

第 5 章

B 会員の研究成果

I. 目的

高信頼性PV封止材の開発

現在主流の PV 封止材 (EVA) は、原料樹脂の分解にともない発生しうる酢酸や、比較的容易に透過する水分による、長期信頼性への悪影響が懸念されている。本研究では、樹脂の酸発生量が少なく透湿性の低い、長期信頼性に寄与しうる封止材の開発を目的とする。

光硬化FRPシートを用いたフレキシブルモジュール設置工法の開発

第 I 期で旭化成ケミカルズ (株) が開発していたフレキシブルモジュールの建築物・構造物への後付け設置工法の開発を、第 II 期では旭化成 (株) にて引き続き検討を行う。

メガソーラー発電所向け防草対策技術の試験施工

第 I 期に 2m×2m の小面積で実施していたメガソーラー発電所向けの防草対策技術を、面積を拡大して実証検討する。

II. 研究開発目標

高信頼性PV封止材の開発

非 EVA 系樹脂を原料とした開発封止材を作製する。これを用いた各種 PV モジュール品を長期耐久性試験に供し、発電性能および EL 画像の経時変化を評価する。長期信頼性発現に向けて各部材に要求される特性の明確化、部材劣化メカニズムの解明を目指す。

光硬化FRPシートを用いたフレキシブルモジュール設置工法の開発

既存コンクリート建築物、建造物へフレキシブルモジュールを後付にて貼付け施工を行う工法の一つとして、ガラス繊維補強材入りの光硬化型 FRP シートによる接着工法の耐久性を屋外曝露により実証する。

メガソーラー発電所向け防草対策技術の試験施工

ポリオレフィン系防草シートと土系透水舗装による防草効果の確認と課題の抽出を行う。

III. 研究開発の成果

高信頼性PV封止材の開発

1. PO封止材の試作検討

耐候性と信頼性を向上させるため、開発品 PO 封止材を試作した。

表 1 に開発封止材の特徴を示す。開発封止材はポリオレフィン (PO) を原料としており、太陽電池セルの劣化原因とされる酸や水分の量が少なく、長期信頼性の発現が期待できる。開発封止材は、従来 EVA 封止材に比べ、「貯蔵安

表 1. 開発封止材の特徴

	試作PO	従来EVA
ベース樹脂	PO	EVA
分解によるガス発生	極微量	有
透湿性	低い	高い
体積抵抗率	高い	低い
有機過酸化物	無	有
加工(ラミネーション)適性	加工時間短縮 装置汚染なし	—
貯蔵安定性	室温 6ヶ月以上	冷暗所 6ヶ月以内

定性が高い」「加工適性に優れる」という特徴も有し、モジュールメーカーでの製造時間短縮や製造・メンテナンスコストの削減が期待できる。

2. 試作PO封止材を用いたPVモジュールの耐久性試験

標準（従来 EVA）封止材、および試作 PO 封止材を用い、それぞれバックシート種を変えて 4 セル多結晶モジュールを作製した。どの試作モジュールも、初期の発電性能は標準モジュールと同等であった。続いてこれらのモジュールを DH 試験に供し、発電性能の推移を評価した（図 1）。

標準モジュール（●）は、DH3000 時間を超えると発電量が大幅に低下した。一方、試作 PO 封止材使用モジュール（●）は、DH4000 時間後も初期比約 80% の発電量を維持した。

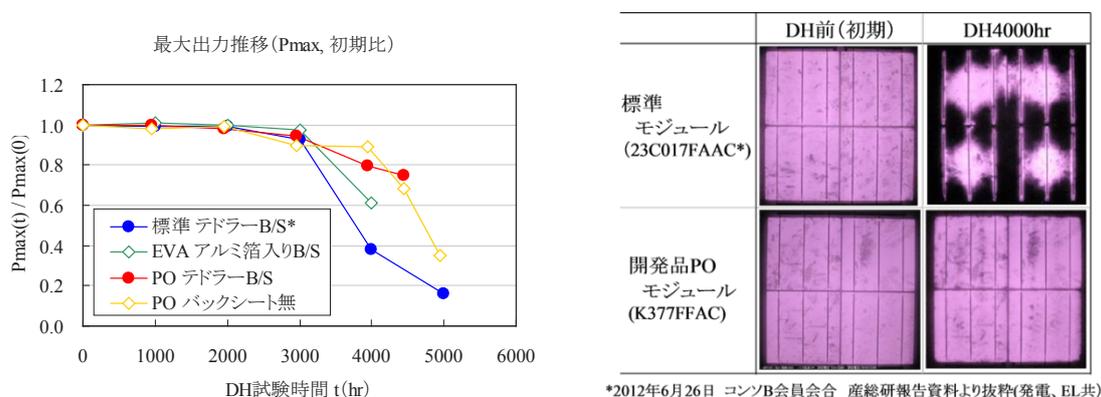


図 1. DH 試験前後の各種評価 (左) 最大出力推移 (右) EL 評価

EL 評価においても、試作 PO 封止材使用モジュールは DH4000 時間後も初期と同じ結果となった。試作 PO 封止材は DH 条件下において、従来 EVA 封止材に比べ高い長期信頼性を発現した。

標準モジュールのバックシートをアルミ箔入りに変えた場合（◇）、発電量低下は抑制される傾向にあった。一方、PO 封止材を用いると、バックシートがなく、水分がよりセルまで浸透しやすいモジュールでも（◇）発電量を同等の水準で維持できた。モジュールの長期信頼性に対し、「水分」単独では大きな影響はなく、「水分と酸の共存」あるいは「酸」単独で大きく影響することが示唆された。

試作 PO 封止材使用モジュールは、TC 試験においても、高い耐久性を示した。TC 試験 950 サイクル後も、初期と同等の発電量を維持できた。

試作 PO 封止材使用モジュールと標準モジュールを、PID 発生試験に供した。表面水張りの条件で、標準モジ

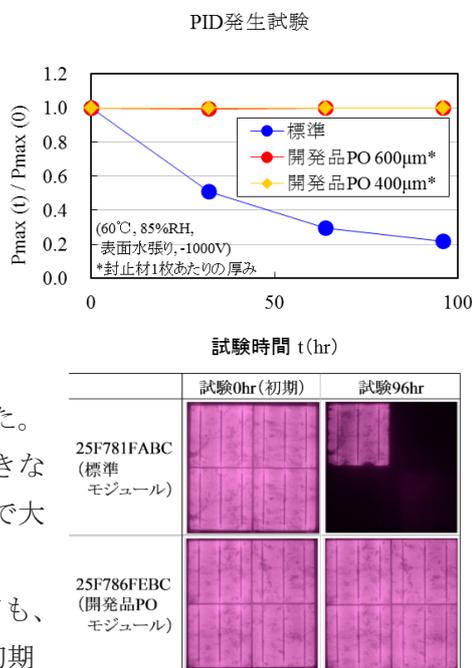


図 2. PID 発生試験結果 (上：発電量推移 下：EL 評価)

ジュール（●）は96時間後の出力が初期比30%を下回った。一方、試作PO封止材使用ジュールでは（●, ◆）その厚みによらず96時間後の出力も初期比99%以上であり、試作封止材の優れたPID耐性が示された(図2)。表面アルミ箔張りの条件でも同じ傾向にあった。PO樹脂はEVA樹脂に比べ透湿度が低い一方、体積抵抗率が高いことが原因と考えられる。

3. 光硬化FRPシートを用いたフレキシブルモジュール設置工法の開発

コンクリート製の建築物や建造物へフレキシブルモジュールを貼付け施工を行ったときの耐久性を確認するため、九州センターにて屋外曝露試験を実施した。

- ・使用モジュール：富士電機製フレキシブルモジュール
- ・使用母材：押出し成型コンクリート板、軽量気泡コンクリート板

① 第1次試験結果 2010年12月～2011年7月

2mモジュールをコンクリート平板へ施工。

モジュール裏面を固定していなかったため、コンクリート平板からの浮き上がりが発生し、表面を覆っていた光硬化FRPとモジュール表面材の剥離が発生した。

② 第2次試験結果：2011年7月～2013年3月

1mモジュールを施工。

軽量気泡コンクリート板への設置品は、2011年末の夜間外気温低下時に貼付け用のFRPが剥離した。母材の付着破壊であり、熱膨張係数差によるFRPの引張応力に軽量気泡コンクリート板が耐えられなかったもの、と判断した。

③ 2013年3月曝露試験品分解調査

周囲のみFRPで接着固定した方式：外気温の高い時期にモジュールの熱膨張により裏面の汎用両面テープが部分的に剥離し、表面が波打つ現象が見られた。モジュール周囲を接着固定していた光硬化FRPは異常なし。

モジュール表面を全面被覆した方式：冬季にコンクリートとの熱膨張率差によると思われるFRP板の微小クラックが角部に見られた。クラックはコンクリート接着面側から発生し、補強のためのガラス繊維部分で止まっており、表面まで貫通していなかった。モジュール裏面を汎用両面テープでコンクリートに貼り付けた効果により、コンクリート板からの浮き上がり及びFRPとの剥離は見られなかった。

4. メガソーラー発電所向け防草対策技術の試験施工

普及が進んでいるポリオレフィン系不織布を用いた防草シートと、近年施工実績が増えてきた土系透水舗装の「トース土」（旭化成ジオテック（株）の取扱商品であり、防草効果を期待して園路や堤防への施工実績あり）を九州センターの屋外曝露試験場へ施工し防草効果を確認した。



写真-1 第1次試験



写真-2 第2次試験

トース土工法：NETIS（国土交通省 新技術情報提供システム）登録番号 QS-060005-V



写真-3 施工前

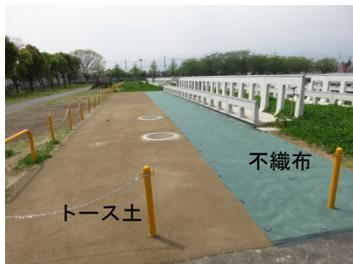


写真-4 施工後



写真-5 経時後

写真-3、-4は2012年4月の施工前後の写真である。写真-5は2013年12月の施工後1年7か月経過後の写真である。

- ① ポリオレフィン不織布：雑草の成長は見られないが、アスファルトやコンクリートとの接合部に施した接合テープの破断が見られる。今後破断したテープの隙間から雑草が生えることが心配される。
- ② トース土：ほふく性雑草であるツルヨシのランナー（走出枝）及び、小さな雑草が所々根を下ろしていることが確認される。ただし根を深く下ろすことは出来ていなかった。尚、トース土を開発したメーカーのホームページには、「雑草は生えにくい」、「コケ類は少し繁殖する」との記載がある。
- ③ 美観性比較：ポリオレフィン不織布は下土の凹凸の影響を受け、やや見苦しい。トース土は整備されたグラウンドのような外観を保っており、美観性に優れていた。

IV. まとめ

1. 高信頼性PV封止材の開発

酸発生のないPO系封止材を試作した。試作封止材を用いた多結晶PVモジュールでは、DH、TC、PIDの各耐久性試験において、標準モジュールを超える長期信頼性を示した。今後、PO封止材の完成（組成確定）と、モジュール劣化メカニズムの解明を目指し、種々の組成の試作封止材を用いたモジュールの長期信頼性評価、および、試験後の各部材の物性・組成分析を検討している。

2. 光硬化FRPシートを用いたフレキシブルモジュール設置工法の開発

周囲のみ固定する方式は、FRPで接着した部分の耐久性は期待できるが、モジュールの裏面の固定方法を更に検討する必要がある。

表面全面を被覆する方法は、低温時のFRPの可撓性の改良が必要である。

尚、本設置工法は生産中であった土木建築用途の光硬化FRPシートの製造販売が終了したため、開発を中断した。

3. メガソーラー発電所向け防草対策技術の試験施工

美観性は土系透水舗装が優れているが、施工方法が開発されて数年しか経っていない技術のため、長期の防草効果を確認する必要がある。

I. 目的

太陽電池市場において、太陽電池モジュールの耐久性向上による長寿命化とプロセスの短縮、部材コストの圧縮によるモジュールコストの低減が必須である。

これらを達成するため、モジュールの高信頼性化に寄与できる PVB 封止材の開発を目的とする。

II. 研究開発目標

各太陽電池における耐久試験後の最大出力が、EVA を用いたモジュールと比較して上回ることを目標とする。

III. 研究開発の成果

1.a-Si 太陽電池モジュール

(1) モジュール構成

ガラス/a-Si/封止材/ガラス(エッジのシール材は不使用)

(2) 耐久性試験結果

①ダンプヒート(DH)試験：85°C, 85%RH

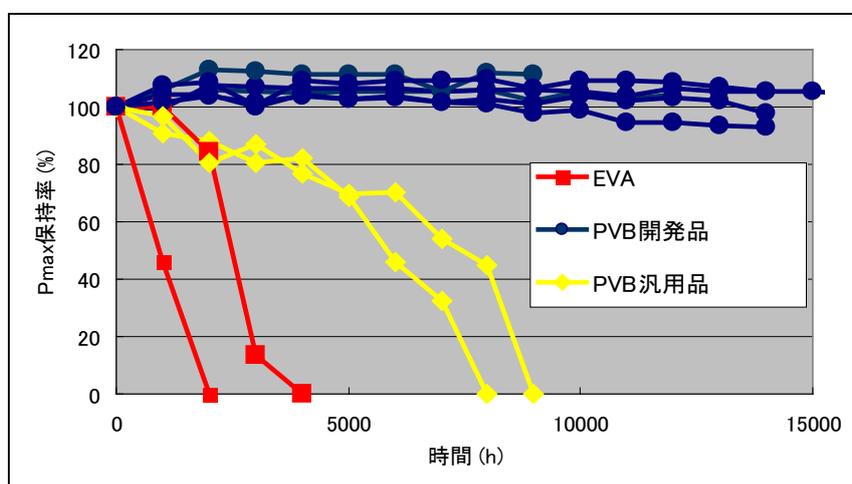


図 1. DH 試験の結果

図 1 に示したように、評価を行った 3 つの封止材では、DH1000h を境に、EVA、PVB 汎用品は発電効率が低下し、EVA は DH4000h、汎用 PVB は DH8000h で最大出力(Pmax) 保持率は 0% になった。一方で、PVB 開発品は DH15000h においても、太陽電池の発電効率低下が見られない長期耐久性を示している。

これらのモジュールの EL 画像を図 2 に示す。

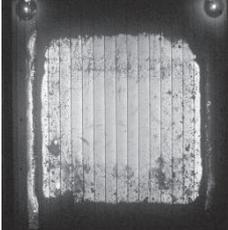
DH 時間	PVB 開発品	PVB 汎用品	EVA
1000h			
3000h			

図 2. EL 画像

EL 画像の結果から、劣化が進行しているモジュールは、外周から輝度が低下していることがわかる。シールレス構成のため、モジュールのエッジから水分が浸入し、そこから劣化が始まっているものと推測する。また、劣化が速いモジュールでは、輝度ムラが発生しており、水分以外の劣化要因が存在する事が推測される。一方で、PVB 開発品は周辺部の輝度の低下が見られていない事から、水分の浸入を抑止している事が示唆される。

表 1 に各モジュールに使用した封止材の透湿度、ガラスとの接着力と酸の発生データを示す。

表 1. 封止材の透湿度、接着力、酸価

	試験条件	PVB 開発品	PVB 汎用品	EVA
透湿度 ($\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$)	40°C, 90%RH	9	59	27
ガラスとの接着力 (N/mm^2)	—	33	21	23
酸価 (KOH mg/g)	85°C, 1000h	0.1	0.1	1.3
	85°C, 2000h	—	0.2	5.4

※EVA のデータはコンソーシアム外の EVA を使用してデータを採取した

EVA における Pmax の低下は、表 1 に示した酸価(封止材を 85°C 下で 1000h、または 2000h 純水に浸漬し、発生した酸の量を測定した)の結果より、EVA の酸発生量が多いため、

劣化が進行したものと推測している。

PVB 汎用品と PVB 開発品の DH 試験の Pmax の差は、透湿度及び接着力を改良した事により、太陽電池セル表面に透湿する水分量が抑制できた事に基づくものと推測している。

② 絶縁試験

表 2. 湿潤漏れ試験結果

DH 時間	絶縁抵抗 (GΩ)	
	PVB 開発品	EVA
0h	7.6	8.0
1000h	1.9	0.4

*絶縁抵抗値が、0.4 GΩ 以上であれば合格。

表 2 に示したように、EVA を用いたモジュールは、DH1000 時間後で絶縁抵抗が 0.4 GΩ まで低下する一方、PVB 開発品は、1.9GΩ と高い絶縁抵抗を示した。

これは、表 1 に示す透湿度の差異が反映されている結果であり、透湿度を改善する事で高温高湿下での絶縁抵抗性を改善できたと考えている。

2. CIGS 太陽電池モジュール

(1) モジュール構成

ガラス/封止材/CIGS/封止材/ガラス(エッジのシール材は不使用)

(2) 耐久性試験結果

① ダンプヒート(DH)試験：85℃, 85%RH

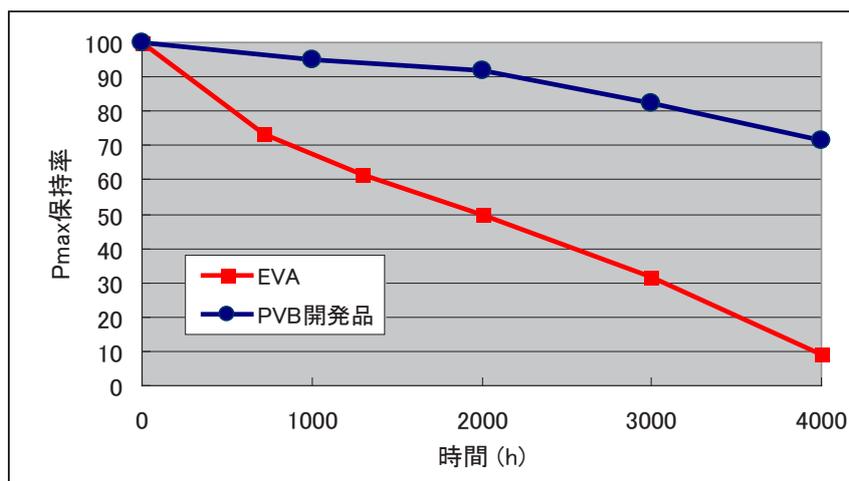
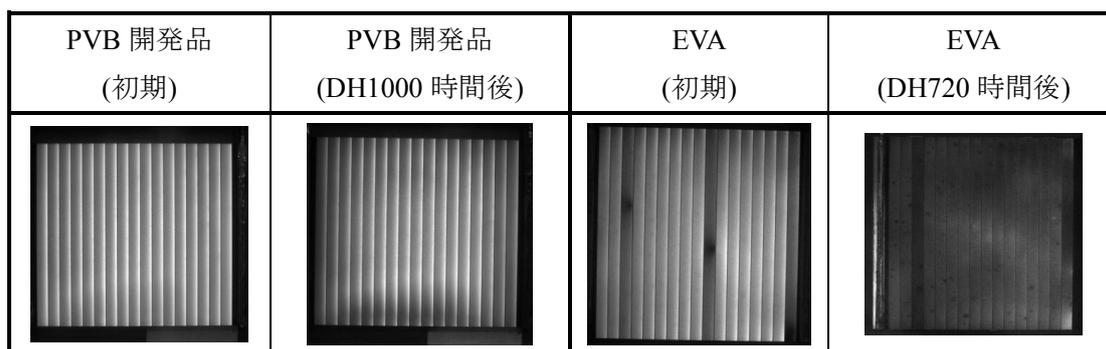


