

第 29 回太陽光発電欧州会議 (29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告

2014. 9. 29

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日 : 2014年9月22日～9月26日。

2. 開催場所 : RAI Convention & Exhibition Centre (アムステルダム、オランダ)。

3. 本会議の概要 :

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、Teun Bokhoven (Dutch Renewable Energy Federation、オランダ) で、論文委員長は Arnulf Jager-Waldau (EC-JRC、イタリア) であった。今年は、76 の国と地域から約 3,000 名の参加者があった。前回より、750 名程少ないが、太陽光発電に関する最大規模の会議となった。

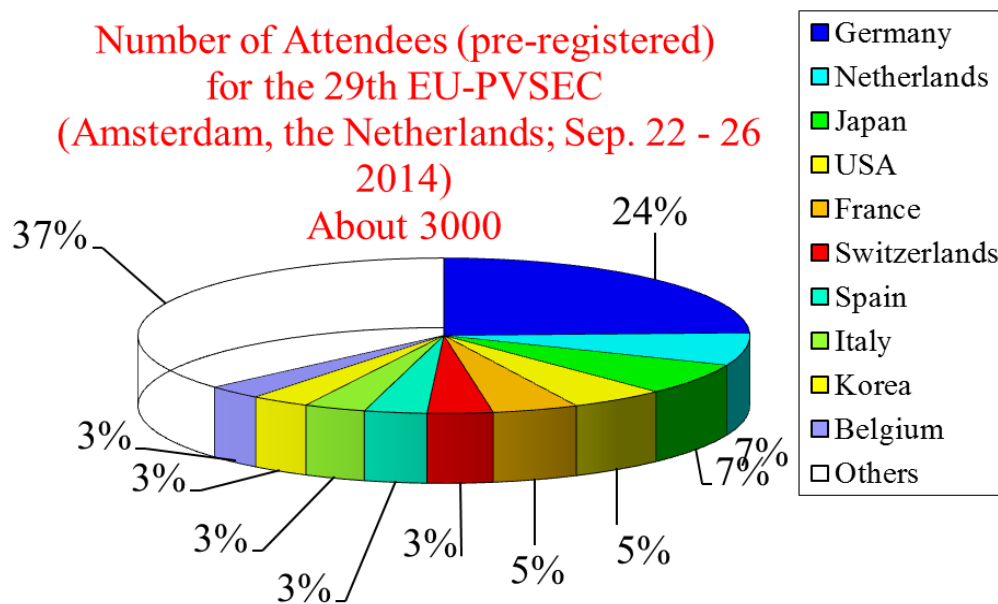


図 1 国別参加者数

図 1 に、国別参加者数 (pre-registered) を示す。国別では、①ドイツ 24%、②オランダ 7%、③日本 7%、④米国 5%、⑤フランス 5%、⑥スイス 3%、⑦スペイン 3%、⑧イタリア 3%、⑨韓国 3%、⑩ベルギー 3%、の順であった。

図 2 は、国別発表論文件数を示す。69カ国から、前回会議より192件減ではあったが、1,428件の論文発表があった。国別では、①ドイツ330件、②日本86件、③オランダ77件、④イタリア75件、⑤台湾73件、⑥フランス70件、⑦韓国63件、⑧米国61件、⑨スイス57件、⑩スペイン54件、の順であった。

**Number of Papers presented at the 29th EU-PVSEC
(Amsterdam, The Netherlands; September 22-26, 2014) 1428 Papers**

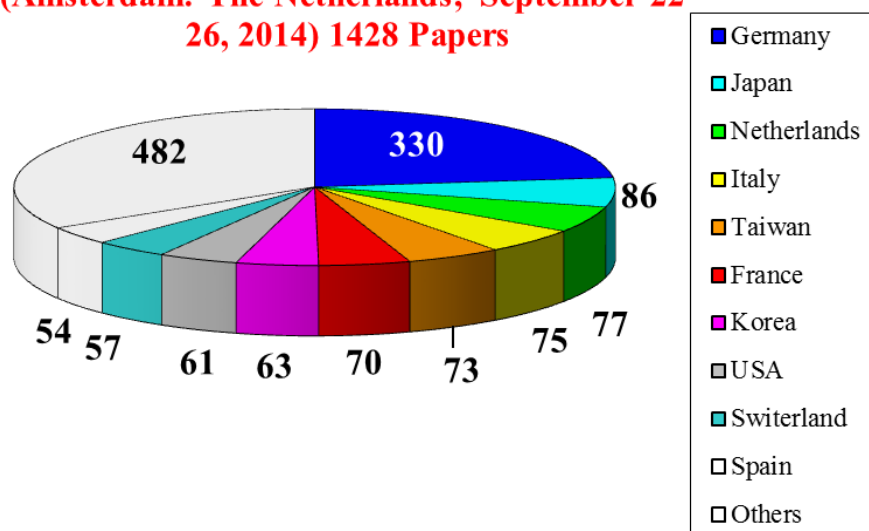


図2 国別発表論文件数 (RTS提供)

図3は、発表論文件数の分野別内訳を示す。分野別では、①太陽光発電の適用、性能、信頼性366件、②結晶Si系346件、③薄膜系（薄膜Si、CIGS・CdTe等II-VI、色素・有機）319件、④先進太陽電池技術163件、⑤太陽光発電の応用90件、⑥重要電源としてのPV84件、⑦集光および宇宙太陽光発電60件、の順であった。

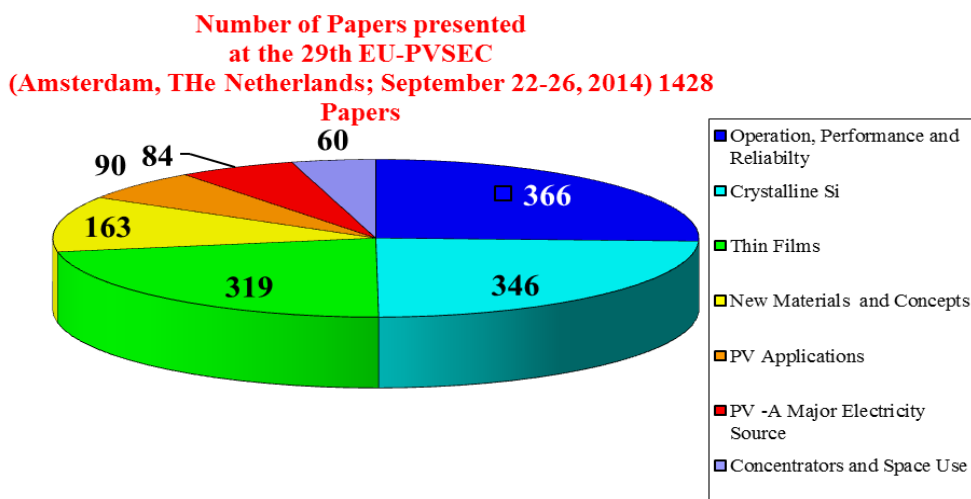


図3 発表論文件数の分野別内訳 (RTS提供)

Becquerel Prizeは、Stefan Glunz (Fraunhofer=ISE) が受賞した。結晶Si太陽電池の研究開発への貢献、特に、多結晶Si太陽電池の世界最高効率20.4%、n型Siの24.4%、CZ-Siセルの光劣化 (B-O複合欠陥) の先駆的研究、Siセルの損失解析、Si PVシンポジウムの創立、J-PVの編集委員、関連産業や産学連携への貢献、などの業績が評価された。

この他、学会併設の展示会には、130社の太陽光発電関連企業、機関が出展した（前回は、27か国247社、前々回は、35か国619社であり、減少傾向にある）。

4. 主な発表論文の概要：

プレーナリ講演を中心に、本会議のトピックスの概要を述べる。

4. 1 太陽電池およびモジュールの新材料、新概念分野：

(1) H. J. Bolinkら (Univ. Valencia) は、“High Performance Perovskite Based Solar Cells”と題して、プレーナリ講演を行った。最近、ペロブスカイト太陽電池がトピックスとなり、多くの研究者、技術者が参加している。1839年のロシアの鉱物学者により発見されたCalcium Titanateに代表されるペロブスカイトの結晶構造の紹介の後、溶媒 (DMF) 中での $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}+\text{PbI}_2$ (PbCl_2) の形成プロセス、二段階堆積法、dual-source thermal evaporationなどの形成方法が紹介された。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)、高 ϵ 、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。2009年の効率3.8%から最近の効率19.3%の変遷、最近の研究開発の状況が述べられた。

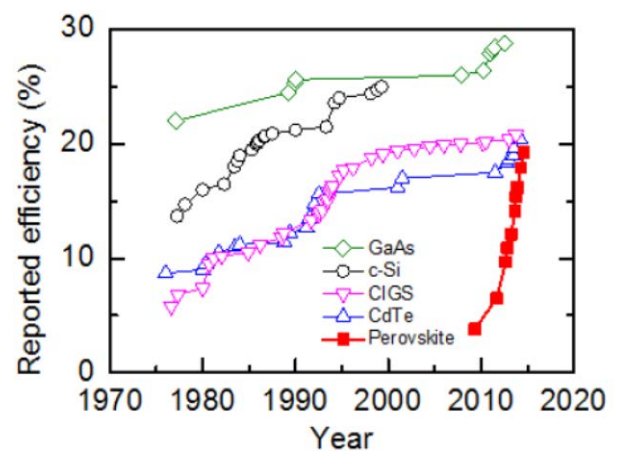
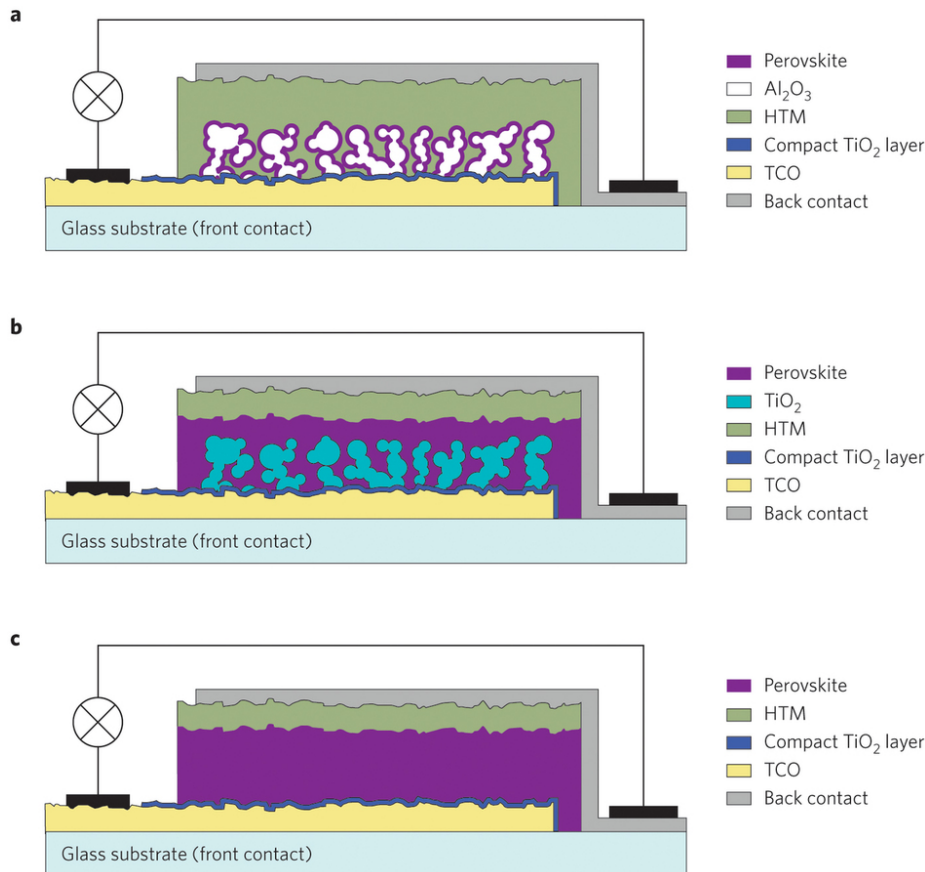


