IEEE EDSのPresidentであるF. GuarinからCherry Awardの経緯、Cherry Award ChairであるC. Honsberg (ASU) より、今回のWilliam R. Cherry Awardの受賞者V. Fthenakis (Columbia Univ.) の紹介と受賞理由が述べられた。同氏のLife cycle assessmentの取り組み、PVを含む再生可能エネルギーの導入予測の難しさ、今後の人類の最重要課題であるエネルギーへの貢献への期待が述べられた。

(4) PVSEC Award :

PVSEC Award ChairであるM. Yamaguchi (豊田工大) から、PVSEC Awardの経緯、今回の受賞者であるT. Wada (龍谷大)、D. Kim (Korea Univ.) の紹介と受賞理由が述べられた。

受賞記念講演として、T. Wadaは、長年のCIGS太陽電池・材料への貢献、特に、松下(現パナソニック)での、組成モニタリングを併用した3段階プロセスによる高効率(17.6%)の実現が、述べられた。最近では、Mo/CIGS界面、CdS/CIGS界面の実験的、理論的解析、CIGS系やCZTS(Se)系の欠陥の形成エネルギーや移動エネルギーの計算で、貢献している。また、昨年11月のPVSEC-27の組織委員長等として、学会活動にも貢献している。

D. Kimは、スタンフォード大時代のp型ドーピングによる高効率(12%)CdTe太陽電池の実現、Korea Univ.でのTopCon結晶Si太陽電池で、高効率(22%以上)の実現の例が紹介された。また、Korean Photovoltaic Development Organization (KPVDO)のPresidentとして、韓国

のPVのR&Dプロジェクトや産業の育成に貢献している。2009年のPVSEC-19の組織委員長や2012年のKorean Photovoltaic Society (KPVS)の設立にも貢献している。

5. 本会議のトピックス

プレーナリを中心に、本会議のトピックスを紹介する。

5.0-1 基調講演：

(1) L. Kazmerski (NREL) は、“Pivotal Moments of PV History: Vanguard and Cherry Hill”と題して、基調講演を行った。太陽電池の歴史が紹介された。太陽電池のアイデアは、1940年2月23日のベル研のRussel Ohlであり、現在の太陽電池の原型の発明は、1954年4月26日のベル研のD. Chapin、C. Fuller、G. Pearsonによるが。1958年3月17日打ち上げのバンガード1号(1.47kg)以来の衛星用から始まり、灯台や無線中継所、過疎地、住宅用や最近の系統連携に至り、導入量が飛躍的に伸びている。バンガード1号では、化学電池が主電源だったが、わずか5日で、使えなくなり、太陽電池の有効性が認識された。太陽電池の技術開発の先駆者の一人であるMorton B. Princeの談話も紹介された。太陽光発電は、間違いなく、将来の主電源、主エネルギーになるであろう。我々は、将来を守るのは当然だが、将来を創造する必要がある、とまとめた。

(2) J. Vasi (IIT Bombay) は、“Global Co-operation in Photovoltaic through the International Solar Alliance”と題して、基調講演を行った。

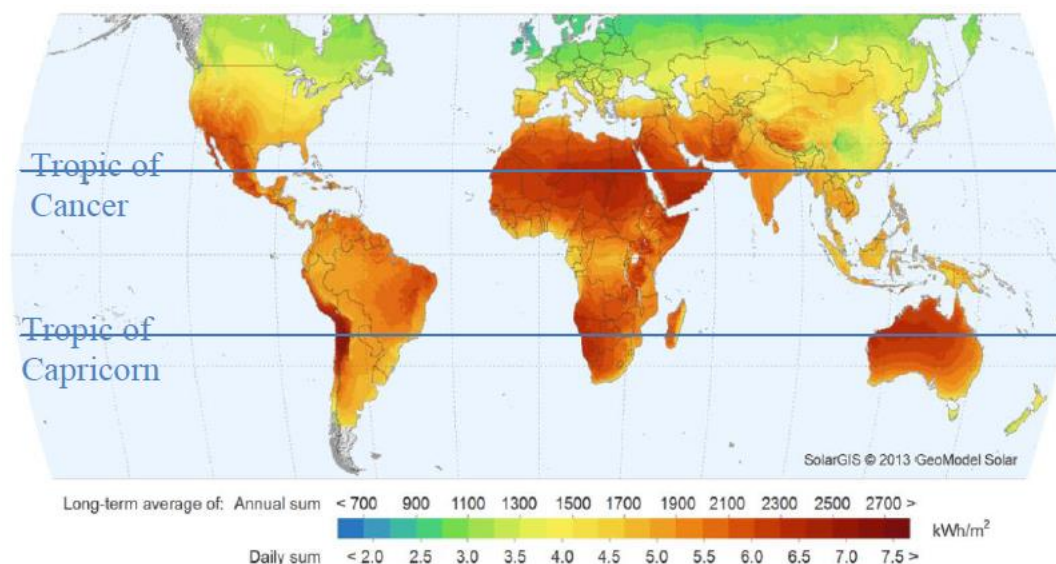


図4. 世界の日射量分布 (www.isolaralliance.org)

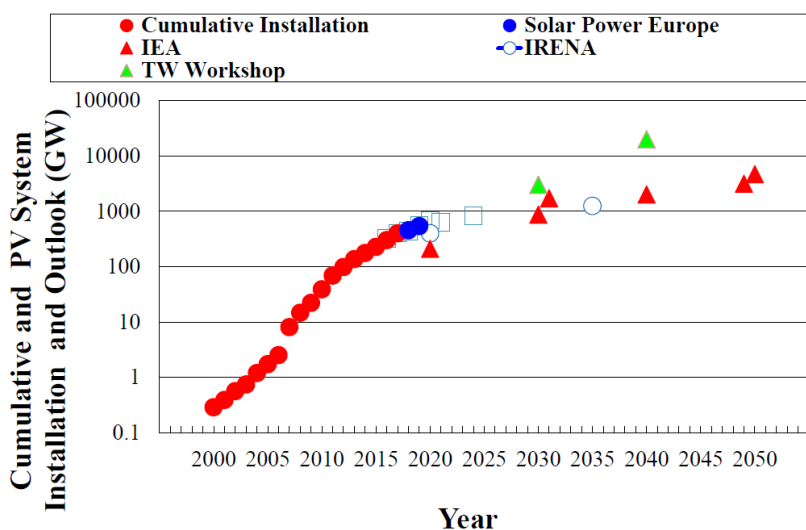
図4に示すように、 $5\text{kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ 以上の日射量の多い、PV供給可能なゾーンと、日射量 $3.5\text{kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ 以下の電力需要の多いゾーンがあり、需要と供給の不整合がある。The International Solar Allianceプログラムが紹介された。パリで開催されたC021(2015年11月)に、アナウンスされた。上記供給と需要の整合を狙いとして、新たなグローバル市場の創製を狙いとしている。300兆米ドルの市場が見込まれる。Cooperationと

coordinationを検討中で、供給者として、インド、ブラジル、アフリカ9カ国など、17カ国が手を上げている。さらに、需要側を含めて、54カ国になりそうである。第一ステップは、ISAプログラムへの参画、実働、貢献を明確にすることである。次のステップは、①ISAのプロモートプログラムの明確化、②ISAプログラムの有用性、貢献度のvisibility、③sunny countryと需要国との連携のcoordination actionの進展、である。2018年3月11日に、ニューデリーで、第1回ISAサミットが開催された。詳細は、www.isolaralliance.orgで、参照されたい。また、インドの太陽光発電の状況も紹介された。

5.0-2 国際連携セッション：

International Special Session として、“International Cooperation and Terawatt Challenge”の特別セッションが企画された。

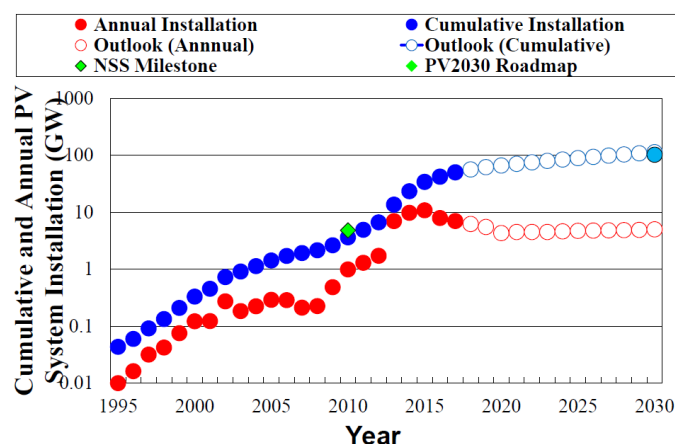
(1) 冒頭、オーガナイザーであるM. Yamaguchi (豊田工大) とS. Kurtz (UC Merced、NREL) からIntroductory talkがなされた。図5に、種々のロードマップによる世界のPVシステムの累積導入量の推移を示す。一昨年3月17日、18日、ドイツ・フライブルグで開催されたThe TW Workshopでは、最少ターゲットとして、2030年、2040年、各々、3TW、20TWと、非常に魅力的なターゲットが提示されている。図6に、日本におけるPVシステム累積導入量のRTSによる予測を示す。しかし、図6に示すように、ドイツや日本では、単年度のPVシステムの導入量は、減少傾向にある。ターゲットとの大きな飛躍、バリアが感じられる。図7に、将来のPVの発展のための重要事項に関する私見が述べられた。①国際的なビジョンやロードマップの策定、②国際連合、各国政府への提言、③将来の社会基盤の構築に向けた国際共同研究やバッテリーとの連携を含めたPV技術(材料、セル、モジュール、システム等)のさらなる強化、④将来の社会基盤の構築に向けた自動車用や農業用等、用途開拓。自動車用の事例として、太陽エネルギーによるモビリティ社会構築に向けた、ソーラーステーションや車載の取り組みの状況も紹介された。



