

第 29 回太陽光発電科学技術国際会議 (29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering) 報告

2019. 11. 11

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日 : 2019年11月4日～11月8日。

2. 開催場所 : Qujiang International Conference Center (西安、中国)。

3. 本会議の概要 :

1984年の神戸での第1回会議以来、1年半毎に開催され、2011年の福岡での会議からは、毎年開催される太陽光発電に関するアジア・オセアニア地区の会議である。今回の会議の組織委員長は、Ying Zhao (Nankai Univ.) と Tianwei Tan (China Renewable Energy Society) であった。ウェブサイトの参加登録者数は、1,448名で、実際の参加登録者数は、1,034名との事である。図1は、ウェブサイトの参加登録者数の国別内訳を示す。①中国857名、②日本179名、③韓国82名、④オーストラリア63名、⑤ドイツ37名、⑥米国32名、の順であった。

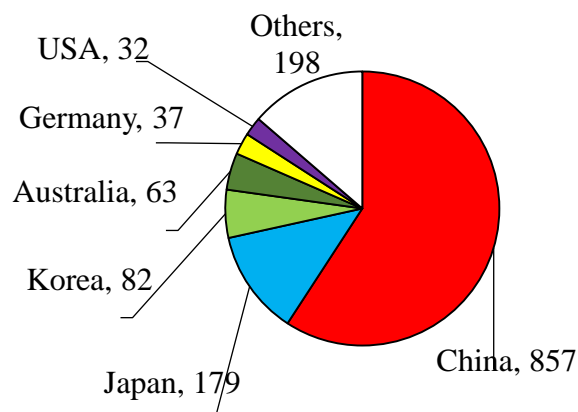


図1. ウェブサイトの参加登録者数の国別内訳 (PVSEC-29組織委員会情報)

図2は、国別発表論文件数を示す。32カ国から785件の論文発表があった。国別では、①中国427件、②日本137件、③韓国48件、④オーストラリア47件、⑤ドイツ26件、⑥米国25件、⑦オランダ15件、⑧シンガポール7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、①Si太陽電池系215件、②化合物薄膜太陽電池系122件、③ペロブスカイト太陽電池121件、④太陽電池モジュールの性能と信頼性85件、⑤新概念および新たな先端材料50件、⑥III-V化合物半導体。集光、宇宙用太陽電池、⑦太陽光発電システム系統連携 (スマートグリッドを含む) 47件、⑧太陽光発電システム (周辺機器を含む) 40件、⑨その他52件、の順であった。

**Number of Papers presented at the PVSEC-29
(Xi'an, China; Nov. 4-8, 2019) 785 papers**

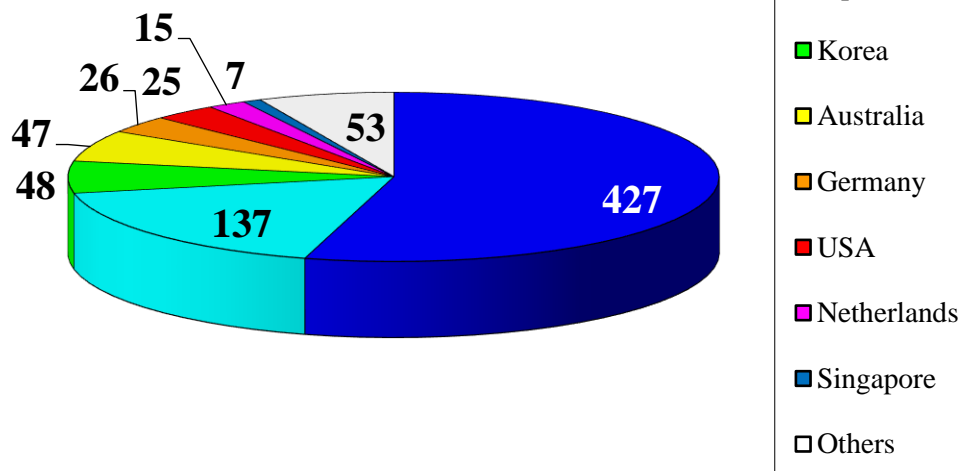


図 2. 国別発表論文数 (RTS(株)提供)

**Number of Papers presented
at the PVSEC-29
(Xi'an, China; Nov. 4-8, 2019) 785 Papers**

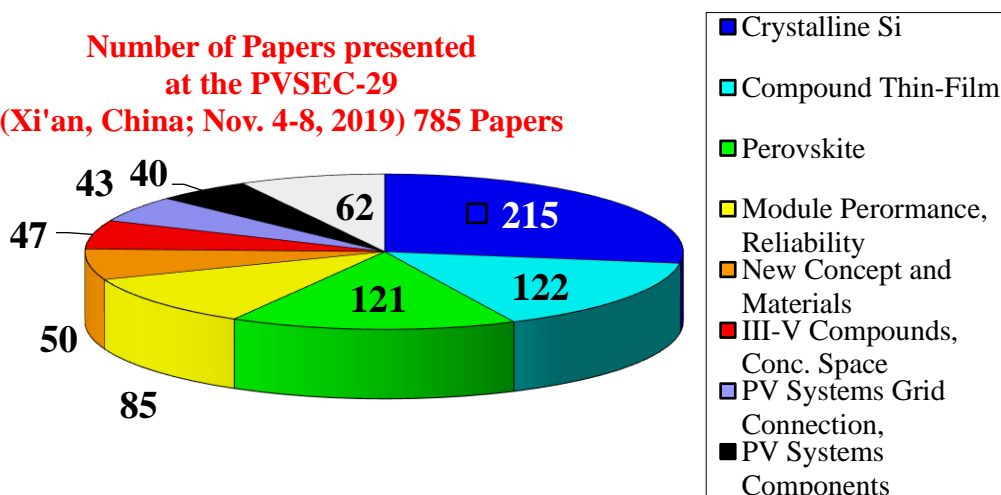


図 3. 発表論文数の分野別内訳 (RTS(株)提供)

PVSEC Awardは、Zhigiang Feng (Trina Solar) と Ying Zhao (Nankai Univ.) が受賞した。Dr. Fengは、TrinaのR&Dチームを率い、19の世界最高効率の達成(2014年、2015年、各々、効率20.8%、21.3%の多結晶Siセル、効率25.04%の面積結晶Siバックコンタクトセル、効率24.58%の面積N型TOPConセルなど)が、評価された。Prof. Zhaoは、1992年以来、薄膜Si R&Dを牽引し、実用化への貢献、China Renewable Energy Society の Vice Presidentとしての活動が、評価された。PVSEC Special Awardは、EVA製造への貢献で、Jianhua Lin (Hangzhou First Applied Materials)、PV企業の牽引とモノ結晶Si製造への貢献で、LONGIチーム、IEA/PVPS活動や標準化活動への貢献で、Fang Lyu (Chinese Academy of Science) が、受賞した。Hamakawa Awardは、Yuepeng Wan (GCL-Poly Energy) が、高品質多結晶Siウエハ、キャストモノ技術への貢献で、受賞した。

4. 主な発表論文の概要：

4. 1 基調講演—1

Hui Shen (Sun Yat-sen Univ.) は、“Sun culture and solar technologies in ancient China”と題して、基調講演を行った。西洋では、AdamとEveだが、中国では、FaxiとNywaで、太陽と月になぞらえる。Yin (月) -Yang (太陽) theoryでは、Yinは、山の北側、川の南側、又は、月、cold weatherにあたる。Yangは、山の南側、川の北側、sun、heat、fireなどにあたる。John Perlinの“Let It Shine”には、太陽エネルギーの6000年の歴史が記述されているが、中国では、約8000年前にさかのぼる6500BC-5500BCのSunman Stone彫像もHubei博物館にあるとの事である。LularやSun Calendarの歴史も紹介された。まだ、古代の太陽エネルギー技術、Sun Fire、Solar Projection Test、206BC頃のTransparent Mirrorなどで、鏡で太陽光を集光して、枯葉を燃やす例も紹介された。英知を結集して、今後の太陽エネルギー技術の発展を期待すると結んだ。

4. 2 基調講演—2

M.A. Green (UNSW) は、“What comes after PERC?”と題して、太陽電池技術の今後の方向性に関して、基調講演を行った。図4に、UNSWにおける単結晶Si太陽電池の高効率化の進展を示す。1983年の18%セルから、2010年の25%セルと、高効率化に貢献している。Suntech、JA Solarなどの中国企業の育成にも貢献している。図4に示すPERC/PERL構造セルが、結晶Si太陽電池の主流である。

