

# 第4回太陽光発電世界会議 (4<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion) 報告

2006.5.30

山口 真史 (豊田工大)

1. 開催月日：2006年5月7日～12日。

2. 開催場所：Hilton Waikoloa Village (ワイコロア、ハワイ、米国)。

3. 本会議の概要：4年毎に開催される太陽光発電に関する世界会議で、今回は、米国がホストで、32<sup>nd</sup> IEEE PVSC、EU-PVSECとPVSEC-16の合同会議である。今回の会議の組織委員長はSheila Baiey(NASA、米国)で、副委員長はHeinz Ossenbrink (EC-JRC、イタリア)とMakoto Konagai (東工大、日本)、論文委員長はTim Coutts(NREL、米国)で、副委員長はEwan Dunlop (EC-JRC、イタリア)とHiroaki Okamoto (阪大、日本)であった。

35カ国から983名(一般858名、学生125名)の参加者があった。加えて、展示関係者362名の参加であった。米国のIEEE PVSCに比べると、5割増しの参加者(前回の31st IEEE PVSCの641名に対して983名)があり、世界会議開催の意義は大きい。また、太陽光発電に対する大きな関心と関連分野に参画する人々の増加も反映していると思われる。図1に、国別参加者数を示す。国別では、米国約440名(45%)、日本約155名(16%)、ドイツ約120名(11%)、以下、韓国、オーストラリア、スペイン、台湾からの参加者が多いようだった。

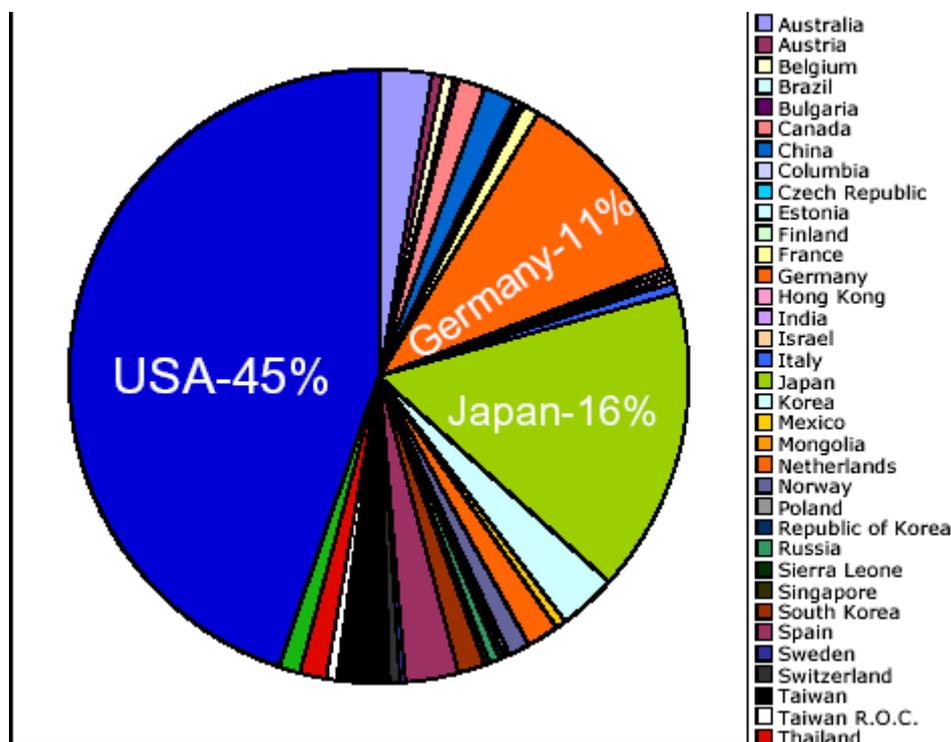


図1 国別参加者数

各国のPVロードマップ、産業界の招待講演やワークショップが企画され、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。

**Number of Papers presented at the WCPEC-4  
(Hawaii, USA; May 7-12, 2006)  
749 Papers**

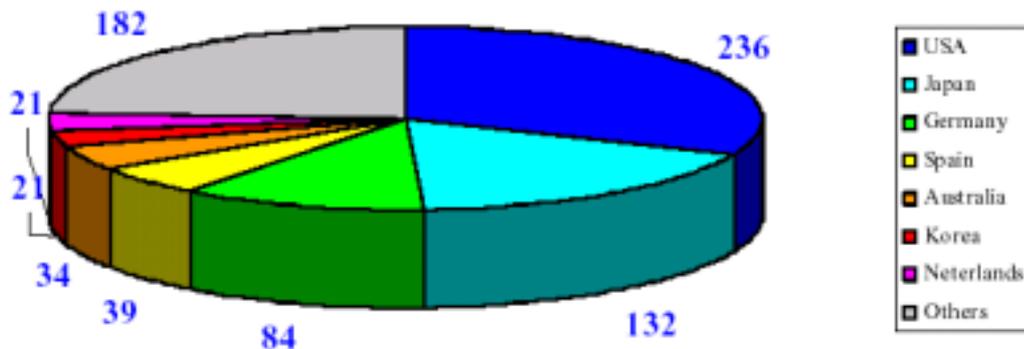


図2 国別発表論文数

図2は、国別発表論文数を示す。749件の論文発表があった。国別では、米国236件、日本132件、ドイツ84件、スペイン39件、オーストラリア34件、韓国21、オランダ21件の順であった。

**Number of Papers presented at the WCPEC-4  
(Hawaii, USA; May 7-12, 2006)  
749 Papers**

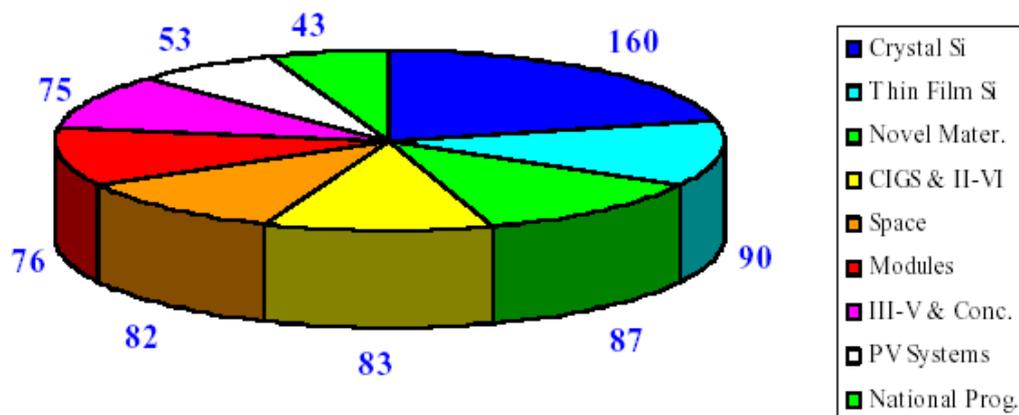


図3 発表論文数の分野別内訳

図3は、発表論文数の分野別内訳を示す。分野別では、結晶Si系160件、薄膜Si系90件、基礎および新材料87件、CIGSおよびII-VI族系83件、宇宙82件、モジュール76件、III-Vおよび集光75件。PVシステム53件、国家プログラム等43件、の順であった。

この他、17カ国から74社の展示があった。



ネバダ州を含む米国、メキシコ、スペイン、南ヨーロッパ、北アフリカ、南オーストラリアはCPVに適していよう。結晶Si系は、欧州、中国、日本向きであり、薄膜系は、東南アジア、北オーストラリアが適していると考えられ、すみ分けが進むのではないかと述べた。



図6 PVシステムの今後のイメージ



図7 領域別最適PVシステムに関する示唆

(7) W. Hoffman (RWE) は、PVの歴史を振り返り、2020年までは市場形成期、2020年以降主要市場が確立されるだろうと述べた。2005年のPV市場は1.4GWで、日本280MW、ドイツ620MW、米国80MW、その他400MWであることから見ても、政策の果たす役割は大きい。現在の市場形成期においては、政策や公的支援が必要、まず国内生産のための国内市場の開発が必要、また輸出政策も企業全体にインパクトを与える、さらには、存在する市場の成長と新たな市場の創製をはかるための道すじの確立が必要、などの持論を述べた。最後に、「Si feed stock問題も2~3年以内に解決されるだろう。今後20~30年、いや永久に結晶Si系がPVのメインとなり続けよう。富田さん、湯川さんも同感でしょう」と締めくくった。