図4 ペロブスカイト太陽電池の高効率化の変遷と他の太陽電池の効率変遷

(本会議ハイライト：

Dr. A. Jaeger-Waldau提供)

図4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、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 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5には、提案されているペロブスカイト太陽電池の構造例を示す。図5aに示すように、mesoporous金属酸化物として、 TiO_2 の代わりに、 Al_2O_3 が提案されているが、高効率は達成されていない。図5bに示す $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ 構造では、効率12.8%が得られ、1000時間のlight-soaking testや 85°C 、85%の1000時間の高温高湿試験でも、安定との事である (A. Mei et al., Science **345**, 295(2014))。図5cのプレーナ構造も検討されている。Graetzelのグループは、効率15.45%を得ている (J. Burschka et al., Nature **499**, 316 (2013).)。その後、Seokのグループは、効率17.9%が実現し (N. Jeon et al., Nature Mater. **13**, 897 (2014).)、最近、UCLAのグループは、効率19.3%を得ているとの事である (Y. Yang et al., Science **345**, 542 (2014).)。課題は、ヒテリシス特性などの不安定性、膜厚を厚くした場合の直列抵抗による曲線因子低下などである。



a, 'Meso-superstructured' PSC employing a film of Al_2O_3 nanocrystals covered with a conformal overlayer of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite. The latter acts as a light harvester as well as an electron conductor. **b**, Nanocomposite embodiment of a PSC where the mesoscopic TiO_2 scaffold is infiltrated by the perovskite. The perovskite assumes the dual role of light absorber and hole conductor. The structure is akin to p-i-n solar cells. **c**, Cross-section of a planar heterojunction solar cell lacking the TiO_2 mesoporous scaffold.

図5 提案されているペロブスカイト太陽電池の構造例(M. Graetel, Nature Materials 13, 838 (2014))

(2) J.C. Goldschmidtら (FhG-ISE) は、” Record Efficient Upconverter Solar Cell Devices” と題して、アップコンバージョンに関するプレーナリ講演を行った。アップコンバージョンは、透過損失を低減するのに有効である。アップコンバージョンプロセスが紹介された後、1996年のエルビウムドープGaAsセルの試み (Er^{3+} 、 Yb^{3+} による効率2.5%増)、2007年の $\beta\text{-NaYF}_4:20\%\text{Er}^{3+}$ ドープbifacial結晶Siセル (効率3.4%増) が紹介された。著者らの成果も報告された。Bifacial 結晶Siセル/アップコンバージョン層 ($\beta\text{-NaY}_2\text{F}_8:30\%\text{Er}^{3+}$) /フォトニック結晶構造などが検討されている。10倍集光で、約 $0.2\text{mA}/\text{cm}^2$ の電流増に対して、554倍集光では、約 $5\text{mA}/\text{cm}^2$ の非線形特性を示す。非集光、94倍集光で、各々、 $1.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $17\text{mA}/\text{cm}^2$ の電流増も得られている。相対的に、0.5~4%の電流増加であり、コスト性能比が課題であろう。

(3) Z.J. Bennettら (ECN) は、” Integrated Approach to Crystalline Si=PV Module”

と題して、プレーナリ講演を行った。オランダも、9月14日に、太陽光発電の累積導入量も1GWに達した。PVシステムコストの低減には、BOSコスト低減、モジュールコスト低減、セルおよびモジュールの高性能化、高信頼度化が必要である。セル・モジュールコストの低減に向け、コンタクト部分（フィンガー電極、バスバー、solder部など）について検討を進めている。図6に示すように、結晶Si太陽電池モジュールは、高出力化の方向にあり、図7に示すように、バンコンタクセルや、ヘテロ接合セルのシェアが増えることが予想される。IBC（Interdigitated Back-Contact）セルについて検討を行った。セル効率よりもモジュール効率の改善に向け、Metal-Wrap-Through（WRT）技術、ラミネーション、セルハンドリングの改善、直列抵抗低減を行った。ECNでは、conductive adhesiveを用いたconductive back sheet foilを開発し、図8に示すように、インターコネクションとラミネーションの一体化、Ag使用量の20%低減をはかり、低コスト化な技術を開発し200MWレベルのモジュール生産を可能としているとの事である。

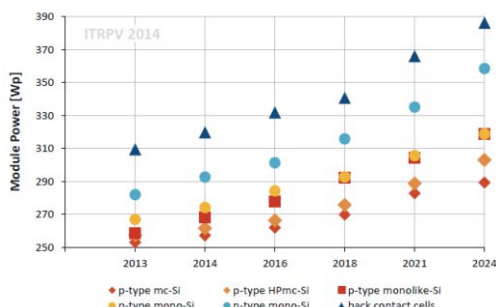


図6 結晶Si太陽電池モジュールの高出力化の方向性 (<http://www.itrpv.net/>)

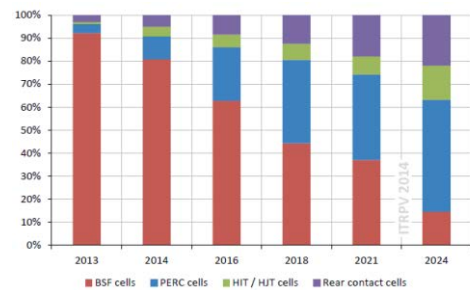


図7 結晶Si太陽電池コンセプトのシェアの今後の方向性 (<http://www.itrpv.net/>)

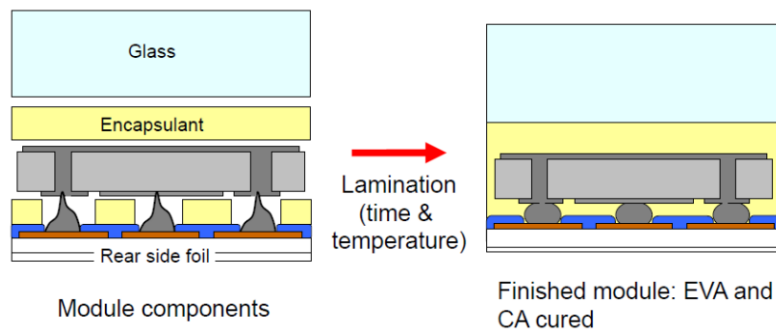


図8 インターコネクション、ラミネーションの一体化 (www.ecn.nl)

4.2 結晶Si太陽電池分野：

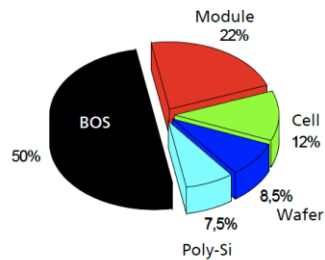
やはり。現在の太陽電池市場を支配する結晶シリコン系太陽電池に関する発表が多かった。

(1) M. Hermleら（FhG-ISE）は、“Progress for Highly Efficient Solar Cells with Low Complexity”と題して、基調講演を行った。市場の91%が、結晶Siであり、62%が多結晶Siである。また、90%以上が、簡易なAl-BSF構造セルであり、low complexityの高効率セルが望まれている。図9に示すように、PVシステムコストは、BOS50%、モジュール22%、セル12%、ウエハ8.5%、ポリSi7.5%の内訳である。電力コストの低減のためには、高効率セルの開発が重要である。図10は、高効率セルの現状を示す。こうした高効率セルを

単純化して、低コスト化をはかる必要がある。基準は、図 1 1 に示す多結晶p型SiのAl-BSFセル（効率18.5%）であり、Levelized Cost of Electricity (LCOE) は、約10ユーロセント/kWhである。図 1 2 に示すように、セルの高効率化は、許容セル製造コストの点で有利となる。

Why Going to High Efficiencies? System costs

- Share of Balance of System costs (BOS) increases from 31 % in 2006 to now about 50 %
- Large fraction of system cost scale with the solar cell efficiency



→ High efficient solar cells reduces your system cost

図 9 PVシステムコストの内訳と高効率セル開発の必要性 (Dr. M. Hermle提供)

Why Going to High Efficiencies? Levelized Cost of Electricity (LCOE)

- What really matters are the Levelized Cost of Electricity (LCOE)
- To rate new solar cell concepts, they have to be compared with the LCOE of the p-type mc Al-BSF cell
- Reference system:
 - p-type mc Al-BSF cell
 - Cell efficiency 18,5 %
 - 900 kWh/kWp, 25 years

LCOE-10 €/kWh

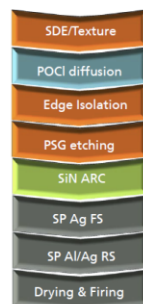


図 1 1 基準となる多結晶p型Al-BSFセル (Dr. M. Hermle提供)

高効率結晶Siセルの生産、研究開発状況がレビューされた。Al-BSFセルをPRC (Partial Rear Contact) セルで置き換えるには、dielectric passivation、LCO (Local Contact Opening) もしくはLFC (Laser Fired Contact) の2ステップの追加が必要となる。多結晶Si、CZ-Siに用いられるメリットはあるが。図 1 1 に、高効率p型PRCセルの開発状況を示す。P型PRCセルにより、多結晶、CZ-Siで、各々、効率19~20%、20~21.5%が可能となろう。キー技術開発は、エミッタとmetallizationの改良である。CZ-PRCセルでは、バルクライフタイムが効率制限要因となる。

n型PERT (Passivated Emitter, Rear Totally diffused) セルについては、両面printed contactによるbi-facialと異なるコンタクト技術によるmono-facialの二つの構成がある。Bi-facialはセルは、拡散層形成法として、二回拡散、dopedガラスによるco-diffusion、イオン注入などがある。既存のプロセス技術のほとんどを用いる。Monofacialセルについては、bifacialセルと同じfront-end技術が使え、PVD rear side metallizationが、rear

Highly Efficient Solar Cells with Low Complexity World Record for Mono c-Si Solar Cells