図 3. DH 試験の結果

図 3 に示したように、PVB 開発品は DH1000h において、最大出力保持率が 95%以上と IEC61646 に合格する高い耐久性を示した。



これらのモジュールの EL 画像を図 4 に示す。

図 4. EL 画像

EL 画像の結果から、**a-Si** と同様に、外周から輝度が低下していることがわかる。シールレス構成のため、モジュールのエッジから水分が浸入し、そこから劣化が始まっているものと推測する。PVB 開発品は周辺部の輝度の低下が小さい事から、EVA と比較して水分の浸入を抑止できている事が示唆される。

3. c-Si 太陽電池モジュール

(1) モジュール構成

構成：ガラス/封止材/c-Si/封止材/バックシート(コンソーシアム標準構成)

(2) 耐久性試験結果

① PID 試験

表 3. PID 試験結果

試験条件	試験時間	Pmax 保持率 (%)	
		PVB 開発品	EVA
60°C, 85%RH, -1000V	0h	100	100
	96h	100	46
	168h	100	未測定

※コンソーシアム外の部材を使用し、ケミトックス株式会社で試験を実施した。

表 3 に示したように、EVA のモジュールは、96 時間後で Pmax が低下する一方、PVB 開発品は、168 時間後でさえ、出力低下が観測されない。PVB 開発品の高い絶縁抵抗性が PID 現象の抑制に寄与している事が推測される。

IV. まとめ

接着力と透湿度を改良した PVB 開発品は、DH 試験後の耐久性及び絶縁抵抗性の向上と、高い絶縁抵抗性に起因した PID 耐久性を示す事が確認できた。今後は、PVB 開発品を封止材に用いて、長期信頼性及びモジュール部材の削減に寄与していきたい。

I. 目的

太陽電池用封止材として、弊社シリコンの特性・信頼性評価を実施する。シリコン封止モジュールにおける光学特性、および加速劣化試験におけるシリコンの特性変化を明確にすると同時に、長期間屋外曝露されたシリコン封止モジュールを評価、解析し、シリコン封止材が太陽電池モジュールに与える影響について考察する。

II. 研究開発目標

- ・シリコンを封止材として用いた太陽電池モジュールの信頼性を検証する。
- ・屋外長期曝露されたシリコン封止モジュールを評価し、不具合モードを調べる。シリコンが与える影響について、不具合モードとの関連性を調査する。

III. 研究開発の成果

1. シリコンの特性・信頼性評価

シリコンとは、シロキサン結合(-Si-O-)を繰り返し単位とするポリシロキサンである。図-1にその基本構造を示す。多くのプラスチックは基本骨格が炭素主体であるのに対し、シリコンは基本骨格がガラス、石英、ケイ酸塩と同じケイ素と酸素の結合からなっており、無機材料の一種とみなすことができる。ケイ素原子に有機基を結合させることによりユニークな特性を付与することができる。

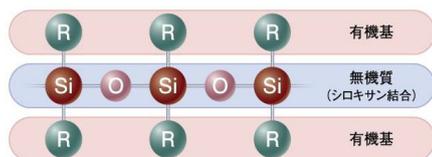


図-1 シリコンの基本構造

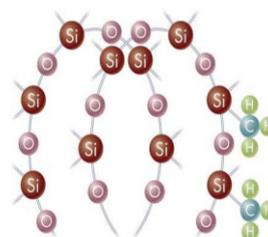


図-2 ジメチルポリシロキサンの分子構造

図-2にジメチルポリシロキサンの分子構造を示す。典型的なジメチルポリシロキサンの分子構造は「らせん構造」をとっているが、ケイ原子に2個結合したメチル基の高さと、比較的大きな振幅の振動により隣接分子が近づきにくくなるという、分子間力が弱く耐寒性に優れる特徴を有する。ジメチルポリシロキサン硬化物は、ケイ素原子に直結したビニル基 (Si-CH=CH₂) とケイ素原子に直結した水素原子を白金系触媒により付加反応させ、シルエチレン結合 (Si-CH₂-CH₂-Si) を三次元的に形成する架橋形態をとるが、反応副生物が無いことが大きな特徴であり、可視～紫外光に対し、高い光透過率を示す。

弊社シリコンとEVAとの透過率比較結果を図-3に示す。弊社シリコンおよびEVAを、

それぞれ白板ガラス（3.2mm 厚）2 枚に挟みこんで、透過率を測定した。その結果を図-3 に示す。400nm 以下の短波長領域で透過率に差が見られる。この材料でセル 1 枚を封止し、200×200mm サイズの両面ガラス構造モジュールで内部量子効率（IQE）を算定した結果を図-4 に示す（短波長高感度セルを使用）。

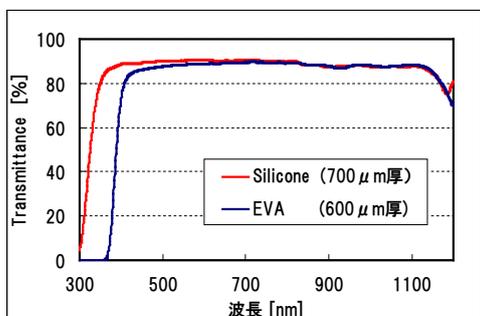


図-3 透過率比較 (対 EVA)

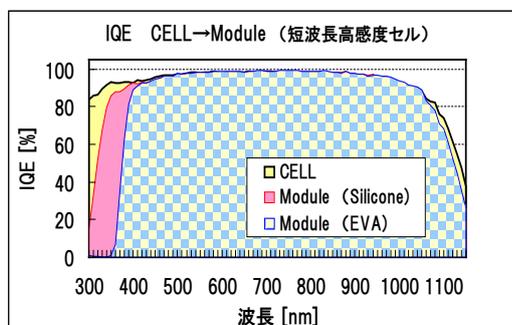


図-4 内部量子効率比較 (対 EVA)

セルからモジュールにした場合の内部量子効率のダウンは、弊社シリコン封止では 3.83%、EVA 封止では 9.59%であり、シリコン封止による短波長領域の透過性が、EVA に比べてモジュール出力にプラスの影響を与えている。

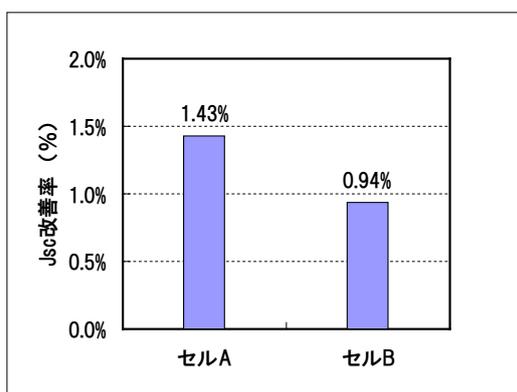


図-5 モジュール出力 (Jsc 改善率) <対 EVA 封止>

実際のモジュールの出力測定結果を図-5 に示す。シリコン封止モジュールは、EVA 封止に対して Jsc が 1.43%改善した（セル A）。また他のセルを用いた場合、Jsc が 0.94%改善した（セル B）。これはセルの短波長感度の違いによるものと考えられる。（セル A：短波長高感度セル）。

次に、弊社シリコンの電気絶縁性について報告する。試験条件は、以下の通りである。

- 105℃ 2000時間
- 85℃85%RH 2000時間
- 55℃ 2000時間

これらの試験結果を図-6に示す。

図に示すように、いずれの試験においても 2000時間後の体積抵抗率の変化は小さく、また高い体積抵抗率を維持している。

このような特性は、PID耐性にも優れた効果を示すものと期待された。

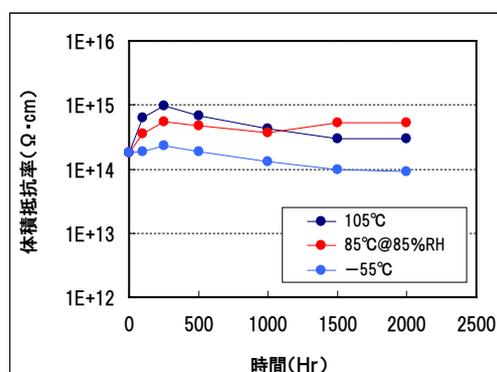


図-6 シリコンの体積抵抗率

次に、PID試験を行った結果を図-7に示す。これは（株）ケミトックスが、同一セル、同一ガラスを使用し、同一条件で実施したものである。

(4直ジュール/試験条件：水張り法、60°C85% セル側-1000V、96時間)

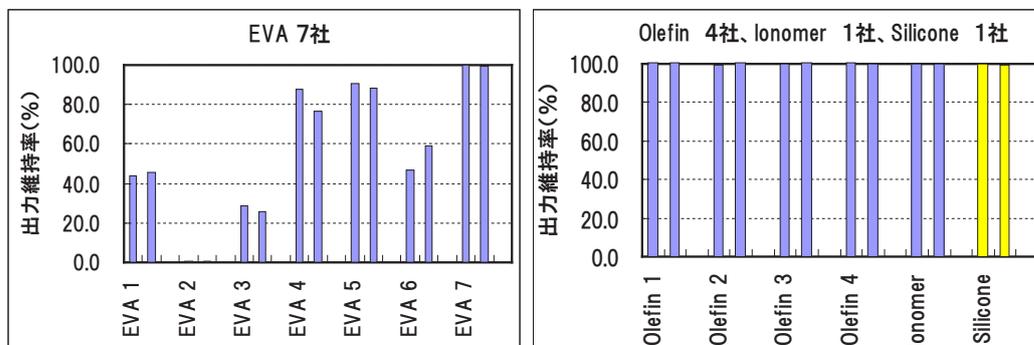


図-7 PID試験結果 ((株)ケミトックス データ提供)

弊社シリコーンは、オレフィン、アイオノマーと並び、PID試験にて優れた耐性を示した。

次に、高温高湿試験 (85°C85%) の結果を図-8に示す。このジュールは産総研コンソ

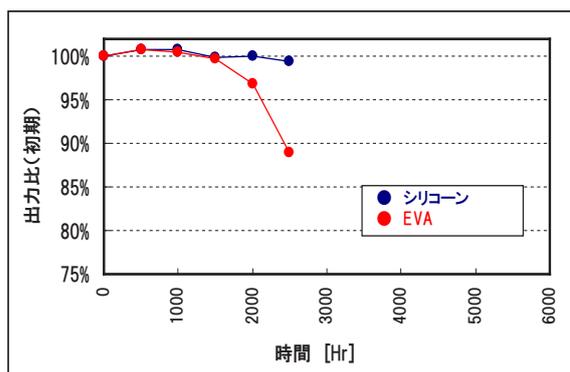


図-8 高温高湿 (85°C85%) 試験結果

ーシアム標準ジュールで、シリコーン封止ジュールは、封止材のみを変更したものである。現在、2500時間経過で、シリコーンは出力低下が見られていない。また、図-9に示すように、同試験サンプルジュールにおいて、インターコネクター部を観察すると、シリコーン封止ジュールは変色等確認されず、良好な外観を維持していることがわかる。



図-9 高温高湿 (85°C85%) 試験 2500 時間におけるインターコネクターの変色 (左：シリコーン封止、右：EVA 封止)

2. 長期間屋外曝露されたシリコーン封止ジュールの評価・解析

奈良県高市郡高取町にある壺阪寺には、1983年に設置された太陽電池ジュール40台が、当時のままの状態に残っている。このジュールは、シャープ (株) 製で、4インチ単結晶セルが36直接続された構造で、定格は35Wのジュールである。また現在よく使われてい

るスーパーストレート構造で、なおかつ、この技術が国内で最初に適用されたものである。封止材はシリコンであり、弊社は2011年秋にこのモジュール全台数(40台)を取り外し、弊社内でIV測定、EL測定、IR測定を実施した。なお、このモジュールは全て元の場所に再設置し、現在でも使用されている。この壺阪寺モジュールの外観を図-10に示す。また、40台のモジュールのそれぞれのIV特性を調べた。IV特性の代表例を図-11に示す。

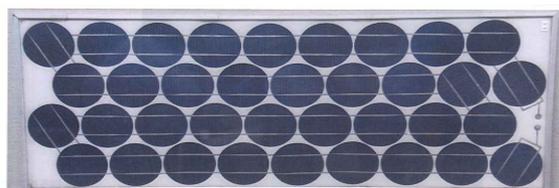


図-10 壺阪寺モジュール外観

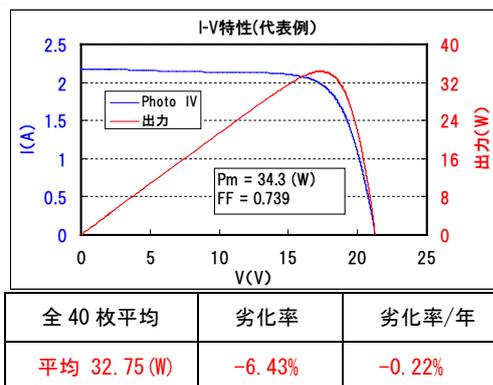


図-11 壺阪寺モジュールの出力特性

このモジュールは、全40台ともに黄変等の変色がなく、外観上、問題は無かった。また29年経過後の出力低下は、全40枚平均で6.43% (定格値との差)、年間での劣化率にすると0.22%であり、劣化率がきわめて小さく、優れた耐久特性を示した。

ほぼ全てのモジュールで、端部においてバックシートとシリコンとの間で剥離が確認されたが、EL検査では、近傍セルの暗部が認められず、出力低下の影響は軽微であった。シリコンは水蒸気流入が懸念されるが、含水率が低くかつ同時に排出しやすい特徴を持っており、一つの有意な結果を与えている。

IV. まとめ

シリコンは、短波長域での光透過率に優れており、モジュール出力に対して優位な出力特性を与えることを確認した。

高温、高温高湿、低温域でシリコンの体積抵抗率を測定し、それぞれの条件において高い体積抵抗率を維持することを確認した。さらに4直モジュールにてPID試験を実施した結果、優れたPID耐性を示すことがわかった。

高温高湿試験(85°C85%)2500時間経過において、シリコン封止モジュールは出力低下がなく、同時にインターコネクター部の変色を生じさせないことを確認した。試験は継続評価していく。

屋外曝露モジュールにおいては、29年間屋外曝露されたシリコン封止モジュール(壺阪寺)を全40台取り外し、社内で非破壊解析を行った。その後モジュールは全台数再設置した。劣化率は全40枚平均で6.43%、年間あたりの劣化率が0.22%で、優れた耐久特性を示すことがわかった。また封止材の変色は、ほとんど確認されず、封止材として優れた特性を確認することができた。

「粘土フィルム（タフクレスト）をバックシートとして用いた結晶シリコン太陽電池の耐侯性と発電電力量の評価」

住友精化株式会社

I. 目的

現在、弊社は産総研東北センター（蛭名チーム長）において、粘土を用いた機能性フィルム開発の共同研究を行っている。今回、開発した高耐侯性、高水蒸気バリア性を有する粘土フィルム（タフクレスト）をバックシートとして用いた結晶シリコン太陽電池4セルモジュールを作製し、耐侯性試験や屋外設置による発電電力量の測定を行い、コンソーシアム標準バックシートであるTPTを用いたモジュールとの性能比較を行った。

II. 研究開発の目標

バックシートとしてタフクレストを用いたモジュールを作製し、耐侯性試験によるモジュール性能の評価と、屋外設置による発電電力量の測定を行い、TPTを用いたモジュールと比較しTPTと同等以上のモジュール性能を有することを目標とした。

III. 研究開発の成果

タフクレストとは粘土とポリイミドの単一フィルムのことである。同組成で厚みの異なる2種類のタフクレスト(50 μ m、140 μ m)と、比較対象としてTPTを用いた太陽電池モジュール(40cm角)を作製し、各試験に用いた。

表1 バックシートの概要

バックシート	タフクレスト	タフクレスト	TPT
膜厚 [μ m]	50	140	340
水蒸気バリア性 [$\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$]	1.4	5.6×10^{-1}	4.9×10^{-1}

※差圧法 (GTR テック社製ガス・水蒸気透過率装置 GTR-30XA1BD) により測定耐侯性試験 (3種類) :

モジュール作製に用いた部材は、タフクレスト以外は全てコンソーシアム標準部材を使用した。耐侯性試験は3種類行い、各5枚ずつモジュールを使用した。(紫外線照射試験のみ装置容量の関係により各2枚で実施)。試験後の性能評価は、出力(SPI)、EL、モジュール外観、耐電圧の確認により行った。

1. ダンプヒート試験 (DH) [試験条件] : DH3000 (85°C-85%RH、3000hr)

① 出力

DH3000hr 後、最大出力(Pmax)がタフクレスト_50 μ mとTPTで約3%、タフクレスト_140 μ mで約5%低下し、全モジュールで緩やかな低下がみられたが、出力にほぼ差はみられなかった。

② ELとモジュール外観

ELによるセルの暗輝度部の確認と目視によるモジュール外観の確認を行った(図1)。タフクレスト_50 μ mのセルには暗輝度部がほぼ無く非常に綺麗な状態であった。それに対して、タフクレスト_140 μ mとTPTのセルには劣化がみられた。これは、これらのバックシートの水蒸気バリア性が高く、モジュール内部に水分が浸入した際、EVAの加水分解により発生する酢酸が内部に留まり、セルに悪影響を与えるためではないかと考える。

タフクレストを用いたモジュールの外観では、タフクレストの色の変化は無く、タブ線等の劣化も非常に少なかった。これに対して、TPTでは全サンプルでTPTや封止材(EVA)に黄変や汚れがみられ、タブ線にも激しい劣化がみられた(図1)。これらの結果より、タフクレストの方がTPTよりセル、封止材(EVA)、タブ線の保護の点で優位性があると言える。

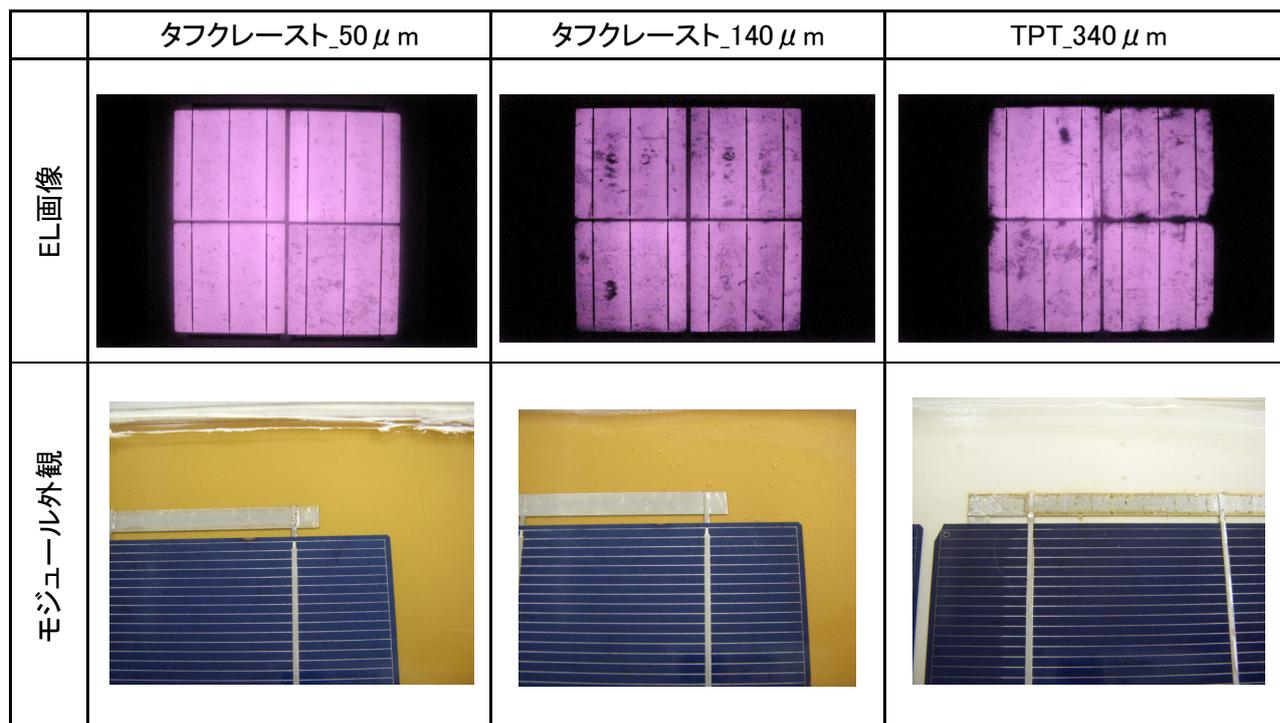


図1 DH3000hr 後の EL 画像とモジュール外観の比較

③ 耐電圧

DCW/IR (気中絶縁性試験) では DH3000hr 後、全モジュールにおいて抵抗値は $>99\text{G}\Omega$ (測定上限値以上) となり、試験前後で違いが無かった。しかし IR (湿潤もれ電流試験) ではタフクレストは TPT に比べ抵抗値が低く、タフクレスト_50 μm では抵抗値が測定下限値以下のサンプルが2点存在した(表2)。TPT に比べてタフクレストの抵抗値が低い原因として、フィルムの厚みや用いたシール材(東レ SH780)との接着性の差などの影響が考えられる。