World's PV Installation Outlook

3

図5. 種々のロードマップによる世界のPVシステムの累積導入量の推移 (山口講演資料)



Japan's PV Installation Outlook
(RTS, PV Market 2017, 2017.7)

4

図 6 . 日本におけるPVシステムの累積導入量のRTSによる予測（山口講演資料）

Important issues towards future PV

1. *Creation of international vision and roadmap towards creation of future clean energy infra-structures.*
2. *Recommendation of energy policy to United Nations, regional and national governments.*
3. *International collaboration to develop high performance, low cost and highly reliable PV materials, cells, modules and systems in cooperation with battery technologies towards creation of future clean energy infra-structures.*
4. *International collaboration to develop new application fields such as automobile and agriculture applications towards creation of future clean energy infra-structures.*

11

図 7 . 将来のPVの発展のために重要な事項（山口講演資料）

GA-SERI Terawatt Workshop conclusions

- The world is taking notice of solar, though the world has not yet fully comprehended its future value:
- Solar is headed toward being the lowest cost electricity in many locations; continued lower cost is useful to make room for cost of storage
- Solar can provide much more than low-cost electricity
 - Ancillary services to grid (frequency regulation, voltage support)
 - Grid resilience
 - Solar will enable electrification, which will reduce primary energy demand
- Solar has great potential, but we need to continue to support it both with friendly policies and with more research

図 8 . TW ワークショップの結論（S. Kurtz 講演資料）

次いで、DOE、METI、ECからのプレーナリ講演がなされた。

(2) C. Gay (DOE) は、“Optimizing Solar in the Autonomous Energy Grid”と題して、プレナリ講演を行った。

Solar Supplies Nearly 2% of U.S. Electricity

More progress must be made in order to take advantage of this domestic energy resource and to compete in the growing global market.

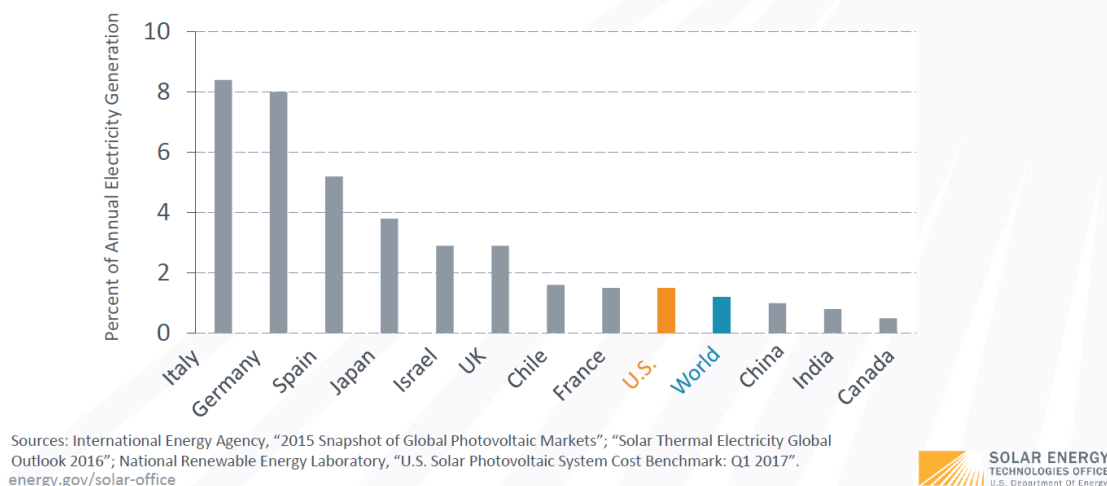


図 9 各国のPVの電力に占める比率 (C. Gay, Portfolio Review 2018, DOE)

Experience Curves for Energy Storage

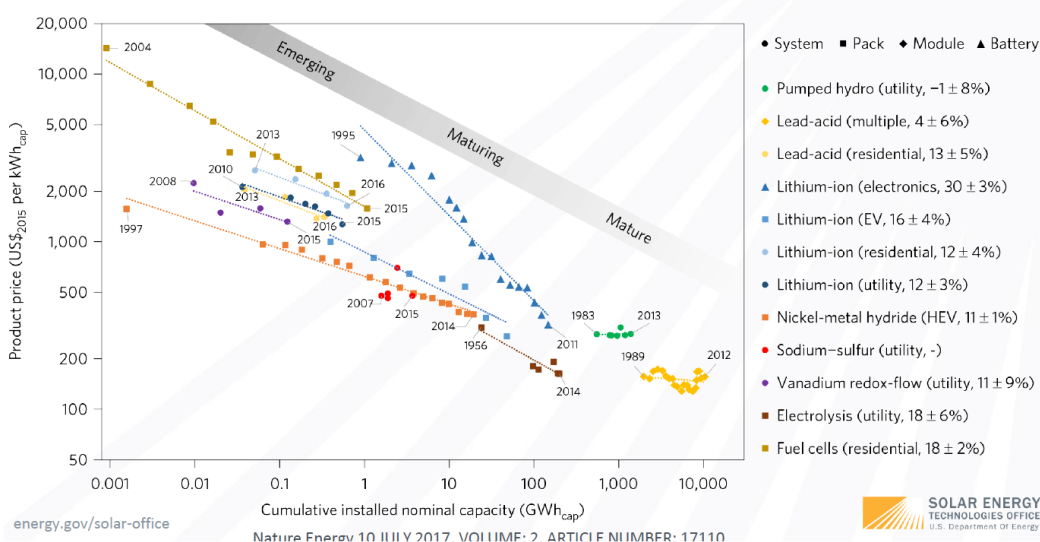


図 10 Energy storageの価格の変遷 (C. Gay, Portfolio Review 2018, DOE)

PVの電力コストの低減が進んでいる。SunShot 2020のLCOE (levelized cost of electricity)の目標は、6セント/kWhで、米国の平均気象条件では、2016年には、7セント/kWhが実現され、目標達成が見えている。SunShot 2030のLCOEの目標は、3セント/kWhとなっている。2016年9月のアブダビの350MWシステムのLCOEは、2.42セント/kWh、2017年10月のサウジアラビアの300MWシステムのLCOEは、1.79セント/kWhで、日射条件の良い地域では、SunShot2030のLCOE目標が、達成されている。図9に示すように、各国で、PVの電力に占める比率が増加している。PVは、将来、主力電源、主要なエネルギーになることが期

待される。当面、エネルギーマネジメントによる系統の安定化が、進もう。Storageとの連携は重要である。PVによるEVの充電、PV+storageによる自家消費が、考えられる。図10に、Energy storageの価格の変遷を示す。電気自動車の導入が進み、Liイオン電池に価格も、2016年の\$218/kWhから、2028~2030年には、\$80/kWh位になることが、予想されている。

Autonomous Energy Grids (AEGs)

Optimized for secure, resilient and economic operations

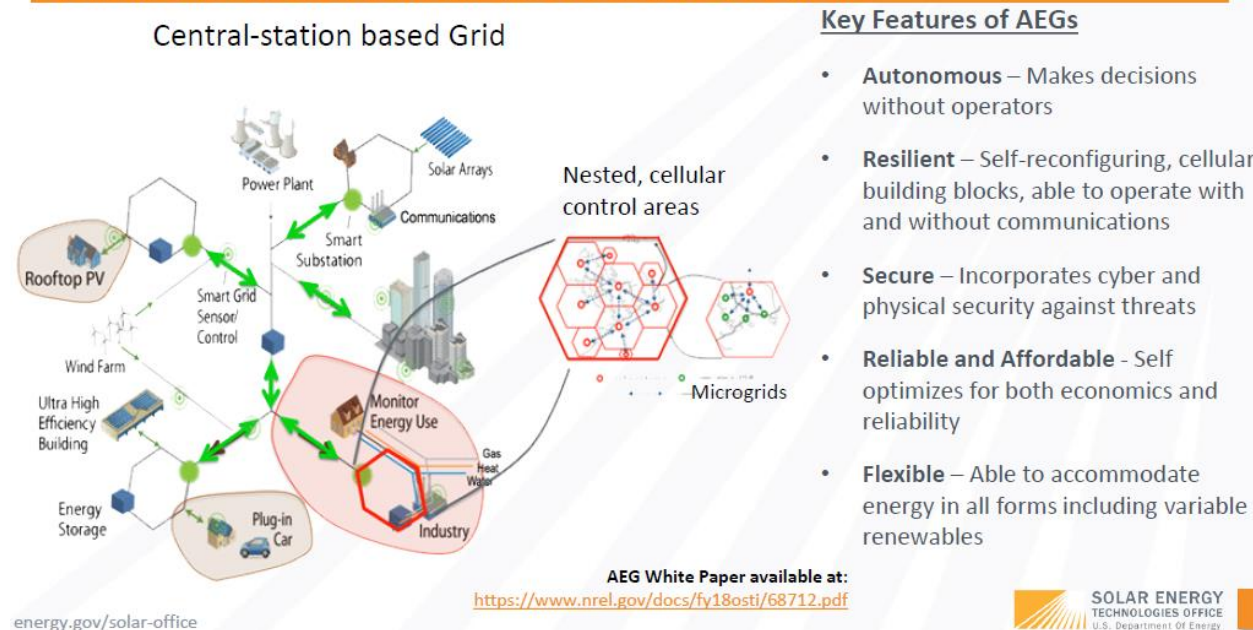


図 1 1 Autonomous Energy Gridsの概要と特徴 (C. Gay, Portfolio Review 2018, DOE)

Key Challenges to Grid Integration of Solar Energy

Maintaining reliability with increasing distributed solar

- The electric power grid has been designed for power flow in one direction. When more solar is generated than is used locally, two-way power flows increase the complexity of system operations.

