論説

Paper

変換効率 28% の集光式太陽光発電装置開発

荒木建次^{*1}, 近藤道雄^{*2}, 魚住久文^{*2}, 高本達也^{*3}, 江上敏夫^{*4},
平松雅男^{*4}, 宮崎憲徳^{*4}, 見目喜重^{*5}, 山口真史^{*6}

Development of 28 percent Efficient Solar Electric Concentrators

Kenji Araki, Michio Kondo, Hisafumi Uozumi, Tatsuya Takamoto, Toshio Egami,
Masao Hiramatsu, Yoshinori Miyazaki, Yoshishige Kemmoku, and
Masafumi Yamaguchi

Synopsis

A 400 X and 7056 cm² concentrator module was fabricated from 36 concentrator receivers, connected in series and with the same number of newly developed dome-shape Fresnel lenses. The averaged outdoor efficiency on a clear sky day was 26.8 ± 1.5 % (25C STC). This is the highest module efficiency achieved to date using a module of practical size and electrical rating. The heat was dissipated by the module wall and neither heat sinks nor external cooling were used. A glass homogenizer was introduced to give uniform illumination to the square cell, and afforded a reasonable assembly tolerance, without the need for optical alignment.

1 . 緒 言

太陽光発電の抜本的なコストダウンにはコスト構成比の大部分を占めるセルの使用量を減らすこと, および, 変換効率を高め, 構造材の使用量そのものを減らすことが有効と考えられる. 30% 以上の変換効率を有する - 族 3J タンデムセルを数百倍の高集光で動作させる手法が注目を浴びている¹⁾.

しかしながら, 高集光に伴う大電流, 低抵抗, 放熱, 耐久性に十分な性能を有し, 取り扱いが難しい - 族 3J タンデムセルのモジュール化には, これまでのシリコンセル高集光技術, あるいは多接合でも低集光倍率に見られたような技術の壁を破る新たなモジュール化技術が要求される.

本研究は高集光に耐え, かつ, シンプルな構造を有し, 1000 倍を越える集光倍率にもスケールアップが可能な表面実装による集光モジュールについて行った. これまでドイツフ라운ホッフ研が保有していた高集光多接合セルを用いた集光モジュールの効率記録 (22.7%, 768cm²)²⁾ を効率, 大きさともに大幅に更新する 28% の効率を 7056cm² の大面積で実現させた. Fig.1 に本モジュールを従来型の平板ソーラーパネルと比較した写真を示す.

2 . 設計指針

2.1 集光に伴う固有技術における課題

集光モジュールには下記技術課題が知られている.

セルへ流入するエネルギー密度が高くなるので, 十分な放熱を行わなければ開放電圧が低下するだけでなく, セ

2004 年 5 月 27 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 豊田工業大学受託研究員 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd. Visiting Researcher, Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 シャープ(株)電子部品事業本部ソーラーシステム事業部 奈良先端大学共同研究員, 工博 (Dr., Eng., Sharp Corp. Joint Researcher, Graduate School of Engineering, Nara Institute of Science and Technology)

* 4 大同メタル工業(株)中央研究所 (Central Research Lab., Daido Metal Co., Ltd.)

* 5 豊橋創造大学, 工博 (Dr., Eng., Toyohashi Sozo College)

* 6 豊田工業大学大学院工学研究科, 工博 (Dr., Eng., Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute)

Fig.1. Comparison between the newly developed CPV (Concentrator PhotoVoltaic) module and a commercial flat-plate solar panel made from MC-Si (Multi-Crystalline Silicon).

