

第39回 IEEE 光起電力専門家会議 (39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference) 報告

2013. 6. 25

山口真史 (豊田工大)

1. 開催月日：2013年6月16日～21日。

2. 開催場所：Tampa Bay Convention Center (タンパ、米国)。

3. 本会議の概要：米国電気電子学会 (IEEE) 主催の太陽光発電会議で、2008年から、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 Ryene Raffaele (ロチェスター工大) で、プログラム委員長は David Wilt (US Air Force Research Lab.) であった。

今回は、42カ国から約1,356名の参加者があった。開催地のせいもあり、前回より約180名の参加者減ではあったが、太陽光発電に対する大きな関心は続いていることを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760名、②日本97名、③ドイツ90名、④韓国40名、④英国40名、⑥台湾39名、⑥中国37名、⑦オーストラリア35名、⑧インド34名、⑨カナダ26名、⑨オランダ26名、⑪フランス20件、の順であった。

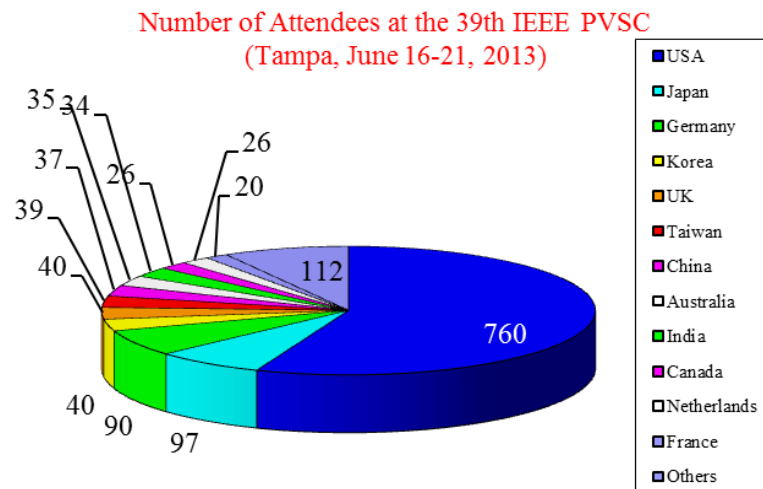


図1 国別参加者数

PV Velocity Forum等を通じて、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。46カ国から、招待講演を含めて951件の論文発表があった。国別では、①米国454件、②ドイツ73件、③日本62件、④台湾50件、⑤中国45件、⑥オーストラリア32件、⑦インド29件、⑧英国27件、⑨韓国22件、⑩オランダ20件、⑪フランス19件、の順であった。

**Number of Papers to be presented
at the 39th IEEE-PVSC
(Tampa, USA, June 16-21, 2013) 951 Papers**

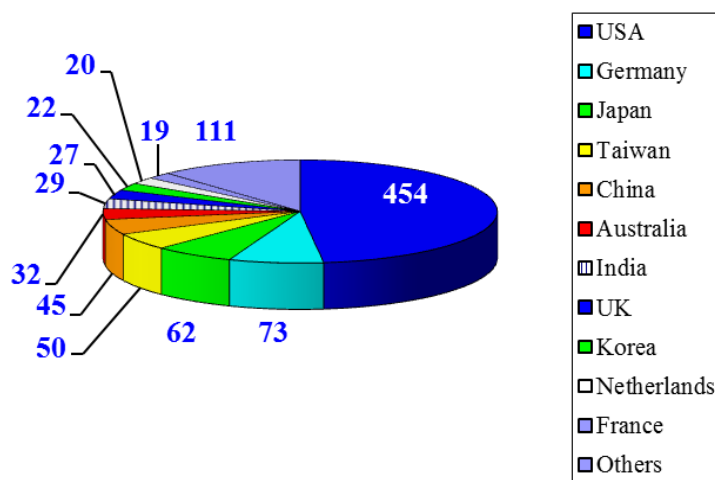


図2 国別発表論文数 (資源総合システム(株)提供)

**Number of Papers to be presented
at the 39th IEEE-PVSC
(Tampa, USA, June 16-21, 2013)**

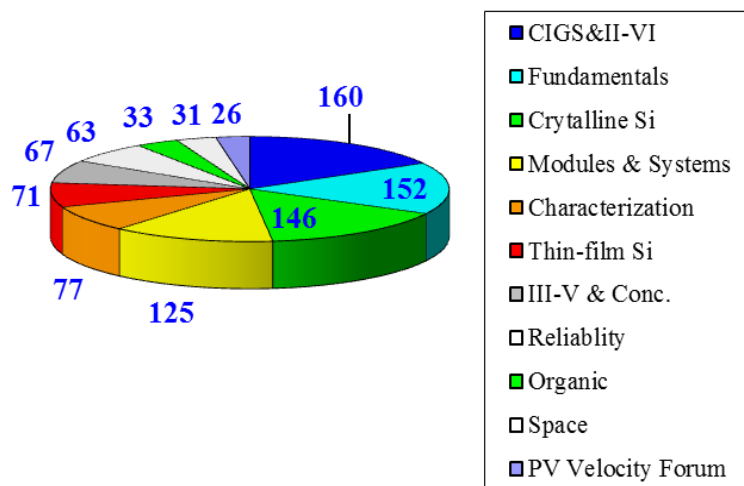


図3 発表論文数の分野別内訳 (資源総合システム(株)提供)

図3は、発表論文数の分野別内訳を示す。分野別では、①CIGS、CdTeおよびII-VI族160件、②基礎および新概念152件、③結晶Si系146件、④モジュールおよびシステム系125件、⑤キャラクターゼーション77件、⑥薄膜Si系71件、⑦III-V族および集光67件、⑧信頼性63件、⑨有機太陽電池33件、⑩宇宙用31件、⑪PV Velocity Forum26件、の順であった。

4. Cherry Award受賞者と受賞記念講演

Cherry Award ChairであるR. King (Spectrolab) より、William R. Cherry Awardの経緯 (表1)、これまでの受賞者 (表2) の説明がなされた。

表1 William R. Cherry Awardの経緯

This award is named in honor of William R. Cherry, a founder of the photovoltaic community. In the 1950's, he was instrumental in establishing solar cells as the ideal power source for space satellites and for recognizing, advocating, and nurturing the use of photovoltaic systems for terrestrial applications. The William R. Cherry award was instituted in 1980, shortly after his death. The purpose of the award is to recognize engineers and scientists who devote a part of their professional life to the advancement of the technology of photovoltaic energy conversion. The nominee must have made significant contributions to the science and/or technology of PV energy conversion, with dissemination by substantial publications and presentations. Professional society activities, promotional and/or organizational efforts and achievements are not considerations in the election for the award.

表2 これまでのWilliam R. Cherry Awardの受賞者

Dr. Paul Rappaport 1980	Mr. Peter A. Iles 1991	Dr. Ajeet Rohatgi 2003
Dr. Joseph L. Loferski 1981	Dr. Lawrence L. Kazmerski 1993	Dr. Timothy J. Coutts 2005
Prof. Martin Wolf 1982	Prof. Yoshihiro Hamakawa 1994	Dr. Antonio Luque 2006
Dr. Henry W. Brandhorst 1984	Dr. Allen M. Barnett 1996	Dr. Masafumi Yamaguchi 2008
Mr. Eugene L. Ralph 1985	Dr. Adolf Goetzberger 1997	Dr. Stuart Wenham 2009
Dr. Charles E. Backus 1987	Dr. Richard J. Schwartz 1998	Dr. Richard King 2010
Dr. David E. Carlson 1988	Dr. Christopher R. Wronski 2000	Dr. Jerry Olson 2011
Dr. Martin A. Green 1990	Dr. Richard M. Swanson 2002	Dr. Sarah Kurtz

今回の受賞者は、Keith Emery (NREL) で、太陽電池、モジュールの特性測定技術の向上、標準化等への貢献が評価されたものである。受賞記念講演では、同氏のこれまでの研究開発の歩みが紹介された。特に、太陽電池、モジュールの特性評価、標準太陽電池による較正、認証機関によるクロスチェックなどの手法が紹介された。平板PVは、IEC-60904-1に準拠し、集光PVは、IEC62270-1+ASTME2527に準拠し、特性測定を行う。AM1.5Gのリファレンス・スペクトルも1976年のNASA TM-73702から、最近のSMARTS version2.9.2と精度が上がっている。地上用セル、モジュール特性は、PTB、AIST、JRC、NRELの認証機関でクロスチェックを行っているが、結晶Siセルでも、±4%の誤差がある。±2%に改善するには、標準セルやシミュレータの改良が必要である。標準セルも、不安定なセルは排除する必要があるし、結晶Siやa-Siセルでは、光劣化を、CdTeやCIGSセルでは、電圧印加履歴、を考慮する必要がある。パッケージングも重要である。特に、有機やCPVセルでは、セル面積の規定が重要で、マスクやエッチオフが要求される。また、二次較正も重要で、NREL、FhG-ISE、AIST間で行っている。1993年以来、Solar Cell Efficiency Tableが、ジャーナル“Progress in Photovoltaics”に発表され、第42版が、まもなく発表されるとの事である。標準太陽電池のIscは、国際的に、±1%以内におさまっている。信頼性は、重要で、多面的に評価する必要がある。

5. 開会式基調講演の概要

(1) S. Kann (GTM RESEARCH) は、“PV Market Analysis: Evolution and Revolution in the U.S. PV Market” と題して、基調講演を行った。まず、モジュール価格の大幅低下について言及された。2000年から2004年は、PV導入の初期で、モジュール価格も \$ 3.5/Wから \$ 3.3/Wと7%/年の減少だった。続く2004年から2008年は、FIT制度が開始し、価格も \$3.3/Wから \$3.6/Wへと8%/年の増加に転じた。2008年から2013年は、近代化時期で、モジュール価格は、\$ 3.6/Wから \$ 0.75/Wへと82%/年の大幅低下となった。図4に、米国におけるポリシリコン、ウエハ、セル、モジュール価格の最近の変遷を示す。2010年Q3のモジュール価格 \$ 1.91/Wから、2012年Q4の \$ 0.75/Wへと減少した内訳は、マージン低減 \$ 0.63/Wが最も効果があり、次いで、ポリシリコンの \$ 0.4/W、他の部材 \$ 0.12/W、技術進歩 \$ 0.09/W、スケールアップ \$ 0.05/Wの順である。モジュール製造メーカーも2010年の357社から247社へと減少し、2016年には、93社に淘汰されるだろうと予測している。

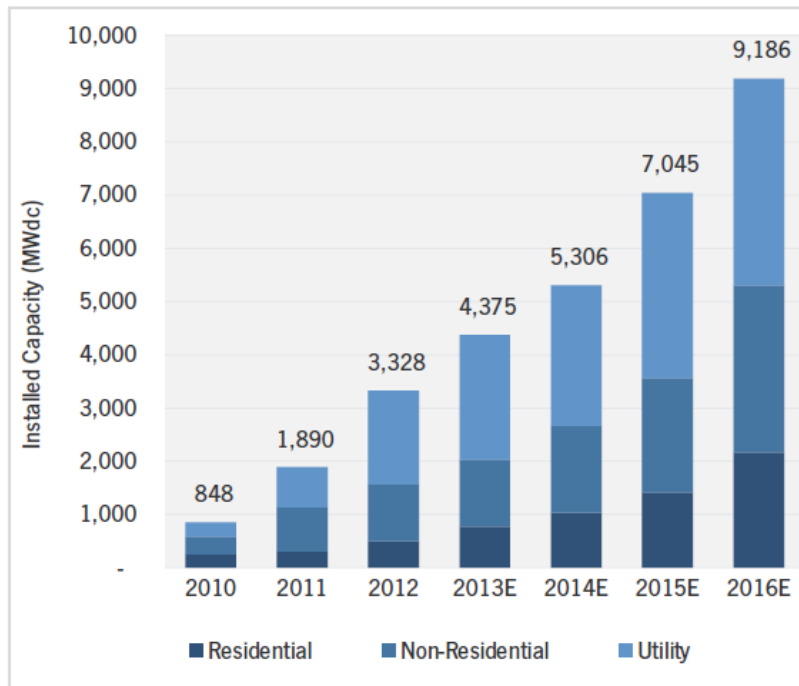
Figure 2.7 U.S. Polysilicon, Wafer, Cell, and Module Prices, Q1 2012-Q1 2013