表2 DCW/IR (気中絶縁性)、IR (湿潤もれ電流試験) による比較(5点平均値)

試験項目	DCW/IR (気中絶縁性試験) ($\text{G}\Omega$)			IR (湿潤もれ電流試験) ($\text{G}\Omega$)			測定時水温
	50 μm	140 μm	TPT	50 μm	140 μm	TPT	
初期値	>99	>99	>99	5.3	4.6	7.0	13~15 $^{\circ}\text{C}$
DH3000hr 後	>99	>99	>99	$<0.2\sim 0.5$	0.5	1.8	21~22 $^{\circ}\text{C}$

※IR(湿潤もれ電流試験)の抵抗値は水温によって変化するため、初期値とDH3000hrの比較はできない

2. サーマルサイクル試験 (TC)

[試験条件]: ・TC50+HF10 (TC50: $-40^{\circ}\text{C}\leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$, 50cyc、HF10: $-40^{\circ}\text{C}\leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$, 85%RH, 10cyc)
 ・TC200 ($-40^{\circ}\text{C}\leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$, 200cyc)

① 出力

TC50HF10、TC200の試験後、タフクレストとTPTの各モジュールの最大出力(P_{max})は、初期値から2%以内の低下であり、また出力にほぼ差はみられず、同等の出力性能を有することを確認した。

② 耐電圧

TC においても、DCW/IR（気中絶縁性試験）での電流値、抵抗値は試験前後で変化がなかった。IR（湿潤もれ電流試験）での抵抗値は、TPT に比べタフクレストがいずれも低い結果となったが、これはバックシートの厚みによるものでタフクレストの劣化によるものではないと考える。TC 試験により TPT も同様に抵抗値が減少しており、TPT との差はないと考える（図 2）。

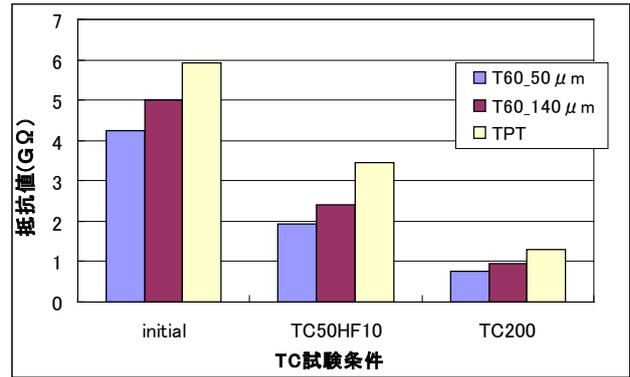


図 2 各モジュールの抵抗値比較(湿潤もれ電流試験)

(測定時水温 : initial:13-15°C、TC50HF10: 12-15°C、TC200:21-23°C)

3. 紫外線照射試験

[試験条件] : 3UV, 27°C (槽内), 積算 600hr (200hr 毎連続)

※3UV(180W/m² 波長 300~400nm)

① 出力

積算 400hr 後、全モジュールで Pmax が約 1%低下したが、その後積算 600hr でほぼ変化無く TPT と同等であり、他の項目(FF、Isc)においても同等の性能であることを確認した(図 3)。

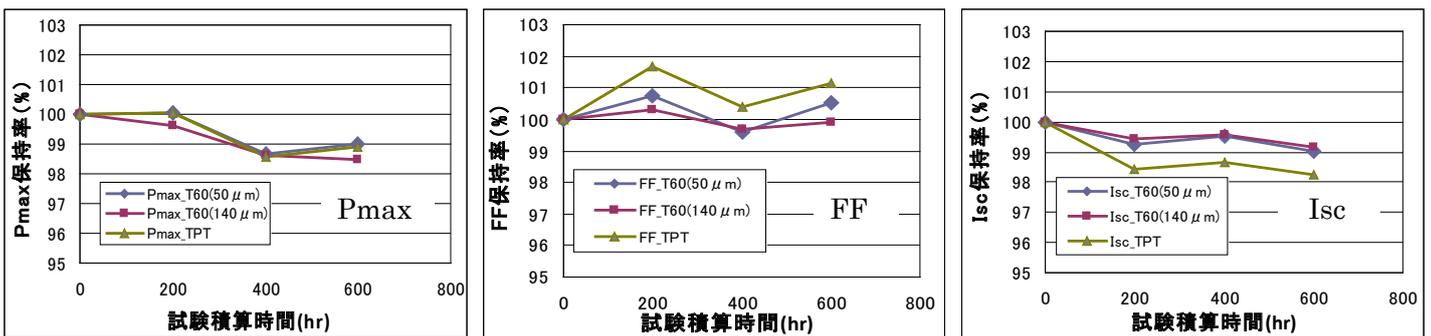


図 3 Pmax, FF, Isc の初期値保持率

② バックシートの色変化

試験積算 600hr のタフクレストの色を試験前のものと比較し、タフクレストの色が明らかに薄く変化していることが確認された。一方、TPT に変色はみられなかった。タフクレストが紫外線により何らかの影響を受ける可能性がある(図 4)。

・タフクレスト_50 μm

・タフクレスト_140 μm

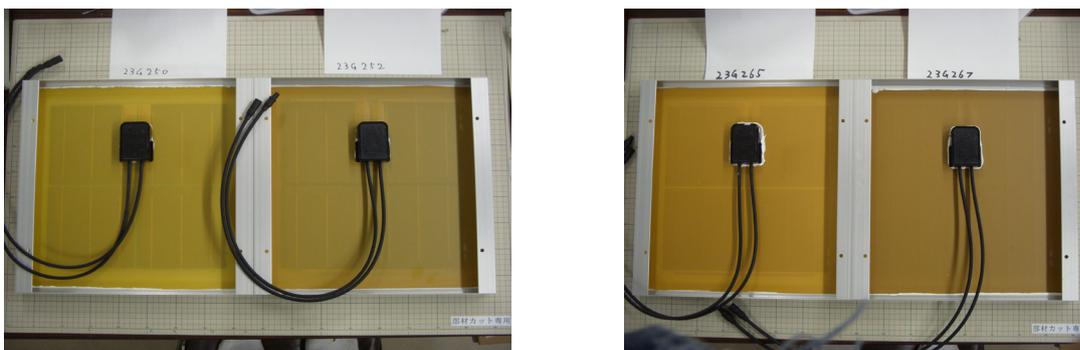


図 4 タフクレストの色変化 (左:積算 600hr 後 右:試験前)

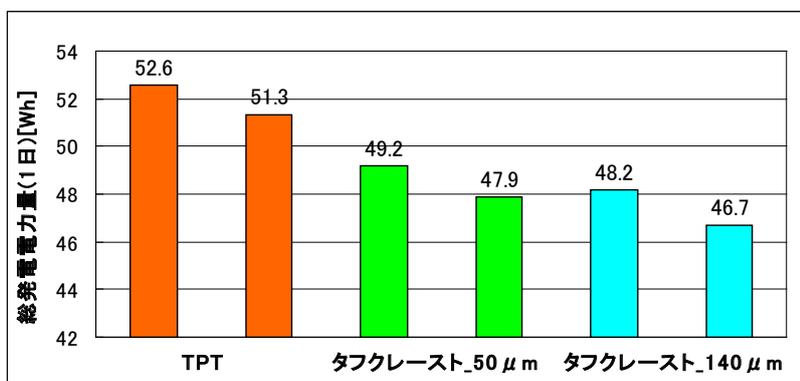
発電電力量測定:

TPT とタフクレスト(50 μ m, 140 μ m)を用いたモジュールを各 2 枚ずつ作製し、屋外設置し発電電力量を測定した。モジュール温度はバックシート表面に熱電対を設置して測定を行った(図 5)。



図 5 モジュール温度測定箇所(モジュール裏面)

測定は Graphtec 社製データロガ(GL-820)で行い、各モジュールからの測定データおよび気象データを記録した。1 日の総発電電力量とモジュール裏面の平均温度(12 時~13 時)を示す(図 6)。



タフクレストモジュールの総発電電力量が TPT モジュールに比べ約 10%程度少なかった。モジュール温度の影響が考えられるため、白色 EVA を用いてモジュールに遮光を施す対策を行ったが温度低下はみられなかった。

	TPT		タフクレスト_50 μ m		タフクレスト_140 μ m	
総発電電力量(1日) [Wh]	52.6	51.3	49.2	47.9	48.2	46.7
モジュール平均温度 [°C]	55.8	57.1	63.1	61.6	63.6	61.0

図 6 各モジュールの総発電電力量とモジュール温度

IV. まとめ

耐侯性試験:

ダンプヒート試験 (DH3000hr) では、タフクレストモジュールのセルやタブ線の劣化具合は TPT モジュールに比べ非常に少なく、TPT に対するタフクレストの優位性がみられた。

サーマルサイクル試験 (TC50HF10, TC200) では、タフクレストモジュール、TPT モジュールでほぼ同等の性能であることを確認した。

紫外線照射試験 (UV 試験) では、試験後、タフクレストの色が薄く変化しており紫外線による何らかの影響が考えられるが、性能の面では TPT モジュールとほぼ同等であることを確認した。

発電電力量測定:

タフクレストモジュールの総発電電力量が TPT モジュールに比べ約 10%程度少なくなり差異がみられた。タフクレストモジュールの裏面温度が TPT モジュールに比べ最大 7.8°C 高くなっており、このことが発電電力量に影響すると考えられる。白色 EVA を用いて遮光を施す対策を行ったが、現在のところ温度低下はできておらず発電電力量の増加はできていない。

I. 目的

保護シートに用いられる、弊社製品、あるいは、開発品であるフッ素樹脂コーティング材、および、フッ素樹脂フィルム、あるいは、弊社製品を用いて作られた他社製保護シートについて、これを太陽電池モジュール（結晶 Si 系）に組み込んだ状態で耐久試験を行い、太陽電池モジュールの長寿命化・信頼性向上という観点から標準品と比較して優劣を明らかにすると共に、弊社品の問題点が明確となった場合には、問題の原因を追究しこれを改良するための基盤データとする。

II. 研究開発目標

太陽電池モジュールは、屋外で長期間にわたって使用されるという性質上、紫外線や熱、水蒸気などの外的な劣化要因から保護される必要がある。その中でバックシートは、紫外線や水蒸気等の内部への浸入を防ぐために用いられている。

本研究では特に水蒸気による影響に注視し、バックシートの構成および部材の違いによって太陽電池の長期信頼性にどの程度の差があるのか明確にし、各構成および部材の固有性能である水蒸気透過率および耐加水分解等の化学的安定性と太陽電池の発電性能の長期信頼性との相関を調べようと考えた。

III. 研究開発の成果

第 I 期コンソーシアムにて、弊社はコンソーシアム標準品を含めて 9 種類の構成のバックシートを用いて試験を実施した。詳細な結果は当該成果報告書を参照されたいが、簡潔に記すと、フィルファクター（以下 FF）の低下に若干の改善は見られたものの、全体としてはバックシートの構成の違いによる影響は期待されたほどは大きく現れなかった。上記の実験結果で用いたバックシートの層構成は、最外層がフッ素フィルムあるいは PET という構成であり、EVA 面には PET と接着層があるという点では共通点が多いが、一方で PVF 系とはその点において異なる構成である。

そこで第 II 期では PVF 系と比較するために、類似の層構成を持つバックシートを用いて実験を行った。その結果、第 I 期では見られなかった有意差を見出した（図 1）。各バックシートの水蒸気透過率はアルミ系バックシートを除いて、初期値として $1\sim 2\text{g/m}^2\cdot\text{day}$ 程度であり、水蒸気透過率以外にダンプヒート（以下、DH）試験において太陽電池モジュールが劣化する要因が存在することが示唆される。

なお、本報告における太陽電池モジュールは全て、多結晶 Si（Q-Cells 製）単セルモジュールを使用した。

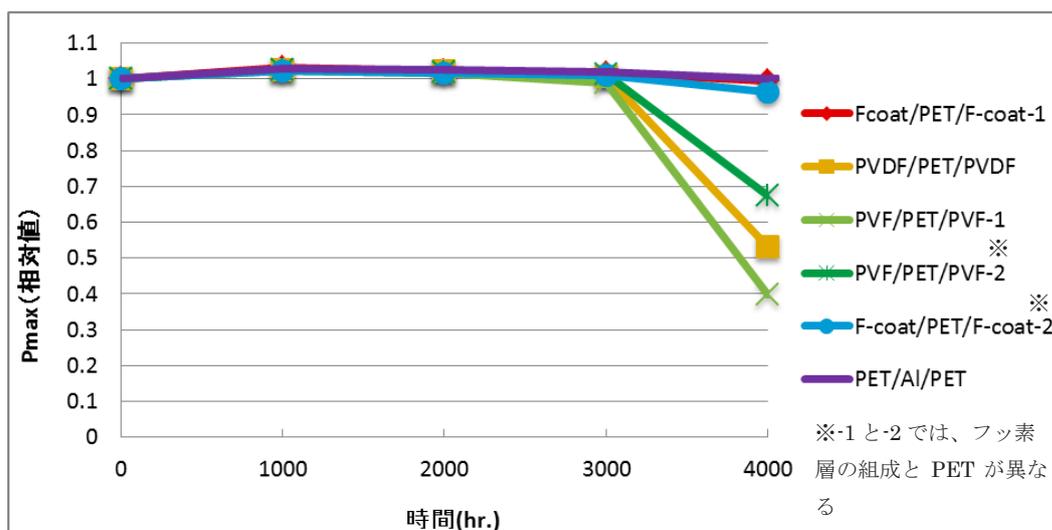


図1：第II期コンソーシアムで行ったDH試験時間と発電効率の維持率の関係

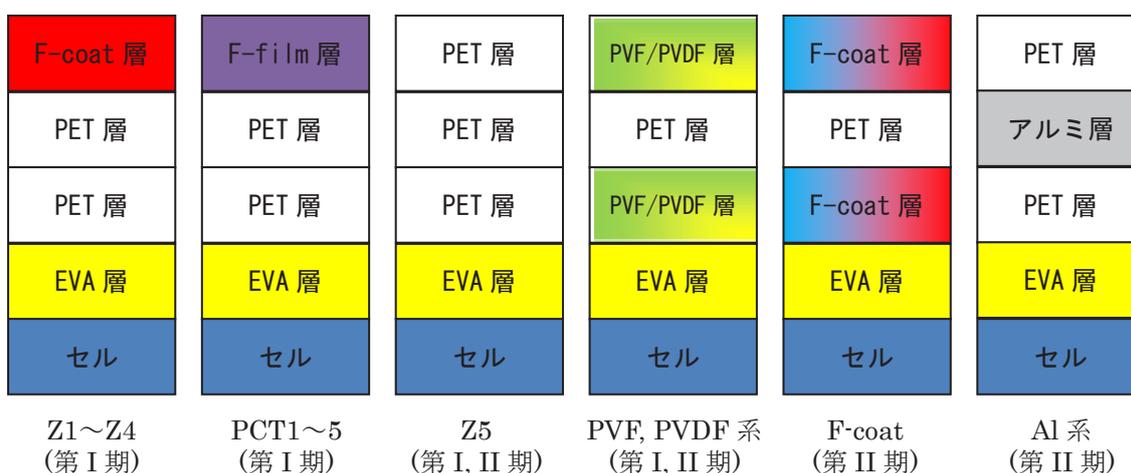


図2：コンソーシアムで作製した太陽電池モジュールのバックシートの層構成の概略図

フッ素コート（以下、F-coat）系のバックシートとアルミ入りバックシート（Al系）は、DH4000時間後でも、Pmaxが初期値から5%以内の低下率でとどまっている。一方で、PVF系はDH3000時間から4000時間にかけて急激にPmaxが低下する傾向を示しており、これらの事例はコンソーシアムの第I期の成果報告書でも報告されている。今回、PVDF系でも同様の傾向が見られた。

近年の太陽電池用バックシートは、市場のコストダウン要請を受けて、以前のような「両面フッ素樹脂」ではなく、「片面（最外層）のみフッ素樹脂」タイプが主流となってきている。そこで、これまでの両面フッ素ではなく、片面フッ素タイプのバックシートでも、同様の評価を行った。結果を図3に示す。

