

第34回 IEEE 光起電力専門家会議 (34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2009. 6. 15

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日：2009年6月7日～12日。

2. 開催場所：Downtown Marriott Philadelphia (フィラデルフィア、米国)。

3. 本会議の概要：これまで1年半毎に開催されてきた米国主催の太陽光発電会議で、前回から、毎年開催されることとなった。今回の会議の組織委員長は Tim Anderson (フロリダ大) で、プログラム委員長は Robert Walters (Naval Research Lab.) であった。

今回は、IEEE と SEIA PV America Conference との共催で開催され、29 カ国から 1,348 名の参加者があった。太陽光発電に対する大きな関心と関連分野に参画する人々の増加も反映していると思われる。図1に、国別参加者数を示す。国別では、①米国 875 名、②ドイツ 70 名、③日本 49 名、④韓国 38 名、⑤カナダ 26 名、⑥スペイン 23 名、⑦台湾 22 名、⑧オランダ 20 名、⑨中国 13 名、⑩オーストラリア 11 名、⑪英国 11 名の順であった。

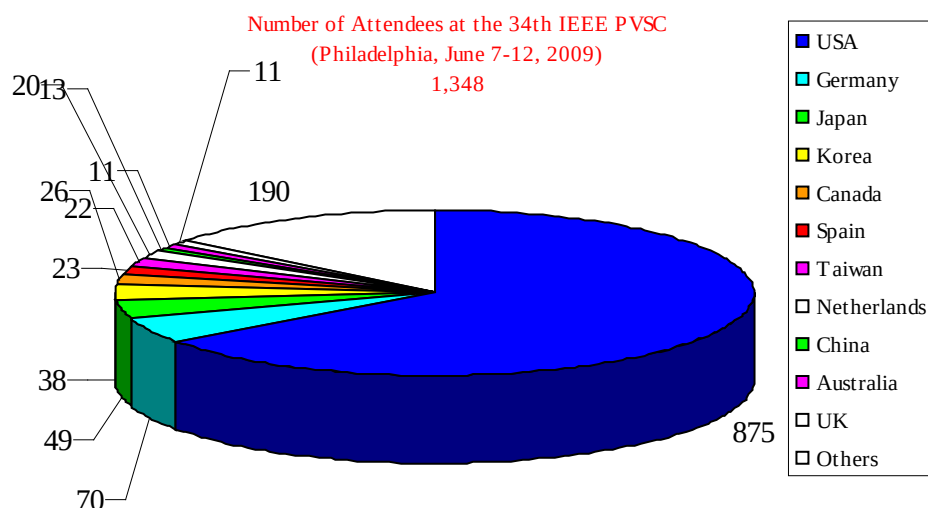


図1 国別参加者数

各国のPVロードマップ、産業界の招待講演が企画され、プログラム構成に関する運営側の努力の跡が現れていた。

図2は、国別発表論文件数を示す。665件の論文発表があった。国別では、①米国312件、②日本46件、③ドイツ42件、④台湾27件、⑤中国23件、⑥韓国20件、⑦インド19件、⑧オランダ19件、⑨スペイン18件、⑩英国16件の順であった。加えて、35件のLate News発表があった。

**Number of Papers to be presented
at the 34th IEEE-PVSC
(Philadelphia, USA, June 7-12, 2009):662**

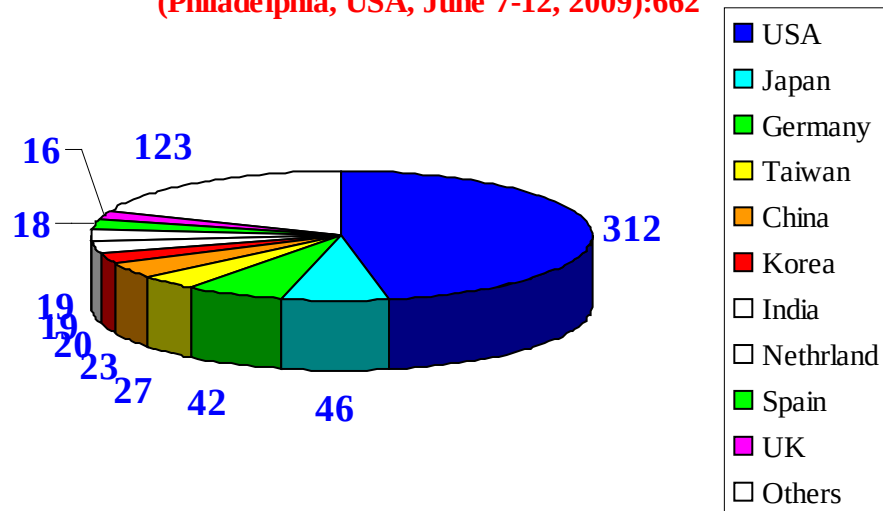


図 2 国別発表論文件数

**Number of Papers to be presented
at the 34th IEEE-PVSC
(Philadelphia, USA, June 7-12, 2009)**

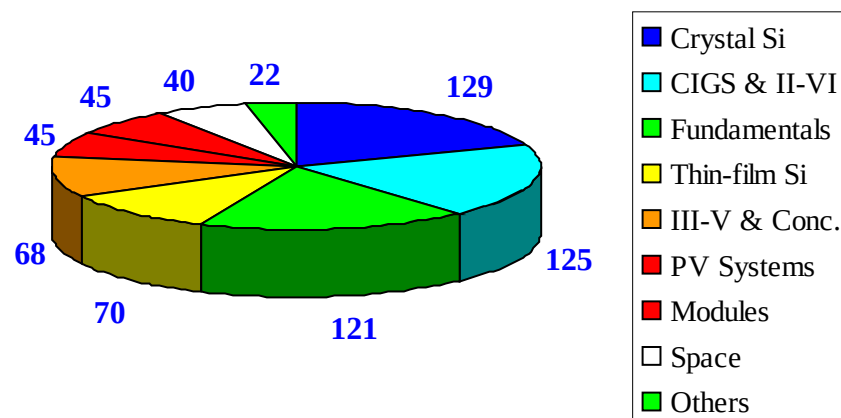


図 3 発表論文件数の分野別内訳

図 3 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128件、②CIGSおよびⅡ-VI族系125件、③基礎及び新材料121件、④薄膜Si系70件、⑤Ⅲ-V及び集光68件、⑥PVシステム45件、⑦モジュール45件、⑧宇宙用40件、⑨その他22件、の順であった。

この他、123社の展示があった。

4. ペンシルベニア州、フィラデルフィア市の取り組みおよび開会式基調講演の概要、

今回の会議は、IEEEとSEIA (Solar Energy Industries Association) との共催であるが、開会式をSEIA会長のR. Reschが仕切るなど、産業界の色彩の濃い会議の印象となった。米国の太陽光発電累積導入量は、2008年末、①ドイツ5.3GW、②スペイン3.2GW、③日本2.15GWに次いで、1.17GWである。州別では、①カリフォルニア州530MW、②ニュージャージー州70MW、③コロラド州36MW、④ネバダ州34MW、⑤アリゾナ州25MW、⑥ニューヨーク州22MW、⑦ハワイ州16MWの状況である。

(1) M. Nuttner (フィラデルフィア市長) は、本会議開催の歓迎の意を述べると共に、フィラデルフィア市の歴史、太陽光発電を含む代替エネルギーに関する取り組みの一端を述べた。

(2) E. Rendell (ペンシルベニア州知事) は、ペンシルベニア州の石炭、鉄鋼等の過去の産業の活況の歴史を述べると共に、次代の産業として、代替エネルギーに大きな期待を持っており、新たな産業創生のための太陽光発電に関する取り組みを紹介した。ペンシルベニア州では、これまで、4 MWの太陽光発電システムが導入されており、住宅用としては、12GWのスペースがあり、州の電力の10%を賄えることが期待できるとの事である。

(3) R. Resch (SEIA) は、米国の最近の太陽光発電の状況を紹介すると共に、今後の展望を述べた。米国は、2008年、太陽電池生産量414MW、生産容量685MWと、対前年比53%、65%の成長を見せている。また、オバマ大統領の“再生および雇用創出”政策方針の下、再生可能エネルギーの導入および研究開発の強化の方向性が述べられた。日射量で比較すると、スペインはアラバマ州、ドイツはアラスカ州に相当し、太陽光発電に関して、米国は大きな可能性を持っていると強調された。