Company	Technology	Material	Area [cm ²]	Efficiency
UNSW J.Zhao, APL 73 1998	PERL	p-type FZ	4	25.0 %
Sunpower D. Smith, IEEE 40th PVSC 2014	„passivated contact“ BJBC	n-type Cz	121	25.0 %
Sharp J.Hakamara, IEEE 40th PVSC 2014	a-Si:H Heterojunction BJBC	n-type Cz	3,72	25.1 %
Panasonic K. Masuko, IEEE 40th PVSC 2014	a-Si:H Heterojunction BJBC	n-type Cz	143,7	25.6 %

図 1 0 高効率結晶Si太陽電池現状 (Dr. M. Hermle提供)

Why Going to High Efficiencies? Efficiency versus Cost – Other Wafer Cost

- If we change the wafer

	Price \$/Wafer
p-type mc	0,94
p-type Cz	1,29
n-type Cz	1,44

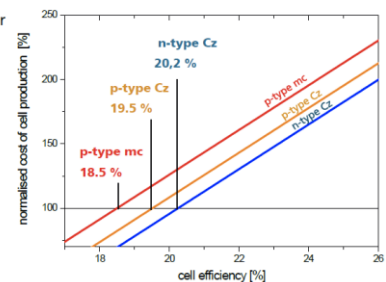


図 1 2 高効率化による許容セル製造コストの変化 (Dr. M. Hermle提供)

side diffusionの表面濃度の制限を低減でき、セル構造は、表面、裏面エミッタにも使われる。図12に、monofacialの高効率n型PERTセルの開発状況を示す。n型PERTセルにより、bifacial、monofacialで、各々、効率20~21%、21~22%が可能となろう。bifacialは、低LCOEの可能性はあるが、metallizationが課題である。Monofacialに関しては、裏面エミッタが、高効率化の可能性を有する。

Solar Cell Concept to Close the Gap p-Type PRC – The Evolutionary Path

	Material	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]	Comment
Q-Cells	mc	655	39,5	79,1	19,5	LFC for point contact P. Engelhart, EUPVSEC 2011
Gintech	mc	652	39,4	79,3	19,5	LCO for point contact Y.K.Chou, Silicon PV 2014
Trina	Cz	662	39,1	79,4	20,5	P. Verlinden, Silicon PV 2014
Solar-world	Cz	672	39,2	79,3	20,9	High lifetime mono material G. Fischer, Silicon PV 2014
Schott	Cz	665	39,9	80,5	21,3	Electro plated front side A.Metz, SOLMAT 120 2014
ISFH	Cz	661	39,8	80,7	21,2	5 BB with dual print H.Hannebauer, PSS RRL 2014
ISE	MCz				21,3	Al-Foil LFC & Ni/Cu plated GridTOUCH measured A.Brand 2012, S.and M. Graf 2012, 6

図11 高効率p型PRCセルの開発状況 (Dr. M. Hermle提供)

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type Heterojunction – A “simple” cell structure

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]	Comment
Silevo	239	739	39,9	80,5	23,1	Tunnel oxide passivation J.Heng 40th IEEE PVSC 2014
R&R	239	736	38,6	81,3	23,1	Smart wire no BB GridTOUCH measured D.Bätzner, Silicon PV 2014
Choshu	239	733	37,3	81,8	22,3	Rear Emitter cell J. Nakamura, nPV Workshop 2013
CEA-INES	105	730	38,7	78,8	22,3	PJ. Riberon, Silicon PV 2014
Kaneka	171	738	40	81,9	24,2	Copper plated front grid J.L. Hernandez, EUPVSC 2013
Panasonic	101.8	750	39,5	83,2	24,7	98 μm thin wafer M. Taguchi, IEEE JPV 2013

図13 高効率n型ヘテロ接合セルの開発状況 (Dr. M. Hermle提供)

図13に、高効率n型ヘテロ接合セルの開発状況を示す。ヘテロ接合セルは、薄型ウエハで高効率を実現でき、高Voc、低温度係数の特徴を持つ。効率22~24.5%が可能である。裏面エミッタ構成が有望だが、metallizationが課題で、低コストの大規模生産 (>1GW) の実証が必要である。

図14に、高効率n型バックコンタクトセルの開発状況を示す。10年以上に及ぶSunpowerによる大規模製造の実績があり、in-situ masked ion implantationやレーザドーピングの新技术開発がある。FhG-ISEでは、in-situ masked ion implantation (n⁺-BSF形成)、BBr3 furnace diffusion (p⁺エミッタやp⁺表面floatingエミッタ形成、Pイオン注入のアニール)、BSGエッチ (ボロンシリケートガラスの除去)、パッシベーション (両対称Al₂O₃/SiN

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type PERT – Monofacial

Front emitter configuration

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]	Comment
ISFH	239	665	38,8	79,5	20,5	Implant and co-annealed F.Kiefer et al., IEEE PVSC 2014
Trina	156	662	40	77,4	20,5	P. Verlinden, Silicon PV 2014
Suniva	239	658	39,1	80,4	20,7	Implant and separate anneal Tao, IEEE PVSC, 2014

Rear emitter configuration

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]	Comment
IMEC	239	677	39,1	81,3	21,5	Cu-plated front side Press release IMEC, 05/2014
Q-Cells	239	673	39,8	79,5	21,3	Screen printed front side V. Mertens, EUPVSEC 2012

図12 monofacialの高効率n型PERTセルの開発状況 (Dr. M. Hermle提供)

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type BJBC– without “passivated contacts”

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]	Comment
Sunpower	156	-	-	-	22,7	Gen 2 D. DeGeuster, EUPVSC 2007
Samsung	154,8	676	40,9	81,1	22,4	Ion implanted Mo EUPVSC 2012
Bosch/ISFH	239	676	41,6	78,5	22,1	Ion implanted 4 BB Bosch Press Release 2013
Trina	153.3	679	40,7	80,9	22,3	P. Verlinden, Silicon PV 2014
ISC Konstanz	239	649	41,9	78,5	21,3	Screen printed metallisation Galbraith, IEEE EUPVSEC 2012

図14 高効率n型バックコンタクトセルの開発状況 (Dr. M. Hermle提供)

パッシベーション) が検討された。図 15 に、n型バックコンタクトセルにおける単純化のアプローチを示す。効率21.7%が得られている。バックコンタクトセルは、効率22~23.5%が可能だが、さらなる単純化が必要である。

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type BJBC- A New Process with Lower Complexity

- Lean process flow with one implantation step
- No alignment during front end process

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	PFF [%]	η [%]
First Cell Batch	4	674	40	80.6	83.4	21.7



- Efficiency can be further increased by adaption of diffusion and implantation conditions

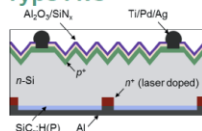
図 15 n型バックコンタクトセルにおける単純化のアプローチ (Dr. M. Hermle 提供)

FhG-ISEにおける高効率セルのアプローチも紹介された。n型CZは、高ドーピングでも高いキャリア寿命を持つので、n型PRCセルは高効率が可能である。HF-Dipによるクリーニング、PECVDによるPassDop層形成、レーザによるPassDop層のオープニング、PVDによるAl堆積が用いられた。図 16 に示すように、145cm²セルで、効率21.9%が得られている。さらに、PVDとNi/Cuプレーティングが導入された。結果を、図 17 に示す。4cm²セルで、効率21.7%だが、高Voc (680mV) の可能性がある。N型PRCセルは、高効率化の可能性を有するが、VocとFFのトレードオフ、ベース抵抗率の影響、パターンニングステップの追加が、課題である。

上記課題を軽減するために、TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) セルも検討された。ボロンエミッタと裏面パッシベーションのn型ハイブリッドセルである。Wet chemicalもしくはUV/O₃成長によるトンネルoxide形成、PECVDによるa-Si層形成、furnace annealと水素パッシベーションが用いられた。図 18 に、n型ハイブリッドTOPConセルの特性を示す。選択エミッタ構造の4cm²セルで、高Voc、効率24.4%が得られている。PRC PassDopセル、TOPConセルで、各々、21.5~22.5%、22.5~23.5%が可能である。図 19 に、近い将来の単純化した高効率セルの可能性をまとめて示す。

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type PRC – the Counterpart to p-Type PRC

- High V_{oc} prove effective passivation of PassDop technology with different passivation layers.
- High FF prove effective rear side contact



PassDop Layer	Area [cm ²]	Material	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]
a-SiC _x P	4	Cz, 1.7 Ωcm	699	41.3	80.5	23.2*
a-SiN _x P	4	FZ, 0.5 Ωcm	693	40.6	80.8	22.8*
a-SiN _x P	145	FZ, 1 Ωcm	687	40.3	78.9	21.9*

(*) certified by Fraunhofer ISE CalLab

J. Benick et. al., 40th IEEE PVSC 2014

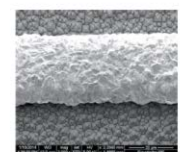
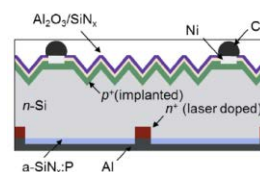
図 16 n型PRCセルの検討結果 (Dr. M. Hermle提供)

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type PRC – the Counterpart to p-Type PRC

- Front side contacts realized by plating of Ni/Cu (forward bias plating)
- Contact opening ~25 μm
- V_{oc} potential from J₀ ~680 mV

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]
Avg. 18	4	675	39.7	78.5	21.1
Best	4	677	39.6	81.2	21.7*

(*) certified by Fraunhofer ISE CalLab



J.Bartsch et al. Silicon PV 2014

図 17 n型PRCセルの検討結果 (Dr. M. Hermle提供)

Solar Cell Concept to Close the Gap n-Type Hybrid TOPCon Cell – Cell Results

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	PFF [%]	η [%]
Blanket Emitter	4	703	41.4	82.5	84.6	24.0*
Selective Emitter	4	715	41.5	82.1	85.0	24.4*

*1KZ-Si, n-type, 2x2 cm², aperture area, confirmed by Fraunhofer ISE Callab

- TOPCon deposition and annealing
after front side boron diffusion
- two high temperature processes

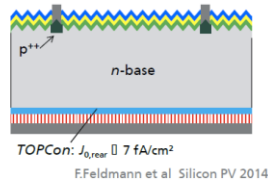


図 1 8 n型ハイブリッドTOPConセルの特性 (Dr. M. Hermle提供)

Solar Cell Concept to Close the Gap What will we get in the “near” Future?

