

第 35 回太陽光発電欧州会議（35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition）報告

2018.10.1

山口真史（豊田工大）

1. 開催月日：2018年9月24日～9月28日。

2. 開催場所：SQUARE – Brussels Meeting Centre（ブリュッセル、ベルギー）。

3. 本会議の概要：

1977年のルクセンブルグでの第1回会議以来、1年半毎に開催され、2005年のバルセロナでの会議からは、毎年開催される太陽光発電に関する欧州会議である。今回の会議の組織委員長は、Pierre J. Verlinden（AMROCK）で、論文委員長は Robert Kenny（EC-JRC）であった。今年は、事前登録で、約1,200名の参加者との事である。前回より、約500名の参加者減で、今年6月開催された世界会議 WCPEC-7（米国会議 IEEE PVSC、本会議 EU-PVSEC、アジア・太平洋地区の会議 PVSEC の合同会議）の影響が表れていると思う。国別参加者数は、入手できていない。

図1は、国別発表論文件数を示す。58カ国から、前回会議より297件減ではあったが、887件の論文発表があった。国別では、①ドイツ185件、②オランダ55件、③日本50件、④ベルギー44件、⑤スイス41件、⑥イタリア40件、⑦フランス38件、⑧スペイン32件、⑨中国32件、⑩台湾29件、⑪韓国27件、⑫米国25件、の順であった。

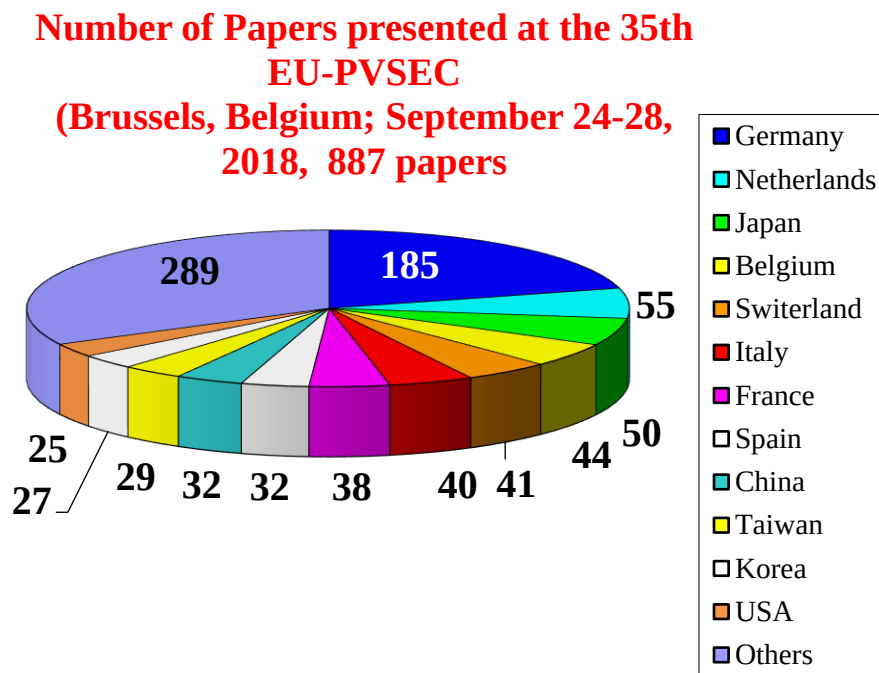


図1. 国別発表論文件数（RTS(株)提供）

図 2 は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①結晶Si系259件、②PVシステムの性能、応用、系統連携225件、③モジュール及びBOS154件、④薄膜系（薄膜Si、CIGS・CdTe等II-VI、色素・有機）109件、⑤先進太陽電池技術91件、⑥太陽光発電の経済性、市場、政策39件、⑦集光太陽光発電、宇宙19件、の順であった。

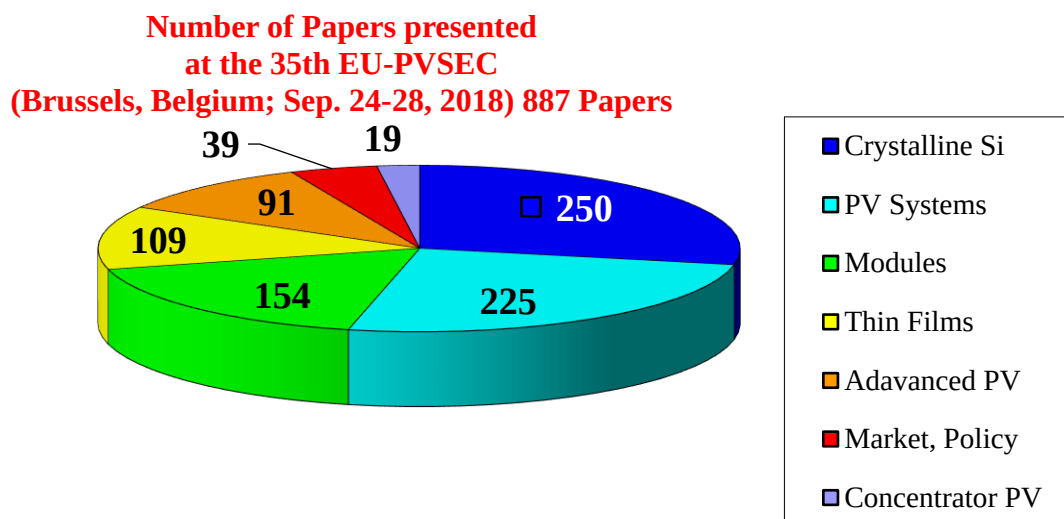


図 2 . 発表論文件数の分野別内訳 (RTS(株)提供)

Becquerel Prizeは、Prof. Peter Wuerfel(Karlsruhe Inst. Tech.)が受賞した。太陽電池の理論研究に関して、業績があり、長年にわたる太陽電池研究への貢献などの業績が評価された。受賞記念講演では、charge、mass、particleの勾配が、太陽電池の駆動力とはなっても、太陽電池動作のためには、selectivityが必要で、最近のペロブスカイト太陽電池などを例にして、接合形成の重要性が述べられた。

4. 主な発表論文の概要：

開会式では、(1)組織委員長の P. Verlinden(Director at Amrock Pty Ltd, Visiting Professor at Sun Yat-Sen University, Guangzhou, China) の挨拶があった。ベルギーの特色の紹介の後、太陽光発電の現状と今後の方向性を述べた。結晶 Si セル効率は、理論効率の約 90%の 26.7%が達成されており、CdTe や CIGS の薄膜系では、効率 22%以上、タンデムセルでは、効率 27~38.8%、集光セルで、効率 46%の状況である。2018 年には、PV の累積導入量は 0.5TW、2022 年までに、1TW の累積導入量となろう。図 3 に、Shell の Sky シナリオにおける一次エネルギーに占める PV を含む各種エネルギーの累積導入量予測を示す。Shell の Sky シナリオによれば、2030 年、2040 年、2050 年、2060 年、2070 年、2080 年、2090 年、2100 年には、各々、5、12.7、22、38、51、61、65、70TW の累積導入量が予想され、PV は、主力エネルギーになるだろう。クリーンエネルギー社会の創製に向け、研究開発は重要で、性能向上やコスト低減に加え、バッテリーとの連携、新機能、サービスや市場開拓が必要であると述べた。特に、BIPV や energy carrier としての mobility の視点での重要性を述べた。

Primary energy use in Shell's "Sky" scenario (26 March 2018)

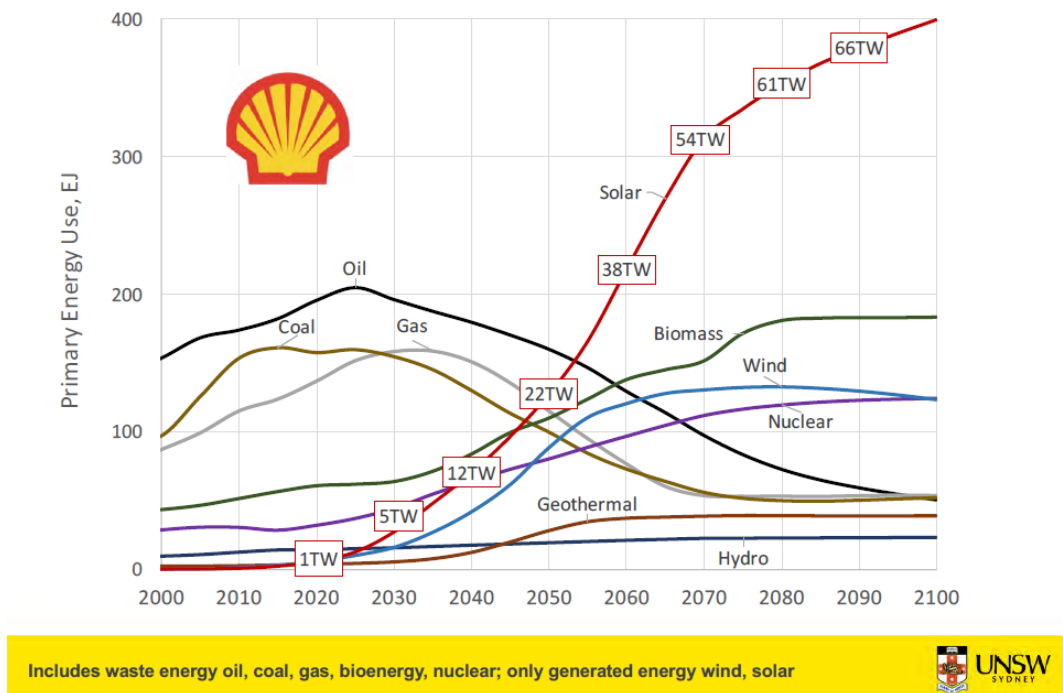


図 3. Shell の Sky シナリオにおける一次エネルギーに占める PV を含む各種エネルギーの累積導入量予測 (Prof. M.A. Green 提供)

(2) Dominique Ristori (European Commission Director General DG Energy) は、EC の関連分野での役割、クリーンエネルギー企業のサポートや技術開発の重要性を述べた。2050 年には、PV がメインになるであろうが、現状では、満足できない。技術開発を通して、performance efficiency の向上に加え、mobility や building など新分野形成が必要であると述べた。

(3) Bart Tommelein (Vice-Minister-President of the Government of Flanders, Flemish Minister for Budget, Finance and Energy) は、将来、太陽光発電を含む再生可能エネルギーが主流になるのは間違いないと確信していると述べた。フランダース地区の PV 導入は、それほど進んではいないが、投資優遇や低金利ローン、住民の教宣につとめているとのことである。

(4) F. Marcellesi (EU 議員) は、早く、PV を含む再生可能エネルギーに移行すべきと主張した。現状では、PV も energy efficiency や安定性の面で、満足していないが、課題解決に向け、エネルギー転換スキーム、政策、ロビー活動の重要性を述べた。

(5) Youssef Bady (Cabinet of Céline Fremault, Energy Minister of the Government of the Brussels-Capital Region) は、“Developing PV on a local scale” と題して、ベルギーの取り組みを紹介した。① 2050 年を見据えた再生可能エネルギーの 2030 年ターゲット、②ベルギーの PV 関連企業の production 増、③投資の pay back of return の保障、④climate business の創成などについて、述べた。

(6) James Watson(CEO, Solar Power Europe)は、2017年の導入量の面で、PVも主流の道を歩みはじめていると述べた。2017年の導入量は、風力 52GW、ガス 38GW、石炭 32GW、原子力 11GW、他の再生可能エネルギー 7GW に対して、PV は 98GW だからと。LCOE (Levelized Cost Of Electricity) も、サウジアラビアなど、日射条件の良いところでは、約 3 セント/kWh と、十分な線まで来ている。2017年の欧州での PV 導入量も 9.26GW と、欧州での PV 導入も復活しつつある。トルコ 2.588GW、ドイツ 1.7GW、英国 0.954GW、フランス 0.875GW、オランダ 0.853GW と、トルコでの PV 導入量が多く、2018 年も期待できる。2018 年 1 月に、Clean Energy Industry Forum を開催し、政策立案者のサポートにつとめている。2019 年時点で、新たに、45,500 人のジョブが期待でき、2030 年の再生可能エネルギー導入 32%のターゲット達成に向け、競争と協調、貿易、研究開発の重要性を述べた。

4. 1 パネル討論：

Paolo Frankl (Head of Renewable Energy Division, IEA) がモデレータとなって、“PV Growth Prospects in Europe - What Role in a Terawatt Level PV World?” のテーマで、パネル討論がなされ、活発な質疑がなされた。Paolo Frankl は、将来、PV は、間違いなく、No.1 になるだろう。輸送や住宅などの市場も魅力的である。EU 会議としては、EU 企業が、come back するには、どうしたら良いかの視点でのパネル討論の方向性を示した。パネリストは、Paula Abreu Marques (European Commission Head of Unit for “Renewables and CCS Policy” DG ENERGY)、Christian Westermeier (President, SolarPower Europe and VP Sales and Marketing, Wacker Chemie)、Jan Rappe (CEO Engie Solar, France)、Arnaud Chaperon (VP Public Affairs, TOTAL)、Jehan Decrop (EDORA - Union of Renewable Energy Producers in Wallonia)であった。欧州各国の導入状況の紹介が述べられたが、今後、ドイツ、スペイン、イタリアに期待が大きい。本題である、欧州企業の come back に向けた課題が議論された。既に、モジュール価格 \$0.25/W の中国企業に、コスト競争するのは難しく、エネルギー性能、信頼性や用途開発や革新的技術等に向けた技術開発が重要であると述べられた。投資の点では、継続的な市場成長が必要であり、集中、分散電力の最適化 (regulation を含む) に加え、エネルギーストレージの重要性も指摘された。Li イオン電池は、短期的ストレージには良いが、長期的ストレージが必要である。EV 用 PV 充電ステーションや PV powered vehicles など輸送や住宅などの市場やプロダクトが、欧州企業の come back に有効であり、国際連携も需要であると指摘された。最後に、PV を含む再生可能エネルギーは、将来、間違いなく、メインとなろう。今は、過渡期で、ビジネスモデルや市場設計が求められている。グリーンエネルギー社会の創製に向け、アンビシャスを持ち、挑戦することが重要で、アンビシャスターゲットの設定と政策立案が必要であると、まとめられた。