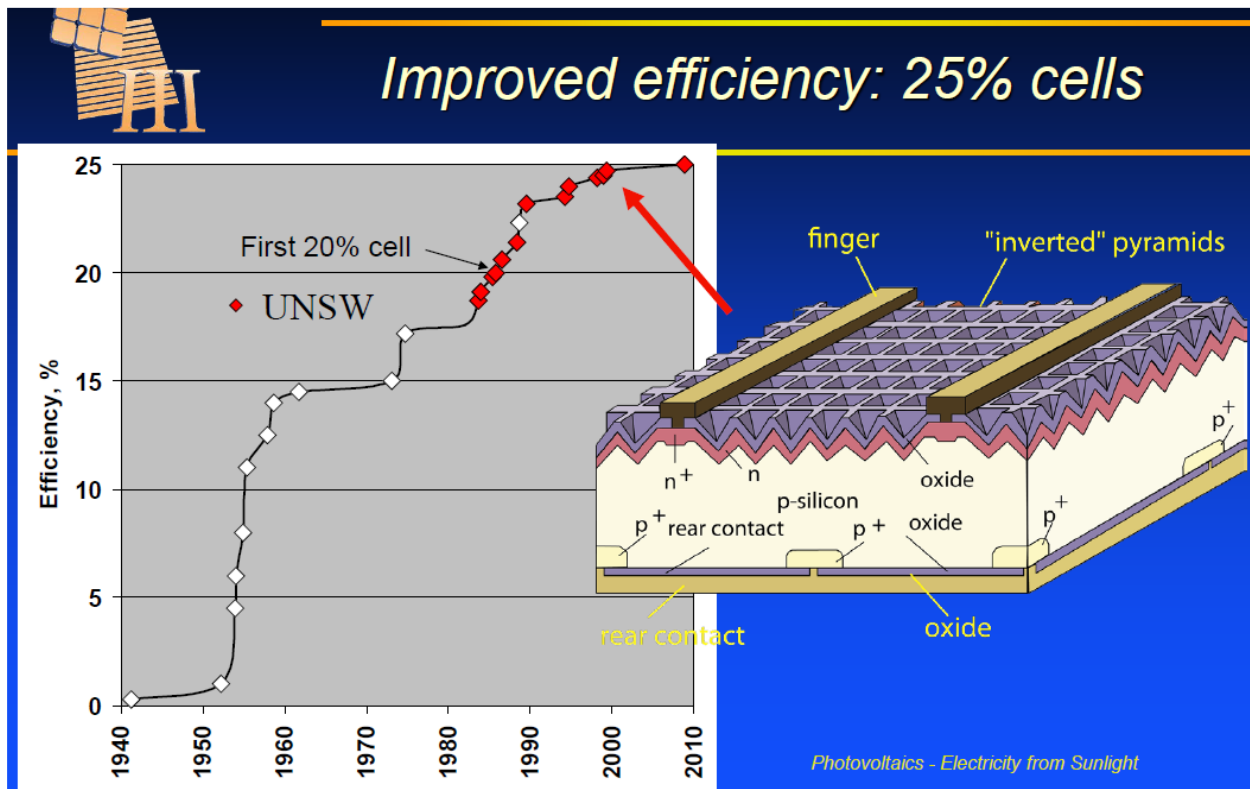


図4. UNSWにおける単結晶Si太陽電池の高効率化の進展 (Prof. M. Green 提供)

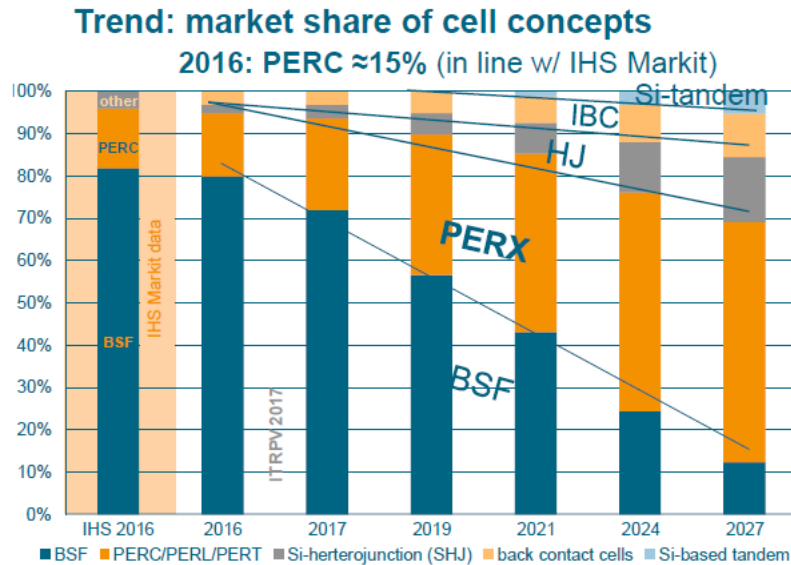


図 5 . 結晶 Si 太陽電池の市場シェアの変遷と予測 (ITRPV 2018、[ITRPV Ninth Edition 2018 including maturity report 20180904.pdf](#))

太陽電池としては、今後 5~10 年は、結晶 Si 系が主力であろう。図 5 に示す ITRPV (International Technology Road for Photovoltaic) ロードマップマップによれば、今後、PERC セルの市場浸透が進むだろう。次の 10 年以降は、Si タンデムに期待が高まろう。図 6 に示すように、Si タンデムセルは、効率 40% 超えの効率化が期待できる。2 端子構造で、InGaP/GaAs/Si 3 接合タンデムセルで、効率 34.1%、ペロブスカイト/Si 2 接合タンデムセルで、効率 28.0% の現状である。図 7 に示すように、各種太陽電池の効率のバンドギャップ E_g 依存性に言及した後、トップセル材料として、種々の材料が適用の可能性がある。図 7 に緑色でチェックした豊富で環境に優しい元素の組み合わせが望ましいと述べた。今回の講演では、述べなかったが、表 1 に示すように、III-V、II-VI、I-III-VI₂、I₂-II-IV-VI₄、II-IV-V₂ など、ハイドライド、カルコパイライト、ケステライト系があり、高ギップ CZTS や NZTS に関心があるとのことである。今後 15 年以降は、3 接合タンデムから 4 接合タンデムになろうとまとめた。

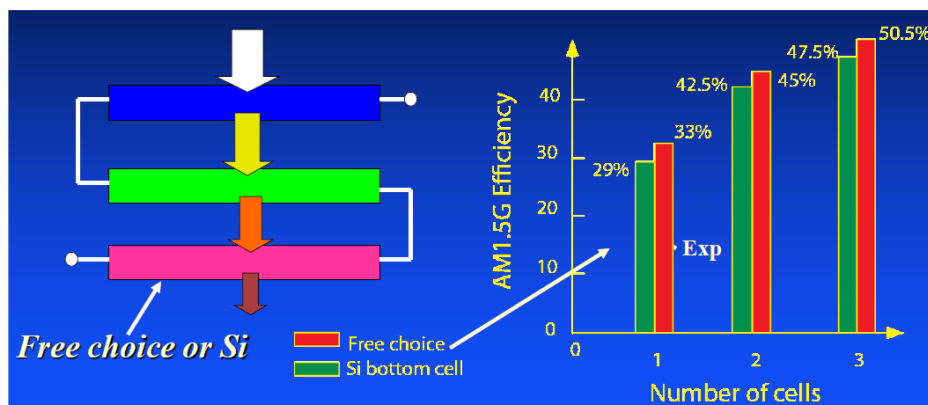


図 6 . Si タンデムセルの高効率化の可能性 (Prof. M.A. Green 提供)

What comes after PERC?

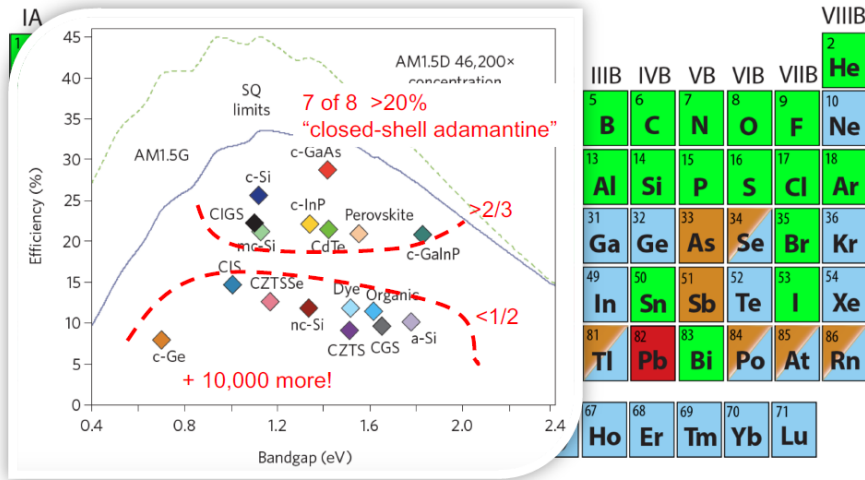


図 7. 各種太陽電池効率とバンドギャップの関係、トップセル材料の可能性 (Prof. M.A. Green 提供)

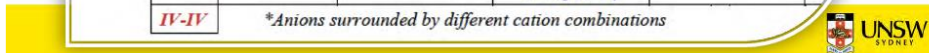
表 1. Si タンデム太陽電池のトップセル、ミドルセルの候補材料(Prof. M.A. Green 提供)

What comes after PERC?