図4 米国におけるポリシリコン、ウエハ、セル、モジュール価格の最近の変遷

米国のPV市場規模の変遷と今後の予測を図5に示す。順調な米国PV市場の成長を予測している。今後は、utility用の導入が進むと考えている。地域的には、2013年Q1の米国全体のPV設置量723MWのうち、カルフォルニア州408MWとダントツで、次いで、ニュージャージー州76MW、ハワイ44MWとなっている。今後の課題として、モジュールの信頼性と性能、Balance of System (BOS) コスト低減であると結んだ。

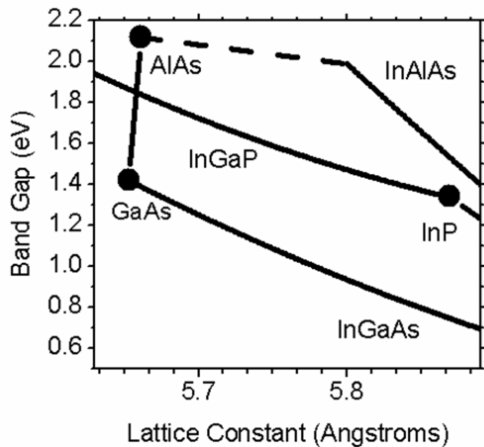
Figure 2.8 U.S. PV Installation Forecast, 2010-2016E



Complete forecast through 2017 by state and market segment available in Full Report

図5 米国のPV市場規模の変遷と今後の予測

(2) H. Branz (Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E)) は、“ARPA-E: Transformational Research for the U. S. Energy Future” と題して、基調講演を行った。Co₂放出の削減、効率向上、輸入削減等を意図し、技術的障壁の克服を狙いとして、ARPA-E プロジェクトを推進している。2009年から今日まで、34の分野で285のプロジェクトを推進している。最近の予算規模は、20011年、\$180M、20012年、\$275M、20013年、\$250M である。2012年には、66のプロジェクトが開始された。いくつかのプロジェクトのうち、太陽光発電関連のものが紹介された。①プロジェクト“50% lattice-matched PV pannels from InP wafer” に関しては、Dr. D.M. Osowski (Micro Link Devices) が、プロジェクトリーダーで、Micro Link Devices、NRL、Rochester Inst. Tech.などが、共同研究を進める。期間は、2013年3月20日~2016年3月19日、予算規模は、\$ 3.6Mである。図6、図7に示すように、InP基板に格子整合したInAlAs(Sb)/InGaAsP/InGaAs 3 接合セルを検討対象としている。3、4接合セルの4500倍以上の集光で、効率50%以上を目指す。図6は、開発対象のIII-V族材料の組み合わせを、図7は、開発対象の3 接合セルの構造を示す。図8に、3 接合セルのバンドギャップの組み合わせと高効率化の可能性を、図9は、4 接合セルのバンドギャップの組み合わせと高効率化の可能性を示す。



Detail of III-V material family focused on InGaAlAsP materials. The large change in band gap for $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ limits the bottom cell band gap in this region. $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ has an indirect band gap at lattice constants below 5.800\AA , indicated by dashed line, and a direct bandgap for larger lattice constants.

図6 開発対象の III-V 族材料の組み合わせ

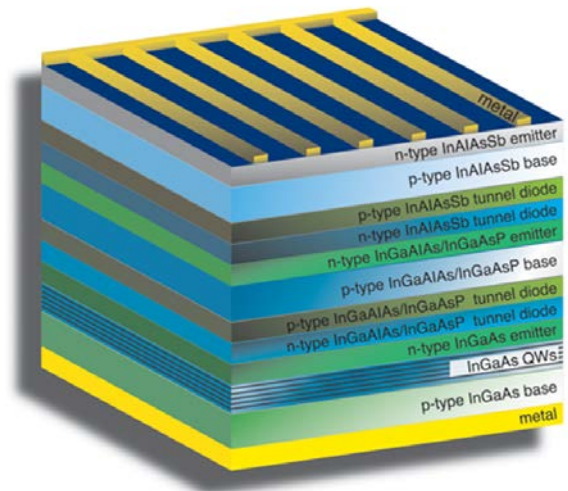
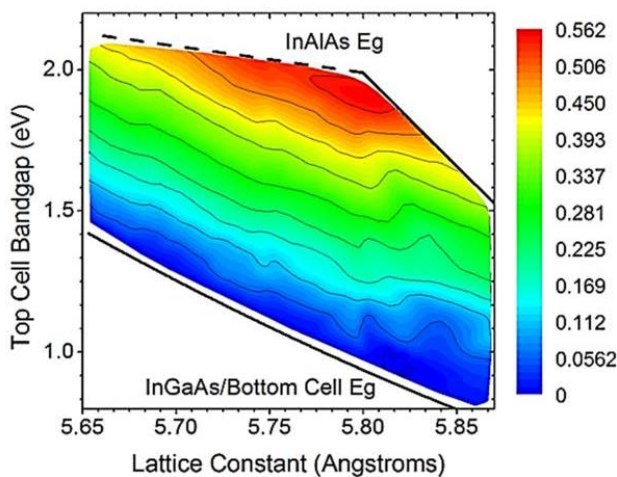
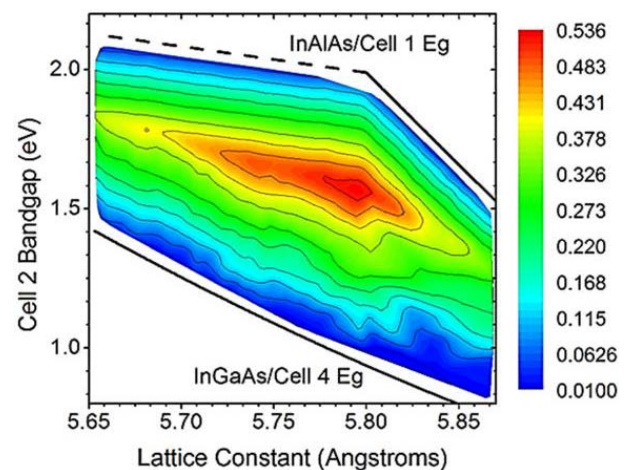


図7 開発対象の3接合セルの構造



Efficiency plot of three junction cells lattice matched between 5.65325 and 5.8687\AA calculated by detailed balance and shown as a function of top cell bandgap. The bottom cell bandgap is constrained to the InGaAs bandgap and top and middle cells are optimized. The band gap of InAlAs forms an upper limit for the top cell band gap at each lattice constant. The middle cell band gap is optimized for each point and not shown.

図8 3接合セルのバンドギャップの組み合わせと高効率化の可能性



Efficiency plot of four junction cells lattice matched between 5.65325 and 5.8687\AA shown as a function of cell 2 bandgap. The bottom cell is constrained to the InGaAs bandgap and the top cell is constrained to the InAlAs band gap. The second and third cells are optimized at each lattice constant. Cell 3 bandgap is optimized for each point and not shown.

図9 4接合セルのバンドギャップの組み合わせと高効率化の可能性

②プロジェクト“Optics For Full Spectrum, Ultrahigh-Efficiency Solar Energy Conversion”に関しては、Prof. H. Atwater (CALTECH) が、プロジェクトリーダーで、CALTECH、Spectrolab が共同研究を進める。期間は、2013年3月28日~2016年3月27日、予算規模は、\$ 2.4M である。詳細は、6.3の(2)を参照されたい。

6. 本会議のトピックス

プレーナリ講演を中心に、本会議のトピックスを紹介する。

6.1 基礎、新材料・デバイス分野：

N.J. Ekins-Daukes (Imperial College) は、“Routes to High Efficiency Photovoltaic Power Conversion” と題して、プレーナリ講演を行った。図 10 に示すように、単一接合セルでは変換効率31%、その集光動作では41%が限界である。図 11 は、単接合セルでの最高効率GaAs太陽電池の現状と限界を示す。GaAs太陽電池、効率28.8%が得られているおり、薄膜化とフォトンリサイクリングにより、さらなる高効率化が期待できるが、効率32.4%が限界である。

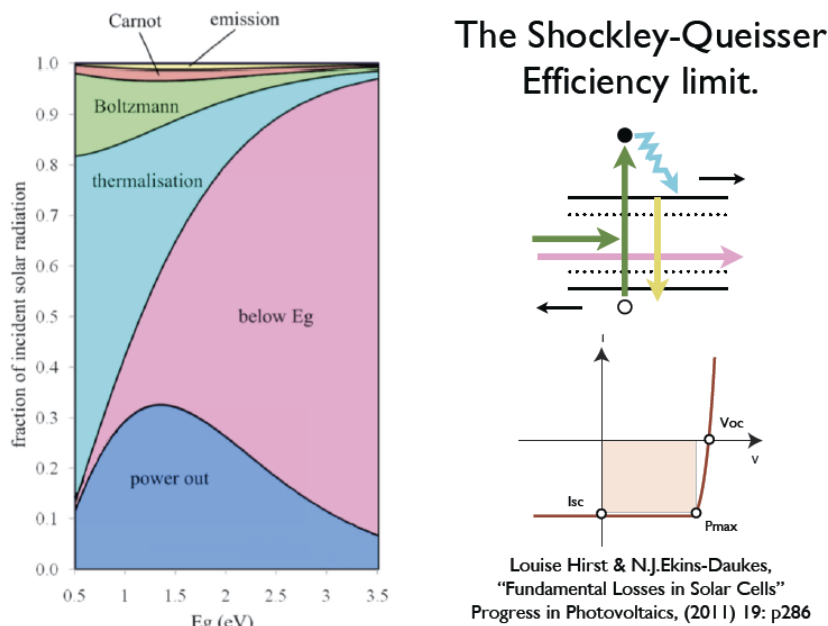


図 10 単接合太陽電池の効率限界

State of the art GaAs PV

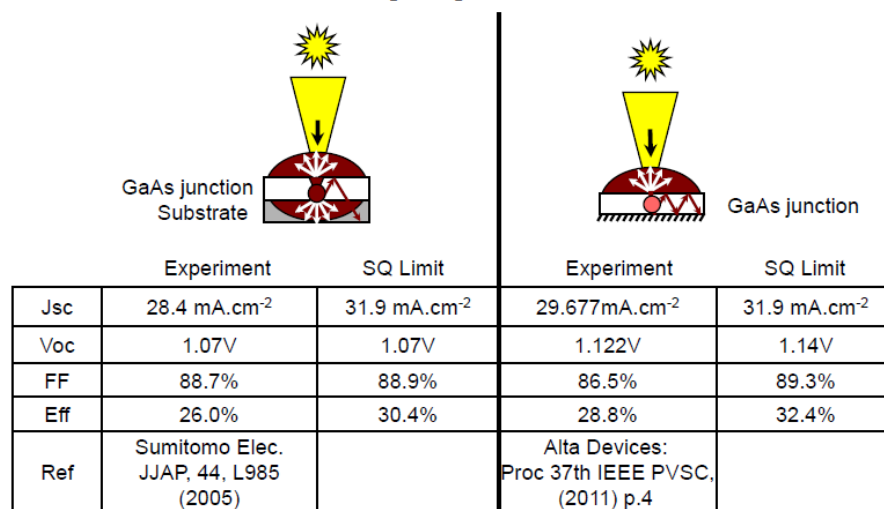


図 11 単接合セルでの最高効率GaAs太陽電池の現状と限界

高性能、低コストの第3世代の太陽電池技術に関する研究が必要である。高効率化のアプローチとして、図12に示す多接合構造太陽電池や中間バンド太陽電池がある。図13には、多接合化による損失低減と高効率化を示す。熱力学的考察から、最も現実的な多重バンドギャップの多接合セルの理想状態での変換効率は、表3に示すように、86.8%である。