(8) 湯川 (京セラ) は、環境問題の視点からPVの重要性を述べた。現在は世界のエネルギー消費の1~2%に過ぎない中国、インド、ロシア、ブラジル等が、将来、10%以上のエネルギー消費が予想される。化石燃料消費に伴う様々な環境問題の深刻さがさらに進むことが予想される今日、化石燃料は大事に使うべきだろう。“もったいない”。今後も、PVに関する研究開発を強化して、PVをできるだけ早くメインのエネルギーにしたい。“人類のために太陽神に感謝したい。何と素晴らしい仕事だ！”と抱負を語った。

## 5. 本会議のトピックス

プログラム委員会のまとめた本会議のハイライトを交えて、本会議のトピックスの概要を述べる。

### 5.1 新材料・デバイス分野：

色素増感型太陽電池では、シャープから10cmx10cmモジュール効率6.3%、Fraunhoferから30cmx30cmモジュール効率2.7%の発表があり、注目された。

有機太陽電池では、UCSCから高分子ハイブリッドの定性的モデル化の発表があり、Eikos社から有機セルの透明電極としてカーボン・ナノチューブを用い、効率2.61%の発表があった。

量子井戸および量子ドット関係では、NRELから量子ドットにおける多重励起子生成に関する発表、Imperial Collegeからは量子井戸構造におけるVoc改善と効率27%の発表があった。

アップおよびダウンコンバージョン関係では、UNSWからEr<sup>3+</sup>蛍光体によるアップコンバージョン、ANUからルミネッセンスによるダウンコンバージョン、Stuttgart大から光学結晶によるバンドフィルターの発表があった。

## 5.2 CIGS、族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たり、不活性化されていたりして、結晶粒径 1 μm でも高効率が期待できる。

研究室段階では、CIGS 系で 19.5% (面積 0.41 cm<sup>2</sup>)、CdTe で 16.5% (面積 1 cm<sup>2</sup>) が得られ、薄膜太陽電池としては高効率を実現している。大面積モジュールでは、それぞれ、13.6% (3,600 cm<sup>2</sup>)、12.5% (5,932 cm<sup>2</sup>) が得られている。CdTe セルは、1991 年頃から製品化されて、住宅用大面積モジュールも試作されている。表 1 に示すように、米国 First Solar 社が 2007 年には 75MW の生産へ増産する計画である。小規模ながら、CIGS 系太陽電池も製品化が開始されている。ドイツ Wuerth Solar 社は、2007 年に年産 15MW の計画である。わが国でも、昭和シェル石油、ホンダ両社が、各々、2007 年頃から、20MW、27.5MW の量産を開始するとのアナウンスもある。

表 1 化合物薄膜系モジュールの量産計画(MW)

Company	Cell	2003	2004	2005	2006	2007
First Solar	CdTe	2	6	20	40	75
Wuerth Solar	CIGS		1	1.5		15
Showa Shell Sekiyu	CIGS					20
Honda	CIGS					27.5

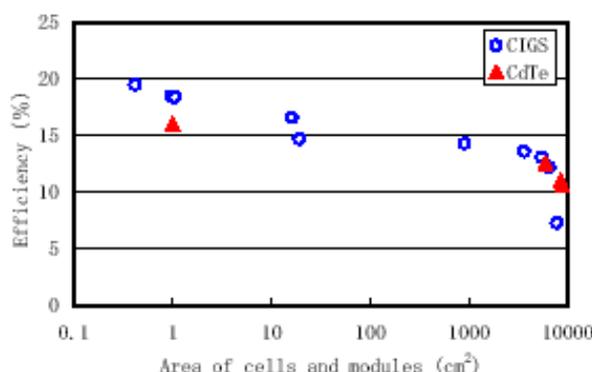


図 8 CdTe、CIGS セルおよびモジュールの変換効率とセルおよびモジュール面積の関係

図 8 には、CdTe、CIGS セルおよびモジュールの変換効率とセルおよびモジュール面積の

関係を示す。特に、図8に示すように、大面積モジュールの高効率化が必要である。研究開発課題は、大面積モジュールでの高効率化、量産モジュール技術、歩留まり向上技術、環境調和型太陽電池やフレキシブル太陽電池、等である。今回、昭和シェル石油からの長期信頼性試験結果や Scheuten からのプロセスコスト低減構造など、モジュールや生産技術に進展があった。

また、現在、CIGS系で高効率が達成されているのは、バンドギャップ 1.2eV の材料である。最適バンドギャップエネルギー 1.4~1.5eV を目指して、CIGS の高バンドギャップ化、CuInS や CuInAlSe<sub>2</sub> などの材料検討もなされている。CdTe および CIGS 系材料による多接合タンデムセルも魅力ある研究開発テーマである。また、CIGS 系セルは、放射線耐性に優れており、低コストで軽量の宇宙用薄膜太陽電池としても期待される。

この分野の plenary 講演で、R. Noufi (NREL) が強調していたように、高効率化、低コスト化や新型・新材料太陽電池の実現のためには、材料科学の理解が必要であり、今回、デバイス評価から材料特性の理解を深めようという研究報告もなされた。NREL による CdTe セルの時間分解 PL、IPE による電子線誘起電圧法を用いた局所的不均一性評価、ZSW によるラマン散乱測定や Toledo 大による CdTe 成長の in-situ リアルタイム偏光解析などが報告された。

### 5.3-1 族化合物および集光型セル分野：

大規模太陽光発電システムの需要増加や原料Siの供給不安の解消に関連して、集光式太陽光発電への関心の高まりと技術進展が今回の会議のトピックスの一つであった。最近、多くの企業が、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。

族多接合セルを用いた集光型太陽電池の高効率化の変遷を結晶Si太陽電池の1-sunおよび集光での効率変遷と比較して、図9に示す。このように、族セルを用いた集光型太陽電池は35%以上の高効率化を実現しており、近い将来、40%以上の高効率化が可能で、非常に効率の良いCPVシステムを提供できる。

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。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ていること。

(1) A. Bett (Fraunhofer) が Special Invited 講演でまとめたように、族多接合セルを用いた集光型太陽電池モジュールの出荷のアナウンスがある。以下、主なものを列

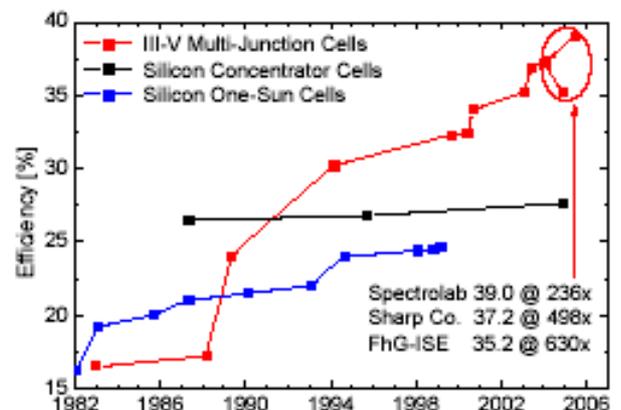


図9 族多接合セルを用いた集光型太陽電池の高効率化の変遷と結晶Si太陽電池の1-sunおよび集光での効率変遷の比較

記する。 Green and Golden Co. (オーストラリア)は、150W～3kWユニットの生産能力2MW/月を2007年に確立するという。 Concentrix Solar (ドイツ)は、Fraunhofer ISEからスピノフしたもので、図10にConcentrix Solarの内部を示す。500倍集光で5～7kWユニットを2007年にMWレベルの生産を開始するという。20MW生産規模なら、平板PVと同等のコストが可能という。 Isofoton (スペイン)は、1000倍集光1kWユニットを2007年に5MWの生産を開始するという。 SolG3 (スペイン)は、470倍集光の200Wモジュールを開発中で、2007年に生産を開始するという。その他、シャープもCPVシステムの販売開始のアナウンスをしている他、大同特殊鋼、Emcore (米国)、SolFocus (米国)、Entech (米国)などは、III族化合物多接合セルを用いた集光型太陽電池モジュールを開発中である。現在、結晶Si集光型セルを用いているAMONIX (米国)、Solar Systems (オーストラリア)、MicroPV (米国/中国)やEnergy Innovations (米国)なども、将来、III族セルを使用することを考慮中であるとの事である。