Table 1: Families of Potential Closed-Shell Adamantine Semiconductors

IA	Families of Potential Closed-Shell Adamantine Semiconductors				VIII B
	BINARY	TERNARY	QUATERNARY	QUINTERNARY	
1 H	I-VII	(I_2-VII_2)	$0-II-VII_2$		2 He
3 Li		$(I_3-VII_3)^*$	$(0_2-III-VII_3)$	$(0-I-II-VII_3)$	10 Ne
11 Na		(I_4-VII_4)	$0_2-IV-VII_4$	$0-I-II-VII_4$	18 Ar
19 K				$0_2-I-III-VII_4$	36 Kr
37 Rb	II-VI	(II_2-VI_2)	$0-IV-VI_2$		54 Xe
55 Cs			$I-III-VI_2$		86 Rn
		$(II_3-VI_3)^*$	$(0-III_2-VI_3)$	$(0-I-V-VI_3)$	
		$(I_2-IV-VI_3)$		$(0-II-IV-VI_3)$	
				$(I-II-III-VI_3)$	
		(III_4-VI_4)	I_3-V-VI_4	$0-II-III_2-VI_4$	$0-I-II-V-VI_4$
				$0-II_2-IV-VI_4$	$0-I-III-IV-VI_4$
				$I-II_2-III-VI_4$	
				$I_2-II-IV-VI_4$	
	III-V	(III_2-V_2)	$II-IV-V_2$		
		$(III_3-V_3)^*$	$(I-IV_2-V_3)$	$(II-III-IV-V_3)$	
		(III_4-V_4)	$0-IV_3-V_4$	$I-III-IV_2-V_4$	
				$II-III_2-IV-V_4$	
	IV-IV				

*Anions surrounded by different cation combinations



5. 主な発表論文の概要：

5. 1 先進太陽電池技術、ペロブスカイトおよび有機太陽電池分野：

Jingo You (Inst. Semiconductors, Chinese Academy of Science) は、“Efficient and stable perovskite solar cells”と題して、プレーナリ講演を行った。Graetzel による 1991 年の効率

5%から 2012 年の効率 11.9%の色素増感太陽電池、2001 年の効率 2%から 2019 年の効率 16.5%の有機太陽電池の変遷の紹介がなされた。ついで、2009 年の宮坂らに始まり、2012 年の Park や Snaith らによるペロブスカイト太陽電池技術の変遷が述べられた。高光吸収係数、長い拡散長と浅い欠陥準位の特長があり、最近、小面積セルで、KRICT/MIT による効率 25.2%、著者のグループによる効率 23.7%の現状である。著者のグループの高効率化の研究状況が述べられた。ヘテロ接合に学び、界面再結合の低減により、少数キャリア寿命が、0.37ns から約 10ns に改善され、2016 年に、効率 19.9%を達成している。GaAs や Si に学び、粒界パッシベーションにより、2017 年、効率 20.9%、ハイドライド塩を用いた表面再結合の低減により、2019 年の効率 23.7%に、高効率化がはかられている。安定性や電圧損失の視点での各種ペロブスカイト材料の違いが、解析されている。2 端子ペロブスカイト/Si、ペロブスカイト/CIGS、ペロブスカイト/ペロブスカイト 2 接合タンデム太陽電池で、効率は、各々、28%、24%、23.5%の状況である。

5. 2 化合物薄膜太陽電池分野：

(1) Takuo Kato (出光興産) は、“Recent progress and future prospects of CIS-based thin-film solar cell technology – High efficiency and new applications”と題して、プレーナリ講演を行った。日本の太陽光発電は、累積で、2018 年の 56GW から、資源総合株による 2030 年の累積 150GW の見通し、2050 年には、400GW という予想もある。今後、(超)高効率、低コスト(価格)に加え、軽量、フレキシブル、新しい価値の創製、などが、求められている。表 2 に、ソーラーフロンティアを含む高効率 CIGS 太陽電池の特性を示す。モジュール効率も、ソーラーフロンティアの面積 841cm² で、効率 19.2%、Avancis の 30cmx30cm で、効率 19.0%、Niesole の面積 1.085m² で、効率 17.4%の状況である。製造レベルのモジュール効率は、ソーラーフロンティアの 17.2%である。RbF や CsF のアルカリ金属による堆積後の処理、(Zn,Mg)O:Al や (Zn,Mg)O:B などの高バンドギャップ窓層、Ag 添加などの効果が、述べられた。さらなる高効率化に向け、タンデム太陽電池の外部状況、UCLA によるモノリシックタンデムで、効率 22.43%、HZB による 4 端子メカニカルスタックで、効率 25.9%が、紹介された。結晶 Si モジュールの 1/20 の軽量モジュールの試作、強度の弱い屋根など、新しい用途展開も言及された。

表 2 CIGS 太陽電池効率の状況

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

(2) Yong-Hang Zhan (Arizona State Univ.) は、“CdTe and 1.7eV MgCdTe solar cells and liftoff technology using water-solution sacrificial layers”と題して、プレーナリ講演を行った。First Solar は、これまで、累積 25GW のモジュールを出荷しており、BIPV などへの適用で、期待は大きい。CdTe 太陽電池効率 22.1%は、他の太陽電池に比べて、高くはない。電圧

損失などが課題であり、表 3 に示す課題と解決策が言及され、ASU、NREL、CSU、First Solar の取り組みが紹介された。

表 3 CdTe 太陽電池の課題と解決策

Challenges	Solutions
Low Voc *Poor hole contacts/low p-type doping	Remote junction p-ZnTe, p-a-Si:H,
*Surface/interface recombination	MgCdTe barrier layer, Al ₂ O ₃ on CdSeTe ZnMgO passivation
Diffusion of Cu	Use of group-V elements (As, P, Sb)
Low efficiency than theoretical limit	Remove of absorptive substrate to enhance photon recycling

CdTe/MgCdTe ダブルヘテロ接合単接合太陽電池やタンデムセルのアプローチが紹介された。CdTe 太陽電池の高効率化に向け、MgCdTe/CdTe/MgCdTe ダブルヘテロ接合単接合太陽電池が検討され、表 3 の hole contact として、a-Si:H が用いられ、active area 効率 19.7% (Jsc=24.9mA/cm²、Voc=1.09V、FF=72.4%)、total area 効率 17.1% (Jsc=21.7mA/cm²、Voc=1.09V、FF=72.4%) の状況である。タンデムセルとして、CdTe(Eg~1.5eV)/Si(1.11eV) や MgCdTe(1.7eV)/Si(1.11eV) が対象である。MgCdTe トップセルは、効率 15.2% (Jsc=16.9mA/cm²、Voc=1.12V、FF=78.7%) の状況である。

5. 3 高効率III-V多接合、集光型および宇宙用太陽電池分野：

(1) M. Yamaguchi ら (豊田工大、トヨタ、シャープ、NEDO) は、“Super-high efficiency III-V multi-junction and concentrator solar cells, and PV-powered vehicle applications”と題して、プレーナリ講演を行った。各種太陽電池、集光型太陽電池および宇宙用太陽電池の高効率化の変遷がレビューされた。図 8 は、各種太陽電池の高効率化の変遷を示す。III-V タンデム太陽電池、集光型太陽電池は、効率、各々、43~46%、55%の高効率化が期待できるが、単接合太陽電池は、29~32%が、限界で、タンデム化が、現実解である。

各種太陽電池の高効率ポテンシャルに関する解析結果も報告された。太陽電池の電圧損失から外部発光効率 (ERE; External Radiative Efficiency)、曲線因子 FF から、抵抗損失が、算出されている。解析結果を図 9 に示す。3、5 接合タンデム太陽電池で、効率 42%、46% の高効率化が期待できる。GaAs 太陽電池、結晶 Si 太陽電池で、各々、効率 31%、29% が期待できるが、CIGS やペロブスカイト太陽電池では、まだ、電圧損失、抵抗損失が課題であり、効率 26~27%が期待できる状況である。III-V 族化合物太陽電池の基礎物性も言及された。表面欠陥挙動の違いによる表面再結合の違い、格子不整合と界面再結合、転位による少数キャリア輸送、放射線照射欠陥の挙動と少数キャリア注入促進アニール現象、フォトンリサイクリングなどが、述べられ、特に、GaAs や InGaP で、フォトンリサイクリングが、効果をあげている。多接合タンデム太陽電池については、種々の課題のうち、トップセル材料の選定、サブセルのインターコネクション用トンネル接合、が言及された。

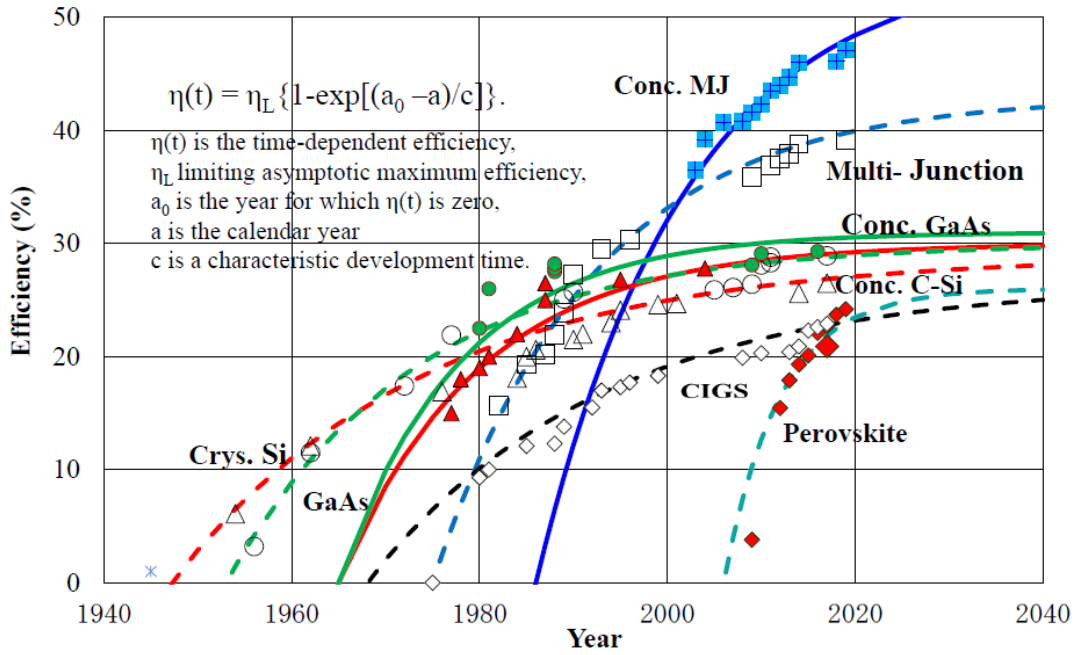


図 8. 各種太陽電池の高効率化の変遷 (M. Yamaguchi 講演資料)