Best practices for integrating solar and distributed energy storage are all local

- Effective utilization of energy storage or load shifting is in early development.

Unpredictable variability of solar power over time

- Solar generation levels vary due to the variability of cloud cover and weather, which can cause challenges for grid optimization.

Inefficient distribution and power quality challenges

- Distribution sensing and control systems have yet to leverage advanced power electronics.

Incompatible or insecure grid-interface standards

- In order for all elements of the grid to work together, communications are necessary, which makes cyber-security issues important.

energy.gov/solar-office

SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES OFFICE
U.S. Department Of Energy

3

図 1 2 太陽エネルギーの系統連携の課題 (C. Gay, Portfolio Review 2018, DOE)

図 1 1 に、Autonomous Energy Gridsの概要と特徴を示す。図 1 2 に、太陽エネルギーの系統連携の課題を示す。今後は、PVの研究開発は必須で、当面、電圧や周波数制御を含む系統安定化やエネルギーマネージメント、zero energy or energy-efficient building、PV + battery storageや用途開発を進め、2050年までには、スマートで効率的でcost effectiveなカーボンフリーのエネルギーシステムを完成させたいとまとめた。

(2) S. Sanno (METI) は、“Challenges and Solutions toward the Massive Deployment of Renewable Energy in Japan” と題して、プレーナリ講演を行った。日本のエネルギー政策、再生可能エネルギーの伸びが述べられた。

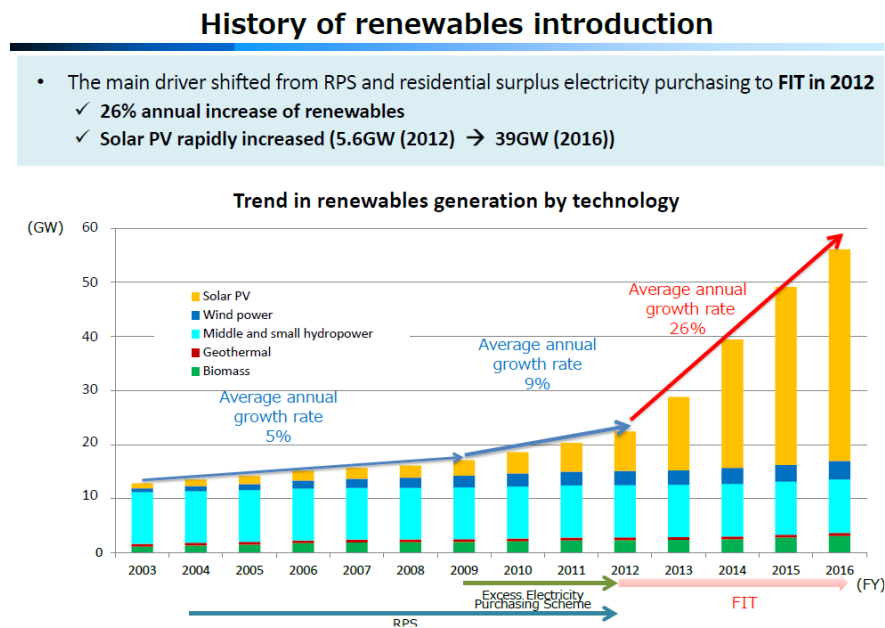


図 1 3 日本における再生可能エネルギーの伸び (S. Sanno、K. Kurumi、講演資料)

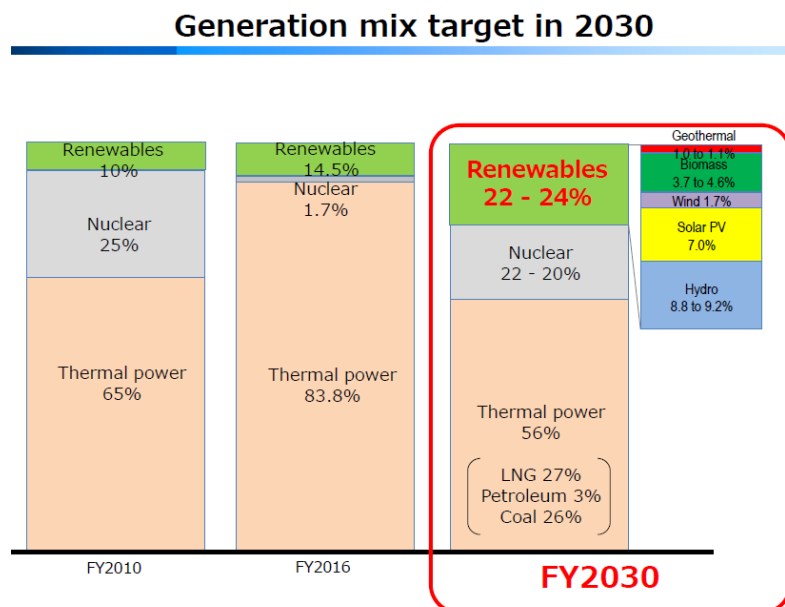


図 1 4 日本の 2030 年の各種エネルギーのターゲット (S. Sanno、K. Kurumi、講演資料)

2011年の東日本大震災に伴う福島原発事故もあり、電源構成に占める原発の比率は、震災前の29%から、現在の2%に落ちている。FIT（固定電力買取制度）の導入により、図1-3に示すように、再生可能エネルギーの導入は、26%/年の伸びで、急激に伸びている。特に、PVの伸びは、2012年の5.6GWから2016年の39GWと、大きい。図1-4は、日本の2030年の各種エネルギーのターゲット、図1-5は、日本の再生可能エネルギーの伸びと2030年の導入ターゲット、を示す。火力56%（LNG27%、石油3%、石炭26%）、原子力20~22%に対して、再生可能エネルギーは22~24%（地熱1~1.1%、バイオ3.7~4.6%、風力1.7%、PV7.0%、水力8.8~9.2%）となっている。図1-5に示すように、2030年のPVの導入ターゲットは、64GWだが、2017年、既に、約50GWであり、上方修正の必要があるように思う。PVの電力コストは、約18円/kWhまで下がっているが、各国に比べて、まだ高い。R&Dをベースに、技術開発によるコストダウンの推進が必要である。PVのR&Dの概要も述べられた。再生可能エネルギーの主電力化が打ち出され、系統連携の安定化が必要で、トランスミッションの連携、connect & manage、storage との連携による自家消費や、roof-top PV+battery+EV 推進などの方向性が述べられた。

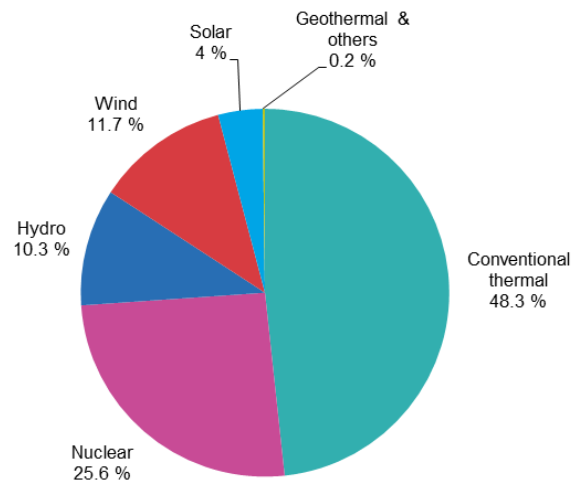
Renewables introduction toward 2030 target

	Before FIT (June 2012)	After FIT [A] (as of Sep 2017)	Target [B] (FY2030)	Progress [A]/[B]
Geothermal	0.5GW	0.5GW	1.4 - 1.6GW	33%
Biomass	2.3GW	3.5GW	6.0 - 7.3GW	53%
Wind	2.6GW	3.4GW	10GW	34%
Solar PV	5.6GW	42.4GW	64GW	66%
Hydro	48.1GW	48.4GW	48.5 - 49.3GW	99%

図1-5 日本の再生可能エネルギーの伸びと2030年の導入ターゲット
(S. Sanno, K. Kurumi, 講演資料)

(3) M. Getsiou (EC) は、“Promoting renewable energy use in the EU; the challenge for Photovoltaics and R&D policy” と題して、プレーナリ講演を行った。EUのエネルギー政策が述べられた。EUのGHG排出の削減ターゲットは、2020年の-20%、2030年の-40%となっている。図1-6に示すように、EU28カ国の2017年の電源構成に占める比率は、火力48.3%、原子力25.6%、水力10.3%、風力11.7%、PV4%、その他0.2%となっている。水力を除く再生可能エネルギーを、現在の約16%から、2020年、2030年、各々、20%、>27%にしたいと述べた。パネル討論で、会場から、原子力の比率が高過ぎないかとのコメントがあった。PVのチャレンジが重要で、DOE、METIのプレーナリ講演と同様、系統連携の安定化、自家消費、storage、mobility との連携の重要性が述べられた。このためには、PV R&Dのさらなる推進が必要であり、現行のHorizon 2020（2014~2020年、予算額約50億ユーロ）と計画中のHorizon Europe（2021~2027年、予算額約150億ユーロ）の概要が述べられた。計画中のHorizon Europeでは、NEDO同様、特に、mobility との連携、storage、III-V族超高効率太陽電池やペロブスカイト太陽電池に関心があるとまとめた。

