

# 太陽熱発電用フィルムミラーの開発

Development of Mirror Film for Concentrated Solar Power

安達 仁\*  
Hitoshi ADACHI

鈴木 利継\*  
Toshitsugu SUZUKI

本田 美佳\*  
Mika HONDA

森 伸芳\*\*  
Nobuyoshi MORI

齋藤 篤志\*\*\*  
Atsushi SAITO

## 要旨

集光太陽熱発電は砂漠などの広大な未利用地での再生可能エネルギーとして期待され、フィルムミラーは軽量、柔軟で割れないという特長により取扱易く、組立性や高精度で集光性に優れた新規光学系を可能にする材料として登場した。しかしこれまで商用化されたフィルムミラーはいずれも耐傷性など屋外耐久性が劣り、本格的に適用されていない。

コニカミノルタは日中の強烈な日射、夜間の結露に加え、砂が表面を汚す砂漠環境下を想定し、フィルムミラーの耐傷性、耐腐食性をはじめとする耐久性の向上および洗浄法等の周辺技術を開発してきた。

この結果、コニカミノルタのフィルムミラーは正反射率（スペキュラー反射率）が従来のフィルムミラーに比べ優れるだけでなく、UV曝露試験、塩水浸漬試験さらには砂嵐を模擬したサンドブラスト試験で優れた耐久性を示すものとなった。

また実際の集光太陽熱発電所で実施されている洗浄方法を研究し、これに適用できる特殊な洗浄ブラシを開発することで洗浄性と耐傷性の両立を果たした。

フィルムミラーには端部からの腐食と剥離という弱点があり、塩水やブラシによる物理ダメージが耐久性における大きな問題であった。これまでは粘着テープによる端部封止が対策として取られてきたが、この方法は施工性が悪く大量のミラーパネルを製作する際の新たな課題となっていた。コニカミノルタはこれに代わるエッジ塗布封止技術を開発した。封止剤の選定と専用塗布ヘッドの開発により、正確でスピーディな施工が可能となり、大規模なプラントへも供給できるようになった。また密閉性が向上し、物理ダメージを含め耐久性が大幅に向上した。

本稿では上記フィルムミラーの耐久性試験結果および洗浄用特殊ブラシを用いた洗浄試験結果、エッジ塗布封止の効果を紹介する。

これらの成果は、従来のフィルムミラーの懸念点を払拭し、フィルムミラーの真の実用化をもたらすものである。それは集光太陽熱発電の本格的な普及発展を促し、持続性社会の実現に貢献する。

## Abstract

Concentrated solar power (CSP) is a renewable energy source perfect for such unutilized lands as deserts. Mirrors made with mirror film are easier to use than glass mirrors because they are lighter, more flexible, and virtually unbreakable as compared with glass mirrors, while they are equivalent to glass mirrors in the performance of the novel collector optics required for accuracy and high light concentration. However mirrors used in the desert are sun baked in the daytime and have dew condensed on them nightly, and they face abrasion from wind-blown sand. Mirrors made with earlier mirror films were impossible to use on a large scale because they were not durable enough to survive outdoors, especially because of low scratch resistance.

Our newly developed mirror film provides high specular reflectance, excellent resistance to corrosion, and scratching. We have also developed peripheral technologies for cleaning and for sealing the edges of the mirror film. As a result, mirrors using our mirror film display exceptional durability in UV exposure, saltwater immersion, and sandblasting tests that simulate sandstorms. The special cleaning brush we developed thoroughly cleans but does not scratch the mirror surface.

Earlier mirror film suffered delamination and corrosion from the edges, a serious issue in durability. The earlier solution was to seal the edges of the mirror panels with adhesive tape, but this was ill-suited to high-volume production. To enable precise, high-speed sealing for high-volume production, we chose an appropriate sealant and designed a special sealant coating head so that mirrors using mirror film can be supplied to major-scale CSP plants. Furthermore our sealant method dramatically improves durability against corrosion and physical damage.

Our new mirror film stands to greatly contribute to the spread of CSP worldwide, and thus to the realization of a world of sustainable energy.