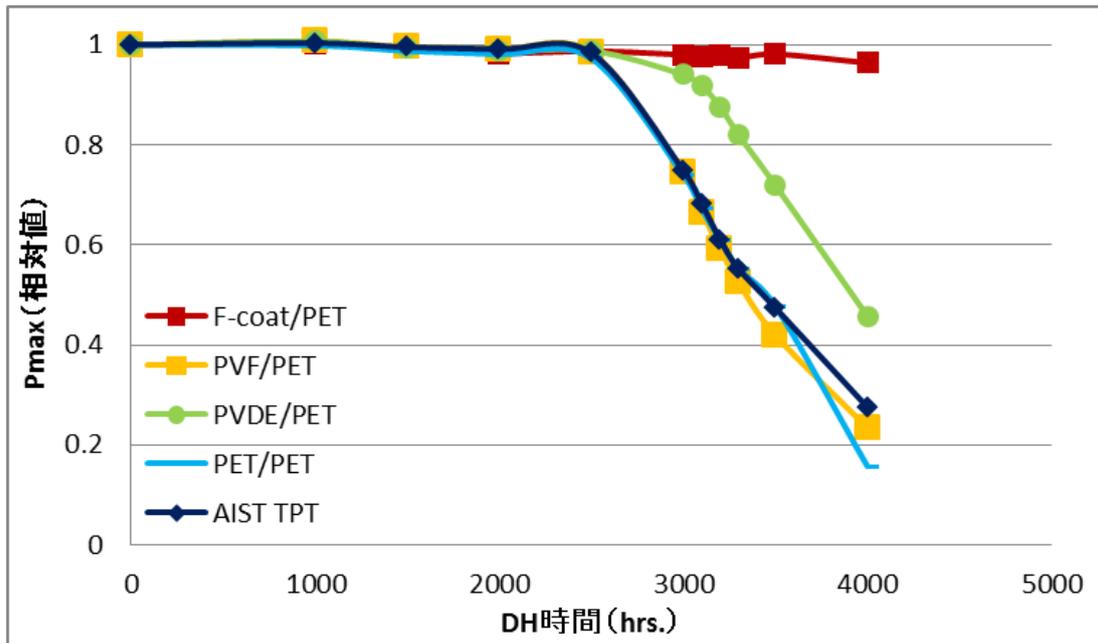


図3：耐候性材料を片面だけにしたバックシートを用いたモジュールの DH 試験時間と最大発電量の推移。

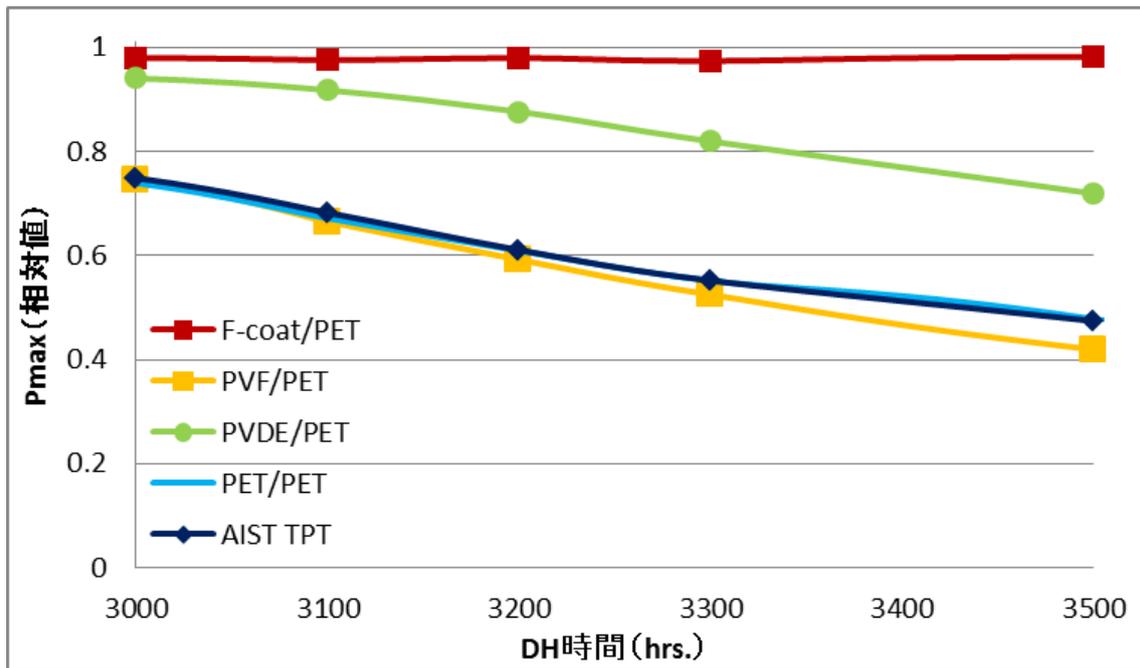


図3-1：耐候性材料を片面だけにしたバックシートを用いたモジュールの DH 試験時間と最大発電量の推移（3000～3500時間部分の拡大）。

結果は、これまでの両面フッ素樹脂のバックシートと同様の結果を得た。EVA 側のフッ素樹脂層が無くなることによる影響は無い。また、Pmax が大きく低下する DH 試験の 3000~3500 時間の間で 100 時間毎に測定を行ったところ、ほぼ直線的に数値の低下が見ら

れた。これは、物理的な断線など不連続的な現象ではなく、化学反応のような連続的な現象による発電性能の低下であると推察できる。

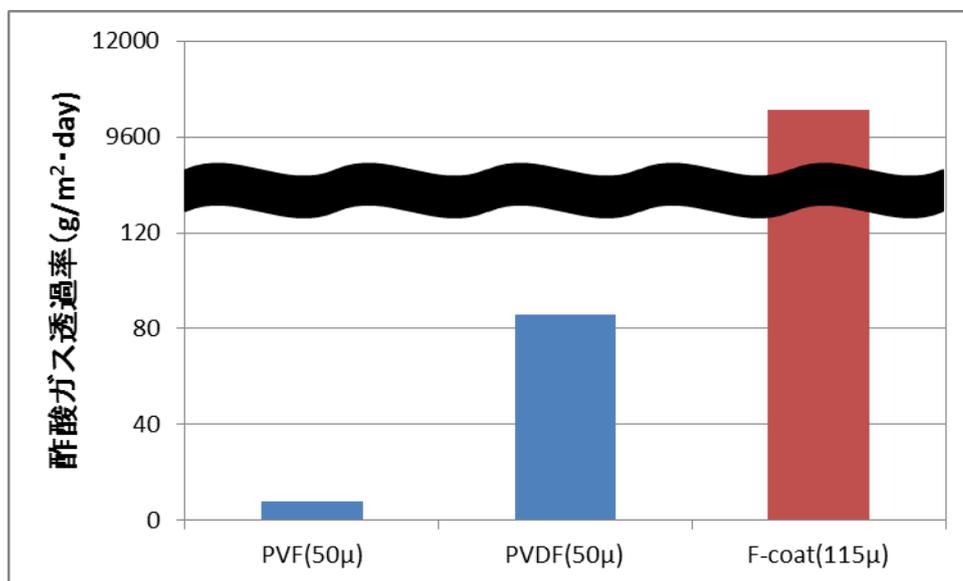


図4：各種フィルムにおける酢酸ガスの透過度（40℃）

太陽電池セル内の電極は EVA の加水分解物である酢酸によってダメージを受けることが示唆されているが、バックシート材料に用いられている樹脂はそれぞれに固有の酢酸ガス透過性をもつ。それらを調べたのが図4である。専用の容器に酢酸を入れ、それぞれのフィルムで外気と遮蔽し、40℃の恒温槽内で静置した。気化した酢酸がフィルムを透過して外気へと拡散した分だけ総重量が減少するので、それらの減少量を時間ごとに追跡した。

F-coat 樹脂は分子鎖に極性基を多く有しており、他のフッ素樹脂と比較すると極性分子である酢酸分子を透過しやすいものと考えられる。故に、F-coat を用いた太陽電池バックシートを使うことで、他のバックシートを使ったものよりも EVA から発生した酢酸が外部に逃げやすくなり、太陽電池セル内の電極へのダメージを軽減することで、DH 試験における耐久性が向上したものと考えられる。

IV. まとめ

さまざま層構成のバックシートを用いて DH 試験による結晶シリコン PV モジュールの長期信頼性を調べたところ、F-coat を用いたモジュールには有意な長寿命化の傾向があることが分かった。バックシートの酢酸ガスの透過性の大きさがモジュールの信頼性に影響を与えている可能性がある。

「オレフィン系封止材を用いた太陽電池モジュールの発電特性と PID 試験結果」

大日本印刷株式会社

I. 目的

弊社では、太陽電池モジュール用の封止材とバックシートの製造販売を行っており、本コンソーシアムでは、高信頼性太陽電池モジュールに対応したオレフィン系封止材を評価した。従来社内で行っていた封止材のガラスとの耐久密着試験や各種諸物性（光線透過率、水蒸気透過性、体積固有抵抗等）の測定に加え、封止材自身の機能がモジュールに対してどのように影響し、その効果がどの程度であるかを、本コンソーシアムにて透明と白封止材を用いた太陽電池モジュールを評価する事で封止材設計に反映させる事を目的とし、中間成果報告会にて報告を行った。今回は、オレフィン系の封止材を用い、PID 試験を行った結果を報告する。

II. 研究開発目標

本コンソーシアムではオレフィン系封止材、オレフィン系白封止材で、4セルモジュールを作製し、ソーラーシミュレーターでの発電効率測定と屋外曝露試験による実際の発電特性を、従来から使用されている封止材（以下 EVA）と比較した。

III. 研究開発の成果

(1) オレフィン系封止材

太陽電池モジュールの多くは EVA が使用されているが、弊社では、EVA で想定される酢酸ガスによるセルや配線に対しての腐食、体積固有抵抗、水蒸気バリア性等を改善したオレフィン系封止材『CVF』（Table1）を開発した。

Table1 CVF 物性表

物性	項目	規格	単位	CVF	EVA
光学特性	全光線透過率	JIS K-7361	%	92	92
	Haze	JIS K-7136	%	3.6	2.0
	UV カット波長	—	nm	<350,<300	350
物理特性	水蒸気透過性	JIS K-7129	g/m ² ·day	2.1	13
	体積固有抵抗	JIS K-6911	Ω·cm	4.1×10E14	2.3×10E13
耐熱性	クリープ特性	DNP 法	mm	<0.1	<0.1
	130°C12 時間				
その他	酸性ガスの発生	DNP 法	銅腐食	○	×
	160°C16 時間				

(2) オレフィン系白封止材

通常太陽電池モジュールのセル間部分は数%程度であるが、そのセル間部分に照射した光を反射させて効率的に使用するために、弊社では、反射率を高めたオレフィン系白封止材『CL-W』を開発した。各封止材を用いて、太陽電池モジュールを作製した際の太陽電池特性のデータを Table2 に示す。(尚、バックシートは全て弊社 VPEW を使用)

Table2 発電効率測定結果 (セル間 GAP : 2mm)

セル	封止材 (表封止材) (裏封止材)	開放電圧 Voc(V)	短絡電流 Isc(A)	最大電力 Pmax (W)	最適電圧 Vpm (V)	最適電流 Ipm (A)	直列抵抗 Rs (Ohm)	並列抵抗 Rsh (Ohm)	FF
Qcells,6in 3本バスバー (4セル)	CVF#400 CVF#400	2.437	8.458	14.350	1.832	7.833	0.053	16.235	0.696
	CVF#400 白開発品#300	2.433	8.579	14.411	1.813	7.951	0.055	16.649	0.690
	EVA EVA	2.420	8.268	14.101	1.829	7.711	0.052	25.798	0.705

モジュール化後の発電効率の差としては、表/裏: CVF/CVF、CVF/CL-W (白開発品)、EVA/EVA を比較すると、EVA より CVF の発電効率の向上が見られる。また、裏面に CL-W を用いたモジュールは更に発電効率の向上が見られる。この結果から、ソーラーシミュレーターの直線光での測定では CVF 及び CL-W が発電効率向上には有効である事がわかった。次に、社内で実施した屋外曝露の結果を Fig.1 に示す。

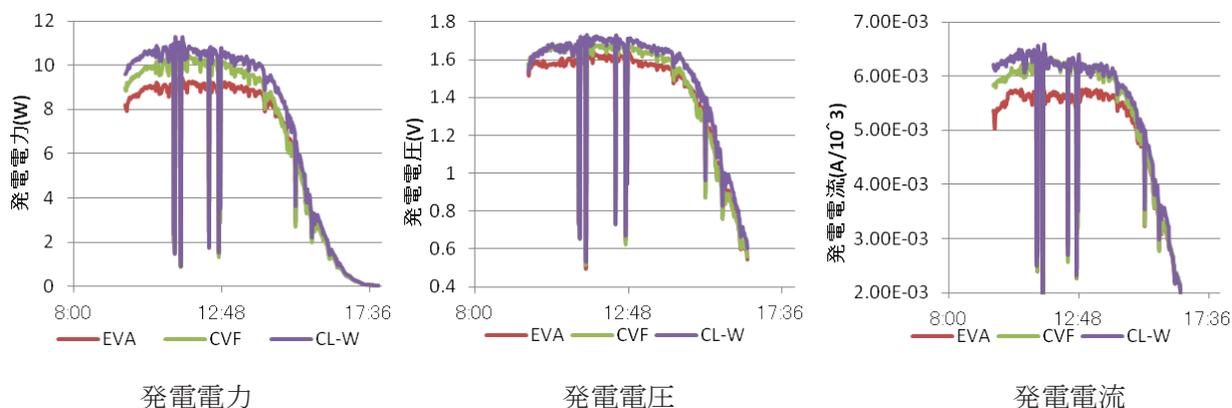


Fig.1 屋外曝露結果 (千葉県 柏市 2012年8月9日)

発電電力の結果を見ると、表/裏:CVF/CL-W > 表/裏:CVF/CVF > 表/裏:EVA/EVA の順で発電電力が大きくなっている。CVF は EVA よりもヘイズ値 (濁度) が高く、内部散乱をおこしやすい性質を持っており、その影響で、表/裏:CVF/CVF の表側の CVF の内部で拡散し斜めからの光を取り込みやすい状態になっていると推測される。

また、表/裏:CVF/CL-W は、白封止材 CL-W の裏面側の高反射率の効果の影響も併せて、更に発電量が大きくなっていると考えられる。

Fig.2 に本年7月~9月に表/裏:CVF/CL-W と表/裏:EVA/EVA のモジュールを屋外曝露した結果を示す。

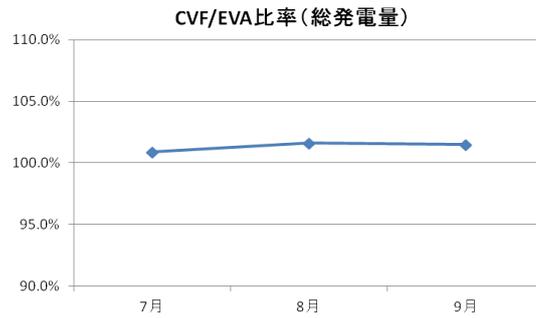


Fig.2 屋外曝露結果 (千葉県 柏市 2012年7月~9月)

表/裏:EVA/EVA を 100%とした場合の表/裏:CVF/CL-W の発電量の比率で見た場合、屋外曝露を行った結果からも EVA よりも発電量が多くなっている事がわかる。

(3) PID 試験結果

PID とは、Potential Induced Degradation 「電位誘発劣化」の事であり、フレームとモジュール内部回路の間の電位差による漏れ電流が影響し、高温多湿など外部環境要因が加わることで大幅な出力低下につながる現象である。大規模な太陽光発電所を多く設置している欧州で大きな問題となっている。運転開始後に発生する進行性のある現象のため、20%以上の出力低下を招くことがある。

PID 現象の原因は構成部材の相互作用であり、(ガラス/セル/封止材/反射防止膜/バックシート/フレームなど) (a)封止材の導電性 (水分・ガス・イオンの透過性や発生、密着性など) (b)ソーダライムガラスからの Na⁺イオン (c)セル表面の窒化シリコン膜の導電率等の原因が考えられる。評価装置等の概要は、Fig.3 の通りである。

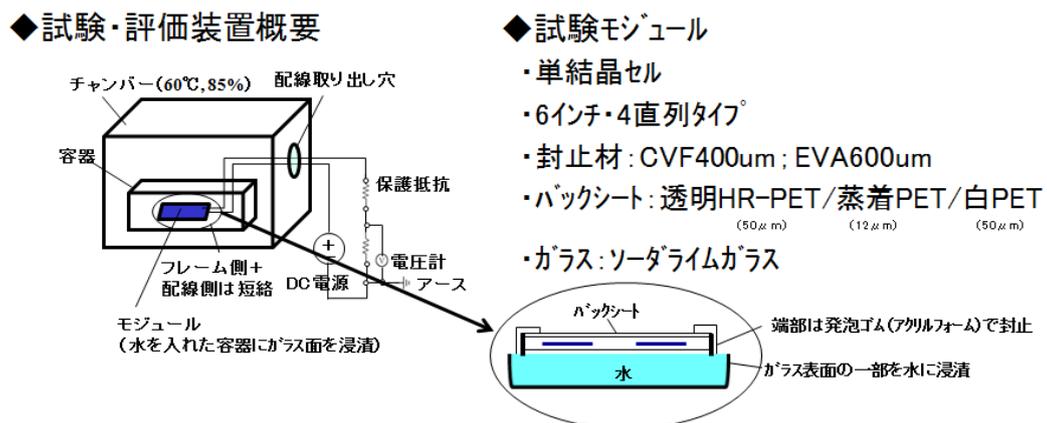


Fig.3 評価装置概要

PID 試験前後の発電効率の結果を Table3 に示す。

Table3 発電効率の結果

封止材	試験方法	状態	Isc[A]	Voc[V]	FF[%]	Pm[W]	ダークRsh [Ω]	FF保持率 [%]	Pm保持率 [%]
CVF	60°C水張り -1000Vdc	初期状態	8.963	2.502	68.44	15.35	6879	100	100
		PID試験24時間後	8.990	2.496	68.27	15.32	3774	99.8	99.9
		PID試験36時間後	8.988	2.494	68.25	15.30	3920	99.7	99.7
EVA	60°C水張り -1000Vdc	初期状態	8.872	2.494	68.82	15.23	4318	100	100
		PID試験24時間後	7.356	1.735	26.53	3.39	0.415	38.5	22.3
		PID試験36時間後	出力大幅低下のため測定中止						

Isc：短絡電流[A], Voc：開放電圧[V], FF：曲線因子[%], Pm：最大出力[W], ダークRsh：ダーク測定時の並列抵抗[Ω]

Fig.4 に、EL 発光画像を示す。

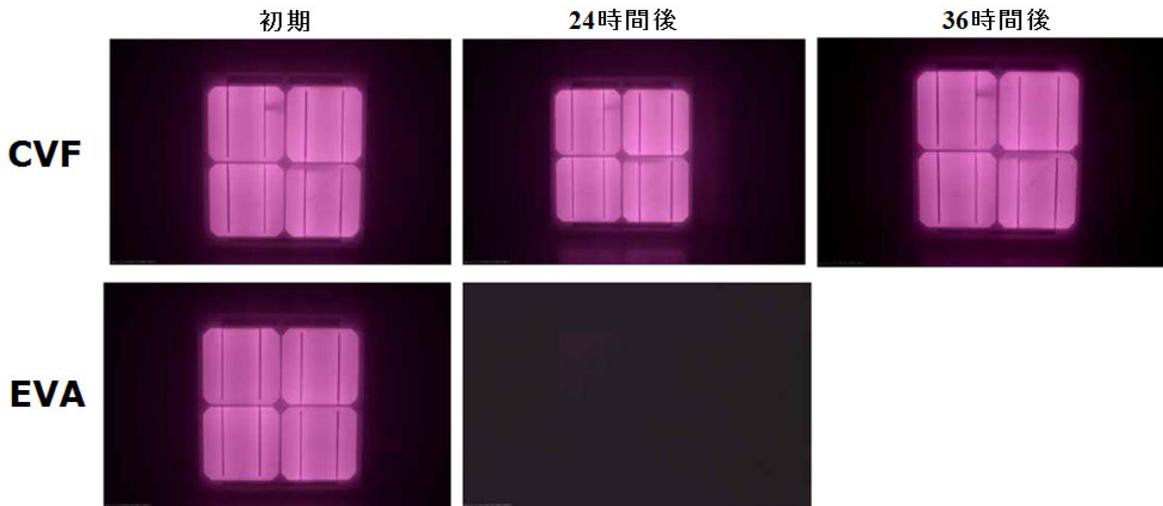


Fig.4 EL 発光画像

上記の通り、オレフィン系の CVF は PID 試験後も発電効率を維持しているが、EVA は効率が劣化した。この要因としては、複数考えられるが、封止材の体積抵抗の違いやモジュール構成部材の相互作用が推察される。

EVA を用いたモジュールは、水分が浸入した事により水分透過が生じた事や、ガラスからの Na イオンの拡散を防ぐ事ができず劣化したと推察される。一方、CVF を用いたモジュールは Na イオンの拡散を防ぎ、水分の透過を抑える事ができた事が PID 耐性を有する要因と推察される。