(4) S. Baldwin (DOE) は、“Renewable Electricity Futures: Solar Opportunities and Challenges” と題して、基調講演を行った。オイル依存症とCO2排出の課題が述べられた。2030年までに、1990年比30%のCO2排出削減が要求されており、3000GWの太陽光発電導入が必要である。そのためには、太陽電池の効率、コスト、寿命、導入の広域性・迅速性、プラグイン・ハイブリッドなどの新たな市場創出、など多くの課題がある。集光式太陽光(熱)発電も大きな可能性を秘めている。材料問題も、考慮すべき課題である。表1には、太陽電池用希少元素の生産量と太陽電池生産量限界をまとめて示す。研究開発の重要性も述べられた。①材料／成長／評価解析／デバイス、②材料使用量の削減、③多接合構造、④第3世代太陽電池技術、などが重要であると述べた。

表1 太陽電池用希少元素の生産量と太陽電池生産量限界

材料	現行生産量 (Mt／年)	20GW／年生産時 必要量 (Mt／年)	現行生産量に 対する比率
In	250	400	160%
Se	2200	800	36%
Ga	150	70	47%
Te	450	930	207%
Cd	26000	800	3%

(5) J. Byrne (Univ. Delaware) は、“New Energy for New Weather”と題して、気候変動の観点から基調講演を行った。1990年に比べて、2050年までに、CO2排出を60%削減するシナリオがある。しかし、2000年に比べて、米国の電力消費は25%増加するなど、このままでは、2020年には、CO2排出は20%増加する可能性がある。クリーンエネルギーとして、太陽光発電に大きな期待を持っている。コスト低減と高性能化が必要である。コストについては、結晶Siで、23セント/kWh、薄膜で18セント/kWhだが、14セント/kWh以下にする必要があろう。CO2排出削減に向けた太陽光発電の寄与度が分析されている、21セント/kWhなら、CO2排出は、2055年に25%までに削減が達成されるが。11セント/kWhなら、CO2排出は、2025年に25%までに削減が達成されよう。28%モジュール効率なら、18セント/kWhでも、2045年に25%に、42%モジュール効率なら、15セント/kWhで、2035年に25%までにCO2排出削減が可能となろう。

(6) S. O’ Rourke (eutsche Bank) は、“Solar Photovoltaic Industry - Institute for Analysis of Solar Energy- 24 April 2009”と題して、PV産業のダイナミクス分析に関して基調講演を行った。結晶Si、CdTe、CIGSの現状コスト28セント/kWh、23セント/kWh、26.5セント/kWhから、2020年には、各々、13セント/kWh、11.5セント/kWh、11.5セント/kWhまで低減されよう。モジュールレベルでコスト低くても、システムレベルでは、差がなくなる。例えば、CdTeの\$5.5/Wモジュールでは、システムコスト16.5セント/kWhに対して、高効率モジュールなら、\$6/W、\$5/Wで、各々、14セント/kWh、11.5セント/kWhが可能で、高効率化も有効である。PV市場の成長に向け、図4に示すように、システムコストが、23.5セント/kWhから2020年に11セント/kWhに低減、投資も2008年の\$1,000Mから2020年の\$11,000Mに増加する必要がある。

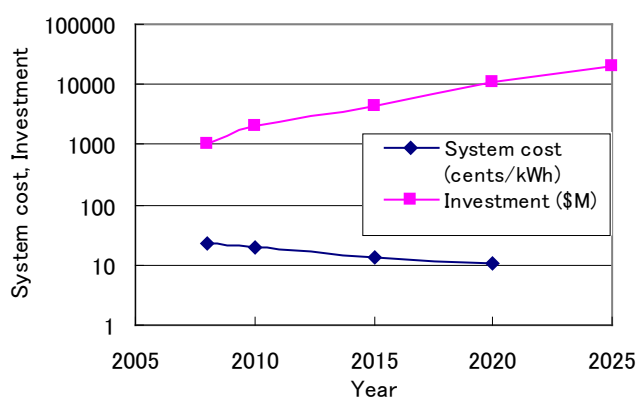


図4 PV市場拡大に向けたシステムコスト低減と投資増加の必要性

5. 本会議のトピックス

5.1 基礎、新材料・デバイス分野：

(1) F. Dirmroth ら (Fraunhofer ISE) は、“Metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cells with > 41 % efficiency”と題して、世界最高効率太陽電池について報告した。F. Dirmroth、A. Bett らの Fraunhofer ISE のグループは、つい最近、世界最高効率値を塗り替えた。図5に示すように、格子不整合 $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$ 接合構造太陽電池 (面積 0.0509cm^2) の454倍集光で41.1% (25°C、ISC=380.5mA、Voc=2867mV、FF=87.2%) を実現している。従来の格

子整合系に比べ、格子不整合系は、サブセルのバンドギャップ組み合わせの最適化が可能である。1.2%の格子不整合があり、不整合転位の発生が課題であった。格子不整合に伴う転位の問題も検討され、In 組成 17%/23%/17%の overshooting 層を含むステップグレーディッドバッファ層や GaInNAs バッファ層の導入による貫通転位の伝播が抑制され、太陽電池の活性層の低転位密度化 (10^6cm^{-2}) か高効率化につながっている。また、高倍集光用にトンネルダイオードも改善され、 $\text{p}^+\text{AlGaInP}/\text{p}^+\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ($2\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$, 20nm) / $\text{n}^+\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}$ ($>1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, 20nm) / $\text{n}^+\text{AlGaInP}$ 構造で、1,000 倍集光でも $\text{FF}>80\%$ のセルが実現している。

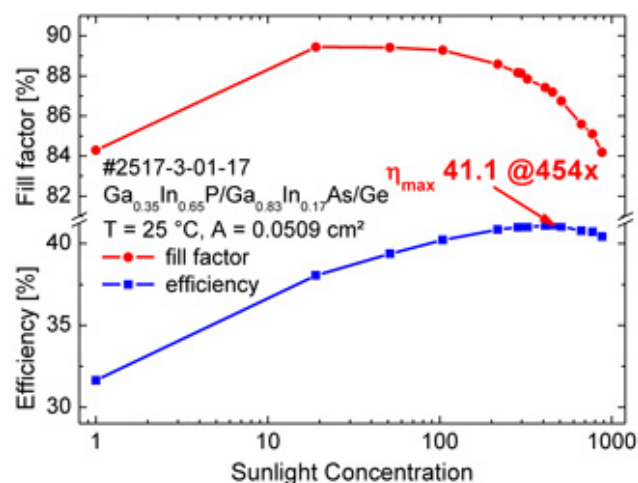


図5 世界最高効率値を更新したGaInP/GaInAs/Ge3接合太陽電池の写真と効率の集光倍率依存性

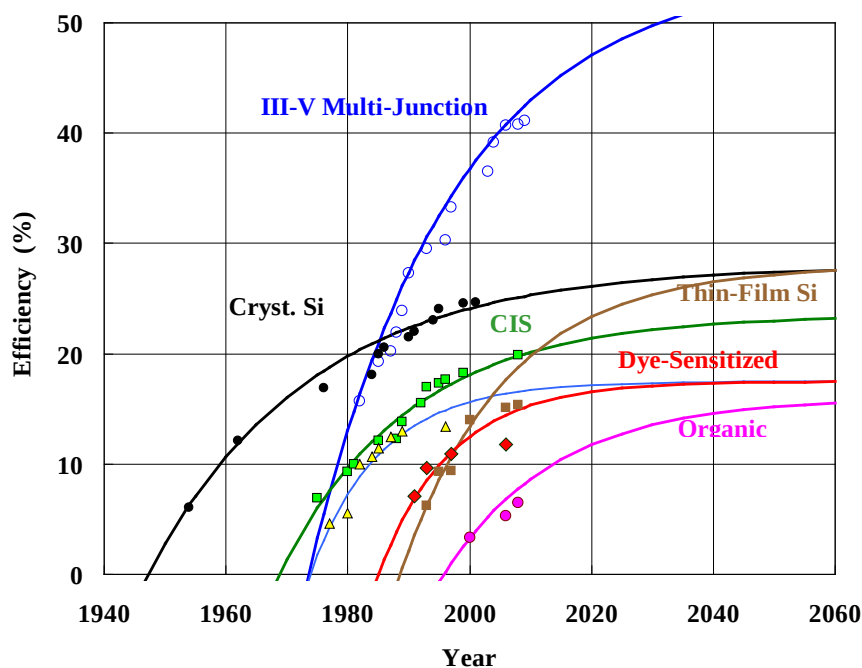


図6 各種太陽電池の変換効率の年次推移と効率向上の予想曲線

このように、当面は、図 6 に示すように、III-V 族化合物半導体を用いた集光型多接合太陽電池が、40～50%以上の超効率を実現できる唯一の解と考えられる。図 6 は、各種太陽電池の変換効率の年次推移と効率向上の予想曲線を示す。