4. 2 先進太陽電池技術分野：

III-V/Si、ペロブスカイト/Si など、Si タンデムセルが、ホットトピックスとなっている。

(1) P. Caño ら (UPM) は、“Hybrid III-V/SiGe solar cells grown on Si substrates through aggressive buffer layers” と題して、プレーナリ講演を行った。近年、シリコンベースのタンデム太陽電池が、結晶シリコン太陽電池の 29.4%の理論限界を超える可能性を有するこ

とで、注目を集めている。III-V 族化合物多接合太陽電池は、高効率だが、地上用としては、まだ高価である。一方、主力太陽電池である結晶 Si 太陽電池は、理論効率の約 90% の 26,7% に達し、高効率化のためには、タンデム化が必要である。Si タンデム太陽電池の高効率化の可能性を、図 4 に、Si タンデム太陽電池の高効率化の可能性を示す。タンデム化により、効率 40% 超えの効率化が期待できる。

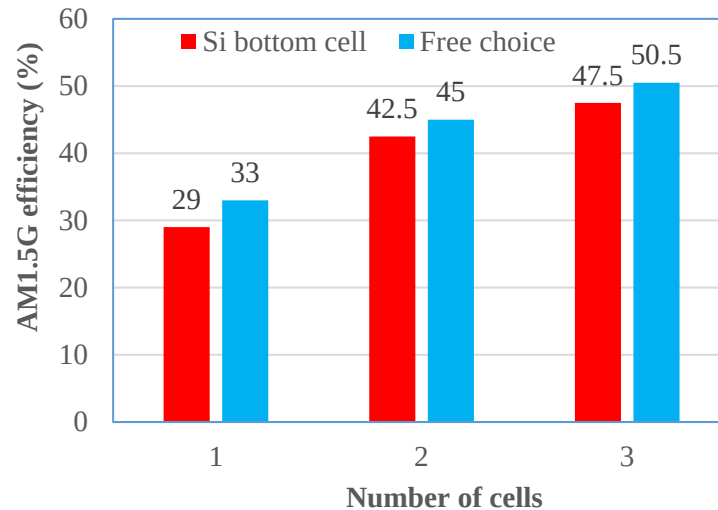


図 4. Si タンデム太陽電池の高効率化の可能性 (M.A. Green, presented at the PV Asia Conference, Singapore, Oct. 23-24 (2012).)

図 5 は、各種 Si タンデム太陽電池の高効率化の現状と高効率化の可能性を示す。III-V・Si、CdZnTe/Si、ペロブスカイト/Si、ナノワイヤ/Si 太陽電池などが検討されており、各々、効率 35.9%、25.1%、16.8%、11.5% の状況である。2 接合タンデム、3 接合タンデムで、各々、効率 36.5%、40.8% の実現が期待できる。

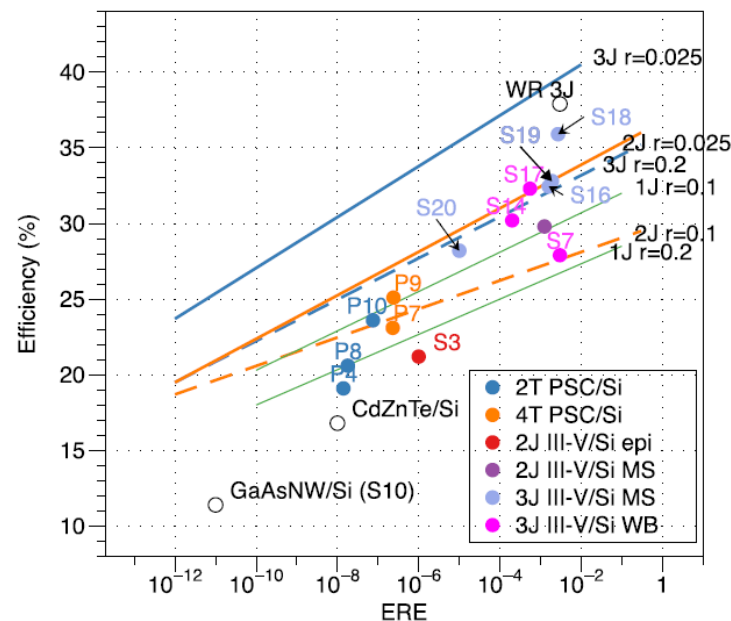


図 5. Si タンデム太陽電池の高効率化の現状と高効率化の可能性 (M. Yamaguchi et al., J. Phys. D., 51, 133002 (2018).)

III-V 族半導体の高性能とシリコンの低コストの優位性を維持しながら、両者を結合した III-V/Si タンデム太陽電池のモノリシック化のアプローチである。Si 基板上の化合物半導体の直接の成長は、その格子定数と熱膨張係数の差が大きいなどの課題があり、約 30 の追究の歴史がある。ここでは、III-V/SiGe タンデムを検討している。2 接合セル、3 接合セルとして、1.52eV/0.93eV、1.94eV/1.42eV/1.0eV を対象としている。Si 上のバッファ層として、CVD 成長 Ge をバッファ層として用い、SiGe ($\text{Si}_{0.25}\text{Ge}_{0.75}$) の傾斜組成バッファ層をさらに使い、 $\text{Si}_{0.25}\text{Ge}_{0.75}$ ボトムセル層を形成し、格子整合する GaAsP トップセル層を MOCVD で形成する。転位密度は、 $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ と比較的低い、2 接合タンデムセルで、 $J_{sc}=13.5 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc}=0.48 \text{ V}$ 、FF も低く、従来他機関の研究成果と比べると見劣りする。また、クラック発生も課題である。前回会議で、FhG-ISE は、ウエハボンディングによる InGaP/Si タンデムセルで、2 端子構造としては、世界最高の効率 33.3% (面積 3.127 cm^2 、 $V_{oc}=3.127 \text{ V}$ 、 $J_{sc}=12.7 \text{ mA/cm}^2$ 、FF=83.8%) を達成している。ヘテロエピ成長による InGaP/GaAs/Si 3 接合セルでは、効率 19.7% ($V_{oc}=2.52 \text{ V}$ 、 $J_{sc}=10.0 \text{ mA/cm}^2$ 、FF=84.3%) で、転位密度が、 $2.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ と高いことが課題である。EPFL と NREL、シャープ、豊田工大は、4 端子メカニカルスタックによる InGaP/GaAs//Si セルで、各々、効率 35.9%、33.0%、28.2% の状況にある。

(2) C. Ballif ら (EPFL) は、“High-Efficiency Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells”と題して、ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池に関するプレーナリ講演を行った。効率 26.7% の結晶 Si 太陽電池の実用性能制限に近づいている。この障壁を克服する 1 つのアプローチは、Si ボトムセルより高いバンドギャップ材料を積層することにより thermalisation の損失を減らすことにある。バンドギャップ、潜在的な低コスト化の可能性と単一接合セルで、効率 23.2% (0.1 cm^2)、20.9% (1 cm^2) が得られているペロブスカイト太陽電池をトップセルと Si ボトムセルとのタンデム化のアプローチである。

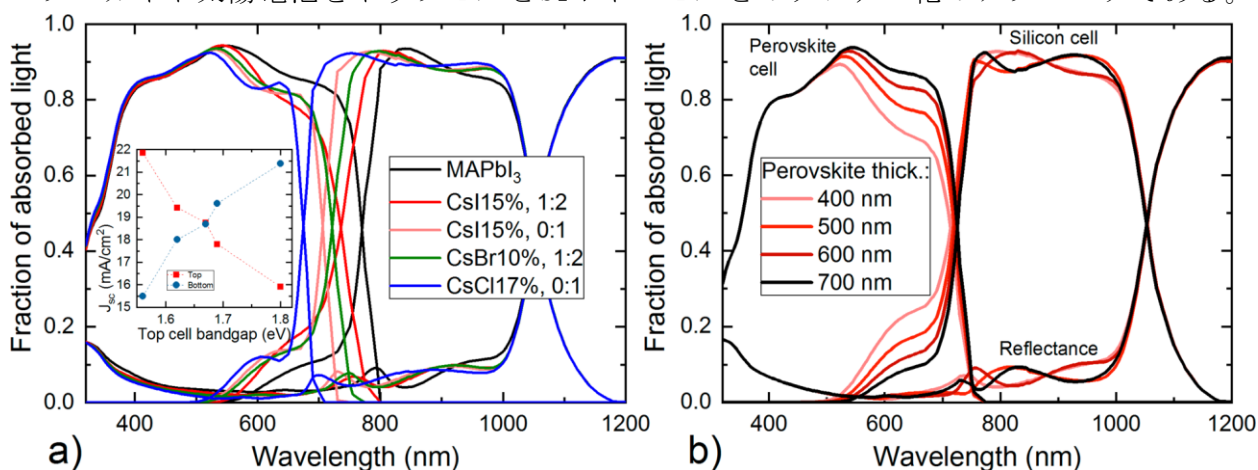


図 6. ペロブスカイト/Si 2 接合タンデムセルの光吸収率のシミュレーション結果 (J. Werner, ACS Energy Lett., 1, 742 (2018))

ペロブスカイト材料として、バンドギャップ $E_g 1.5 \sim 1.8 \text{ eV}$ の共蒸着による CsFA 系が検討されている。図 6 に示すように、Cs/Br 比、Cs/Cl 比、Cs/I 比、ペロブスカイト層厚の効果が検討されている。Si ボトムセルは、ヘテロ接合構造で、裏面テクスチャがなされている。

サブセルインのインターコネクションとして、微結晶Siのn/pトンネル接合層が用いられている。Ag/a-Si:p/a-Si:i/c-Si/a-Si:i/a-Si:n/nc-Si:n/nc-Si:p/ITO/NiOx/perovskite/C60/SnO2/IO:H/MgF2構造のモノリシック 2 接合Siタンデム太陽電池が作製された。1.42cm²セルで、効率 25.24% (Voc=1.78V、Jsc=19.5mA/cm²、FF=72.4%) が得られている。講演では、Oxford大学のH. Snathらのグループの情報も紹介された。1.09cm² 2 接合タンデムセルで、27.3% (Voc=1.813V、Jsc=19.98mA/cm²、FF=75.4%) が得られているとの事である。安定性試験もなされ、ベアセルは、66時間で10%劣化だったが、封止することにより、10%劣化を270時間まで、のばしている。今後、ペロブスカイト/ペロブスカイト/Si 3 接合タンデムセルで、2~5年以内に、30%以上の高効率化が可能だろうと、まとめた。

(3) J.F. Guillemoles ら (CNRS) は、“Electronic ratchets as necessary stepping stones for new PV concepts ” と題して、東大との共同研究成果に関するプレーナリ講演を行った。Shockley-Queisser limit を打破する革新的太陽電池のアプローチを紹介した。例えば、新しい概念である中間バンド太陽電池は、効率改善が重要であり。パフォーマンス向上の潜在的なパスは、中間のバンドよりもわずかに低いエネルギー レベルを挿入することで、電子ラチェットを導入することである。ここでは、上記概念の実現のため。種々のナノ構造を用い、実験データの光学的、輸送特性を考慮し、非平衡グリーン関数 (NEGF) を用い、計算する。現実的な特性を考慮し、ラチェット状態が、非理想状態を補償しつつ、中間バンドが性能の著しく低下を生じることを示すことができる。また、このような概念を、ホット キャリアや多重励起子生成 (MEG) など次世代太陽電池の高度なアプローチに適用する方法を示すこととしたい。本概念の狙いは、太陽光スペクトラムの有効利用であるが、高性能化のためには、課題である再結合をいかに低減するかである。

(4) M.A. Green (UNSW) は、“Current overview of PV technologies and visions for the future” と題して、プレーナリ講演を行った。図 7 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 年の再生可能エネルギー100%シナリオにおいて、Solar PV は、69%を占め、主力となるだろう。Shell の Sky シナリオも、紹介された。2017 の PV の累積導入量も 400GW で、モジュール価格も \$ 0.3/W のレベルになっている。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。

2017 年の太陽電池生産量は、多結晶 Si 60.8GW、単結晶 Si 33.2GW、CdTe 2.3GW、CIGS 1.5GW、a-Si 0.3GW で、結晶 Si 系が 95.8%を占め、今後も、結晶 Si 系が主力であろう。図 8 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。Si タンデムセルの高効率化の可能性は、図 4 に示したように、タンデム化により、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 33.3%、ペロブスカイト/Si 2 接合タンデムセルで、効率 27.3%の現状である。図 9 に示すように、各種太陽電池の効率のバンドギャップ Eg 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。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、高ギャップ 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。

