

第17回欧州太陽光発電会議 (17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition) 報告
(宇宙用太陽電池及びシステム分野、次世代光起電力技術分野)

2001.11.5

山口 真史 (豊田工大)

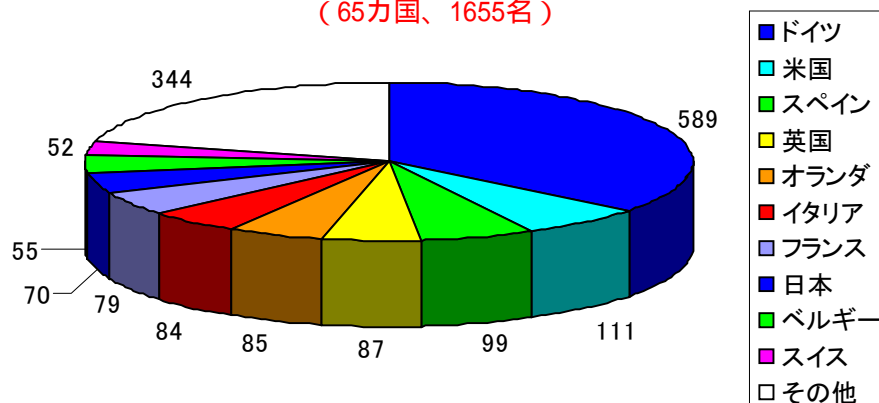
1. 開催月日： 2001年10月22日～26日。

2. 開催場所： ミュンヘン国際会議場 (ミュンヘン、ドイツ)。

3. 本会議の概要： 1年半毎に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 B. McNelis、論文委員長は H. Ossenbrink、WIPの P. Helm が中心となって、会議を運営していた。また、V.M. Andreev 博士 (Ioffe Phys.-Tech. Inst., ロシア) が、Becquerel Prize を受賞したのは、ご同慶の至りである。1972年のIBMのヘテロ接合 GaAs セルよりも早く実現した先駆的業績が評価された。

図1に、国別参加者数を示す。65カ国から1655名の参加者があった。米国でのテロと報復爆撃で、参加者減画懸念されたが、欧州会議としては、これまでの最多の参加者であり、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を反映していると思われる。国別では、ドイツ589名、米国111名、スペイン99名、英国87名、オランダ85名、イタリア84名、フランス79名、日本70名、ベルギー55名、スイス52名の順であった。この他、27カ国から157件の展示があった。

図1. 国別参加数
(65カ国、1655名)



発表論文については、1050件以上のアブストラクト投稿があり、66カ国から1001件の論文発表が予定されていた。他にLate News 発表があった。図2には、国別発表論文件数を示す。国別では、ドイツ224件、スペイン84件、米国67件、日本60件、英国55件、フランス48件、オランダ46件、イタリア42件、の順であった。

発表機関別では、 Fraunhofer ISE（ドイツ）41件、 Univ. Politech. Madrid（スペイン）27件、 Univ. Konstanz（ドイツ）21件、 UNSW（オーストラリア）20件と各国のPVに関する中核的研究拠点（COE）からの論文発表が多く、頑張っている様子が見える。

図2. 国別発表論文件数
(66カ国、1001件)

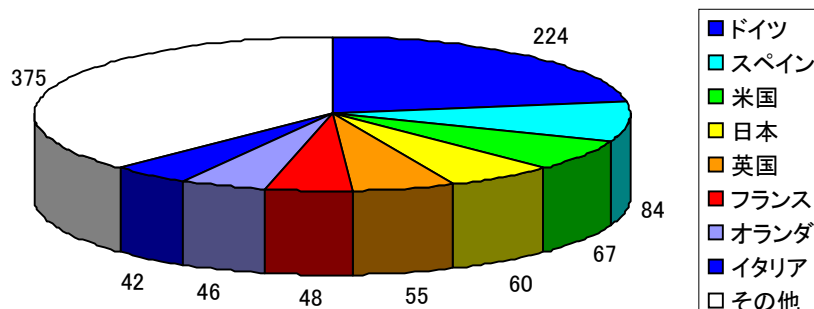
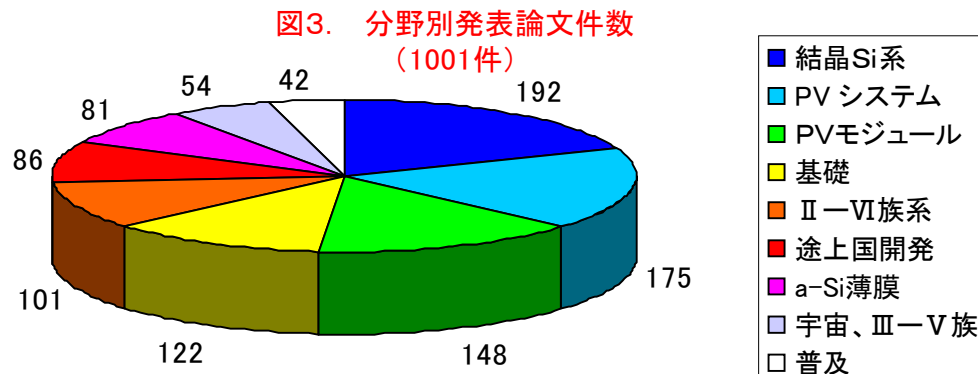


表1. 機関別発表論文件数

| 順位 | 機関 | 国 | 発表件数 |
|----|------------------------|---------|------|
| 1 | Fraunhofer ISE | ドイツ | 41 |
| 2 | Univ. Politech. Madrid | スペイン | 27 |
| 3 | Univ. Konstanz | ドイツ | 21 |
| 4 | Univ. New South Wales | オーストラリア | 20 |
| 5 | Hahn-Meitner Inst. | ドイツ | 16 |
| 5 | ISFH | ドイツ | 16 |
| 7 | ENEA | イタリア | 15 |
| 8 | IMEC | ベルギー | 13 |
| 8 | ECN | オランダ | 13 |
| 10 | Univ. Stuttgart | ドイツ | 12 |
| 10 | CISEMAT | スペイン | 12 |
| 12 | EC-Joint Rec. Ctr. | EU | 11 |
| 13 | 豊田工大 | 日本 | 10 |
| 13 | Forschungszentrum | ドイツ | 10 |
| 15 | NREL | 米国 | 9 |
| | その他 | | 755 |
| 計 | | | 1001 |