(2) S. Forrest (Univ. Michigan) は、“Small Molecule Organic Solar Cells: Seeking High Efficiency Via Crystalline Order” と題して、招待講演を行った。有機太陽電池の効率は 6% レンジであり、課題は、励起子の拡散長が光吸収係数よりはるかに低いことにある。解決策として、バルクヘテロ接合の形成、拡散長を増加させるための結晶性の向上、がある。今回は、バルクヘテロ接合太陽電池について、厚い活性領域、高い励起子効率、高いキャリア収集効率の実現を目指して、有機結晶サイズと結晶配向性について検討してきた結果を報告する。Organic vapor phase deposition 法を用いて、C60 や CuPt の成膜を行っている。ソース温度、基板温度、キャリアガス流量等と結晶粒径、結晶性との相関が検討された。非晶質の拡散長 5.1～16.8nm から、結晶膜の 10.4～21.8nm へと改善がはかられている。拡散長が 6.5nm から 21.5nm へ増加すると、太陽電池効率は、約 2 倍になることが試算されている。C60(40nm)/(C60₃, 2nm+CuPt₃, 2nm) $\times$ n 層/CuPt(14.5nm) 構造の太陽電池が検討され、n=6 層で、効率 4.75% が得られている。また、液相成長による結晶粒径拡大の可能性が示された。光吸収係数、キャリア生成、拡散長、移動度、再結合およびキャリア収集を考慮したエネルギー変換効率のシミュレーションもなされている。結晶粒径増加による高効率化の可能性が示唆されてはいるが、課題は多い。

(3) A. Zunger (NREL) は、“Understanding the Physics of Carrier-multiplication and intermediate band solar cells based on nanostructures- What is going on?” と題して、招待講演を行った。量子ドット太陽電池の物理は複雑なのに、過大評価され、セールスマンになりさがある人達もいる。今回は、多重キャリア生成と中間バンド太陽電池などナノ構造の現原理について考察がなされている。これまで損失となっていた $h\nu - E_g$ ($h\nu$: 光子エネルギー) のエネルギーを何とか活用したというのが、ホットキャリアセルの考え方である。従来、紫外線領域では、衝突電離により、1 個のフォトンから 2 個の電子-正孔対が生成されることは知られていた。最近、米国ロスアラモス国立研究所では、PbSe や PbS ナノ結晶で、NREL では、シリコンナノ結晶中において、高エネルギーのフォトンを入射すると、複数の電子・正孔対を生成するマルチエキシトン効果を観測することに成功している。例えば、PbSe では、3eV の閾値で、9eV では 800% の増倍が観測されている。バルク結晶中では、高いエネルギー準位に励起された電子、正孔は、ピコ秒程度の短時間内に、キャリア散乱とフォノン放出を経てエネルギー緩和が生じる。ここで、量子ドット中では、キャリアが狭いナノ空間に閉じ込められる結果、フォノンとの相互作用が抑制され、ホットエレクトロン効果やマルチエキシトン効果を太陽電池の高効率化に利用することが期待される。講演では、フォノン緩和、Auger 再結合、表面再結合などに関する考察結果が報告された EDT を用いた layer-by-layer dipping 法により、ITO/PbSe-QDs/金属裏面電極構造太陽電池が作製され、効率 2.1% (Voc=241mV, Jsc=23.9mA/cm², FF=40.3%) が得られている。波長 1450nm に QD 起因のキャリア収集は見られているものの、可視域で量子効率 65% で、キャリア増倍効果は観測されていない。今後、電子、正孔の分離や高速で外部にいかに取り出すか、材料や太陽電池構造を含めて、基礎的研究が必要である。

5.2 CIGS、Ⅱ—Ⅵ化合物薄膜セル分野：

CdTe や CIGS 系の化合物薄膜セルは、アモルファス Si および微結晶 Si 薄膜セルと共に、低コストの薄膜太陽電池として期待されている。これらの材料は、真空蒸着やスパッタ法などで、わりと簡単に作製でき、多結晶薄膜でありながら、多結晶粒界が少数キャリアのキラーにはなっていないかったり、不活性化されていたりして、結晶粒径 $1\mu\text{m}$ でも高効率が可能である。NREL は、CIGS セルで 20.0% を達成している。図 7 は、これまで得られていた NREL による 0.42cm^2 の CIGS セルの効率 19.9% である。

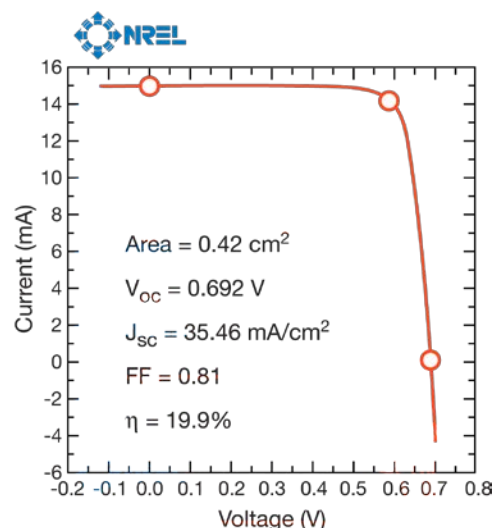


図7 これまで得られていた NREL による
 0.42cm^2 の CIGS セルの効率 19.9%

CIGS 太陽電池モジュールでは昭和シェルにより、 $30 \times 30\text{ cm}$ で効率 15.22% が得られている。CdTe 太陽電池では、NREL により 1.132cm^2 セルで効率 16.5% が得られている。 4874cm^2 モジュールで効率 10.9% の状況である。First Solar 社は、2003 年の生産能力 2MW から、2004 年 6MW (コスト \$ 2.94/W)、2005 年 21MW (コスト \$ 2.94/W) 2006 年 60MW (コスト \$ 1.4/W)、2007 年 207MW (\$ 1.25/W)、2008 年 420-460MW (\$ 1.08/W) への推移を報告している。また、Abound Solar (AVA Solar) は、200MW の CdTe 太陽電池の量産設備を設置し、商用化の段階にあるとの事である。

CIGS 系の課題は、①吸収層と装置の標準化、②モジュールの高効率化、③フレキシブルモジュールの湿気対策、④柱状構造と代替プロセス、⑤吸収層の薄層化 ($<1\mu\text{m}$)、⑥大面積化に向け、ストイキオメトリと均一化、などがある。CdTe 太陽電池の課題は、①吸収層と装置の標準化、②モジュールの高効率化、③裏面コンタクトの安定性、④吸収層の薄層化 ($<1\mu\text{m}$)、⑤大面積化に向け均一化、などがある。2009~2012 年の薄膜太陽電池の製造規模として、表 2 のようにまとめられている。アナウンスを総計すると、2012 年には、薄膜系で 9.9GW の生産規模となる。日本は、シャープ (a-Si)、カネカ (a-Si)、昭和シェル (CIS) が、各々 1GW をはじめ、計 3.3GW、米国は、UniSolar (a-Si) 1GW、Nanosolar (CIS) 430MW、First Solar (CdTe) 197MW はじめ、計 2.3GW である。欧州は、First Solar (CdTe) 198MW はじめ、計 1.29GW、他の地域は、Best Solar (a-Si) 1GW、First Solar (CdTe) 788MW はじめ、計 2.99GW である。最近の経済不況もあり、増産規模や時期に不確かさがある。また、In や Te など希少元素を用いている CIS や CdTe の生産量の限界に関する質問もあった。