\*アドバンストレイヤーカンパニー アドバンスフィルム事業統括部 AF開発部

\*\*アドバンストレイヤーカンパニー アドバンスフィルム事業統括部 DF事業推進G

\*\*\*アドバンストレイヤーカンパニー 生産技術センター

## 1 はじめに

地球温暖化問題が取り上げられてから久しい。今日では地球上のいたるところで温暖化が引き起こす異常気象による災害が連日のようにニュースを賑わせており、再生可能エネルギーへのシフトが急務となってきている。

集光太陽熱発電は再生可能エネルギーの将来有望な選択肢の一つであろう。砂漠のような広大な不毛の土地に降り注ぐ莫大な太陽エネルギーは、エネルギーの最終形態の熱として無為に散逸している。集光太陽熱発電では、たくさんの鏡を利用してこの太陽エネルギーを集め、熱として用い発電を行う。原子力や化石燃料を燃やして得る熱の代わりに太陽エネルギーを用いるもので、CO<sub>2</sub>や核廃棄物を出さない究極のクリーンエネルギーと言えよう。

しかし、集光太陽熱発電は発電コストが高く、あまり普及していないのが実情である。これまでの集光太陽熱発電では、屋外の過酷な環境を考慮しガラスミラーが使われてきている。しかしガラスミラーは重い、割れるといった欠点を有し、危険で組立作業性に課題がある。

また、商用の集光太陽熱発電プラントの90%はFig. 1に示すようなトラフ式であり、放物面形状を有する曲面鏡を使用しているが、ガラスミラーの曲面加工には加熱プレスが必須で熱歪や形状歪を伴い形状精度が悪く集光特性に影響していた。このことは発電コストをさらに押し上げる原因となっていると考えられる。



Fig. 1 A CSP (concentrated solar power) plant using parabolic trough mirrors<sup>1)</sup>.

一方フィルムミラーは軽く、割れない、また柔軟で曲面化が容易といった特徴があり、上記ガラスミラーの欠点を補った新しい集光光学系を実現する新素材として、期待とともに登場した。ところが他社が商品化し提案したフィルムミラーは傷付きやすく、屋外耐久性に課題を残し、さらにガラスミラーにはなかった反射性能の面での問題もある。このためフィルムミラーを用いた集光太陽熱発電は未だ実用化を見ていない。

コニカミノルタは屋外、特に砂漠環境での実使用時に起こるあらゆるダメージを真摯に受け止め、集光太陽熱発電に変革をもたらすべく、フィルムミラーとその周辺技術を開発してきた。本稿ではコニカミノルタの高耐久フィルムミラーの特性と実用を想定した周辺技術について紹介する。

## 2 フィルムミラーの主要技術

### 2.1 フィルムミラーの層構成

フィルムミラーには、太陽光を効率よく集光し熱として利用するための高い正反射特性と、砂漠環境下において20年以上に渡って機能し続ける耐久性の両方が要求される。高い正反射特性を得るために、反射層には金属の中でも可視～赤外域の光反射率の最も高い銀反射層を用いている。しかし銀反射層は、大気中の酸素や塩分、周辺の樹脂部分の紫外線劣化によっても劣化が進行し、著しい反射率低下の要因となる。また、砂嵐による傷なども反射率低下の要因となる。

そこで、これらの自然界における劣化因子からフィルムミラーの機能を保護するため、Fig. 2のような層構成を設計した。

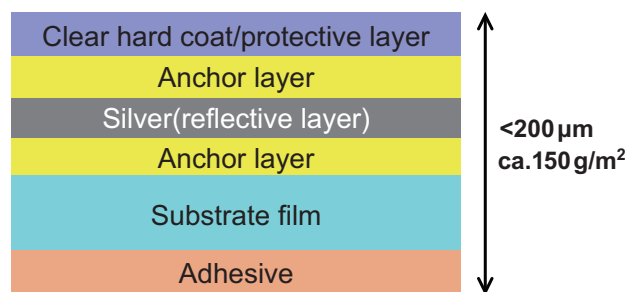


Fig. 2 Multilayer composition of our newly designed mirror film (sunlight enters from the top of the figure).