図3には、分野別発表論文件数を示す。分野別では、結晶Si系192件、PVシステム175件、PVモジュール148件、基礎、新デバイス・材料122件、CdTe、CIS、III-V族系101件、途上国開発86件、a-Si及び微結晶Si薄膜系81件、III-V族を含む宇宙54件、普及42件、の順であった。PVシステ

ム / P V モジュール / 途上国開発 / 普及をトータルすると、451件(45%)で、欧州会議のP Vシステム寄りの色彩が現れていた。



4. 族化合物半導体太陽電池及び宇宙用太陽電池分野の主な発表論文の概要

族および宇宙用セル関係は、宇宙セッションでの発表論文54件に加えて、基礎セッションでの発表論文を加えると、約75件の論文発表があった。

4.1 多接合セル

(1) 山口(豊田工大、PE2.2)は、超高効率多接合構造太陽電池の要素技術として、トップセル材料の選択と高品質化、ダブルヘテロ接合(DH)構造トンネル接合によるトンネル接合からの不純物の抑制、ワイドギャップInGaPトンネル接合の提案、Ge基板に格子定数整合したInGaAsミドルセル提案、ワイドギャップAlInP裏面電界層の提案、があることを紹介した後、日本のプロジェクトの概要を報告した(表2)。

表2. 日本の族セルのR & D成果のまとめ

| Solar Cells | | Area (cm ²) | AM | Efficiency (%) | Organization | Year | Remarks |
|---------------------|---|-------------------------|--------------|----------------|---------------------------------|------|---------|
| Bulk | GaAs bulk | 25 | AM1.5 | 26.0 | Sumitomo Electric | 2001 | WR |
| | | 4 | AM0 | 22.5 | Mitsubishi Electric | 1987 | |
| | InP bulk | 0.25 | AM1.5 | 22.0* | NTT | 1986 | 2-WR |
| Thin-film | GaAs-on-Si | 1 | AM1.5 | 20.0 | NTT | 1989 | WR |
| | | 1 | AM0 | 19.3 | NTT | 1989 | WR |
| | InGaP/InGaAs | 4 | AM1.5 | 30.3 | Japan Energy | 1996 | |
| | 2-junction-on-GaAs | 9 | AM1.5 | 30.6 | Japan Energy | 1998 | WR |
| | | 4 | AM0 | 26.9 | Jpn Energy, Toyota T. I. | 1997 | 3-WR |
| | AlGaAs/GaAs2-Junction-on-GaAs | 0.25 | AM1.5 | 20.2 | NTT | 1987 | |
| Multi Junction (MJ) | | 0.25 | AM1.5 | 27.6 | Hitachi Cable | 1999 | |
| | GaAs/InGaAs | 1 | AM1.5 | 28.8 | Sumito Electric | 1996 | |
| | Mechanically Stacked GaAs/InGaAsP | 1 | AM1.5 | 31.1 | Sumito Electric | 2001 | |
| | Mechanically Stacked AlGaAs/Si 2-Junction | 0.25 | AM0 | 21.2* | Nagoya Inst. Tech. | 1997 | |
| | InGaP/InGaAs/Ge | 1 | AM1.5 | 31.7 | Japan Energy | 2000 | WR |
| | 3-junction-on-Ge | 25 | AM1.5 | 31.2 | Japan Energy | 2000 | |
| | InGaP/GaAs/InGaAs | 1 | AM1.5 | 33.3 | Jpn Energy, Sumitomo | | |
| | MS 3-Junction | 1 | AM1.5 | 33.3 | Toyota Tech. Inst. | 1997 | WR |
| Concen. MJ | InGaP/GaAs 2-Junction | 1 | AM1.5 (x 20) | 31.5 | Toyota Tech. Inst. Japan Energy | 1999 | 3-WR |

* active-area efficiency, WR: world-record efficiency

住友電工によるGaAs-DH構造単一接合セル(25cm²)の変換効率26.0%(AM1.5)、豊田工大、ジャパンエナジーによるInGaP/GaAs2接合セル(1cm²)のAM1.5の20倍集光で31.5%、ジャパンエナジーによるGe基板上のInGaP/InGaAs

/ Ge 3 接合セルの 31.7% (1 c m ²)、31.2% (25 c m ²)、ジャパンエナジー、住友電工および豊田工大の協力による InGaP / GaAs / InGaAs メカニカル・スタック 3 接合セル (1 c m ²) の効率 33.3% (AM1.5) が主な成果である。InGaP、InGaAsP など InP 系トップセル、ボトムセル材料の優れた放射線耐性も見出されており、宇宙用セルへの適用性は十分にある。