表2 2009～2012年の薄膜太陽電池の製造規模

	Group	Material	Present (MW)	Additional (MW)	Total (MW)	Group	Material	Present (MW)	Additional (MW)	Total (MW)	Totals	Grand Total
USA	First Solar	CdTe	148	49	197	AVA Solar	CdTe	3	130	133	2306	
	Uni-Solar	a-Si	120	880	1000	Nano PV	a-Si	—	4	4		
	MiaSole	CIS	5	50	55	OptiSolar	a-Si	—	40	40		
	Global Solar	CIS	40	100	140	Primestar Solar	CdTe	—	50	50		
	EPV	a-Si	2	25	27	SoloPower	CIS	—	20	20		
	Daystar Technologies	CIS	1	25	26	ISET	CIS	—	3	3		
	Power Film	a-Si	1	10	11	Xunlight Solar	a-Si	—	3	3		
	Ascent Solar	CIS	2	25	27	Heliovolt	CIS	—	20	20		
	Signet Solar	a-Si	—	65	65	X Sun X	a-Si	—	25	25		
Nanosolar	CIS	—	430	430								
JAPAN	Kaneka	a-Si	70	1000	1070	MH1	a-Si	14	56	70	3312	
	Showa Shell	CIS	80	1000	1080	Kanto Sanyo	a-Si	7	—	7		
	Sharp	a-Si	165	850	1015	Honda	CIS	30	—	30		
	Fuji	a-Si	15	25	40							
EUROPE	First Solar	CdTe	198	—	198	Next Solar	a-Si	—	30	30	1294	9906
	CSG Solar	Thin-Si	10	15	25	AMI	a-Si	—	160	160		
	Wurth Solar	CIS	3	15	18	Johanna Solar Tech	CIS	—	30	30		
	Antec Solar	CdTe	10	—	10	Sontor	a-Si	—	60	60		
	Schott Solar	a-Si	3	27	30	Solisbro	CIS	30	90	120		
	ICP Solar Tech	a-Si	3	—	3	Global Solar	CIS	—	35	35		
	Solar Cells	a-Si	1	—	1	Helio Grid	a-Si	—	50	50		
	Free Energy	a-Si	1	—	1	SunFilm	a-Si	—	60	60		
	Solar Plus	a-Si	—	5	5	T. J. Solar	a-Si	—	40	40		
	Sulfur Cells	CIS	5	—	5	Signet Solar	a-Si	—	20	20		
	Aleo Solar	CIS	—	30	30	Clyxo	CdTe	—	60	60		
	Ersol	a-Si	—	40	40	Avancis	CIS	—	20	20		
	Inventux	a-Si	—	33	33	Odersun	CIS	—	30	30		
	Solarion	CIS	—	25	25	Scheuten Solar	CIS	—	10	10		
	Pramac	a-Si	—	30	30	EPV	a-Si	—	25	25		
	Grupo Uni Solar	a-Si	—	5	5	Avendi	CdTe	—	15	15		
	Masdar	a-Si	—	70	70							
REST OF WORLD	First Solar	CdTe	394	394	768	ENIV Solar	a-Si	—	60	60	2994	
	Bangkok Solar	a-Si	7	—	7	GET	a-Si	—	40	40		
	Sinonar	a-Si	15	35	50	Nanowin Tech	a-Si	—	35	35		
	T. J. Solar Cell	a-Si	2	—	2	Moser Baer	a-Si	—	20	20		
	Soltech	a-Si	15	—	15	Solar Morph	a-Si	—	20	20		
	Suntech Power	a-Si	—	50	50	Topray Solar	a-Si	20	—	20		
	Weihai BTP	a-Si	5	5	10	Sun Well Tech	a-Si	—	40	40		
	Nex Power	a-Si	—	50	50	Sunner Solar	a-Si	—	25	25		
	CSP	a-Si	—	50	50	Auria	a-Si	—	60	60		
	Aleo Solar	CIGS	—	50	50	HHV	a-Si	—	6	6		
	Sunvim	CIGS	—	30	30	Kenmos Solar	a-Si	—	5	5		
	BESA	a-Si	—	40	40	QS Solar	a-Si	—	25	25		
	CGSolar	a-Si	—	100	100	Formo Sun Tech	a-Si	—	15	15		
	Masdar	a-Si	—	140	140	Mosel Vitelic	a-Si	—	20	20		
	Best Solar	a-Si	—	1000	1000	ASP	CdTe	—	25	25		
	CSF Solar	a-Si	—	150	150	Baoding Tianwei	a-Si	—	46	46		

5.3 III—V族化合物セルおよび集光型太陽電池、モジュール分野：

最近、多くの企業が、III—Vベースの集光太陽光発電（CPV）システムの商用化を開始している。その主な理由として、次の点があげられる。

- ① III—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。
- ② PV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 現在のPV用シリコン原材料のshortageが、コスト的にも有効な代替PV技術への関心をもたらししていること。

(1) J. Lasichら (Solar Systems) は、“World’s first demonstration of a 140-kWp Heliostat Concentration PV (HCPV) system”と題して、同社の集光型太陽光発電（CPV）システムの開発状況を報告した。大型光学反射鏡を用いた商用CPVシステムに関して10年以上の経験があり、ここ7年間に、1.5MWの商用CPVシステム（47ユニットで、Siセルを用いたもの555kW、多接合セルを用いたもの945kW）を導入している。III-V族多接合セルを用いた140kWのHeliosta-CPVシステムの低コスト化に向け、①大型・低コストミラーの使用、②小型で高効率セルの使用、③MW当りの付属機器の削減、④クーリングシステムの最適化、などの改善をはかった。Spectrolab製の3接合セルを用いている。第一世代セル（2006年）50W/cm²で効率35.5%から、第二世代セル（2007年）で効率36.7%、第三世代セル（2008年）で効率37.4%へと、向上している。第二世代セルを用いて、システムが構築され、32.25m²

のシステムで、年間平均DC効率24.8%（平均AC効率22.5%）が達成されている。20m²の28heliostats（140kWシステム）で、光学効率84%で、DC効率24～26%を実現している。今後は、2013年の102MWのCPVパワーステーションの完成に向け、2010年にプロトタイプ、2011年の2MWパワーステーションの開発の計画である。集光型システムのコストは、平板型PVの1/10が可能であり、他のPV技術より低コストシステムを提供できる。

（2）F. Newman ら（EMCORE）は、“Optimization of Inverted Metamorphic Multijunction Solar Cells for Field-Deployed Concentrating PV Systems”と題して、高効率III-V族多接合集光型セルに関して報告した。ボトムGeセルを用いた格子整合3接合太陽電池（面積0.309cm²）は、300～350倍集光で効率39.2%で、理論限界効率に近づいている。Ge接合を1.0eVInGaAs接合で置き換えると、電流のロスなく、セル電圧を上げることで、効率向上が期待できる。先に、J. Geiszら（NREL）は、効率向上、多接合セル層の成長時の熱負荷軽減と格子不整合層を最終段にする狙いで、図8に示す逆構造を検討している。GaAs基板上に、有機金属気相堆積（MOCVD）法で、1.8eVGa_{0.5}In_{0.5}P/1.4eVGaAs/1.0eVIn_{0.3}Ga_{0.7}As 3接合セルが、逆構造でモノリシックに成長されている。格子不整合In_{0.3}Ga_{0.7}As接合は、最後に、Ga_xIn_{1-x}Pバッファ層上に成長されている。太陽電池構造を、操作治具にマウント後、GaAs基板は除去されている。最適化された1.0eVIn_{0.3}Ga_{0.7}As接合は、転位密度が10⁶cm⁻²オーダーの低いレベル、Voc値が0.54Vであった。3接合セルの効率は、1-sunのAM1.5G、AM0、81倍AMDにおいて、各々、33.8%、30.6%、38.9%であった。非集光の33.8%は、1997年に達成したジャパンエナジー、住友電工、豊田工大によるInGaP/GaAs/InGaAs3接合セルのこれまでの最高値33.3%を凌駕した。326倍集光で、40.8%の世界最高効率を達成している。

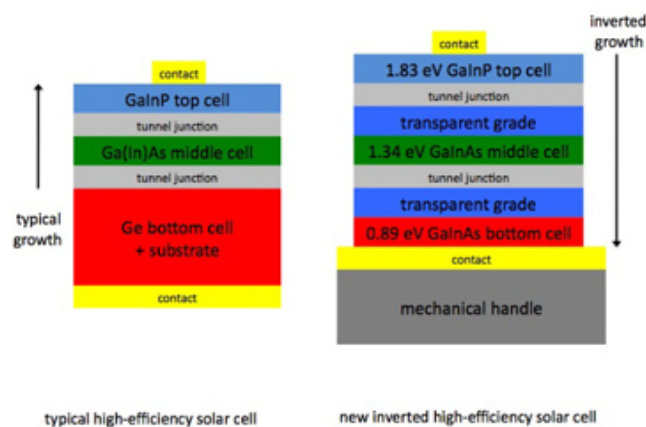


図8 通常構造と逆構造3接合セルの断面

今回、Emcoreも同様な逆エピ構造の格子不整合3接合セル（面積0.309cm²）を製作し、439倍集光で効率39.9%（Voc=3515V、Isc=1.79A、FF=85.9%）を得ている。520倍集光の3ヶ月動作や-40℃～+110℃の650回の熱サイクルでも、劣化なしとの事である。今後の改善点として、FFの改善、サブセルの電流整合、AR設計、プロセス改善、などがあるとしている。また、日射条件（AM）やセル温度の面から3接合、4接合サブセル構造の最適化に向けたモデリングの試みもなされた。