ルや周辺部材に熱損傷が加わる。

組立誤差や追尾誤差に伴う集光光学系光軸ずれなど、セル間の発電電流ばらつきが生じやすく、最悪部に引きずられてモジュール全体の発電電流が大幅に低下する。

集光倍率に比例して出力電流が増大するので、内部抵抗によるジュール損失（電流の自乗に比例）の影響が顕著となる。

一般に集光された光は、スペクトル、強度とも一様ではない。これにより、セルの効率も低下する。

セルを湿度その他過酷な屋外環境から保護するため一般に封止が必要となるが、封止に用いる透明樹脂材料が集光光に対し、十分な耐候性を有しているか否か。

2.2 パッケージ化の概念

太陽光発電装置は設置サイトに応じ多様な形態が考えられる。しかしながら、上記集光式太陽光発電固有技術をすべて配慮して装置設計を行うのは困難である。そこで、電子回路におけるブラックボックスの概念を用い、上記固有技術をすべてパッケージ化した要素部品としてまとめ、これを機械技術で装置化することにより、多様な形態に対応できるようにした。回路技術者が半導体物理や半導体材料の信頼性に関する知識がなくとも素子を組み合わせる回路設計および基板製作ができることと同じである。パッケージ化した発電ユニット（集光レシーバーと称する）を Fig.2 に示す。放熱を含めた実装技術および集光光学系については後章で詳述する。その他の要素技術につき、概略を論ずる。

2.3 誤差割付の概念

実用的なサイズのモジュールを設計するにあたっては、高集光に伴う放熱やセル保護などの固有技術だけではなく、部品の機械加工精度、組立精度、および架台の追尾精度を統合的に勘案しなければならない。誤差については、追尾などに伴う角度誤差と機械加工などにともなう位置

Fig.2. Photograph of the newly developed concentrator receiver.

誤差とを峻別し、前者については誤差を前提とした集光レンズ設計に、後者についてはレシーバーに付属した2次光学系に担わせた。これにより、通常の機械組立精度でもセル間の発電電流ばらつきによるミスマッチング損失を3%程度に抑制することが可能となった。これは集光光学系を用いず、太陽電池を敷き詰めただけの従来型ソーラーパネルと同じ値である。言い換えれば、太陽電池の特性ばらつきに比べ、集光式太陽光発電固有の光学系（およびそのアライメント）ばらつきの影響がほとんど見られないということである。これまで国内外で試作開発された集光式発電システムでは、ミスマッチング損失を抑制するために並列接続を併用せざるを得ず、その結果、大電流・低電圧の電気設備となり、関西電力が山崎に設置した線集光太陽光発電システム、点集光太陽光発電システムのように100kWクラスの大型設備が中心だった³⁾。従来型ソーラーパネルと同じ全数直列接続が可能となり、家庭用ソーラーシステムと同じような接続箱による電気工事が可能となった⁴⁾。

2.4 抵抗損失

内部抵抗損失については、抵抗の低い半田鍍金銅箔配線により各セルを結線し、内部抵抗によるジュール損失を0.1%に抑制した。また、全数直列接続により低電流高電圧駆動もジュール損失抑制に寄与している⁴⁾。

2.5 封止材料

封止材料の集光光に対する耐候性に関しては、UV印刷に使われる鉄メタルハライドランプに対し水冷しながらアーク長あたりの入力250W/cm（石英バルブを用いた高圧紫外線ランプでも空冷ではアーク入力密度は80W/cmが限界）といった過負荷入力を与えた上に楕円反射鏡で集光照射させる構造の紫外線加速劣化促進機を開発し⁵⁾、集光暴露試験を繰り返すことにより、封止材料としてシリコン系樹脂を選んだ。