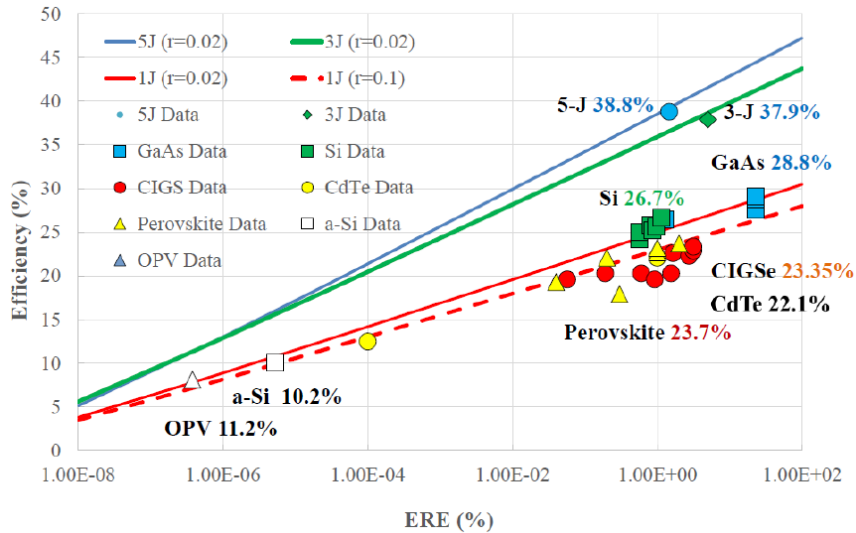


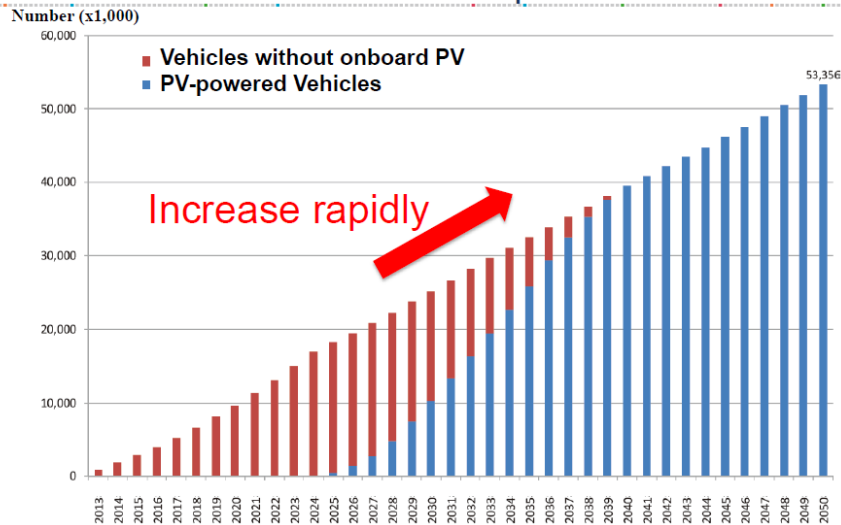
図 9. 各種太陽電池の高効率ポテンシャルに関する解析結果 (M. Yamaguchi 講演資料)

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。輸送分野でも CO₂ 削減が必須で、2030 年までは、ガソリンカーは、ゼロになると予想される。しかし、HV や EV も、CO₂ 削減の点は、不十分で、太陽光発電等再生可能エネルギーの導入が必要である。図 10 は、NEDO「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」による太陽電池搭載自動車の導入予測を示す。再生可能エネルギーのうち、太陽光発電が、有望と考えられ、2050 年には、約 50GW、累積約 1TW の市場形成が、期待される。わが国の乗用車の一日あたりの平均走行距離は、約 24 km である。乗用車の屋根やボンネットの面積は、狭く、30km/日以上以上の走行距離を実現するには、30%以上の効率太陽電池モジュールの開発が要求される。図 11 は、効率 30%以上の車載用高効率太陽電池モジュールの必

要性を示す。表 4 に示すように、太陽電池搭載自動車の開発動向が紹介されている。現状では、車載用太陽電池として、高効率結晶 Si 太陽電池モジュールが用いられているが、効率 25% が、限界と考えられる。

図 1 1 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 30% のためには、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。さらなる高効率化と低コスト化に関する研究開発が必要である。今後の重要な技術開発の一つとして、Si タンデム太陽電池がある。図 1 2 示すように、2 接合および 3 接合 Si タンデム太陽電池で、各々 36%、42% 以上の高効率化が可能であるが、InGaP/GaAs/Si 3 接合タンデム太陽電池、ペロブスカイト/Si 2 接合タンデム太陽電池で、効率、各々、35.9%、28.0% の現状である。

Prediction of a number of PV-powered vehicles



NEDO's Interim Report "PV-Powered Vehicle Strategy Committee" released on Jan. 31st 2018.
https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100358.html

図 1 0 . 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)

Solar module for automotive applications

10

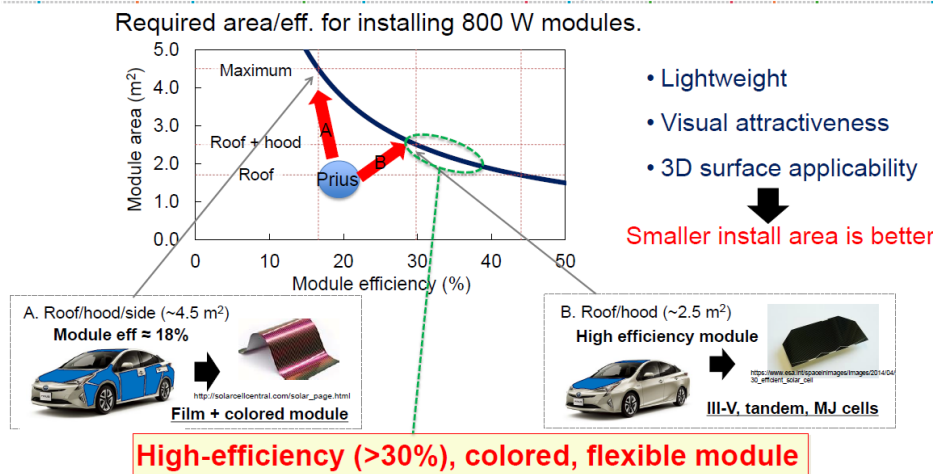


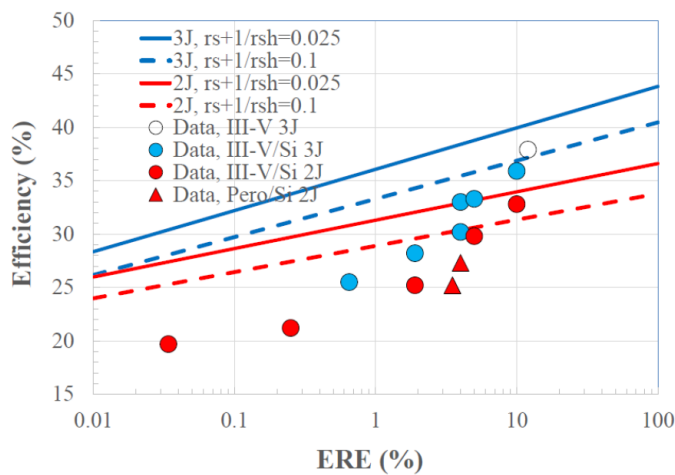
図 1 1 . 効率 30% 以上の車載用高効率太陽電池モジュールの必要性 (M. Yamaguchi 講演資料)

表 4. 太陽電池搭載自動車の開発動向 (M. Yamaguchi 講演資料)

Status of practical phase PV-powered vehicles

7 / 1

Auto company	Module	Output power	Driving range	Sales start year
TOYOTA https://global.toyota/en/newsroom/toyota279c5888.html	Si (HIT)	180 W	~6.1 km/day	2017
HYUNDAI https://www.hbc.com/technology-4240594	Si	NA	NA	NA
LIGHTYEAR https://lightyear.com/	Si (IBC)	1000 W	~50 km/day	2021
SONO MOTOR https://sonomotors.com/	Si (IBC)	1204 W	~34 km/day	2020
Hanergy http://en.hanergy.com/power-converter.html	GaAs	NA	NA	NA



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

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

図 1 2. Si タンデム太陽電池の現状と高効率化の可能性

PV-powered car for “Public Road Test”

Collaboration with Sharp and NEDO

Prius PHV

InGaP/GaAs/InGaAs 3-junction (Sharp)

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

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

Stated public road test to show effectiveness

図 1 3. 実証試験用 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV (M. Yamaguchi 講演資料)

図 1 3 に示すように、実証試験用シャープ製 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池搭載トヨタ Prius PHV と特性も紹介された。講演では、III-V/Si タンデム、3 接合太陽電池の静的低倍集光モジュールおよび III-V/Si ハイブリッド部分集光太陽電池モジュールの研究成果も報告された。

5. 4 結晶 Si 太陽電池分野：

(1) Frank Feldmann Stefan Glunz (FhG-ISE) は、“Silicon photovoltaics – New opportunities for an old technology”と題して、プレナリ講演を行った。結晶Si太陽電池モジュールは、市場の約97%を占め、今後も、主流となるであろう。図 1 4 に示すように、結晶Si太陽電池は、GaAsやGaInP太陽電池に比べて、電圧損失、FF損失が多く、改善の余地がある。光およびキャリアマネージメントが必要である。結晶Si太陽電池の方向性が、議論された。P型SiのAl-BSFセルは、1973年に、最初の報告があり、2010年、2013年に、効率、各々、17.2%、19.7%が報告され、一時期、市場の70~80%を占めてきたが、図 1 5 に示すように、セル効率20%が限界である。