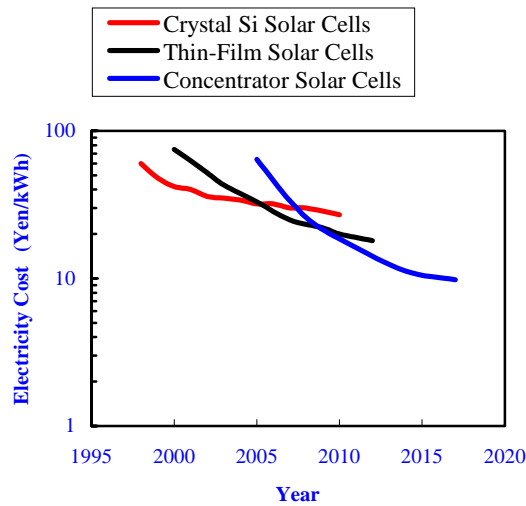


図 4 . 集光型太陽電池開発による電力コスト低減のシナリオ

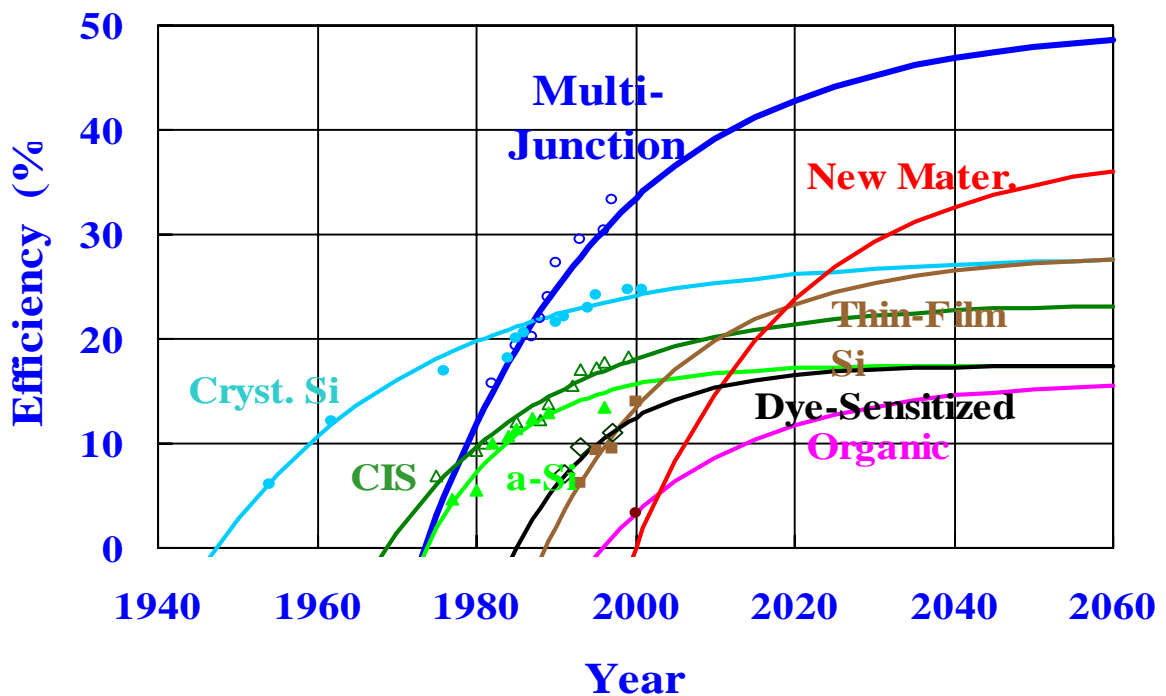


図 5 . 各種太陽電池の変換効率の年推移と効率の将来予測 (Prof. A. Goetzberger の予測曲線に山口が多接合セル予測を追加)

次世代技術として、オンSi技術が期待される。豊田工大、NTT、NASDAの共同研究の成果として、技術試験衛星ETS-1を用いて、GaAs-on-Siセルの宇宙実証試験結果も報告された。GaAs-on-Siセルは、高放射線量照射下で、従来のGaAsセルより絶対効率として優れていることが明らかになると共に、ETS-1での実証試験でも、GaAsセルや50~200 μ m厚の薄型Si単結晶宇宙セルよりも、放射線耐性のあることが示された。

今後の方向としては、変換効率50%の実現に向けた高効率化に加え、集光技術が低コスト化に有効であるとのコスト試算結果も述べられ、図4に示すように、集光型太陽電池が、第1世代の太陽電池として期待していることが強調された。次世代光起電力技術としては、集光技術に加え、格子不整合系やオンSi技術、新規薄膜形成技術、新原理や新デバイス構造などの研究開発が重要である。最後に、A. Goetzberger 前所長 (Fraunhofer ISE) の各種太陽電池の効率の将来見通しに多接合セルの効率予測が追加され、変換効率50%の実現が有望であることが示された。

(2) F. Dimrothら (Fraunhofer ISE、PE2.3) は、格子不整合系多接合セルの検討結果を報告した。GaInAsミドルセルを低バンドギャップ化することで、GaInP/GaInAs/Ge3接合セルはAM0効率31%の可能性があるが、格子不整合転位の発生という課題がある。GaAs6°オフ(100)基板上に、n-i-p構成のGa_{0.35}In_{0.65}PトップセルとGa_{0.83}In_{0.17}AsボトムセルがCドープAl_{0.3}Ga_{0.7}As/SiドープGa_{0.83}In_{0.17}Asトンネルダイオードで接続され、ボトムセルには1445nm厚のAlInAs/GaInAsのBragg Reflectorが付き、かつ1500nm厚のGa_{1-x}In_xAsのgradedバッファ層もある。これまで、Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As2接合セルでは、1cm²セルで、効率27.6%(AM1.5G)、27.0%(AM1.5D)、24.1%(AM0)が得られている。

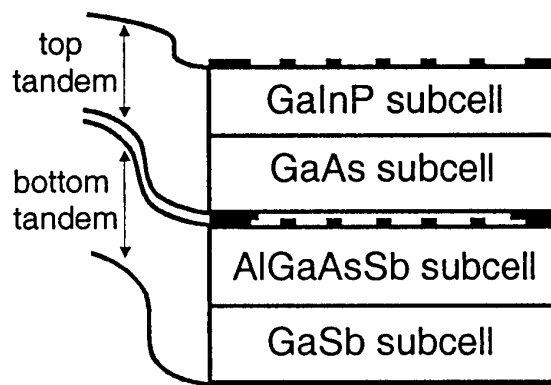


Figure 4: Schematic illustration of GaInP/GaAs - AlGaAsSb/GaSb mechanically stacked 4-junction solar cell with 4-terminal configuration.

図6 . GaInP / GaAs / AlGaAsSb / GaSbのメカニカル・スタック4接合セルの提案

研究所の移転で、その後の研究の進展はなかったが、今回、図6、図7に示すようなGaInP/GaAs//AlGaAsSb/GaSbのメカニカル・スタック4接合セルおよびAlGaInP/GaInP/GaAs/GaInAs/Ge 5接合セルが提案され、31~34%の変換効率が期待できるとの試算結果が報告された。

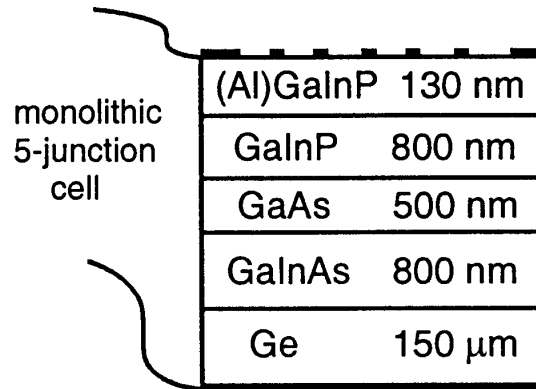


Figure 5: New 5-junction multi-layer solar cell concept for highest EOL efficiencies.