IV. まとめ

今回のソーラーシミュレーターでの屋内評価と屋外曝露の結果で、EVA に対して CVF を用いる事で発電効率が向上し、発電量が多くなる事が確認できた。

また、PID 現象についても、EVA に対して CVF の有意差を確認する事ができた。

I. 目的

田中貴金属グループは、金地金をはじめ、さまざまな貴金属材料の開発や安定供給を行なう事業活動を通して、資源循環問題、エネルギー対策、環境汚染対策などにも積極的に挑戦し、持続可能な社会の実現へ貢献することに取り組んでいる。本コンソーシアムでは、貴金属の特性を利用し太陽電池モジュールの高効率化および長期信頼性に寄与することを目的とする。

II. 研究開発目標

貴金属の特性により太陽電池セルとタブ線の線膨張係数の違い等に起因するセルの反りや破損を低減できる配線材料、良好な耐候性により変質の少ない配線材料、良好な電気伝導性により接触抵抗並びに配線抵抗の低い接合材料の開発を目指す。

開発する配線・接合材料により回路抵抗を低下させることで太陽電池モジュールの効率向上に貢献する。更に、セルとタブ線の接合性を向上することでモジュールの高信頼性、長寿命化に貢献することを目標とする。

低温硬化Ag接着剤を用い結晶シリコン単セルモジュールを作製し、EL画像およびソーラーシミュレータ（SS）にて評価を行った。

III. 研究開発の成果

III-1 Ag 接着剤

(1) 評価サンプル

以下の低温硬化 Ag 接着剤を使用した。

	比抵抗値 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Ag 含有率 (パーセント中)	特徴
W1	0.7×10^{-4}	86%	低抵抗・高熱伝導タイプ
W21	1.5×10^{-4}	75%	低温度・短時間硬化タイプ

(2) モジュール作製方法

モジュールは、コンソーシアムの標準部材を使用して次の手順で作製した。

- ①セル表面に Ag 接着剤を塗布する。
- ②塗布した接着剤上にタブ線を配置する。
- ③焼成炉で加熱し、太陽電池セルとタブ線を接合する。
- ④ラミネートおよび配線

(3) モジュールの評価

はんだ接合を行った単セルモジュールと、Ag 接着剤を使用してタブ線を接合した単セル

モジュールの優位差を比較した。モジュール効率は、セル面積を 156 mm 角として計算した。

EL 画像 (図 1) は、はんだ接合とほぼ同等で、種類、接合条件による有意差はないと判断した。SS 測定 (図 2) において、接着剤 W1 を使用したモジュールにおいても、はんだ接合とほぼ同等の結果となった。よって、低温硬化 Ag 接着剤のはんだ代替の可能性が確認できた。

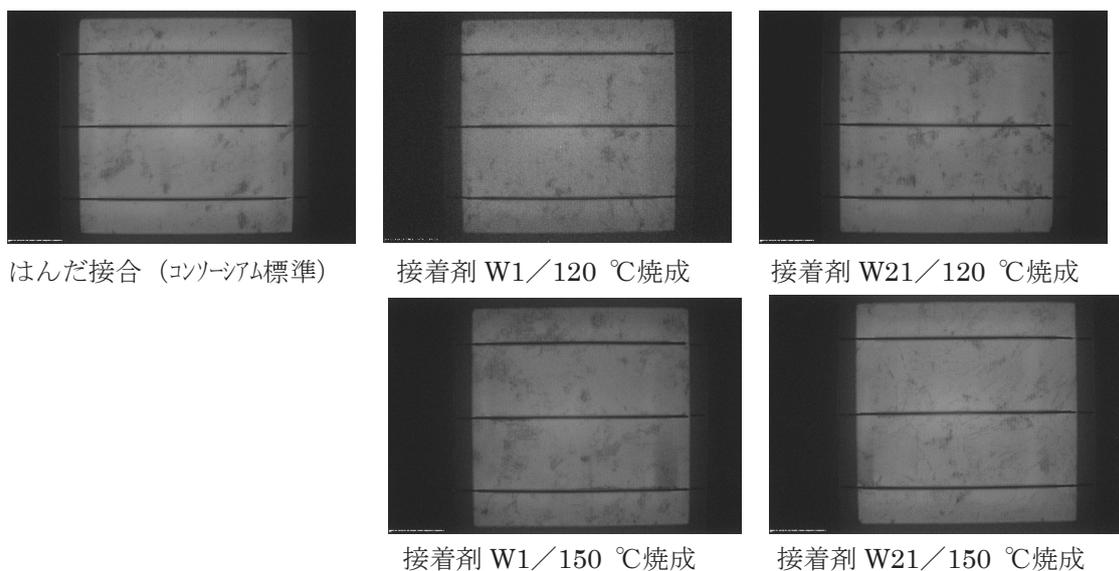
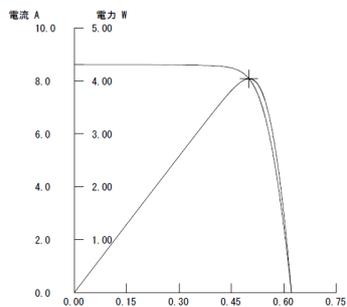


図 1 単セルモジュールの EL 画像

はんだ接合

Voc	0.621 V
Isc	8.613 A
Pmax	4.038 W
FF	0.7546
Eff.	16.59%



接着剤 W1 / 120 °C 焼成

Voc	0.616 V
Isc	8.599 A
Pmax	3.973 W
FF	0.7504
Eff.	16.32%

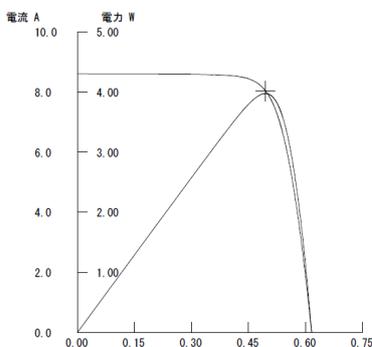


図 2 ソーラーシミュレータの測定結果

III-2 アルミニウムリボンによる配線

(1) 評価サンプル

耐食性を強化したアルミニウムリボン TABR 2.0 mm 幅×0.2 mm 厚、1.5 mm 幅×0.2mm 厚をタブ線として使用した。

同じ材質のアルミニウムワイヤのプレッシャークッカー試験後の断面写真を図 3 に示す。

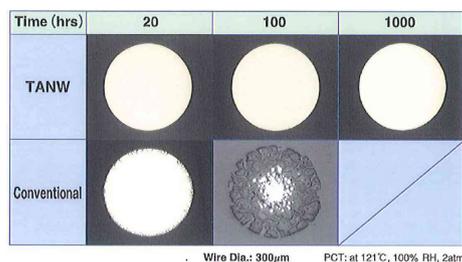


図 3 耐食試験後のワイヤの断面写真

(2) モジュール作製方法

モジュールの作製は、III-1 (2)と同様な手順で行った。

(3) モジュールの評価

EL 画像 (図 4) は全体的に暗く、SS 測定結果 (図 5) は、コンソーシアム標準のタブ線を使用したモジュールと比較して低い効率となった。アルミニウムリボンをタブ線として使用する場合は、接合方法を検討する必要がある。

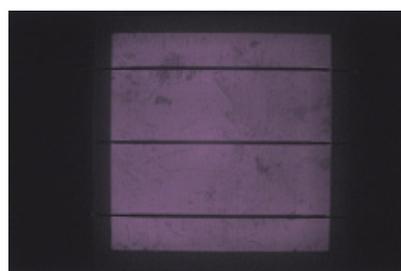


図 4 AL リボン+接着剤 W1/120°C焼成

接着剤 W1/120 °C焼成

Voc	0.617 V
Isc	8.574 A
Pmax	3.357 W
FF	0.6350
Eff.	13.79%

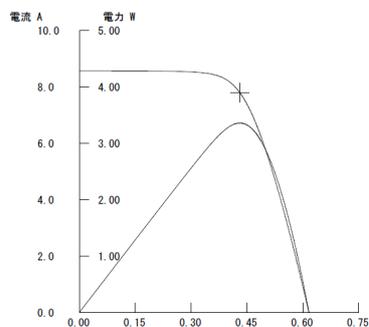


図 5 ソーラーシミュレータの測定結果

III-3 Ag コーティングしたタブ線による配線

(1) 評価サンプル

受光面側の反射が異なる 3 種類の Ag コーティングタブ線 (A:フラット、B:加工 1、C:加工 2) を使用した。

(2) モジュール作製方法

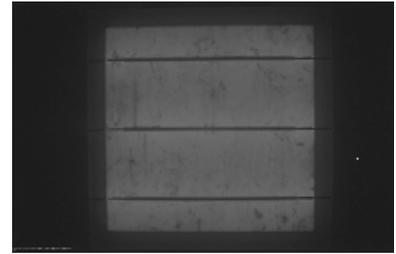
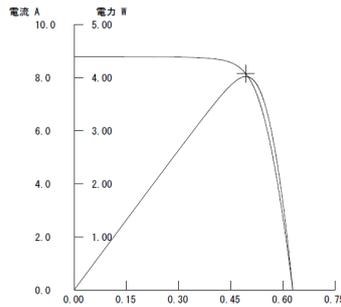
モジュールの作製は、III-1 (2)と同様な手順で行った。

(3) モジュールの評価

SS 測定結果と EI 画像を図 6 に示す。いずれのサンプルもコンソーシアム標準モジュール (Pmax : 4.038W) より高い効率を得ることが出来た。特に、加工 2 を施したタブ線 C では、表面の反射を変えたことで、より多くの光がセルに閉じ込められ、効率が向上したと考えられる。

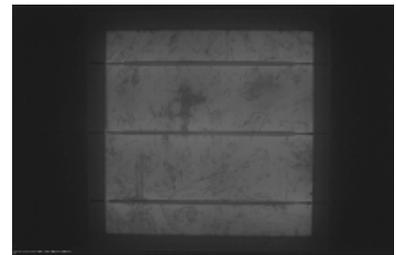
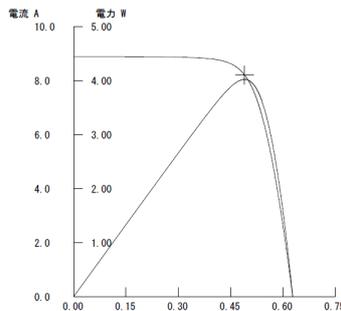
【A : フラット】

Voc	0.628 V
Isc	8.796 A
Pmax	4.018 W
FF	0.7270
Eff.	16.51%



【B : 加工 1】

Voc	0.628 V
Isc	8.8901 A
Pmax	4.022 W
FF	0.7202
Eff.	16.53%



【C : 加工 2】

Voc	0.627 V
Isc	9.375 A
Pmax	4.282 W
FF	0.7287
Eff.	17.60%

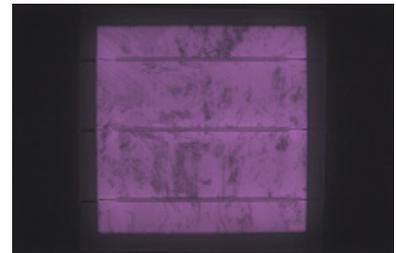
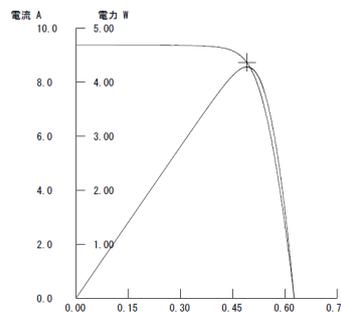


図 6 ソーラーシミュレータの測定結果および E I 画像

IV. まとめ

Ag 接着剤は、太陽電池セルとタブ線の接合材として使えると判断する。

アルミニウムリボンは、表面の僅かな酸化の影響により導電性接着剤や導電性接着テープでの接合では、使用が難しいと考える。超音波接合などのほかの接合方法を検討する必要がある。

反射率の高い Ag をコーティングしたタブ線は、全般に発電効率を向上した結果を得ることが出来た。特に、受光面側に加工を施したものは、コンソーシアム標準と比較して、効率が絶対値で 1% 近く向上した。

「導電性フィルムを用いた太陽電池モジュールの開発および評価」

デクセリアルズ株式会社

(元ソニーケミカル&インフォメーションデバイス株式会社)

I. 目的

太陽電池モジュールにおいて、太陽電池用タブ線接合材料としての導電性フィルム(Conductive Film、以後 CF と略して記載する)を用いた接続方法を新たに提案している。この CF は熱で硬化する接着剤であり、導電性を有する金属系の微粒子がフィルム内に均一に分散されているものである。

この接続方法は、従来の 200℃以上で接合を行うはんだ接合に比べ、180℃以下での低温接続が可能で、熱応力によるセルへのストレスが少なく、次世代の薄型化セルや HIT 型セルに対応可能な低温接合工法となる。CF のような新たな接合材料を提案することで、コンソーシアムの目標とする長寿命モジュールの開発に貢献できると考えており、太陽電池接合材としての CF の優位性を確認することを目的とした。

なお第 I 期に引き続き、CF を用いてセルとリボンを接合した太陽電池モジュールの開発および長期信頼性の評価を行うことに加え、新たなテーマとして薄膜太陽電池向けに新規開発したリボンと CF を一体型にした配線材(タブ線付き CF)を評価し、結晶系における CF と同様に優位性を確認することを目的とした。

II. 研究開発目標

CF を使用した結晶系フルサイズモジュールにて高温高湿環境(85℃/85%RH) 3,000 時間と温度サイクル試験(-40℃⇔85℃) 50 サイクル・温湿度サイクル試験(85℃/85%RH⇔-40℃) 10 サイクル・さらに温度サイクル試験 600 サイクル・屋外実曝露試験、タブ線付き CF を使用した薄膜系フルサイズモジュールにて温度サイクル試験 200 サイクルを実施する事を目標とした。

III. 研究開発の成果

III-1. CF 評価サンプル

本研究には以下の CF サンプルを使用した。

表 1 評価CFサンプルと条件

評価CFサンプル	圧着条件	太陽電池種
CF-A	180℃, 2MPa, 15sec	結晶系
タブ線付きCF-B	60℃で仮貼り, EVA封止工程で硬化	薄膜系

III-2. モジュール作製方法

III-2-1. 結晶系モジュール作製方法

CF を使用した結晶セルストリング作製方法を以下の順番で行った(図 1)。

- Step 1. 結晶系太陽電池セル両面の集電電極部分に CF を貼り付ける。
 - Step 2. タブ線を配置し、ストリングを作製する。
 - Step 3. 本圧着（加熱・加圧）を行い太陽電池セルとタブ線を接合させる。
- また、モジュール作製時にはすべてコンソーシアム標準部材を使用した。

III-2-2. 薄膜系モジュール作製方法

薄膜系セル(アモルファス)へのタブ線付き CF 接続作業を以下の順番で行った(図 2)。

- Step 1. 薄膜系太陽電池セルを加温ステージにて 60~80℃に加温する。
- Step 2. タブ線付き CF を太陽電池セルに貼り合わせる。
- Step 3. 封止樹脂・バックシートを積層し、通常のラミネート作業をすることで CF の本圧着（加熱・加圧）を行い太陽電池セルとタブ線を接合させる。



図 1 結晶系セルのストリング作製手順 図 2 薄膜系セルへのタブ線付き CF 接続作業手順

なおモジュール作製時には結晶系同様、配線材以外はすべてコンソーシアム標準部材を使用した。また配線材の仕様については、表 2 に示す。

表 2 配線材仕様

配線材	配線材厚み
タブ線付き CF-B	35um
超音波ハンダ	180um(はんだ厚込み)

III-3. 結晶系フルサイズモジュールの長期信頼性評価

III-3-1. 第 I 期コンソーシアム評価経過

第 I 期中に CF-A を使用した結晶系フルサイズモジュールを作製し、はんだ接合を行った結晶系フルサイズモジュールと比較した。CF 接続による信頼性の優位差を見るため、第 I 期中に①高温高湿環境試験を 2,000 時間、②温度サイクル試験を 50 サイクル、温湿度サイクル試験 10 サイクルを行う計 2 種類の試験で評価を行った。第 I 期における評価では、①・②いずれも CF-A とはんだにおける差異は確認されなかった。①においてはセル起因の最大出力(Pmax)の低下が確認されたため、第 II 期においては②について継続評価を実施した。

III-3-2. 温度サイクル継続試験

CF-A を使用した結晶系フルサイズモジュールを作製し、はんだ接合を行った結晶系フルサイズモジュールをリファレンスとして温度サイクル試験の継続評価を n=3 にて 600 サイクルまで実施した(図 3)。その

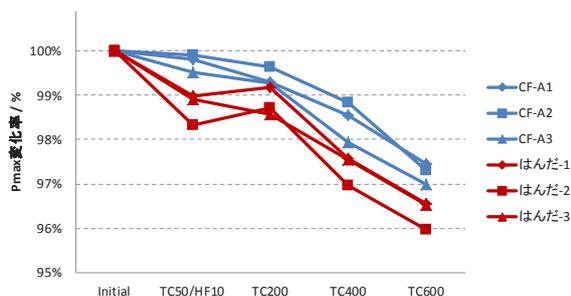
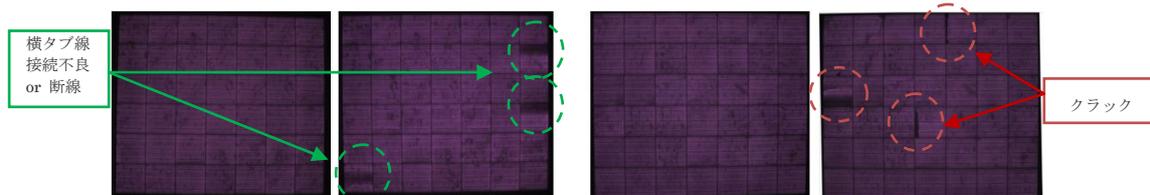


図3 結晶系フルサイズモジュール 温度サイクル試験によるPmax経過

結果、試験の経過とともに全モジュールについて Pmax の低下が確認されたが、初期値比にて 5%以上の出力劣化に至るものはなかった。一方、CF-A とはんだの接続方法の違いからは、試験の経過によって劣化するという点に差異は無いものの、劣化速度には一定の差異が確認され、温度サイクル試験 600 サイクル終了時、CF-A を使用したモジュールのほうが Pmax 変化率における変位量は 0.5~1.0%程度低く優位であることがわかった。

つぎに各モジュールの EL 画像を確認した(図 4)。EL 画像においても、試験の経過とともに全モジュールについて輝度の違いが生じることが確認された。このことは図 3 における Pmax 低下の裏付けとなった。接続方法の違いに着目すると、CF-A において初期におけるセルの割れ(クラック)は確認されず、試験後はわずかなクラックが確認できるものの、輝度の違いが生じた場所はモジュール中のストリング末端のセルに集中していた。この原因はストリングと集電の横タブ線との接続起因あるいはタブ線の断線による可能性が高い。本件については継続試験さらに分析評価が必要と考える。一方、はんだにおける初期の EL 画像ではすでに複数のクラックが確認できた。試験の経過とともにクラックはさらに増加し、試験後の輝度の違いではセルの一部が発光しないモジュールまで確認できた。これらの結果から、CF-A とはんだの接続方法による明瞭な差異を確認することができた。



CF-A(左：初期 右：TC50/HF10+TC600) はんだ(左：初期 右：TC50/HF10+TC600)