Routes to High Efficiency

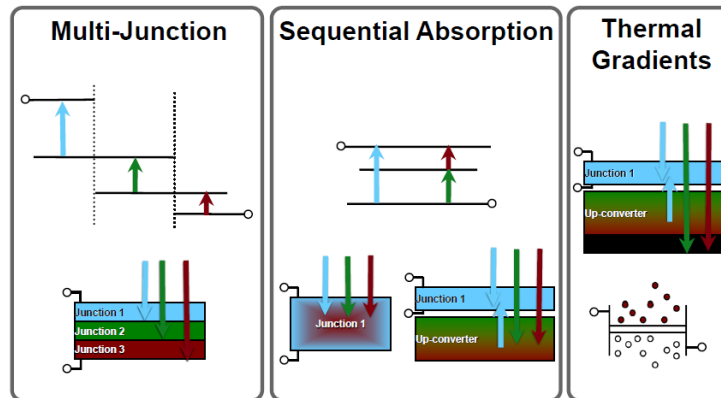


図12 高効率化が期待できる多接合太陽電池、中間バンド太陽電池やアップコンバージョン

Multi-junction solar cells

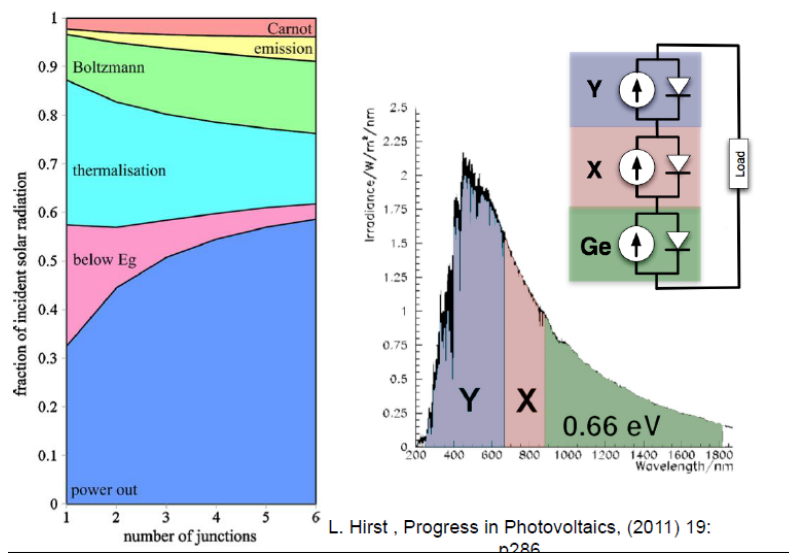


図13 多接合化による損失低減と高効率化

表3. 多接合セルの理想状態での理論変換効率

接合数	非集光	集光
1 接合	30.8%	40.8%
2 接合	42.9%	55.7%
3 接合	49.3%	63.8%
4 接合	68.2%	86.8%

この他、表 4 に示すように、衝突電離などの多重電子-正孔対生成の原理を利用できれば、変換効率 85.4%、ホットキャリアセルでは 86.2%、多重バンド励起が利用できれば 86.8% など、可能性が示唆され、実際的には、理論変換効率 $\times 0.8$ の変換効率 70% の実現が可能で、実用効率としては、さらに $\times 0.8$ の 55% の可能性があるとしている。6 接合タンデムの効率限界 58% より少し低い、関心が持たれている。

表 4. 第 3 世代太陽電池技術の提案と高効率化の可能性

概念	提案年	理想状態での変換効率
多接合	1955	86.8%
多重励起	1972	85.4%
ホットキャリア	1981	86.2%
マルチバンド (中間バンド)	1997	86.8%
量子井戸	1990	60%
不純物バンド PV	1960	63%

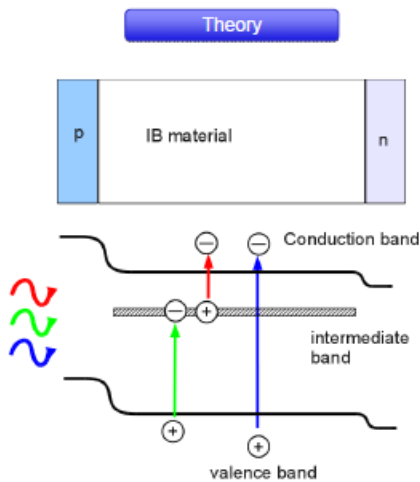


図 1 4 中間バンド構造太陽電池

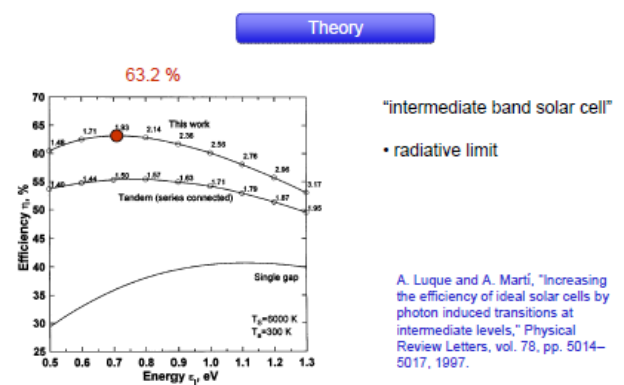
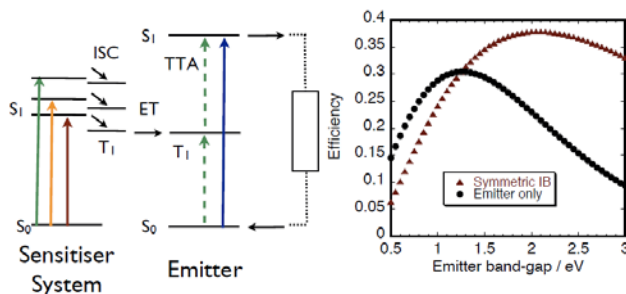


図 1 5 中間バンド構造太陽電池の高効率化の可能性

Symmetric Intermediate Band Solar Cell



N.J. Ekins-Daukes & T.W. Schmidt. Applied Physics Letters (2008) vol. 93 (6) pp. 063507

図 1 6 Imperial College 試算による中間バンド太陽電池の効率限界

Efficiency limits for up & down conversion

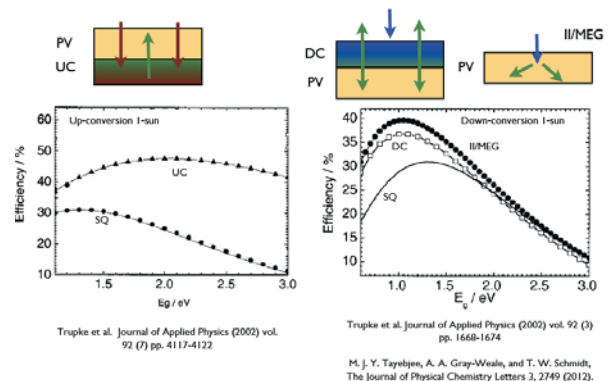


図 1 7 アップコンバージョン、ダウンコンバージョンの効率限界

単接合セルの $I_{sc}-V_{oc}$ のトレードオフを解決するために、図 1 4 に示すように、中間バンド構造太陽電池も提案されている。1.95eV、1.24eV、0.71eV の多重光励起過程の利用により、理論効率 63.2% が、図 1 5 に示すように、UPM のグループにより試算されていた。Imperial College のグループにより、中間バンド太陽電池の効率限界が試算され、図 1 6 に示すように、38% 程度が効率限界である。この他、図 1 7 に示すように、アップコンバージョン、ダウンコンバージョンの効率限界も試算されており、各々 47%、40% 程度である。

Imperial College のオリジナルである量子井戸 (QW) セルの状況も報告された。図 1 8 は、歪補償 GaAsP/InGaAs-MQW セルの分光感度特性、暗状態での I-V 特性を示す。非集光下では、非輻射再結合電流が支配的だが、集光下では、放射再結合が支配的となり、特性が改善されている。図 1 9 は、Imperial College からスピンオフした JDSU が作製した InGaP/InGaAs-MQW/Ge 3 接合セルの特性を示す。集光効率 41.5% が得られている。

Radiative recombination dominates at concentrator current levels

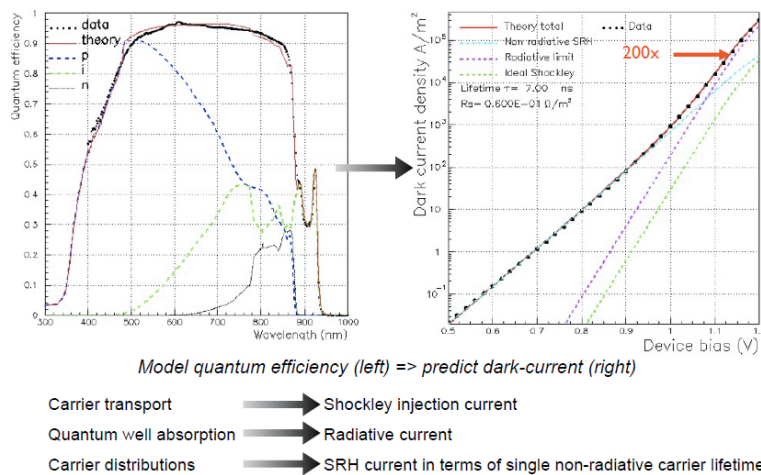


図 1 8 歪補償 GaAsP/InGaAs-MQW セルの分光感度特性、暗状態での I-V 特性

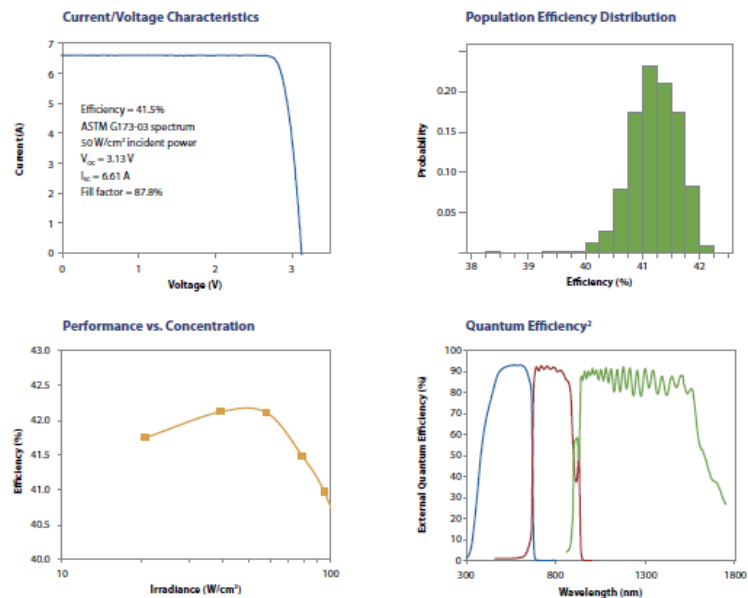


図 1 9 JDSU 作製の InGaP/InGaAs-MQW/Ge 3 接合セルの特性

6.2 CIGS、CdTe、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 $1\mu\text{m}$ でも高効率が期待できる。

(1) W. Shafarman (Univ. Delaware) は、”What’s Next Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film PV – Opportunities and Challenges”と題して、プレーナリ講演を行った。効率面では、小面積セルで、CIGS の 20.3% (ZSW) である。CIGS フレキシブルセルでは、最近、EMPA が、ポリイミド基板を用い、効率 20.4% を達成したとの事である。

本会議でも、M. Nakamura ら (昭和シェル石油、ソーラーフロンティア) は、“Achievement of 19.7% efficiency with a small-sized

Cu(InGa)(SeS)₂ solar cells”と題して、高効率化の進展を報告した。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 20 に示すように、面積 0.496cm^2 の CIGS 太陽電池で、効率 19.7% ($V_{oc}=7683\text{mV}$ 、 $J_{sc}=37.1\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=77.8\%$) を達成している。

表 5 に、CIGS の高効率セルの効率を示す。ベストの特性を組み合わせると、効率 22.2% が可能で、将来的には、効率 25% が期待できるとしている。CIGS 太陽電池モジュールについて

は、ソーラーフロンティアは、すでに、 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ のサブモジュールで効率 17.8% を達成していた。