Electricity Generation in 2015 and 2050

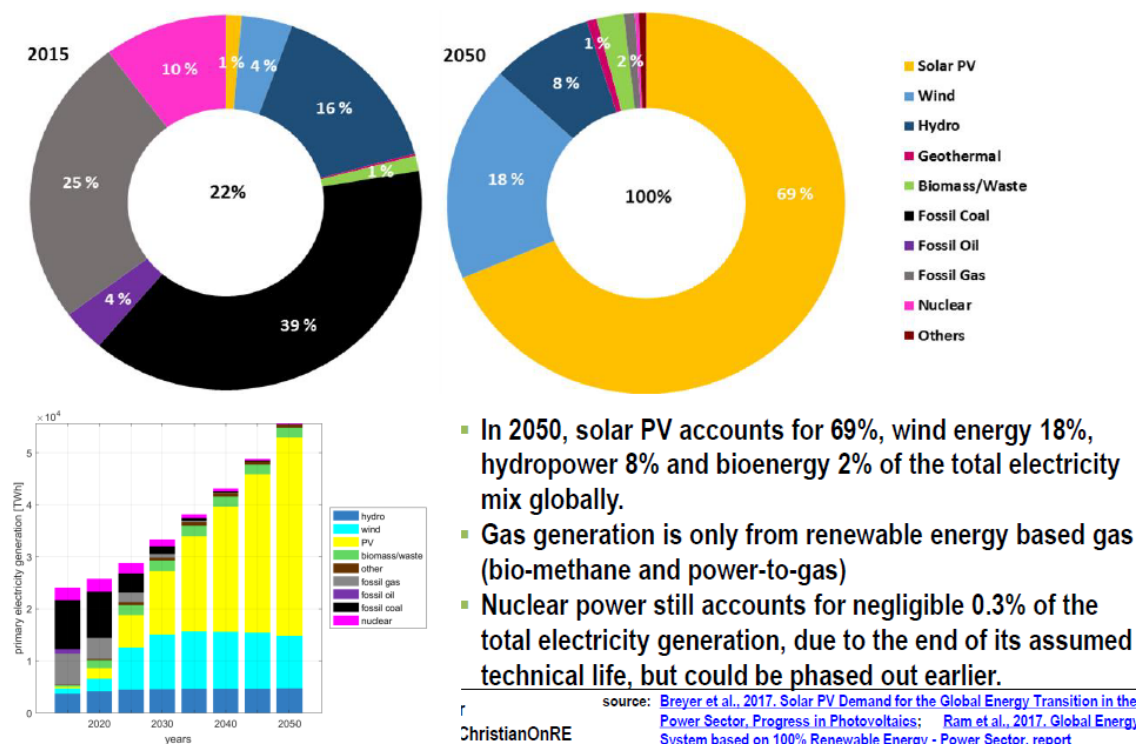


図 7. 再生可能エネルギー導入の現状（2015 年）と 2050 年の導入予測（Prof. C. Breyer 提供）

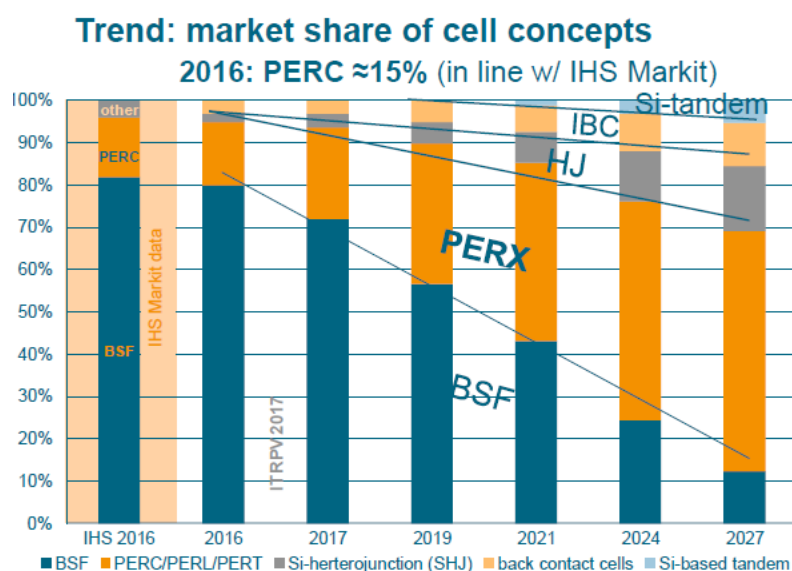


図 8. 結晶 Si 太陽電池の市場シェアの変遷と予測（ITRPV 2018、[ITRPV Ninth Edition 2018 including maturity report 20180904.pdf](#)）

What comes after PERC?

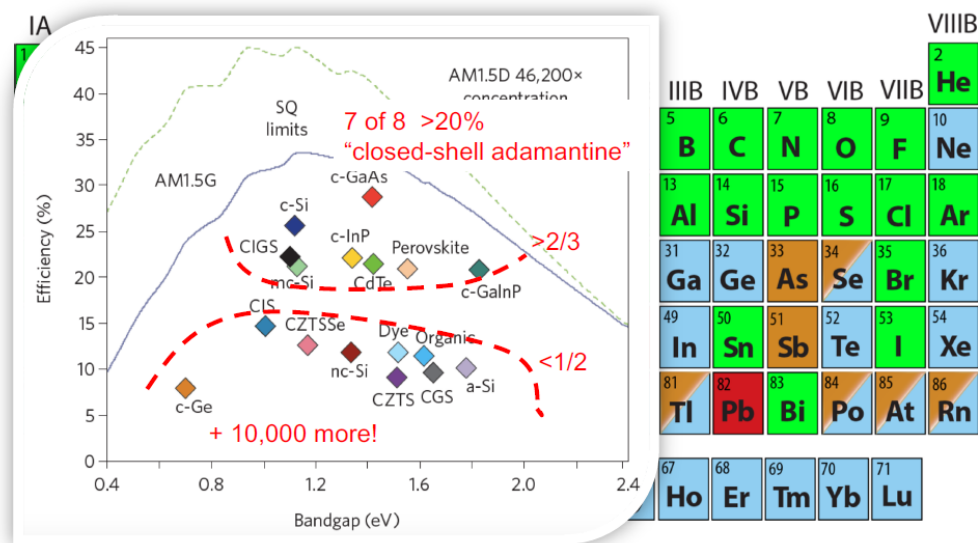


図 9．各種太陽電池効率とバンドギャップの関係、トップセル材料の可能性 (Prof. M.A. Green 提供)

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

	BINARY	TERNARY	QUATERNARY	QUINTERNARY
IV	I-VII	(I ₂ -VII ₂)	0-II-VII ₂	
		(I ₃ -VII ₃)*	(0 ₂ -III-VII ₃)	
		(I ₄ -VII ₄)	0 ₃ -IV-VII ₄	
			0 ₂ -I-III-VII ₄	
	II-VI	(II ₂ -VI ₂)	0-IV-VI ₂	
			I-III-VI ₂	
		(II ₃ -VI ₃)*	(0-III ₂ -VI ₃)	
			(I ₂ -IV-VI ₃)	
			(I-II-III-VI ₃)	
		(II ₄ -VI ₄)	I ₃ -V-VI ₄	
III-V			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)	
		(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) M, Yamaguchi (豊田工大)、H. Akiyama (東大) らは、“Analysis for Non-radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials” と題して、量子ドット太陽電池の高効率化の限界について、考察した結果を述べた。太陽電池特性は、少数キャリア寿命 (拡散長) に依存する。放射再結合寿命 τ_{rad} は、次式で与えられる。

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

ここで、N は、キャリア濃度、B は、放射再結合確率で、Si、GaAs では、各々、 $2 \times 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ 、である。実効寿命 τ_{eff} は、次式で与えられる。

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

ここで、 τ_{nonrad} は、非放射再結合寿命で、次式で表される。

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

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

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

ここで、 k は、ボルツマン定数、 T は、絶対温度、 q は、電子電荷、 J_L は、光生成電流密度、 J_0 は、飽和電流密度である。 V_{oc} の改善のためには、飽和電流密度 J_0 の低減が必要である。

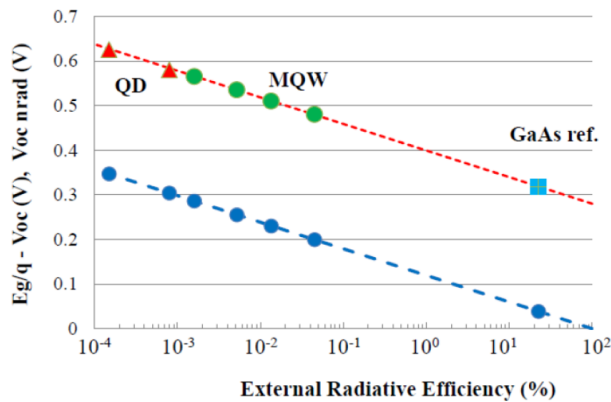


図 10. 量子ドットおよび多重量子井戸太陽電池のバンドギャップエネルギー E_g に対する開放端電圧損失 ($E_g/q - V_{\text{oc}}$) と非放射再結合開放端電圧 V_{oc} ($V_{\text{oc}}, \text{nrad}$) の外部発光効率 (ERE) 依存性 (M. Yamaguchi et al, Progress in PV, 26, 543 (2018))

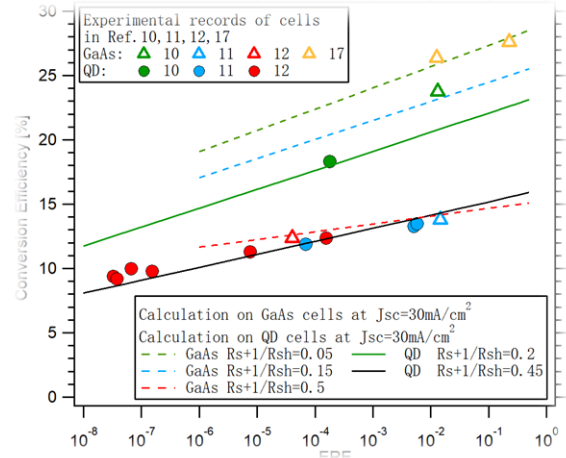


図 11. QD 太陽電池の効率と計算値の外部発光効率 (ERE) 依存性 (M. Yamaguchi et al., 講演資料)

図 10 は、量子ドット (QD) および多重量子井戸 (MQW) 太陽電池のバンドギャップエネルギー E_g に対する開放端電圧損失 ($E_g/q - V_{\text{oc}}$) と非放射再結合開放端電圧 V_{oc} ($V_{\text{oc}}, \text{nrad}$) の外部発光効率 (ERE) 依存性と GaAs 太陽電池との比較を示す。開放端電圧 V_{oc} は、ERE に対して、次式で表される。

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

ここで、第二項は、非放射再結合電圧損失であり、放射再結合電圧 $V_{oc,rad}$ は、次式で与えられる。

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

ここで、 $J_L(V_{oc,rad})$ は、放射再結合のみの場合の開放端での光生成電流密度で、 $J_{0,rad}$ は、放射再結合のみの場合の飽和電流密度である。図 9 の $\Delta V_{oc,rad} = E_g / q - V_{oc,rad}$ の値は、太陽電池

の外部量子効率 (EQE) の報告データから、算出された。図 10 に示すように、MQW や QD 太陽電池は、非放射再結合損失が多くあり、少数キャリア寿命改善や各種再結合損失の低減により、さらなる高効率化が可能であると言える。解析では、開放端電圧損失 ($E_g/q - V_{oc}$) は、外部発光効率 (ERE) を尺度として、また、抵抗損失は、曲線因子 FF に組み込んだ。

図 11 に、QD 太陽電池の効率と計算値の外部発光効率 (ERE) 依存性を示す。規格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.15 において、外部発光効率 (ERE) を 0.1% から、10% に改善することにより、24%、規格化抵抗 ($r_s + 1/r_{sh}$) < 0.05 において、25.8% の高効率化が期待できる。

今回、図 12 に示す QD の光吸収係数の 2 ステップ関数モデルを用い、QD 太陽電池特性の詳細平衡モデルに基づく計算がなされ、QD の申請損失である放射再結合損失が評価され、上記外部発光効率に基づく外因性損失である非放射再結合損失も議論された。

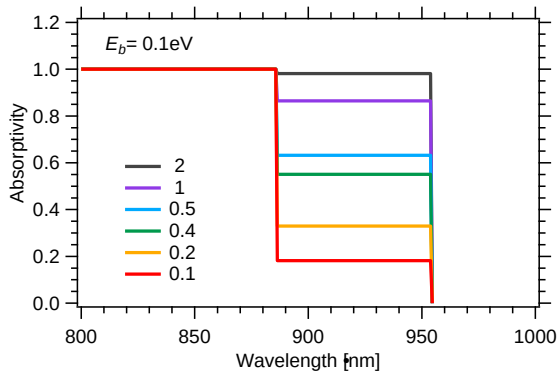


図 12. QD の光吸収係数の 2 ステップ関数モデル (L. Zhu et al., Proc. 44th IEEE PVSC (2017).)

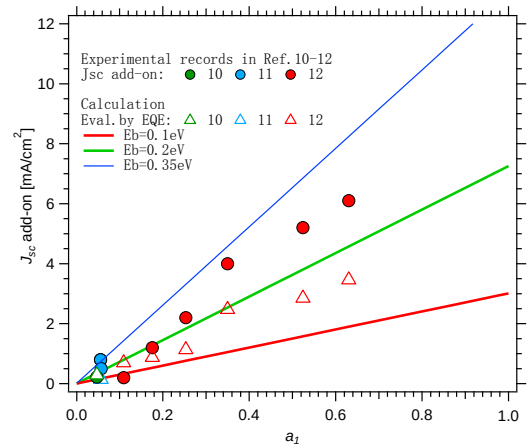


図 13. QD 太陽電池の短絡電流密度 J_{sc} の光吸収度 a_1 依存性の計算結果と実験値の比較 (M. Yamaguchi et al., 講演資料)

図 13 に示すように、予想 (A. Luque and A. Marti, Phys. Rev. Lett., **78**, 5014 (1997)) 通り、QD 太陽電池の短絡電流密度 J_{sc} は、光吸収度 a_1 の (QD の結合エネルギー E_b 、量子ドット密度) 増加と共に、増加している。

しかし、図 14 に示すように、QD 太陽電池の開放端電圧 V_{oc} のトータルの損失は、光吸収度 a_1 (QD の結合エネルギー E_b 、量子ドット密度) の増加と共に、増加し、特に、真性損失 (放射再結合損失) よりも外因性損失 (非放射再結合損失) が、大きくなっており、高

効率化の大きな壁となっている。結果、図 1 5 に示すように、QD 太陽電池の変換効率は、光吸収度 a_1 (QD の結合エネルギー E_b 、量子ドット密度) の増加と共に、減少することとなる。事実、QD の結合エネルギー $E_b=0.1\text{eV}$ 、光吸収度 $a_1=0.05$ の薄い量子ドット密度の QD 太陽電池で、効率 18.3% が得られている。