### 2.2 耐光性評価

太陽光曝露の加速試験には、通常Xeウェザーメーターを用いるが、25年相当分の紫外線を与えるには約1.5年がかかる。そこで評価を加速するために、アリゾナ砂漠において、Fig. 3に示すようなAMETEK社の超促進屋外曝露システム(UAWS)を用いて、屋外曝露25年相当のエネルギー照射実験を、約6ヶ月の期間で実施した。



Fig. 3 An ultra-accelerated weathering system (UAWS) was used for testing in the Arizona desert, U.S.A., with the apparatus shown. Our UV energy exposure test, corresponding to 25 years exposure, was achieved in about 6 months<sup>2), 3), 4)</sup>.

上記のUAWS試験機において、我々の開発したフィルムミラーの評価サンプルを60°C一定となるよう温度を制御しながら、屋外太陽光曝露試験を行った結果をFig. 4に示す。25年相当の紫外線（8625 MJ/m<sup>2</sup>）を照射後も反射率は初期値をほぼ維持する結果が得られている。

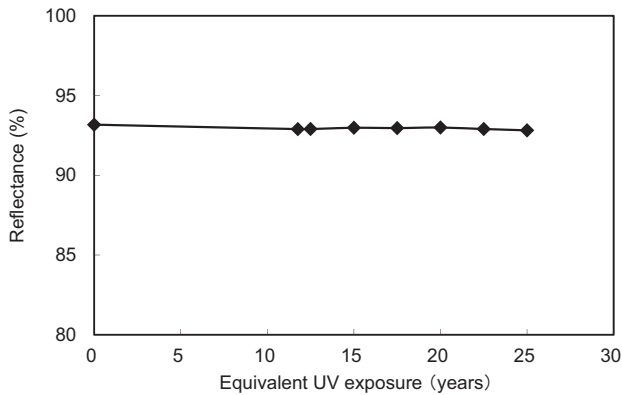


Fig. 4 Results of the UAWS exposure test of our mirror film. No degradation of reflectance is observed against a UV dose of 8,625 MJ/m<sup>2</sup>, equivalent to 25 years exposure.

### 2.3 洗浄性

屋外で使用されるフィルムミラーには、洗浄時に噴霧される水や結露によって付着した水分に砂などの汚れ成分が混じり、乾燥する過程でミラー表面に固着するため、ブラシなどによる洗浄では汚れがなかなか除去できないといった問題が生じる。Fig. 5において、上の図は一般的なガラスミラーで親水性表面に泥水が広がっている様子を示している。その一方で、我々のフィルムミラーはハードコートに撥水表面処理を施しており、泥水は小さな水滴となる。その結果、表面に付着した泥汚れは小さな面積に集まるため、反射率の低下が小さく、またふき取りも容易である。

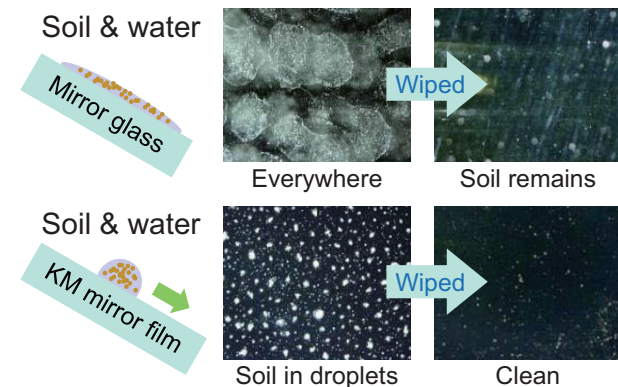


Fig. 5 Artificial soiling and cleaning tests. The upper-left image shows a mixture of water and soil sliding down over a tilted conventional glass mirror. The lower-left image shows the same over a mirror using our mirror film. The soil spreads everywhere over the surface of the glass mirror, but mirror film is water repellent so that the water and soil forms droplets. These droplets gather in small areas for a minimal loss of reflectivity, even without cleaning. Further, soil on the mirror film virtually disappears after wiping, whereas the glass mirror fails to come completely clean.