図7 . AlGaInP / GaInP / GaAs / GaInAs / Ge
5接合セルの提案

4.2 集光型セル

(1) C. Alogra(Univ. Politech. Madrid、0C9.3)は、まず、集光型GaAsおよび多接合セルモジュールのコスト試算結果を報告した。現状の10MWp/年の生産規模では、図8に示すように、GaAs単一接合セルの1000倍集光の効率28%モジュールで、2.74Euros/Wp(0.104Euros/kWh)の価格実現が可能である。2.74Euros/Wpの内訳は、セルが0.56EU/Wp、光学系0.28EU/Wp、モジュール化0.13EU/Wp、冷却系0.16EU/Wp、追尾系0.75/Wp、インバータ等0.20EU、設置費0.11EU/Wp、利益率25%である。1,000MWp/年の生産時には、1000倍集光の効率28%モジュールで0.79Euros/Wp(セル0.12EU/Wp、光学系0.13EU/Wp、モジュール化0.06EU/Wp、冷却系0.07EU/Wp、追尾系0.19/Wp、インバータ等0.06EU、設置費0.02EU/Wp、利益率25%)で、0.033Euros/kWhが可能であるとしている。また、効率38%の高効率モジュールでは、0.6Euros/Wpが可能であるとしている。地上用低コストセルを狙ったもので、短期目標は、GaAs単一接合セルを用い、3Euros/Wp(0.1Euros/kWh)以下である。中期ターゲットは、多接合セルを用い、1Euros/Wp(0.033Euros/kWh)以下である。高効率化や熱管理技術などは改善されているが、課題としては、多接合化によるセル歩留まり、モジュール化技術、光学系の色収差、2軸追尾系、長期信頼性、また集光下での材料劣化、コスト目標の達成、などが指摘されている。LPE成長(Ioffe Phys.-Tech. Inst.)およびMOCVD成長(Energy Environ. Inst.)DH構造GaAs単一接合セルが検討されている。図9に示すように、GaAs単一接合セルのAM1.5の500倍集光で効率26.7%が得られている。温度上昇は40以下である。高効率集光形セル実現のキーポイントは、直列抵抗、ARコーティング、

半導体太陽電池層の成長、である。高効率化には、直列抵抗 $2 \sim 3 \text{ m} \Omega \text{ cm}^2$ 以下が必要で、表面金属電極設計がなされ、平均 10^{-4} cm^2 が得られている。GaInP 窓層の挿入、n-on-p 構成、表面コンタクト抵抗の低抵抗化 (10^{-5} cm^2) により、1000 倍集光で効率 29.4% が可能であるとの事である。

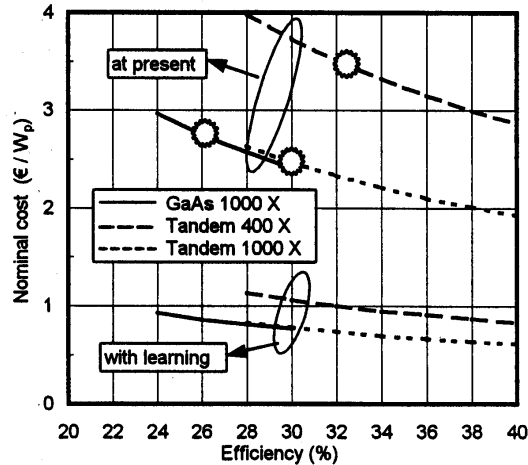


Figure 1. Nominal cost of a complete PV plant (based on our optoelectronic approach) as a function of the efficiency of the solar cells. Two different production scenarios are considered: a) a cumulated production of 10 MW_p at present and b) a cumulated production of 1000 MW_p for the medium term when learning is considered. The stars indicate the present highest efficiencies on single junction GaAs and tandems solar cells described in the Introduction.

図 8 . GaAs 単一接合セルおよび多接合セルを用いた集光型太陽光発電システムに関するコスト試算結果

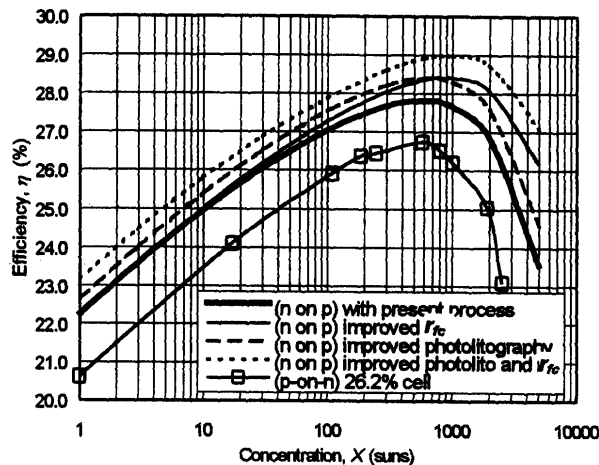


Figure 2. Calculated efficiencies of n-on-p GaAs structures. The curves correspond to the behaviour of different single junction GaAs solar cell structures optimised for operation at 1000 suns. Each curve assumes a different technology improvement. The experimental result of the 26.2% at 1000 suns for a p-on-n GaAs solar cell described in Section 2 is also shown for comparison.