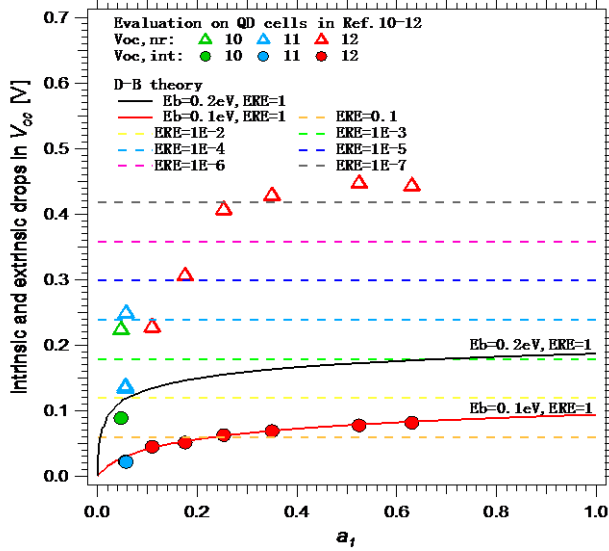


図 1 4. QD太陽電池の開放端電圧 V_{oc} の真性および外因性損失の光吸収度 a_1 依存性の計算結果と実験値の比較 (M. Yamaguchi et al.、講演資料)

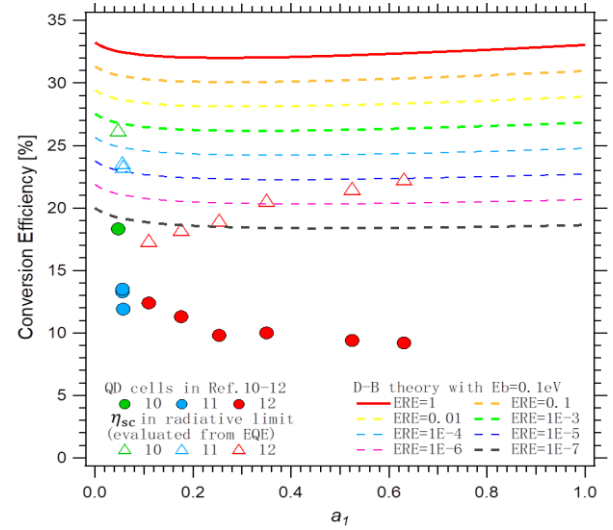


図 1 5. QD太陽電池の変換効率の光吸収度 a_1 依存性の計算結果と実験値の比較 (M. Yamaguchi et al.、講演資料)

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

$$R_{nr} = \alpha \left(\Delta a/a_0 \right) N/h, \quad (7)$$

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

図 1 6 は、量子ドット太陽電池の外部発光効率 (ERE) の (7) 式の $\alpha=1$ とした場合の r_{nr} ($=\alpha (\Delta a/a_0) N/h$) 依存性を示す。格子不整合に伴う非放射再結合損失の増加と共に、ERE は、低下し、高効率化の壁となっている。図 1 5 に示すように、SBL (歪補償層) 技術などにより、非放射再結合損失を低減する必要がある。

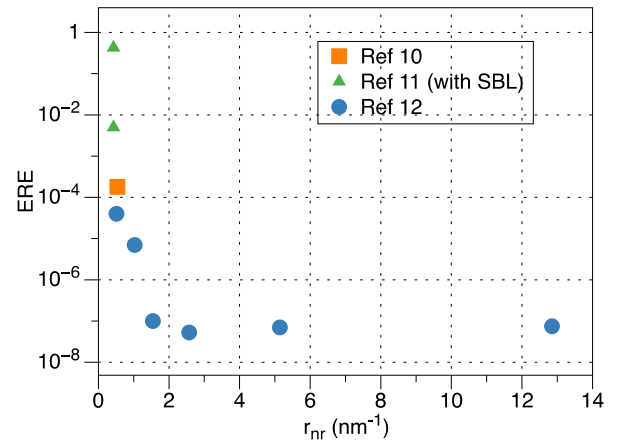
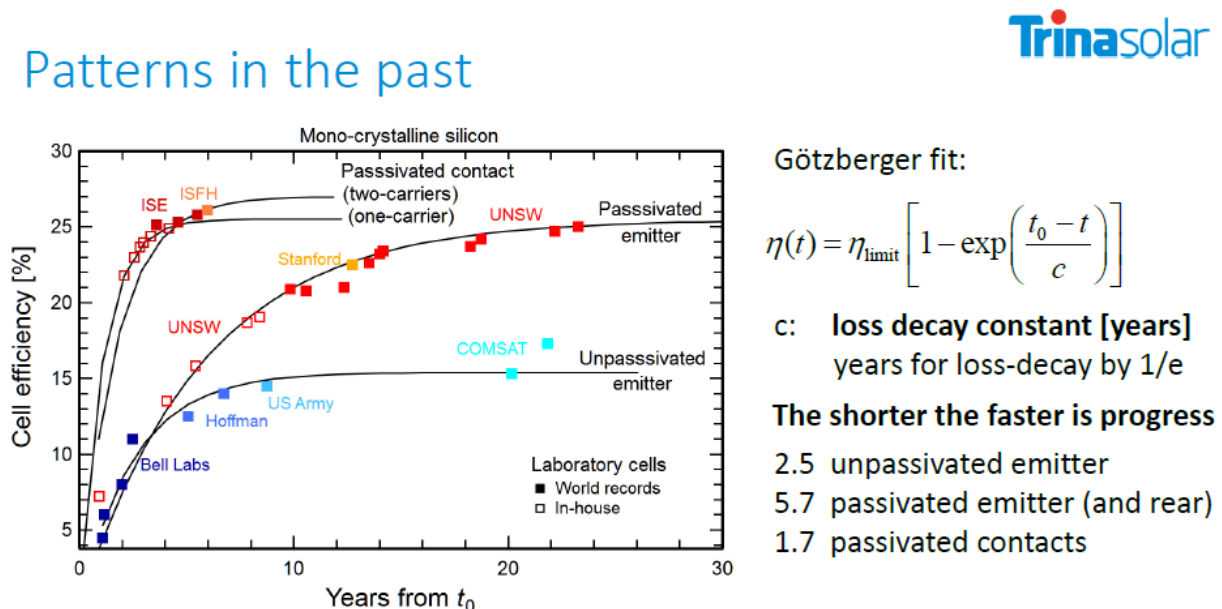


図 1 6. QD太陽電池の外部発光効率 (ERE) の非放射再結合率 r_{nr} 依存性 (M. Yamaguchi et al.、講演資料)

4. 3 結晶 Si 太陽電池分野：

(1) P.P. Altermattら (Trina Solar) は、“Learning from the Past to Look Beyond the Roadmap of PERC Si Solar Cell Mass Production” と題して、プレーナリ講演を行った。図 8 に示すように、PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 構造結晶Si太陽電池が、主流となっている。PERC太陽電池の生産規模も、2017年の28.9GWから、2018年には、65.7GWになる見通しである。2050年までに、100%の再生可能エネルギーの実現のためには、累積導入量22TWが必要で、III-V化合物、II-VI化合物、カルコパイライト化合物やペロブスカイで実現は、難しいだろう。結晶Siが主力になろう。結晶Si太陽電池モジュール価格も、2018年の\$0.3/Wから、2030年には、\$0.17/Wになろう。PERCモジュール効率も、2004年の約14%から、2018年には、19.1%となっている。Ag、Ga、Snの資源制約もあり、結晶Si太陽電池では、Ag使用量を、40m/セルから20mg/セルに、削減する見通しである。unpassivatedセル、passivatedセル、HIT-IBCなど、各種結晶Si太陽電池の高効率化の変遷が、図 9 に示すように、分析されている。



Exponential saturation pattern:

Initial progress quick, but efficiency hurdles on the way.

Progress has become quicker → drawing from past experience

Data: M.A. Green, Prog PV 17, 183 (2009); M.A. Green et al, Prog PV, solar cell efficiency tables.

In-house data: author (UNSW), F. Feldmann (ISE). Fit: A. Götzberger et al., Sol. En. Mater. Sol. Cells 74, 1 (2002)

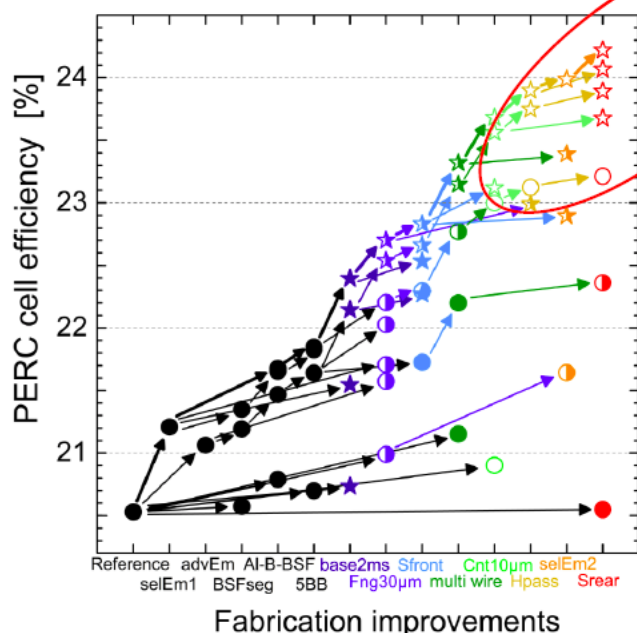
図 1 7. 各種結晶Si太陽電池の高効率化の変遷と予想曲線 (Dr. P.P. Altermatt提供)

PERCの今後のための技術開発の取り組みが紹介された。高ライフタイム τ 基板 (n型またはFZ)、エミッタ構造の改善、BSF構造の改善、メタリゼーションの改善、表面パッシベーションの改善に加え、ポリSi passivated contact、トンネル酸化物、反転層の利用などが対象で、計算シミュレーションによる太陽電池の損失がなされ、高効率化の可能性に関する解析結果が報告された。図 1 8 に、種々の技術の適用による結晶Si PERC太陽電池の高効率化の可能性に関するシミュレーション結果を示

す。 $\tau = 1.5\text{ms}$ の基板の場合、効率24.35%の実現が期待できる。研究開発成果の適用により、高効率PERC太陽電池の大量生産が可能とまとめた。

Beyond PERC

Trinasolar



PERC is a suitable platform for other materials and device features to come into mainstream

Integrate such features into PERC cell process

altermatt@trinasolar.com

B. Min et al, IEEE J-PV 7, 1541 (2017)

35th EU PVSEC 2018 – page 12

図18. 種々の技術の適用による結晶Si PERC太陽電池の高効率化の可能性に関するシミュレーション結果 (Dr. P.P. Altermatt提供、B. Min et al., IEEE J-PV, 7, 1541 (2017))

(2) J. Haunshildら (FhG-ISE) は、“Characterization of Diamond Wire Sawn Multicrystalline Silicon Wafers”と題して、プレーナリ講演を行った。単結晶Siインゴットの切断に、ダイヤモンド Wire Sawing (DWS) が広く (95%) 用いられているが、多結晶Siインゴットの スライスには、まだ、スラリーワイヤーが用いられている。単結晶SiインゴットのDWSの利点 (高速、耐久性、ワイヤーの低消耗) を、多結晶インゴットに移転する研究開発の方向にある。これは、太陽電池の製造コスト低減につながる。現状では、単結晶インゴットのDWSは、約2時間に対して、多結晶インゴットのスライスには、約3時間かかる。課題は、多結晶の場合は、SiCやSiNの偏析物、粒界が、スライスに影響を与える。太陽電池製造のテクスチャリングプロセスに提供するには、DWSウエハの表面モロロジーを考慮する必要がある。また、キャラクターゼーションの方法論を顔発する必要がある。本研究では、DWSのインラインのキャラクターゼーションが検討された。8000ウエハ/時間のDWSが可能との事である。ライフタイム、3社のPL (フォトルミネセンス) イメージング装置が用いられた。156mmx156mmの多結晶Siウエハが評価された。PLイメージングから、転位が、0.8%、5.6%、20%の場合、セル効率は、各々、19.2%、18.5%、17.5%で、転位が、セル効率を支配している。厚さの偏差も、13,000ウエハの評価で

スラークットの5～20 μm に対して、DWSは、12～17 μm との事である。多結晶Siに関するDWSのインラインキャラクターゼーションの方法論は、できているとまとめた。

(3) M. Sivaramakrishnanら (IMEC) は、“Overview of Cell Fabrication Options for Thin (< 50 μm) Kerfless Epitaxial Silicon Foils: Recent Progress and Challenges” と題して、プレーナリ講演を行った。Kerfless 薄型Siのアプローチが述べられた。バルク結晶Si太陽電池のプロセス工程の複雑さ、コスト低減の必要性が述べられた。