### 2.4 耐傷性

フィルムミラーが設置されるサンベルト地帯には砂嵐が多く存在し、砂嵐が発生することも珍しくない。砂嵐はその衝撃により構造体を損傷する原因となるため、砂嵐によるミラー面への衝撃に対する模擬試験として、ガラスビーズを使ったサンドブラスト試験を実施した。

吹き付ける砂粒はアブダビにおいて採取した砂粒と粒径を合わせ、風速20 m/秒、チルト角60°、吹きつけ時間は15秒で実施した。

また、砂粒の吹き付け有無による傷付きを比較するため、サンプルミラーの半分の面積をマスキングテープで覆ってFig. 6に示すようなサンドブラスト試験を実施した。

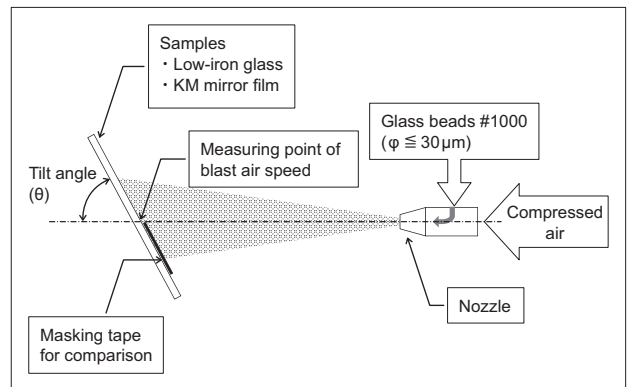


Fig. 6 Virtual sandstorm test. To simulate desert sand, a sandblast test was carried out using very fine glass beads. The test conditions were designed based on our experiences in Abu Dhabi: wind speed, 20 m/sec; tilt angle, 60°; blasting duration, 15 sec.

結果をFig. 7に示す。マスキングテープを剥がすと平滑な表面は暗く見え、ダメージを受けた表面は光の散乱で白く見える。比較品のガラスミラーでは、砂粒の衝撃による衝撃で白化が生じ、傷がついた様子が分かる。

一方、フィルムミラーでは白化が見られていない。これは、より硬いガラス表面は砂粒の衝撃を受けて表面に微細な凹凸が形成されるが、フィルムミラーは表面のハードコートによる傷付き防止効果に加え、粘着層などの樹脂層が衝突応力を吸収し、最表面への衝撃を緩和したためと考えられる。

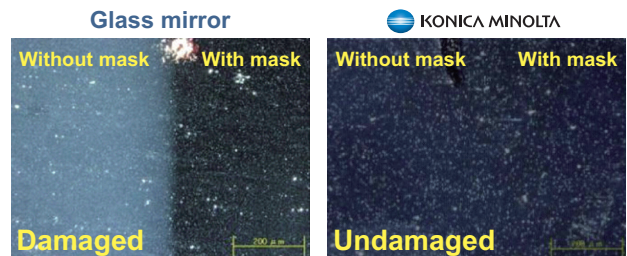


Fig. 7 To allow comparison, half of each sample was covered with masking tape in the sandblast test in Fig. 6. When the masking tape was peeled off, smooth surfaces appeared black, while damaged surfaces appeared milky white due to light scattering. In this test, the glass mirror was damaged but the mirror using our mirror film was not, indicating higher resistivity.

## 2.5 塩水耐性

太陽熱発電プラントは乾いた砂漠環境下のみならず、湿度の高い沿岸部に設置されるケースも想定される。

フィルムミラーの反射層には銀を用いており、高反射率が得られる一方、酸化や塩化、硫化によって銀反射層の腐食が進行し、銀反射層界面で剥離が生じてしまうといった課題がある。そこで、銀反射層上下のアンカー層には、銀表面に吸着して安定化する化合物を添加し、銀の腐食を抑制している。

その効果として、フィルムミラーを実際の海水濃度に近い3.5%の塩水に浸漬した場合の塩水耐性を評価した。

評価結果をFig. 8に示す。左図は塩水によって剥離が加速された他社品サンプルで、浸漬後21日目で保護層が完全に剥離してしまった。一方、右図の我々のフィルムミラーは浸漬開始後145日を経過しても劣化がみられない。



Fig. 8 Salt water immersion test. A mirror using the mirror films of a competitor and one using Konica Minolta's mirror film were soaked in 3.5% salt water. After 21 days, the competitor's mirror had completely delaminated, but after 145 days the Konica Minolta mirror showed no change, thanks to the mirror film's anchor layer.