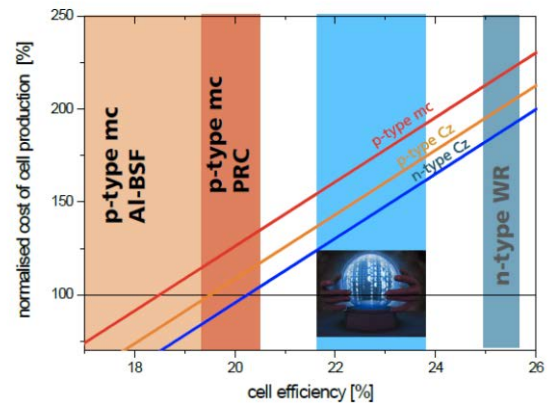


図 1 9 近い将来の単純化した高効率セルの可能性 (Dr. M. Hermle提供)

(2) J. Nakamuraら (シャープ) は、“Development of Hetero-Junction Back Contact Si Solar Cells” と題して、世界第二位の効率25.1%に関するプレーナリ講演を行った。電力コストの低減のためには、セル・モジュールの高性能化が重要である。ヘテロバックコンタクト (HBC) セルは、25%以上の高効率化を達成できる構造と期待される。バックコンタクト (BC) 構造により、表面電極のシャドロー損失の削減による高Jscが、ヘテロ接合により、良好な表面パッシベーションによる高Vocが可能である。シャープでは、2003年から、BCセルの研究開発を開始し、2011年から、生産を開始している。図 2 0 は、HBCセルの構造を示す。CZ成長n-Si (100) 基板を用いた。片面は、アルカリ処理によるテクスチャ形成、表面クリーニングの後、PE-CVDを用いたa-Si層堆積がなされる。a-Si/c-Si界面特性、a-Si層のパターニングに関して、検討がなされた。I-V特性測定には、図 2 1 に示す、SMT (Surface-Mount Technology) が用いられた。図 2 2 は、HBCセルのI-V特性を示す。表 1 には、HBC構造セルの特性を示す。効率25.1% (Voc=736mV、Jsc=41.7mA/cm²、FF=81.9%、Voc=729mV、Jsc=42.0mA/cm²、FF=82.0%) が得られている。さらなる高効率化は、可能と結んだ。

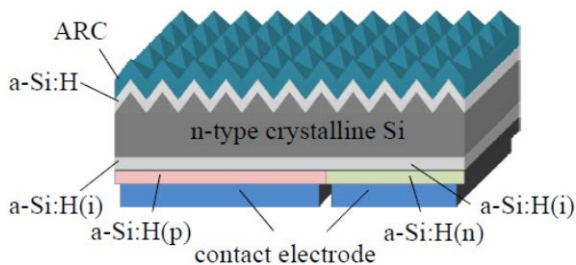


Fig. 1. Structure of HBC cell.

図 2 0 HBCセルの構造 (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

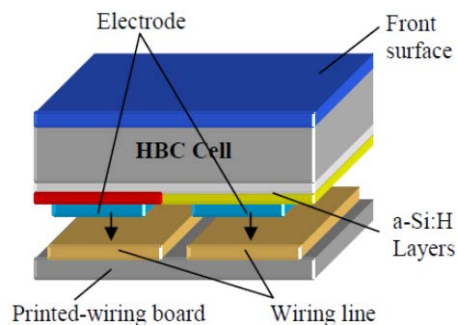


Fig. 2. Schematic configuration of SMT concept.

図 2 1 SMT (Surface-Mount Technology) のコンセプト (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

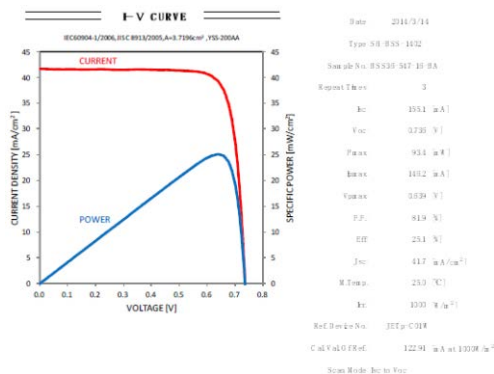


Fig. 3. IV curve of the HBC structure cell.

図 2 2 HBCセルのI-V特性 (J. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

表 1 HBC構造セルの特性

Table I
IV parameters of the HBC structure cell

No.	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Efficiency(%)
1	41.7	736	0.819	25.1
2	42.0	729	0.820	25.1

Note. Aperture area: 19.3mm x 19.3mm (3.713cm²).
Measured at AM1.5, 1000W/m², 25°C by JET

(3) A. Froitzheimら (SolarWorld) は、“Manufacturing of 300Mp Module” と題して、プレーナリ講演を行った。同社は、日産40万枚以上のセル、2000モジュールの製造実績である。2013年5月時のPERCセルの平均効率は、19.5%で、4.7W/セルで、モジュールは出力は、265Wであった。大出力 (>300W) モジュール製造のため、CZ-Si結晶の最適化、表面側の最適化、モジュール構造の最適化を検討した。勿論、低劣化も重要である。PERCセルで、20%以上の効率実現のためには、抵抗率1~3Ω cmが良い事がわかっている。少数キャリア寿命も、効率20%以上のためには、300μsが必要で、500μsでは、効率21.8%が期待できる。ピークドーパント濃度および接合深さの最適化（低ドーパント濃度、深い接合）がはかられ、エミッタ飽和電流密度 J_{0e} の改善がはかられ、 V_{oc} として、650~660mVが得られ、効率20.5%が可能となった。モジュール構造も検討され、バスバー等の直列抵抗損失低減がはかれ、出力8W増が可能となった。表面の反射損失等光学損失の低減もなされ、平均効率20.4%、モジュール平均出力300Wが実現している。Agフリー化も検討されている。今後、現状のPERCセル20.2%から、①表面電極改良で、効率20.4%、②エミッタ改良で20.8%、③パッシベーション改良で21.2%、④高品質Siで21.6%、⑤コンタクト改良で22.2%、⑥マルチバスバーで22.7%の実現を見込んでいる。

4. 3 薄膜太陽電池分野：

4.3.1 薄膜 Si 太陽電池：

(1) C. Balif (EPFL) は、“PV Application of Thin-Film Silicon” と題して、基調講演を行った。薄膜Si PVは、大規模PVに適したものとして期待されていながら、昨今のPV市場の急激な成長に対応できなくなっており、死に体の様相と述べた。しかし、モジュール効率10%以上で35ユーロ/m²の低コスト化が可能で、>5m²のアップスケールが可能で、nearly zero energy buildingやBIPVへの応用が期待できる。カネカ、シャープ、パナソニックなど14社がまだactiveである。現状の課題は、言うまでもなく、効率向上、光劣化抑制、コスト低減であり、TCOの光吸収低減、ドーパSiO_x、ランダム構造光トラッピング、SW効果低減、PECVDプロセス改善による膜品質改善、堆積速度対膜質、などが検討対象である。薄膜Si太陽電池およびモジュールの現状が報告された。表 2 に、高効率a-Siおよびμc-

Si薄膜Si単接合太陽電池特性の認定データを示す。a-Siセル、 μ c-Siセルの最高安定化効率率は、 1cm^2 程度の小面積セルで、各々、10.22%、11.37%で、AISTによる。

表2 高効率 a-Si および μ c-Si 薄膜 Si 単接合太陽電池特性の認定データ

	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF (%)	効率(%)	機関
a-Si	16.38	896	69.8	10.22	AIST
a-Si	16.75	886	67.8	10.10	TEL Solar
μ c-Si	29.1	536	73.1	11.37	AIST
μ c-Si	26.55	549	73.3	10.69	EPFL

Kanekaは、a-Si/ μ c-Si 2 接合タンデムの小面積セル (0.962cm^2)、サブモジュール (14.23cm^2) の安定化効率、各々、12.3%、11.7%を以前、達成している。小面積セルの最高安定化効率は、EPFLによる12.63%である。3 接合タンデムでは、LG電子の安定化効率13.4%、の状況である。図 2 3 に、EPFLによる 2 接合タンデムセルの効率12.63%の特性を示す。



図 2 3 EPFLによる 2 接合タンデムセルの効率12.63%の特性(本会議ハイライト: Dr. A. Jaeger-Waldau提供)

今後の方向として、効率16%以上の実現を目指して、4接合タンデム、a-Siの光劣化抑制、a-Siおよび μ c=Siの高品質材料によるVoc向上、HIT構造の適用、高光吸収材料、light trapping、新材料などの検討が必要としている。

4.3.2 CIGS、II—VI族化合物薄膜太陽電池：

(1) K. Kushiya(ソーラーフロンティア)は、”Current Status and Future Prospect of CIS-based Thin-Film PV Technology at Solar Frontier K.K”と題して、CIGS系薄膜PVに関する基調講演を行った。小面積セルの効率は、ソーラーフロンティアのCIGSセルで20.9%、CdTeセルで21.0%である。今回、バッファ層の最適化、シャントの低減、一様性改善、セル構造の最適化、光学損失の低減、吸収層改良により、図 2 4、2 5 に示すように、面積 0.52cm^2 の CIGS 太陽電池で、効率 20.92% (Voc=686mV, Jsc=39.9mA/cm², FF=76.4%) の世界最高効率を達成している。今回は、図 2 6 に示すように、光損失の解析結果に基づき、ZnO:BのTCO層のドーピング濃度の最適化により高移動度でシート抵抗率を維持しつつ、TCO層の透過率を向上をはかり、Zn ベースバッファ層の改善により短波長側量子効率の改善もはかられている。また、吸収層のバンドギャップ Eg の深さ分布の検討もなされ、低 Eg 域の拡大により吸収損失の改善がなされ、長波長域の量子効率の改善が図られている。

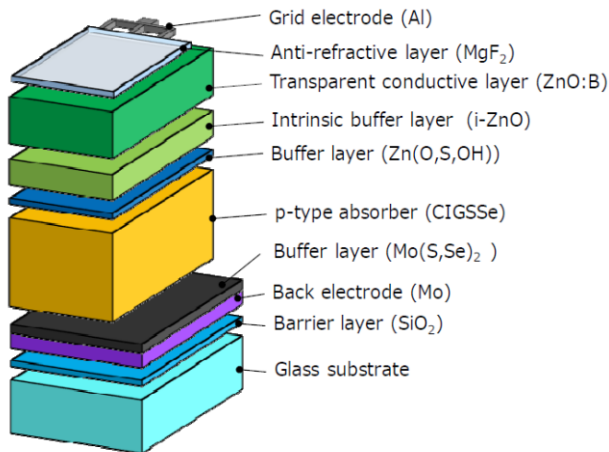


Fig. 1. Schematic image of our device structure.