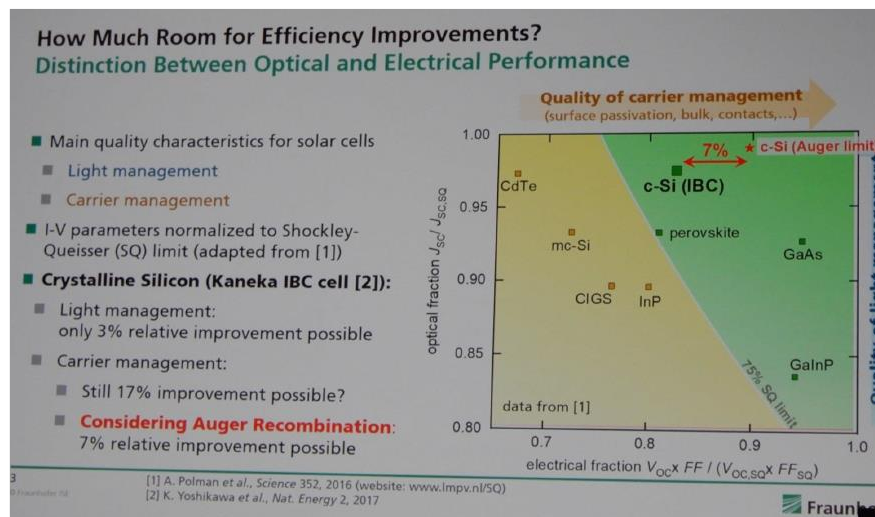
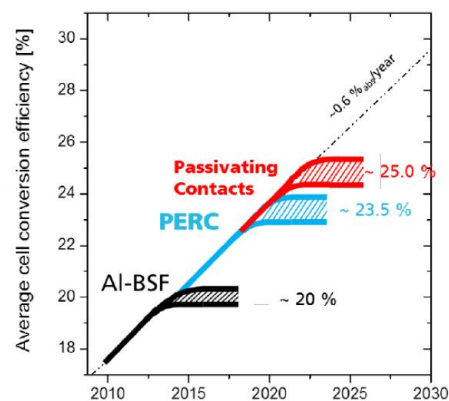


図 1 4. 各種太陽電池の高効率化の現状と改善の可能性 (36th EU-PVSECで、中上明光氏提供)

PERC limitations

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



[1] M. Hermle, nPV workshop, 2019

図 1 5. 各種結晶Si太陽電池の効率限界 (Dr. D. De Ceuste提供)

図 1 6 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。PERLセルで、UNSWは、効率25.0%、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。しかし、PERCセルの効率限界が指摘されている。図 1 5 に示すように、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、期待されている。

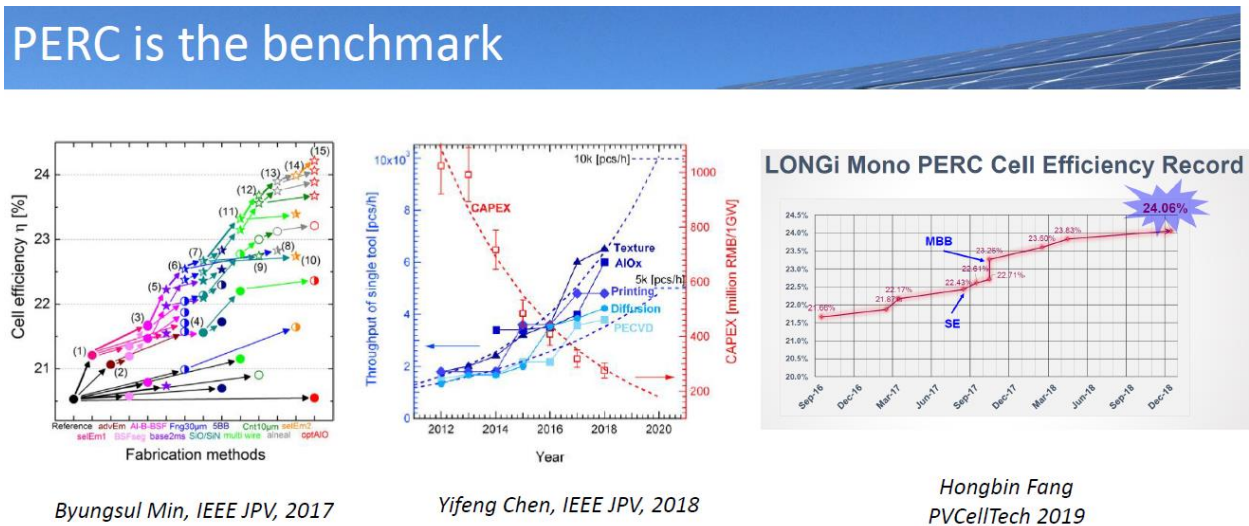


図 1 6 . PERCが現在の主流 (Dr. D. De Ceuste提供)

図 1 7 は、FhG-ISEのTOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) 太陽電池の構造と特性を示す。4cm²セルで、効率25.8% (Jsc=42.9mA/cm²、Voc=724mV、FF=83.1%) が得られている。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。バックコンタクトセルで、SunPowerの効率25.2%、ISFHのPOLO構造セルで、効率26.1%、ヘテロ接合バックコンタクトセルで、カネカの効率26.7%の現状である。Auger Limitの効率限界は、29.4%であり、2030年、効率29%で、飽和するだろう。

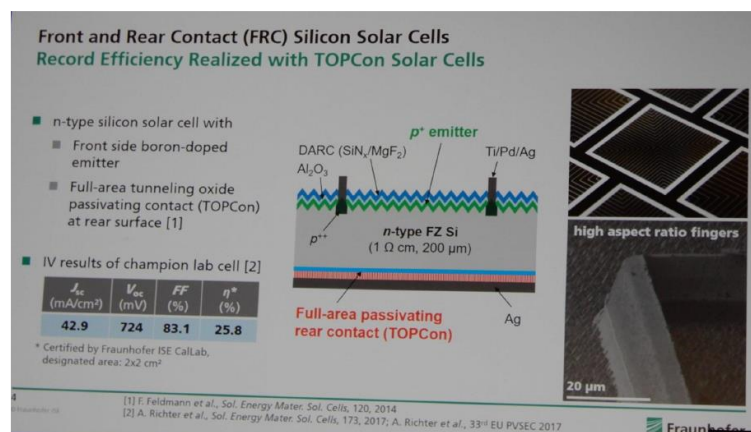


図 1 7 . FhG-ISEのTOPCon太陽電池の構造と特性 (36th EU-PVSECで、中上明光氏提供)

効率 30%以上を目指して、III-V/Si、ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池が、検討されている。FhG-ISE では、direct bonding による GaInP(1.88eV)/GaAs(1.42eV)/Si(1.12eV)

3 接合タンデムセルで、効率 34.1%（面積 3.963cm²、Jsc=12.4mA/cm²、Voc=3.177V、FF=86.4 %）、direct growth で、効率 24.3%（Jsc=12.2mA/cm²、Voc=2.662V、FF=74.5 %）を得ている。ペロブスカイト/Si 2 接合タンデム太陽電池では、FhG-ISE は、効率 21.6% の状況である。EPFL から、効率 25.24%、Oxford PV から、効率 28% が、報告されている。HZB から、最近、LiF/IZO/SnO₂/C60/perovskite//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% が報告されている。

(2) Yaepeng Wan ら (GCL-Poly Energy) は、“Recent key technology progress and issues in crystalline silicon wafers for solar cells” と題して、プレーナリ講演を行った。表 5 に、CZ-Si の現状と将来が、まとめられている。課題は、低酸素濃度、抵抗率分布の抑制、Ar ガス recovery、装置・プロセスコストのさらなる低減、などである。

表 5 CZ-Si の現状と将来

	Present	Future
Pulling speed	1.5~1.7 mm/min	1.9mm/min
Power	20~28kWh/kg in 45~65kg	17 kWh/kg
Charge size	700~1200 kg/run	1500 kg/run
Productivity	3.8~4.8 kg/hr	5.5 kg/hr
Diameter	216~236 mm	280~320 mm

キャスト多結晶に関しては、2005 年から G4、2007 年から G5、2012 年から G6/G7 と、大型化が進み、2011 年からシードキャストの開発がなされ、2011 年からキャストモノの G1、2013 年から G2、2017 年から G3 と進展し、2018 年 7 月から、モジュール化、G3 のキャストモノウエハの事業化がなされている。キャストモノを用いた PERC セル効率は、2013 年には、17.6~19.4% と分布していたが、現在は、40 万枚の PERC セル (G3) の平均効率は、21.96% であり、CZ セルの平均効率の 22.2% に近づいている。酸素濃度も、CZ の 12ppm から、キャストモノでは、5ppm と改善されている。G3 キャストモノの PERC セルモジュール出力も、375~395W と増加している。モジュール出力 (効率) も、CZ モノとの差は、10W 程度である。今後は、成長プロセスの最適化、品質制御、新しいホットゾーン、新しいシード配置などが、課題としている。Trina は、N 型キャストモノを用いた TOPCon セルで、効率 22.96%（面積 247.79 cm²、Jsc=41.35 mA/cm²、Voc=709.8 mV、FF=78.14 %）を達成している。

(3) Christophe Ballif ら (EPFL) は、“Recent improvements in research and industrialization of front and back - contacted solar cells and modules using low-temperature passivating contacts” と題して、プレーナリ講演を行った。図 18 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。

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、PECVD、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、

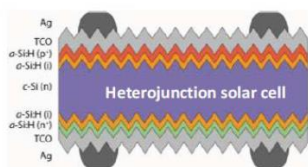
GCL、Jollywodなどが、パイロットライン、技術開発ステージである。TOPConは、現在のPERCラインをアップグレードでき、種々のツールを活用できる可能性がある。究極のゴールは、真のpassivating contactsを持つ両サイドTOPConである。課題は、メタリゼーションのインテグレーション、低コストプレーティング、パッシベーションを劣化させないペーストなどである。