3. 集光光学系

太陽光エネルギーの集光利用では像の歪みなどに注意

を払う必要が無く（結像する必要が無く）、したがってレンズ形状が一義的に決まるわけではない。したがって、実用上の課題を勘案して形状の調整が可能となる。実用発電装置では追尾誤差が大なり小なり発生するので、この誤差を前提とした設計を行った。レンズ形状は最適値問題を解くことにより求めることができる。最適値問題の制約条件として、許容設計追尾誤差（入射半角として 1.7° ）をあらかじめ与えた。この解は無数に存在する。外表面側にプリズム溝を持たない（なめらかな曲面）という制約条件で解くと、解は一義に定まり、ドーム型の外形形状となった⁶⁾。この形状は同時に最小ふれ角条件をほぼ満たしており、色収差も最小となる。このレンズは設計許容追尾誤差内では一定の集光効率で集光するものの、この範囲をはずれると急激に集光光が減衰する特徴を持っている。この特性は、追尾装置が故障するなどして、セル以外の場所に集光光が照射されるようなことがあった場合の部材熱損傷の可能性を抑制するのにも役立っている。

樹脂材としては耐候性試験結果などから PMMA を選択した。フレネルレンズの製法としては、量産性を考慮し、組金型による射出成形を採用した。従来、高精度を要求するフレネルレンズの製法としては熱間プレスが一般的である上、ドーム型形状を組金型で成形する技術も、90 年代に米国のボーイング社、GE 社が挑戦したものの、相次いで挫折した難易度の高い技術である。加えて、PMMA は硬く、成形が困難な樹脂の部類に入る。射出圧力、温度、取り出し条件などを精密に制御した。また、成形・金型についても新技術を開発した。レンズ中央部は光学性能を犠牲にするものの抜き角を正に保つことにより垂直に金型をはずすものの、周囲は金型を水平方向に引き抜くといった組金型を開発した。Ray-Tracing Simulation を用いて全体

の光学効率に影響を与えずに、安定して抜き型動作が行えるように垂直抜き型領域およびその抜き角を設計した。

円偏光エキスパンドレーザーを面掃引し、セル受光面積に相当する受光窓に入射する光エネルギーの割合から集光性能を評価した（Fig.3）。図にて x 軸、y 軸はレンズの投影面、z 軸は投影面各々の地点での光学効率を示す。面プロットに重ね合わせて示したドットは実際に掃引測定したポイントを表している。図の中央部で光学効率がわずかに低下している領域が、成形条件を優先し光学効率を犠牲にした領域である。

最高効率としては 85.4% が得られた。この値の多寡については意見が分かれるところである。ドイツフラウンホッフ研が試作したモジュール（効率 22.7%）に用いられたレンズ（シリコン樹脂製プリズムシート貼りあわせ方式）での効率が 84 ~ 86% と報告されていることを考えると³⁾、量産性に適した方法で同程度の効率を達成したといえるであろう。

4．非一様集光・色収差対策

一般に集光した太陽光は強度、スペクトルとも一様ではなく、セルの動作を損なうことが理論的に知られており、実験上からも定量的に確認されている^{7),8)}。セルに様な集光光を照射するには万華鏡型の 2 次光学系を併用することが効果的である⁹⁾。これには金属の表面反射を用いる方法、誘電体の界面全反射を用いる方法の 2 通りが考えられるが、反射効率および耐久性の実験結果から後者を採用した¹⁰⁾。Fig.4 に 2 次光学系の有無による電流電圧特性の変化を計測した例を示す。一様な強度、スペクトルの光が照射されることにより、高負荷の状態でも出力電流が低下しないことが示された。

Fig.3. Distributions of 140mm square 400 X Fresnel lens optical efficiency made by injection molding before improvement (left) and after improvement (right).

Fig.4. - curves of the concentrator solar cell illuminated by 400 X Fresnel lens with and without a homogenizer.

5. 放熱および実装技術開発

実装においては正確な熱設計が重要である。例えば 500 倍集光では放熱が悪いと、理論上、熱放射がバランスする 1450 °C の高温まで温度が上昇しうる⁽¹⁾。逆に熱の速やかな拡散に成功すれば、Fig.5 に示すように、所詮は太陽に照らされた金属板の温度上昇に過ぎなくなる。本節ではその熱設計手段の具体例を提示する。

Fig.6 に本研究で用いた多接合セルの構造とエネルギーバランスの数値解析に用いたモデルを示す。エネルギー収支計算としては、セル内部での熱収支、および筐体での熱拡散とに分けることができる。線形過程であるので、両者

の重畳として熱流および温度分布を与えることができる。まず、セル内部での熱収支について説明する。

Fig.5. Heat spreading concept for concentrator module. Notice that the total energy will be same (as low as 1 kW/m²) if the concentrated heat is efficiently spread.