Certified Efficiency of 19.7%

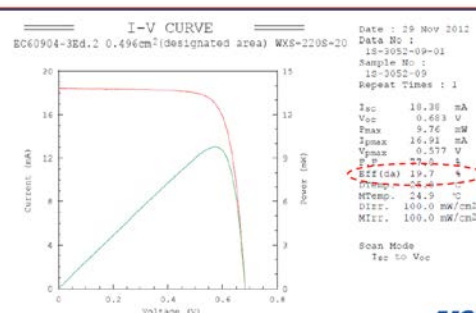


図 20 ソーラーフロンティアの高効率 CIGS 太陽電池の I-V 特性

表 5 CIGS 太陽電池効率の状況

Institute	Absorber formation	Buffer	Eff. (%)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	R_s (Ω/cm^2)	A	J_0 (A/cm^2)	Area (cm^2)
SF	Sputtering/SAS	$\text{Zn}(\text{O},\text{S},\text{OH})_x$	19.7	683	37.1	77.8	0.36	1.33	$8.4\text{E}-11$	0.496
ZSW	Co-evaporation	CdS	20.3	740	35.4	77.5	0.23	1.38	$4.2\text{E}-11$	0.500
NREL	Co-evaporation	CdS	20.0	692	35.7	81	0.37	1.14	$2.0\text{E}-12$	0.419

台湾の k-M. Lins ら (TSCS Solar) は、本会議で、 1m 四方のフルサイズの CdS バッファ CIGS セルモジュールで効率 15.7% を報告している。

W. Shafarman は、IGS 系太陽電池の特徴 (組成制御と混晶制御による $1.0\text{eV}\sim 1.7\text{eV}$ にわたるバンドギャップ制御、高光吸収係数、多結晶の粒界の質など) を述べた後、1975 年の Bell Lab. の CdS/CuInSe 太陽電池の効率 12% 以来の CIS、CIGS 太陽電池の歴史が語られた。成膜法として、三段階共蒸着、反応性スパタリング、インク印刷、電析などの長短も述べられた。

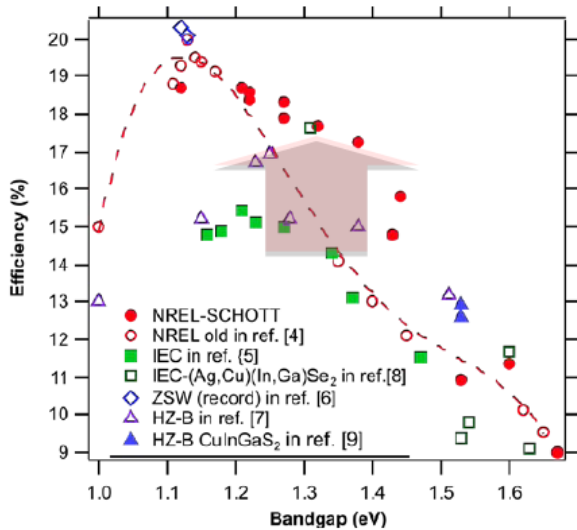


図 2 1 CIGS 系太陽電池の効率のバンドギャップ E_g 依存性

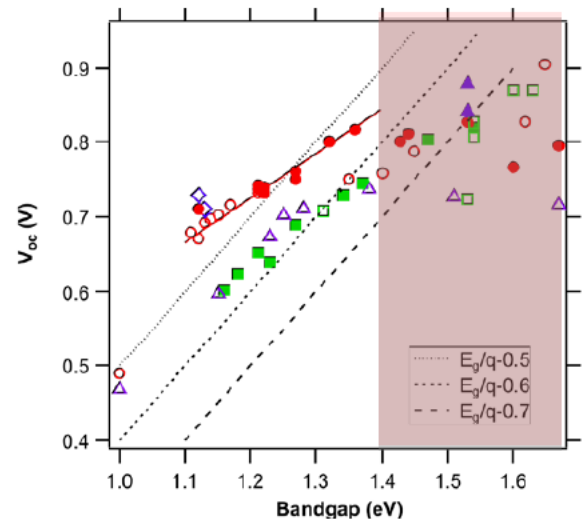


図 2 2 CIGS 系太陽電池の開放端電圧 V_{oc} のバンドギャップ E_g 依存性

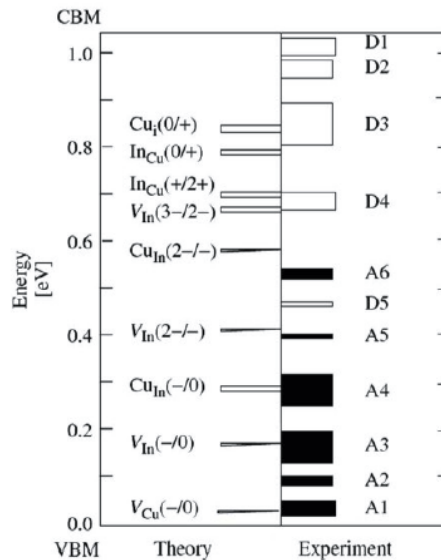


図 2 3 報告されている CuInSe_2 の欠陥準位

高効率化の課題は、薄膜成長の制御と高品質化、接合形成、界面、粒界や欠陥の理解と制御、ワイドギャップ材料の高品質化、バンドギャップグレーディング、デバイス構造設計、光マネジメント、などである。ワイドギャップ CIGS 混晶 ($\text{Cu}(\text{InAl})\text{Se}_2$, CuInGaSe_2 , $\text{CuIn}(\text{SeS})_2$, $(\text{AgCu})\text{InSe}_2$) の現状も述べられた。図 2 1 に、CIGS 系太陽電池の効率のバンドギャップ E_g 依存性を示す。 $E_g \sim 1.4\text{eV}$ 程度で高効率が期待できるが、図 2 1 に示すように、 $E_g \sim 1.12\text{eV}$ 付近で、効率ピークを持つ。図 2 2 は、CIGS 系太陽電池の開放端電圧 V_{oc} のバンドギャップ E_g 依存性を示す。 $E_g \sim 1.25\text{eV}$ では、 $E_g/q - V_{oc} = 0.4\text{V}$ 程度だが、 $E_g \sim 1.3\text{eV}$ では、 $E_g/q - V_{oc} = 0.5\text{V}$ 、 1.4eV では、 $E_g/q - V_{oc} > 0.6\text{V}$ と、バンドギャップ増加と共に、期待道理の V_{oc} が得られず、効率低下となっている。図 2 3 に、報告されている CuInSe_2 の欠陥準位を示す。 $E_v + 0.8\text{eV}$ の欠陥準位は、ワイドギャップ材料では、禁制帯内のミドル準位で、再結合中心と働いているとの見解が述べられた。

低コスト化の課題は、薄膜系のコストダウン、高スループットなどプロセス改良、ガラス、封止などのモジュールコストの改善が必要である。低コスト化に向けた、CIGS 活性層の薄層化についても述べられた。CIGS 活性層厚を $2\mu\text{m}$ から、 $1\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.2\mu\text{m}$ と薄層化すると、効率は、14.0%から、13.9%、13.7%、9.1%へと減少する。光マネージメント（テクチャー構造や裏面反射構造など）により、 $0.37\mu\text{m}$ 厚の CIGS 層の太陽電池でも、効率 17.5%程度を達成しているとの事である。

(2) M. Gloeckler (First Solar) は、“CdTe Solar Cells at the Threshold to 20% Efficiency” と題して、CdTe 太陽電池のニューレコード効率 19.05%を達成したことを報告した。1993 年～2003 年の CdTe セル効率のターゲット 19.0% ($V_{oc}=900\text{mV}$ 、 $J_{sc}=27\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=76.5$) に対して、2010 年段階では、セル効率 16.5% ($V_{oc}=845\text{mV}$ 、 $J_{sc}=25.9\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=75.5\%$)、量産ベースのモジュール効率 ($V_{oc}=791\text{mV}$ 、 $J_{sc}=19.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=62.2\%$) であった。その後、2012 年に、セル効率 17.3%を達成したが、すぐに、GE が、効率 18.3%を実現した。2013 年 4 月には、First Solar は、セル効率 18.7%、つい最近、19/05%のニューレコードのセル効率を達成した。最近の高効率 CdTe 太陽電池の特性をまとめて、ターゲット効率と比較して、表 6 に示す。TCO の改良で、短波長域 (300nm～400nm) の光透過が改善され、 $J_{sc}=28.6\text{mA}/\text{cm}^2$ が得られている。Voc 改善に向け、粒界、界面、ドーピング、空乏層が検討され、GE の $V_{oc}=857\text{mV}$ に対して、872mV に改善されている。少数キャリア寿命の改善が Voc の向上にもつながり、903mV も得られているとの事である。Voc 改善は、FF 改善にもつながる。モジュール効率は、16.1%が認定され、量産ベースのモジュール効率も、12%から、12.3%、13%へと改善予定である。モジュール効率向上には、直列抵抗損、面積損、スクライブ損等の改善が必要である。次のターゲットは、セル効率 22% ($V_{oc}=920\text{mV}$ 、 $J_{sc}=30\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=60\%$) と結んだ。

表 6 最近の高効率 CdTe 太陽電池の特性とターゲット効率との比較

	GE	First Solar	First Solar	Target
V_{oc} (mV)	857	852	872	900
J_{sc} (mA/cm ²)	27.0	28.6	28.0	27.0
FF (%)	79.0	77.7	78.0	78.5
η (%)	18.3-	18.7	19.05	19.0

(3) T.K. Todorov ら (IBM) は、“High-Efficiency Devices with Pure-Solution-Processed $\text{Cu}_4\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_2$ Absorbers” と題して、CZTS 系太陽電池について講演した。

CdTe や $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) は、高効率で低コストの薄膜太陽電池として期待され、年産 1～2.5GW の生産レベルにある。しかし、CdTe や CIGS は、高価で資源量に制約がある Te、In や Ga で構成されている。例えば、効率 13%の CIGS セルで TW 生産を行うには、4 万トンの In が必要で、2010 年の In 生産量が 600 トンで、ディスプレイ市場での In の需要を考慮すると、年産 10GW 以下の CIGS 生産と危惧される。Cd は、重金属で、将来、限られた市場のみに制限される危惧がある。CdTe や CIGS に代わる高効率が期待でき、豊富なカルコゲナイド薄膜太陽電池材料として、 Cu_2S 、 FeS_2 (pyrite)、SnS や $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ (CZTSSe) などがある。本研究は、CZTSSe に着目したもので、効率 10%以上の CZTSSe 太陽電池実現に向けた取り組みを述べた。材料的には、1988 年の伊東、中沢 (信州大) が早く、太陽電池としては、1996 年の片桐ら (長岡工業高専) が先駆けである。IBM でも、構成材料組成の最適化 ($\text{Cu}/(\text{Zn}+\text{Sn}) \approx 0.9$ 、 Zn/Sn

≈ 1.2)、共蒸着 600nm 厚の CZTS 吸収層を用い 効率 8.4 % ($V_{oc}=661\text{mV}$ 、 $J_{sc}=19.5\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=65.8\%$ 、面積 $=0.446\text{cm}^2$) が得られていた。その後、ナノ粒子とヒドラジン溶液のハイブリッド堆積法を開発し、バンドギャップ E_g 制御のため、Se 導入を検討し、2010 年には、効率 9.7% ($V_{oc}=516\text{mV}$ 、 $J_{sc}=28.6\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=65.4\%$ 、面積 $=0.44\text{cm}^2$) が得られた。2011 年には、CZTSSe ($E_g=1.15\text{eV}$) を用い、効率 10.1% ($V_{oc}=517\text{mV}$ 、 $J_{sc}=30.8\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=63.7\%$ 、面積 $=0.45\text{cm}^2$) が得られている。一方、CZTS ($E_g=1.04\text{eV}$) を用いても、同じ効率 11.1% ($V_{oc}=423\text{mV}$ 、 $J_{sc}=38.7\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=61.9\%$) が得られている。CdS/CIGS セルとの特性の違いから、課題は、 FF と V_{oc} であり、要因として、直列抵抗や界面障壁や CZTSSe 中の欠陥などが考えられる。少数キャリア寿命測定では、CZTSSe の 3.1ns に対して、CZTSe では 10ns である。CIGS では、 V_{Cu} (0.03eV) の浅いアクセプター欠陥が効果的効いていたが、CZTSSe では、 V_{Cu} よりも、 Cu_{Zn} (0.12eV) の深いアクセプター欠陥が効いているようである。2012 年 3 月に、進展が見られ、 MoS_x/Mo 基板上の CZTSSe ($E_g=1.12\text{eV}$) を用い、効率 11.1% ($V_{oc}=460\text{mV}$ 、 $J_{sc}=34.5\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=69.8\%$ 、面積 $=0.447\text{cm}^2$) が得られている。最近、同じ 11.1% ($V_{oc}=474\text{mV}$ 、 $J_{sc}=32.8\text{mA/cm}^2$ 、