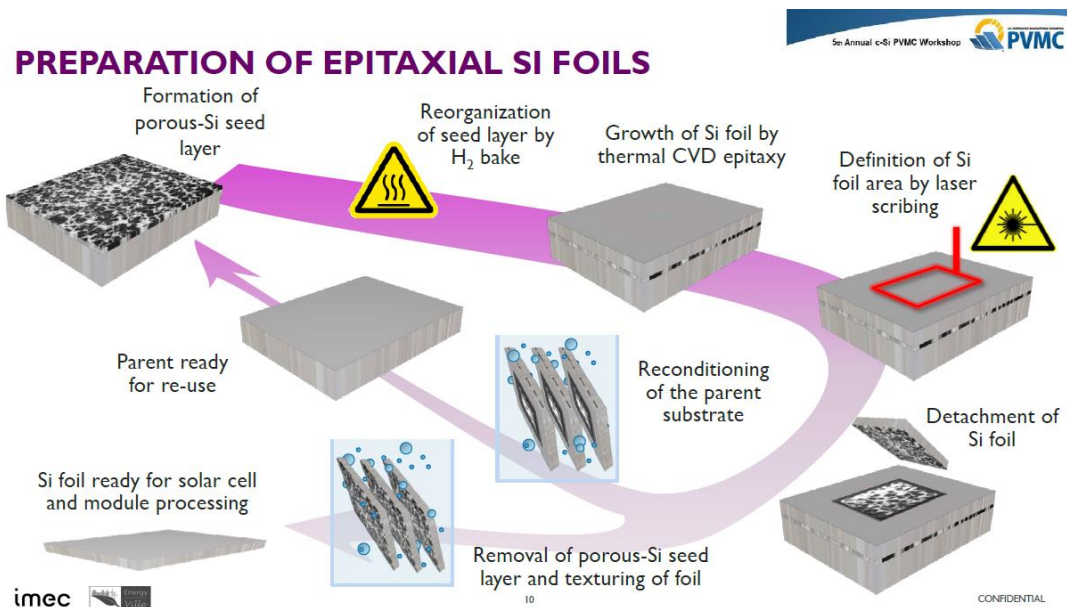
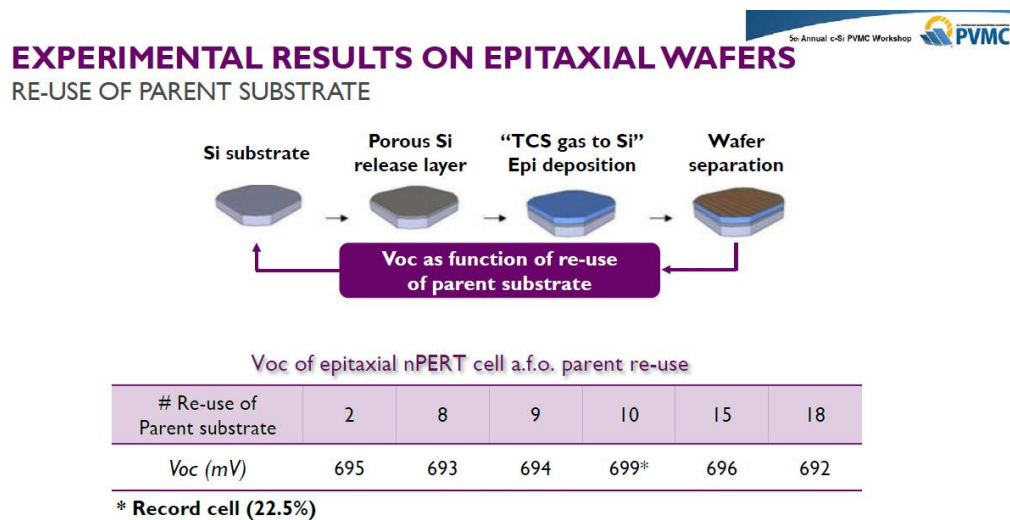


図 1 9 . Si箔のエピ成長プロセス (Dr. J. Poortmans提供)



imec

CONFIDENTIAL

図 2 0 . 基板の再利用によるセル特性の推移 (Dr. J. Poortmans提供)

Smart cut 等の kerf-free wafering、EFG 等の melt からの direct crystallization、Crystal Solar 等のガスからの direct crystallization が紹介された。IMEC では、図 1 9 に示すように、電気化学的に Si 基板表面に多孔質 Si 層を形成し、多孔質 Si 上の Si の

CVD エピ成長、レーザスクライブで Si フォイルを liftoff の後、太陽電池作製、Si 基板は再利用される。レーザグルーブ時のピラー、ヒーロック等の欠陥が問題だったが、ストレス低減等により改善されている。基板に FZ-Si を用いた $4 \times 4 \text{ cm}^2$ のヘテロ接合バックコンタクト Si 太陽電池が作製され、 $47 \mu\text{m}$ 厚エピ Si フォイルを用いた 156.25 cm^2 セルで、効率 16.3% ($V_{oc}=671 \text{ mV}$ 、 $J_{sc}=33.3 \text{ mA/cm}^2$ 、 $FF=72.9\%$)、 $64 \mu\text{m}$ 厚 FZ-Si を用いた 156.25 cm^2 セルで、効率 20.5% ($V_{oc}=737 \text{ mV}$ 、 $J_{sc}=35.4 \text{ mA/cm}^2$ 、 $FF=78.5\%$) の状況である。基板の再利用に関する質問が出た。図 20 に示すように、18 階の再利用では、特性劣化は見られず、50 回は、可能とまとめた。

(4) B. Minら (ISFH) は、“Status of the EU H2020 Disc Project: European Collaboration in Research and Development of High Efficient Double Side Contacted Cells with Innovative Carrier-Selective Contacts” と題して、プレーナリ講演を行った。DISC プロジェクトは、次世代の高性能太陽電池セルとモジュールの要素技術の開発を狙いとしている。Passivating contacts 又はキャリア選択エミッタや接合の利用のアプローチである。単純な、パターン不要の両面コンタクトデバイスで、Energy yield 向上とコスト低減を可能としている。13 機関が参画している。セル効率 $> 25\%$ 、モジュール効率 $> 22\%$ を目標としている。講演では、セルやモジュールコンポーネントの研究開発の最初の 18 ヶ月の成果のハイライト、低スパッタダメージの In フリーの透明導電性酸化膜 (TCO) などを報告した。スパッタ SiO_2 と比較しつつスパッタ AZO が検討されている。ITO を用いたセル効率 21.2% ($V_{oc}=708.1 \text{ mV}$ 、 $J_{sc}=37.5 \text{ mA/cm}^2$ 、 $FF=79.8\%$) に対して、AZO を用いたセルでは、効率 20.6% ($V_{oc}=719.4 \text{ mV}$ 、 $J_{sc}=36.9 \text{ mA/cm}^2$ 、 $FF=77.69\%$) の状況である。まだ、 V_{oc} が低く、スパッタダメージの抑制により、736 mV が可能としている。

(5) A. Cuevasら (ANU) は、“Silicon Solar Cells by "DESIGN"” と題して、プレーナリ講演を行った。

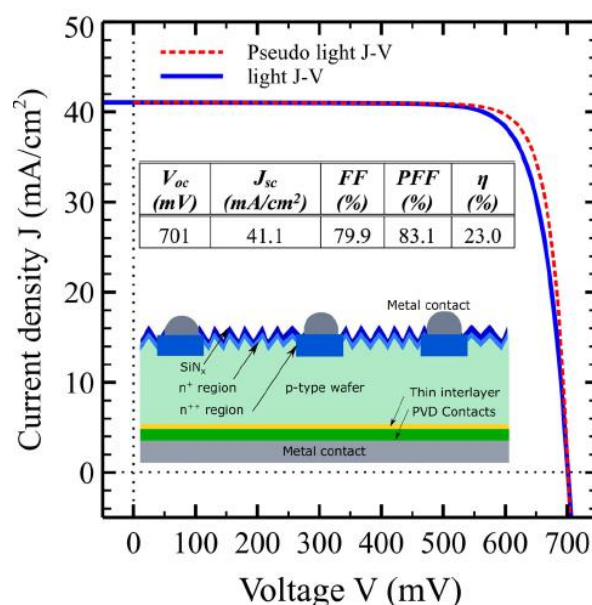


図 21. PVD 成長正孔選択コンタクトを用いた p 型 Si ベース太陽電池の構造と I-V 特性
(Di. Yan et al., Appl. Phys. Lett., **113**, 061603 (2018))

Si 基板上に薄膜堆積することで太陽電池用接合形成をはかりたい。これまで、薄膜形成は、化学的手法でなされ、例えば、a-Si:H ベースの低温のアプローチやポリ Si のような高温アプローチがある。講演者らは、DESIJN (Deposited Silicon Junctions) と名づけた新規なアプローチ、Si の化学堆積と超薄膜 SiO_x 中間層上のドーピング層、について講演した。開発の初期段階だが、B を in-situ ドープした p⁺ポリ Si コンタクトで、再結合電流密度 $J_{0p} + \approx 20 \text{ fA/cm}^2$ とコンタクト抵抗 $\rho_c \approx 10 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ を達成している。これらの passivating contacts は、表面側の P 拡散電子導電層と p 型 Si の裏面側の正孔選択導電層からなる。図 2 1 に、PVD 成長正孔選択コンタクトを用いた p 型 Si ベース太陽電池の構造と I-V 特性を示す。表面は、P の二重拡散による n⁺層（接合用）と n⁺⁺層（コンタクト用）、PECVD-SiN の passivating contact、裏面は、PVD 成長超薄膜 SiO（厚さ約 1,4nm）と PVD 成長 70nm 厚 Si:B の正孔選択コンタクトからなる。抵抗率 $1 \Omega \text{ cm}$ の FZ 成長 p-Si（200 μm 厚）を用いたセル（2x2cm²）で、効率 23.0%（Voc=701mV、Jsc=41.1mA/cm²、FF=83.1%）の状況である。n-Si では、効率 24.7%が得られているとのことである。

（6）この他、ISFH から、SiO_x/AlO_x/SiN_x 表面パッシベーションを用いた IBC セルで、効率 26.1%（面積 3.986cm²、Voc=726.6mV、Isc=169.9mA、FF=84.28%）の発表があった。また、Meyer Burger から、低コストプロセスの IBC、HJT トンネル接合技術を用いた IBC セル、HJT セルで、各々、効率 23.8%（面積 90.5cm²、Voc=735mV、Jsc=40.6mA/cm²、FF=79.6%）、23.7%（面積 140cm²、Voc=733mV、Jsc=39.5mA/cm²、FF=81.9%）の発表があった。

4. 4 non-Si 薄膜太陽電池分野：

（1）W. White ら（ZSW）は、“Characterization and New Concepts Applied to Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells: Advancements through EU Project Sharc25” と題して、基調講演を行った。図 2 2 に示す EU の CIGS ‘Cu(In,Ga)Se₂’ に関する Sharc25 プロジェクトの成果が報告された。

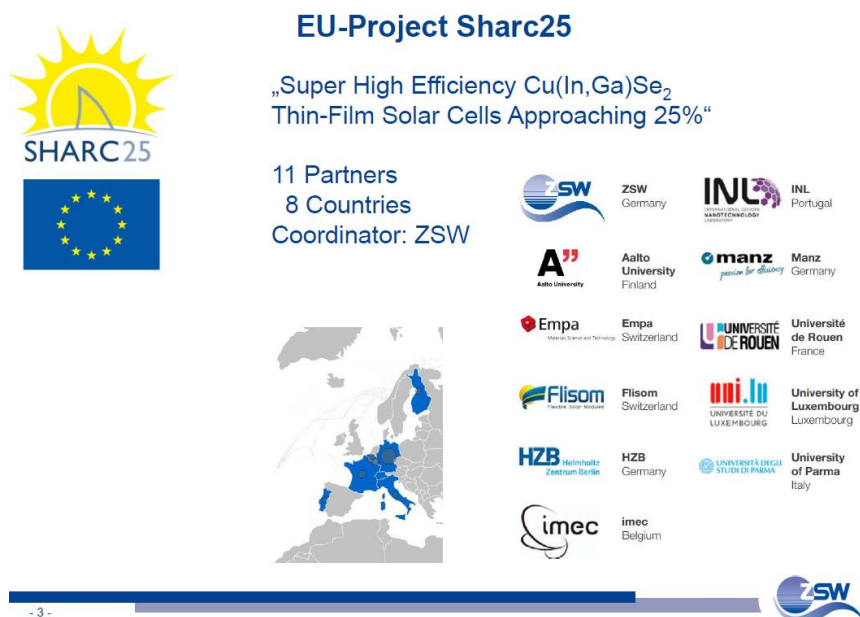


図 2 2 . EU の Sharc25 プロジェクトの概要 (https://www.zsw-bw.de/uploads/media/Sharc25_Flyer_08.pdf)

ZSW の効率 21.7%をベースに、2015 年 5 月からスタートし、3.5 年で、効率 25%の達成を目指す。予算は、EU から 4.6M ユーロ、スイス政府から 1.6M ユーロである。11 機関が参画している。図 2 3 に、CIGS 太陽電池の高効率化の推移と Sharc25 プロジェクトの目標を示す。損失メカニズム、界面再結合、バンドオフセット、TCO やバッファ層の光吸収、CIGS 吸収層の粒界等のバルク再結合、裏面コンタクト等に関する基礎的研究も含まれている。CIGS 光吸収層の Post Deposition Treatment (PDT) が検討されている。PDT なしに比べて、Na や KF の PDT により Voc 向上がはかられている。さらに、RbF や CsF の PDT で、性能向上の効果があることが見出されている。例えば、PDT なし、KF-PDT、Rb-PDT、CsF-PDT で、各々、効率が、17.7%、18.6%、19.1%、19.0%と報告されている。PDT により、光吸収特性の Urbach energy の現象がわかっており、PDT による欠陥低減が、一つの効果であろう。EMPA、ZSW により、CIGS 太陽電池の高効率化が検討され、RbF-PDT、薄い溶液成長 CdS 層およびスパッタ (Zn,Mg)O 層の適用により、ZSW が、効率 22.6%を達成している。CIGS 光吸収層の表面、裏面パッシベーションも検討されている。デバイスモデリングによれば、裏面反射による light trapping の有効性がわかっている。裏面反射の予備検討により、短絡光電流密度 $0.46\text{mA}/\text{cm}^2$ のゲインも得られている。

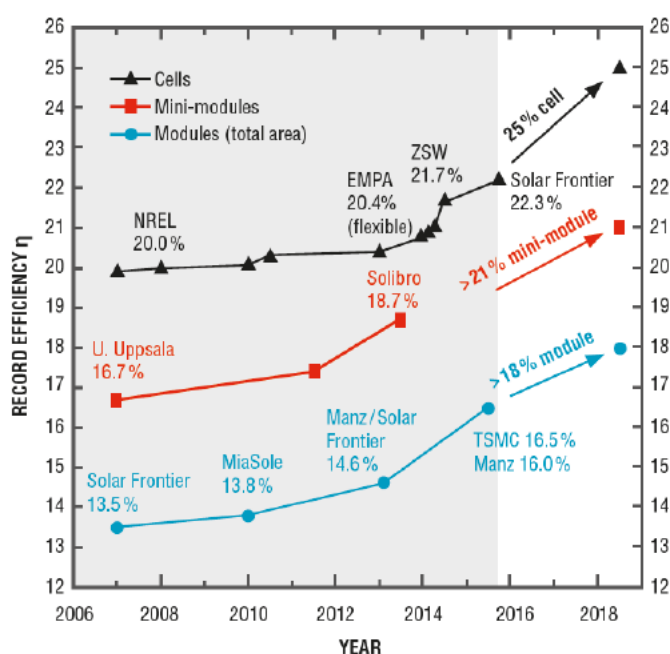


図 2 3 . CIGS 太陽電池の高効率化の推移と Sharc25 プロジェクトの目標
(https://www.zsw-bw.de/uploads/media/Sharc25_Flyer_08.pdf)