図10 Concentrix Solarにおける集光型太陽電池モジュールのパイロット生産設備。2006年末には、1 MWのパイロット生産ライン能力になるとの事。

(2) P. Verlinden (Solar Systems)は、CPVに関するplenary講演を行った。Solar Systemsは、CPVに関して15年以上の経験を有し、ポイントコンタクト結晶Siセルと500倍集光反射鏡を用いたシステムをオーストラリアの6ヶ所に計1 MWを設置している。年産100MW規模で、コスト\$2/Wpを試算している。今回、結晶Siセルに代え、III族多接合セルを用いた33kWpのCPVシステムに関する検討結果が報告された。図11は、III族多接合セルモジュールとSiセルモジュールの21℃における効率と集光度の関係を比較して示す。21℃で36%、温度補正なしで30.3%の効率が得られ、平板PVに比べ3倍の

効率を実証し、年間発電量も2300kWh/kW以上であるという。

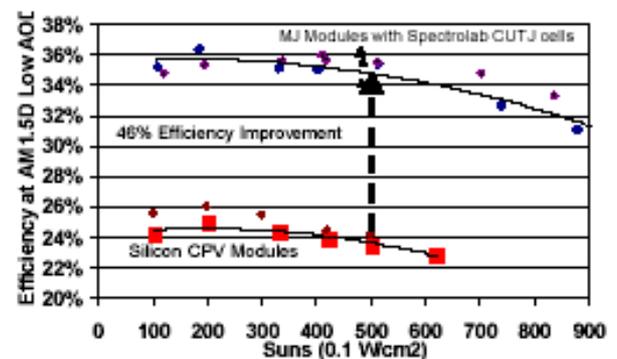


図11 III族多接合セルモジュールとSiセルモジュールの21℃における効率と集光度の関係を比較して示す。

(3) G. Sala (UPM)は、Special Invited講演において、CPVの歴史を語ると共に、UPMおよびIsofotonでの研究開発状況を報告した。また、2007年末にLa Manchaに設立予定のCPV研究センターのために、2.7MWのCPVシステムを購入予定であるとのアナウンスがあった。少なくともCPV企業3社からの購入となるとの事で、公式アナウンスは2006年6月との事である。また、このセンターのための専門家も公募予定である ([www.ies.upm.es](http://www.ies.upm.es))。

(4) 荒木ら(大同特殊鋼)は、NEDOプロジェクトで行われた集光型高効率InGaP/InGaAs/Ge 3 接合太陽電池モジュールの技術開発成果のまとめを報告した。成果は、要素技術としてのトンネル接合および電極設計による高集光用InGaP/InGaAs/Ge 3 接合セルの開発、高集光用、注入モールド法による低コストドーム型1次フレネル光学レンズの開発、光強度の一樣化と色収差の補正に有効な2次光学レンズ(ホモジナイザー)の開発、高集光下での温度上昇の抑制(500倍集光下で、温度上昇15~25 以下)をはかった良熱伝導性エポキシシートの開発、等の研究開発によるものである。1年間以上のフィールド試験の結果、平板PVに比べて1.6倍の単位面積当たりの発電量(277kWh/m<sup>2</sup>)を実現している。信頼性についても、メンテナンス・劣化なしで、2年半の動作実績を得ている。500倍集光紫外線照射試験等の加速試験で、20年以上の長期信頼性を見通しを得ている。

図12に示すように、300W、22kgモジュールを開発し、0.07kg/Wの軽量化をはかっている。この値は、薄膜セルモジュールの約1/2、結晶Siセルモジュールの約70%である。現状では、2.5kWのアセンブリしかしていないので、コスト\$17/Wの現状だが、1GWの累積生産量下では、learning curveより\$0.11/Wを予測している。シースルーCPV(図13)の試みも紹介された。今後の検討課題としては、信頼性、生産技術、コストがあげられた。



図12 300W、22kgの集光太陽電池モジュール



図13 シースルーCPV

多接合構造太陽電池については、格子不整合系、逆構造、layer transfer等の技術にも関心が寄せられている。

(5) R. Kingら(Spectrolab)は、これまで検討してきたGaInP/GaInAs/Ge 3 接合セル(図14)に関する技術の精査の結果を報告した。図15に示すように、格子整合系では、AM1.5Dの236倍集光下で $39.0 \pm 2.3\%$ 、格子不整合系では、AM1.5Dの241倍集光下で38.8%の高効率化を達成している。AM1.5Gの非集光で、格子整合系では効率32.0%、格子不整合系では31.3%を達成している。

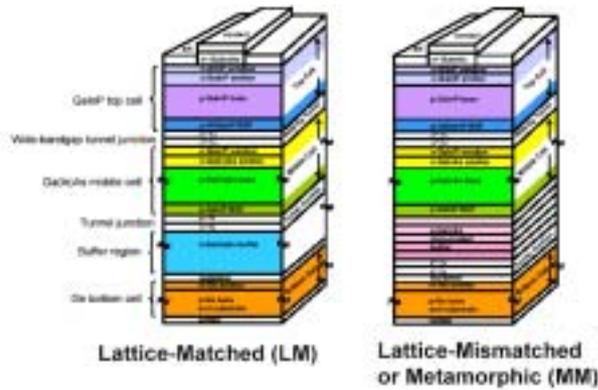


図14 格子整合、格子不整合3 接合セルの構造

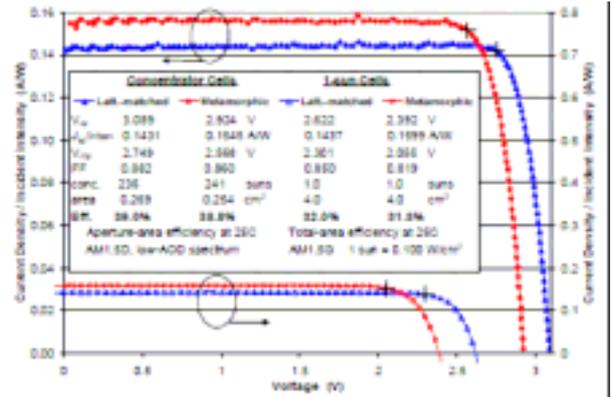


図15 Spectrolab社の高効率 GaInP/GaInAs/Ge 3 接合セルの I-V 特性

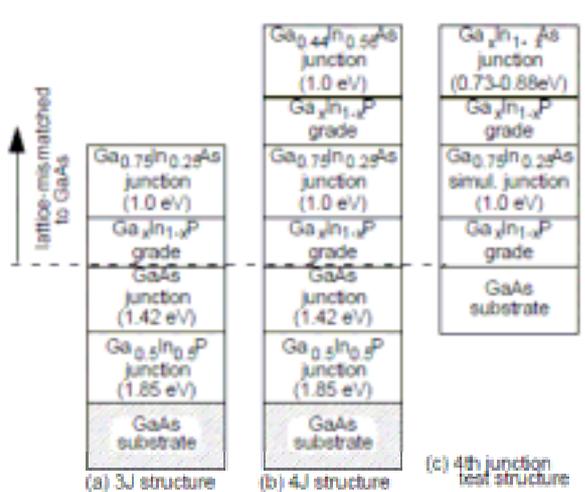


図16 逆構造3 接合セルおよび4 接合セルの断面

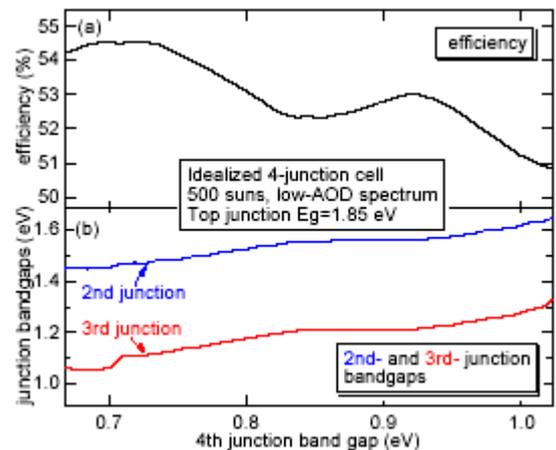


図17 4 接合セルの500倍集光下での理論効率の4 接合目のバンドギャップ ( $E_g$ ) 依存性と2 接合、3 接合セルの最適  $E_g$  (トップセル  $E_g=1.85eV$  固定)