図 9 . GaAs 単一接合セルの変換効率の集光動作特性

(2) A.W. Bettら (Fraunhofer ISE, OC9.2) は、MOVPE成長 $Ga_{0.35}In_{0.65}P$ / $Ga_{0.83}In_{0.17}As$ 2 接合セルと Zn の気相拡散による GaSb の p-n 接合セルとのメカニカル・スタック 3 接合セルの 300 倍集光動作で効率 33.5% のトップデータを実現している。メカニカル・スタック 3 接合セルの構成は、図 10 に示す通りであり、自由キャリア吸収を減らすために、350 μm 厚の n-GaAs 基板が用いられ、n-on-p 構成のため第二のトンネル接合が追加されている。以前用いられていた AlInAs / GaInAs の Bragg Reflector 反射層は、赤外域の透明性を増加させるために、省略されている。セルは 4 mm 径で、表面コンタクトには、Au-Ni/AuGe/Ni が 2 μm 厚で蒸着および電着され、上部構造セルの裏面には、上記電極材料によるコンタクトが周辺リング状の 2 次元形状となっている。上部構造セルの両面の反射防止膜には TiO_2 / MgF_2 が用いられている。

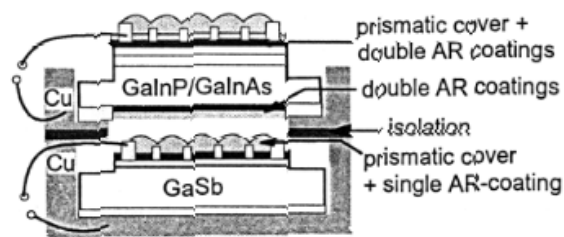


Figure 1: Sketch of the mechanically stacked triple-junction cell using a monolithic dual-junction cell as top cell and a GaSb bottom cell.

図 10. $Ga_{0.35}In_{0.65}P$ / $Ga_{0.83}In_{0.17}As$ / GaSb
メカニカル・スタック 3 接合セルの構成

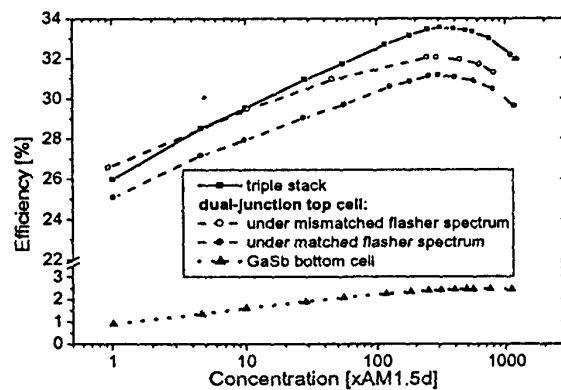


Figure 4: Efficiency versus concentration for the mechanically stacked triple-junction cell and its subcells. In addition, the influence of the flasher spectrum on the measurement of the monolithic tandem cell is shown.

図 11. メカニカル・スタック $Ga_{0.35}In_{0.65}P$ / $Ga_{0.83}In_{0.17}As$ / GaSb
およびモノリシック・カスケード $Ga_{0.35}In_{0.65}P$ / $Ga_{0.83}In_{0.17}As$
2 接合セルの変換効率の集光動作特性

メカニカル・スタック $Ga_{0.35}In_{0.65}P / Ga_{0.83}In_{0.17}As / GaSb$ およびモノリシック・カスケード $Ga_{0.35}In_{0.65}P / Ga_{0.83}In_{0.17}As$ 2 接合セルの変換効率の集光動作特性を図11に示す。3 接合セルの308倍集光で効率33.5%、2 接合セルの299倍集光で31.1%が得られている。半絶縁性 $GaAs$ 基板の導入やARコーティングの改良により、効率35%が実現可能としている。

(3) L.M. Fraas ら (JX Crystals, VD3.43) は、Tecstar、EntechおよびNASAとの協力で、 $InGaP / GaAs / GaSb$ メカニカル・スタック3 接合セルのAM0の15倍集光で効率32.5%を得ている。薄い $GaAs$ 基板とPrismaticカバーガラスの導入により、効率35% (AM0の15倍集光) が期待でき、宇宙用セルへの適用性が十分あるとの事である。

(4) I. Rey-Stolle ら (Univ. Politech. Madrid, VD3.16) は、高集光動作 (>1000 倍) 高効率 $GaAs$ 太陽電池の信頼性に関する報告を行った。族化合物セルの高集光動作は、低コスト化に有効だが、高集光動作に伴う高フォトン密度、高電流密度および高温動作の課題は残る。図12に、各種試験に用いた $InGaP$ あるいは $AlGaAs$ 窓層付き集光型 $GaAs$ 太陽電池の構造を示す。パッケージなしで、ARコートなしセルに関する沸騰水での湿度試験では、図13に示すように、 $AlGaAs$ 窓層付きセルは、100 分間の試験で、50%の J_{sc} 低下と8%の V_{oc} 低下を見たが、 $InGaP$ 窓層付きセルは、 J_{sc} の低下はなく、 V_{oc} が3.5%低下するのみである。 $AlGaAs$ 窓層付きセルの出力低下は、 $AlGaAs$ の酸化によると思われる。-5 ~ 95 (湿度RH~30%) の8500 時間の熱サイクル試験 (23 年間のフィールド試験に等価) では、3%以下の特性低下であり、出力低下はないと見られる。高電流密度での順方向バイアス試験 (1100 倍集光に等価な順方向電流密度) で6000 時間 (2.5~3 年間のフィールド試験に等価) では、 $GaInP$ 窓層付き $GaAs$ セルでも、図14に示すように、 J_{sc} で2%、 V_{oc} で6.5%の低下が見られる。セル表面に青緑色の欠陥が出現しており、 ZnS / MgF_2 AR膜の劣化と考えられる。改善は必要だが、 $GaInP$ 窓層付き $GaAs$ セルは顕著に耐性のあるデバイスである。