## 3 メンテナンスにおける信頼性向上

フィルムミラーは、サンベルト地域の砂漠環境下に設置されるため、砂を含んだ塵、埃などが表面に堆積し、これらが雨などにより固着して反射率を著しく劣化させる。反射率回復のために実施している洗浄の一つである物理洗浄により、フィルムミラーの反射面に傷が入るため、傷つかない洗浄技術を開発した。また、大気中の酸素や水分による反射層腐食やデラミネーションを抑制するための封止技術の開発を行った。

### 3.1 ミラー洗浄技術

20~30年と長期に渡り発電を継続するにはミラー反射率を長期に渡り維持する必要があるため、付着した砂塵などの汚れを定期的に洗浄する事が求められる。

一方、フィルムミラーの繰り返し洗浄に伴い傷が累積されて反射率低下が起り、発電効率が低下し、発電コストの上昇を招いてしまう。従って、発電コスト上昇を抑え、ミラー反射率を維持するため、我々は傷が入らない洗浄技術を開発した。

また、太陽熱発電プラントは一般的に50MW以上と大きく、洗浄するミラー面積は一例を挙げると、洗浄高さ6m以上、洗浄距離60km以上と大きい。そのため洗浄に時間を要すると、日々の砂塵による汚れが再び堆積し洗浄効果を失うので、効率的な洗浄技術が求められている。

### 1) 傷が入らない洗浄技術

付着汚れの主成分はシリカであり、少量含まれる粘土成分と共に粒状又は不定形の状態で存在している。そのまま強い力で押し擦ると硬く鋭利なシリカによってフィルムミラーは表面弾性限界を超えて傷付く。これを防止するには、フィルムへのシリカ押圧力低減と、洗浄面からの汚れの速やかな除去が必要である。水と洗浄ブラシ選定により、我々はFig. 9に示すように傷を入れず綺麗に洗浄できる技術を開発した。

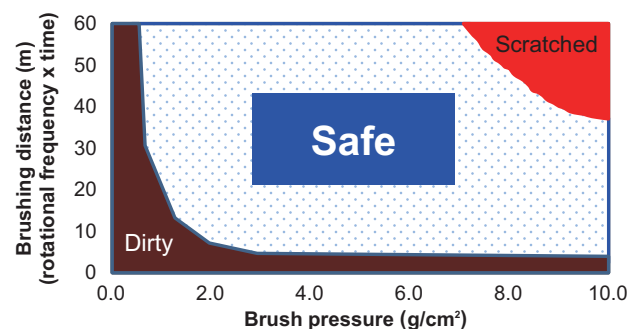


Fig. 9 Safe cleaning. Our cleaning brush allows a wide, safe range of brush pressure and brushing distance, brushing away dirt without scratching. The narrow safe range of a conventional brush means there is always the danger of the mirror either remaining dirty or being scratched.

### 2) 大型洗浄技術

プラント洗浄はFig. 10のCleaning vehicleという路面走行型の車両に洗浄ブラシを搭載した装置を用いるのが一般的である。この車両をそのまま活用してKMが開発した洗浄技術を適用することが近道と判断し、洗浄に用いるブラシの開発を行った。



Fig. 10 Konica Minolta's cleaning method on a large scale. Our brushes have been mounted on vehicles and used in actual trough cleaning<sup>9)</sup>.