エネルギー吸収：各接合でのバンド幅により決まる吸収波長範囲での太陽光エネルギーの吸収。一般に高効率の多接合セルでは分光感度特性はほとんど矩形窓であり、近似として吸収端以下の光はすべて吸収するとして扱うことができる。また、最下層の Ge 以外の接合の厚さは基板の厚さに比べ非常に薄いので、これらはすべて表面層吸収と

Fig.6. Heat flow circuit and structure of solar cell.

して扱うことができる。また、Ge 吸収端およびセル内部のジュール損はバルク吸収として扱うことができる。最後に Ge 吸収端以上の波長の光に対してはすべて背面吸収として扱うことができる。

エネルギー支出：各接合での発電による出力は各々の層（Ge 以外の接合では表面，Ge 接合はバルク）でのエネルギー流出と扱える。また，筐体および表面での対流損失は，適当な熱伝達係数から計算できる。

エネルギーバランスの基礎方程式：線形過程であるため，下記3条件(1)～(3)式の重畳として扱うことができる。ここに，変数 x は表面からの深さ， s_1 ， s_2 はそれぞれ表面の雰囲気温度，裏面の温度， λ ， α_1 ， α_2 は表面の熱伝達係数（この場合は表面における自然対流条件での熱伝達係数），裏面の熱伝達係数（この場合は裏面の絶縁層における熱伝達係数）， λ は Ge 基板の熱伝達係数，Thick は Ge 基板（多接合セル）の厚さ， qs_1 ， qs_2 は表面および裏面での単位面積あたりの熱発生量（表面および裏面での光吸収量からそれぞれでの発電量を差し引いたもの，ただし，裏面での発電量は零）， q はバルク領域での単位体積当たりの熱発生量（Ge ボトムセルの吸収量にジュール損失を加えたものから Ge ボトムセルでの発電量を差し引いたもの）である。上記方程式で求められる $\theta_1(x)$ ， $\theta_2(x)$ ， $\theta_3(x)$ はそれぞれセルを貫流する熱流により発生する温度，セル表面および裏面での熱源により発生する温度，セル内部の均一な熱源により発生する温度であり，セル内部の温度分布は線形過程における重畳の原理によりこの3者の単純和として表される。

また，セル内部に流れる熱流速は以下の式(4)で表される。

$$\theta_1(x) := \frac{-(\theta s_1 - \theta s_2)}{\lambda \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\text{Thick}}{\lambda} \right)} \cdot \left(x + \frac{\lambda}{\alpha_1} \right) + \theta s_1 \quad (1)$$

$$\theta_2(x) := \frac{-(\alpha_2 \cdot qs_1 + \alpha_1 \cdot qs_2)}{(\alpha_2 \cdot \lambda + \alpha_1 \cdot \lambda + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \text{Thick})} \cdot x + \frac{-(-qs_1 \cdot \lambda - qs_1 \cdot \alpha_2 \cdot \text{Thick} + \lambda \cdot qs_2)}{(\alpha_2 \cdot \lambda + \alpha_1 \cdot \lambda + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \text{Thick})} \quad (2)$$

$$\theta_3(x) := \frac{-1}{2} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot x^2 + \frac{1}{\lambda \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\text{Thick}}{\lambda} \right)} \cdot \frac{q}{\alpha_2} \cdot \text{Thick} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_2}{\lambda} \cdot \text{Thick} \right) \cdot \left(x + \frac{\lambda}{\alpha_1} \right) \quad (3)$$

$$Q(x) := \frac{\theta s_1 - \theta s_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\text{Thick}}{\lambda}} + \frac{\frac{qs_1}{\alpha_1} + \frac{qs_2}{\alpha_2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\text{Thick}}{\lambda}} + q \cdot x - \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\text{Thick}}{\lambda} \right)} \cdot \frac{q}{\alpha_2} \cdot \text{Thick} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_2}{\lambda} \cdot \text{Thick} \right) \quad (4)$$