$FF=70.7\%$ 、面積 $=0.45\text{cm}^2$) が得られているが、 $E_g/q-V_{oc}>0.67\text{V}$ と大きい。図 2 4 に、CZTSSe 太陽電池の電流-電圧特性、分光感度特性を示す。

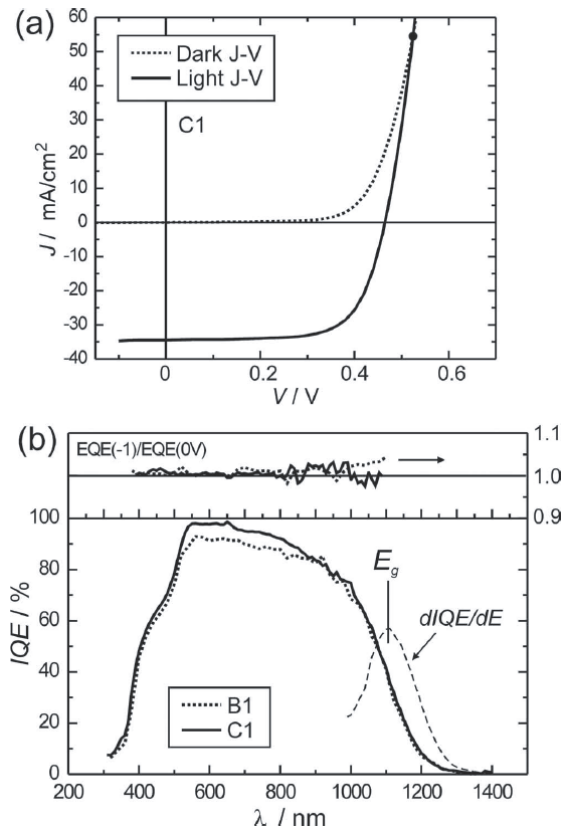


図 2 4 CZTSSe 太陽電池の電流-電圧特性、分光感度特性

表 7 高効率 CZTSSe 太陽電池と同等のバンドギャップ材料を用いた CZTSSe 太陽電池のデバイス特性

Cell	Eff	FF	V_{oc}	J_{sc}	$R_{SL}^{a)}$	$A^{a)}$	E_g	$E_g/q-V_{oc}$
	%	%	mV	mA cm^{-2}	$\Omega \text{ cm}^2$		eV	V
C1	11.1*	69.8*	459.8*	34.5*	0.40	1.5 (1.3)	1.13	0.670
C2	10.8*	68.7*	456.9*	34.4*	0.60	1.6 (1.3)	1.13	0.673
C3	10.9	66.6	468.8	35.0	0.55	1.7 (1.3)	1.13	0.661
C4	10.6	67.0	469.6	33.8	0.47	1.7 (1.3)	1.13	0.660
C5	11.1	69.7	460.6	34.6	0.52	1.6 (1.2)	1.13	0.669
C6	10.8	62.7	447.4	38.6	0.76	2.0 (1.3)	1.09	0.643
B1	9.5	64.4	449.6	32.8	0.50	1.8 (1.4)	1.13	0.680

*Values measured and certified by Newport; ^{a)} R_{SL} and A are the series resistance and ideality factor determined from light $J-V$ data using Sites' method.^[22] The values in parentheses are determined using $J_{sc}-V_{oc}$ data.^[27]

表7に、高効率 CZTSSe 太陽電池と同等のバンドギャップ材料を用いた CZTSSe 太陽電池のデバイス特性を示す。材料の不均一性や欠陥、低不純物濃度などが課題と考えられ、LBIC や PL 解析がなされている。CdS に代わる In_2S_3 などのバッファ層の検討も進めているとの事である。Voc=520mV が得られれば、効率 12.5% は近いと結んだ。

(4) H. Hiroi ら (昭和シェル石油、ソーラーフロンティア) は、” High Voltage $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Submodules by Hybrid Buffer Layer” と題して、H. Sugimoto ら (昭和シェル石油、ソーラーフロンティア) は、” Lifetime Improvement for High Efficiency $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Submodules” と題して、CZTS に関する最近の状況を報告した。図25に、CZTS、CZTSSe サブモジュールの I-V 特性を示す。スパッタリング堆積法を用い、CdS バッファ層や $\text{In}_2\text{S}_3/\text{CdS}$ ハイブリッドバッファ層および吸収層の改良、TCO ($\text{ZnO}:\text{B}$) / $\text{In}_2\text{S}_3/\text{CdS}/\text{CZTS}$ (あるいは CZTSSe) Mo/glass 造の 14cm^2 のサブモジュールで、各々、効率 9.19%、10.8% を得ている。また、PL 解析もなされ、Voc 等太陽電池特性向上の指針としている。

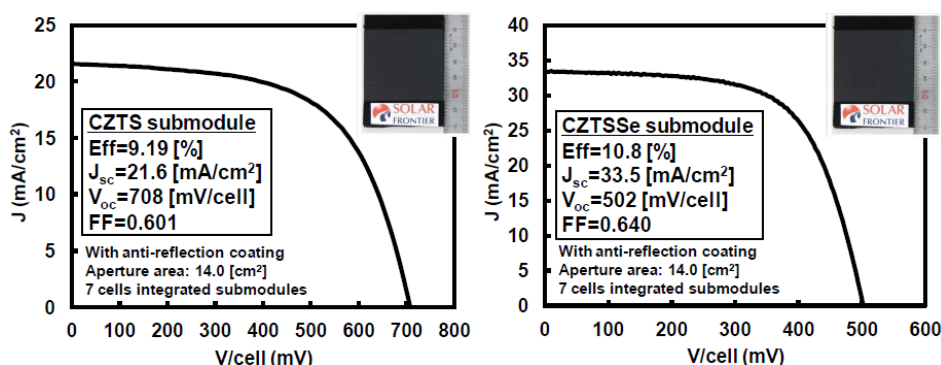


図25 CZTS、CZTSSe サブモジュールの I-V 特性

6.3 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 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) M. Yamaguchi、(豊田工大)、A. Luque (UPM) は、” Outline of Europe-Japan Collaborative Research on Photovoltaics” と題して、2011年6月1日から開始された、図26に示す「集光型太陽光発電に関する日欧共同研究開発」の概要と、さらなる高効率化を狙いとした4、5接合太陽電池用新材料のアプローチについて述べた。

図27に、単接合太陽電池の高効率化の現状と限界を示す。GaAs、Si、InP、CIGS、CdTe、色素、有機、a-Si で、各々、28.8%、25.0%、22.2%、20.4%、18.3%、11.9%、11.1%、10.1% が得られているが、単接合太陽電池では、効率 30% が限界である。III-V 族化合物半導体の多接合太陽電池の集光動作は、図28に示すように、効率 50% 以上の超高効率化と 50 円/W 以下の低コスト化が期待できる。

EU-Japan Project “NGCPV”

A New Generation of Concentrator Photovoltaic Cells,
Modules and Systems



Aim of the Project “NGCPV”

...to accelerate the move to very high efficiency and lower cost
Concentrator Photovoltaic (CPV) technologies



Courtesy
: Daido
and BSQ,

M. Yamaguchi (TTI) & Y. Okada (Univ. Tokyo)

A. Luque (UPM) & A. Bett (FhG-ISE)



図 2 6 「集光型太陽光発電に関する日欧共同研究開発」の概要

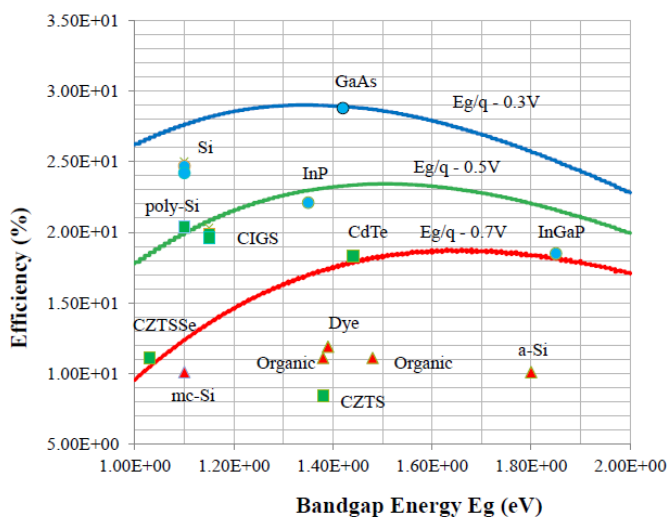


図 2 7 単接合太陽電池の高効率化の現状と限界

Price experience curves, Si flat plate and III-V CPV

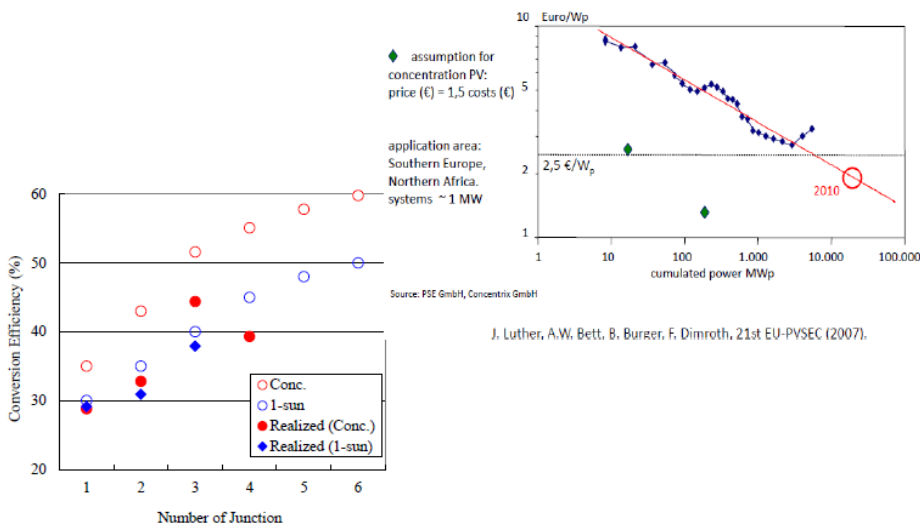


図 2 8 III-V 族化合物半導体多接合太陽電池の集光動作による超高効率化と低コスト化の可能性

本プロジェクトは、図 2 6 に示すように、日欧の専門家の協力により、集光太陽光発電の研究開発と実用化の加速化を狙ったものである。本プロジェクトで、シャープが開発した InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の集光特性が、FhG-ISE で測定され、図 2 9 に示すように、つい最近、250~300 倍集光下で 44.4% の世界最高効率が実現している（2013. 6. 14 にプレスリリース）。

シャープは、図 3 0 に示すように、先に、InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池で 37.9% と、非集光動作下での世界最高効率を達成しているが、今回、電極設計等、直列抵抗および光損失の低減をはかって、集光下でも世界最高効率を達成したものである。図 3 1 は、各種太陽電池の高効率化の推移を示す。

また、大同特殊鋼は、本プロジェクトにおいて、UPM や宮崎大との共同研究成果として、303cm² サブモジュールで、効率 34.6% を実現しているとの事である。

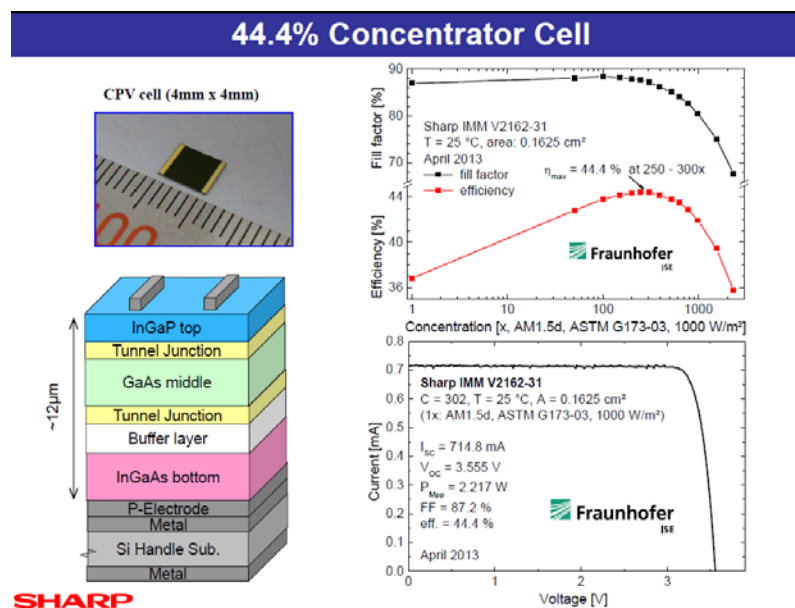


図 2 9 シャープ開発の世界最高効率 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合セルの集光特性（FhG-ISE で測定）