その結果、傷を入れずに綺麗に洗浄する大型洗浄条件を確立した。しかし、繰り返し洗浄の目標としている半年間の使用に耐えるほどのブラシ耐久性は未達であり、更なる技術開発が必要である。

### 3.2 端部封止技術

フィルムミラーはアルミ薄板等の基材へ接着してミラーパネル化して用いられるが、この接着部が端部から剥離する懸念がある。また、フィルムミラーの切断面は銀が表出し、この部分から銀の腐食が発生するため何らかの封止が必要である。既存のフィルムミラーでは端部封止にテープを貼っているが、テープそのものも長期間の屋外使用で剥離してしまい、耐久性に問題があった。また、テープでミラー表面を覆ってしまうため反射面積の縮小による発電効率の低下も問題であった。

コニカミノルタでは、フィルムミラー端部および基材への接着部の端部に、封止材を高精度に塗布する技術を開発することで上記の問題を解決した。この塗布技術には写真感材等の塗布で培ってきたコニカミノルタ独自の押出塗布方式の技術が応用されており、端面およびミラー反射面端部のごく狭い部分を同時にL字型に塗布するノズルを用いている。

Fig. 11 は基材へ貼り付けたフィルムミラー端部の断面模式図で、ミラー面を覆う幅は従来のテープ封止品の幅約6mmに対して、幅2mmと大幅に縮小している。

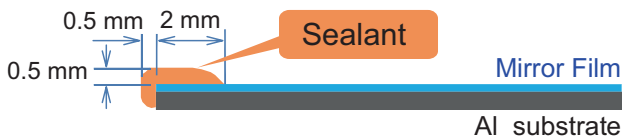


Fig. 11 L-shaped mirror film/substrate seal at design dimensions.

Fig. 12 は封止材をL字に塗布するノズルヘッドの模式図である。また、Fig. 13 は実際に塗布した封止材部分をレーザー測定器で測定した断面形状測定結果で、Fig. 11をよく再現しており、精度よく封止材が形成されていることが確認された。

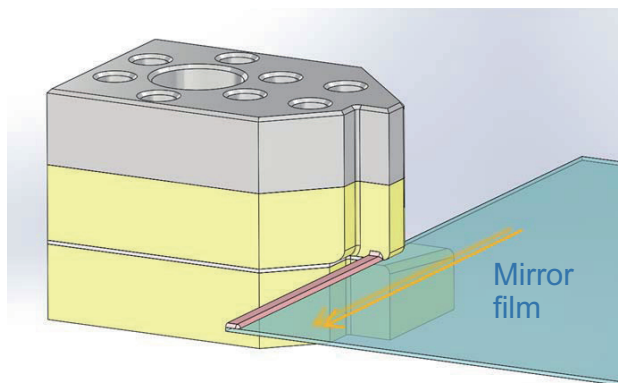


Fig. 12 A nozzle head for L-shaped sealing applies sealant both to the surface of the mirror film and to the edge that the film shares with its substrate.

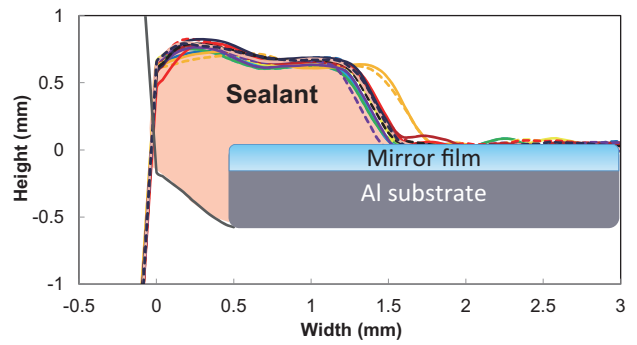


Fig. 13 Cross-sections measured by laser of the sealant on an actual mirror film on substrate. The shape and dimensions of the seal are maintained closely along the entire length of the seal.