以上より，多接合セル内部の温度分布および熱流束を求めることができた。通常，セルと筐体との間には絶縁層があり，熱抵抗は比較的高い。この間の温度差は単純に熱抵抗に熱流束を掛け合わせるにより求めることができる。

次に，筐体への熱拡散であるが，これは中心部に発散源，および全面から一様な放熱源のあるポアソン方程式の境界値問題の解として容易に求めることができる。上記より求めた熱流束を発散源，ポテンシャルを温度と読み替ればよい。一般に筐体の厚みは筐体の代表長と比べ十分に小さいので，2次元の境界値問題として扱えば十分な精度が得られる。

光学集光倍率 300 倍での計算例を Fig. 7 に示す。図において x 軸， y 軸はレンズの鉛直投影面で切断した筐体の領域を示す。 z 軸は筐体辺縁部を基準とした温度上昇の度合

Fig.7. Temperature increase (Z-axis) front side of the base-plate relative to uniformly illuminated (non-concentrated) aluminum plate.

いを示す。したがって、セルを36個搭載したモジュールの場合、同じパターンの温度分布が36回繰り返されるといことである。セル表面温度は周辺部比で7.7Kと推定される。また、セルの開放電圧の温度特性から逆算した結果でも、筐体温度比で平均6Kの温度上昇が計測されており¹²⁾、ほぼ計算通りの温度上昇となっている。

高集光に伴う大電流、低抵抗、放熱、耐久性に十分な性能を有し、取り扱いが難しい。族3Jタンデムセルの実装には、これまでのシリコンセル高集光技術、あるいは多接合でも低集光倍率のに見られたような技術の壁を破る新たなモジュール化技術が要求される。

これまでは、高熱伝導性セラミック基板や銅板貼りつけガラス、アルミヒートシンクの上にワイヤーボンディングや導電性接着などで実装するのが一般的であったが、コストおよび信頼性の点で不安があった^{13),14)}。これに対し、Fig.2に示したように信頼性が高く大電流対応が可能なレーシーバーの実装構造を開発した。シンプルな構造であるため、低コスト化、自動組立化が容易である。

本レーシーバーはアルミ製のシャーシに直接セルや配線がラミネートされており、これまでのような煩雑な機械加工や立体構造が不要となっている。集光によりセルが受ける熱は低熱抵抗の熱伝導性エポキシにより速やかにアルミシャーシに拡散されるため、ヒートシンクなしでも500倍、1000倍といった高集光が可能である¹³⁾。万一、追尾がずれて集光スポットがセル以外ところに当たったとしても、エポキシを通してアルミシャーシに直接放熱されるため、集光スポットがずれて電線が焦げるといった事故と無縁である。

良好な熱伝導性と過酷な熱サイクルに耐える接着強度とを両立させるために、通常のソーラーパネル(ラミネート圧1気圧)の場合を遙かに超える高圧プレス(ラミネート圧20気圧)でセルをラミネートしている。集光セルは

脆い150 μ m厚Ge製であり¹⁵⁾、ピンセットでつまんだだけで割れてしまう。以下に述べる新プロセスにより真空を用いなくても超高压でラミネートすることに成功した。