一方、SHJは、光劣化なし、低温度係数（0.25～0.27%/℃）、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。パナソニック、Teslaの1,000MW生産の他、RECの600MW、Hevel Solarの250MW生産などである。技術開発は、ASU、CSEM/EPFL、CEA/INESなどでなされている。Meyer Burgerが、24.55%を達成している。RECのモジュール効率ターゲットは、20.6%（360W）～21.7%（380W）である。装置やタンキラインは、Meyer Burger、AMAT、INDEOtec、Von Ardenneなどから入手できる。大量生産も、CIE、Sunpreme、3SUN/ENEL、Hanergy、Jinergyなどで、計画中である。製造コストの低減が必要で、材料、結晶Si、chemical、TCO、Ag、モジュール、装置、スループットがあげられている。

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

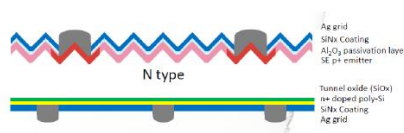


SHJ cross-section
C. Ballif, 2018 IEEE-WCPEC

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

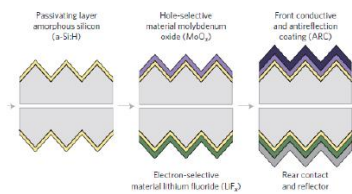
[1] Glunz, 2017 IEEE PV Conference

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



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

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



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

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

図 1 8. TOPConとヘテロ接合 (SHJ) 構造太陽電池の比較 (Dr. D. De Ceuste提供)

EPFLでの取り組みも紹介された。ドーパントフリーMoO₂などキャリア選択性 passivated contact が検討され、種々のCZウエハを用い、効率23.1～24.4%の現状である。トンネルIBCセルでは、25.0%（面積25.04 cm²、J_{sc}=41.5 mA/cm²、V_{oc}=736 mV、FF=81.9%）を得ている。今後は、セルインターコネクションの改善、装置コストの低減、アップグレードIBCなど効率向上（量産セル効率23.5%→25%）、ウエハの薄型化（110～120 μm）、Ag使用量削減（20～30 mg）、ペースト改善（Cuペーストを含む）が、課題とまとめた。

5. 5 PVモジュール、BOSコンポーネント分野:

(1) Jun Lv (Longi Solar) は、“Power, peak, cost valley – Innovation LCOE solution”と題して、プレーナリ講演を行った。LCOEは、power、energy yield、reliability、costに関係し、

2000年の15CNY/kWhから、2017年の0.7CNY/kWhに低減している。大型ウエハ、bifacial、half-cutなどの先端モジュール技術に言及した。M6ウエハは、156.75mm角から166mm角に移行し、モジュールコスト0.031CNY/Wを削減できる。Bifacial PERCセルは、6バスバー、光吸収の改善より、効率22.5%の状況である。光劣化、PIDなどの信頼性に関しても、検討結果が述べられた。モジュールHi-MO3、Hi-MO4の出力は、各々、375~385W、430~440Wで、BOSコスト6.9%、LCEO1.45%の低減が、はかられている。Energy yieldに関しては、tracking gain9.3%、bifacial gain15.2%、total gain24.5%を見込んでいる。今後、新しいモジュール設計、特に、セルの高密度配置、bifacial PERC、half-cutなどが、重要とまとめた。

(2) Keisuke Ohdaira (北陸先端院大)は、“Systematic study on potential-induced degradation of n-type crystalline Si photovoltaic modules”と題して、プレーナリ講演を行った。PV産業の拡大と共に、PVモジュールの信頼性は、益々、重要となっている。図19に示すように、n型FE (Front Emitter) およびSiヘテロ接合 (SHJ) モジュールのPID (Potential-Induced Degradation) に関する検討結果が報告された。結果は、表6に、要約されている。また、参考文献があり、詳しくは、参考文献を参照されたい。SHJモジュールでは、TCO内の金属In形成によるJsc減少とSiへのNa侵入によるVoc減少が、主要劣化である。n-FEモジュールでは、下記の3段階減少からなり。第1段階：回復しうるが、JscとVocの減少。SiNx内の正電荷蓄積と表面再結合増大。正電荷の起源は、Kセンター (SiNx内のSiダングリングボンド)。第2段階：回復しうるが、FF減少。空乏層内へのNa侵入による再結合電流増加。第3段階：回復しうるが、VocとFFの減少。Naドーム形成によるSiNxと接合の破壊。

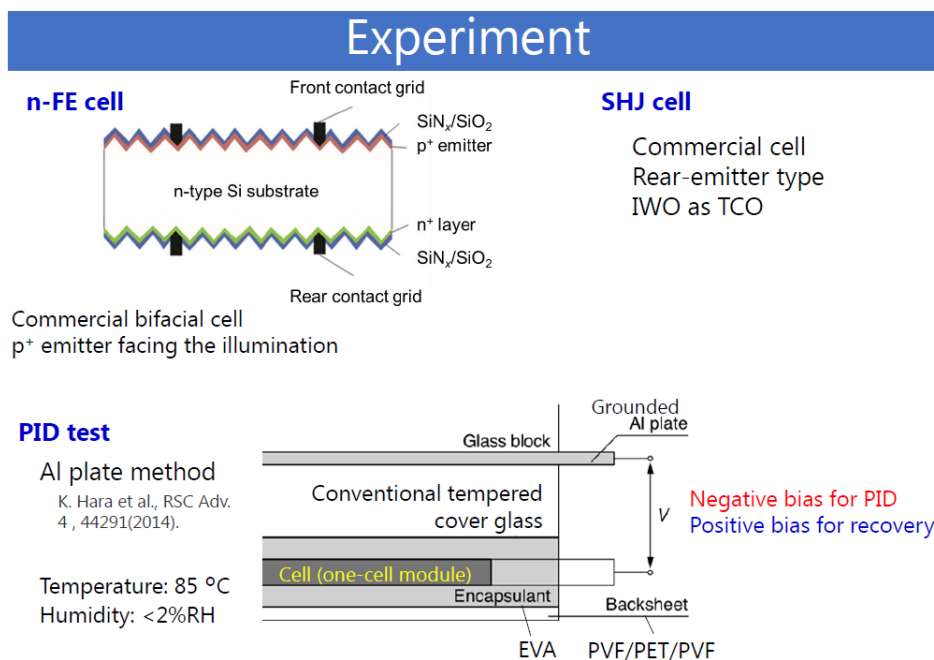


図19. PID試験の太陽電池構造とテスト条件 (Prof. K. Ohdaira提供)

表 6. PID試験による太陽電池モジュールの特性変化、考え得るメカニズムと参考文献
(Prof. K. Ohdaira提供)

PID of n-type c-Si PV modules

Our work

Type	Behavior	Possible mechanism	References
Rear-emitter (n-RE)	V_{oc} reduction	Na introduction	Sol. Energy Mater. Sol. Cells 151, 113 (2016).
Silicon heterojunction (SHJ)	J_{sc} reduction	Reduction of TCO by Na	Sol. Energy Mater. Sol. Cells 161, 439 (2017).
	V_{oc} reduction	Na introduction	Prog. Photovoltaics Res. Appl. 26, 697 (2018).
Front-emitter (n-FE)	J_{sc} and V_{oc} reductions	Charge accumulation in SiN_x	Appl. Phys. Express 9, 112301 (2016). Jpn. J. Appl. Phys. 57, 122301 (2018).
	FF reduction	Na introduction into a depletion layer	Microelectron. Reliab. 84, 127 (2018).
	V_{oc} and FF reductions	Serious damage by Na	Appl. Phys Express 12, 064004 (2019).

5. 6 PV システム、性能、応用、インテグレーション分野：

(1) Hongwei Zhou (IBEA Xinjiang Sunoasis Co.) は、“Passive damping scheme design for multiple grid-connected photovoltaic inverters with a common capacity” と題して、プレーナリ講演を行った。Multi-paralleled インバーターは、拡張性、モジュール化、変換機を少なくできるメリットがある。インバーターに circulating 電流があり、共振周波数ドリフトにつながるが、パラレル数の増加により、減少できる。また、common capacitor による共振周波数の固定も可能である。passive damping 設計と active damping 設計が、紹介された。パラレル数に独立に、common capacitor を用いることで、共振周波数を固定できている。システムの安定性を増す active damping は、高スイッチング周波数、広帯域の特徴を持つ。

(2) Xiaoping Xie (Yellow River Upstream Hydropower Development Co.) は、“Environmental and ecological impacts of wind-photovoltaic-hydro-storage complementary energy and large-scale photovoltaic power stations” と題して、プレーナリ講演を行った。

5. 7 PV 経済、市場、政策等分野：

(1) Stefan Nowak (IEA/PVPS) に代わり、IEA/PVPS 専門家が、“From technology to the energy system - latest insights by IEA PVPS” と題して、プレーナリ講演を行った。太陽光発電 (PV) は、TW Era に向かい、①導入量拡大、②価格低減による他のエネルギーに差別化、③広範な用途開拓、④種々の顧客へのサービス、⑤エネルギーシステムへの参入、⑥主力エネルギー (電源) 化、が進んでいる。表 7 に、PV 開発のマイルストーンが示されている。単年度導入量は、1999年の100 MWから、2018年の>100GW、累積導入量も、1995

年の100MWから、2018年の>500GWへと拡大し、2021/2022年には、1TWを超えよう。PVの今後の方向性を、図20に示す。グリッドインテグレーションに加え、ストレージとの協力、ビルディングに加え、輸送分野とへの用途拡大、エネルギーシステムやエネルギー市場への参入等の重要性が示されている。

表7. PV開発のマイルストーン (S, Nowak講演資料)