図 2 4 CIGS太陽電池の構造

(M. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

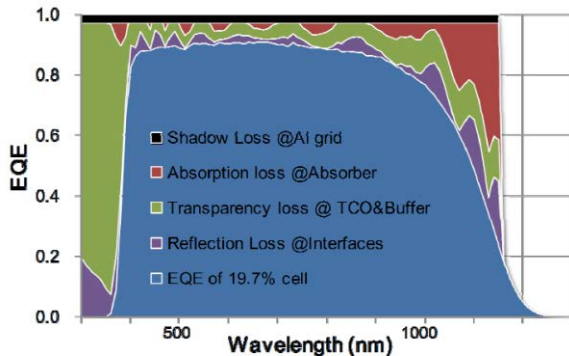


Fig. 3. Summary of optical loss calculations

図 2 6 CIGSセルの光損失解析のまとめ (M. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

30cmx30cmのミニモジュールでは、2010年の効率15.7%から2011年の17.2%、2012年の17.8%と、改善がはかられている。これらの研究開発成果が、2011年の150Wモジュール（モジュール効率12.2%）、2013年の160Wモジュール（モジュール効率13.0%）製造につながっている。2014年、170Wモジュール（97.7cmx125.7cm、モジュール効率13.8%）、2015年、180Wモジュール（モジュール効率14.6%）の製造を予定している。また、200Wモジュール（モジュール効率16.3%）も視野に入れている。

最高モジュール効率は、CIGSで15.7%、CdTeで17.0%である。表3は、First SolarによるCdTeセルの高効率化の見通しを示す。低コスト化については、First Solarが、CdTe太陽電池モジュールで、2013年の平均モジュールコスト\$0.63/W、ベスト\$0.53/Wを実証しており、モジュールコスト<\$0.5/W、システムコスト<\$1/Wが見えている。CdTe太陽電池モジュールの平均効率は13.5%で、ベストは、14.2%である。First Solarの年産規模は、2.2GWで、これまで、8GW以上、設置されているとのことである。CIGS系では、ソーラーフロンティアの年産規模は1GWである。今後は、効率向上、高信頼性と同時に、モジュール

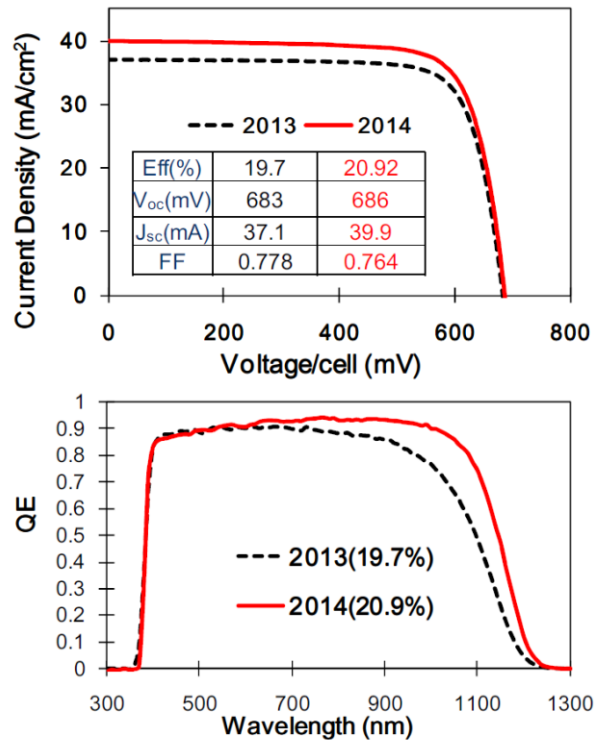


Fig. 2 (a) *J-V* and (b) EQE characteristic comparison between our previous record cell (0.50 cm²) and the new champion cell (0.52 cm²). The measurements were independently conducted under the standard test condition by third parties (AIST and Fraunhofer ISE for 19.7% and 20.9% cells, respectively). The absolute values of the EQE curves were adjusted so that the integral of EQE become the same value as *J_{sc}* of the *J-V* measurement.

図 2 5 高効率CIGS太陽電池の特性

(M. Nakamura et al, Proc. 40th IEEE PVSC (to be published))

ルコストの低減が必要である。モジュールコスト \$ 0.38/W 以下に向けた薄膜系のコストダウンのためには、高スループットなどプロセス改良、ガラス、封止などの改善が必要である。また、コスト低減には、生産量拡張が有効である。投資と同時に市場拡大が必要であり、BIPV や軽量・フレキシブルモジュール用適用領域の発掘が望まれる。今後の高効率化のためには、シート抵抗低減等 TCO の改良、CBD-CdS および CIGS 光吸収層の光吸収改善、ヘテロ接合や量産製造工程の改良が必要で、基礎的には、層堆積、粒界、アルカリ金属 (Na、F) 効果や重金属 (Fe、Ni、Cr) などバルク特性向上、Ga 濃度分布など接合特性、界面欠陥やパッシベーションなど界面特性、ストレス効果、バッファ層や透明導電 (TCO) 膜の光損失低減、TCO の導電率向上、ワイドギャップ材料での高効率化、などが重要である。長期的には、多接合化による高効率化 (>30%)、太陽電池の損失メカニズムや大面積モジュールの非一様性の理解等、基礎的理解が重要であると考えられる

表 3 CdTe 太陽電池の効率の現状と高効率化の見通し

	現状	中期見通し	長期見通し
Voc (mV)	872	916	950
Jsc (mA/cm ²)	29.5	30.5	31.5
FF (%)	79.5	81.8	83.0
η (%)	20.4	22.8	24.8

閉会式の会議ハイライトで、図 2 6 に示すように、ZSW から、CIGS セルで、効率 21.7% が達成されたとの紹介もあった。

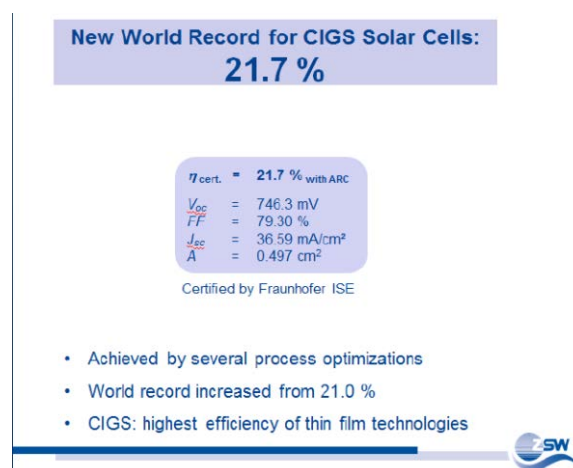


図 2 6 ZSWによる効率21.7%のCIGSセルの特性 (本会議ハイライト: Dr. A. Jaeger-Waldau提供)

4.3.3 有機・色素太陽電池:

(1) R. Andriessenら (Solliance) は、” Solliance OPV: Fully Printed Organic Photovoltaic Cells and Modules with Freedom of Shape and Size” と題して、有機系太陽電池に関する基調講演を行った。有機系太陽電池は、①低価格、②軽量、③フレキシブル、④カラフル、⑤半透明、⑥大量生産性、などの特徴を有する。ペロブスカイト系については、4.1(1)の項に譲る。図 2 7 に示すように、有機系太陽電池の高効率化には、バルクヘテロ接合 (BJT) やタンデムの概念が有効で、P3HTの他に、35以上の高分子系で効率5%

以上が実現している。出荷されている有機系太陽電池の効率は、3%のオーダーである。三菱化学は、低分子系で効率11.1% (0.159cm^2 , $J_{sc}=17.8\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=0.807\text{V}$, $FF=0.657$) を実現している。Heliatekは、有機系タンデムで効率12.0%、UCLA/住友化学は、高分子系タンデムで効率10.6%を達成している。有機系太陽電池の効率向上が必要である。2011年に、P3HT/PC60BM、PVNTNT/PC60BMの組み合わせで、効率7%、P3HT/PC71BM、TC60BA/PBDTT-DPPの組み合わせで、効率9.36%だった。2012年には、UCLAでは、P3HT、住友化学の高分子/吸収端波長900nm材料の構成で、効率10.61%を得ている。3接合タンデムの試みも紹介され、Rene Janse1グループでは、PMPPPST、PCDTBTなどを用い、効率8.9~9.6%を得ている。無機系では、 $E_g/q-V_{oc}=0.4\sim 0.5\text{V}$ だが、有機系では、低 E_g 系で、 $E_g/q-V_{oc}=0.7\text{V}$ 、高 E_g 系で、 $E_g/q-V_{oc}=1\text{V}$ と、大きく、高効率化の障害となっている。

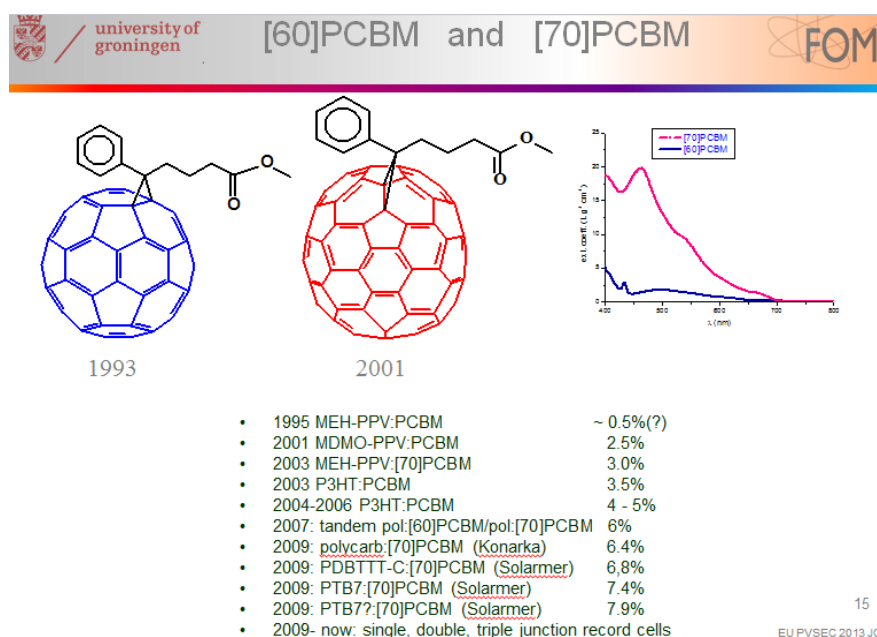


図 27 有機系太陽電池の高効率化の変遷（前回会議ハイライト：Dr. A. Jaeger-Waldau提供）

次世代OPVとして、stretchable、printable OPVの試み、モフォロジーと効率との相関、Quantum Chain解析などの基礎的研究についても触れた。60℃、85%RHの高温・高湿試験もなされ、1000時間後でも、10%以内の低下におさまっているとの事である。

また、色素・有機太陽電池の分野では、効率18%を目指したセルの高効率化、高信頼度化の検討が必要であり、公立の公的機関による効率測定の実験が必要であることが指摘されている。

4. 4 高効率III-V多接合、集光型および宇宙用太陽電池分野：

(1) T. N. D Tibbitsら (FhG-ISE) は、“New Efficiency Frontiers with Wafer-Bonded Multi-Junction Solar Cells” と題して、基調講演を行った。①III-V族セルを用いた集光型太陽電池は40%以上の高効率化を実現しており、近い将来、40%以上の高効率モジュールの実現が可能で、非常に効率の良いCPVシステムを提供できる。②PV応用がサイズの上でも成長しており、より大規模なシステムの実現が要望され、CPVシステムが適している。③