セル割れの主原因である剪断応力には熱可塑性樹脂をラミネートでの温度上昇により溶融し、加圧パッドの熱変形から発生する剪断応力を液層で開放してセルに伝わらないようにした。また、この溶融熱可塑性樹脂はセルの凹凸や段差を埋め、均一な静水圧を加えるのにも役立っていると思われる。加圧、温度、保持時間といった基本的プロセスパラメータについては、樹脂粘弾性の温度特性から、粘度および弾性率の低下に合わせて加圧を増大するとともに、セルの変形が起こらないが樹脂の流動するのに十分な時間を保持した。これにより、高い再現性と歩留まりで繊細な集光セルを実装するプロセスを安定化させた。さらに、熱膨張率差の少ない42ニッケル合金と低抵抗かつ柔軟性に富み残留応力を塑性変形で緩和できる錫鍍金純銅からなる複合部材を開発し、残留応力を最小限に押さえ、特性劣化の抑制に成功した。

6. 発電性能評価

Fig.8に示すレンズ・セル36対を直列接続したモジュールを試作し、屋外で発電特性を評価した。評価地点は愛知県の犬山市と豊橋市を選び各々独立に評価を行った(Fig.9)。

Fig.8. Inside view of the new module-side covers are removed to show the inside.

Fig.9. Field test in Inuyama site 25 km north from sea, 3 km south from a big river constructed on sunken place, little wind (left) and in Toyohashi site, rooftop of the building and relatively strong wind, 5 km north from sea (right).

いずれのサイトとも、標準条件（モジュール温度 25℃ 補正、ただし温度係数は 0.17%/K）補正でのピーク発電効率として 28.1% が得られた。快晴時の発電効率を Fig.10 に、雲に時々太陽が隠れる典型的な晴天日での発電効率を Fig.11 に示す。なお、Fig.10、Fig.11 にて朝夕の太陽高度の低い時間帯で発電効率が低下しているのは、直達太陽光が通過する空気層が厚くなるので、大気中の混濁成分により、短波長成分が不足しているためである。

ただし、その後、豊橋サイトでの直達日射計を再校正したところ、再校正後の感度係数がわずかに上昇した。この校正係数を適用すると、効率は 27.5% となる。この例に留まらず法線面直達日射量の計測は種々の要因に影響される上、発電量との対応も相関も必ずしも確立されたわけではない。誤差要因を考慮すると、空気が澄んでおり条件の良い気象条件での発電効率としては $26.8 \pm 1.5\%$ と考えられる。

発電効率そのものについては、基準となる法線面直達日射エネルギー計測に誤差を含み絶対値そのものにはエラーバーが伴うので、従来型ソーラーパネルとの比較も行っている。Fig.12 に市販多結晶シリコン太陽電池（12.5cm

Fig.10. Power generation in a course of the day-clear sky day.

Fig.11. Power generation in a course of the day-sunny day with thin clouds.

Fig.12. Comparison to a commercial flat-plate crystalline silicon module.

角)モジュールとの発電量の比較を示す。朝夕の周辺構築物が日影を落とす時間帯を除けば、晴天時の単位面積あたりの発電量は約 2.9 倍となった。

7. 損失解析

集光式太陽光発電では、小面積高効率の太陽電池にいかにより有効にエネルギーを注入し、かつ、いかに効率よく電力を取り出すための光学技術、実装技術が重要となる。そこで、モジュール化に伴うエネルギー効率を評価した。

通常、太陽電池は屋内を用いて人工太陽光（スペクトル基準 AM1.5G）で評価される。ここで問題となるのは、国内では夏至南中快晴時といえども、法線面の直達日射は基準スペクトルよりも短波長成分が少なく、発電効率が低下してしまうことである。エネルギー伝達効率評価のためにはこの効果を補正する必要がある。

Fig.13 に等価回路と法線面直達日射のスペクトルモデ

Fig.13. Measured and calculated efficiency of the concentrator module with 3-J cells.

Fig.14. Energy flow diagram of the concentrator module.