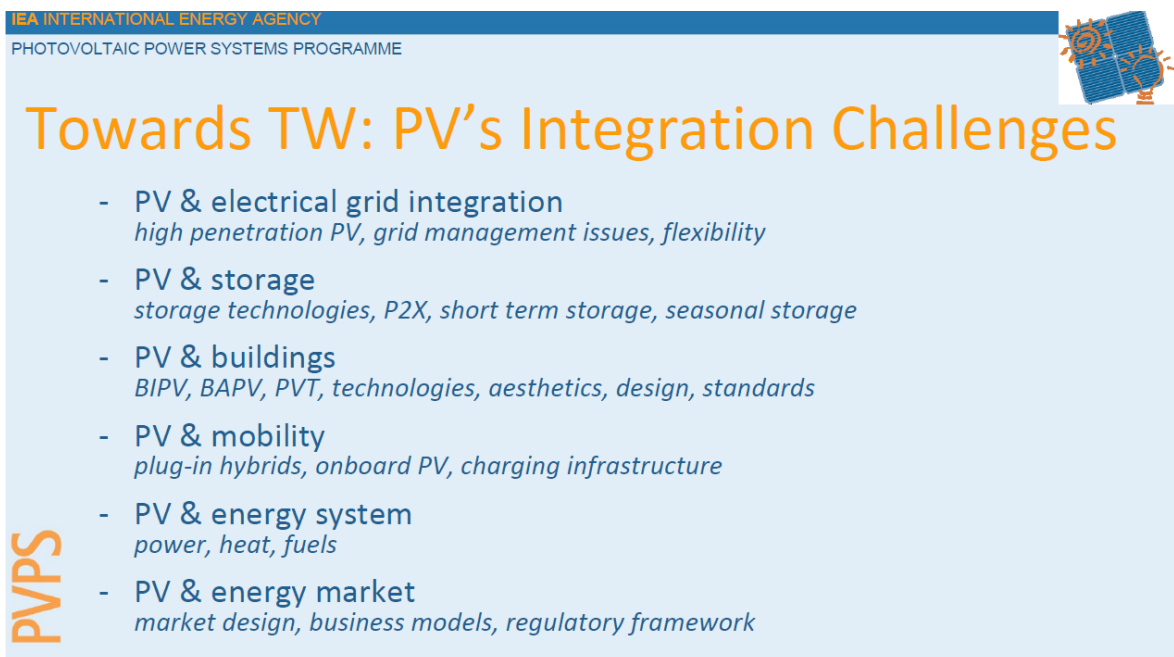
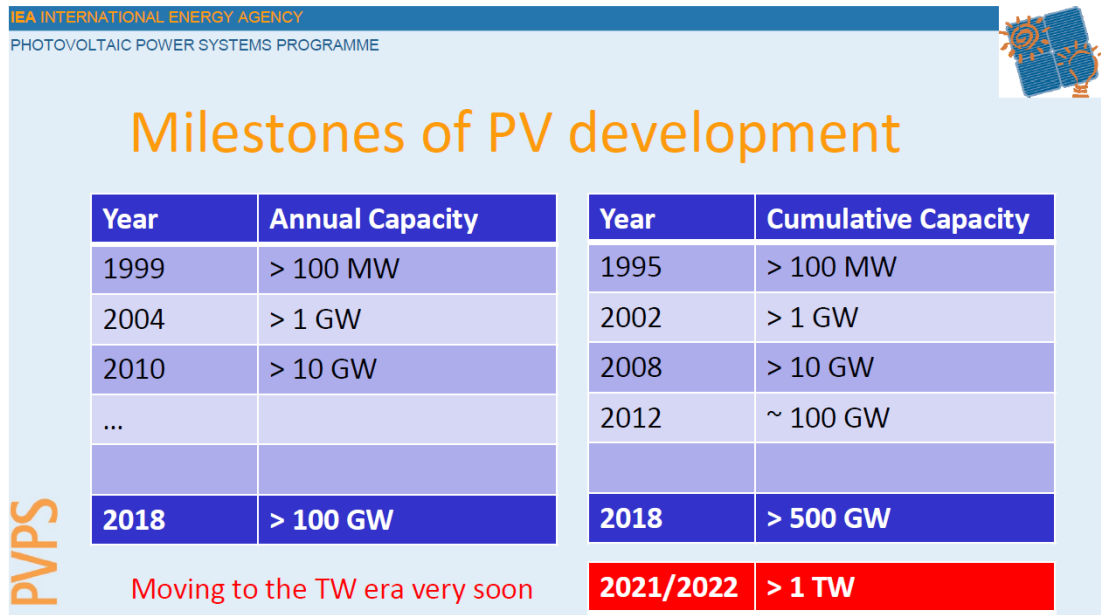
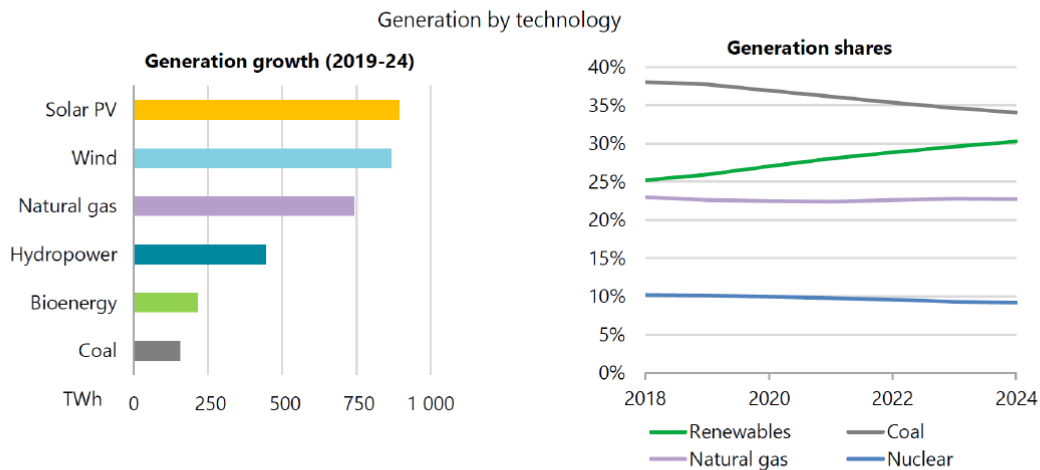


図20. PVの今後の方向性 (S. Nowak講演資料)

IEA (International Energy Agency) による最近の分析結果も報告された。図21に、IEAによる再生可能エネルギーに関する分析結果を示す。ここ5年間の太陽光発電の発生電力量の成長は大きく、再生可能エネルギーは、今後も、導入が大きく進むだろう。図

22に、2019～2024年の再生可能エネルギーの伸びに関する I E A の分析結果を示す。Solar PVの大きな伸びが、予測されている。図23に、分散および住宅P VのLCOEに関する I E A の分析結果を示す。Solar PVのコスト低減がさらに進み、小売電力料金よりさらに安くなり、特に、分散P Vは、投資家に魅力的になるだろう。

Are we on track to meet global climate targets?



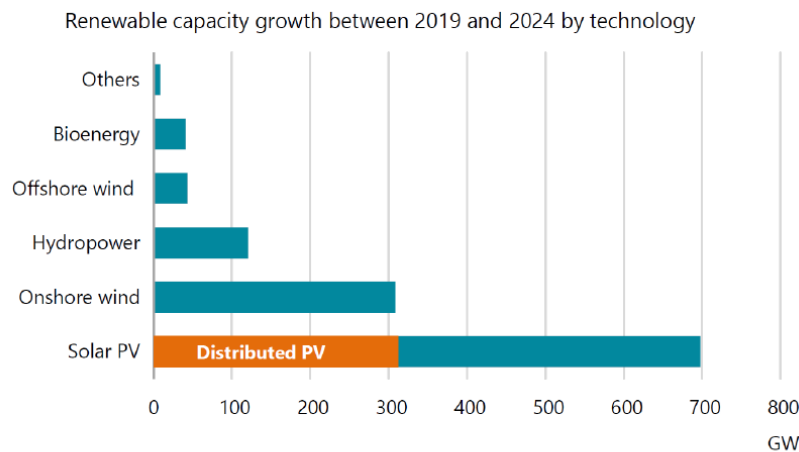
Renewable electricity generation will grow faster than all fuels; however, to be on track with global climate goals, renewables share in generation need to surpass coal before 2024

IEA 2019. All rights reserved.



図21. I E Aによる再生可能エネルギーに関する分析結果 (S. Nowak講演資料)

Solar PV drives strong rebound in renewable capacity expansion



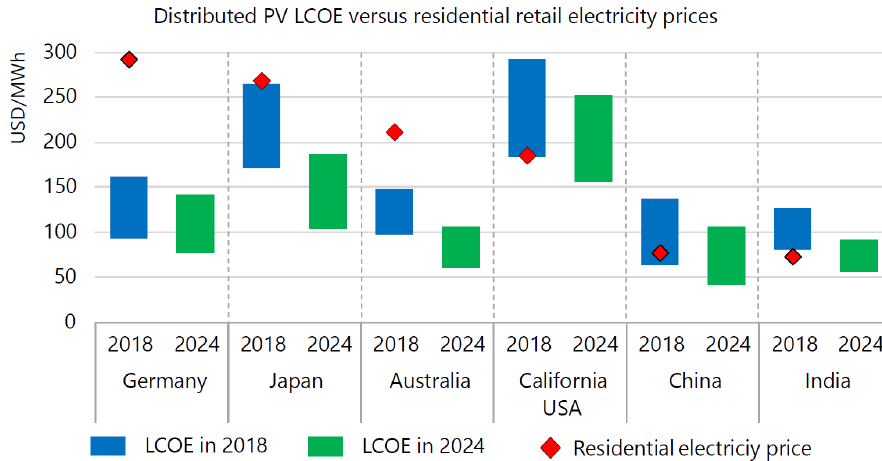
Renewables expand by 50% through 2024, with distributed PV alone growing as much as onshore wind

IEA 2019. All rights reserved.