5.4 結晶Si太陽電池分野：

(1) Z. Shi ら (Suntech) は、“Mass Production of the Innovative PLUTO Solar Cell Technology” と題して、招待講演を行った。6 年前に、UNSW の PERL セルを Suntech は量産化を開始した。低コスト・高効率太陽電池の Pluto 技術として、PERL セルの 6～7 つの要素技術の見直しを行った。①FZ 結晶から CZ 結晶へ、②2 層 AR から 1 層 AR へ、③フォトリソグラフィ技術の置き換え、④熱酸化の見直し、⑤Ti/Pd/Ag コンタクトの置き換え、⑥2cmx2cm から 12.5cmx12.5cm へ、セルサイズの拡大、である。セル効率 19.1%を達成している。また、100 モジュール以上製作し、平均モジュール効率 18.3%(平均 $V_{oc}=45.4V$ 、 $I_{sc}=5.48A$ 、 $FF=78.38\%$)を実現している。直列抵抗や裏面再結合速度の改善により、効率 21%が可能である。スクリーン印刷ラインを立ち上げ、昨年半ばに 50MW、今年 5 月に、60MW、今年末には、300MW の生産規模に増強予定である。

(2) A. Das ら (Georgia Tech.) は、“20% Efficient Screen Printed Boron BSF Cells Using Spin-on Dielectric Passivation” と題して、コスト当たりの効率が高い結晶シリコン太陽電池の開発について、招待講演を行った。単結晶・多結晶を含む結晶系シリコン太陽電池のシェアは 85%を超えており、依然として太陽電池の主流である。また、結晶シリコン系太陽電池の価格を左右してきた原料ポリシリコンの供給不足が今後解消され価格が下がる見込みであることから(～30 \$/kg)、結晶シリコン太陽電池の発電コストも順調に下がると予想され、他の太陽電池に対する価格競争力が失われることはないとした。

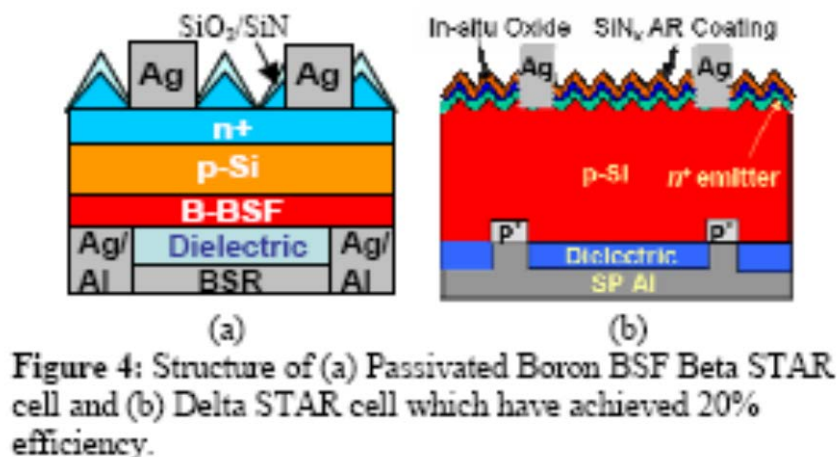


図9 Beta-STAR および Delta-STAR 構造

Rohatgi 教授のグループでは、スクリーン印刷とスピンコーティングを基本技術とし、費用対効果の高い技術を用いて結晶シリコン太陽電池を高効率化することを目指している。今回は、熱拡散による pn 接合とスクリーン印刷電極に加え、裏面に誘電体膜パッシベーションを適用することで 20%を超える効率を達成したことを報告した。セル構造は図 9 に示すように 2 種類あり、それぞれ Beta-STAR と Delta-STAR と名付けている。Beta-STAR 構造では、裏面に熱拡散によって B-BSF を形成し、熱酸化膜でパッシベーションした後 Ag のスクリーン印刷でポイントコンタクトを形成してある。Delta-STAR では、裏面をスピンコート形成した誘電体膜でパッシベートし、Al のスクリーン印刷と焼成によってローカル BSR 構造を実現している。

これまで、FZ 成長 p 型 Si ($1.3 \Omega\text{cm}$) の Al-BSF セル (4cm^2) で、効率 18.9% ($V_{oc}=640\text{mV}$ 、 $J_{sc}=37.7\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{FF}=78.3\%$) を得ているが、表面再結合速度 (FSRV) $15,000\text{cm}/\text{s}$ を半減、裏面再結合速度 (BSRV) $600\text{cm}/\text{s}$ を半減、裏面反射率 (BSR) 65% を 95% にできれば、各々、効率 0.4%、0.2%、0.4% の向上が期待できる。例えば、BSRV= $650\text{cm}/\text{s}$ と BSR=65% のセルと、BSRV= $200\text{cm}/\text{s}$ と BSR=95% のセルについて、PC1D で試算したセル効率の比較を図 10 に示す。

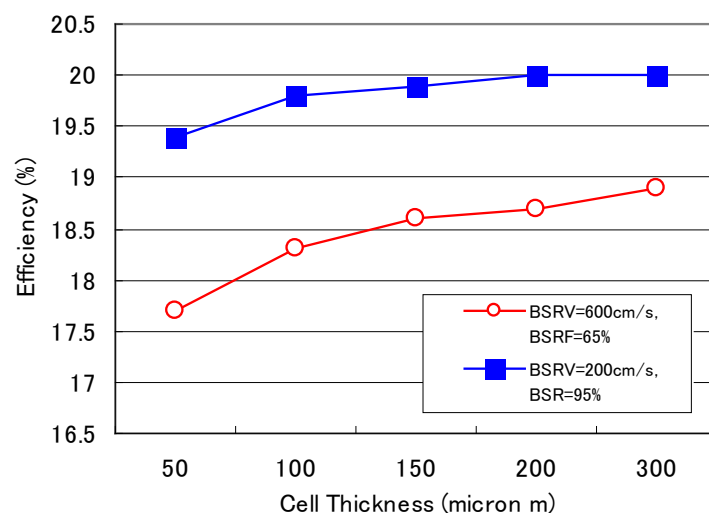


図 10 BSRV= $650\text{cm}/\text{s}$ と BSR=65% のセルと BSRV= $200\text{cm}/\text{s}$ と BSR=95% のセルの効率比較

得られた特性を表 3 に示す。

表 3 Beta-STAR および Delta-STAR 太陽電池の特性 (面積 3.8cm^2)

	Wafer	Thickness	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	Efficiency
Beta-STAR	FZ, $1.3 \Omega\text{cm}$	$290 \mu\text{m}$	647	39.2	78.6 %	20%*
Delta-STAR	FZ, $2.35 \Omega\text{cm}$	$290 \mu\text{m}$	652	39.4	78.1 %	20.1%

*Independently confirmed by NREL.

5.5 アモルファス、ナノ／マイクロ結晶薄膜Si太陽電池分野：

表 4 に、Si 薄膜太陽電池の変換効率の現状を示す。UniSolar による a-Si/a-SiGe/nc-Si の 3 接合セル (0.25cm^2) で初期効率 15.4%、安定化効率 13.3%、大面積モジュールでは、カネカによる a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ の 3 接合モジュール (4141cm^2) で効率 13.5% の現状である。

表 4 Si薄膜太陽電池の変換効率の現状

Structure	$\eta(\%)$	Area(cm ²)	Remarks
triple cell	15.0	1	initial, Kaneka
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	14.6	0.25	initial, Uni-Solar
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	13.0	0.25	stable, Uni-Solar
a-Si/a-SiGe/nc-Si	15.39	0.25	initial, Uni-Solar
a-Si/a-SiGe/nc-Si	13.31	0.25	stable, Uni-Solar
a-Si/μc-Si	14.7	1	Kaneka
a-Si/μc-Si	13.5	4141	Kaneka
a-Si/μc-Si	13.4	3827	Kaneka (measured by AIST)
a-Si/μc-Si	13.4	4141	Kaneka, Si HYBRID PLUS μc-Si: single chamber