EU-28 Electricity production by source, 2017 (in %)



Source: Eurostat (online data code: nrg_105m)

eurostat 

図 1 6 EU28 カ国の 2017 年の電源構成に占める各種エネルギーの比率

5.1 基礎・：新概念分野：

(1) K. Catchpole (ANU) は、“High efficiency perovskite/silicon solar cells” と題して、プレーナリ講演を行った。BOS コストの低減の点で、高効率化が有効で、タンデム化が必要である。

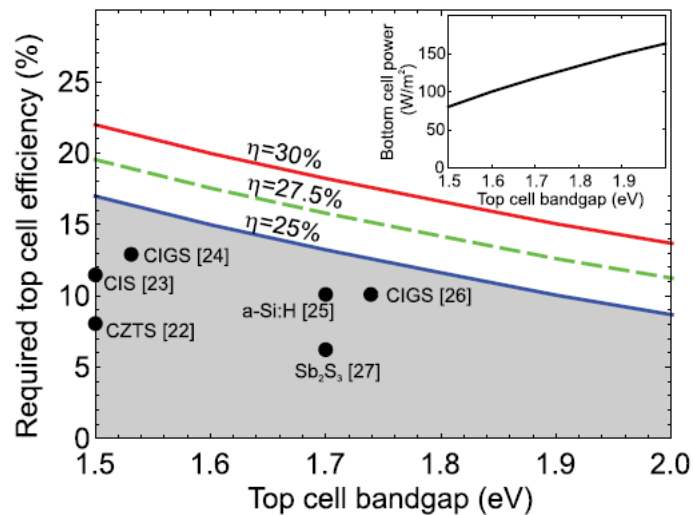


図 1 7 結晶 Si ベース太陽電池とトップセルかならなる 2 接合タンデム太陽電池のトップセルに要求される効率のバンドギャップ E_g 依存性 [効率 $\eta = 25\%$ (青線)、 27.5% (緑線)、 30% (赤線)] (T.P. White et al., IEEE Journal of Photovoltaics, **4**, 208 (2014).) .

$E_g=1.55\text{ eV}$ のペロブスカイト太陽電池で、効率 22.7% が得られているので、効率 30% の実現が期待される。ANU は、バンドギャップ 1.73eV の Cs 系ペロブスカイト単接合太陽電池で、効率 17.4% を得ており、Cs 系ペロブスカイトトップセルと効率 23.9% の単結晶 Si 太陽電池のメカニカルスタック 4 端子 2 接合タンデム太陽電池で、効率 26.4% (Si ボトムセルの寄与は、10.4%) を得ている。表面 Si_3N_4 、裏面 Al_2O_3 パッシベーションの拡散型 n/p Si 太陽電池 (効率 23.9%) が、ボトムセルに用いられている。ペロブスカイト ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) トップセルは、表面 AR、裏面 AR と ITO コンタクトが用いられ、表面のグリッド電極、ITO コンタクトの検討がなされ、抵抗損失の低減 (約 5%)、シャドー損失の低減 (約 16%) の低減がはかられている。2 端子ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池で、効率 22.8% ($V_{oc}=1.75\text{V}$ 、 $J_{sc}=17.6\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=73.8\%$)、4 端子構成で、効率 26.4% が得られている。ペロブスカイト/CIGS タンデム太陽電池でも、効率 23% が得られているとの事である。

(2) Stanford Univ. は、バンドギャップ 1.68eV 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 ボトムセルのモノリシック構造 2 接合タンデム電池 (1cm^2) で、図 18 に示すように、効率 23.6% ($V_{oc}=1.65\text{V}$ 、 $J_{sc}=18.1\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=78.0\%$) を得ている。

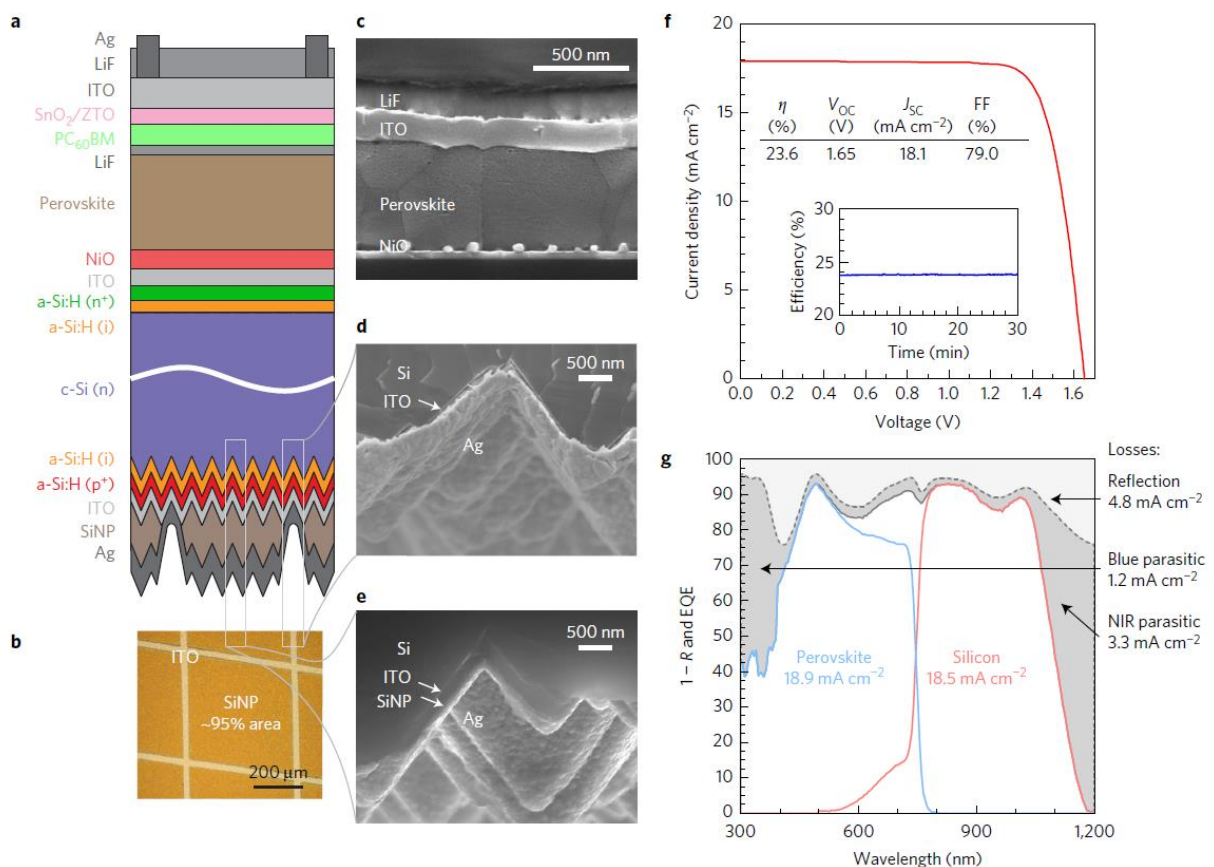


図 18. ペロブスカイト/ヘテロ接合 Si タンデムセルの I-V 特性 (K. A. Bush et al., Nature Energy 2, 17009 (2017).)

トップセル太陽電池の候補として、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ($E_g=1.6\text{eV}$)、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ($E_g=1.6\text{eV}$)、 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$ ($E_g=1.48\text{eV}$)、 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbBr}_3$ ($E_g=1.48\text{eV}$)、の化合物

がある。バンドギャップ1.68eV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、効率23.6%が得られている。

5.2 CIGS、CdTe、Ⅱ—Ⅵ化合物薄膜セル分野：

A. Bayman (MiaSole Hi-Tech) は、“Has time for CIGS thin film solar?”と題して、プレーナリ講演を行った。MiaSole は、2013年に、ハンガリーに設立。革新的薄膜太陽電池のプロダクトと装置のプロバイダーである。薄膜太陽電池の状況も報告された。CIGS太陽電池、CdTe太陽電池、ペロブスカイト太陽電池で、各々、22.9%、22.1%、22.7%、が達成されている。製造レベルのモジュール効率は、CdTe太陽電池で、17%であり、CIGS太陽電池は、ソーラーフロンティアで、15.0%、Solibroの15.9%などで、結晶Si太陽電池のモジュール効率のキャッチアップが必要である。ソーラーフロンティアの累積生産量は、2018年4月には、5GWになったとの事である。年産では、ソーラーフロンティアの1.1GW、Avancis300MW、Solibro145MW、MiaSole175MWなどで、計画中のものは、Avancis1.5GW、GES1.2GW、MiaSole2.1GWなどであり、計画中のものを含めると、年産9.1GWになる。MiaSoleのフレキシブル軽量CIGS太陽電池も、報告された。真空Roll-to-Cellのターンキイ装置、高スループットであると述べた。22セルの0.3m²モジュールの効率も、2015年の効率15.85%が、メタリゼーション改善、セレン化均一性改善や低Eg化より、2016年の効率16.35%につながった。さらに、Ag-CIGSによる少数キャリア寿命8倍改善、メタリゼーション改善、高Eg化、TCOプロセス改善により、2017年の効率17.5%へと、改善されている。大学との共同研究の成果でもある。製品も、50W、125W、2950W、1200Wとある。Transportation等への応用を検討中である。