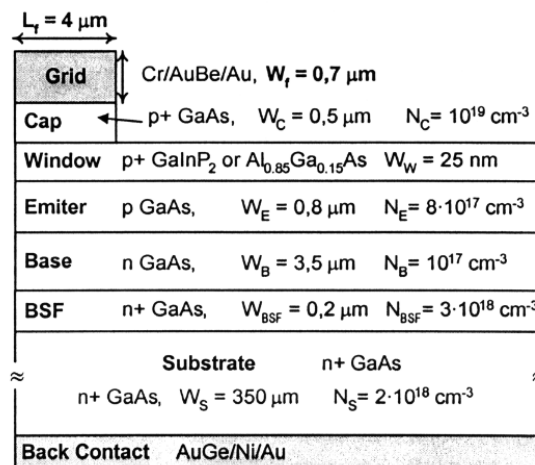


Figure 1: Structure of the solar cells used in the tests

図 12. 各種試験に用いた $InGaP$ あるいは $AlGaAs$ 窓層付き集光型 $GaAs$ 太陽電池の構造

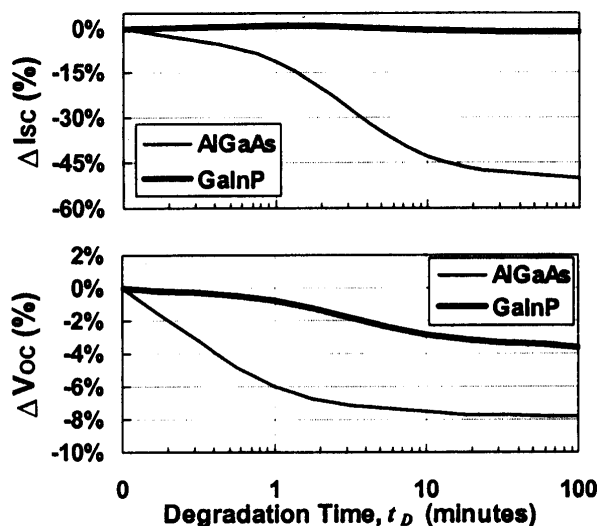


Figure 5: I_{SC} and V_{OC} evolution versus time in boiling d.i. water.

図 13 . A R コートなし G a A s 単一接合セルに関する沸騰水での湿度試験結果

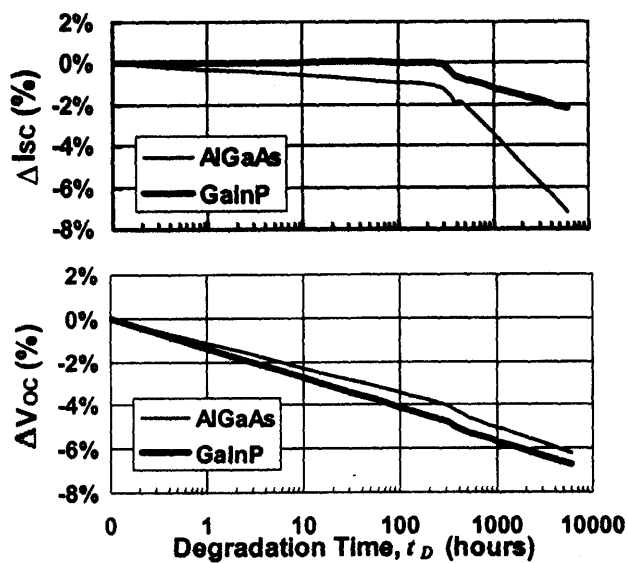


Figure 7: I_{SC} and V_{OC} evolution during forward biasing

図 14 . G a A s 単一接合セルの高電流密度での順方向バイアス試験 (1100 倍集光に等価な順方向電流密度) 結果

4 . 3 宇宙用太陽電池

(1) K. Bogus ら (E S A , PE2-Lecture) は、欧州の宇宙太陽光発電の現状と将来について報告した。宇宙用太陽電池は、人工衛星用に 40 年以上も実用されており、宇宙用太陽電池は年産 1 MW 程度の市場である。地上用太陽電池との要求条件の違い (放射線、プラズマ、紫外線、熱環境など) が述べられた。ここ 10 年間で、図 15 に示すように、E O L

(End-of-Life) 出力が 2 kW から 12 kW に増加し、今後 30 kW 級が要求され、2 接合、3 接合セルの開発が進み、実用になっている。欧州の多接合セルのロードマップを図 16 に示す。現状の InGaP / InGaAs 2 接合セルの AM0 効率 23% から、InGaP / InGaAs / Ge 3 接合セルの 26%、将来の 4 接合セルの 34% へと高効率化を進める必要がある。また、放射線耐性の向上に加え、低コスト化も重要で、CIGS 等の薄膜セルの研究開発に期待している。CIGS セルは放射線耐性が良いが、効率の点で課題があり、当面大面積で AM0 効率 15% 以上の達成が必要である。将来的には、20% 以上が要求されよう。

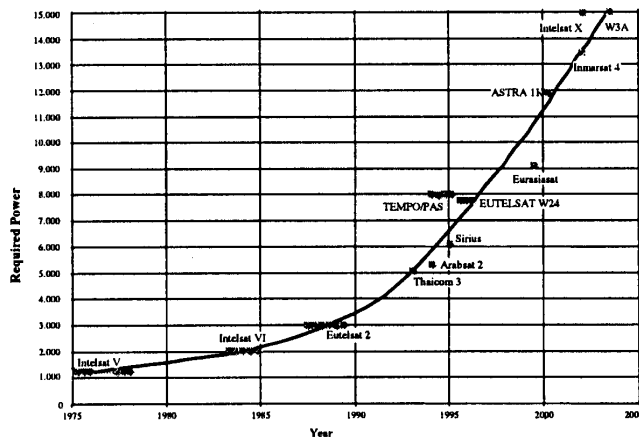


Figure 7: Development of maximum power requirements for Astrium ComSat solar arrays