(2) P. Kratzert ら (Solibro Research) は、“CIGS Productive Technology above 18%”と題して、プレーナリ講演を行った。Solibro は、2003 年に設立され、累積出荷量は、300MW である。モジュール効率も、2010 年 4 月の平均効率 10.4% (ベスト 11.7%) から、CIGS プロセス改良、メタリゼーションの改良、TCO の光吸収低減、K-PDT の導入により、17.9% (total area 効率 17.0%) へと改善されている。30x30cm² のサブモジュールで、アパーチャ効率 18.8% が得られている。ま今後は、モジュールの大面積化 (0.94m²→1.88m²) も

進め、出力 140～150W モジュールから、300～320W モジュールにつなぎたいとまとめた。

(3) F.D. Giacomo ら (Holst Center - TNO) は、“Large Area (>140 cm²) Perovskite Solar Modules Made by Sheet to Sheet and Roll to Roll Fabrication with 14.5% Efficiency” と題して、プレーナリ講演を行った。金属ハロゲン化物ベースのペロブスカイト太陽電池は、効率 23.2% (0.1cm²)、20.9% (1cm²) が得られ、期待されている。太陽光発電市場参入のための課題の 1 つは、事業化に適したモジュールのスケールアップ、と大面積モジュールの開発である。モジュールの開発の方向性は、スピンコーティング、スケーラブルな蒸着技術の開発である。面積 10.5cm²、160cm² のミニモジュールで、効率、各々、12.2% (真性効率 13.4%)、10.1% (真性効率 11.1%) が得られている。

4. 5 高効率III-V多接合、集光型および宇宙用太陽電池分野：

(1) G. Siefer ら (FhG-ISE) は、“Final Results of CPVMatch - Concentrating Photovoltaic Modules Using Advanced Technologies and Cells for Highest Efficiencies” と題して、プレーナリ講演を行った。図 2 4 に、集光太陽光発電 (CPV) システムの設置例を示す。これまで、400MW の CPV システムが設置されている。結晶 Si 太陽電池は、効率 26.7% で、Auger Limit の 29.4% に近づいている。CPV セルは、効率 46% の状態で、CPV は、最高効率のセル、モジュール、システムである。また、追尾架台上の設置は、土地の二重利用を可能としている。

CPV Installations

Triple-Junction Cells and Silicone on Glass Lenses



Photo sources: companies

6

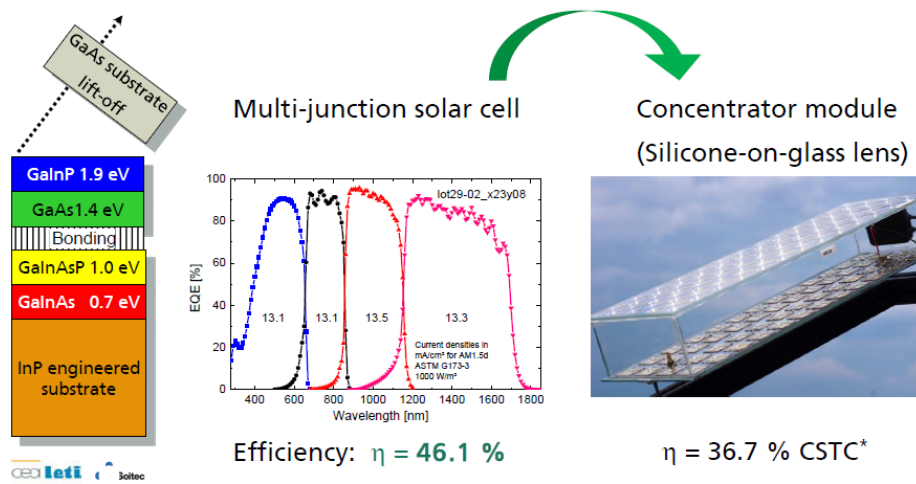
© Fraunhofer ISE
FHG-SK: ISE-PUBLIC



図 2 4. CPV システムの設置例 (Dr. G. Siefer 提供)

講演では、CPV に関する共同研究開発プロジェクトの状況が報告された。EU の Horizon 2020 の支援で、2015 年 5 月に開始し、3 年のプロジェクトである。予算は、4.95 M ユーロである。集光太陽光発電モジュールを開発し、高度な技術開発と最高効率の実現を目指す。コンソーシアムは、フラウンホーファー ISE、RSE、CEA、Tecnalia の 4 つの研究機関、1 大学（UPM）、2 つの企業（AZUR（宇宙太陽光発電）、AIXTRON と 2 つの中小企業（ASSE Cycleco）で、構成されている。

From the Laboratory to the real Sun Highest efficient CPV Modules



* Concentrator Standard Testing Conditions, 1000 W/m², 25 °C_{cell}

15

© Fraunhofer ISE
FHG-SK: ISE-PUBLIC

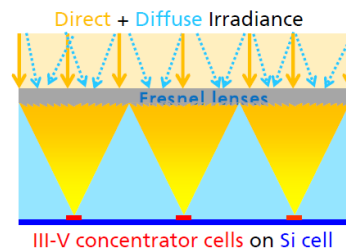
F. Dimroth et al. IEEE JPV, 2016. 6(1)
M. Steiner et al. Prog. Photovolt., 2014. 23(10)



図 2 5 . CPV 共同研究プロジェクトの CPV セルおよびモジュールの成果（Dr. G. Siefer 提供）

Outlook beyond CPVMatch CPV Modules capturing diffuse Sunlight - EyeCon Module

- Multi-junction solar cell utilizes direct radiation
- Silicon solar cell utilizes diffuse, scattered radiation + works as heat spreader
- Increase of power output of the module



31

Yamada N, Okamoto K. Optics Express 2014
J.F. Martinez, AIP Conference Proceedings 2012, 090005 (2018)



図 2 6 . Si セル上の III-V 多接合セルのハイブリッド集光セルモジュール（Dr. G. Siefer 提供）

図 2 5 に、CPV 共同研究プロジェクトの CPV セルおよびモジュールの成果を示す。ウエハボンディング GaInP(1.9eV)/GaAs(1.4eV)//GaInAsP(1.0eV)/GaInAs(0.7eV) の CPV セルの約 300 倍集光で、効率 46.1%、CPV モジュールで、効率 36.7% が実現している。図 2 6 に、Si セル上の III-V 多接合セルのハイブリッド集光セルモジュールを示す。これは、III-V 族多接合セルは、直達光を利用するのに加えて、結晶 Si セルが、拡散光と散乱光を利用し、出力増加を狙っている。図 2 7 に、Si セル上の III-V 多接合セルのハイブリッド集光セルモジュールによる出力増大効果を示す。III-V 多接合セルは、直達光 587W/cm² で、効率 38.9%、結晶 Si セルは、拡散光 63W/cm² で、効率 17.4%、合わせて、効率 36.8% が実現している

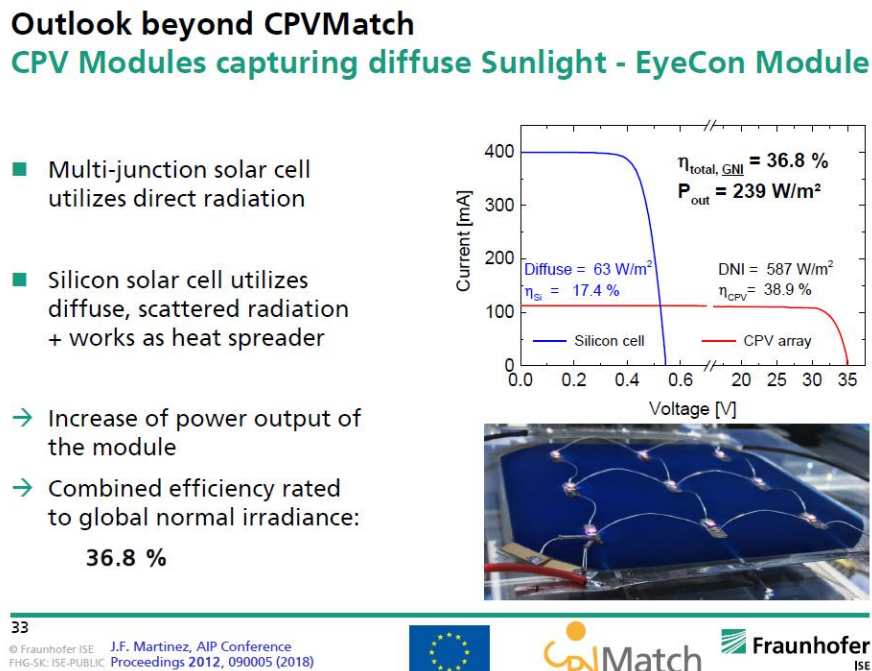


図 2 7. Siセル上のIII-V多接合セルのハイブリッド集光セルモジュールによる出力増大 (Dr. G. Siefer提供)

4. 6 PV モジュール、BOS コンポーネント分野：

(1) T. Sample (EC-JRC) は、“Standards for PV - Overview of IEC Related PV Standards and How They Contribute to Reduced Costs of Energy” と題して、基調講演を行った。IEC TC82 は、PVにおける国際連携をリードし、国際標準を発行している。1980年初頭に設置されたモジュールに関する標準化を進めているWG2の活動の概要が報告された。5つのサブWGから成る。

①Measurement Principlesに関しては、14ドキュメントがある、IEC60891、60904～10にまとめられ、CPVに関するWG7 (IEC60904-3) と連携し、ダイレクトスペクトラムやCPVデバイス用のソーラーシミュレーターに関わるIEC60904-9のアップデートされている。

②Qualification and Safety Testingに関しては、10ドキュメントがある。IEC61215 (結晶Si)、61646 (薄膜系)、61730 (PVモジュール) にまとめられている。追加修正として、ホットスポットや温度係数などがある。

③Power and Energy Ratingsに関しては、4ドキュメントがある。IEC61853-1 (irradiation

and temperature performance) および-2 (spectral response, cycle of incidence and module temperature) 、 61853-3 (module energy rating calculation) などである。

④Specialized Stress Testsに関しては、 9 ドキュメントがある。IEC617 (salt-mist corrosion testing of PV modules) 、 IEC62719 (transported testing) 、 62712 (dynamic mechanical load testing) 、 62716 (corrosion testing) 2804 (system-voltage durability testing) などである。

⑤Module Materials and Componentsに関しては、6 ドキュメントがある。Module Materials に関して波、Encapsulants、Back Sheets and Front Sheets、Adhesives、Pottants、Edge Sealから成り、IEC62775、62788-1-2 (EVA) 、 62788-1-4 (encapsulants and back sheets) 、 62788-1-5 (encapsulation optimization) 、 62805-1-1、1-2などもある。Module Components に関しては、IEC62790 (junction box) 、 62109-2 (safety for power convertors) 、 connectors for PC applications in P systems -safety requirement testing、PV cables などがある。

⑥Module Materialsは、Encapsulants、Back Sheets and Front Sheets、Adhesives、Pottants、Edge Sealから成り、IEC62775、62788-1-2 (EVA) 、 62788-1-4 (encapsulants and back sheets) 、 62788-1-5 (encapsulation optimization) 、 62805-1-1、1-2を開発中である。

⑦Quality Assuranceに関しては、 2 ドキュメントがある。

⑧Increased Reliability (reduced risk) に関しては、IEC62892-Xがあり、 3 つの異なる地域での評価を踏まえ、現在は、70℃レベルだが、高温動作 (70～80℃、80℃～90℃) のガイドラインIECTs63126、IEC61215、61730、62790、62852のガイドラインがある。Increased Reliabilityに関しては、IEC63209の拡張スタンダードの検討が、2018年8月に離陸したが、マイナーチェンジにしたいとの事である。

⑨Extended Test Sequence

⑩Common Pointsに関しては、IEC61215をベースに、繰り返し試験、PID試験や追加評価 (EL イメージング等) を検討中である。

(2) R. Kopecek ら (CISC) は、“Overview of Bifacial Module Technologies, Applications and Costs”と題して、プレーナリ講演を行った。Bifacial 太陽電池は、出力増とコスト低減の可能性がある。結晶 Si 太陽電池の生産量のうち、bifacial 太陽電池生産量は、2017 年は 6%。2018 年は 8%で、ITRPV ロードマップによれば、2020 年、2022 年、2025 年、2028 年には、各々、16.5%、21%、30%、38%と予測されている。2018 年の Longj Solar の p-Si 単結晶 PERC 構造 bifacial 結晶 Si 太陽電池モジュールは、効率 23.95% (320W) を実現している。Monofacial セルモジュールに比べて、5～10W の出力増との事である。他文献だが、bifacial 太陽電池の monofacial 太陽電池に比べた出力増のシミュレーション結果を図 28 に示す。PERT セルモジュールでは、monofacial に比べて、2mW/cm² の出力増が試算されている。講演でも、約 10%のエネルギーgain が期待できるとしている。図 29 は、bifacial モジュールの monofacial モジュールに比べた LCOE のシミュレーション結果を示す。monofacial モジュールに比べて、LCOE コストの低減が期待できる。講演では、一軸追尾の有用性も述べられた

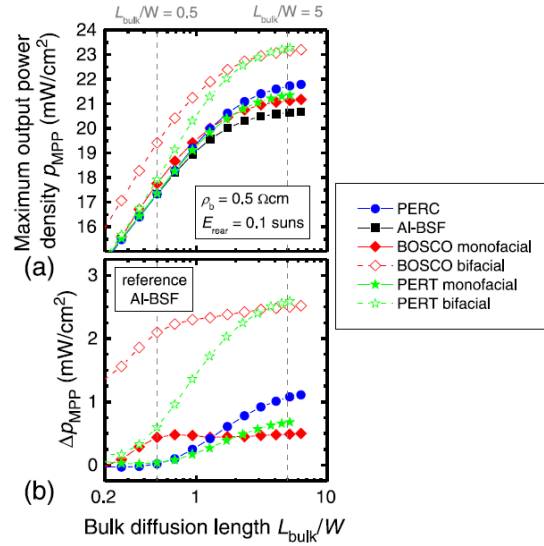


図 2 8. bifacial 太陽電池の monofacial 太陽電池に比した出力増のシミュレーション結果 (F. Fertig et al., Progressn in PV, **24**, 800 (2016))