図22. 2019～2024年の再生可能エネルギーの伸びに関する分析結果 (S. Nowak講演資料)

Distributed PV increasingly cheaper than retail electricity prices



Continuing decline of solar PV costs widens the gap with retail electricity prices, increasing distributed PV's economic attractiveness for private investors

IEA 2019. All rights reserved.



図 2 3 . 分散および住宅 P V の LCOE に関する I E A の分析結果 (S. Nowak 講演資料)

IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

IEA PVPS basics

- 32 members: 27 countries covering 5 continents, EC SolarPower Europe, SEPA, SEIA, Copper Alliance
- A truly global and unbiased network of PV expertise
- Representing main stakeholders in R&D, industry, implementation and policy
- Activities are carried out collaboratively on a country basis along a number of technical and non-technical subjects

Technology Collaboration Programme
by IEA

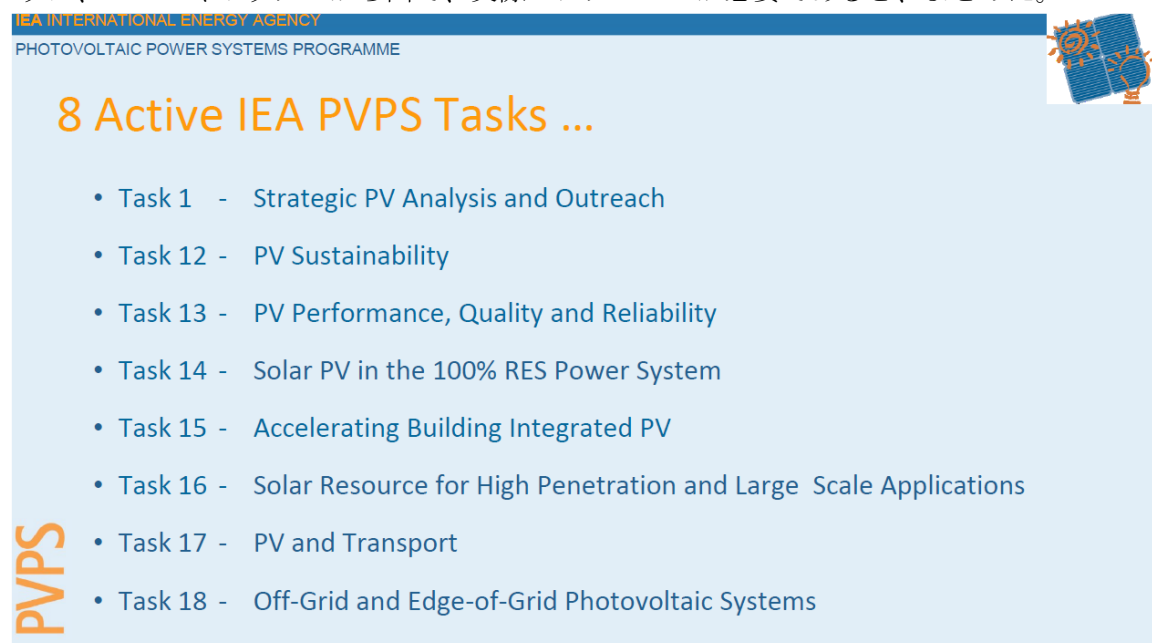
図 2 4 . I E A / P V P S の活動概要 (S. Nowak 講演資料)

IEA/PVPS (PV Power Systems) の活動状況も報告された。図 2 4 に、IEA/PVPS の活動概要、図 2 5 に、IEA/PVPS のタスク活動を示す。IEA/PVPS は、27 カ国と EC、Solar Power Europe、SEPA、SEIA、Copper Alliance の 5 機関の 32 メンバーからなり、PV 専門家のグローバルネットワークである。研究開発、企業、導入、政策など、技術的、非技術的項目についての、国際的協力活動がなされている。図 2 6 に示すように、現在、8 つのタスクから成る。Task 1 は、understanding markets, business and policy、Task 12 は、providing facts about PV sustainability、Task 13 は、tracking and

securing quality and reliability、Task 14は、preparing for 100% renewable energy systems、Task 15は、understanding the BIPV market and its dynamics、Task 16は、enabling predictable PV production、Task 17は、studying an important new field of applications、Task 18は、addressing the off-grid challengesを、指向している。各タスクの活動目的、活動内容、活動状況が、報告された。

今後の重要な視点として、①Need for a much broader view Beyond PV and beyond power、②New opportunities arise Competitiveness, new applications, diversity, system view、③・PV as a backbone of the future energy system Entering many areas of the energy system, possibly becoming the most important source of electricity/energy、④Sense of responsibility Trust and confidence、⑤Sustainability in all dimensions Environment, economy, society, decarbonisation of the energy system、がある。

PVは、環境変化や将来のエネルギーとして、大きなチャンスがある。種々の課題や限界を克服し、チャレンジする必要がある、加速には、国際共同研究、協力、手法やルールを超えた真のパートナーシップ、ゾーンやボックスから出て、実際のアクションが必要であると、まとめた。



IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

8 Active IEA PVPS Tasks ...

- Task 1 - Strategic PV Analysis and Outreach
- Task 12 - PV Sustainability
- Task 13 - PV Performance, Quality and Reliability
- Task 14 - Solar PV in the 100% RES Power System
- Task 15 - Accelerating Building Integrated PV
- Task 16 - Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications
- Task 17 - PV and Transport
- Task 18 - Off-Grid and Edge-of-Grid Photovoltaic Systems

PVPS

図 25. IEA/PVPS のタスク活動 (S. Nowak 講演資料)

(2) Zhongying Wang (China National renewable Energy Center) は、“China PV development and future revolution vision”と題して、プリーナリ講演を行った。世界的には、2050年までに、CO2ガスを半減する動きにある。中国では、2050年までに、いかに石炭を減らすかが、課題である。3483MtのCO2削減に向け、太陽光発電を含む再生可能エネルギー (RE) の導入を進める必要がある。2050年には、REは、全エネルギーの89~93%で、2664GW~2835GW導入のビジョンである。今後、砂漠への導入や電気自動車等への展開にも関心があるとの事である。

5. 8 中国の太陽電池アクティビティの紹介：

組織委員会から、中国の太陽電池アクティビティが紹介された。中国の太陽電池開発には、1000以上の研究所、大学、企業が参画している。過去12年間、世界の70%以上のモジュールを出荷している。中国の太陽電池のbest efficiency tableが紹介された。これまで、version-1が2018年5月、version-2が2019年5月に、発行されており、今回が、version-3との事である。表8に、ジャーナルProgress in Photovoltaicsに掲載されてもいる中国の各種太陽電池のベスト効率を示す。

表8. 中国の各種太陽電池のベスト効率の例

太陽電池	効率 (%)	面積 (cm ²)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	機関
Si multi PERC	22.8	246.66	0.6871	40.9	81.16	Canadian Solar
GaAs	29.1	0.998	1.1272	29.78	86.67	Hanergy (Alta Devices)
Perovskite (ミニモジュール)	17.25	17.277	1.0697	20.66	78.1	Microquanta 7セル
Perovskite (サブモジュール)	14.30	300.74	2.898	19.79	70.0	Microquanta 28セル
Organic	16.48	0.04137	0.8468	25.46	70.3	SCUT

6. 感想：

中国の太陽電池アクティビティの紹介によれば、中国の太陽電池の研究開発には、1000以上の研究所、大学、企業が参画しており、日本は、総合力で劣る印象である。しかし、表8に示すように、ジャーナルProgress in Photovoltaicsに掲載されてもいる中国のベスト効率5件に対して、日本は、太陽電池効率で14件、モジュール効率で5件と、研究開発面では、大きな成果をあげている。課題では、事業化である。

今後10年も結晶Si系が主流であり続けることが期待される。勿論、そのためにも、研究開発の一層の強化が重要なポイントの一つであると言えよう。今後も、NEDOプロジェクト等での発展を期待するし、結晶Si太陽電池を含む太陽光発電の研究開発者人口を増やし、さらにレベルを上げることが必要である。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、まだまだ、国の支援が必要と言える。太陽電池や太陽光発電の高性能化、低コスト化、長寿命化の流れにあり、技術開発のさらなる強化と産学連携が必要である。幸い、日本は、各分野で世界最高の技術力を有していると言える。固定電力買い取り制度の後の展開も重要であり、smart gridやself-

consumptionが重要であり、バッテリー等の貯蔵技術とのハイブリッド化が必要であろう。また、技術開発が、太陽電池モジュールおよびシステムの低コスト化にも有効である。自動車応用や農業利用も期待したい。このためにも、車載のプロジェクトや国際共同研究の離陸も期待したい。総じて、太陽光発電は、電力、エネルギーの主力になるのは、間違いなく、将来のクリーンエネルギー創製に向けた、展開が必要と思う。今後の技術開発テーマとしては、Siタンデム、BIPVや車載、リサイクル等の展開が、重要であろう。太陽光発電の市場拡大、新たな市場開拓、さらには、太陽光発電等の利用による将来のクリーンエネルギー社会の構築のためには、研究開発の加速が必要であると考えられる。

次回のPVSEC-30は、2020年11月8日～13日、韓国のJejuで開催予定である。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。47th IEEE PVSCは、2020年6月14日～19日、カナダのカルガリーで開催予定である。また、37th EU-PVSECは、2020年9月7日～11日、ポルトガルのリスボンで開催予定である。

(以上)