図 4 結晶系フルサイズモジュール EL画像

III-3-3. 屋外曝露試験

産業技術総合研究所九州センター（鳥栖）の屋外評価試験場にて1年2ヶ月の屋外曝露試験を実施した。CF-A とはんだとの比較を表 3 に示す。

	CF-A			はんだ		
	初期	1年2ヶ月	変化率	初期	1年2ヶ月	変化率
Pmax, W	171.6	169.5	99%	172.3	170.5	99%
FF, %	0.760	0.755	99%	0.760	0.758	100%
Isc, A	8.748	8.716	100%	8.762	8.712	99%
Voc, V	25.83	25.75	100%	25.88	25.84	100%
Rs, Ω	0.341	0.327	96%	0.327	0.325	99%

表 3 より 1 年 2 ヶ月の実曝露試験による CF とはんだの出力差 (Pmax) は確認できなかった。一方 EL 画像による観察からははんだにおいて複数のクラックが確認できたが、CF におけるクラックの発生は確認されなかった(図 5)。モジュールにおける 1 年程度の実曝露に対して、この程度のクラックでは出力影響が無く、出力影響を確認するためにはさらに長期的な実曝露評価が必要なが分かった。

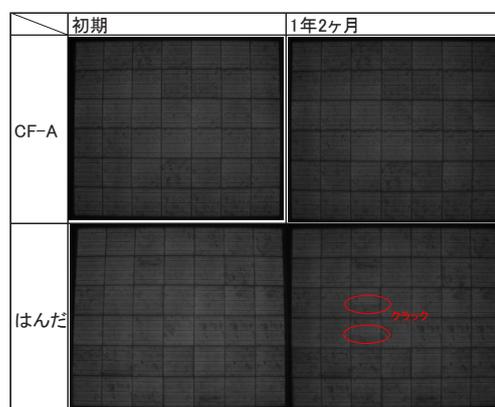


図5 実曝露試験前後のEL画像の比較

III-4. 薄膜系フルサイズモジュールの作製・信頼性評価

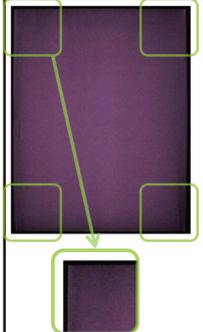
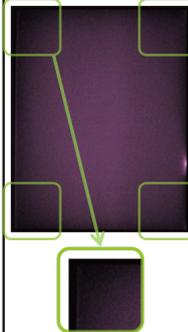
タブ線付き CF-B を使用した薄膜系フルサイズモジュールを作製し、温度サイクル試験による信頼性評価を実施した。

Pmax および EL 画像を測定した結果を表 4 に示す。薄膜系セルに対して、タブ線付き CF-B を配線材として利用可能なことが確認された。さらに、超音波はんだを使用したモジュールと比較しても Pmax 値が高いことが確認された。タブ線付き CF-B のタブ線厚みは超音波はんだ

のタブ線の 1/5 程度の厚みしかない。配線抵抗が高いにも関わらず、超音波はんだ比で同等以上の Pmax 値を確認できた理由として、EL 画像から電極全面での集電性による差が考えられる。配線前のセルの個体差による影響は否定できないが、モジュール四隅における輝度の違いは、少なからずこれらの差に起因していると考えられる。

つぎに温度サイクル試験の結果を示す(図 6)。いずれのモジュールにおいても、アニール効果により試験後の Pmax の上昇が確認されるが、試験結果からタブ線付き CF-B において一定の信頼性を有することが確認された。

表4 薄膜系PVモジュール 初期のPmaxとEL画像

	タブ線付きCF-B	超音波はんだ
Pmax, W	126.2	115.9
EL画像		

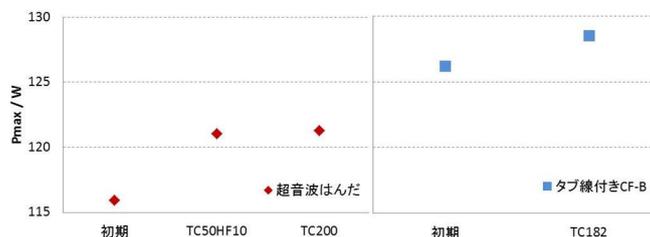


図 6 薄膜系モジュールの温度サイクルによる信頼性評価(平均値プロット)

IV. まとめ

結晶系モジュールの CF 接続プロセスにおいて、温度サイクルの継続試験により信頼性の優位性を実証できた。さらに屋外実曝露試験の結果から CF を使用した太陽電池モジュールは実際の使用にも一定の信頼性を有することが確認された。

また、薄膜系モジュールにおいても新規配線接続プロセスの適用実現性と一定の信頼性を実証できた。今後もさらなる長寿命モジュールあるいは次世代モジュールに適合した材料の開発に努め、太陽電池部材として貢献したい。

I. 目的

現行の太陽電池モジュールに広く用いられている EVA(エチレン・酢酸ビニル共重合体)樹脂封止材は、腐食性物質(酢酸)の遊離や電気絶縁性、耐湿性の低さから、モジュールの長期信頼性向上の観点で課題を有している。最近の欧州メガソーラーにおける高バイアス環境下での急速劣化現象(PID)も、モジュール中の水分量や封止材のイオン透過性が原因の一つとされている。そのためモジュールの長期信頼向上のために新しい封止材料が求められている。また、EVA樹脂はシリコンセル保護に必要な軟質性には優れるが、そのままでは耐熱性が低いため封止工程において架橋処理が必要となる。架橋工程は繊細かつ複雑な工程であり、架橋処理で発生する発泡、酢酸の発生やシート収縮などによる生産性低下、それを防止するための厳しい品質管理は、製造コスト高の一因となっていると考えられる。

一方、当社は独自の重合技術を用い炭化水素系ブロック共重合体樹脂(以下 SE 樹脂)の開発を行っている。本 SE 樹脂は腐食性物質を遊離せず、軟質で電気絶縁性、耐湿性ともに優れている。さらに独自の分子構造に由来する耐熱性を有するため、架橋処理を必要としない新規熱可塑性封止材としてのポテンシャルを有している。本コンソーシアム第一期では SE 樹脂封止材の基本特性評価、各種モジュールの試作と初期評価を行ってきたが、第二期ではこれら各種モジュールの信頼性試験および製造コスト削減などの検討を行った。

II. 研究開発目標

コンソーシアム第一期、第二期を通じた研究開発目標は以下の通りである。

- ①封止材基本特性の評価
- ②現行製造プロセスへの適応性(封止時間短縮、封止材薄膜化、初期発電性能)
- ③単セル〜フルサイズの各種モジュール試作及び初期特性、長期信頼性、屋外曝露評価
- ④PID 耐久性試験及び新規モジュール構成の検討

III. 研究開発の成果

III-1 SE封止材

SE 樹脂は、原料のスチレンとエチレンから当社独自の触媒技術により得られる、エチレンスチレン共重合体主鎖(ソフトセグメント)とポリスチレン側鎖(ハードセグメント)を有する分岐型ブロック共重合体(Segregated star copolymer)である(Fig.1)。本 SE 樹脂はブロック共重合体特有のナノ相分離構造を有し、透明で軟質な新規熱可塑性エラストマーである(Fig.2)。

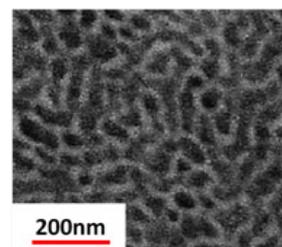
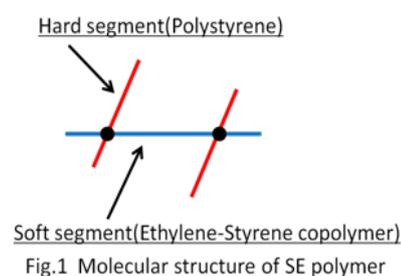


Fig.2 TEM micrograph of SE polymer

III-2 SE封止材の基本特性

標準耐光剤処方をした SE 封止材の耐光試験結果を Table1 に示す。モジュール用ガラスの下に封止材を置き、大気中 83°C でカーボンアーク光を照射したが試験 3000h 後においても SE 樹脂の全光線透過率、力学特性に変化は認められなかった。SE 封止材の透明性は EVA 封止材と同等である。Table2 では封止材に求められる各種物性を比較した。SE 封止材は腐食性物質を生成せず、電気絶縁性(体積抵抗率、絶縁破壊電圧)、防湿性(水蒸気透過率)はいずれも EVA 封止材と比較し優れている。また、透明性、ガラス接着性、軟質性に関しては EVA 封止材と同等である。

Table1 Light resistance test of SE polymer
[Carbon-arc light irradiation 83°C in ambient air]

Irradiation time	0h	1000h	3000h
Sample view			
Total light transmittance [%]	89.1	90.3	89.4
Elongation at break [%]	540	650	640
Breaking strength [MPa]	23	29	24

Table2 Properties of EVA and SE Encapsulants

Encapsulant	EVA	SE
Corrosive	Acetic acid	No contain
Volume resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}$]	8×10^{13}	8×10^{16}
Breakdown voltage [kV/0.5mm]	14	22
Moisture permeability JISZ208 [g/m ² · 24h · mm]	22	2
Glass adhesion [N/25mm]	>40	>40
Shore A hardness	65	65

次に、SE 樹脂の熱可塑性封止材としての可能性を耐熱性の観点から説明する。Fig.3 は貯蔵弾性率と温度の関係を示し、EVA 樹脂は融点(60°C)付近で貯蔵弾性率が急激に低下し、熔融状態にあることがわかる。そのため架橋処理を行うことにより高温での貯蔵弾性率を維持し太陽電池の使用環境下(最高 100~120°C)における耐熱性を確保している。一方、SE 樹脂は室温で EVA 樹脂と同等の貯蔵弾性率(軟質性)を示すが、温度上昇に対する貯蔵弾性率の低下は小さく 100°C~150°C の範囲でも架橋 EVA 樹脂に近い貯蔵弾性率(耐熱性)を有する。この特性は SE 樹脂のハードセグメントであるポリスチレン側鎖の Tg と特異な分岐型構造による分子の絡み合いに基づいており、それぞれポリスチレン側鎖含有量と樹脂の流動性(MFR)によって制御できる。熱可塑性封止材として提案されているポリオレフィン(エチレン)系の各共重合体はその融点(100~120°C)以上の温度で急激に貯蔵弾性率が低下(溶解)するが本 SE 樹脂はそのような急激な低下は無く、より優れた耐熱性を有している。太陽電池モジュールに求められる耐熱性については諸説があり一般的には 120°C 程度とされているものの、直列太陽電池セルの一部が日陰になることで抵抗となり他のセルで発電したエネルギーを消費する現象(ホットスポット現象)では部分的に最大 140°C に達するとの説もある。以上から SE 樹脂封止材はホットスポット耐性を有する熱可塑性封止材としてのポテンシャルを有していると考えられる。

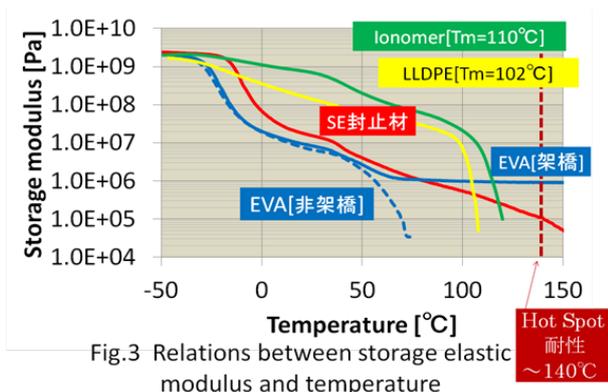


Fig.3 Relations between storage elastic modulus and temperature

III-3 現行製造プロセスへの適応性(封止時間短縮、封止材薄膜化、初期発電性能)

真空ラミネーターを使用し現行封止プロセスへの適用可能性を検討した。SE 封止材を用い、EVA 樹脂と同一の封止条件に加え封止温度、封止時間、封止材の厚みを変え単セル、4セル、フルサイズモジュールの各種試作を行ったが、外観観察、EL 測定結果から空隙やセル割れの問題なく完全に封止出来ている事を確認した(Table3)。

Table3 Encapsulant conditions and appearance

Run	Module Size	Thickness	Conditions of Encapsulation	Appearance
EVA(SC)	Single Cell	0.4mm	150°C,30min	OK
EVA(FC)	Single Cell	0.4mm	135°C,15min	OK
SE-1	Single Cell	0.4mm	150°C,30min	OK
SE-2	Single Cell	0.4mm	150°C, 3min	OK
SE-3	Single Cell	0.4mm	135°C,15min	OK
SE-4	Single Cell	0.2mm	135°C,10min	OK
SE-5	Single Cell	0.2mm	135°C, 3min	OK
SE-6	4Cell	0.4mm	150°C,30min	OK
SE-7	Full(42Cell)	0.4mm	150°C,30min	OK

また、各種条件で作製したモジュールの初期発電性能もコンソーシアム標準 EVA モジュール (以下コンソ EVA) と同等であった。初期発電性能については 4 セルモジュールで詳細に比較した (SE 封止材、コンソ EVA 封止材共に n=8) が、両者間に有意差は認められなかった。

III-4 フルサイズモジュールの信頼性試験、屋外曝露評価

産総研九州センター(鳥栖)で SE 封止材を使ったフルサイズモジュールを試作した。本モジュールを使い 85°C、湿度 85%の条件下で DH 試験を実施した結果、DH5000 まで高い発電性能を維持した(Fig.4)。4セルモジュールでも同様に DH5000 まで高い発電性能を維持した。対照的にコンソ EVA では 4セル、フルサイズモジュール共に DH3000 以降急激に発電性能が低下した。DH 試験後の 4セルモジュールの EL 画像(Fig.5,6)では SE 封止材モジュールでは全面が発光しているのに対し、コンソ EVA では DH4000 でモジュール周辺より暗部が拡大している。I-V プロファイルでは I_{max} およびフィルファクター FF の低下が観察されることより、コンソ EVA の性能低下は水分の浸入と酢酸の発生により引き起こされた絶縁および導電不良であると考察した。SE 封止材の特徴 (腐食性物質無、電気絶縁性、耐湿性の高さ) が本試験結果に反映していると考えている。ヒートサイクル、結露凍結(TC50HF10)試験および TC200 を繰り返したが、本試験ではコン

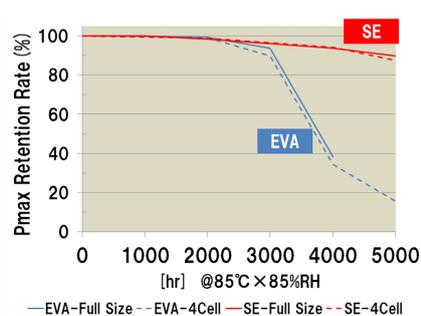


Fig.4 Damp Heat

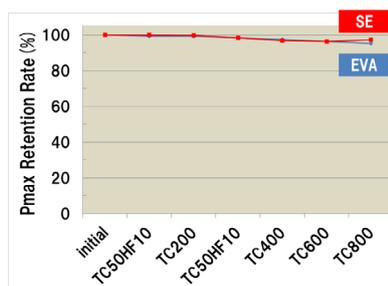


Fig.7 Full Size Module Thermal cycling/Humidity freeze

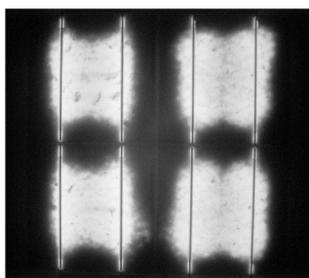


Fig.5 EVA DH4000

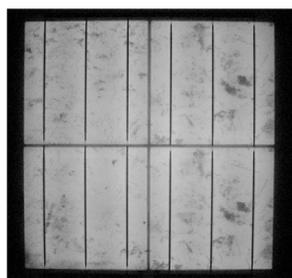


Fig.6 SE DH5000



Fig.8 産総研九州センター(鳥栖)屋外曝露試験

ソ EVA と SE 封止材ともに発電性能の低下は無く有意差は認められなかった(Fig.7)。現在フルサイズモジュールは産総研九州センター(鳥栖)で屋外曝露試験を実施中である(Fig.8)。

III-5 PID耐久性試験及び新規モジュール構成の検討

近年、欧州のメガソーラーにおいて設置間もないモジュールで急激な発電性能低下が報告され、PID(Potential induced degradation)現象として注目されている。メガソーラー特有の高バイアス電圧下で高温高湿度条件が加わると発生する現象で、ガラス中のナトリウムイオンが高バイアス電圧下で遊動し結果としてセルの PN 接合を破壊するという説が有力である。EVA 封止材を透過してイオンが拡散するため、封止材の耐湿性、非イオン性が重要であると考えられる。最近確立された加速評価条件下でSE封止材モジュールのPID耐久性試験を実施した(株式会社ケミトックス外注)。その結果、ケミトックス社提供の EVA モジュールでは明確な発電性能(Pmax)低下と EL による暗部の発生が認められたのに対し、SE 封止材モジュールでは発電性能の低下は見られず高いPID耐久性を示した(Fig.9)。

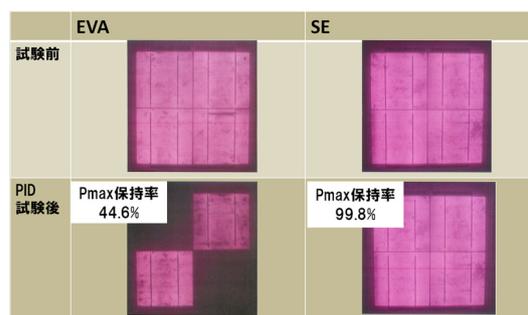


Fig.9 PID条件(-1000V 60°C×85%RH×96時間×水張り法)

さらに、上面から PV ガラス/SE 封止材/セル/SE 封止材/コンソ標準 TPT(テドラー/PET/テドラー)バックシートの標準構成に対し、バックシート無しの構成モジュールを試作し DH 試験を実施した。その結果バックシート無しモジュールでも DH5000 まで高い発電性能を示した(Fig.10)。バックシートに求められる性能は耐 DH 試験耐久性だけではないので本結果が直ちにバックシートの省略可能性を示す訳ではないが、高性能の封止材を用いることでバックシートの構成を簡略化でき、モジュールのコストダウンにつながる可能性を示していると考ええる。

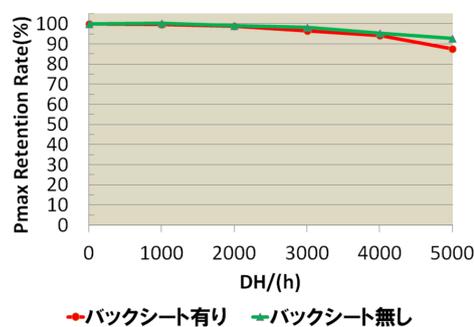


Fig.10 4Cell Module Damp Heat

IV. まとめ

SE 樹脂封止材は化学的に安定で腐食性物質を出さず、電気絶縁性、防湿性に優れ、耐熱性も高いことから新規熱可塑性封止材としての高いポテンシャルを有する材料である。現行 EVA と同じ封止条件でモジュール製造が可能であり現行プロセス適合性も高い。SE 封止材を使用した各種モジュールはコンソ EVA モジュールと同等の発電性能を示し、DH、PID 耐久性試験結果から長期信頼性向上が期待できる。高い封止材性能を生かし、コスト競争力を有する新しいモジュール構成及び製造方法(単純なバックシート構成、封止材薄膜化、タクトタイム短縮等)を提案できる可能性を秘めており、薄膜系など様々なモジュールへの展開も含め今後も検討を進めていく。