図 15 . 人工衛星の E O L 出力の高出力化

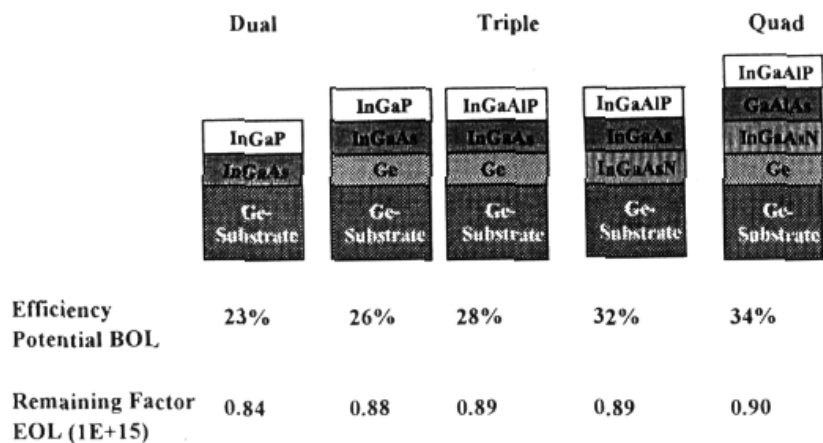


Figure 10: European MJ-Solar Cell Road Map

図 16 . 欧州の多接合セルのロードマップ

(2) N.S. Fatemi ら (Emcore, 0B6.2) は、Emcore での高効率・耐放射線性宇宙用多接合セルの技術開発状況を報告した。12~20 kW 級の電気通信用衛星のニーズが増加しており、高効率多接合セルが重要になっている。4 インチ、100~140 μm 厚の Ge 基板上に n - o

n - p 構成の InGaP / GaAs / Ge 3 接合セルが生産されている。33,000 枚のフライト用セルの AMO 効率 24.5 ~ 27.6% で、平均効率は 26.2% である。1 MeV 電子線 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 照射時の出力保存率も 0.91 まで改善されている。EOL 効率で比べると、宇宙用 Si セルの 2 倍の出力に相当する。MOCVD 装置 E-400 と E-450、各 3 台を用い、4 シフトで生産を行い、年産 235 kW (月産 18,000 枚) で、これまで 160,000 枚のセルを出荷している。2002 年までに、E-450 を 2 台増強する予定である。改良技術についても述べられたが、ジャパンエナジーのセル構造を真似た InGaP / InGaAs / Ge 3 接合セルで、180 枚のセルの AMO 効率は 26.8 ~ 28.4% で、平均効率は 27.5%、EOL 効率 25.2% となっている。2005 年までに、4 接合セルで AMO 効率 35% を達成したいとしている。

4.4 放射線損傷等評価解析

(1) N. Dharmarasu ら、A. Khan ら (豊田工大、OB6.3、OB9.4、VD3.19、VD3.20) は、多接合セルおよび材料の放射線損傷ならびに照射欠陥挙動に関する成果を報告した。トップセル材料 InGaP およびボトムセル材料 InGaAsP は、InP の性質を受け継ぎ、GaAs よりも優れた放射線耐性を有する。DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) 解析によれば、InGaP および InGaAsP 中の主要照射欠陥は、InP 中の主要照射欠陥 H4 中心と同様に、再結合中心として働き、かつ太陽光や順方向バイアスにより少数キャリア注入促進アニール現象というユニークな現象を示すことを明らかにしている。図 17 には、InGaAsP セルの太陽光照射 (70 倍集光) による太陽電池出力の回復特性を示す。こうした知見は、宇宙用多接合セルの放射線耐性の向上に有効である。

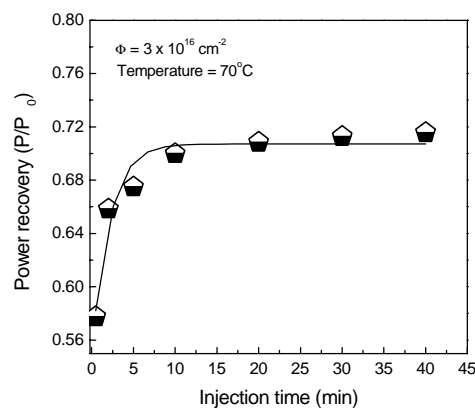


Figure 5: The maximum power recovery of a InGaAsP cell due to photo illumination under 10 sun concentration ratio for 1 MeV electron-irradiated p-InGaAsP solar cells.

図 17. InGaAsP セルの太陽光照射 (70 倍集光) による太陽電池出力の回復特性

4.5 太陽電池製造技術



図 18. 6 インチ 7 枚の Multi Wafer Planetary Reactor

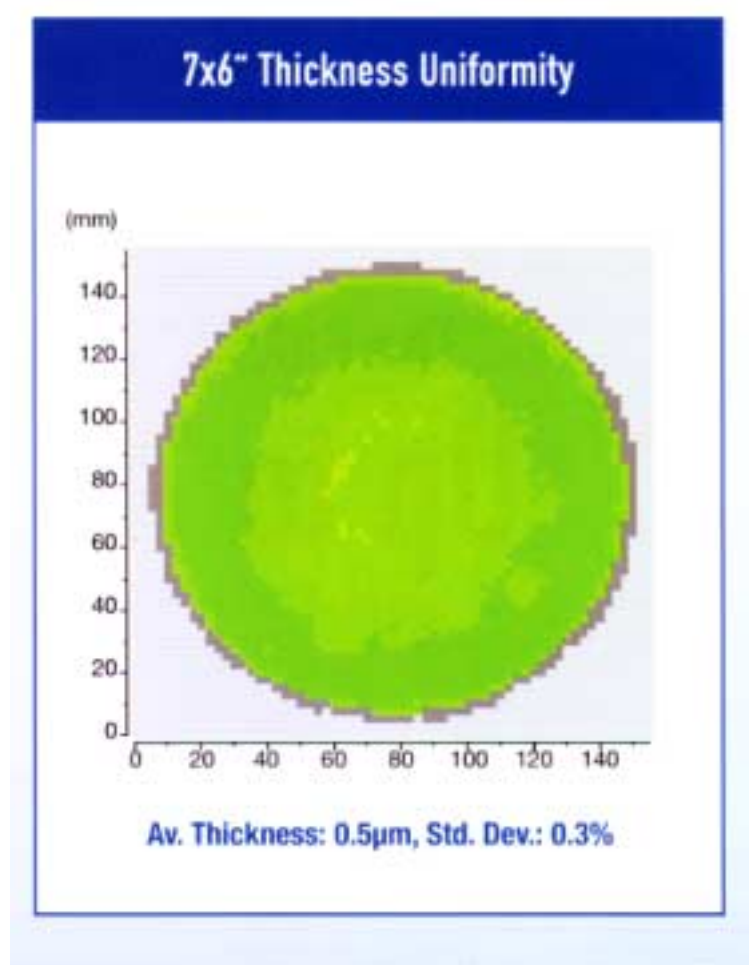


図 19. 大面積 MOCVD 装置による太陽電池用 GaInP エピタキシャル成長膜厚の一様性

(1) T. Scmittら (AIXTRON、OB9.3) は、太陽電池製造用 MOCVD 装置として、6 インチ 7 枚の Multi Wafer Planetary Reactor を開発した (図 18)。6 インチ 5 枚の AIX 2600G3 を拡張したもので、従来の経験と数値モデリングによって、図 19 に示すように、GaAs、AlGaAs、GaInP 成長に関する温度分布の一様性 $< \pm 1$ 、膜厚一様性 $\pm 0.2 \sim \pm 0.7\%$ (ウエハ面内)、 $\pm 0.1 \sim \pm 0.5\%$ (ウエハ間)、n-ドーピングの一様性 $\pm 0.4 \sim \pm 3\%$ 、組成の一様性 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5\%$ を実現している。