ルを用い、モジュール効率を計算した結果と実際の測定値との比較を示す。両者はほぼ一致している。これを敷衍して太陽光スペクトルが常時AM1.5G基準スペクトルで不変とした場合での効率計算結果を比較する。これにより、AM1.5G 基準スペクトルでのモジュール効率が算出される。この基準スペクトルモジュール効率とセル効率との比をとることにより、モジュール化効率を算定できる。モジュール化効率としては78%と推定され、まだまだ改善の余地があることが暗示される。なお、Fig.13にて法線面直達日射量が200～600 W/m²で計算値からはずれた測定点列が認められるが、これは日の出から2時間の時間帯で集光レンズに結露が付着し、透過効率が低下した影響である。

さらに、各部のエネルギー伝達効率を測定し、積算した結果をFig.14に示す。特に集光レンズでの損失が大きいことがわかる。

8. 結 論

本研究は高集光に耐え、かつ、シンプルな構造を有し、1000倍を越える集光倍率にもスケールアップが可能な表面実装による集光モジュールにつき行ったものである。これまでドイツフラウンホッフ研が保有していた高集光多接合セルを用いた集光モジュールの効率記録(22.7%, 768cm²)²⁾を効率、大きさともに大幅に更新する28%の効率を7056cm²の大幅面積で実現させた。

9. 謝 辞

本研究は、経済産業省のもと、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO 技術開発機構)から委託され、実施したもので関係各位に感謝する。セルはシャープ、レンズは大同メタル工業が同じく新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により試作開発を行った。

非結像フレネルレンズ設計理論はドイツフィリップス大学 R. Leutz 講師が提唱し、東京農工大学大学院工学研究科秋澤研究室で設計がなされた。両氏からはフレネルレンズ、ホモジナイザーをはじめとする集光光学系技術開発に関し有益な助言を頂いた。モジュールに使った特殊材料について愛知県内地域企業の技術者からさまざまな助言を頂いた。各位に感謝する。

(文 献)

- 1) M. Yamaguchi, A. Luque: IEEE Trans. Elec. Dev., 46-10 (1999) 2139.
- 2) 北村章夫: 太陽エネルギー, 29-5 (2003) 26.
- 3) A. W. Bett, C. Baur, F. Dimorth, G. Lange, M. Meusel, S. van Riesen, G. Siefert, V. M. Andreev, V. D. Rumyantsev, N. A. Sadchikov: Proc. 3rd WCPEC, (2003) 634.
- 4) K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, M. Yamaguchi: Proc. 3rd WCPEC, (2003) 630.
- 5) K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, M. Yamaguchi: Proc. 3rd WCPEC, (2003) 805.
- 6) R. Leutz, A. Suzuki (2001) Nonimaging Fresnel Lenses: Design and Performance of Solar Concentrators; [Springer Verlag, Heidelberg].
- 7) S. R. Kurtz et al.: Proc. 1st WCPEC (1994) 1791.
- 8) M. J. O'Neill: Proc. 25th IEEE PVSC, (1996) 349.
- 9) 荒木建次, 近藤道雄, 山口真史: 電気製鋼, 73 (2002) 221.
- 10) K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, M. Yamaguchi: Proc. 3rd WCPEC, (2003) 853.
- 11) K. Araki, M. Yamaguchi: Proc. 29th IEEE PVSC, (2002) 1568.
- 12) K. Araki, H. Uozumi, M. Yamaguchi: Proc. 3rd WCPEC, (2003) 2350.
- 13) A. W. Bett, F. Dimroth, M. Hein, G. Lange, M. Meusel, U. Schubert, G. Siefert: Proc. 29th IEEE PVSC, (2002) 844.
- 14) H. Cotal, R. Sherif, G. Glenn, D. Krut, A. Paredes, T. Meza: Proc. 29th IEEE PVSC, (2002) 1612.
- 15) T. Takamoto, T. Agui, K. Kamimura, M. Kaneiwa, M. Imaizumi, S. Matsuda, M. Yamaguchi: Proc. 3rd WCPEC, (2003) 581.