I. 目的

太陽電池（主に薄膜系太陽電池）製造工程において、弊社開発の超音波振動を利用した電極接合装置を用いて太陽電池セル基板とタブ線を直接接合することにより、太陽電池接合部の信頼性評価を行い、弊社接合技術の改善・強化を目指す。

弊社開発の超音波電極接合法は、ハンダやペーストを用いない直接接合であり、接合の長期信頼性・長寿命化が期待できる。電極接合法とハンダなどの接合中間材を用いた接合法の発電特性の差異を評価し、発電特性への影響を確認する。

II. 研究開発目標

弊社開発の超音波電極接合法と従来法であるハンダ付けを比較した信頼性評価を行う。薄膜シリコン太陽電池セル基板にタブ線を接合し、ラミネートしてアルミフレームを取り付け、シミュレータにより特性データを比較する。さらに、温度サイクル試験を行い 600 サイクル経過後の特性データを比較することで評価する。

III. 研究開発の成果

1. 超音波電極接合装置について

弊社開発の超音波電極接合装置について説明する。

(1) 原理

超音波接合とは、被接合素材の表面に圧力と超音波振動を与えることにより、表面層の酸化被膜を破壊除去し、更に接合界面の金属を塑性流動させ、原子同士相互に引力を及ぼす距離まで接近して接合（原子間結合）するものである。図 1 は Mo 成膜基板にアルミリボンを超音波電極接合した外観写真である。また、図 2 は弊社で開発した超音波電極接合装置の写真である。



図 1 超音波電極接合した外観写真



図 2 超音波電極接合装置

(2) 特徴

超音波電極接合装置の特徴として、

- ① ハンダ、ペースト等の消耗品が不要
- ② 常温プロセス (省エネルギー)、メンテナンスも容易
- ③ 直接接合のため、低接触抵抗、接合の安定性向上

独自技術によりガラスへのダメージを大幅に軽減し、薄膜系太陽電池セル基板とタブ線を直接接合することが可能となった。

(3) 装置仕様

- ① 対象基板 : 薄膜系太陽電池セル基板
成膜電極 Ag、Ti、Ni、Al、Mo、Cr、TCO 等
- ② 対象基板サイズ : 幅 650~1100mm、長さ 1200~1650mm、厚さ 2~4mm
- ③ 電極材料 : 材質 純アルミ、
リボンサイズ 幅 3~4mm、厚さ t 0.1~0.2mm
- ④ 接合パターン : 接合ピッチ 任意設定
- ⑤ 配線精度 : 幅方向 ±0.5mm、長さ方向 ±1mm

2. 信頼性評価

超音波電極接合法と従来法であるハンダ付けを比較するため、接合方法が異なるモジュールを作製して評価を行った。

(1) 使用材料

- ① 基板 : 薄膜シリコン太陽電池セル基板 (タンデム型) (産総研標準)
幅 998×長さ 1200mm
- ② 接合 : セル基板にタブ線を超音波電極接合したモジュールを 2 枚、ハンダ付けしたモジュールを 2 枚作製した。タブ線から端子ボックス取付け位置に引出す横タブ線とも接合する。作製条件を表 1 に示す。

表 1 作製条件

モジュール No.	タブ線 接合方式	横タブ線 接合方式	タブ線	横タブ線	タブ線 接合ピッチ (mm)
1	超音波 電極接合	超音波 電極接合	アルミリボン	ハンダコート 銅リボン	36
2					72
3	ハンダ付け	ハンダ付け	ハンダコート 銅リボン		36
4					

③ 封止材、バックシート

- a) 封止材 : サンビック FC (産総研標準)
- b) バックシート : Al 封止 (産総研標準)

④ 端面処理、端末処理

a) アルミフレーム（産総研標準）

（ブチルゴム注入後、モジュールにアルミフレームを圧入）

b) 端子ボックス（産総研標準）

（端子ボックスと横タブ線はハンダ付け）

(2) 評価

① 評価 : シミュレータにより測定した特性データと EL 画像を比較

温度サイクル (TC) 試験を行い 200 サイクル経過毎のデータで比較

(TC50 後に結露凍結 (HF) 試験 10 サイクルを加える)

② 測定装置 : 産総研のシミュレータ SPI-SUN SIMULATOR 1116N と EL を使用

③ 温度サイクル試験条件

温度 : $85 \pm 2^\circ\text{C} \Leftrightarrow -40 \pm 2^\circ\text{C}$

設定時間 : 1 サイクルあたり 270min、温度保持時間 : 各 30min 以上

④ 結露凍結試験条件

温度 : $85 \pm 2^\circ\text{C} \Leftrightarrow -40 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 : $85 \pm 5\%$ ($85 \pm 2^\circ\text{C}$ 時)

設定時間 : 1 サイクルあたり 24hr

温度保持時間

: 高温 ($85 \pm 2^\circ\text{C}$, $85 \pm 5\%$) 20hr 以上、低温 ($-40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) 30min 以上

温度サイクル試験ならびに結露凍結試験は、エスペック株式会社（神戸試験所）に試験を委託して実施した。

(3) 測定結果

① 初期データ

温度サイクル試験前に、初期データとして表 1 に示す各モジュールの特性をシミュレータで測定した。ハンダ付けしたモジュール特性の平均値を 1 とし、超音波電極接合した各モジュール特性の比を表 2 に示す。

表 2 初期データ比（超音波 / ハンダ付け）

モジュール No.	接合ピッチ (mm)	開放電圧 Voc (V)	短絡電流 Isc (A)	最大電力 Pmax (W)	フィルファクタ FF
1	36	1.004	0.992	1.034	1.038
2	72	0.989	1.007	1.012	1.015

この結果からは超音波電極接合とハンダ付けとのデータに顕著な差は見られない。

② 温度サイクル試験結果

表 1 に示す各モジュールについて、TC50 サイクル後の HF10 終了時と、その後 200 サイクル毎に特性を測定し、600 サイクルまで試験を実施した。

初期値を1として各モジュールの特性の変化率を図3に示す。

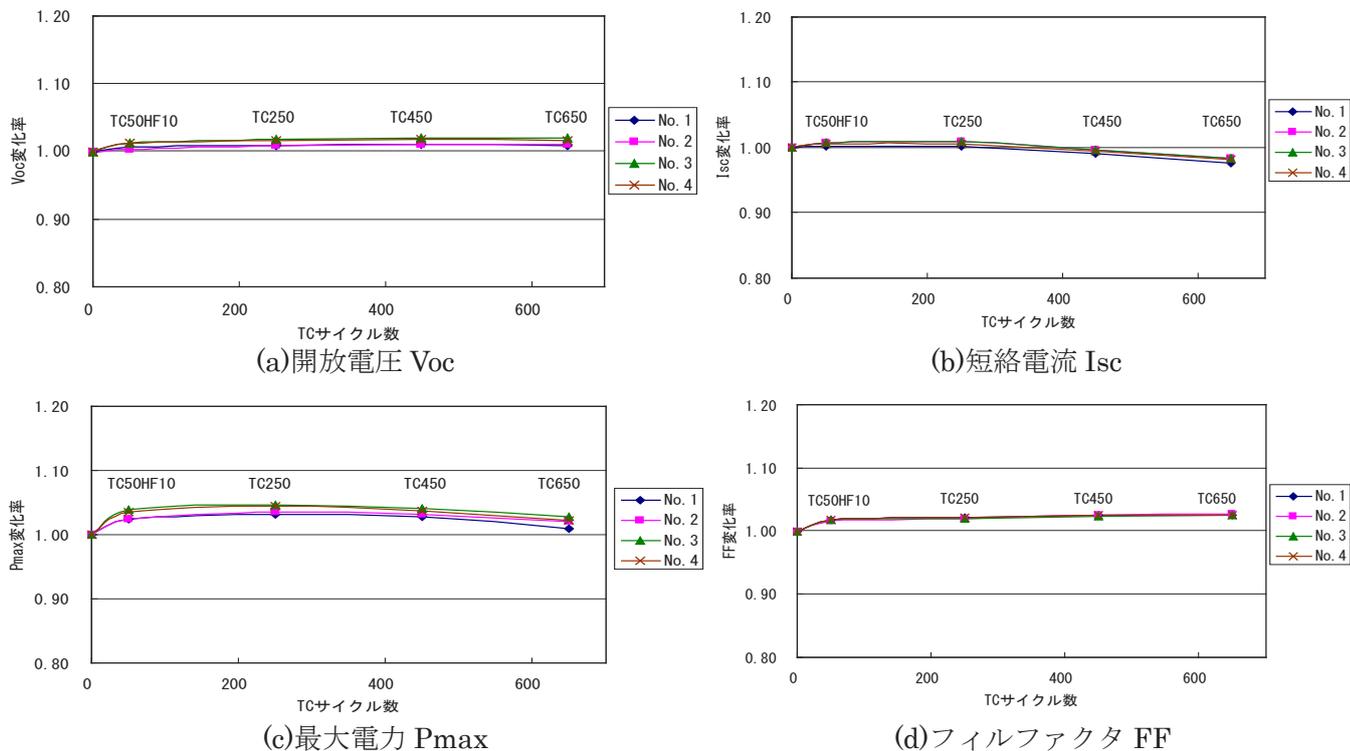
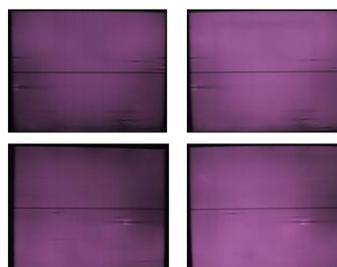


図3 特性の変化率

EL画像として、初期とTC600後の代表例2つを表3に示す。

表3 EL画像



これらの結果からも、超音波接合法とハンダ付けとのデータに顕著な差は見られない。また、接合ピッチを広くした影響もなく600サイクルまで安定した結果となっている。

IV. まとめ

超音波電極接合と従来のハンダ付けにより接合したモジュールについて温度サイクル試験の信頼性評価を行った結果、顕著な差異は見られなかった。したがって、超音波電極接合法は従来から適用されてきたハンダ付け法と同等の接合品質を有する電極接合法であると見なせ、弊社として製品適用を目指した活動を展開する。

I. 目的

太陽電池モジュールの裏面保護の役割を担うバックシートを構成する部材には、その使用部位に応じて耐候性や封止材との密着性、水蒸気バリア性といった特性が求められている。当社は、保有する樹脂技術、加工技術を活かした耐加水分解性ポリエステルフィルムや、封止材易接着性ポリエステルフィルム、透明蒸着バリアフィルム等のバックシート用部材の開発、生産を通じて、太陽電池モジュールの信頼性向上に寄与することを目指している。本研究はバックシート用部材の要求特性を明確化し、バックシート用部材の開発・改善に活用することを目的として実施した。

II. 研究開発目標

当社は、当社の耐候性ポリエステルフィルム、封止材易接着性ポリエステルフィルム、透明蒸着バリアフィルム等のバックシート用部材を使用して、高い信頼性のモジュールを実現することを目標に、コンソーシアム第 I 期から継続して参画し、部材の信頼性評価、要求特性の把握を目指して活動を行っている。

当社のコンソーシアム第 I 期の研究では、当社製耐候性ポリエステルフィルム(商品名：シャインビーム®)をバックシートの最外層部材に用いたモジュールのダンプヒート(DH)試験(85°C/85%RH)を行い、耐候性ポリエステルフィルムが 4000 時間におよぶ長期の DH 試験でもクラックを生じない優れた耐湿熱性を有することを確認した。一方で、コンソーシアム標準部材である TPT (PVF/PET/PVF) バックシートの中間層の PET フィルムや、当社が本研究で用意したバックシートの一部に用いた一般グレードの PET フィルムは DH 試験 3000 時間で脆化によるクラックを生じることを確認し、外部環境に晒されるバックシート最外層だけでなく、直接外部環境には触れず、強度や絶縁性といったモジュール保護機能の重要な役割を担うバックシート中間層のフィルム部材にも湿熱による劣化の影響が及んでいる可能性が示された。

当社の第 II 期の研究では、第 I 期の成果を踏まえて、バックシートトータルでの信頼性向上を目指して当社部材適用の効果の検討を行った。

III. 研究開発の成果

III-1. 実験

III-1-1. モジュール作製

当社製耐候性ポリエステル(PET)フィルム(商品名：シャインビーム®)の透明タイプ(コンソーシアム内呼称：AT)、同白色タイプ(同 AW)をはじめとする表 III-1-1-1 に示したバックシート部材用フィルムを用意した。

表 III-1-1-1. バックシートに用いたフィルム

名称	材料基本構成	タイプ	EVA易接着コート	厚み [μm]
AT1	耐候性PETフィルム	透明		50
AT2	耐候性PETフィルム	透明		188
AW1	耐候性PETフィルム	白色	○	50
AW2	耐候性PETフィルム	白色		50
GT1	一般グレードPETフィルム	透明		250
GT2	一般グレードPETフィルム	透明		50
GW1	一般グレードPETフィルム	白色	○	188

表 III-1-1-1 に示したフィルムを用いて、表 III-1-1-2 に示した層構成のバックシートを作製した。BS1、BS2 はコンソーシアム第 I 期から引き続き検討しているバックシートである。BS3、BS4 は今期新たに作製したバックシートで、BS3 はセル側、モジュール裏面側の両外層を含めてすべて一般グレード PET フィルムで構成した。BS4 は中間層を含めてすべてのフィルム層を耐候性ポリエステルフィルムで構成した。バックシートのセル側で EVA との密着面になる PET フィルム表面には、当社の EVA 易接着性コート層を設けた。

比較として、コンソーシアム標準の TPT バックシートを用いた。

表 III-1-1-2. バックシートの層構成

バックシート呼称	BS1	BS2	BS3	BS4	TPT (比較用)
セル側					
層構成	AW1 50μm	AW1 50μm	GW1 188μm	AW1 50μm	PVF 38μm
	GT1 250μm	GT1 250μm	GT2 50μm	AT2 188μm	一般PET 250μm
	AT1 50μm	AW2 50μm	GT2 50μm	AT1 50μm	PVF 38μm
モジュール裏面側	外層：耐候性PET 中間層：一般PET	外層：耐候性PET 中間層：一般PET	全層一般PET構成	全層耐候性PET構成	コンソ標準 TPTバックシート
	— 当社EVA易接着コート層		— 層間接着剤層		

試験モジュールの作製は、バックシートを変更したことを除いてコンソーシアム標準の多結晶シリコンセルモジュールと同じ部材構成で行った。なお、単セルモジュールについては、端子ボックスを用いずに、タブ線をモジュール端部から直接取り出す形とし、一部のモジュールについては、シリコーンシーラントを用いるアルミフレームの取り付けは行わなかった。

III-1-2. 加速劣化試験

加速劣化試験として 85°C×85%RH の DH 試験を実施した。第 I 期期間中に作製したモジュールの継続試験はコンソーシアム使用設備で実施し、第 II 期に作製したモジュールは当社が保有する恒温恒湿槽を用いて実施した。

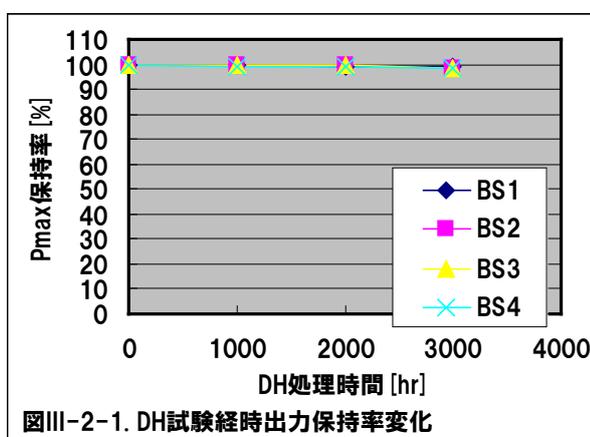
III-1-3. モジュール評価

作製時初期及び加速劣化試験後のモジュールは外観観察の他に、コンソーシアム設備を使用した I-V 特性測定、EL 画像測定により劣化状況の評価を行った。

III-2. 結果と考察

第 I 期では、バックシート BS1、BS2 及びコンソーシアム標準 TPT バックシートを用いた 4 セルモジュールの DH 試験において、DH3000 時間経過時点で中間層 PET フィルムにクラックが生じた。今回、第 I 期でも評価した BS1、BS2 に加えて BS3、BS4 をバックシートに使用した単セルモジュールを作製し、3000 時間まで DH 試験を行った。

図 III-2-1 に DH 試験経時における最大出力保持率の変化を示した。BS1、BS2、BS3、BS4 いずれのバックシートを用いたモジュールでも DH3000 時間時点における最大出力保持率はすべて 98%以上であり、DH 試験の経時による出力変化は小さかった。



図III-2-1. DH試験経時出力保持率変化

図 III-2-2 に DH3000 時間経過後のモジュールのバックシート面外観の写真を示した。写真では分かりにくいですが、最外層に一般グレードの PET フィルム GT2 を用いた BS3 の表面は黄変を生じていた。最外層が耐候性ポリエステルフィルムで構成された他の 3 つの水準では、顕著な色調の変化は見られなかった。特に BS1、BS4 は最外層、中間層が透明であり、バックシートの内部にも色調の変化がないことがわかる。

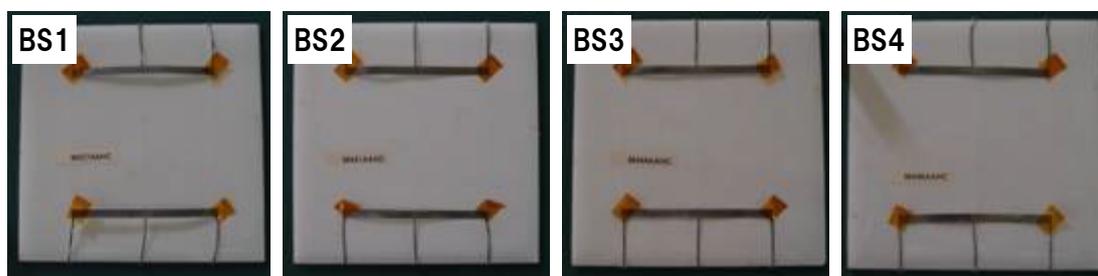


図 III-2-2. DH3000 時間処理済みモジュールのバックシート外観

BS1、BS2 を用いた第 I 期の 4 セルモジュールの DH 試験では、DH3000 時間経過時点で中間層の一般グレード PET フィルムにクラックが生じていたが、今回の単セルモジュールの DH 試験では、この 2 種のバックシートのモジュールで DH3000 時間経過時も自発的

なクラックの発生は見られなかった。しかし、バックシート面に外部から局所的な力を加えると、中間層にのみ容易にクラックが生じることが分かり（図 III-2-3）、最外層に耐候性ポリエステルフィルムを有する BS1、BS2 でも中間層の一般グレード PET フィルムは DH 試験により脆化が進行していることが示唆された。

3 層のフィルムすべてを一般グレードの PET フィルムで構成した BS3 では、最外層の PET フィルム GT2 にクラックを生じており、さらに反対面からの透過光で観察すると、セル側層の白色 PET フィルム GW1 や中間層の PET フィルム GT2 にもクラックが生じていることが確認できた（図 III-2-4）。