(6) D.J. FriedmanらおよびM. Wanlassら (NREL) は、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16に示す逆構造を検討している。図17に、4接合セルの最適バンドギャップの組み合わせと理論効率を示す。1.85eV/1.46eV/1.1eV/0.7eV、1.85eV/1.56eV/1.21eV/0.93eVの組み合わせで、各々、理論効率(実現可能効率)、54.5%(46.5~49.5%)、53%(45~48%)である。既に、 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$  (1.87eV)/GaAs (1.42eV)/ $Ga_{0.75}In_{0.25}As$  (1eV)の3接合セルの10.1倍集光で、効率37.9%を実現している。今回、4接合化のアプローチとして、図16(c)に示す4接合セルについて、特に4層目のMOCVD成長格子不整合系GaInAs ( $E_g=0.73\sim 0.88eV$ )セルに関する検討結果が報告された。結果を図18、19、表2に示す。格子不整合の影響が出ているが、今後が期待される。

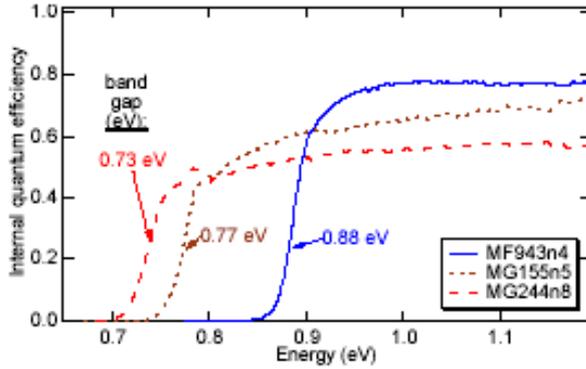


図18 格子不整合GaInAsセルの分光感度

表2 GaInAsセル特性のパラメータ

Device ID	x	$E_g$ (eV)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Opt. $E_{g2}$ (eV)	Opt. $E_{g3}$ (eV)
MF943n4	0.40	0.88	0.361	10.5	57	1.56	1.21
MG155n5	0.51	0.77	0.214	9.0	48	1.51	1.15
MG244n8	0.53	0.73	0.088	8.2	30	1.48	1.12

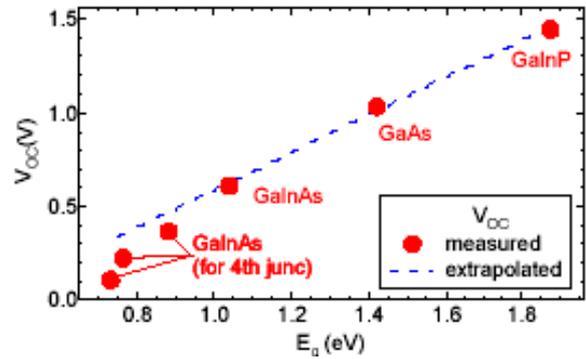


図19 格子不整合GaInAsセルのVocとEgの

関係に関して種々の太陽電池との比較

(7) 新しい材料系としては、InGaAsNやInGaNの他、InGaAsNSbやInGaPSbが検討され始めている。D. Jackrelら (Stanford Univ.) は、MBE成長GaInNASbセルに関する検討結果を報告した。GaInP/GaAs/Ge 3 接合セルで、非集光で効率32%が得られているが、0.9eVのボトムセル材料を用いれば、例えばGaInP/GaAs/GaInNASb 3 接合セルで効率36.6%の実現が期待できる。図20は、MBE成長GaInNAS(Sb)単接合セルの構造、表3には、得られた特性を示す。0.9eV GaInNASbセルで14.8mA/cm<sup>2</sup>が得られている。

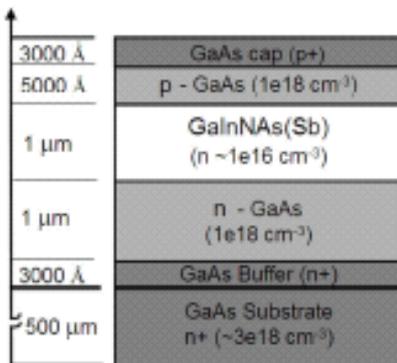


図20 GaInNAS(Sb)セルの構造

表3 GaInNAS(Sb)セルのEg、内部量子効率 (Eg+0.2eVで)、GaAsセル下での分光感度特性から求めたJsc

Sample	Reference	Band-gap (eV)	IQE (Eg + 0.2eV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
GaInNASb	This work	0.92	0.72	14.8
GaInNAS	This work	1.03	0.64	9.03
GaInNAS	[17]	1.04	0.74	9.64
GaInNAS	[5]	1.15	0.96	9.38
GaInNAS	[18]	1.07	0.78	9.26
GaInNAS	[19]	1.0	0.55	8.95
GaInNAS	[19]	1.1	0.67	7.79

### 5.3-2 DARPA (米国・国防総省国防高等研究事業局) プロジェクトの概要:

会期中、“DARPA Very High Efficiency Solar Cell Project”として、特別セッションが開催された。

(1) Douglas Kirkpatrick (DARPA Advanced Technology Office Program Manager) は、この超高効率太陽電池 (VHESC) プロジェクトの概要を報告した。コンソーシアムによる

予算5300万ドルの変換効率50%以上の実現を目指すプロジェクトで、15の大学、企業、研究所が参加し、DARPAより最大で3360万ドル、コンソーシアム・メンバーより1930万ドルを調達する予定である。VHESCは、個々の兵士が持つ様々な電気製品や電源の信頼性を高めるハイテク軍事用途に利用することを目的としている。また、同時に、商業利用もかなりの範囲で見込まれるとの事である。VHESCとして、効率50%が必要であり、携帯機器（ラジオ、パソコン、フラッシュ、ビジコン、携帯電話等）の電力要求を満たし、兵士の背負う加重を減らし、兵士の行動性を向上させることにある。マイルストーンとして、2008年3月までに、効率50%以上を実現するための要素技術の実証、2009年3月までに、研究室段階での効率50%以上のデバイスの実現、2009年10月までに、10cm<sup>2</sup>デバイス（0.5W）を1000ユニット作製すること、がある。コスト的にも、現在\$2000/Wを\$200/Wに、将来的には\$2/Wが望ましいとの事である。

(2) 研究責任者であるAllen Barnett (Univ. Delaware) からプロジェクトの研究開発内容が報告された。2005年11月2日に、VHESC Kick off Meetingを開催した(写真1)。デラウェア大の他、NREL、ジョージア工大、ロチェスター大、パーデュ大、カリフォルニア大サンタバーバラ校、MIT、ハーバード大、イェール大、カーネギーメロン大、DARPA、UNSWなど、企業として、BP Solar、Corning、DuPont、LightSpin Technologies、Blue Square Energyが参画している。



写真1 VHESC Kick-off Meetingの参加者

研究開発テーマとして、コアアプローチとして、 $\text{III-V}$ 族化合物半導体を用いた5接合、6接合太陽電池と集光技術の組み合わせがある。例えば、GaInP(1.84eV)/GaAs(1.43eV)/Si(1.12eV)/GaInAsP(0.95eV)/GaInAs(0.67eV)やGaInNなどであり、また集