NEDOの革新的太陽光発電技術研究開発プログラムでは、2010年度末までに、低倍集光で効率20%の実現を目指す。2014年度末までには、メカニカルスタック構造の5、6接合薄膜太陽電池の低倍集光で、効率30%を目指すとして述べた。図1-1に、研究対象の薄膜5接合太陽電池を示す。2.2eV (1.3V、a-SiO₂、a-SiC) /1.7eV (1V、a-Si) /1.4eV (0.9V、a-SiGe、CdTe、CIGS、Siナノ) /1.1eV (0.6V、 μ c-Si、CIGS) /0.8eV (0.2V、Ge)の5接合セルの5接合薄膜セルを考えている。プラズモン効果も研究対象で、バンドエン

지니어リング、薄膜集光、光マネジメントなどが主要研究テーマである。

Eg=2.2 eV, Voc=1.3V (a-SiO₂, a-SiC)
Eg=1.7 eV, Voc=1.0V (a-Si)
Eg=1.4 eV, Voc=0.9V (a-SiGe, CdTe, CIGS, Si nano dots)
Eg=1.1 eV, Voc=0.6V (μc-Si, CIGS)
Eg=0.6 eV, Voc=0.2V (Ge)

図1-1 研究対象の薄膜5接合太陽電池の構造

今後、高効率化のためには、①テクスチャ構造、Ag/ZnO裏面反射、②a-SiGeの改善、③ナノ結晶Siの開発（水素希釈プロファイル制御による粒径、欠陥密度制御）、④光劣化の低減、低コスト化のためには、高周波堆積による高堆積速度、などの研究開発が必要である。UniSolarは、図1-2に示すように、a-Si/a-SiGe/nc-Siの3接合セル（0.25cm²）で初期効率15.4%を実現している。また、フレキブル太陽電池も開発している。同社の生産規模も、2000年度の2MWから、2007年度32.5MW、2008年度73.6MW、2009年度145-150MWへと推移しつつある。需要から見ると、2007年度58MW、2008年度118MW、2009年度238W、2010年度300MW、2011年度600MW、2012年度1000MWの生産が必要である。コストも、2007年度の\$2.63/Wから、2008年度の\$2.03/W、さらには、材料、歩留まり、効率の改善により、2012年度\$1.1/Wを予想している。

2007年の太陽電池モジュール出荷3.1GWの11%が薄膜系である。薄膜系のうち、First Solarが54.7%、UniSolarが14.1%、カネカが10.3%を占める。図1-3は、生産増強のアナウンスをもとに予測した薄膜太陽電池系の生産規模を示す。2012年の生産規模として、a-Si系5GW、CIGS系3.2GW、CdTe1.2GWのアナウンスがある。

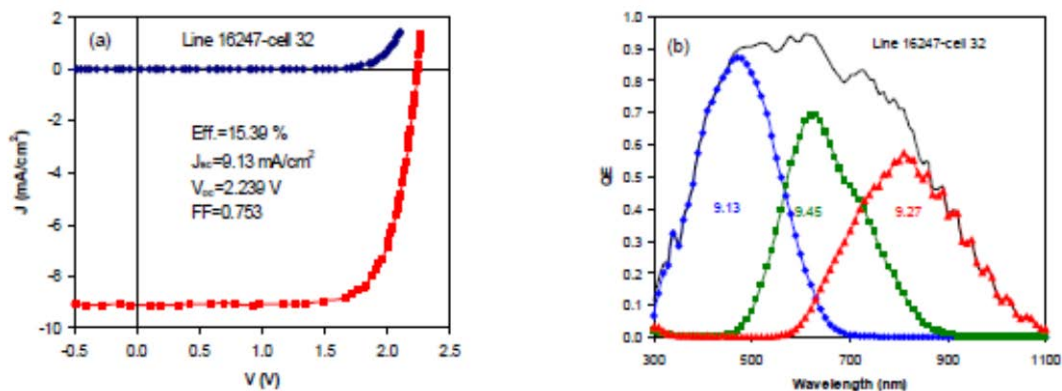


図 1 2 a-Si/a-SiGe/nc-Si₃接合セル (0.25cm²) で初期効率15.4%

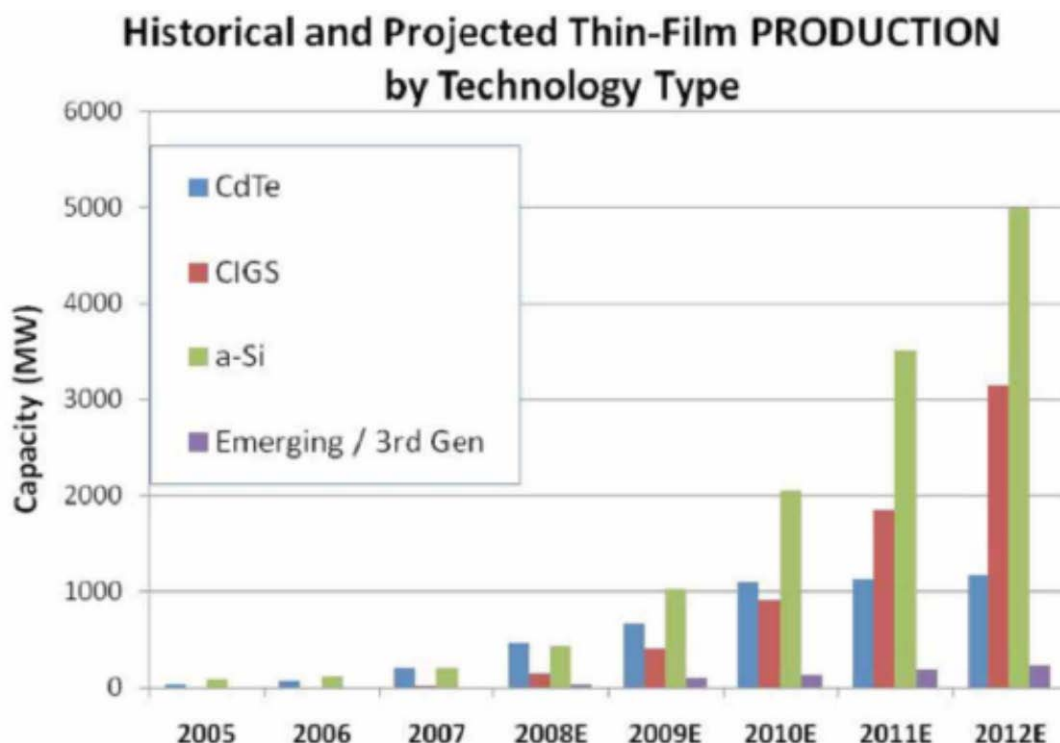


図 1 3、生産増強のアナウンスをもとに予測した薄膜太陽電池系の生産規模

5.6 宇宙用太陽電池分野：

(1) R. Raffaele (Rochester Inst. Tech.)、S. Bailey¹ (NASA)らは、“The Future of Space Photovoltaics”と題して、招待講演を行った。宇宙用太陽電池の変換効率も1958年の7%から今日のAM0効率30%がSpectrolab、Emcore、Sharpなどで実現されている。今後は、50%を目指して研究開発が進められよう。研究開発の主要テーマは、①格子不整合成長、②逆エピ格子不整合成長、③4、5接合、④希釈ナイトライドデバイス、⑤メカニカルスタッキング、⑥光学的分離法、⑦集光設計、⑧量子閉じ込め、などである。逆エピ格子不整合成長とELO (エピタキシャル・リフトオフ) 3接合セルにより、1-sun AM0効率33%が得られており、ベアセルで重量比出力3,000W/kg、面積比出力>440W/m²に相当する。EMCOREの4

接合セルで、AM0最高効率33.9% (V_{oc} 3255mV、 J_{sc} 16.91mA/cm²、FF83.3%) が達成されている。低コスト化やフレキブル化を狙った多結晶Ge上のGaAsセルやCdS/CIGSセルの試みも紹介された。中間バンド構造太陽電池の効率計算も見直され、表2の結果が報告された。

表5 中間バンド構造太陽電池の理論効率

太陽スペクトル	理論効率 (%)	母体バンドギャップ (eV)	中間バンドギャップ (eV)
Black Boy	46.7	1.49	0.92
AM0	45.8	1.38	0.85
AM1.5G	49.4	1.5	0.93
	48.6	1.36	0.75