### 3.3 封止材耐久性

#### 3.3.1 環境試験

端部封止済みミラーパネルを国際標準である性能認証規格 (IEC62108集光型太陽電池モジュール) に準拠し、Table 1 に示す封止材の劣化評価 (密着性、剥がれ、亀裂、変形) を行った。封止材-A, 封止材-Bが環境試験をクリアした。

Table 1 Environmental test results of sealant materials. Sealant materials A and B passed environment testing.

| Material | A         | B    | C    | D    |
|----------|-----------|------|------|------|
| Test a)  | Excellent | Good | Poor | Poor |
| Test b)  | Excellent | Good | Poor | Poor |
| Test c)  | Excellent | Good | Good | Good |
| Test d)  | Excellent | Good | Poor | Good |
| Test e)  | Excellent | Good | -    | -    |

In conformity with International standard IEC62108 (Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies - Design qualification and type approval)

- a) Thermal cycling test (Part 10.6)
- b) Damp heat test (Part 10.7)
- c) Humidity freeze test (Part 10.8)
- d) Salt spray test (ISO9227 NSS)
- e) Ultraviolet exposure (6900 MJ/m<sup>2</sup>)

Fig. 14 はTable 1 のTest a)とTest b)の環境試験の後に封止材の接着強度試験を行った結果である。封止材AとBが環境試験後も強度を維持していることが分かる。

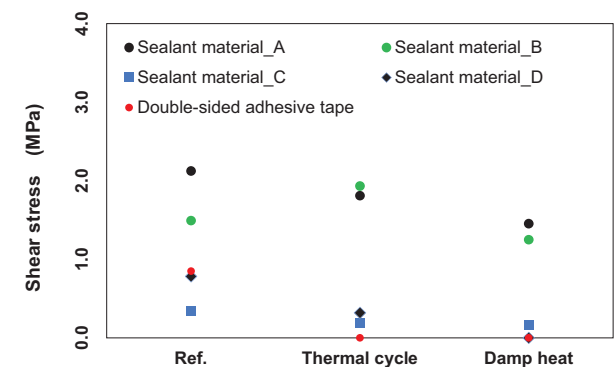


Fig. 14 Tensile strength after durability test. After a thermal cycling test or a damp heat test, tensile strength is lower than at initial level. However, the tensile strengths of sealing materials A and B are within the allowable range.

### 3.3.2 洗淨耐性

ミラーパネルは、反射効率を回復するためブラシを用いた物理洗淨を実施しているが封止材の洗淨耐性が懸念事項である。Fig. 15 のように環境試験後さらに20年相当の洗淨を実施し、封止材耐久性を確認している。

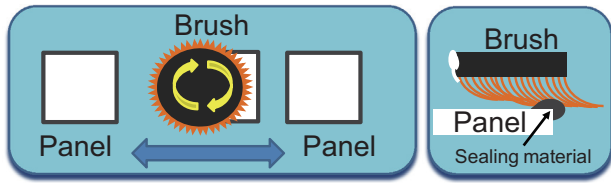


Fig. 15 Cleaning apparatus used in sealant durability test, in which sealant is put under great stress from a moving cleaning brush for over 1,000 cleaning cycles.

## 4 まとめ

ハードコートや紫外線吸収層、銀の腐食防止技術などの材料技術を駆使して、砂漠のような過酷な環境下でも20年以上に渡って機能を維持し続けうる太陽熱発電用フィルムミラーを開発した。

しかし、実際の使用環境においては、ただ静置しておくことに比べて、洗淨等の日々のメンテナンスに伴い遙かにフィルムミラーを劣化促進する因子が与えられることが明らかになってきた。

そこで今回、顧客が実際のプラントにおいてどのように集光設備をメンテナンスしているのかを調査し、その結果を元に、我々が顧客に提案できる洗淨技術と端部封止技術も併せて開発した。

今後、フィルムミラーのガラスミラーに対する優位性を示すとともに、メンテナンスにおける信頼性向上技術についても合わせてアピールし、安心して使っていただけるフィルムミラーを提供し太陽熱発電システムを普及・促進に貢献していく予定である。

#### ●参考文献

- 1) <http://www.acwapower.com/project/15/bokpoort-csp-project.html>
- 2) <http://atlas-mts.com/services/natural-weathering-testing-services/accelerated-weathering/ultra-accelerated-exposure-testing/>
- 3) Ultra-Accelerated Weathering System I: Design and Functional Considerations Henry K. Hardcastle, Gary J. Jorgensen, Carl E. Bingham (European Weathering Symposium)
- 4) Photo by Courtesy of Atlas Material Testing Technology LLC
- 5) Photo by Courtesy of Fermupe.S.L