光技術についても、非結像光学系が重要であるとしている。開発においては、材料選択の合理性、柔軟性を与える光学、内部接続、セルなどの設計統合や、開発された新しい技術を統合するための新しいアプローチが基になっている点が重要としているが、今回のプロジェクトのコアアプローチは、欧米や日本で進めている「超高効率集光型多接合太陽電池の研究開発」と何らかわるものではない。しかし、これまでの太陽光発電研究開発史上、最大規模のものであり、うらやましい気もする。また、将来テーマとして、有機、ナノ構造、バイオなどがあげられたが、具体性が感じられなかった。

(3) 共同研究責任者であるChristiana Honsberg (Univ. Delaware) から、研究開発テーマに関する原理的可能性について報告された。図21は、多接合太陽電池の接合数と理論変換効率を示す。コアアプローチは、多接合太陽電池であり、材料的組み合わせが紹介された。また、GaInNや格子不整合系にも関心を持っている。表4には、超高効率化のアプローチを示す。M. Greenの第3世代PVやEUのFull Spectrumプロジェクトと何らかわりはない。QWsやQDsにも言及された。

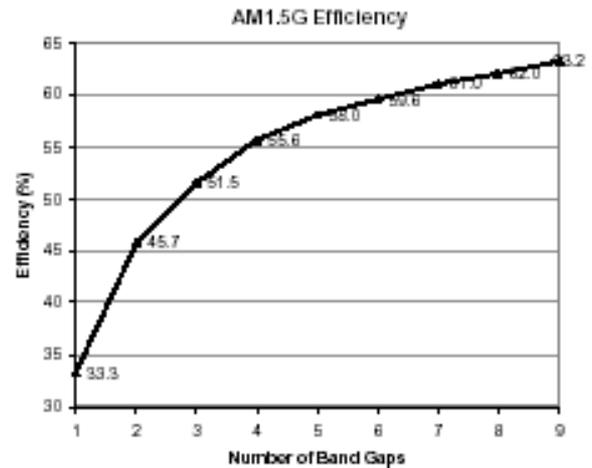


図21 多接合太陽電池の接合数と理論変換効率の関係

表4 超高効率化のアプローチ

Approach	Advantages/uses	Central Issues	Examples
Multiple spectrum	<ul style="list-style-type: none"> <li>Can be implemented using low cost coatings</li> <li>Can use existing solar cells (or LEDs for thermophotonics)</li> </ul>	Efficient conversion of solar spectrum not demonstrated	Thermophotovoltaic Up and down conversion
Multiple absorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>High impact ionization rates demonstrated with colloidal quantum dots</li> <li>Suited to conversion of high energy photons</li> </ul>	Transport of carriers not demonstrated	Impact ionization Two-photon absorption Raman absorption
Multiple energy level	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suited to low energy photon conversion</li> <li>Can capitalize on LED/photodetector devices</li> </ul>	Demonstration of <i>simultaneous</i> radiative coupling required	Localized band (QW) Mini-band (IBSC)
Multiple temperate	Potential for high efficiencies using a single absorber material	Extraction of energy from hot carrier populations not demonstrated	Hot carriers QWs with thermal escape
AC solar cells	Potential for high efficiencies using a single absorber material	Requires THz devices	Rectenna

#### 5.4 宇宙用太陽電池分野：

(1) H. Brandhorst (Auburn Univ.) が、“The Past, Present and Future of Space PV” と題して、plenary講演を行った。宇宙用太陽電池アレイは、1957年以来飛んでおり、変換効率も1957年の7%から今日のAM0効率30%がSpectrolab、Emcore、Sharp、RWE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。

(2) E. Fuller (Emcore) は、“Economic Consideration Influencing the Future of High Efficiency Solar Cells” と題して、Special Invited講演を行った。図22に示すように、静止衛星軌道上の商用衛星数の推移を示す。商用衛星数は減少傾向にあるが、回復傾向を予測しているが、市場の回復が、宇宙用PVビジネスにとって最善である。

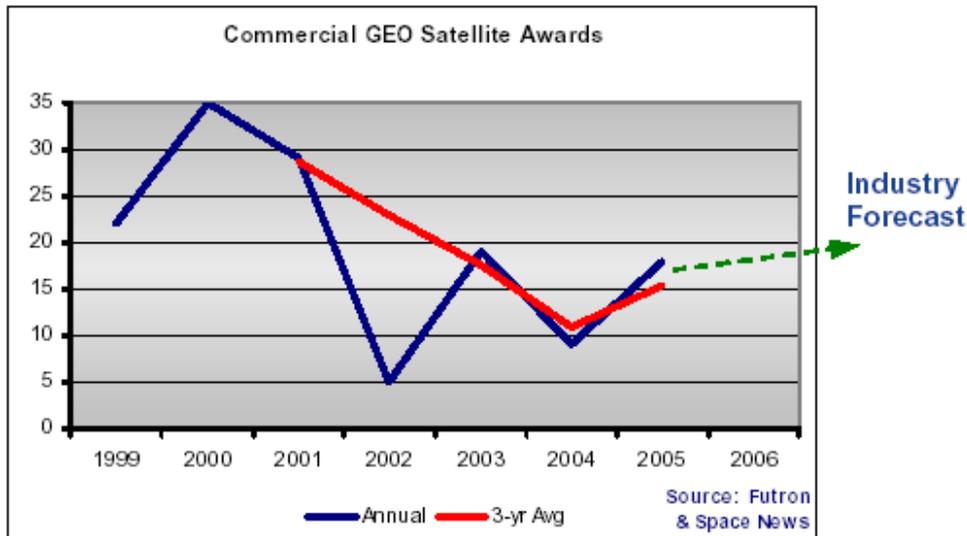


図22 静止衛星軌道上の商用衛星数の推移

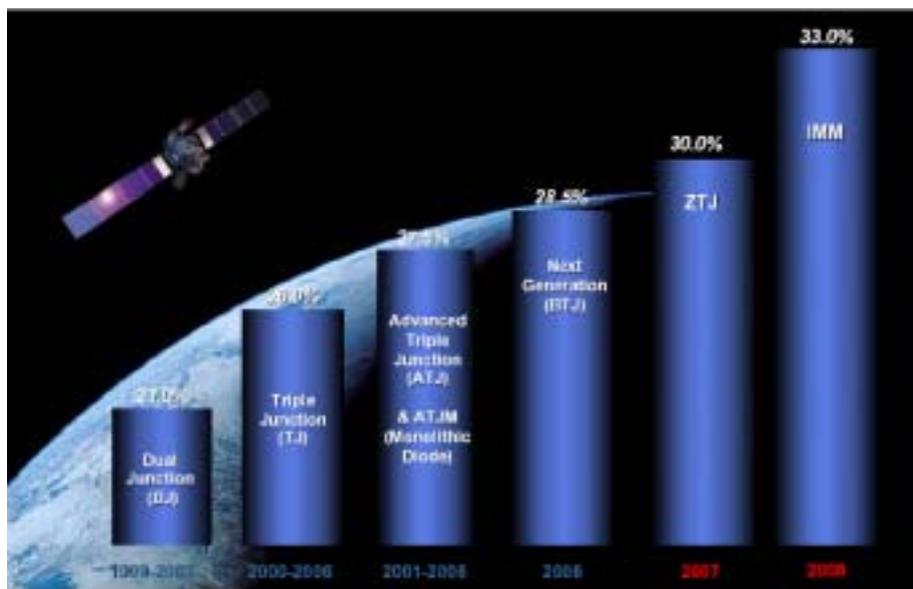
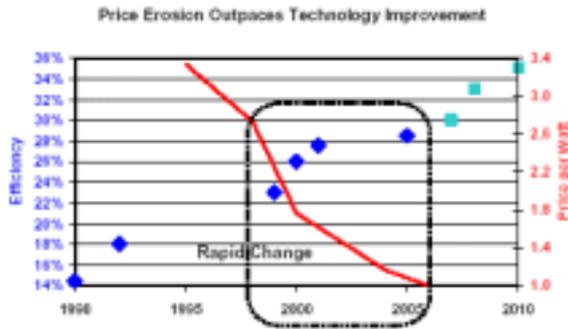