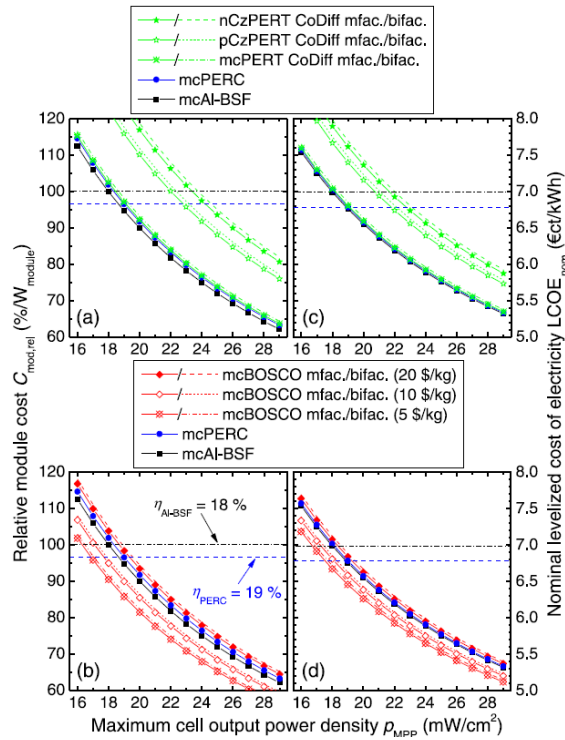


図 2 9. bifacial モジュールの monofacial モジュールに比した LCOE のシミュレーション結果 (F. Fertig et al., Progressn in PV, **24**, 800 (2016))

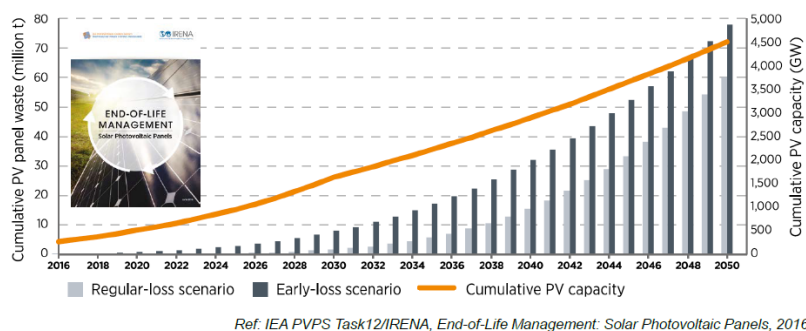
(3) K.P. Kainesら (RWTH Aachen Univ.) は、“Storage for Increasing Self Consumption”と題して、プレーナリ講演を行った。将来のクリーンエネルギー社会の創成のためには、PVの柔軟性が求められる。世界的に、系統に占めるPVの比率が増加しつつある。今後、集中発電から分散発電へ、スマートグリッドが重要となろう。系統連携は、電圧や周波数変動をもたらし、系統の安定化のためには、PVシステムのsmart integrationが必要である。一解決策として、PV+バッテリーなどがあり、系統の安定化のためにも、バッテリーの重要性

が増している。系統に頼らず、自己消費のシステムの方向が進むと考えられる。例えば、PVの電力発生と住宅での電力消費の不整合を緩和する一つの解は、バッテリー使用であり、今後、off gridの自己消費が進むと考えられ、住宅レベルでのバッテリーサイズの最適化が必要である。residential home storageは、累積で、2014年の15,000件から、2018年100,000件との事である。Liイオン電池価格も2013年の2000ユーロ/kWhから、2017年、1300ユーロ/kWhとなっている。今後、PV、バッテリー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。home storage容量の度数分布でも、2013年、3 kWhが11%、4kWhが18.5%、5kWhが18%、6kWhが16%だったのが、2016年、3 kWhが2.5%、4kWhが12%、5kWhが3.5%、6kWhが20%と、大容量化にシフトしている。アーヘン近くのHome storageシステムの実証データ解析結果も、報告された。自己消費率は、5～7月の約95%、4月および8月の約90%に対して、11月～1月は、約20%となっている。residential home storageは、累積で、2014年の15,000件から、2018年100,000件との事である。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、電力損失等を通して、PVシステムサイズ、使用するバッテリー容量と自己消費率、コストとの最適化が必要である。

(4) K. Komoto ら (Mizuho IR Inst.) は、Environmental Aspects of Crystalline Silicon PV Module Recycling Technologies” と題して、プレーナリ講演を行った。

Projection of Global Waste Volume

☀ Estimated cumulative global waste volume of the EOL PV modules (IEA PVPS Task12/IRENA, 2016)



Ref: IEA PVPS Task12/IRENA, End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels, 2016

MIZUHO
みずほ情報総研

K. Komoto et al., 35th EU-PVSEC, Brussels, Belgium, September 2018

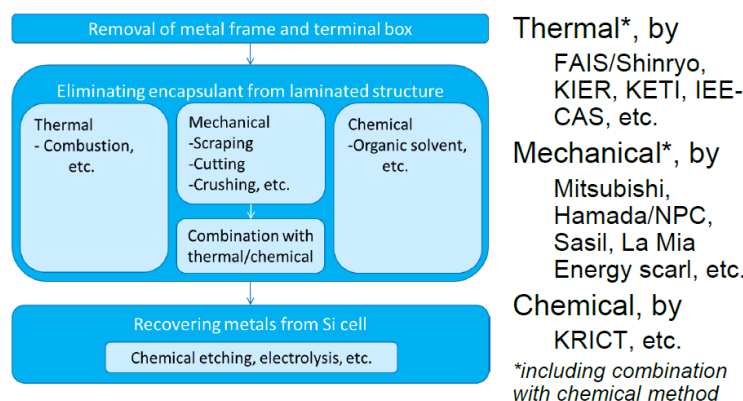
4

図30. PVの累積導入量と廃棄物量の予測 (Dr. K. Komoto 提供)

PVの導入が、世界的に、急速に伸びている。これは、PVモジュールの増加は、将来的に廃棄されることを意味している。図30は、PVの累積導入量と廃棄物量の予測を示す。エンドオブライフ (EOL) 太陽電池モジュールの管理体制を確立するための環境負荷低減と資源の有効利用の観点から、評価結果が述べられた。一般的に、持続可能な廃棄物管理は、3Rと呼ばれるReduce、Reuse、Recycle、からなる。製品を修復または再利用できないとき、リサイクルは、廃棄物として破棄する前に望ましいオプションである。大量廃棄物の太陽電池モジュールとPVのクリーンエネルギー技術としての位置を確立するために、

新たな課題となっている。

R&D on Crystalline Si Module Recycling



Ref: K. Komoto, J.-S. Lee, J. Zhang, D. Ravikumar, P. Sinha, A. Wade, and G. Heath, End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12-10:2018.

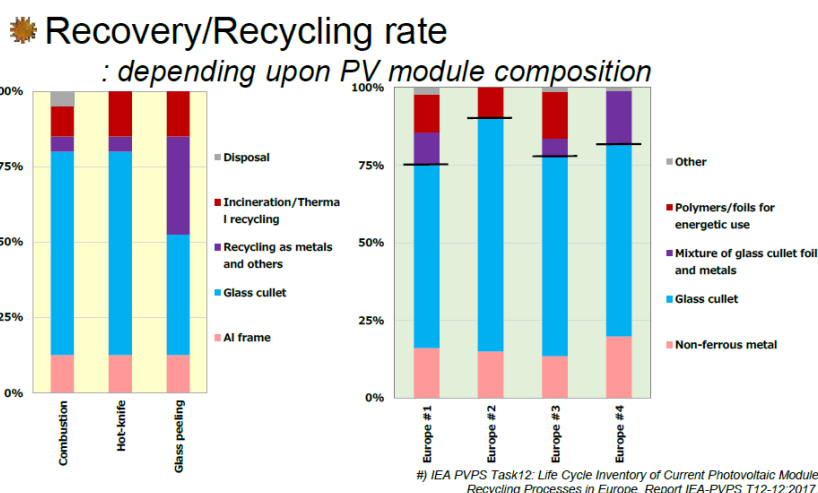
MIZUHO
みずほ情報総研

K. Komoto et al., 35th EU-PVSEC, Brussels, Belgium, September 2018

7

図 3 1 . 結晶 Si 太陽電池モジュールのリサイクルの研究開発体制 (Dr. K. Komoto 提供)

Comparison with European recyclers



MIZUHO
みずほ情報総研

K. Komoto et al., 35th EU-PVSEC, Brussels, Belgium, September 2018

21

図 3 2 . EVA Combustion、Hot-knife、Glass Peeling の 3 つの技術による結晶 Si 太陽電池モジュールのリサイクル率の評価結果と欧州の事例 (IEA/PVPS Task12) との比較 (Dr. K. Komoto 提供)

図 3 1 は、結晶 Si 太陽電池モジュールのリサイクルの研究開発体制を示す。および様々な議論や活動実施され、政府によって開発されました。組織、および会社。講演では、結晶 Si 太陽電池モジュールのリサイクル技術の環境側面の評価結果が報告された。図 3 2 は、EVA Combustion、Hot-knife、Glass Peeling の 3 つの技術による結晶 Si 太陽電池モジュールのリサイクル率の評価結果を欧州の事例 (IEA/PVPS Task12) と比較して示す。リサイクル率は、PV モジュールコンポーネントにも依存し、リサイクル技術は、確立されては折らず、

さらなる研究開発の加速が必要であると言えよう。図 3 3 は、EVA Combustion、Hot-knife、Glass Peeling の 3 つのリサイクル技術による相対的環境負荷指標の比較を示す。環境負荷解析結果は、太陽電池モジュールのリサイクル技術が、正味の環境負荷低減に有効であることを示しているが、ライフサイクルアセスメントを含め、図 3 2、3 3 の結果は、今後修正される可能性もある。さらなる環境負荷解析が必要であるとまとめた。

Normalization of environmental indicators

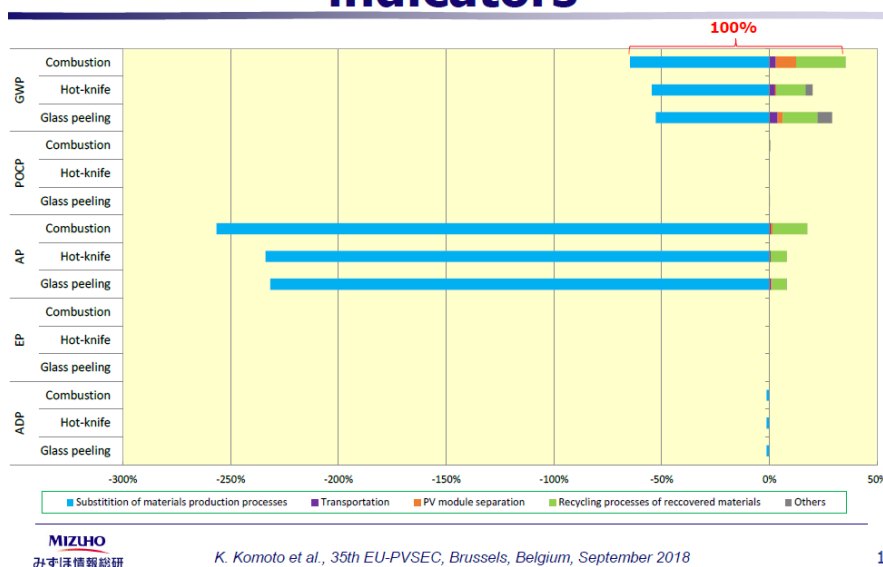


図 3 3 . EVA Combustion、Hot-knife、Glass Peeling の 3 つのリサイクル技術による相対的環境負荷指標の比較 (Dr. K. Komoto 提供)

4. 7 PV システム、性能、応用、インテグレーション分野：

(1) B. Herleleer ら (EKISTICA) は、“Visions from the Future: The Interaction between Curtailment, Spinning Reserve Settings and Generator Limits on Australian Projects with Medium to High Renewable Energy Fractions” と題して、基調講演を行った。オーストラリア再生可能エネルギー庁 (ARENA) プログラムの下でのプロジェクトである。狙いは、再生可能エネルギー中間、高度浸透オフグリッドシステムの性能評価をすることである。Northern Territory Solar Energy Transformation Program (NT SETuP) プログラムや他の RAR プロジェクトの実証データから PV の Performance Ratio のインパクトを評価する。PV とジーゼル発電のハイブリッドシステムの 25 のコミュニティが対象である。質疑では、クリーンエネルギーの観点で、ジーゼル発電は如何なものか、とのコメントがあった。戦略的 PV の削減、Spinning Reserve (SR)、Generator Limits や技術に対する経済的優位性等の相互作用が、リスク/インセンティブ同様、検討されている。コスト LCOE も評価されている。時間はかかるが、100% 再生可能エネルギー下での PV の役割形成は可能とまとめた。

(2) M. Machado ら (Techalia) は “Demonstrating Novel Building Integrated Photovoltaic Technologies with the PVSITES Project” と題して、プレーナリ講演を行った。建材一体型太陽光発電 (BIPV) 技術には、EU によって設定されたエネルギー効率目標の達成に貢献で