コスト的にも有効な代替PV技術への関心をもたらしていること。集光型太陽電池は、結晶Si太陽電池を用いた集光倍率3倍以下の低倍集光、結晶Siなどの太陽電池を用いた3~100倍の中倍集光、III-V族多接合太陽電池を用いた400倍以上の高倍集光に分類される。ここでは、高倍集光に言及された。①高効率エネルギー、②高エネルギー生成、③高温動作可能、④次世代革新技術、⑤高速GW製造が可能、⑥低コスト太陽エネルギー、といった集光型太陽光発電（CPV）システムの特徴を述べた後、集光型太陽電池モジュールの現状、FhG-ISEの取り組みが述べられた。研究段階の集光型セルの効率は、Sharpにより44.4%に達し、モジュール効率32~35%、システム効率26~28%の現状であり、他の太陽電池よりも格段に性能が良い。

既に、数社が、1 MW以上のCPVシステム設置に貢献している。Golmn, Coloradoなど、30~110MWのCPVシステムも設置されている。現状では、CPVの製造コストは、薄膜系や結晶Si系と同等との事である。特に、2500kWh/m²/yr以上の日射条件の良い地域では、他のPV技術よりも電力コスト低減が可能で、8.5セント/kWh以下が期待できる。エネルギーペイバックタイムについても、他のPV技術に比べて有利であり、1年以下の実現が可能である。

図28には、III-V族多接合、集光型太陽電池の高効率化の可能性を示す。多接合太陽電池の集光動作により、50%以上の高効率化期待できる。スペクトルプリッティングやメカニカルスタックは、システム構成上、コスト高になるうとの見解が述べられた。モノリシックタンデムが妥当で、格子整合系GaInP/GaInAs/Ge 3接合セルが、以前の主流であったが、集光動作でも、効率41.6%程度であった。さらなる高効率化のためには、格子不整合系やIII-V-N化合物の適用が必要である。格子不整合系は、転位発生が課題であるが、シャープは、逆エピ構造InGaP/GaAs/InGaAs 3接合セルで、非集光効率37.9%、250~300倍集光で効率44.4%を達成している。Emcoreは、逆エピ構造InGaP(Eg=1.9eV)/InGaAs(1.4eV)/InGaAs(1.0eV)/InGaAs(0.7eV) 4接

合セルで、AM0効率34,2%を実現している。III-V-N系においては、Solar Junctionは、InGaP/GaAs/InGaAsNSb 3接合セルの集光動作で効率44.1%を実現している。

Detailed Balance Calculations More Junctions Enable Higher Efficiencies

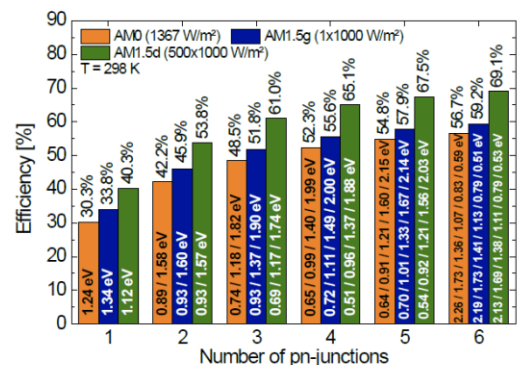


図28 III-V族多接合、集光型太陽電池の高効率化の可能性 (Dr. A. Bett提供)

サブセル材料の組み合わせの柔軟性からは、貼り合わせ技術の適用や、オンSi技術の適用が有効である。Spectrolabは、GaAs基板上のAlInGaP/InGaP/GaAs 3接合セルのエピタキシャル・リフトオフ（ELO）したものとInP基板上のInGaAsP/InGaAs 2接合セルの直接ボンディングによる5接合セルで、AM1.5G効率38.8%を達成している。

前回会議で、FhG-ISE、Soitec、HZB、CEA-Letiの共同開発により、4 接合セルの 297 倍集光で、44.7%の世界最高効率を達成した事を発表した。これまでは、Sharpの InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルの250~300倍集光での効率44.4%が世界最高効率であった。図 29 に示すように、GaAs基板上のInGaP/GaAs 2 接合セル（FhG-ISE製）とInP基板上的 InGaAsP/InGaAs 2 接合セル（HZB製）とをウエハボンディングで貼り合わせるメカニカルスタック法（Soitec）により、モノリシック（2 端子）4 接合セルを実現したものである。格子整合型で、古くから、理想的構造と言われていたが、2 枚の化合物基板を使用することで、高価であることから、本格的検討はなされてはいなかった。昨今の高効率化の競争の中で陽の目を見たような気がする。図 30 は、世界最高効率 4 接合セル、4 接合セルの外部量子効率の波長特性、297 倍集光下での動作特性、を示す。

Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell

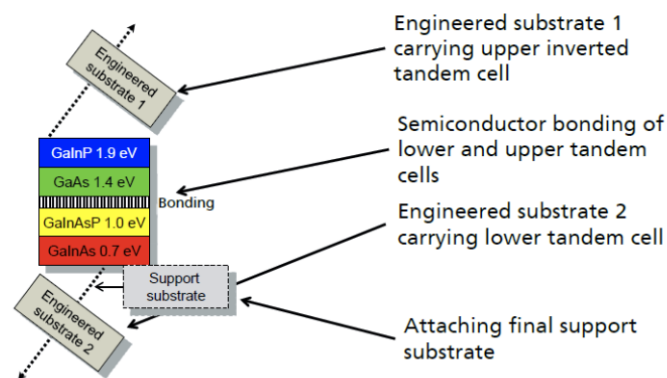


図 29 4 接合セルの作製プロセス (Dr. A. Bett提供)

Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell

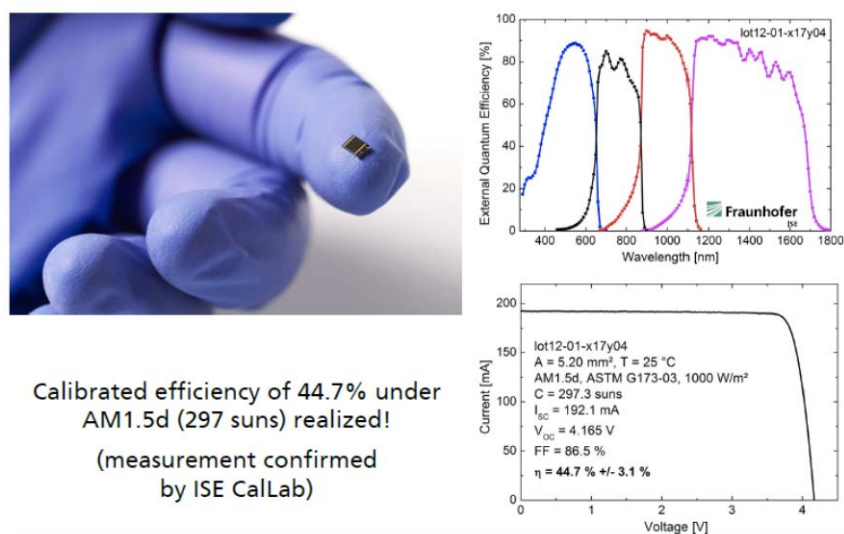


図 30 世界最高効率 4 接合セル、外部量子効率の波長特性、297 倍集光下での動作特性 (Dr. A. Bett提供)

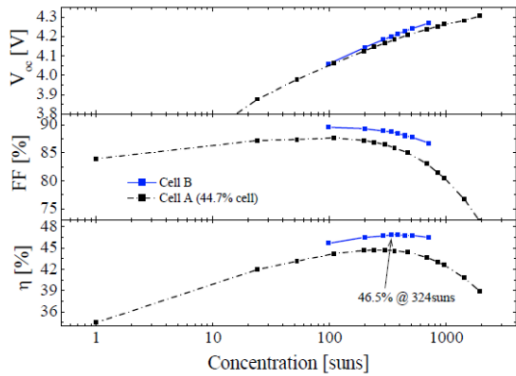


Figure 6: Performance metrics for cell structure B compared with the previous record cell A. The peak efficiency measured at 324x is now 46.5%.

図 3 1 新しい世界最高効率 4 接合セルの集光特性 (Dr. T. N. D Tibbits提供)

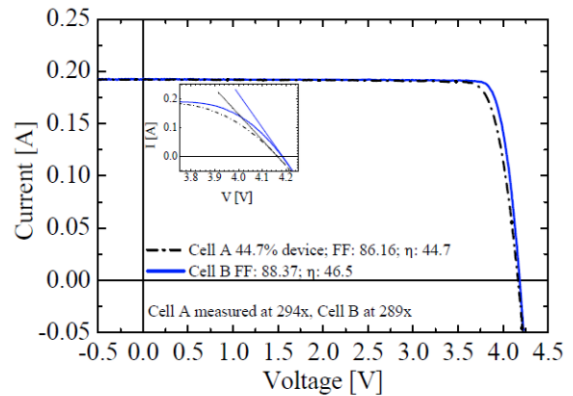


Figure 7: Flash IV curves for solar cell devices A and B, taken at very similar concentrations (~300x). The inset shows the detail at V_{OC} with the gradient at V_{OC} highlighted with additional lines. Hero cell B has a lower R_{series} of $49.0 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ versus $63.5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ for cell A.

図 3 2 300倍集光で 4 接合セルの I-V 特性 (Dr. T. N. D Tibbits提供)

今回、①GaInPトップセルのエミッタ改良による高収集電流化、②GaInP/AlGaAsトンネルダイオードの透明化、③GaAs系サブセルの E_g 、層厚の増加による高 V_{oc} 、 J_{sc} 化、④GaInPAsサブセルの E_g 低減によるサブセルの電流整合、改善がなされ、図 3 1、図 3 2 に示すように、324倍集光で、46.5%の世界最高効率が実現している。AIST、FhG-ISEにも測定を依頼しているとの事である。

現状の生産段階のセルのAM1.5D集光効率38~40%、AM0効率29~31%を、中長期的には、AM1.5D集光効率45~50%、AM0効率33~38%としたいと結んだ。

4. 5 PV システム、性能、信頼性分野：

(1) G. Boppら (FhG-ISE) は、“Electrical Storage for Renewable Energy Supply” と題して、プレーナリ講演を行った。2012年PVは36GW (30TWh、約5%) 2013年風力は34GW (55TWh、約9%) で、2030年には、再生可能エネルギーが65% (650GW) まで浸透することが予測されている。再生可能エネルギーのさらなる導入には、electrical storageが必要である。種々のstorageの現状と課題が述べられた。

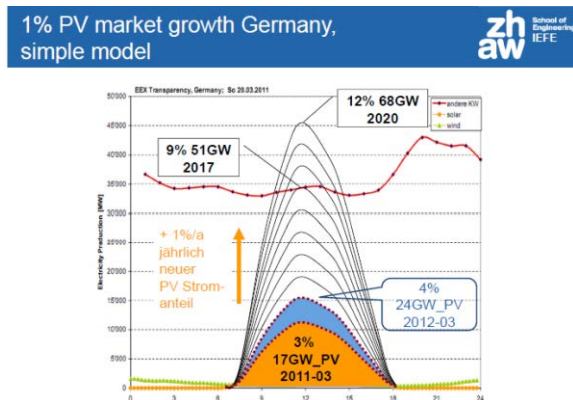


図 3 3 ドイツにおける系統に対する PVの割合 (Dr. F. P. Baumgartner提供)