5.3 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池分野：

(1) A. J. Ptak (NREL) は、“Bringing III-V photovoltaics down to earth with dynamic-hydride vapor phase epitaxy”と題して、プレーナリ講演を行った。III-Vセルは、高効率だが、高コストで、宇宙用と一部集光用に限られている。効率30%で、コスト\$0.5/W (50MW/年)を狙っている。III-Vセルのコストは、おおざっぱに、基板、エピ成長、セルプロセスが、各々1/3と考えられる。基板コストの低減には、SiタンデムやELO(Epitaxial Lift Off)などが検討されている。エピ成長においては、①安いプリカーサの使用、②プリカーサの利用効率向上、③高速成膜、高スループット、が低コスト化に有効である。HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) は、高スループットの特長を有する。従来のHVPEでは、ヘテロエピ界面の急峻性や質に課題があったが、多成長室によるDynamic-HVPE

(D-HVPE) を検討している。InGaP/GaAs:Se ($2\mu\text{m}$) /InGaP ダブルヘテロ単接合太陽電池で、効率 25.31% ($V_{oc}=1.082\text{V}$ 、 $J_{sc}=27.95\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=83.8\%$) を実現している。従来の MOVPE (Metal—Organic Vapor Phase Epitaxy) に比べて、高速成膜で、同等の効率が得られている。成長速度 $R_g=68\mu\text{m}/\text{h}$ の HVPE で、 $V_{oc}=1.08\text{V}$ が得られ、 $R_g=6\mu\text{m}/\text{h}$ の MOVPE の $V_{oc}=1.10\text{V}$ と遜色ないとの事である。さらなる高速成膜 $R_g=195\mu\text{m}/\text{h}$ でも、効率 25%は可能であるとしている。InGaP/GaAs 3 接合太陽電池では、効率 23.7% ($V_{oc}=2.41\text{V}$ 、 $J_{sc}=11.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=88.4\%$) の状況である。BIPV や Transportation 等、地上用への導入が進めば、大きな市場形成が期待できる。約 1%の参入で、5.5 億～27 億ドル、約 5%の参入で、42 億～152 億ドル、約 15%の参入で、158 億～256 億ドル、が見込まれるとの事である。

(2) M. Steiner (NREL) は、IMM (Inverted Meta Morphic) 6 接合太陽電池で、効率 35.8% ($V_{oc}=5.301\text{V}$ 、 $J_{sc}=8.05\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=83.9\%$) を達成し、本会議の Best Paper Award を受賞した。 $E_g=2.06\text{eV}/1.70\text{eV}/1.42\text{eV}/1.15\text{eV}/0.94\text{eV}/0.70\text{eV}$ で、構成されている。K. Araki (豊田工大) は、大気パラメータ変動を考慮すると、極端な多接合化は、年間発電量は却って低下との計算結果を報告した。。

5.4 結晶Si太陽電池分野：

Q. Wangら (Jinko Solar) は、“Manufacturing crystalline Silicon PERC solar cells” と題して、プーナリ講演を行った。図 19 に、Jinko Solarのウエハ、セル、モジュールの生産規模を示す。Jinko Solarは、11年の歴史を有し、従業員15,000人で、これまで、26GW 以上、出荷している。図 18 に示すように、ウエハ、セル、モジュールの生産規模を着実に伸ばしている。PERCセルは、当面、結晶Si太陽電池の主流である。1984年、SERIの提案であり、1999年のUNSWの25.0%につながっている。高 V_{oc} 、近赤外域の高レスポンスに特長がある。Jinko Solarは、2018年5月に、6 インチp-type単結晶PERC構造太陽電池で、効率 23.98%を得ているとの事である。選択エミッタの最適化、表面、裏面パッシベーション、多層ARによる短絡電流改善、グリッド設計等による直列抵抗減とFF改善が、なされている。p-type多結晶PERC構造太陽電池では、効率 22.0% (面積 245.83cm^2 、 $V_{oc}=671.7\text{mV}$ 、 $J_{sc}=40.66\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=80.9\%$) の状況である。生産レベルのセル効率も、2012年の20.2% から、2017年の22.7%へと改善されている。世界のPERCセルの生産規模も、2015年の4GW から、2016年14GW、2017年23GWとなり、2018年は45GWの予想があり、2019年67GWのアナウンスもある。セル効率よりも、モジュール効率の改善が重要である。モジュールコスト、\$ 0.23/Wの状況である。さらなる高効率化、低コスト化に加え、光劣化に関する検討結果も、述べられた。

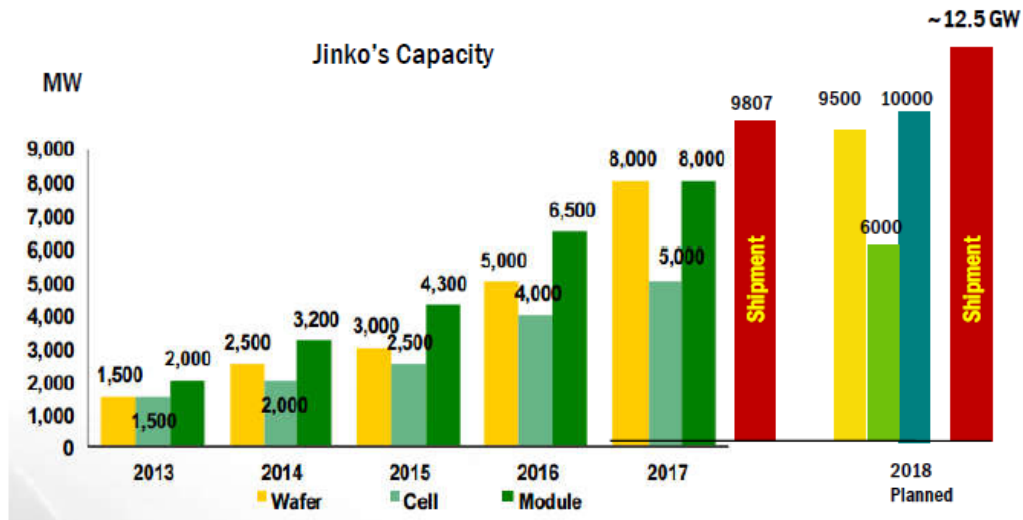


図 1 9 Jinko Solarのウエハ、セル、モジュールの生産規模 (Dr. Q. Wang提供)

5.5 キャラクターゼーション分野：

R. Sinton (Sinton Instruments) は、“Challenges and opportunities in cell and module I-V testing” と題して、プレーナリ講演を行った。セル、モジュールのI-Vテストの方法論、課題が述べられたリファレンスセル、リファレンスモジュールを用意し、標準光源で、標準的方法で、測定を行えば、モジュール出力値も、例えば、 $268.2 \pm 1\%$ で、認定される。製造の不確かさや校正リファレンスモデルや、セルではプローブ等の不確かさが残る。最近、n型セルが延びてきているが、図 2 0 に示すように、高効率 n 型 Si 太陽電池は、p 型 Si 太陽電池より、200倍高い電気容量Cを持つ。過渡電流 $d(CV)/dt$ が、I-V特性測定に影響し、I-V特性測定に不確かさを与える。図 2 1 に示すように、200msの測定時間が必要となる。

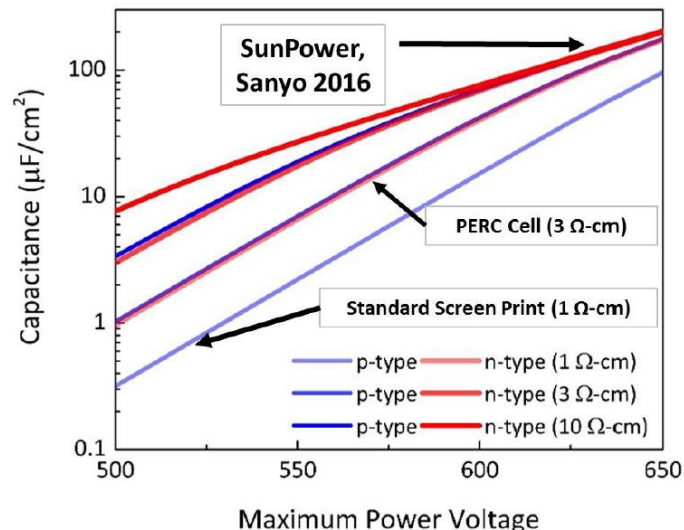


図 2 0 n 型、p 型結晶 Si 太陽電池の容量—最大出力時の電圧 (R. Sinton、講演資料)

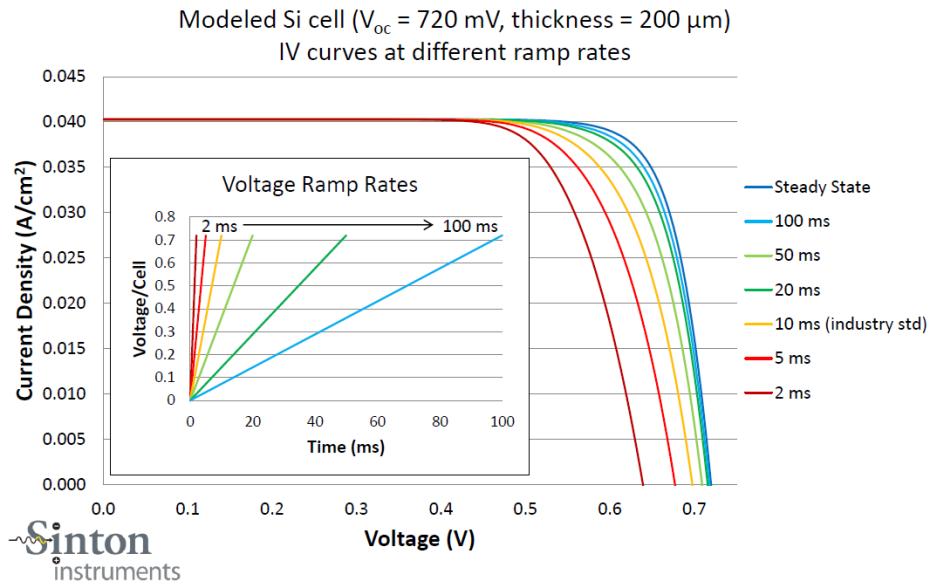


図 2 1 n 型結晶 Si 太陽電池の I-V 特性の走査時間効果に関する PC1D シミュレーション結果 (R. Sinton、講演資料)