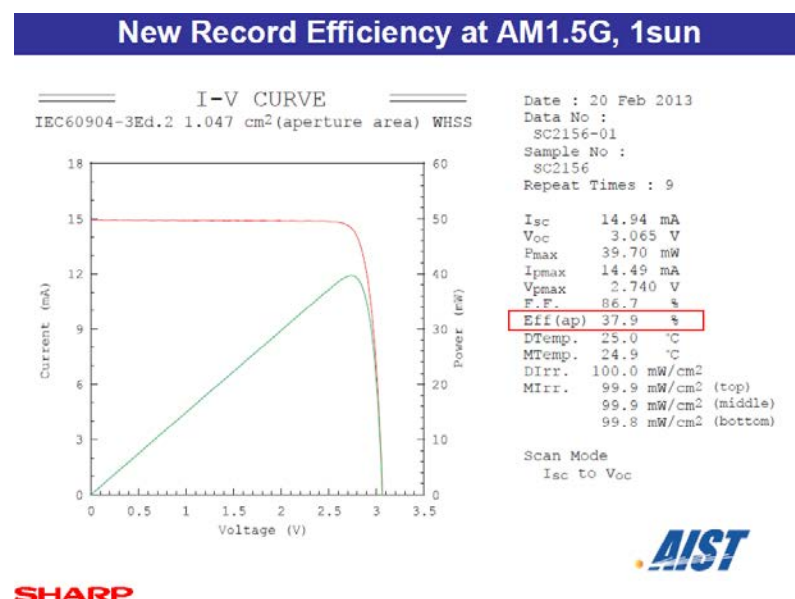


図 3 0 非集光下での世界最高効率 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の I-V 特性

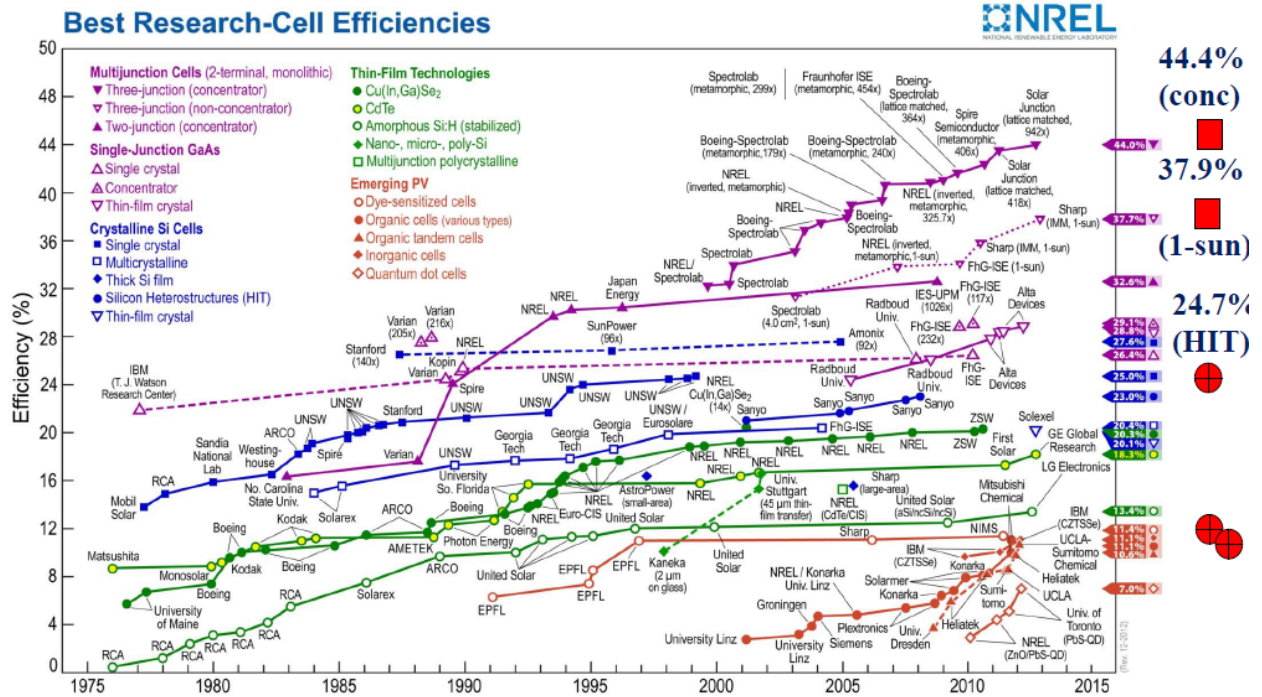


図 3 1 各種太陽電池の高効率化の推移

(2) H. Atwater (CALTEC)は、“Full Spectrum High Efficiency Photovoltaics”と題して、プレーナリ講演を行った。前述の5. (2)の②のAdvanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E)プロジェクトに採択されたテーマに関する発表であった。

III-V族化合物半導体の高効率化の達成

(Alta DevicesのGaAs薄膜セルで効率28.8%)をベースにして、効率40%以上で、低コスト化 (< \$ 0.5/W)を同時に達成しようというものである。Full Spectrumを狙ったもので、図32に示すように、反射鏡を利用し集光し、光学系(プリズム、薄膜あるいはナノスケールの光学フィルター、ホログラム等)で波長分離し、材料の異なる6~15のサブセルで受光するものである。サブセルとして、例えば、2.13eV (AlInGaP) / 1.84eV (InGaP) / 1.65eV

(AlGaAs) / 1.42eV (GaAs) / 1.15eV (InGaAsP) / 0.94eV (InGaAsP) / 0.74eV (InGaAs)を考えているとの事である。

500倍集光で、45%が可能との事である。ELO(Epitaxial-Lift-Off)、光学設計、アセンブリなど、種々の技術開発が必要で、複雑で、どのように実現するのか具体性に欠け、非常にチャレンジングな印象である。

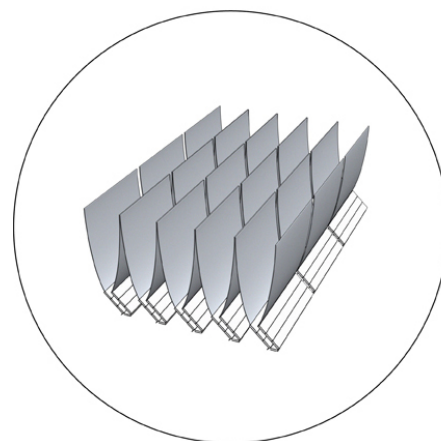


図 3 2 提案の集光システム

6.4 結晶Si太陽電池分野：

(1) J. Zhao (China Sunenergy) は、“A 20% efficient PERC type cell and prospects for the future of high efficiency cell technologies” と題して、プレーナリ講演を行った。結晶Si太陽電池の世界最高効率ホルダーとして、結晶Si太陽電池の研究開発の歴史が述べられた。図33は、結晶Si太陽電池の高効率化の変遷を示す。彼が所属していたUNSWは、1984年のMIS/MINPセル（oxideパッシベーション、Alゲッタリングで効率19.1%）以来、高効率化に貢献してきている。1986年には、PESCセル（oxideパッシベーション、マクログループと二層反射防止膜による光反射損低減）で効率20%を超えた。1988年には、PERC（Passivated Emitter and Rear Contact）セルが提案され、効率22.3%が達成されている。図32には、PERCセルの構造、特徴と特性を示す。

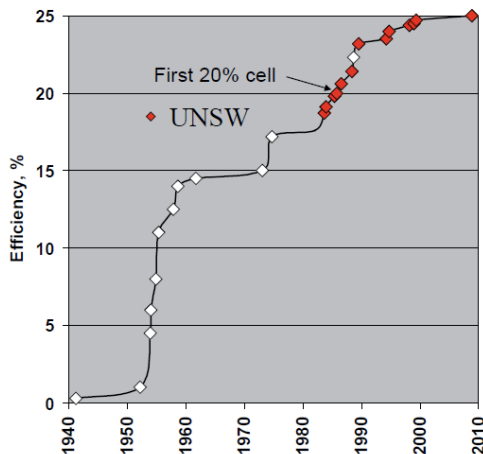
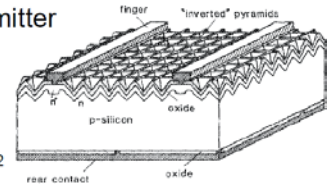


図33 結晶Si太陽電池の高効率化の変遷

1994年には、彼が中心となって、PERL（Passivated Emitter and Rear Locally-diffused）セルが提案され、1999年には、効率24.7%が達成された。その後、スペクトル見直しにより、効率25.0%に修正されている。図35には、PERLセルの構造、特徴と特性を示す。

PERC cells (UNSW, 1988)

- TCA processing to preserve lifetime
- Un-diffused point contacts thru rear oxide
- Double diffused emitter
- Inverted pyramids
- 22%
 - Voc: 670-705 mV
 - Jsc: 38-40 mA/cm²
 - FF: 81-82%

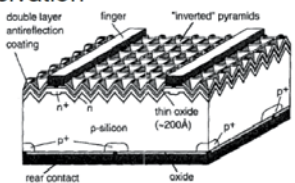


• A.W. Blakers, A. Wang, A.M. Milne, J. Zhao and M.A. Green, "22.8% Efficient Silicon Solar Cell", Appl. Physics Letters, Vol. 55, pp. 1363-1365, 1989

図34 PERCセルの構造、特徴と特性

PERL

- Boron point-diffusions
- Improved inverted pyramids
- Improved oxide passivation
- Grid re-design
- 24-25%
 - Voc: 700-715 mV
 - Jsc: 41-42 mA/cm²
 - FF: 82-83%



• J. Zhao, A. Wang, P. Altermatt and M. Green, "24% efficient silicon solar cells", 24th IEEE PVSC, 1994

図35 PERLセルの構造、特徴と特性

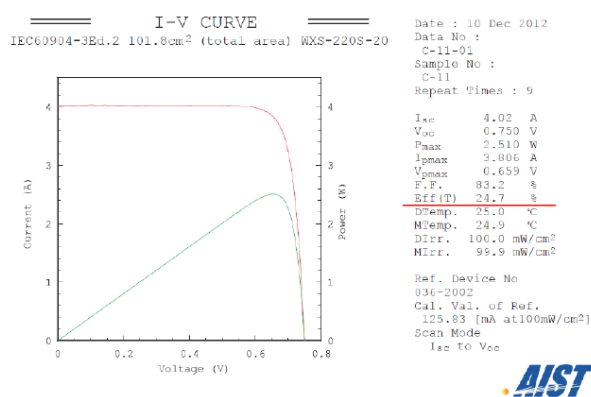
CSUNでは、PERCセル生産に向けて技術開発を進めている。SiO₂の表面パッシベーションとSiNのAR膜、裏面SiO₂/SiN二層パッシベーション、表面、裏面とも、スクリーン印刷Agが裏面はAlペーストが用いられ、156cm²セルで効率20.3%（Voc=656mV、Isc=39.7mA/cm²、FF=77.9%）が作製されている。モジュール出力も、275W前後の現状である。金属のコンタクトの強度試験やELイメージ等による分析がなされ、FFの改善もはかられている。Bifacialセル構造も検討され、実効効率21.56%との事である。表面Agコンタクト、テックスチャー構造、SiO₂/SiN_x表面、裏面パッシベーション、n⁺エミッター、p-Siベース、p⁺-BSF、裏面AgAl

コンタクト、裏面はフラット、スクリーン印刷メタリゼーション、などが要素技術である。適用地域によっては、40%の出力向上が見込まれるとの事である。通常条件/草地/セメント地面/降雪地は、各々、337W/368W/393W/448Wの出力であり、Bifacialセル構造は魅力的との見解であった。今後は、 Al_2O_3 パッシベーション、イオン注入、BSR、レーザーパターンニング、GaドープCZ結晶、等に関心があるようで、予備検討ではあるが、Gaドープ200 μ m厚CZウエハを用い、効率21.9% ($V_{oc}=680mV$ 、 $I_{sc}=41.6mA/cm^2$ 、 $FF=78.6\%$)を得ているとの事である。2014年には、PERCセル、bifacialセル、あわせて50MW生産を開始する予定である。