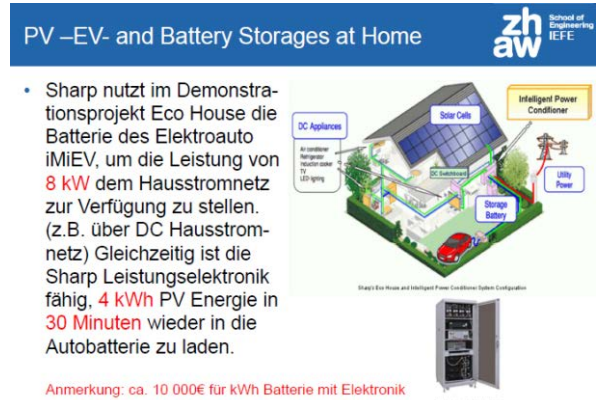


図 3 4 PV-EV-Batteryホームシステム (Dr. F. P. Baumgartner提供)

ここでは、F.P. Baumgartnerら（ZHAW Univ.）による、第27回欧州太陽光発電会議での、” integration and Management of PV Mattery Systems in the Grid” と題するプレナリ講演を紹介する。ドイツなどでは、系統に占めるPVの比率が増加しつつある。ドイツの場合、図 3 3 に示すように、2011、2012、2017、2020年に、各々、24GW（4%）、29GW（5%）、51GW（9%）、68GW（12%）と予測されている。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+EV+バッテリーのsolar home storage system（図 3 4）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。図 3 5 には、市場における種々のバッテリーの現状をまとめて示す。いくつかのケーススタディが述べられた。図 3 6 は、PV、バッテリー、グリッドのコストシナリオを示す。2017、2018年頃に、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。

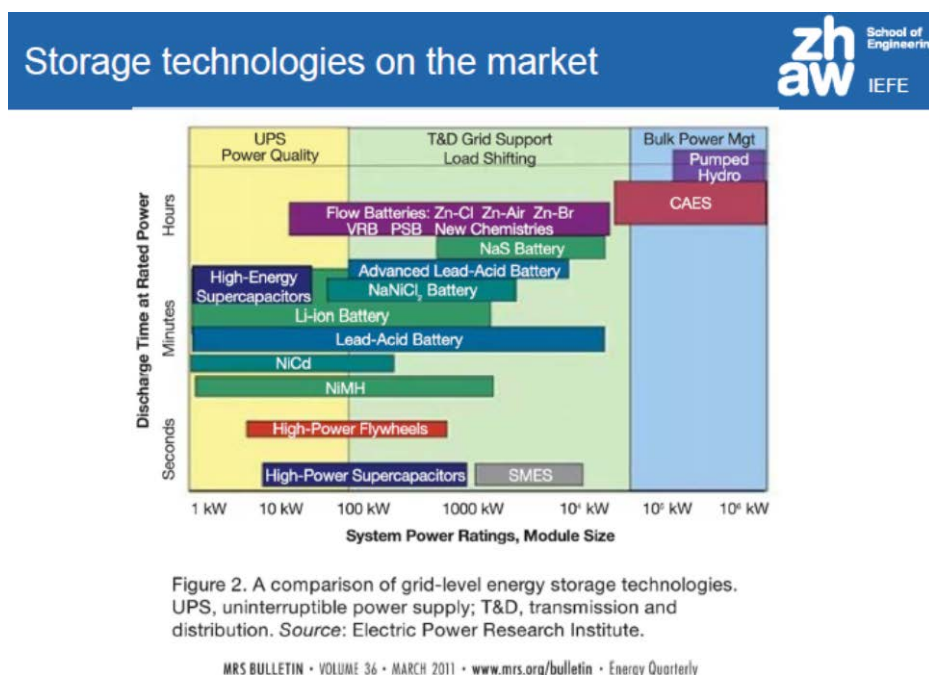


図 3 5 市場における種々のバッテリーの現状（Dr. F.P. Baumgartner提供）

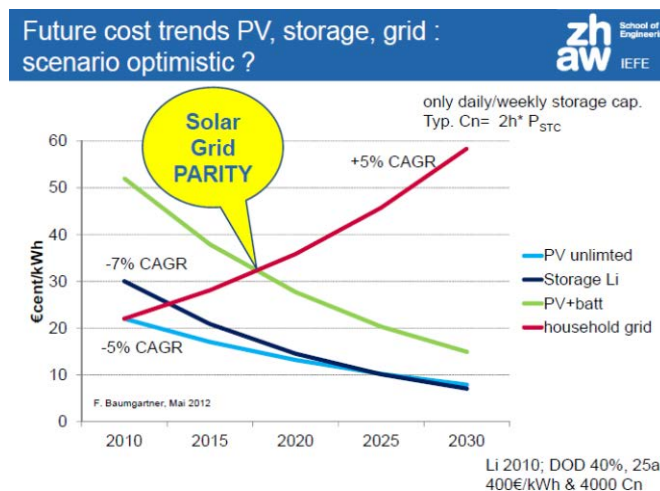


図 3 6 PV、バッテリー、グリッドのコストシナリオ（Dr. F.P. Baumgartner提供）

(2) M. Kohl (FhG-ISE) は、“Reliability and Service Life Prediction”と題して、プレーナリ講演を行った。新しい製品開発のためには、コスト/性能比、耐用年数、信頼性などが重要となる。PVセル、モジュールの信頼性に関して、種々の試験法が紹介された。85°C/85%のDamp Heat試験では、多くの結晶Si太陽電池モジュールは、2600~3300時間で劣化する。75°C/85%、85°C/85%、90°C/85%と過酷な条件にするほど劣化は大となる。活性化エネルギーは、69kJ/moleとの事である。

4. 6 PV 応用分野 :

(1) N. Taylorら (EC-JRC) は、“Cost Maps for PV Electricity in Europe”と題して、プレーナリ講演を行った。PVシステムのLCOEコストを試算して、欧州各国のPV電力コストが試算されている。表4は、2013年のPVシステムのLCOEコストを示す。2014年には、PVシステムが18%減少し、表4の1,700ユーロ/kWpから、1,400ユーロ/kWpに減少している。図37は、2013年時のLCOEコストの内訳を示す。20年以上の耐用年数を考慮して、20年経過後のPVシステム性能を初期性能の80%を仮定している。

表4 2013年時のPVシステムのLCOEコスト (H. Ossenbrink et al., Photovoltaic Electricity Cost Maps, (EC-JRC, 2013))

Table 1: LCOE of PV generated electricity for residential systems with a system price of 1700 EUR/kWp ex. VAT, 1.5% operation, maintenance and repair (O&M) cost, an annual generation of 1000 kWh/kWp/y installed and financial lifetime of 20 years.

Item	Contributions to LCOE				LCOE Total [EURct/kWh]
	Cost [EUR/kWp]	Item [EURct/kWh]	Capital for ROI 5% [EURct/kWh]	O&M 1.5% [EURct/kWh]	
PV Module	600	3.00	1.60	0.9	5.5
Inverter	150	0.75	0.35	0.2	1.3
Balance of Systems	420	2.10	1.10	0.6	3.8
Engineering Procurement & Construction	370	1.85	0.95	0.6	2.8
Other (fees, permitting, insurance..)	160	0.80	0.40	0.2	1.4
Total	1,700	8.50	4.40	2.5	15.4

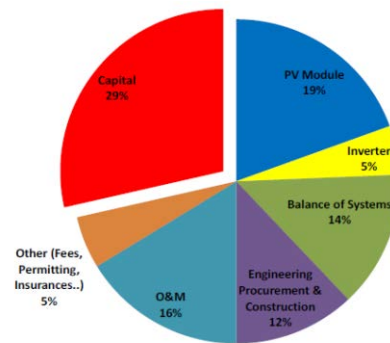


Fig. 2: LCOE cost breakdown for locations generating 1,000 kWh/kWp/y

図37 2013年時のLCOEコストの内訳 (H. Ossenbrink et al., Photovoltaic Electricity Cost Maps, (EC-JRC, 2013))

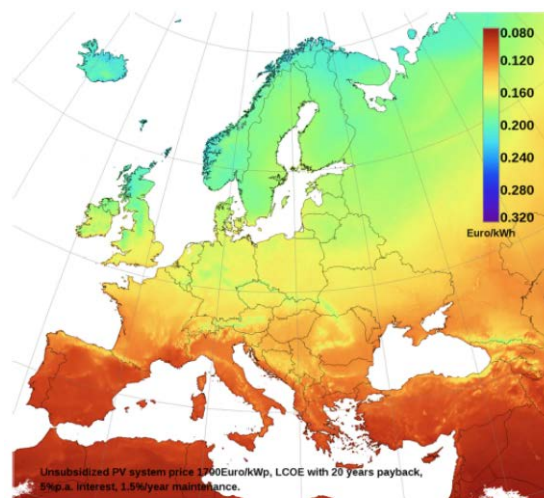


Fig. 1 Distribution of the levelised cost of PV electricity in Europe.

図38 2013年時の欧州各国のPVシステムのLCOEコストの分布 (H. Ossenbrink et al., Photovoltaic Electricity Cost Maps, (EC-JRC, 2013))

図 3 8 に、2013年時の欧州各国のPVシステムのLCOEコストの分布を示す。図 3 9 に、2013年時の欧州各国のPVシステムのLCOEコストと家庭の電力料金との差の分布を示す。2013年時は、デンマーク、ドイツ、スペイン、ポルトガルでは、PVシステムのLCOEコストは、家庭電力料金以下となっており、フランス、スウェーデン、オランダ、ベルギー、スイス、オーストリアなどは、同等となっている。2014年時には、欧州の79.5%が、PVシステムのLCOEコストは、家庭の電力料金以下となっているとの事である。0.004ユーロ/kWhの実現も可能と述べた。今後は、さらなるPVシステムの開発（さらなる高性能化、低コスト化、長寿命化）が必要で、モジュールレベルの標準化、システムの多様化（PV+storage、PV+heating、……）への対応、ネットワーク制御技術、smart gridやICTインフラの開発、他の再生可能エネルギーとの連携、EV、PHVなど自動車応用、新しいビジネスモデルや市場開拓、などが課題であると結んだ。

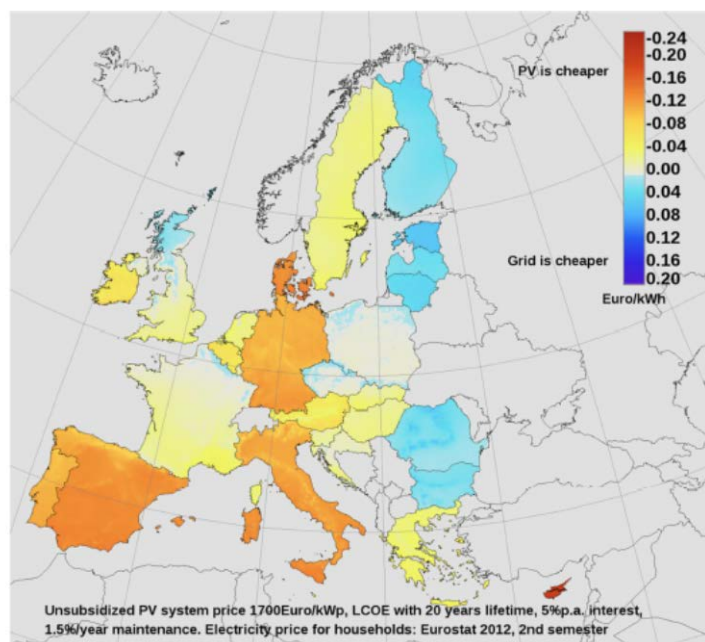


Fig. 2 Price difference between PV levelised electricity cost and household retail prices.