きる可能性がある。しかし、政策立案者とエンドユーザーの主要な要求を満たす包括的なソリューションを提供する上で、企業の難しさによって過去数年間の市場取り込みが妨げられている。この市場展開は、コスト低減、フレキシブルな設計、高性能、長期信頼性、標準化や法的規制へのコンプライアンスに関する意欲的なターゲットの達成に依存する。Horizon2020 の PVSITES プロジェクトにおいて、15 のパートナーの欧州コンソーシアムが、市場要求への包括的で堅牢な答えを提供するための意欲的 BIPV ソリューションを開発するために、共同研究している。プロジェクトは、2016 年 1 月 1 日～2018 年 6 月 30 日で、予算は、EU から 5.47M ユーロ、スイス政府から 1.4M ユーロである。講演では、プロジェクトの結果、ガラス-ガラス結晶 Si 太陽電池モジュール、金属基板上のフレキシブル薄膜 (CIGS) 技術に基づく BIPV 要素のポートフォリオ、効率的、発生電力のグリッドフレンドナリーなインテグレーションを実現するための新しいインバーター技術や建物のエネルギー管理の開発、BIPV の設計、アーキテクチャの統合を支援するためにソフトウェア、が報告された。欧州全土の 7 つの異なる建物について、PVSITES プロダクトの概要も報告された。2018 年 10 月から、新しいプロジェクト BIPV BOOST がスタートしている。Zero emission building、75%のコスト低減、設計最適化、生産プロセスの自動化やフレキシブル化。などが狙いである。

(3) M. M. de Jong ら (SEAC) は “An Overview of Floating PV Worldwide” と題して、ブレーナリ講演を行った。Floating PV システムは、地上設置の PV システムの代替である。

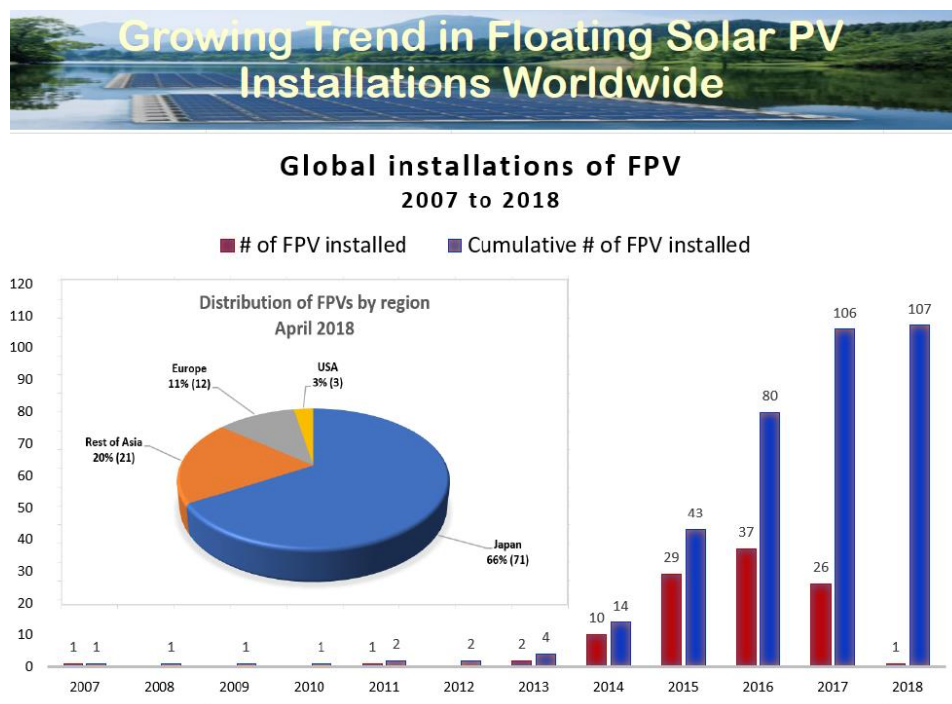


図 3.4. Floating PV 市場の増加 (www.solarplaza.com)

図 3.4 に、データは古いですが、Floating PV 市場の増加を示す。年間の設置容量は、2013 年の 3MWp から、2016 年 87.3MWp、2017 年 422.9MWp に、迅速に伸びており、2023 年には約 2 GW p と予想されている。現在、Floating PV の国際的市場は。総 PV 市場に比べて小さ

いが、今後数年間で数十億ユーロの市場になると期待されている。フローティング PV 市場成長の主要な駆動力は、土地コストの軽減である。他の駆動力は、PV モジュールの温度の低温化や水の光発射による出力増、水力発電湖や飲料水貯水槽のカバーや、水蒸発の減少、等である。現在、日本や中国で、Floating PV の導入が多い。中国や日本のプロジェクトに加え、シンガポール、マルタ、オランダで、研究プロジェクトが実行されている。14の異なる市販 Floating PV システムのエネルギーの出力に影響を与える種々のパラメータの分析結果が報告された。環境的インパクトに加え、エネルギー出力、出力密度、信頼性、メンテナンスや設置のし易さ、などである。オランダは、2050 年に向け、230GW 導入のターゲットがあるが、オランダの国土は、約 40,000km² で、Floating PV に対する期待も大きいとまとめた。

(4) J. A. Tsanakas ら (IMEC) は “Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications: An Overview of the Latest Report by IEA PVPS Task 13” と題して、プレーナリ講演を行った。国際エネルギー機関 (IEA) の太陽光発電システム プログラムのタスク 13 (“Performance and Reliability of Photovoltaic Systems”) は、PV システム、サブシステム、コンポーネントの性能や故障データを収集し、解析することで、これらの運用・保守 や信頼性の改善の共同研究に焦点をあわせている。ここでは、Task13 の最近の研究、技術の成果を総合報告している。特に、サブタスク 3.3 (“Characterization of PV Module Condition in the Field”) の成果、フィールド適用に向けた赤外やエレクトロルミネッセンス (EL) イメージングのガイドラインや提案、を報告している。新しい IEC 標準、Technical Specifications (TS) やガイドラインの議論を含む。フィールドでの PV モジュールやアレイの種々の故障モードと IR/熱や EL 特性結果が、取り組みの例として示された。

4. 8 PV 経済、市場、政策等分野：

(1) C. Breyer ら (Lappeenranta Univ. Tech.) は、” Solar Photovoltaic Capacity Demand for a Sustainable Transportation Sector to Fulfil the Paris Agreement by 2050” と題して、プレーナリ講演を行った。パリ合意は、21 世半ばまでに、明確なターゲット、ゼロの温室効果ガス (GHG) の排出量を設定している。これは、運輸部門が、水素や液体炭化水素 FT (Fischer-Tropsch) 燃料などの合成燃料の形で、直接的・間接的電化を通して、ゼロの温室効果ガス排出に達成することを意味している。講演では、まず、2050 年までに持続可能性の目標を達成するためのグローバル太陽光発電 (PV) 需要の分析結果を紹介している。

図 7 の再生可能エネルギー導入の現状 (2015 年) と 2050 年の導入予測に示すように、2015 年の再生可能エネルギー導入は、22% で、Solar PV は 1% に過ぎない。2050 年の再生可能エネルギー 100% シナリオにおいて、Solar PV は、69% を占め、主力となるだろう。次いで、直接電化、水素や FT 燃料に関する最終エネルギー需要の変換される移動体需要の導出の方法論が示されている。電力ーガス (H₂) および電力ー液体 (FT 燃料) のバリューチェーンが、運輸部門における energy transition を仮定して、モビリティ需要に関する総電力要求に適用される。この電力需要は、solar PV の需要に基づいている。2015 年から 2050 年まで約 200% の旅客および貨物輸送の全ての輸送モードで継続的な需要の増加を示してい

る。道路や鉄道部門における予想される強い直接電化、海洋や航空部門における液体燃料の継続的な需要は、海上と航空への急激な相対的エネルギー需要シフトを示唆する。移動体分野における2050年までのグローバル太陽光発電容量の総需要は、約 25.6 TWpと推定される。そのうち、17%、4%、79%が、各々、直接電化、水素、FT-燃料である。太陽光発電容量の追加分6.5 TWpは、FTの副産物ナフサ化学工業に割り当てられる可能性がある。2050 年に化学工業の原料需要の約30% に相当する可能性がある。図 3 5 に、PVの電力および運輸部門の需要予測を示す。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、図 3 5 に示すように、匹敵する需要(2050年のPV要求80TWのうち、電力部門22TW、運輸部門19.1TW)を持つ鍵を持つ。

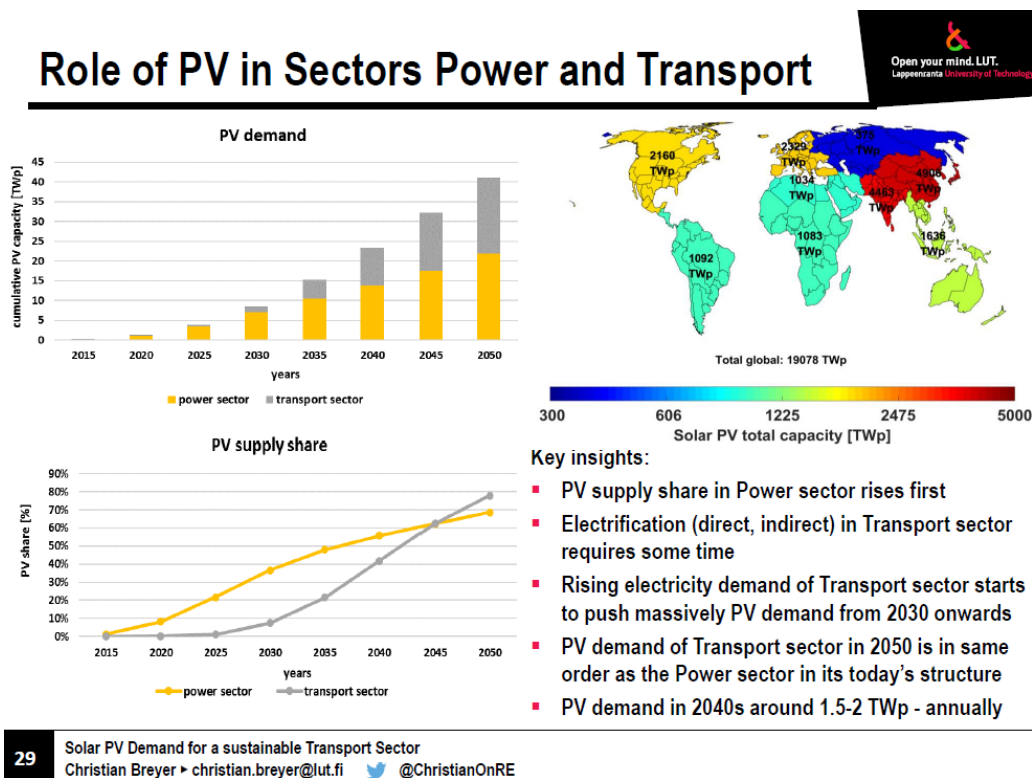


図 3 5. PVの電力および運輸部門の需要予測 (Prof. C. Breyer提供)

(2) M-C. Leinhard ら (Trier Univ. Appl. Sc.) は、”Sector Coupling in Europe to Reach the Climate Change Mitigation Goals by 2050”と題して、プレーナリ講演を行った。2050 年までに気候変動の軽減の目標を達成するために、欧州におけるエネルギーシステムを開発するか、エネルギーセクターとどのように連携するかに関する研究事例を報告した。欧州は、現在、約 15P (peta) Wh の電力量で、2050 年には、35PWh となろう。本研究の目的は、温室効果ガス (GHG) 放出をゼロに減らすために、住宅、商業および産業セクターの効率改善を考慮した再生可能エネルギー システム (PV、風力、バイオエネルギー) の必要な容量を算出することである。欧州の 39 カ国が検討され、8 つの領域に分類されている。まず、それぞれの国で、電気、熱および輸送用のエネルギー需要を分析する。特に、熱需要は部屋の熱とお湯 (低温度 100 °C よりも低い) およびプロセス熱 (100~500 °C の中温と 500 °C を超える高温) に分類される。次の手順では、それぞれの国の 2050 年まで、種々のセクターにおける最終エネルギー需要を決定するモデルを開発する。また、種々の再生可能エ

エネルギーの可能性を評価する。最後に、我々 地域や気象条件を考慮して、欧州の全ての国における、PV と wind park (onshore および offshore)の容量付加を算出し、バイオエネルギーに関する農地利用の3つの異なるシナリオを選択している。2050年、PV、onshore wind および offshore wind は、各々、3.354TW、0.785TW、1.071TW と試算しており、この講演でも、PV を主力として見ている。

(3) A.H. M. Smets (Delft Univ. Tech.) は、” Photovoltaics, You Should Think Big!” と題して、プレーナリ講演を行った。CO2ガス排出による地球温暖化の進展をビデオで紹介し、2050年のターゲット20TWをまかなうには、1220kmx120kmの面積で足りる。2017年の太陽光発電の従事者数は、約340万人で、MW当り15人の仕事があり、今後、毎年100万人の増加が見込める。2050年には、3200~4000万人の雇用が見込まれる。従って、教育が、極めて重要で、講演者の太陽光発電に関する教育の取り組みが紹介された。

4. 9. パラレルイベント :

パラレルイベントとして、IEA/PVPS Task17 (PV for Transport) 後援のSolar Mobility Forum も開催された。H. Ossenbrink (元EC-JRC) がモデレーターで、C. Breyer、K. Komotoなどが、話題提供を行った。C. Breyerは、2050年において、PVは、輸送部門でも、電力部門と同等の貢献が期待できると述べた。講演は、4.8 (1) のC. Breyerのプレーナリ講演内容を参照されたい。K.Komoto (Mizuho) は、NEDOの「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」での検討結果を報告した。中間報告書 (www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100909.html) を参照されたい。

5. 感想 :

展示が、欧州市場の冷え込みを反映して、出展企業数が減少している。参加者は、前回よりも少なく、本会議参加者は、約1,200名 (前回1,864名)、展示関係者やサイドイベント参加者を含めると、2,037名 (前回2,516名) との事であった。

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。結晶Si太陽電池セッションでは、欧米からの研究成果発表が盛んだが、日本企業からの参加は少なく、今後の危惧を感じる。また、欧州で産学連携が進んでいる。わが国でも、NEDOプロジェクトで、結晶Si太陽電池の研究開発のコンソーシアムが進展して、優位な成果が出つつある。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り、オールジャパンで連携して、総合力で、直近の壁を打破する必要があるだろう。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。

次回の36th EU-PVSECは、2019年9月4日～8日、フランスのマルセイユで開催予定である。46th IEEE PVSCは、2019年6月16日～21日、米国のシカゴで開催予定である。また、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)