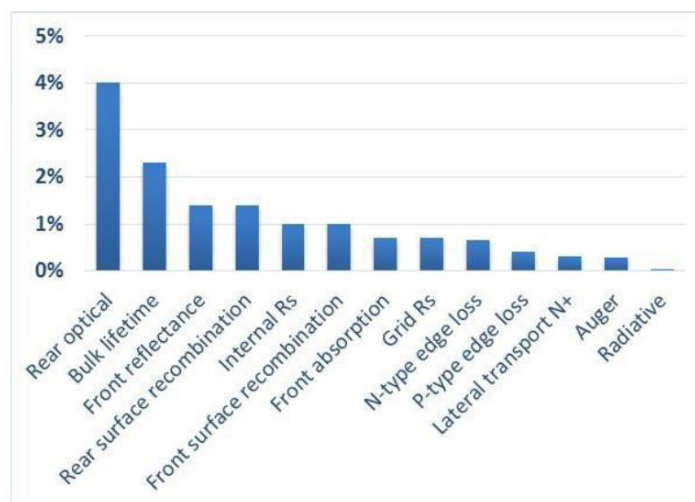
さらなる I-V 特性の方法論が、考察されている。デバイス物理をベースに、表 1 に示すような物理パラメータを考慮すべきと述べた。表 2 には、各物理パラメータの測定方法論を示す。

図 1 I-V 特性測定で、考慮すべき物理パラメータ (R. Sinton、講演資料)

Step	Metric	Fundamental Analysis	Impact Analysis
Feedstock	τ vs. Δn	τ vs. Δn	Implied IV curve
Crystal	τ vs. Δn , $\Omega\text{-cm}$, trapping	τ vs. Δn	Implied IV curve
Wafer	τ vs. Δn , $\Omega\text{-cm}$, trapping	τ vs. Δn	Sorting
Dopant diffusion	τ vs. Δn , $\Omega\text{-cm}$, trapping	τ vs. Δn	Implied IV curve
Passivation	τ vs. Δn , $\Omega\text{-cm}$, trapping	τ vs. Δn	Implied IV curve
Cell	I , V , R_s , R_{sh} , τ vs. Δn , N_A	τ vs. Δn	Real/pseudo-IV curve
Module	I , V , R_s , R_{sh} , τ vs. Δn , N_A	τ vs. Δn	Real/pseudo-IV curve
System	I , V , R_s , R_{sh} , τ vs. Δn , N_A	τ vs. Δn	Real/pseudo-IV curve

表 2 各物理パラメータの測定方法論 (R. Sinton、講演資料)

Parameter	Method
IV parameters	MultiFlash or SingleFlash technology; filtered Xenon light
Substrate doping	Time-dependent continuity equation
Lifetime vs. excess carrier density	Time-dependent Suns- V_{oc} data using doping result
R_s	Evaluation of IV and Suns- V_{oc} curves at J_{mp}
R_{sh}	Ohm-meter in dark at 0 Volts
Voltage (Strategic, 6 points)	8 Channel simultaneous data acquisition
Current	same
Intensity	same (using silicon reference cell)
Temperature	RTD
Capacitance effects	Constant charge method (EUPVSEC Dresden, 2006)



David D. Smith et al. "Silicon Solar Cells with Total Area Efficiency over 25%" IEEE PVSC June 2016.

図 2.2 SunPowerのIBC結晶Si太陽電池の損失解析結果 (R. Sinton、講演資料)

バルク少数キャリア寿命とセル特性から得られる少数キャリア寿命は、異なる。バルク少数キャリア寿命は、結晶基板の質によるが、さらに、表面パッシベーション、高温プロセス時の汚染や結晶欠陥生成、などが予想される。太陽電池の損失解析も重要で、図 2.2 に、SunPowerのIBC結晶Si太陽電池の損失解析結果も紹介された。

5.6 ペロブスカイトおよび有機太陽電池分野：

A. Hagfeldt (Stanford Univ.) は、“An introduction to the unique success story of perovskite solar cells” 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。今日、ペロブスカイト太陽電池に用いられている $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は、1.55eVの直接遷移型のバンドギャップを有する。小結晶粒界だが、少数キャリア拡散長 (100~1000nm) 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 $7.5\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、正孔 $12.5 \sim 66\text{cm}^2/\text{Vs}$) などの物性

についても述べられた。励起子の結合エネルギーは、5～16meV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22.7%（面積0.0935cm²、V_{oc}=1.144V、J_{sc}=24.92mA/cm²、FF=79.6%）の変遷、最近の研究開発の状況が述べられた。図23に、ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷を示す。2009年に、宮坂らのグループが、色素増感太陽電池のsensitizerとして、CH₃NH₃PbI₃を導入し、効率3.8%を得たのが最初である（A. Kojima et al., J. Am. Chem. Soc. 131, 6050 (2009).）。

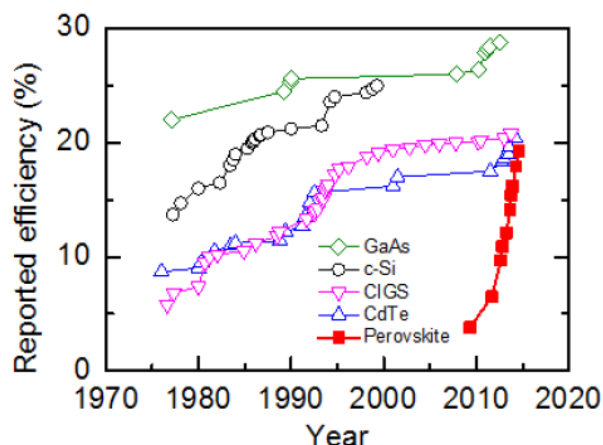


図23 ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷と他の太陽電池の効率変遷（29th EU-PVSEC会議ハイライト：Dr. A. Jaeger-Waldau提供）

EPFLの状況が述べられた。FA_{1-x}MA_xPb(I_{1-x})Br_x系のペロブスカイトのモフォロジー、粒径の改善により、x=0.15のペロブスカイト太陽電池で、効率21.6%（V_{oc}=1.14V、J_{sc}=23.3mA/cm²、FF=0.78）を得ている。ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池では、効率25.2%の状況である。

5.7 宇宙用太陽電池およびシステム分野：

P.R. Sharpsら（SolAero Technologies Co.）は、“Current perspective on space photovoltaic power generation”と題して、プレーナリ講演を行った。380機以上のSolAeros社の衛星が軌道上にあり、約1100機が、2、3年後の打ち上げられる計画にあるとのことである。図24に、衛星の状況の変遷を示す。高出力化が進み、高性能化と同時に、低コストと自動化要求されている。地上用と異なり、当初から、高性能化（面積当りの出力）、重量当りの出力と放射線耐性が要求される。図25には、宇宙用太陽電池の高効率化の推移を示す。1958年3月17日打ち上げのバンガード1号以来、単結晶Si太陽電池が用いられてきたが、1978年頃から、GaAs太陽電池、1992年頃から、InGaP/GaAs 2接合太陽電池、2000年頃から、InGaP/GaAs/Ge 3接合太陽電池が用いられている。効率と放射線耐性の重視による変遷である。

Space 2.0

- **“Historic” space satellites – Space 1.0**
 - Large, limited edition, “unique” satellites
 - Design work & analysis requires high NRE
 - Unique cell form factors for each satellite
 - Automation difficult due to cell/panel uniqueness
 - AF ManTech experience
 - Modularity was goal
 - Every prime contractor has a unique, advantageous design
- **Space 2.0**
 - Broadband driven by latency and signal
 - Earth obs driven by low cost (CubeSats)
 - Automation compatible for panel assembly
 - One cell form factor
 - Fewer parts mix
 - High volume
 - All lead to lower cost

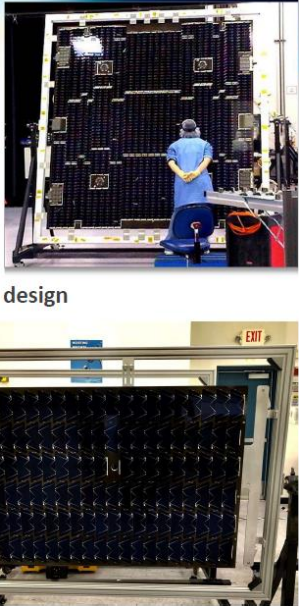


図 2 4 衛星の状況の変遷 (Dr. P. R. Sharps提供)