5. 次世代光起電力技術

(1) A. Goetzberger (Fraunhofer ISE、PA1-Lecture2) は、太陽電池材料および技術の現状と将来展望についてレクチャーを行った。過去、現在ともに Si で、将来も Si か又は？、というイントロで始まり、結晶 Si 太陽電池、薄膜太陽電池および材料の展望が述べられた。また、各種太陽電池に関するこれまでの変換効率の変遷から、次式により、今後の変換効率の推移を予測している。

$$\eta(t) = \eta_{lim} [1 - \exp\{-(a_0 - a)/c\}]$$

ここで、 $\eta(t)$ は時間依存の太陽電池の変換効率、 η_{lim} は限界最高効率、 a_0 は $\eta(t) = 0$ の年、 a はカレンダー年、 c は特性開発年である。図 20 には、各種太陽電池に関する変換効率変遷と将来予測を示す。結晶 Si、a-Si の η_{lim} は、それぞれ、29%、18.5% であるが、第 3 世代 PV 技術の η_{lim} として 42% を期待している。

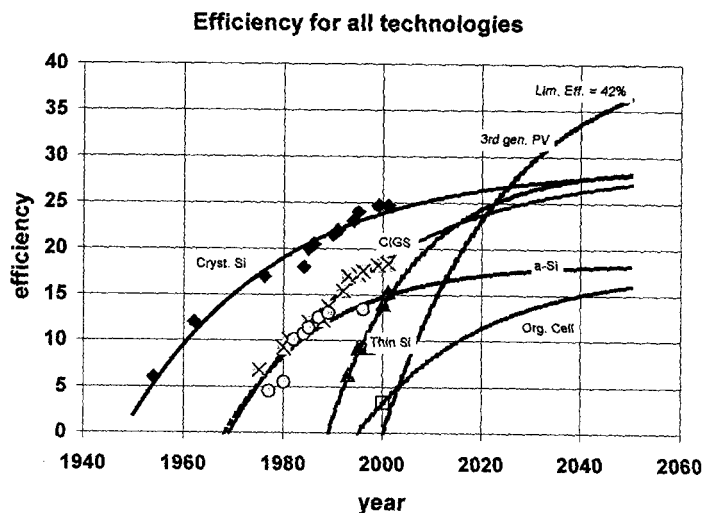


Fig. 6: A century of photovoltaics. Past achievements and future predictions of highest laboratory solar cell efficiencies. Best data are for crystalline silicon. The right curves are based on very few data points, the curve for the third generation material is purely hypothetical

図 20. 各種太陽電池に関する変換効率変遷と将来予測

(2) C. Honsberg ら (Georgia Tech. Inst., PA1-Lecture1) および M.A. Green (UNSW, PA1.1) は、第3世代のPV技術に関する理想状態での理論変換効率を議論した。単一接合セルでは変換効率31%、その集光動作では41%が限界であり、第1世代、第2世代のPV技術は、そこで尽きる。高性能、低コストの第3世代のPV技術に関する研究が必要である。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。

表3 . 多接合セルの理想状態での理論変換効率

| 接合数 | 1 - s u n | 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85.4%、多重バンド励起が利用できれば86.8%など、可能性が示唆されたが、多接合セルや量子効果デバイスが現実的な解であろう。

表4 . 第3世代の光起電力技術の提案と高効率化の可能性

| Concepts | Proposed Year | Calculated Maximum Efficiency |
|---------------------------|---------------|-------------------------------|
| Multi-Junction | 1955 | 86.8% |
| Multiple electrons/photon | 1972 | 85.4% |
| Hot Carriers | 1981 | 86.2% |
| Multiple Band | 1997 | 86.8% |
| Quantum Well | 1990 | |
| Impurity PV | 1960 | 77.2% |

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 . 感想

米国テロと報復爆撃の影響で、参加者減が懸念されたが、欧州PV会議としては、これまでの最多の参加者の会議となり、また展示が157件もあり、太陽光発電への熱い期待が感じられた。

多接合化による高効率化が進んでいる。変換効率40%を日米欧のどこが出すかと、Luther 所長(Fraunhofer ISE)にも質問されたが、超高効率化の極限追及に向けて、切磋琢磨して行きたい。

宇宙用に加えて、 C_6H_6 族化合物セルの地上用への実用化には、集光技術の適用が必須である。集光技術の研究開発も進んでおり、高効率化に加えて、低コスト化、高信頼化等

の検討がなされている。集光式太陽光発電技術に関する最初の国際会議開催が、本 17th EU-PVSEC の翌週にスペインで開催が予定されていたが、米国テロの影響で来年 4 月開催に延期になったとはいえ、関係者の関心の高さを反映している。こうした場等を活用して、海外の研究者達と議論しながら、集光型高効率・低コスト太陽電池を世の中に出して行きたい。

次世代光起電力技術については、全く基礎研究、原理検証段階とはいえ、日本での試みが少ないのは残念である。報告者らは、幸い、量子井戸構造太陽電池について、英国 Imperial College と共同研究の実績もあり、Nanostructures in PV(ドイツ、2001.7)、Path to Ultra High Efficient Solar Cells(イタリア、2001.11)、Third Generation PV(スペイン、2002.3)等の国際ワークショップへの招待の機会を通して、情報交換につとめ、将来に備えたい。

(以上)