図23 Emcoreの宇宙用太陽電池のロードマップ

Emcoreの宇宙用太陽電池のロードマップを図23に、変換効率およびW当り価格の年次推移を図24に示す。自動化された4インチラインで8台のMOCVD装置で、これまで、50万枚以上の多接合セルを出荷している。現在の平均効率27.5~28.5%を、2008年33%、2010年35%を目指すという。コスト低減のための技術戦略として、設備集中・投資、自動化、歩留り、生産ボリュームがあると述べた。

図24 Emcoreにおける宇宙用太陽電池の変換効率およびW当り価格の年次推移



さらなる高効率化に向けて、5、6接合化のアプローチがある。

(3) F. Dimroth (Fraunhofer ISE) は、図25に示すAlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge5接合セルで、AM0効率24% (図26、 $V_{oc}=5.196V$ 、 $J_{sc}=7.3mA/cm^2$ 、 $FF=86.3%$ ) を得ている。

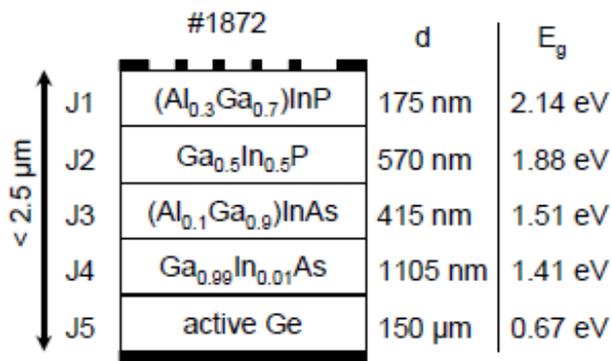


図25 5接合セルの構造

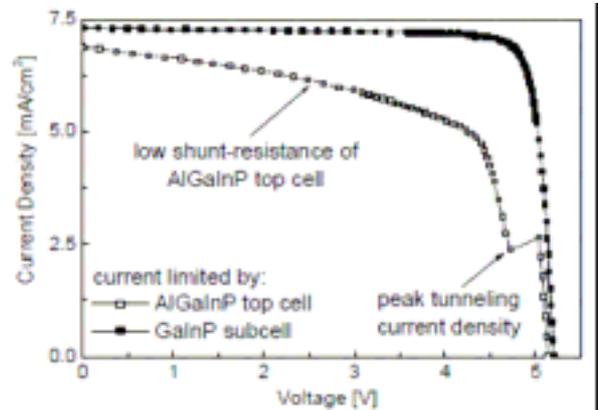


図26 5接合セルのI-V特性

(4) R. King (Spectrolab) もSpecial Invited講演として、5、6接合化の試みを報告した。図27には、5、6接合セルの構造を示す。図28には、6接合セルのI-V特性を示す。AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInAs/Ge6接合セルでAM0効率20.9%(真性効率23.6%、面積0.26cm<sup>2</sup>、 $V_{oc}=5.334V$ 、 $J_{sc}=7.30mA/cm^2$ 、 $FF=82.0%$ ) を得ている。

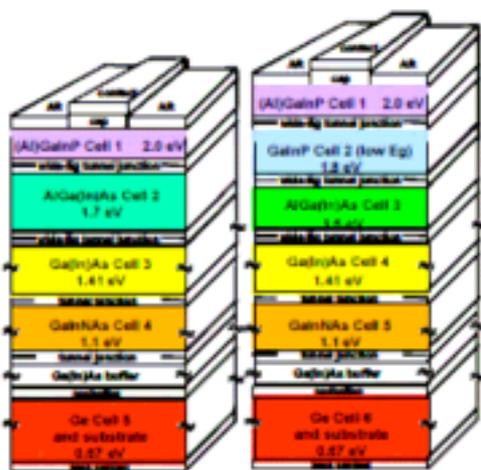


図27 5、6接合セルの構造

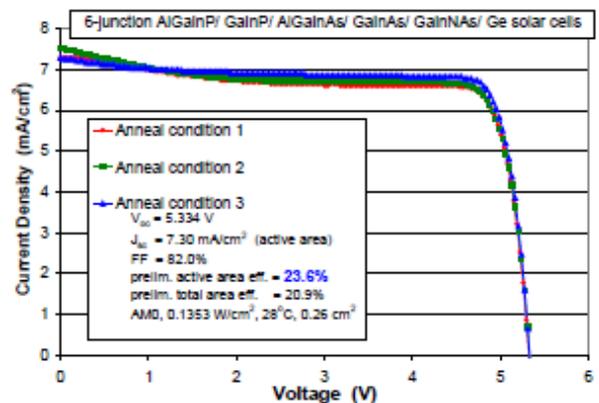


図28 6接合セルのI-V特性

宇宙用太陽電池では、軽量化も要求される。5W/kgから100W/kg、将来的には1000W/kgを目指している。a-SiやCIGSなどの薄膜セルが、宇宙用フレキシブル太陽電池として検討されているが、性能は不十分である。ウエハボンディング、エピタキシャル・リフトオフや薄層剥離技術による III-V 族セルの薄層化と転写技術の試みはあるが、実用レベルで成功した例はない。

(5) 高本ら(シャープ)は、“Paper-thin InGaP/GaAs Solar Cells”と題して、Special Invited講演を行った。MOCVDエピタキシャル成長InGaP/GaAs 2 接合セルが、金属薄膜上に転写され、セルの厚み約 2 μm以下、フレキシブルセルが作製されている。1cm角セルで、AM0効率25.2% (AM1.5G効率29.4%) が得られており、金属薄膜による光反射の有効性や放射線耐性の向上のメリットも得られている。この値は、典型的なInGaP/GaAs 2 接合セルの値にほぼ同じである。

図29に、フレキシブルセルの作製プロセスを示す。4x7cm<sup>2</sup>セルでAM0効率21.2%が得られ、図30に示す9x32cm<sup>2</sup>のフレキシブルパネルも作製され、AM0効率25%が得られれば、重量比出力0.83W/gであり、フレキシブル宇宙用太陽電池として有望である。今後、エピタキシャル用基板の再利用やエピタキシャルコストの低減がはかられば、全ての太陽電池の中で最高効率の III-V 族多接合セルを、非集光型でも、地上用として適用することも可能であろう。