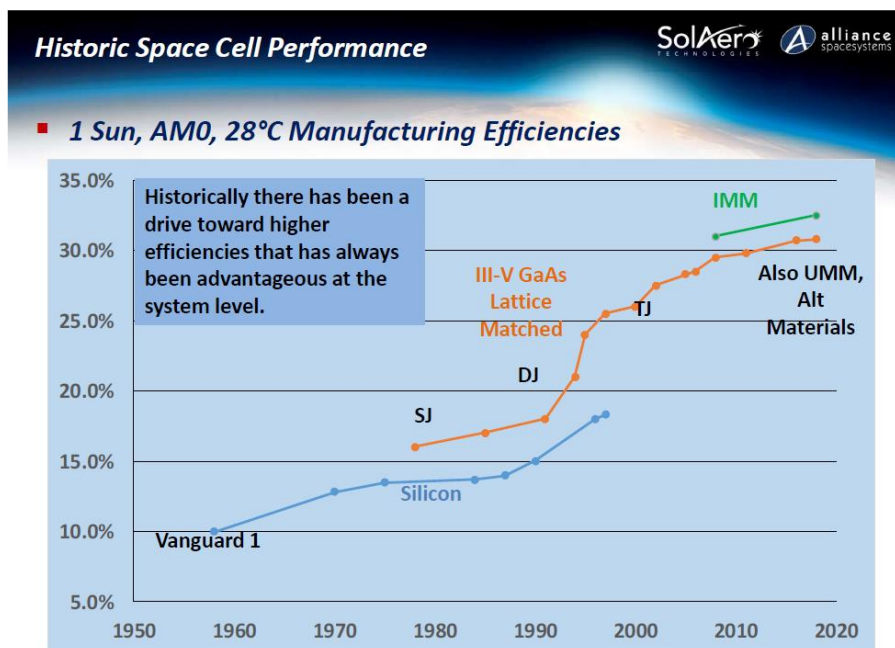


図 2 5 宇宙用太陽電池の高効率化の推移 (Dr. P. R. Sharps提供)

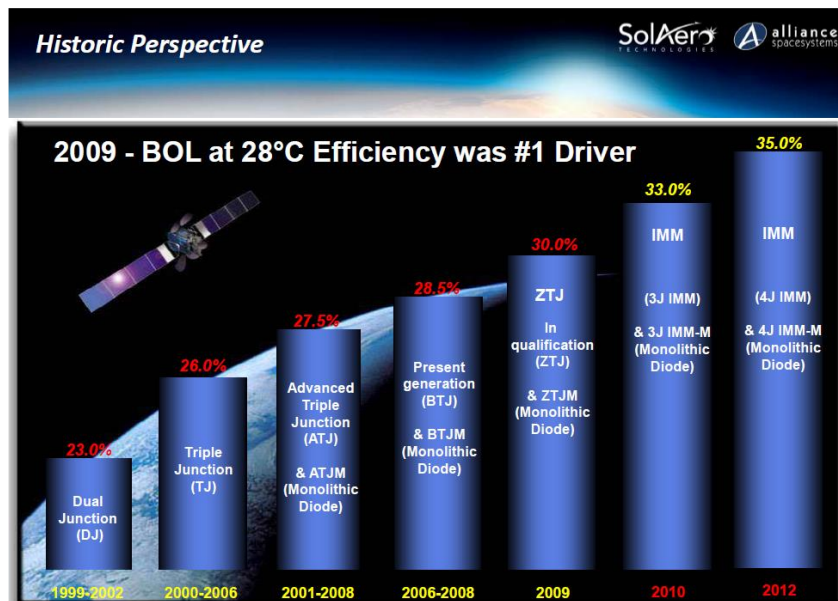


図 2 6 宇宙用InGaP/GaAs系多接合太陽電池の高効率化の推移 (Dr. P. R. Sharps提供)

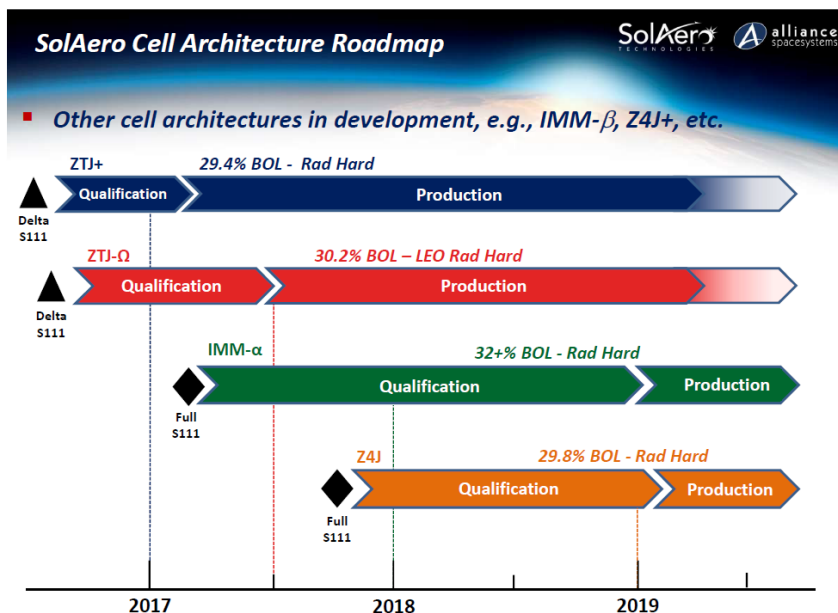


図 2 7 SolAero社のセルアーキテクチャのロードマップ (Dr. P. R. Sharps提供)

図 2 6 に、宇宙用InGaP/GaAs系多接合太陽電池の高効率化の推移を示す。Ge基板上的格子整合InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池の高効率化がはかられ、宇宙用として用いられてきた。逆エピ構造格子不整合 (IMM) 3 接合、4 接合太陽電池も開発されている。高効率、放射線耐性に加え、低コスト化の要求もセル選定の重要なパラメータになりつつある。ミッションによって、セルに対する要求条件は、異なる。太陽接近衛星などは、高温・高光強度が要求され、火星衛星は、低温・低光強度の要求がある。図 2 7 に示すように、SolAero社のセルアーキテクチャのロードマップを述べて、まとめた。

5.8 モジュール、システム分野：

A. Burrell (NREL) は、“Electrochemical energy storage：Challenges and options”と題して、プレーナリ講演を行った。世界的に、系統に占めるPVの比率が増加しつつある。今後、集中発電から分散発電へ、スマートグリッドが重要となろう。系統連携は、電圧や周波数変動をもたらし、系統の安定化のためには、PVシステムのsmart integrationが必要である。一解決策として、PV+バッテリーなどがあり、系統の安定化のためにも、バッテリーの重要性が増している。系統に頼らず、自家消費のシステムの方が進むと考えられる。

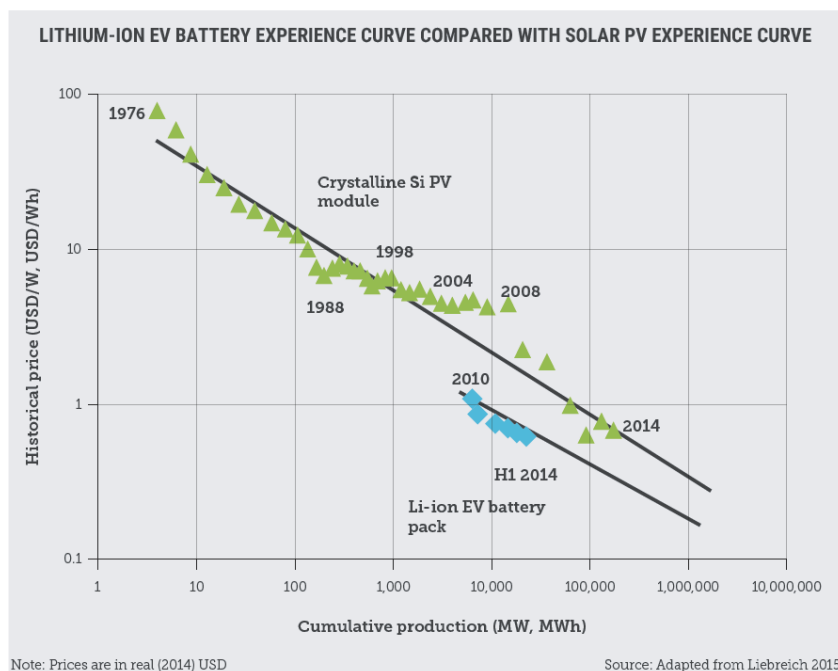


図 2.8 Liイオン電池とPVモジュールの価格低減の状況

(ISBN: 978-0-9944195-3-8 (web), Climate Council of Australia Ltd 2015) EEH-PSL 1413, 2014)

図 2.8 には、Liイオン電池とPVモジュールの価格低減の状況を示す。今後、両者の価格低減がはかられ、PV+バッテリーシステムも、グリッドパリティを実現できるとしている。PV+バッテリーシステムの性能評価手法、試験法、シミュレーション法、電力損失等が言及された。バッテリー容量、利用率と経済的メリットも述べられた。蓄電池の状況と課題も述べられた。2016年の世界のgrid scale battery capacityは、600MWhで、Liイオン電池が63%、Na-金属が14.5、鉛系が12%となっている。Liイオン電池は、\$250/kWh（2015年）と、まだ高い。2024年には、<\$100/kWhになるであろうとの事である。Liイオン電池の正極材料として、LiFeO₄、LiCoO₂、LiMn₂O₄などがある。LiCoO₂系は、1991年に商品化され、主にモバイル機器用に広く普及しているが、Coの価格が、近年、上昇している。LiMn₂O₄系は、1996年に商品化され、近年は特に自動車用として広く普及している。結晶構造が比較的強固なため熱安定性が高い。材料のMnはコバルトの1/10以下の価格である。LiFeO₄系は、近年、アメリカや中国で採用が増えている。材料は安い、製造コストがやや高い。結晶構造が強固なため熱安定性が高い。電気伝導性が低いことが課題とされていたが、活物質の微細化と表面の炭素コート採用により改良されている。代替材料として、Li[Ni_xCo_yMn_z]O₂が、検討されている。Li-SやLi-空気など、挑戦的な研究開発もなされている。