(2) 結晶Si太陽電池に関するDiscussion Sessionも企画された。UNSWのPERLセルは、4cm²で、効率25.0% ($V_{oc}=706mV$ 、 $J_{sc}=42.7mA/cm^2$ 、 $FF=82.83\%$)、SunPowerが、158.9cm²のn-SiのIBCセルで、効率24.2% ($V_{oc}=721mV$ 、 $J_{sc}=40.46mA/cm^2$ 、 $FF=82.3\%$)の現状である。ヘテロ接合型も最近の傾向である。

M. Taguchiら (Panasonic, Sanyo Elec.) ”24.7% Record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer”と題して、HIT太陽電池の最新成果を報告した。図36に示すように、98 μ m厚の10cmx10cmセルで効率24.7% ($V_{oc}=750mV$ 、 $J_{sc}=39.6mA/cm^2$ 、 $FF=83.2\%$)を達成している。IBCセル、PERLセルより、パッシベーション効果と薄型化等により、高い開放端電圧 $V_{OC}=750mV$ が達成している。

24.7% with large-area (>100cm²), thin (98 μ m) HIT cell ¹



Panasonic ideas for life

Panasonic, News Release (2013.2.12)

図36 Panasonic (Sanyo Elec.) によるニューレコード効率24.7%の98 μ m厚の10cmx10cmHIT太陽電池のI-V特性

その後、ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic) ロードマップに基づいて、議論がなされた。なお、ロードマップITRPVの第4版は、www.itrpv.netで入手できる。

6.5 アモルファス、ナノ／マイクロ結晶薄膜Si太陽電池分野：

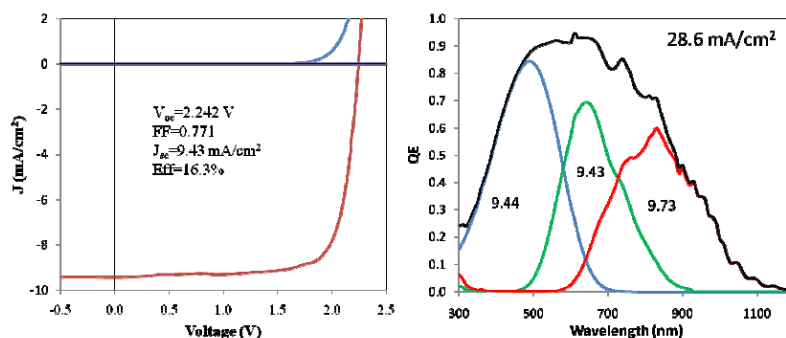
(1) A. Feltrinら (Kaneka) は、“Recent Progress of Thin Film Silicon Photovoltaics”と題して、プレーナリ講演を行った。薄膜Si PVは、大規模PVに適したものとして期待されていながら、昨今のPV市場の急激な成長に対応できなくなっている。課題は、言うまでもなく、効率向上、光劣化抑制、コスト低減である。薄膜Si太陽電池の現状が報告された。表8に、高効率薄膜Si太陽電池特性の認定データ (Solar cell efficiency tables (version41); M. Green et al., Progress in Photovoltaics, 21, 1 (2013).) を示す。a-Siセル、nc-Siセルの最高安定化効率は、1cm²程度の小面積で10.1%で、Oerlikon Solar、Kanekaによる。Kanekaは、a-Si/nc-Si 2 接合タンデムの小面積セル (0.962cm²)、サブモジュール (14.23cm²) の安定化効率、各々、12.3%、11.7%を以前、達成している。a-Si/nc-Si/nc-Si 3 接合タンデムの小面積セル (1.006cm²) で、LG Electronicsは、安定化効率13.4%を達成している。UniSolarが3 接合タンデムで初期効率16.3% (図37) を達成している。

表8 高効率薄膜Si太陽電池特性の認定データ

Classification ^a	Effic. ^b (%)	Area ^c (cm ²)	V _{OC} (V)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF ^d (%)	Test centre ^e (and date)	Description
Amorphous/ Nanocrystalline Si							
Si (amorphous)	10.1 ± 0.3 ^m	1.036 (ap)	0.886	16.75 ^f	67.8	NREL (7/09)	Oerlikon Solar Lab, Neuchatel [26]
Si (nanocrystalline)	10.1 ± 0.2 ⁿ	1.199 (ap)	0.539	24.4	76.6	JOA (12/97)	Kaneka (2 μm on glass) [27]
a-Si/nc-Si/nc-Si (thin film)	13.4 ± 0.4 ^p	1.006 (ap)	1.963	9.52 ^h	71.9	NREL (7/12)	LG Electronics [15]
a-Si/nc-Si (thin film cell)	12.3 ± 0.3% ^q	0.962(ap)	1.365	12.93 ^f	69.4	AIST (7/11)	Kaneka [29]
a-Si/nc-Si (thin film submodule)	11.7 ± 0.4% ^{r,s}	14.23 (ap)	5.462	2.99	71.3	AIST (9/04)	Kaneka [30]

Tripel-junction with a-SiGe:H as middle cell

16.3 % initial efficiency recently demonstrated !



UNI-SOLAR

J. Yang et al., to be publ in APL 2011

図37 UniSolarによる3接合薄膜SiタンデムセルのI-V特性と分光感度特性

a-Siセルの劣化抑制、表面テクスチャーやlight trapping、裏面反射、透明導電膜の光

吸収抑制、導電率向上への効果が述べられた。Kaneka SOLARTECH Corp. は、1998年に設立され、120MWの生産能力を有する。現在、効率10.5%の151Wモジュールが生産されている。初期効率11.7%で、183W初期出力モジュール ($1.42 \times 1.1 \text{m}^2$) も開発中で、当面、roof-tile など、roof-top市場、シースルーモジュールを適用対象としているとの事である。

NEDOプロジェクトの薄膜Si-PVコンソーシアムの概要も紹介された。高スループットG5のVHF-CVD装置開発(成膜速度 2.3nm/sec で、 $\text{uniformity} < \pm 8.5\%$)、光劣化抑制、a-Si、nc-Siセル開発や薄層化の試みも述べられた。AISTは、nc-Siの小面積セル (0.997cm^2) で、安定化効率10.5% ($V_{oc}=521 \text{mV}$ 、 $J_{sc}=28.2 \text{mA/cm}^2$ 、 $FF=71.5\%$) を達成している。最近、EPFLは、15.9%を達成しているとの事である。温度特性についても触れ、a-Si/a-Siタンデム $-0.2\%/K$ 、a-Si/nc-Siタンデム $-0.35\%/K$ 、単結晶Si $-0.3 \sim -0.49\%/K$ 、CdTe $-0.27\%/K$ 、CIGS $-0.37 \sim -0.45\%/K$ 、である。多接合化にも言及し、シミュレーションでは、4接合タンデムセルで、効率20.3%が試算されている。

課題は、モジュールの安定化効率15%以上、CVDコスト低減、スループット、yield、a-Siの光劣化抑制、などである。

6.6 有機太陽電池分野：

K. Leoら (Tech. Univ. Dresden) は、“Recent progress in organic solar cells: From a lab curiosity to a serious photovoltaic technology” と題して、プレナリ講演を行った。

Konarka社が撤退する中、種々の機関が参入している印象である。有機系太陽電池は、大面積化、フレキシブル、カラフル、低コスト化の特徴を有する。最近のOLEDは、有機系太陽電池への関心を押し上げている。しかし、有機太陽電池は、低分子リゴマー、ポリマーの狭い吸収波長領域、低移動度、低拡散長により低効率であり、バルクヘテロ接合 (BJT) やタンデム化のアプローチが有効である。真空堆積は、溶媒不要、タンムセル作製可能(界面劣化少ない)、大面積製造可能、コスト低減の可能性、があると強調した。

これまで、三菱化学は、低分子系で効率11%を実現している。Heliatekは、有機系タンデムで効率10.7%、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。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、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。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。色素系では、効率12.3%の現状である。

タンデム化のための材料のアプローチが紹介された。Conjugated A-D-A オリゴマー、DCV6T (光学ギャップ $E_g=1.55 \text{eV}$ 、 $V_{oc}=0.87 \text{V}$) やHDR014 ($E_g=1.77 \text{eV}$ 、 $V_{oc}=1.04 \text{V}$)、ZnPc ($E_g=1.46 \text{eV}$ 、 $V_{oc}=0.6 \text{V}$) などである。Heliatek社では、ガラス基板上のこれらのp-in-構造による 1cm^2 タンデムセルが作製され、効率10.7% ($V_{oc}=1.71 \text{V}$ 、 $J_{sc}=9.23 \text{mA/cm}^2$ 、 $FF=67.8\%$) が得られている。最近12%が得られているとの事である。温度 55°C 位までは、温度上昇と共に、効率が上がるとの事である。 122cm^2 のサブモジュールでは、真性効率9.8%である。信頼性も検討されている。Heliatek社では、両面ガラス封止セルは、20%以上もつと述べていた。製造コストとして、 $\$ 23.4 \sim \$ 37.5/\text{m}^2$ が試算されている。市場として、色調、半透明性や柔軟性を生かした携帯機器、ビル、屋内応用などを考えている。

有機太陽電池を実用技術にするのは、セル効率15%以上、モジュール効率12%以上が必要であろう。

6.7 宇宙用太陽電池およびシステム分野：

R. Waltersら（NRL）は、“TacSat-4 Radiation Environment and Solar Cell Degradation Correlations Using Onboard Experiments”と題して、プレーナリ講演を行った。ONRとNRLの衛星：TacSat-4は、2011年9月27日に打ち上げられ、HEO軌道（70kmv12050km、63.4°）を航行している。CEASE放射線スペクトロメータによる放射線計測とIII-V族3接合太陽電池のI-V特性評価を連携して、放射線損傷面から、放射線環境モデルを構築することにある。太陽電池特性実験では、予想より大きな劣化を示し、すでにミッション寿命の半分に到達している。CEASE放射線スペクトロメータによる計測では、放射線環境モデル（AE8/AP8）および改訂版（AE8/AP9）より高い強度の陽子線と低強度の電子線を検出している。CEASEデータとNRLコードSCREAMを用い、放射線環境モデルの構築を行った。図38は、HEO軌道上太陽電池アレイの出力低下の経時変化の実際と各モデルによる出力低下予測との比較を示す。CEASE放射線スペクトロメータによる放射線計測を利用することにより、予測精度が上がっている。TacSat-4の経験は、将来のHEOやGEO-transfer衛星の太陽電池アレイに有効であり、軌道上放射線計測が重要であるとまとめた。

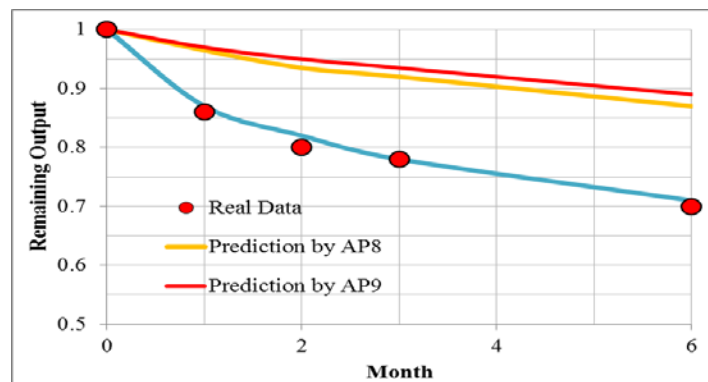


図38 HEO軌道上太陽電池アレイの出力低下の経時変化の実際と各モデルによる出力低下予測との比較

6.8 キャラクターリゼーション：

T. Trupkeら（UNSW）は、“Photoluminescence in Silicon Photovoltaics: A Cinderella Story?”と題して、プレーナリ講演を行った。結晶シリコン太陽電池、結晶、モジュールの研究開発や製造段階で、フォトルミネッセンス（PL）が広範囲に使われるようになっていく。PLによる評価解析の理論的な取り扱いに関して、図39に示す1954年のvan Rosbroeck、Shockley以来の歴史的な流れが、紹介された。Electro Luminescence（EL）イメージングは、冬木先生のグループ（奈良先端院大）が先駆的な仕事をなした。今回は、PLイメージングに関して、Trupke氏のグループの研究開発の主要な成果が報告された。2007年には、UNSWをスピンオフして、BT imaging社が設立されている。図40には、結晶SiのPLスペクトル、強度と少数キャリア寿命との対応を示す。

Theoretical work

- van Roosbroeck and Shockley, 1954

$$dr_{sp}^0 = C \cdot \alpha(\hbar\omega) \cdot (\hbar\omega)^2 \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1} d(\hbar\omega)$$

$$dr_{sp} = \frac{n \cdot p}{n_i^2} dr_{sp}^0$$

- Rate of spontaneous emission at thermal and electrochemical equilibrium proportional to $\alpha(\hbar\omega)$.
- Rate of spontaneous emission proportional to np product.