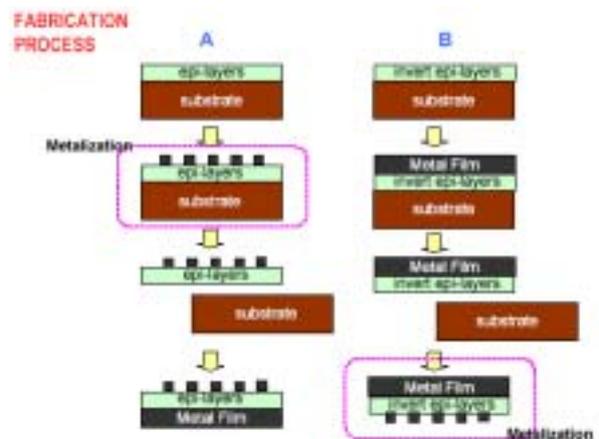


図29 フレキシブルセルの作製プロセス

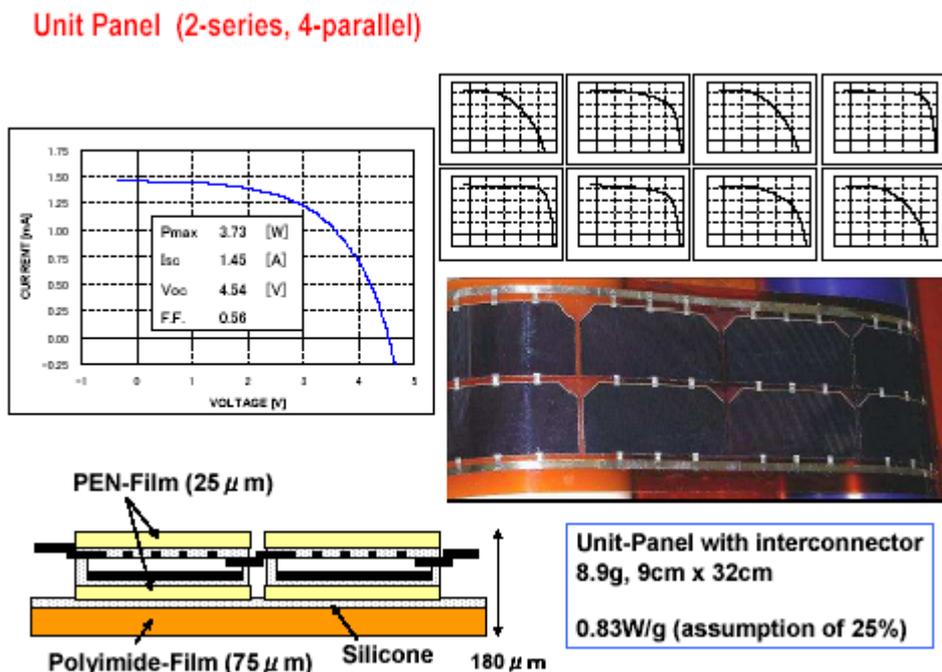


図30 フレキシブルパネル (9x32cm<sup>2</sup>) とI-V特性

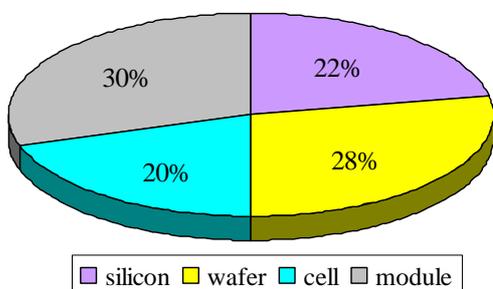
薄膜太陽電池も宇宙用太陽電池として魅力的で、1965年の6%から、今日12%と徐々に効率向上がはかられている。CIGSやa-Siセルに関する報告がAerospace Co.、AFRL、JAXA、Univ. Neuchatelなどからあった。

### 5.5 結晶Si太陽電池分野：

(1) M. Kaesら(Konstanz)は、Plenary講演において、ELKEMの太陽電池級(SoG)-Siを使用して $2 \times 2 \text{cm}^2$ のセルサイズで18.1%(表5)の変換効率を得たことを報告した。結晶Si太陽電池分野では、原料Siが主要課題の一つである。キャスト成長多結晶シリコンから作製した太陽電池における各工程のコストについてみると、図31に示すように、原料、結晶成長、及びスライスのコストは、全体の50%を占めている。この高いウエハコストに加えて、原料不足やカーフロス(>50%)の問題があるため、原料使用量が少なく、カーフロスが無いリボン状シリコン結晶などが期待されてはいるが、効率が低い。今回、図32に示す精製プロセスを用いたELKEM製SoG-Siを用いた。このSoG-Siは冶金学的なアプローチで精製されている。

表5 SoG-Si太陽電池の特性

Best cell	$V_{oc}$ [mV]	$j_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	FF [%]	$\eta$ [%]
confirmed@ISE	641	35.1	80.3	18.1
UKN	642	35.3	80.3	18.2
10 min@200°C	644	35.6	80.5	18.5
850 min@1 sun	642	35.2	80.5	18.2



[P. Wyers, 2006]

図31 多結晶Si太陽電池における各工程のコスト

(2) P. Engelhartら( ISFH)は、RISE( Rear Interdigitated Single Evaporation)セルに関する報告を行った。レーザーアブレーションにより裏面に段差を作り、それによってp層とn層の分離を行っている。今回、22.0%の効率(面積 $2 \text{cm} \times 2 \text{cm}$ )を報告した(表6)。このセルでは、B-BSF層とローカルコンタクトを用いているが、p層の電極を

Process step	Description
Elkem Silicon Metal	- Elkem Silicon globally largest supplier
Pyro-metallurgical refining	- Energy efficient refining
Hydro-metallurgical refining	- Run in industrial scale today (Silgrain <sup>®</sup> )
Final polishing	- Adapting material to customer specification.
	- Process exclusively designed for PV Solar manufacturers

図32 ELKEMによる金属級Siの精製プロセス

Al-LFC ( Laser Fired Contact )で作ったものでは19.5%を得ている。

表6 RISEセルの特性

	$V_{oc}$ mV	$J_{sc}$ mA/cm <sup>2</sup>	FF %	Eff. %
Al-LFC	650	38.3	78.5	19.5
B-BSF	660	40.5	80.6	21.5
B-BSF & local contacts	662	41.7	79.9	22.0

250 $\mu\text{m}$ -thick 1.5 $\Omega\text{cm}$  p-type FZ-Si, Aperture area: 4cm<sup>2</sup>. Independently confirmed by FhISE

(3) n型ベースセルに関する多くの発表があった。n型基板の利点は、その長い少数キャリア寿命とベース層の光劣化の問題がないことにある。J. Zhaoら (UNSW) は、n型基板の裏面側にB拡散でエミッタ層を形成する裏面エミッタ型PERT (Passivated emitter rear cell) セルについて報告した。B-0ペアによる光劣化を抑制する為に、n型基板を用いてB拡散エミッタ層を裏面側に配置している。PVSEC15で、170 $\mu$ m厚のFZ-S基板で22.7%の効率を報告したが、今回、CZ-Si基板を用い(面積22cm<sup>2</sup>)、基板厚180~200 $\mu$ mで、CZ-Siでも20%を超える効率を得ているが、FZ-Siより2%弱悪い値となっている。

表7 n型裏面PERTセルの特性

	$\rho$ $\Omega$ cm	$t$ $\mu$ m	$V_{oc}$ c mV	$J_{sc}$ mA/cm <sup>2</sup>	FF %	Eff. %
CZ	4.5- 5.5	20	65	39.9	78.	20.
		0	9		7	8
		18	66	39.3	79.	20.
FZ	1-2	0	0	40.1	7	7
		17	70		80.	22.
		0	2	5	7	
		17	70	79.	22.	
		0	6	40.1	1	4

AM1.5 100mW/cm<sup>2</sup>, Area: 22cm<sup>2</sup>. FZ cells were tested at Sandia National Lab. CZ-Siは信越半導体制.

(4) a-Si/c-Siヘテロを持つHIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) セルに関しても多くの報告があった。丸山ら (Sanyo) は、図33に示す構造を持つHITセルで最高効率を21.8%に更新したことを報告した。低欠陥密度のa-Si層を低ダメージで堆積する技術の開発により、表8に示すように従来と比較して $V_{oc}$ が改善されている。現時点における $V_{oc}$ の最高値は730mVである。また、事業でもHITセルを積極的に展開し、年産能力を160MW (2005年) から250MW (2007年) に拡張するとアナウンスした。Wangら (NREL) は、HWCVDを用いた(n)a-Si/(p)c-Si構造において効率18.2%を、Schmidtら (Hahn Meitner Inst.) はn型、p型基板それぞれに対し効率19.8%、17.4%を報告した。特性を表8に示す。他と較べてSanyoのセルは $V_{oc}$ が極めて高く、彼らは優れたa-Si/c-Si界面制御技術を持っていることが伺える。

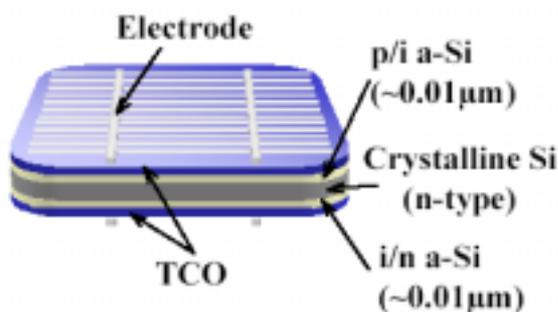


図33 SanyoHITセルの構造

表8 各種 a-Si/c-Siヘテロ接合セルの特性

	Area cm <sup>2</sup>	c-Si	$V_{oc}$ mV	$J_{sc}$ mA/cm <sup>2</sup>	FF %	Eff. %
Sanyo	100.4	n	718	38.4	79.0	21.8
Sanyo	100.3	n	712	38.3	78.7	21.5
NREL	0.998	p	667	35.5	76.9	18.2
HMI	-	n	639	39.3	78.9	19.8
		p	629	34.9	79	17.4