5.9 信頼性および発電量予測分野：

A. Ciesla (UNSW) は、“Hydrogen induced degradation” と題して、プレーナリ講演を行った。もともと、Prof. Stuart Wenham (UNSW) が、プレーナリ講演の予定だったが、昨年12月23日に、逝去した。亡き父に代わり、遺児であるDr. Cieslaが、プレーナリ講演を行った。まず、亡き父の業績を紹介した後、Prof. Wenhamのグループの水素関与劣化現象に関する総合報告を行った。p型単結晶太陽電池ではボロン・酸素複合体によるLID（光誘起劣化）の問題が指摘されている。図29は、B-O欠陥および格子間Hの荷電状態とエネルギーレベルを示す。結晶Si太陽電池では、 Si_3N_4 や Al_2O_3 形成時に、Hが導入される。ボロン・酸素複合体と水素の荷電状態 (H^+ 、 H^0 、 H^-) を制御すること（例えば、集光）で、不活性化することでLIDを抑制できるとしている。一方、多結晶PERCセルでは、高温での光照射で、Le LID（光・高温誘起劣化）が発生するが、Co-Firing温度を、700～900℃にすることで、劣化を抑制できるとの事である。

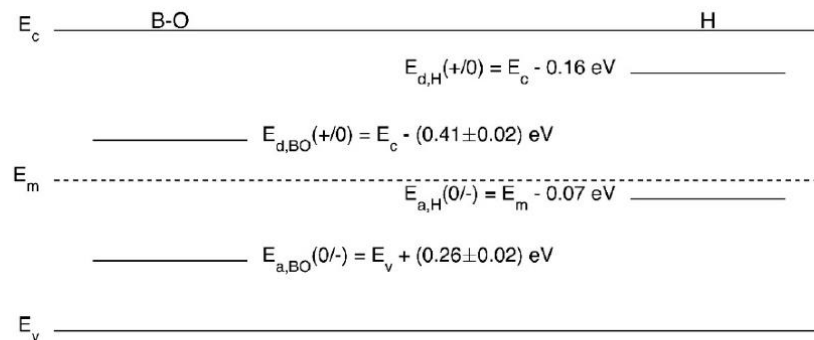


Figure 2. Energy level diagram for B-O defects and interstitial hydrogen showing the donor (E_d) and acceptor (E_a) levels relative to the conduction band (E_c), valence band or mid-gap (E_m).

図29 B-O欠陥および格子間Hの荷電状態とエネルギーレベル (B. Hallam et al., Applied Sciences 8, 1 (2018).)

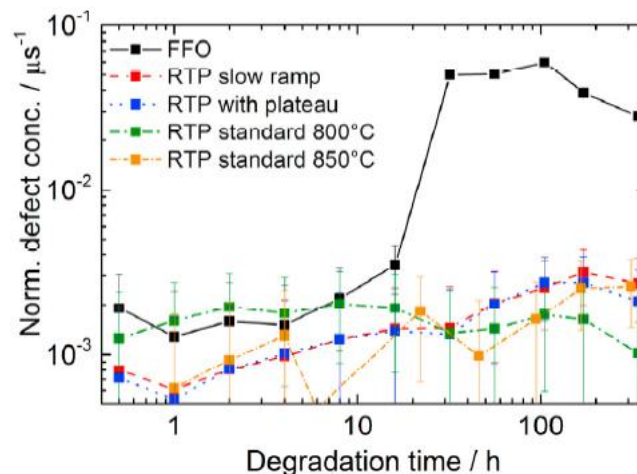


図30 プロセス方法による規格化欠陥濃度の劣化時間変化 (R. Eberle et al., Energy Procedia 124, 712 (2017).)

5.10 系統連系および政策分野：

S. Teske (Univ. Tech. Sydney) は、“The role of solar photovoltaics in decarbonisation scenarios: Estimated market by region and possible impact on power grids” と題して、プレーナリ講演を行った。EPIAにしろ、IEAにしろ、PV成長を過小評価してきた。パリ協定では、2℃以下をターゲットとしているが、その実現のために、原子力やCCSを含んで

おり、現実的ではなく、再生可能エネルギーをもっと増やすべきであろう。特に、PVが有望であると述べた。講演では、2℃上昇を前提とした場合のPV市場および課題と解決策が述べられた。図3-1に、温度上昇2℃の場合のPV市場の予測を示す。単年の世界市場は、2017年の約100GWから、21021年200GW、2030年350GWになると試算されている。累積では、図に示すように、2030年3.87TW、2040年7.77TW、2050年11.4TWと、PVが主力（PVの一次エネルギーシェア33%）になるとの試算結果である。

Cumulative Capacity by 2050 under the LDF 2°C case

Case	Unit	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Global REF	[GW]	226	515	785	1,031	1,226	1,422	1,672	1,969
Global 2C	[GW]	231	711	1,995	3,821	5,766	7,713	9,715	11,427
North America REF	[GW]	29	81	133	162	191	220	261	310
North America 2C	[GW]	29	188	529	909	1,141	1,415	1,741	2,199
Latin America REF	[GW]	2	8	14	19	24	29	35	42
Latin America ADV	[GW]	2	21	91	176	250	301	349	453
Europe REF	[GW]	95	117	137	157	164	172	182	191
Europe 2C	[GW]	95	140	264	392	511	628	760	899
Africa REF	[GW]	2	9	17	27	40	52	68	89
Africa 2C	[GW]	2	26	113	235	421	638	771	859
Middle East REF	[GW]	0	3	7	10	15	21	29	40
Middle East 2C	[GW]	5	16	83	328	697	964	1,299	1,415
Eurasia REF	[GW]	4	4	5	6	7	8	9	10
Eurasia 2C	[GW]	4	4	54	155	267	402	537	653
Other Asia REF	[GW]	4	6	9	26	35	44	56	70
Other Asia 2C	[GW]	4	8	82	217	377	602	852	1,070
India REF	[GW]	5	60	115	198	271	345	433	545
India 2C	[GW]	5	65	215	455	715	1,002	1,319	1,519
China REF	[GW]	43	154	265	330	380	430	495	565
China 2C	[GW]	43	174	343	633	936	1,228	1,446	1,655
Australasia REF	[GW]	43	73	84	96	99	102	105	107
Australasia 2C	[GW]	43	70	222	322	451	531	640	704

FIRST RESULTS - CURRENTLY UNDER REVIEW – JUNE 2018

The LDF 2 ° C : Global PV Capacity in 2030 increases by factor 10

図3-1 温度上昇2℃の場合のPV市場の予測（Dr. S. Teske講演資料）

PVシェア10%を超えると、storageが、非常に重要となってくる。多くの雇用が必要で、教育およびtrainingが重要となる。技術開発に加え、多くの種々の材料が必要で、戦略的材料計画が必要である。Generation management、storage、generation予測によるフレキシブルパワープラントに置き換わろう。社会基盤創成の視点を持つべきであろう。特に、ユーティリティは、新しいビジネスコンセプトを持つべきであろうとまとめた。

6. 感想

今回の会議でも、日本企業からの参加者は、少なく、今後が危惧される。今後の太陽光発電の発展や市場拡大のためには、図3-2に示すように、まだまだ、国の支援が必要と言える。図3-2は、データは古いが、主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算（研究開発費を含む）との相関を示す。PVの市場拡大とPVに関する国家予算は、線形関係にあり、市場拡大のためには、国の支援がまだまだ必要であり、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。

国際連携特別セッション” International Cooperation and Terawatt Challenge”でも議論さ

れたように、さらなる研究開発、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をベースに、車載等用途開発や、エネルギーマネジメント、バッテリーとのハイブリッド化が、今後の方向性と考えられる。PV Mobilityが話題になっており、国際連携や国際共同研究を期待する。Dr. S. Teskeのプレーナリ講演にあるような 2030年の4TW、2040年の8TW、2050年の11.4TWの実現のためには、信頼性やリサイクル等も課題であるし、将来の社会基盤創成の視点を持つ必要があるだろう。

Correlation between PV budget and PV system installation

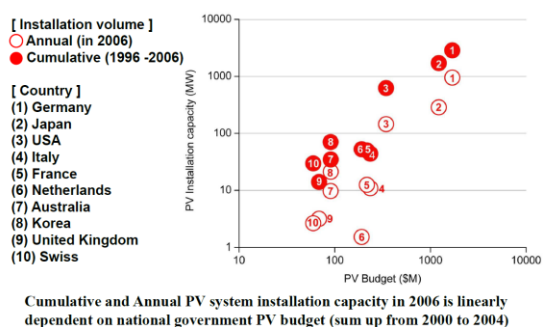


図 3 2 主要国における太陽光発電の単年度および累積導入量と各国のPV関係の予算（研究開発費を含む）との相関（ICSU-ISPRES Report）

次回のWCPEC-8は、2022年9月18日～23日、イタリアのローマで開催予定である。35th EU-PVSECは、2018年9月24日～28日、ベルギーのブリュッセルで、46th IEEE PVSCは、2019年6月16日～21日、米国のシカゴで、PVSEC-29は、2019年11月4日～8日、中国の西安で、開催予定である。

（以上）