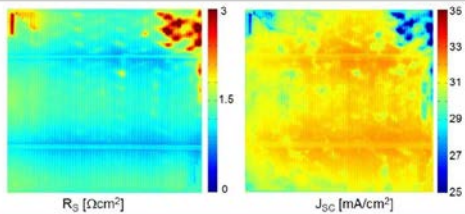
W van Roosbroeck and W Shockley, "Photon-Radiative Recombination of Electrons and holes in Germanium", Physical Review, 84(8), 1558 (1954)



図 3 9 フォトルミネッセンス (PL) 特性の評価解析の初期の理論的取り扱い

Extracting additional solar cell parameters

- Shen et al, 2013



- Extract solar cell parameters from a series of PL images under different illumination and bias conditions.

C. Shen et al., "Spatially resolved photoluminescence imaging of essential silicon solar cell parameters and comparison with CELLO measurements", Sol Energy Mater Sol Cells 109:77 (2013)

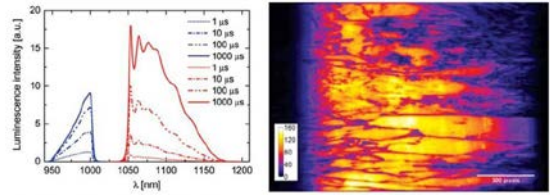


図 4 1 結晶Si太陽電池の直列抵抗Rsの分布と短絡電流密度Jscの分布との対応

結晶Si中の結晶欠陥（結晶粒界、転位など）やFe等の重金属の分布などがPLイメージングにより、短時間に評価されるようになってきている。太陽電池特性分布とPLイメージングの対応も明らかになりつつある。一例として、図 4 1 に、結晶Si太陽電池の直列抵抗Rsの分布と短絡電流密度Jscの分布との対応、図 4 2 に、結晶Si太陽電池の飽和電流密度J0の分布と効率の分布との対応、を示す。さらに、結晶Si太陽電池の製造工程にPLイメージングを導入し、工程管理がなされている例として、図 4 3 に示すように、転位密度や不純物濃度と結晶Si太陽電池の効率分布との対応が評価され、ウエハ選別、プロセスや製造工程の最適化がはかられている。関連資料は、

Bulk lifetime on Si bricks

- Mitchell et al, 2011



- Bulk lifetime on Si bricks from PL intensity ratio (two filter method)
- Absolute τ_0 from two PL images, each measured in relative units

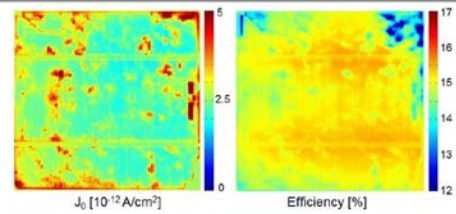
B Mitchell, T Trzopke, J W Weber, J Nyhus, "Bulk minority carrier lifetimes and doping of silicon bricks from photoluminescence intensity ratios", J Appl Phys, 109: 053111 (2011)



図 4 0 結晶SiのPLスペクトル、強度と少数キャリア寿命との対応

Extracting additional solar cell parameters

- Shen et al, 2013



- Implementation into commercial PL imaging systems

C Shen et al., "Spatially resolved photoluminescence imaging of essential silicon solar cell parameters and comparison with CELLO measurements", Sol Energy Mater Sol Cells 109:77 (2013)



図 4 2 結晶 Si 太陽電池の飽和電流密度 J0 の分布と効率の分布との対応

www.facebook.com/PLimaging で入手できる。

PL Imaging in production

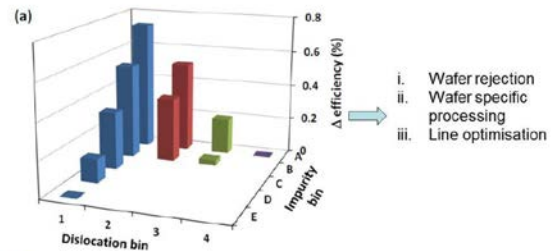


図 4 3 転位密度や不純物濃度と結晶Si太陽電池の効率分布との対応によるウエハ選別、プロセスや製造工程の最適化へのフィードバックの例

6.9 モジュール・システム分野：

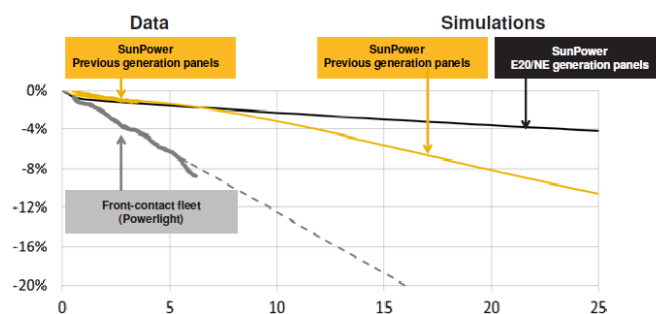
A. Woyteら (3E) は、” Photovoltaics in Power Systems: Legends, Challenges and Solutions” と題して、プレーナリ講演を行った。PVは、無視できる存在から主要電力源に向けた発電技術になりつつある。講演では、PVシステム計画と運転、PV系統連系の研究開発動向が述べられた。PVに直面した今日の課題として、系統分散の飛躍的向上におけるコスト、性能、高電圧送電のためのインフラストラクチャー、柔軟性の増加ニーズ、等がある。一般的なガイドラインとして、PVは電力システムとして見るべきであり投資や運転コストのグローバルな最適化がなされるべきであるとまとめた。

6.10 信頼性分野

E. F. Hasselbrinkら (SunPower) は、” Validation of the PVLife Model Against 3 Million Module-Years of Live Site Data” と題してプレーナリ講演を行った。PVの広範な普及のためには、信頼性に関する物理的理解や研究に基づく、PVセル、モジュールの低劣化率が要求される。本講演では、SunPowerモジュールを用いている266システムおよび非SunPowerモジュールを用いている179システムから得られた80万を超えるモジュール (3.2百万年・年の経験) に関するデータ分析結果が報告された。図4-4は、SunPowerモジュールと非SunPowerモジュールの劣化と加速試験データに基づくシミュレーションの結果の比較を示す。実データとシミュレーション結果の一致は良く、SunPowerモジュールは、front contact moduleに比べて、劣化は二倍少ない。図4-5は、モジュールのリターン率の比較を示す。やはり、SunPowerモジュールは、front contact moduleに比べて、リターン率は、百倍少ない。図4-6は、モジュールのリターンに関する劣化理由を示す。モジュールのリターンの99%は、3つの理由による。ラミネーション (セル/リボン/ハンダ)、バックシート/封止、クラックを含む性能、である。front contact moduleの66%は、インターコネクションの劣化によるとの事である。

Results

- Good match between median YOYPIX data and simulation
- Current generations of SunPower panels show ~2x less degradation compared with previous generations according to simulations using PVLife (coefficients based on accelerated data)



SUNPOWER | © 2013 SunPower Corporation 17

図4-4 SunPowerモジュールと非SunPowerモジュールの劣化と加速試験データに基づくシミュレーションの結果の比較

Module Return Rates

- SunPower owns both back-contact (SunPower proprietary) and front-contact fleets due to acquisition of Powerlight and Teneosol

	SunPower Maxeon II (includes all E-series currently in production)	Front-Contact (Powerlight installations of various mfrs, + Teneosol)
Modules in field	>8,000,000	800,000
Avg. system age	2.12	6.8
Return rate to date	< 0.0050%	0.44%

- Front-contact fleet age is on average 2.3X older than Maxeon II fleet
- Front-contact fleet return rate is 100X higher than Maxeon II

Which modes are responsible for the difference?



図 4 5 モジュールのリターン率の比較

Failure rates by “return code”

Return reason entered in databases by dealers, installers, or O&M staff

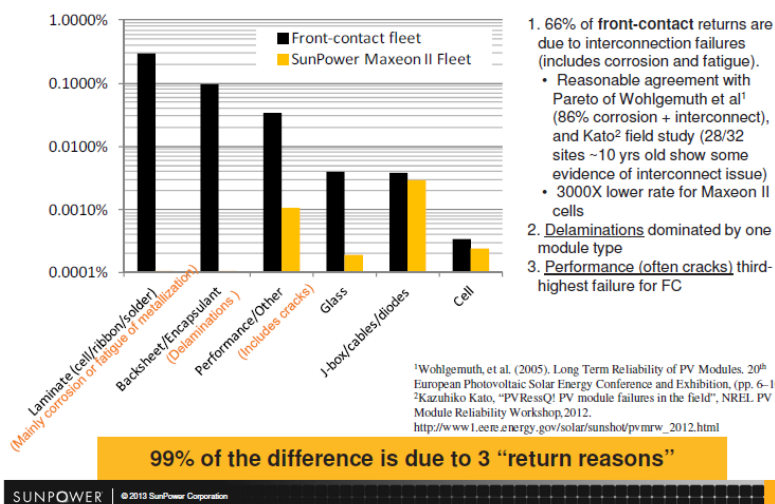


図 4 6 モジュールのリターンに関する劣化理由

6.11 市場および政策分野：

(1) P. Haldar (USPVMC, Univ. Albany) ” Supporting Innovation and Development in the US” と題して、プレーナリ講演を行った。US industryは、強いとは言えない。当面、PV市場は、政府のインセンティブに依存し、利益率は低下している。こうした背景で、PV Manufacturingコンソーシアム (PVMC) がスタートした。予算は、5年間で \$ 300M、薄膜PV (一部、結晶Siを含む) を対象とし、SEMATECH、CNSE、約60社の薄膜PV企業が参画している。\$ 1/W以下のシステムコスト、R&D革新、米国の優位性、米国の雇用、等を目指している。当面、PVセル製造 (装置、材料、メタリゼーション、サプライヤー、R & D会社)、1.5年後、モジュール製造 (装置、材料、サプライヤー、PV製造)、2年後、アーキテクチャ、BIPV応用、3年後、ユテリテイ、等の計画である。CdTe、CIGS、TCO、インターコネクト、寿命>20年、薄膜&フレキシブル、ロールtoロールプロセス、水蒸気バリアフィルム、

10cmx10cmサブモジュール、が研究開発、対象で、10cmx10cmサブモジュール、セル効率>18%等が目標で、コスト、resource availability、environmental impact、recycling、の視点が重要である。「何故、薄膜PVに注力するのか?」、「結晶Si PVやCPVにも目を向けるべき」等、会場からの質問やコメントがあった。

7. 感想

開催地がやや不便なこともあり、前回会議より参加者は減少した。企業からの参加者が減っている印象である。特に、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、欧米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、中国に追い抜かれている。特に、中国企業は、UNSW、米国、ECNやSERISから技術導入をしており、わが国は、結晶Si太陽電池の研究開発者人口を増やし、レベルを上げることが必要である。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。幸い、図29に示すように、今回のシャープの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%、パナソニックのHITセルの効率24.7%、ソーラーフロンティアのCIGSサブモジュールでの効率17.8%、シャープの色素増感セルの11.9%、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。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。中国企業に対抗するためには、震災復興事業として、時限性のオールジャパンの国営製造工場を震災地に設立するのも一案と思う。

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、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、基礎にたちかえる必要があるだろう。この分野も、オールジャパンでの展開を期待したい。

次回の40th IEEE PVSCは、2014年6月8日～13日、コロラド州Denverで開催予定である。また、41st IEEE PVSCは、PVSEC-24、30th EU=PVSEC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。