図 3 9 2013年時の欧州各国のPVシステムのLCOEコストと家庭の電力料金との差の分布 (H. Ossenbrink et al., Photovoltaic Electricity Cost Maps, (EC-JRC, 2013))

4. 7 市場、ビジネス、政策等：

(1) P. Frankl (IEA) は、閉会式で、“ Solar Photovoltaic Energy Technology Roadmap” について、基調講演を行った。2013年末のPVシステムの年間設置量、累積設置量は、各々、37GW、135GWである。PVは、2019年には、global electricityの2%、2050年には、再生可能エネルギーは65~79%、PVは16%になるだろうと述べた。

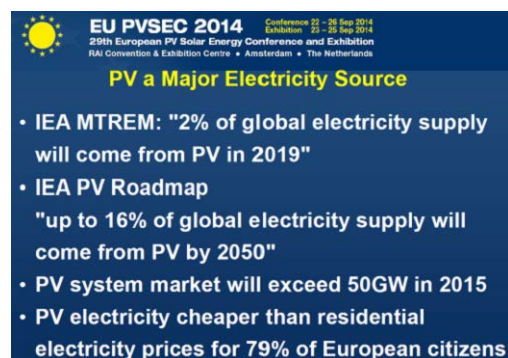
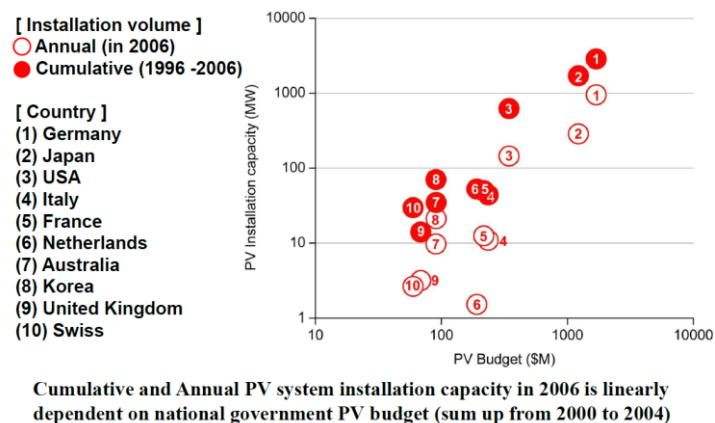


図 4 0 本会議ハイライト (Dr. A. Jaeger-Waldau提供)

IEAのロードマップも紹介された。PVシステムの累積設置量も、2030年、2050年には、各々、1721GW、4674GWになるだろう。モジュール価格も、2013年の約\$0.8/Wから、2020年、2025年、2030年、2035年には、各々約\$0.7/W、約\$0.5/W、約\$0.45/W、約\$0.4/Wになるだろうと予想されている。今後は、flexible power systemの構築が必要で、policy makerに将来のインフラ構築の視点を期待したい。ロードマップは、www.iea.org/roadmapsで入手できるとの事である。

(2) Y. Fujiokaら (NEDO、豊田工大) は、” Overview of research and development projects for solar cells in Japan” と題して、NEDOの太陽電池研究開発プロジェクトの概要に関して講演を行った。NEDOの概要、研究開発におけるNEDOの役割を述べた後、太陽光発電市場の加速化には、各国の支援、特に、研究開発の加速化が必要であると述べた。図4-1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。経産省およびNEDOが、日本におけるPV産業の進展や市場拡大に貢献しており、1990年以来、PVコストは、着実に低減し、2013年度には、累積導入量13.6GWに到達している。

Correlation between PV budget and PV system installation



M. Yamazuchi, T. Schiefl, J. Luther and A. Blakers, ISPRE Report (IGSU) 4.

図4-1 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（Prof. M. Yamaguchi提供）

NEDOの太陽光発電技術開発の概要が報告された。図4-2に、各種太陽電池の最高変換効率の変遷と日本の最近の貢献を示す。NEDOのプロジェクトで、シャープのInGaP/GaAs/InGaAs 3接合セルの集光下での効率44.4%、非集光下での効率37.9%、シャープの結晶Si HBTセルの効率25.1%、ソーラーフロンティアのCIGSセル、サブモジュールでの効率20.9%、17.8%、シャープの色素増感セルで11.9%、東芝の有機系5cm角サブモジュールで効率9.9%（セル効率は11.2%）、産総研のμc-Siセルおよびa-Siセルで、各々、11.4%、10.22%など、世界最高効率あるいは第二位の高効率が実現している。この他、パナソニックの結晶Si HBTセルの効率25.6%、三菱化学の有機セルの11.1%、など、世界最高効率を

達成し、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。引き続き、国家レベルでの研究開発の推進が必要である。

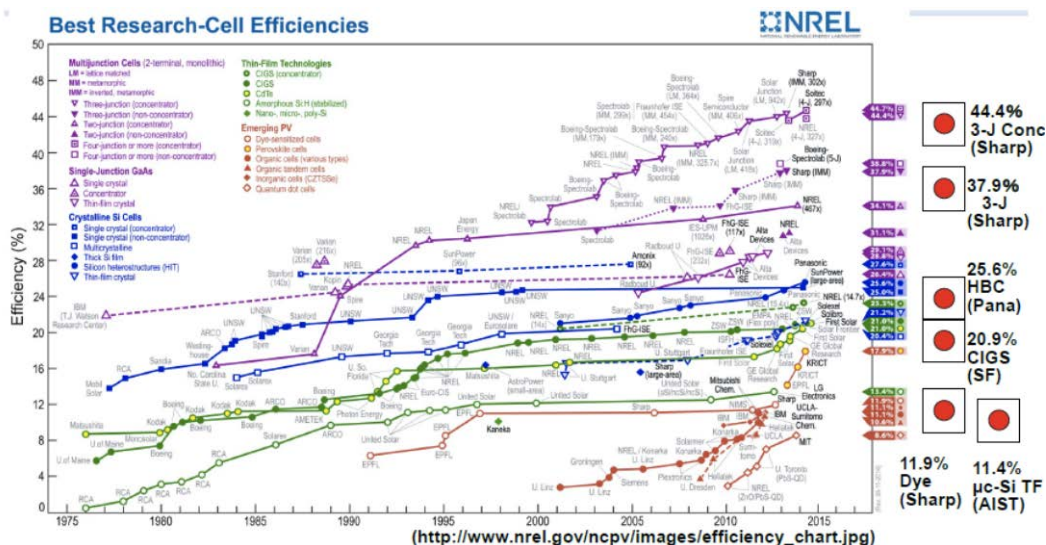


図 4 2 各種太陽電池の最高変換効率の変遷と日本の最近の貢献 (Mr. Y. Fujioka提供)

5. 感想 :

今回の会議は、前回より、参加者数が減ったとはいえ、相変わらず、太陽光発電に関する最大規模の会議となった。展示の方も、欧州市場の冷え込みを反映して、出展企業数は、減少した。

現在主流の結晶Si系は、本会議での発表論文件数が346件と多く、企業や大学、研究所による研究開発の裾野の広がり是他分野を圧倒しており、今後10年は結晶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の高性能次世代プロジェクトで、結晶Si太陽電池の研究開発のコンソシアムが進展して、優位な成果が出つつある。今後も、NEDOの後継プロジェクトを期待するし、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。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の創製の実現をしたいものである。

ここに来て、薄膜Si系の元気のなさも気にかかる。産学連携を強化し、結晶Si太陽電池に対して、性能、コスト、寿命等でも優れたものを開発することが求められている。

15年振りに、パナソニックおよびシャープが、結晶Si太陽電池の世界最高効率を更新し、その他の分野でも、高効率化が進展し、盛り上がった会議の印象であった。しかし、今後の太陽光発電の発展や市場拡大のためには、図 4 1 に示すように、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、図 4 2 に示すように、シャープのInGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルの集光下での効率44.4%、非集光下での効率37.9%、

パナソニックおよびシャープの結晶Si HBTセルの効率25.6%、25.1%、ソーラーフロンティアのCIGSセル、サブモジュールでの効率20.9%、17.8%、産総研の微結晶Si薄膜セルの効率11.4%、シャープの色素増感セルの11.9%、東芝の有機セルの11.2%、など、世界最高効率あるいは第二位を達成し、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。経産省（通産省）、NEDOが推進してきたPVに関する研究開発のお陰と言える。今後は、40th IEEE PVSCでのR. Swansonのプレーナリ講演に示されているように、GTM RESEARCHの“PV TECHNOLOGY AND COST OUTLOOK, 2013-2017”によれば、2017年までに、モジュールコストは、\$0.36/Wに下がると見ており、技術向上60%、他の消耗品22%、スケールアップ17%、ポリSi 1%と、技術向上の効果は大きいとみており、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。

2011年6月から、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米での集光型太陽光発電システムの重要性が再認識されており、わが国における超高効率太陽電池・材料、集光モジュールおよびシステムに関する研究開発の再強化の良い機会となろう。モジュールやシステムの信頼性やスマートグリッド、系統の安定化、プラグインハイブリッド等、システム研究開発の強化も必要であり、自動車応用や農業利用も期待でき、日欧共同研究開発と同様に、日米共同研究開発も期待したい。

有機・色素系は、性能や信頼性に課題が多く、基礎に打ちかえる必要がある。この分野も、オールジャパンでの展開を期待したい。

なお、プログラム委員長が閉会式で紹介した今会議のハイライトが、下記のホームページで入手できる。

http://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/28th/2_conference/EUPVSEC2013_high_lights_.pdf

次回の30th EU-PVSECは、PVSEC-24、41st IEEE PVSCの合同会議である「第6回太陽光発電世界会議」（WCPEC-6）として、2014年11月23日～27日、京都国際会議場で、開催予定である。また、42nd IEEE PVSCは、2015年6月14日～20日、New Orleansで、31st EU-PVSECは、2015年9月14日～18日、ドイツのハンブルグで、PVSEC-25は、2015年11月15日～20日、韓国の釜山で開催予定である。

（以上）