量子ドット (QD) 構造作製の試みも紹介され、図3に示すように、GD層を積層することにより、短絡電流密度の向上は可能であるが、開放端電圧の低下が課題である。

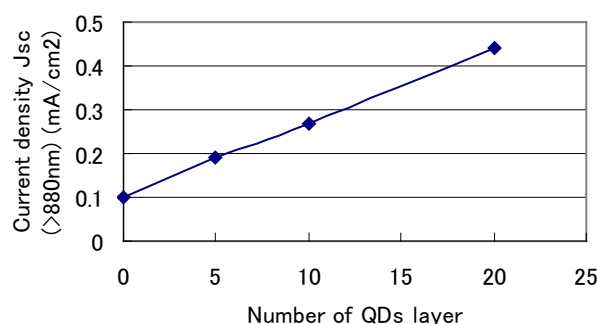


図1-4 GD層の層数増加によると短絡電流密度の向上

(2) C. Signoriniら (ESA) は、“ESA Future Missions: Challenges for the Power Generators”と題して、招待講演を行った。太陽や惑星を含む太陽系に関する宇宙探査や基礎科学研究の面から種々の挑戦的ミッション計画が検討されている。多くは、ESA、NASA、JAXAの共同研究開発に基づくものである。Near Sun Missionや水星、金星探査衛星では、高光強度でかつ太陽電池の表面温度が高温（水星、金星探査衛星で、各々、240℃、170℃）になることが予想される。太陽電池特性上、太陽電池アレイ温度を157℃以下にする必要がある。太陽電池やカバーガラスの改善がなされている。一方、木星、土星探査衛星では、低光強度でかつ低温度（木星、土星探査衛星で、各々、-135℃、-170℃）になることが予想される。一般的には、低温度では、太陽電池効率は増加するが、-80℃で、FFの低下が観測される。

(3) D. Wilt1ら (AFRL) は、“Technology Opportunities to Enable High Mass Specific Power”と題して、招待講演を行った。高効率かつ軽量の太陽電池開発を進めている。逆エピ格子不整合系3接合セルで、AM0効率32.0% (V_{oc} =3.061V、 J_{sc} =16.6mA/cm²、FF=85.7%) が得られている。1MeV電子線10¹⁵cm⁻²照射時の出力保存率も0.85から0.88に改善され、重量比出力も210W/kgから350W/kgに改善されている。しかし、重量に占めるハネカム基板とカバーガラスの比重が高く（基板55%→70%、カバーガラス11%→15%、セル24%

→2%、その他10%→13%)、これらの軽量化が課題である。4mil厚カバーガラス／5mil接着剤／0.4mil (11 μ m) 厚セル／0.2milブランケット／5mil接着剤／2milカプトンの構造で、軽量化が検討された。カバーガラスの密度にもよる(放射線耐性に影響する)が、LEO軌道、MEO軌道、GEO軌道で、各々、2倍以上、2倍、30%の重量比出力の改善がはかられているが、HEO軌道では、効果がほとんどない。

5.7 市場および政策分野：

黒川(東工大)は、”Accelerated and extended Japanese PV technology roadmap “PV2030+”と題して、招待講演を行った。原油価格の高騰や地球環境問題を背景に、太陽光発電など、クリーンエネルギーへの期待が高まっている。福田前首相が、洞爺湖サミットで述べた「Cool Earth50」に関連して、21の革新的技術開発計画が策定された。その一つが、革新的太陽光発電技術研究開発プロジェクトである。また、2030PVロードマップ改訂版の概要が報告された。今後の太陽光発電システムの技術開発の方向性を図15に示す。図16には、PV2030+ロードマップの技術シマリオを示す。今後の太陽光発電の重要な方向性として、PVセル・モジュール技術開発、電池やパワーエレクトロニクス技術、系統安定化技術、地域レベルのシナリオ(蓄電)や地域レベルの系統連携(マイクログリッド)、集光などの大規模太陽光発電(VLSPV)やインフラ整備、などが示された。これらの実現のためには、引き続き、研究開発が必要である。図17には、経産省、NEDO主導の日本における太陽光発電システムの技術開発計画を示す。