(5) 今回の会議では、イメージングによる評価が幾つか報告された。UNSWからはフォトルミネッセンス(PL)を利用した評価法について報告された。この方法の特徴としては、非接触・非破壊、セル化不要、SiのCCDカメラで検出(高価なIRカメラ不要)、室温で測定、などが挙げられる。各工程における汚染や破損の評価に使用した例が報告さ

れた。測定時間も 1sec 程度であるため、ライン工程の見直し等に非常に有用と考えられる。また、セル化後のウエハーの評価にも使用可能である。セル化後は、エレクトロルミネッセンス(EL)と組み合わせて使用することで、局所的な接触抵抗のばらつき等の情報も得ることが出来る。奈良先端大からは、EL を利用した評価法が報告された。他のイメージングとしては ISFH、Max Planck から Lock-in-Thermography 関連の報告があった。この方法ではシャントを検出したり、電極の状態 (ohmic, Schottky) などを判別したりと様々な利用法が提案されているが、前述の PL, EL に比べて装置が多少複雑であるため、汎用性は劣ると思う。セルの薄型化に伴い、クラックの検出や残留応力の測定に注目が集まり始めている。REC Wafer は、赤外の透過光と可視光の反射光を組み合わせたクラック検出システムを報告している。可視光像と外光透過像と組み合わせる事により明確にクラックを判別出来る。Univ. South Florida は、超音波振動の共鳴を利用したクラック検出技術を報告している。Georgia Tech. は、応力起因の複屈折を近赤外偏光システムを用いて測定している。

#### 5.6 アモルファス、ナノ/微結晶薄膜 Si 太陽電池分野：

結晶Siの原料問題が続く中、薄膜Siセル、化合物薄膜セルや集光型セルなどにも大きな期待が寄せられている。10年前のシナリオでは、薄膜太陽電池の生産量が、今年あたり、結晶Si太陽電池と同等になることが試算されていたが10%にも満たない。しかし、薄膜系も増産の方向にある。表9に、薄膜Si太陽電池モジュールの生産状況および計画を示す。

表9 薄膜Si太陽電池モジュールの生産状況および計画 ( MW ) ( PV News等より )

	Cells	2003	2004	2005	2006	2007	2010
United Solar	a-Si 3-J		17	25	25	50	300
KANEKA	a-Si/ $\mu$ c-Si	20	20	20	30		
Mitsubishi Heavy Ind.	a-Si	10	10	10	30		

( 1 ) S. Guha ( United Solar ) は、Plenary講演を行った。2005年の25MWから、2007年に50MW、2010年に300MWの生産増強の計画にある。写真2に示すように、2006年2月20日に、Bush大統領がUnited Solarを訪問したと自慢していた。材料面では、3接合構造、BSR構造、SiGe、超高周波P-CVD、ナノ結晶Siなどに言及した。飛行船や宇宙ステーションへの応用も可能との事で、Missile Defense Agencyは、65,000フィートの高度の飛行船では75kW出力のPVを必要としている。DODは、50kW以上の大出力のPVアレイを必要としている。ステンレス箔上の効率9%セルで、重量比出力500W/kg以上を当面の目標として、中期的には、ポリイミド上の8.5%セルで1100W/kgの実現を目標としている。

( 2 ) アモルファスSi ( a-Si:H ) とナノ/微結晶 ( nc/ $\mu$ c-Si:H ) のタンデムセルで、小面積ながら、初期効率15%が実現している。United Solarは、面積0.25 cm<sup>2</sup>セルで初期効率15.1% ( Jsc=9.13mA/cm<sup>2</sup>、Voc=2.195V、FF=0.752)、カネカは、1cm<sup>2</sup>セルで初期効率15.0% ( Jsc8.93mA/cm<sup>2</sup>、Voc=2.28V、FF=0.735)を実現している。

## President Bush visits United Solar (Feb. 20 2006)



“A couple of things struck me. One, solar technology is commercial, and particularly because they've figured out ways to make long rolls of this photovoltaic technology. That's important to help us achieve a major goal, which is to become less dependent on foreign sources of oil”

“This technology right here is going to help us change the way we live in our homes. The ultimate goal is to have solar technology on your home, and that home will become a little power-generating unit unto itself.”

写真2 Bush大統領のUnited Solar訪問（2006年2月20日）

#### 5.7 PV モジュールおよびシステム部品分野：

H. Ossenbrink (EC-JRC) は、plenary講演で、種々のタイプのモジュールおよびシステム部品の品質や認証について議論した。特別招待講演セッションでは、モジュールメーカーから、結晶Si、a-Si、CdTeおよびCIGSセルモジュールの最近の状況が報告された。種々の技術の短所も議論された。また、産業界と学界との共同研究も重要である。

#### 5.8 地上用 PV システム分野：

PVシステムの大型のものが増えている。MW級（1MW～11MW）PVシステム数は300以上となっている。広範な用途が対象となっている。電力品質、系統連係、建材一体型PVなどが議論された。23年間の長期特性が、確認されている。しかし、発展途上国に関係した論文発表がほとんどなく、寂しい。発展途上国には、2005年に、86MW（全市場の6%）が設置され、80万人の人々に届いている。しかし、15億人以上には、まだ届いていない。

#### 5.9 国家プログラム、政策、経済性：

ドイツ、日本、米国や他の国々の国家プログラムの講演を通じて、インフラの確立や市場形成に向けた次世代のPV技術の目標や政策に共通性を見た。また、PV対他のエネルギー源を用いた場合の環境アセスメント、PV技術に関する材料的制限や大規模系統集中への挑戦等について考慮する必要がある。

## 6 . 感想

世界会議（WCPEC）という事で、米国で開催されるIEEE PVSCに比べると、参加者数は5割増しであり、世界会議開催のメリットはあると思う。個人的にも、今後も、世界会議の継続発展に貢献して行きたいと思う。

現在主流の結晶Si系もfeed stock問題等、正念場であるが、本会議での発表論文件数が第一位の160であることから、この問題は2～3年以内に解決され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。ただ、結晶Si分野では、短・中期的な研究開発が多い印象であり、D. Arvizu（NREL所長）が言っているように、将来のためには、大学や国研主導型の研究開発の推進が必要であろう。

集光型PV（CPV）については、5社程からMW程度の生産開始のアナウンスがあり、今後の進展が期待される。最初は、小規模生産なので、信頼性、生産技術、コストなどの課題に関する検討が残されている。結晶Si系のfeed stock問題の解決や大規模PVの要求増大の点からも、CPVは大きなポテンシャルを持っている。勿論、薄膜系にも大きな期待が寄せられており、正念場である。

米国国防総省（DARPA）の超高効率太陽電池（VHESC）プロジェクトは、これまでの最大規模のプロジェクト（予算約60億円）で、同分野に関わるものとしてうらやましい気がする。プロジェクトの主要ターゲットは、III-V族化合物半導体を用いた多接合太陽電池の集光動作で、変換効率50%以上の実現を狙ったもので新しさは感じられない。しかし、予算規模5300万ドルは、単一プロジェクトとしては群を抜いているし、参画機関も22と聞く。わが国でも、予算規模は少なくとも、超高効率太陽電池および新しい材料の研究を強化して行く必要がある。

第3世代PV、EUのFullSpectrumプロジェクトやDARPAの将来テーマを含めて、新材料や新型構造太陽電池の研究テーマは実現の可能性は低いが、生き長く研究開発を進めるべきだと思う。5年間のプロジェクトで目標達成はできなくとも、予算規模を少なくして、将来のために、革新的な探索研究を続けて行く必要がある。報告者が関係した多接合太陽電池も、1982年の研究開始だが、宇宙用太陽電池として実用化されたのは2002年から2003年であり、20年を要している。他の太陽電池でも、種から実りを得るまでには、それ相当の時間を要すると考えられる。

今回のWCPEC-5は、欧州がホストで、4年後の2010年9月に開催される予定である。アジア・太平洋地区の第17回太陽光発電国際会議（PVSEC-17）は、2007年12月3日～7日、福岡国際会議場で開催予定である。

（以上）