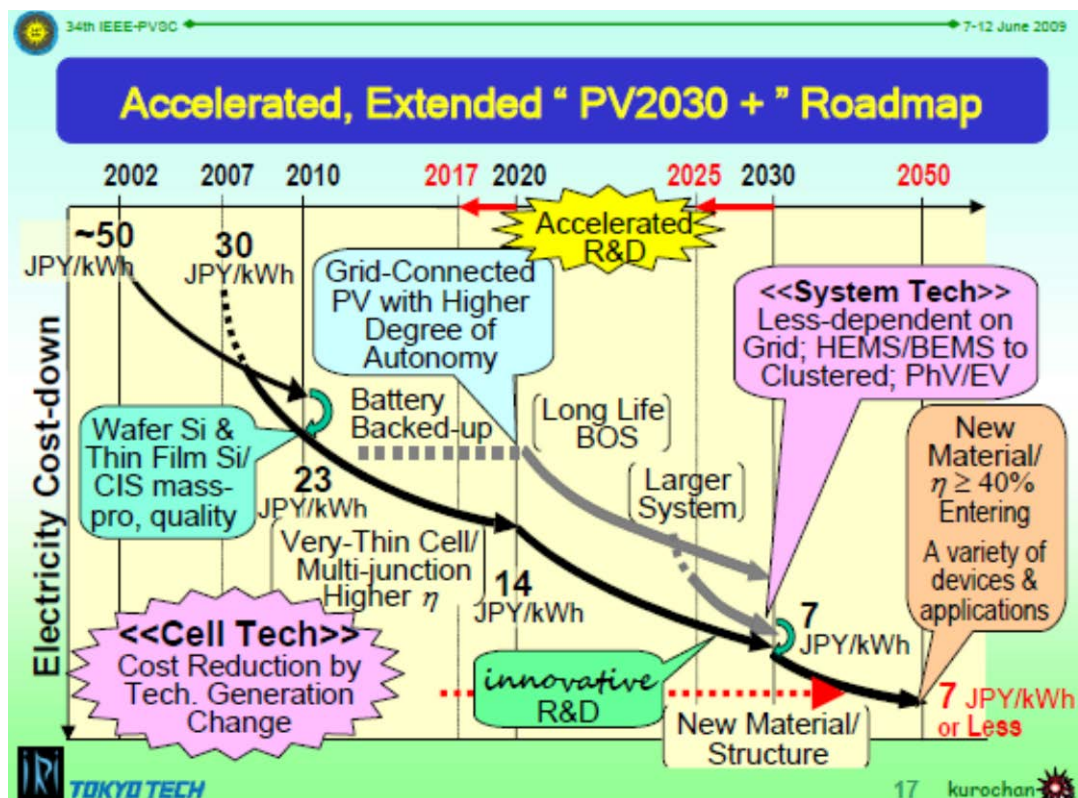


図15 今後の太陽光発電システムの技術開発の方向性

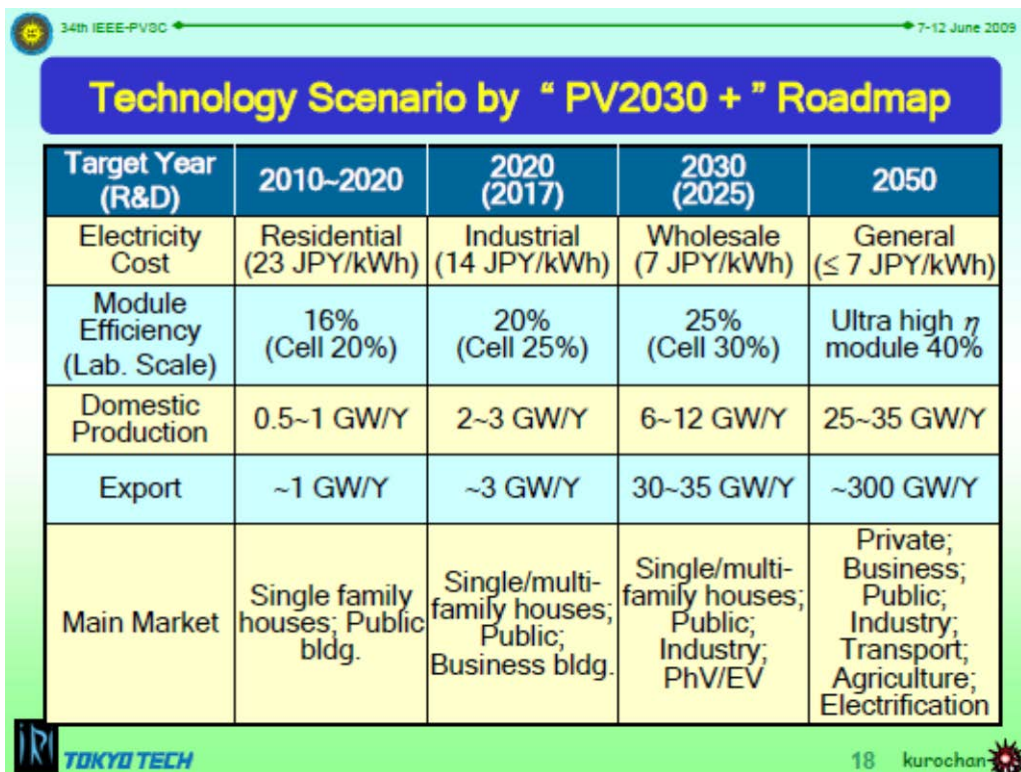


図 1 6 PV2030+ロードマップの技術シマリオ

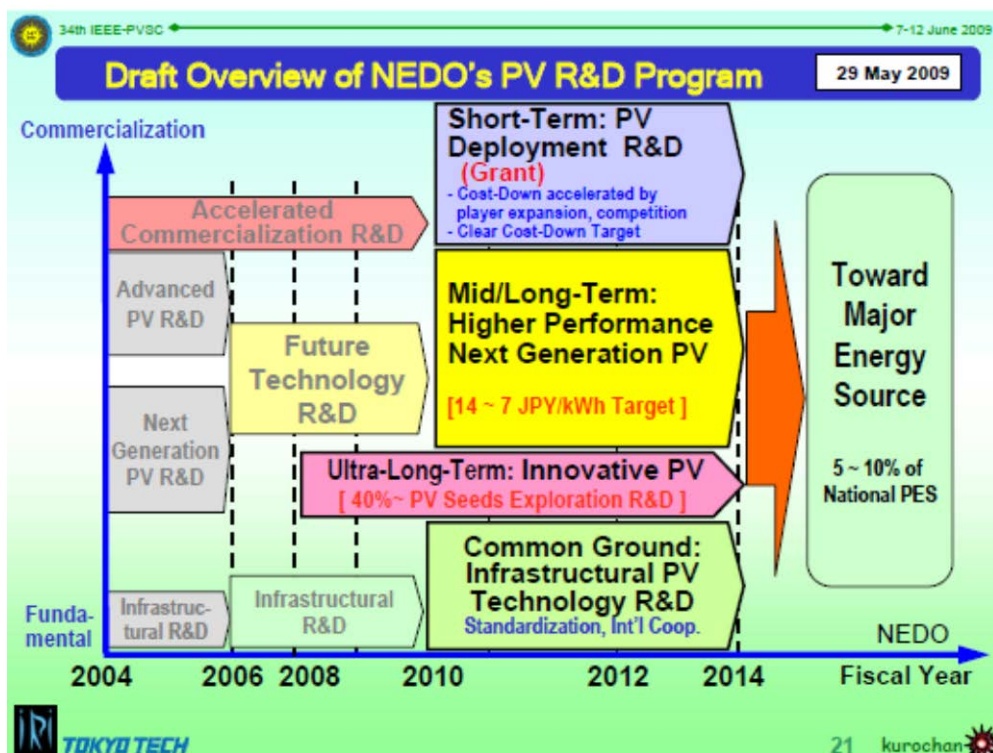


図 1 7 経産省、NEDO主導の日本における太陽光発電システムの技術開発計画

各国が、太陽光発電お研究開発を強化すること絵、図 1 8 に示すように、全世界レベルで、2030年に120GW／年（年17.5兆円市場）、積算800GW、2050年に1070GW／年（年106兆円市場）、積算10TW、2075年に4,26TW／年（年365兆円市場）、積算75TW、2100年に4.56TW／

年（年375兆円市場）、積算133TWを予想し、ドイツのAdvisor Committee on Global Changeがまとめた「世界のエネルギービジョン21000」を達成できるとしている。

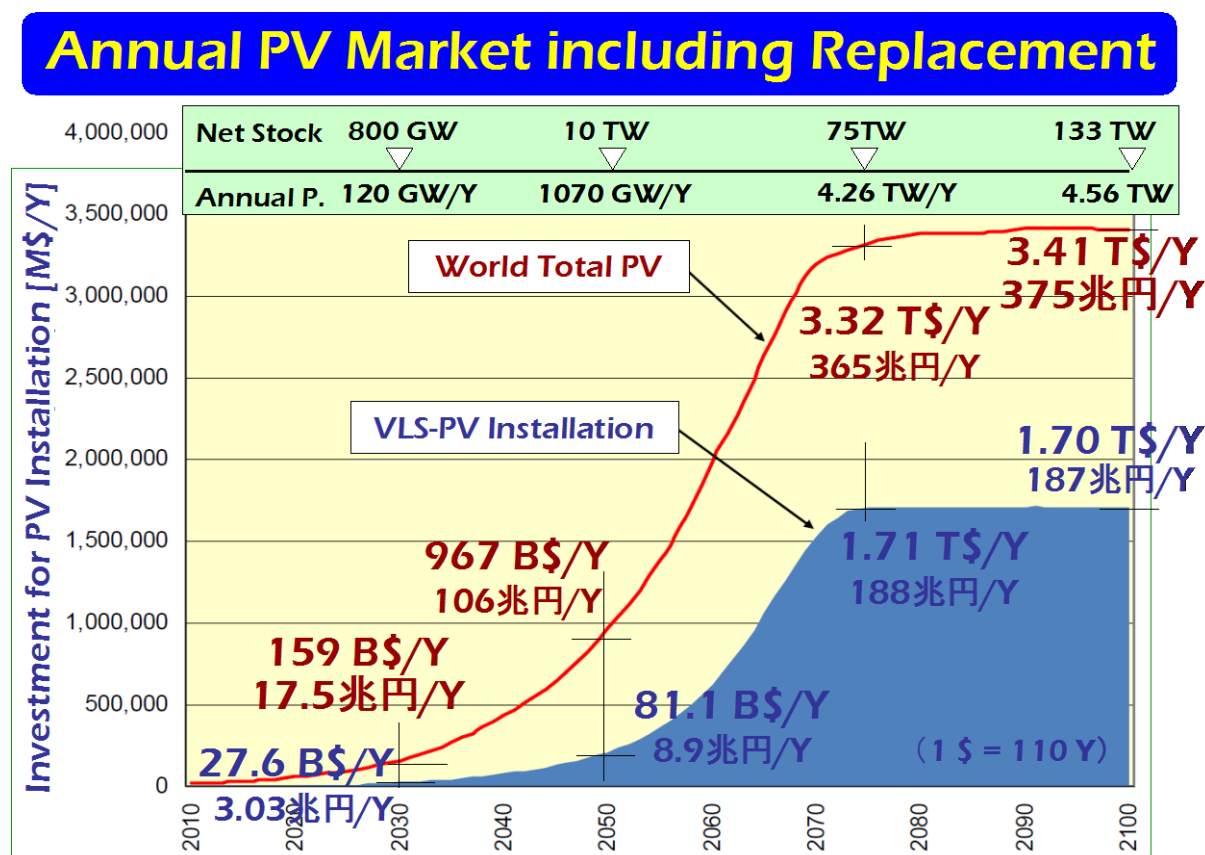


Fig. 13.4-2 Annual PV market (including replacement) [million USD/Y]
Source: IEA PVPS Task 8 3rd Report: Energy from the Desert

図 1 8 太陽光発電市場成長予測

6. 感想

結晶Si太陽電池では、欧州で産学連携が進んでいる。確かに、わが国は、結晶Si太陽電池生産量において、世界一だったが、中国、ドイツ、に追い抜かれ、台湾、韓国が追い上げている。これは、わが国における結晶Si太陽電池の研究開発者人口およびレベルが十分とは言えないことに起因しているだろう。半導体LSI凋落の二の舞を踏まないためにも、わが国における研究開発の強化と産学連携が必要である。

超高効率太陽電池や集光型太陽電池分野でも、EC主導のFULLSPECTRUMプロジェクトに加え、米国のHiPerf PVプロジェクトがある。ここに来て、集光式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必要性を痛感した。

前回から、IEEE PVSCは、毎年開催されることとなった。今回、SEIAとの共催であったが、SEIAの協力や関係が不十分であったことから、次回の35th IEEE PVSCは、SEIA PV America Conferenceとの共催はやめて、IEEE単独主催で、2010年春に、ハワイもしくは米国西海岸で開催予定である。次々回の36th IEEE PVSCは、欧州ホストで、2010年秋に開催予定のWCPEC-5の合同会議の予定である。