図 III-2-3. BS1 使用モジュールのクラック
（モジュール端部の透過光観察）

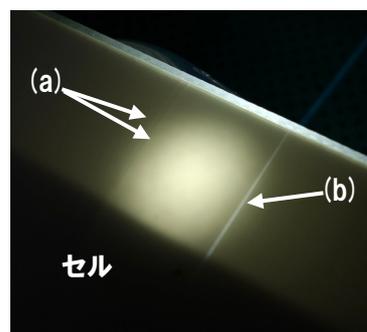


図 III-2-4. BS3 使用モジュールのクラック
(a) 中間層のクラック、(b) セル側層のクラック
（モジュール端部の透過光観察）

3 層をすべて耐候性ポリエステルフィルムで構成した BS4 では、外観を仔細に観察してもバックシートのいずれの層にもクラックの自発的な発生は認められず、BS1 や BS2 の中間層に用いた一般 PET フィルムのような脆化も見られないことから、BS4 バックシートは他の一般グレード PET フィルムを構成に含むバックシートや第 I 期で評価したコンソーシアム標準 TPT バックシートに比べても優れた耐久信頼性を有することが分かった。

BS4 を用いたモジュールはさらに積算 4000 時間まで DH 試験を継続したが、セル側層、中間層、最外層のいずれの層にもクラックや層間の剥離は認められなかった。

以上の結果から、当社製耐候性ポリエステルフィルムはバックシートのいずれの層に使用しても極めて高い耐久信頼性を有していると言える。

IV. まとめ

セル側層、中間層、最外層のすべてを当社の耐候性ポリエステルフィルムで構成したバックシートを用いた多結晶シリコン単セルモジュールの DH 試験を実施し、当社の耐候性ポリエステルフィルムが DH4000 時間を超える極めて高い耐久信頼性を有することを確認した。

今後、ますます多様化するニーズに対応した優れたバックシート用部材を提供できるよう、本研究の成果を元に、鋭意開発を進めていく。

I. 目的

太陽電池モジュールの裏面を保護する「バックシート」は水蒸気浸入の抑制、電気絶縁性などの保護機能を主に司る材料である。第Ⅰ期コンソーシアム活動において当社では耐加水分解性 PET フィルムを含む自社製部材適用モジュールの高信頼性、並びに湿熱負荷 (Damp Heat 試験 : DH) + 温度サイクル負荷 (Thermal Cycle 試験 : TC) の組み合わせ試験における自社製部材適用モジュールの高信頼性について検討した。第Ⅱ期コンソーシアムでは引き続き DH + TC の組み合わせ試験における信頼性に着目し検討を行った。また、モジュールの信頼性に大きな影響を与え得る PID (Potential Induced Degradation) 現象について、バックシートの水蒸気透過率がモジュールの PID 耐性に与える影響を検討した。

II. 研究開発目標

高信頼性結晶系シリコン太陽電池モジュールの開発、並びに新規信頼性試験方法の提案に向けて次の目標を掲げ、研究活動を推進した。

(ア) 新規加速試験方法 (DH+TC 複合加速試験) の提案

(イ) PID 現象とバックシート水蒸気透過率の相関性検証

III. 研究開発の成果

(ア) DH+TC 複合加速試験 (詳細は中間成果報告書を参照)

現行の結晶シリコンモジュールに対する認証規格試験 (IEC61215) にて定められている温度、湿度負荷による環境試験は下記の通りである。

① DH 試験 1000 時間

② TC 試験 50 サイクル → 結露凍結 (HF) 試験 10 サイクル

③ TC 試験 200 サイクル

DH 試験、TC 試験は太陽電池モジュール及び周辺部材の湿熱負荷や温度サイクル負荷に対する信頼性・耐久性を確認する上では有効な試験方法であるが、屋外環境試験下では湿熱・温度サイクル負荷が複合的に作用しているため、単一試験では実使用下における信頼性を評価することは難しく、複合負荷による評価が重要と考えている。そこで当社は DH と TC の組み合わせ試験について更に詳細に検討を実施した。

DH と TC の組み合わせ試験において使用したバックシートは表 1 の通り。参照・比較用としてコンソーシアム標準部材の Tedlar/PET/Tedlar (TPT)、自社製部材としての耐湿熱 PET を含むバックシート①を使用した。ガラス、封止材 (EVA : Fast cure タイプ)、セル、配線材、端子箱、ポッティング剤、シーリング剤、アルミフレーム等は全てコンソーシア

ムの標準部材を使用し、結晶 4 セルモジュールで評価を実施した。

検討した試験方法を表 2 に示す。当社では DH&TC の組み合わせ試験に関し、表 2 の考案試験に記載の 2 つのスキームを検討し、DH・TC の Round 完了毎に評価を実施した。

まず、DH500&TC100、DH1000&TC200 の組み合わせ試験における BS No.1 : TPT の外観変化を図 1 に示す。BS No.1 : TPT ではいずれの組み合わせ試験においても累積 DH2000・TC400 の時点でバックシートに亀裂が生じることが分かった。累積 DH2000 の時点では亀裂は生じておらず、DH による汎用 PET の脆化が進行した後、TC による温度サイクル負荷によって亀裂が生じたものと推測している。BS No.2 : 耐湿熱構成①では亀裂発生は無く、外観・安全性の保持において TPT のような汎用 PET 構成よりも耐湿熱 PET を含むバックシートの方が優れていると言える。

DH500&TC100 組み合わせ試験における Pmax 保持率を図 2 に、DH1000&TC200 組み合わせ試験における Pmax 保持率を図 3 に、DH500&TC100・DH1000&TC200 組み合わせ試験の EL 画像を図 4 にそれぞれ示す。DH 試験を長時間継続した場合、およそ 2500～3000 時間経過した時点でセルの外周から暗部が発生し、徐々にセル中央に侵食する現象が確認されている。しかしながら、図 4 より DH1000&TC200 組み合わせ試験では DH1000

表 1. DH/TC 組み合わせ試験で使用したバックシート

Cell side	“Tedlar” (38 μm)	白色オレフィン (150 μm)
BS構成	汎用PET (250 μm)	“ルミラー”X10S (125 μm)
Out side	“Tedlar” (38 μm)	耐熱性コート層
BS No.	No.1 TPT	No.2 耐湿熱構成①
耐湿熱性	△	◎
水蒸気透過率 (40°C90%RH)	1.86	1.21

表 2. DH/TC 組み合わせスキーム

		従来試験		考案試験	
		Damp Heat (DH)	Thermal Cycle (TC)	DH500 & TC100	DH1000 & TC200
Round	1	DH1000	TC200	DH500	DH1000
	2	DH1000	TC200	TC100	TC200
	3	DH1000	TC200	DH500	DH1000
	4	DH1000	TC200	TC100	TC200
...	



図 1. DH&TC 組み合わせ試験による外観不具合

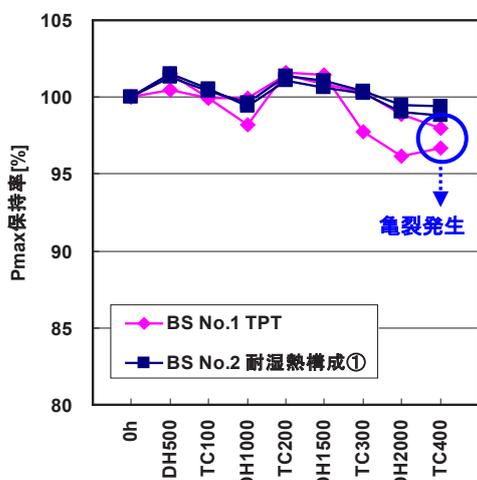


図 2. DH500&TC100 試験の Pmax 保持率

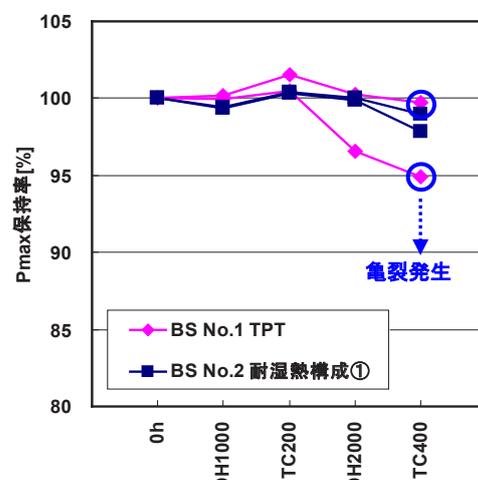


図 3. DH1000&TC200 試験の Pmax 保持率

→TC200 が完了した段階でセルにスポット状に暗部が発生することが分かった。一方、DH500&TC100 繰り返し試験ではスポット状の暗部の発生は見られず、累積でDH2000&TC400 完了時点においても EL 画像の変化は見られていない。累積された負荷は同じでも DH と TC の組み合わせによって EL 画像の変化に違いが見られることが分かった。

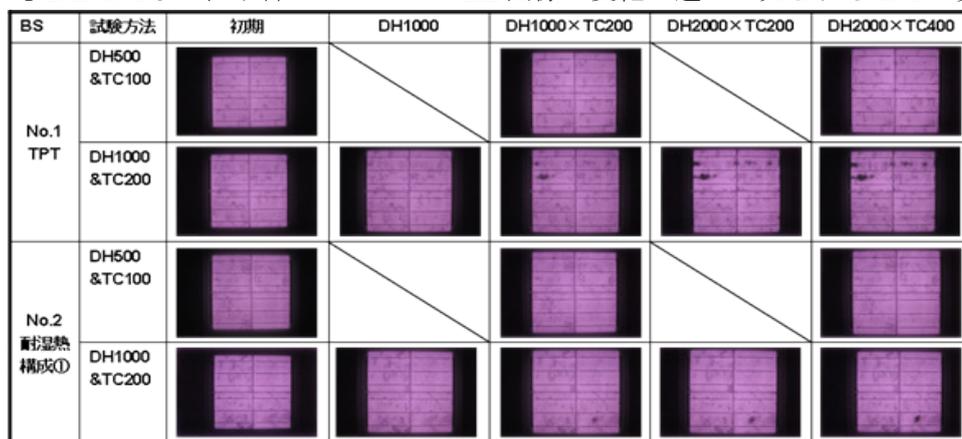


図 4. DH&TC 組み合わせ試験による EL 画像変化

(イ)PID 現象とバックシート水蒸気透過率の相関性について

表 4. PID 試験に使用した

次に、PID 試験について記述する。モジュールの信頼性に大きな影響を与えると考えられる PID 現象について、封止材やセル、ガラス等の基幹部材による影響に関する検討については既に報告例があるが、バックシートに関する報告例はない。封止材の含有水分量がモジュールの

バックシートと WVTR

裏面材	水蒸気透過率@40°C90%RH (g/m ² /day)
PET/Al/PET (PAP)	- (極めて低い)
無機層蒸着BS	0.2
Tedlar/PET/Tedlar (TPT)	2.0
50 μm ETFE	14

PID 耐性に影響を与える可能性があることから、バックシートの水蒸気透過率がモジュールの PID 耐性に与える影響について検討を実施した。

本試験において使用したバックシート及びその水蒸気透過率を表 4 に示す。なお、#50ETFE を除く 3 種のバックシートはいずれもコンソ標準部材である。これらのうち、Al 箔入り BS である PAP を使用した水準では裏面材からの水蒸気浸入は遮断され、水蒸気浸入経路は端面のみとなるものとする。ガラス、配線材、端子箱、ポッティング剤、シーリング剤、アルミフレーム等は全てコンソーシアムの標準部材を、封止材、セルは持ち込みの部材を使用し、結晶 4 セルモジュールで評価を実施した。

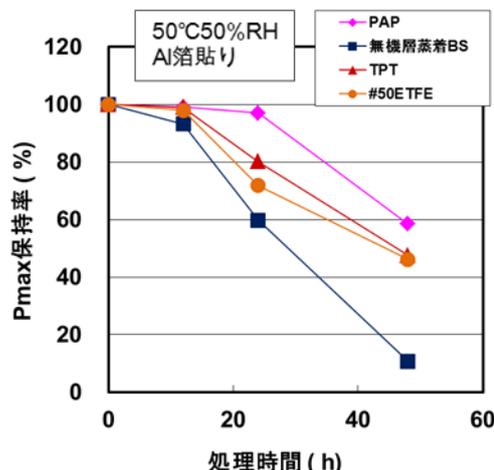


図 5. PID 試験後の Pmax 保持率

検討に当たり、試験方法は Fraunhofer 研究所が提唱する 50°C50%RH Al 箔貼り 48 時間を採用し、試験時間が計 12, 24, 48 時間となった時に取り出し、評価を実施した。

試験結果となる Pmax 保持率を図 5 に示す。モジュールへの水蒸気浸入量が最も小さいと考えられる PAP 使用水準の Pmax 低下が最も小さい結果だが、その他の水準については傾向が一致しない。この結果を、水蒸気がモジュール内部に十分浸入していないために水準間に差が生じていないものと考え、試験中の水蒸気浸入速度がより大きいと考えられる、PI Berlin が提唱する 85°C85%RH 96 時間条件 (Al 箔無し) にて同様の水準を用いて再度実験を行った。

ここで 85°C85%RH 条件における水蒸気浸入速度について、NEDO プロジェクト「モジュール内水蒸気浸入経路調査方法の研究開発」の下、Ca 法にて調査された結果 (図 6) を参考とした。これによると、モジュールへの水蒸気浸入経路となり得る裏面と端面の内、1 セルモジュールでは裏面材が主な水蒸気浸入経路となり、50 時間処理時点で浸入水蒸気がセル表面に回りこんでいる。4 セルモジュールの場合も裏面材からの水蒸気浸入が支配的となり、同様の傾向を示すと考えられ、PI Berlin 提唱条件にて水蒸気の浸入による有意差の有無を確認可能と考えた。

PID 試験について、試験時間が計 24, 48, 96 時間となった時にモジュールを取り出し、評価を実施した。その Pmax 保持率を図 7 に示す。比較的水蒸気透過率の低い無機層蒸着 BS で劣化が生じているにも関わらず、水蒸気透過率の高い #50ETFE や TPT で劣化が生じていない。以上の結果を鑑みて、裏面材の水蒸気透過率がモジュールの PID 耐性に与える影響は小さいものと考えられる。

IV. まとめ

本研究の成果を以下の通りまとめる。

- DH&TC の組み合わせ方によって劣化の挙動に差が見られることを確認した。
- DH&TC の組み合わせ試験により、単体試験では生じなかった、PET の脆化が原因と考えられる BS の亀裂という新たな劣化モードを生じさせることができた。
- 外観、安全性確保の面で耐湿熱 PET は汎用 PET に比較して優れている。
- バックシートの水蒸気透過率はモジュールの PID 耐性に大きな影響を与えない。

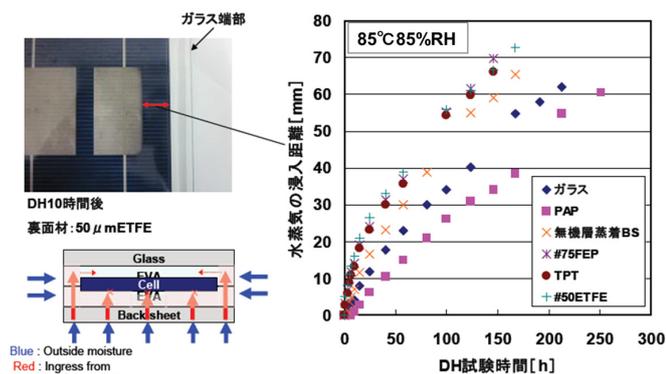


図 6. 85°C85%RH 下での 1セルモジュール内水蒸気浸入速度

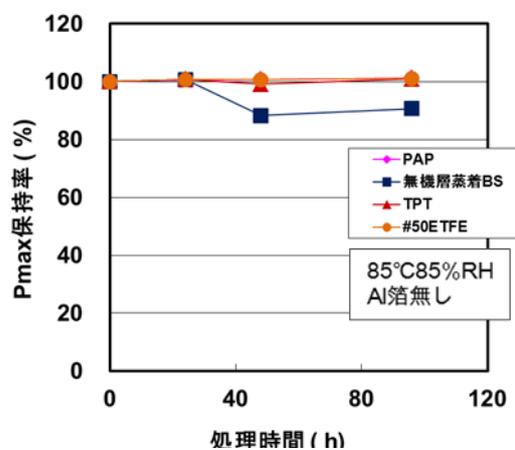


図 7. PID 試験後の Pmax 保持率

I. 目的

現在多くの太陽電池モジュールに封止材として EVA（エチレン-酢酸ビニル共重合体）が用いられているが、EVA がモジュール内の水分と反応して発生した酢酸が金属部材を劣化させ、出力低下を引き起こす可能性が指摘されている。一方でバックシートの重要な役割の一つに、モジュール内に水分が浸入するのを防ぐ保護機能があるが、太陽電池に必要なバリア性能は十分に検証されていない。そこで我々は薄膜シリコン系太陽電池に着目し、バックシートの水蒸気バリア性がモジュール寿命に及ぼす影響を把握することで、薄膜シリコン太陽電池モジュールに必要なバリア性能を明確にすることを目的とする。

II. 研究開発目標

II.1. バックシートバリア性とモジュール出力低下の関係把握

本研究向けに作製した水蒸気バリア性の異なる数種類のバックシートと、コンソーシアム標準部材を組み合わせてミニモジュールを作製する。加速劣化試験として 85°C85% RH 高温高湿（DH）試験を行い、試験後のモジュールの出力低下と、バックシートの水蒸気バリア性の関係を確認する。

II.2. モジュール出力低下の原因解明

EVA から発生した酢酸が出力低下を引き起こす可能性が指摘されている。一方で薄膜シリコン太陽電池に関しては水分だけでも出力低下が起こるという説もある。出力低下の原因を推測するため、水蒸気バリア性の異なるバックシートと、2 種類の封止材（EVA、オレフィン系）、コンソーシアム標準部材を組み合わせてミニモジュールを作製する。各モジュールの 85°C85%RH 高温高湿（DH）試験後の出力低下と、バックシートの水蒸気バリア性の関係を確認する。

III. 研究開発の成果

III.1. 実験方法

III.1.1. 水蒸気バリア性の異なる凸版試作品バックシートの作製

PET フィルム片面にガスバリア層を形成したガスバリアフィルムを作製し、このガスバリアフィルムの両面に PET フィルムをラミネートすることで本研究のための凸版試作品バリアバックシート（バリア BS）を作製した。バックシートの厚みは、約 200~240 μm となり、上記ガスバリアフィルムに形成されたガスバリア層の水蒸気バリア性をコントロールすることで、水蒸気透過率を $10^{-4}\sim 10^{-1}\text{g/m}^2\cdot\text{day}$ （40°C90%RH）とした。各バックシートの水蒸気透過率を表 1 に示す。

表 1 凸版試作品バリア BS の水蒸気透過率

		水蒸気透過率 $[g/m^2 \cdot day]$ ※
バリアBS	①	0.12
	②	0.02
	③	0.008
	④	0.003
	⑤	0.005
	⑥	0.0004

※40°C90%RH環境で測定

III.1.2.評価用ミニモジュールの作製

《バックシートバリア性とモジュール出力低下の関係》

凸版試作品バリア BS①～④とコンソーシアム標準部材とを組み合わせ、薄膜シリコン（アモルファスシリコン）の太陽電池ミニモジュール（約 18cm 角）を作製した。また比較用として、凸版試作品バリア BS の代わりにコンソーシアム標準アルミバックシート（アルミ BS）を使用したミニモジュールも作製した。なおアルミ BS の水蒸気透過率は測定していないが、最もバリア性が高いと考えられる。

また、コンソーシアム I 期の成果では、ジャンクションボックスを取り付けるために開けたバックシートの穴から水分が浸入していることが確認されたため、本研究ではジャンクションボックスを使用せず端面から直接配線を取り出す方式を取っている。

モジュール端面は、コンソーシアムの方式通りブチルゴムとアルミフレームでシールしている。

《モジュール出力低下の原因》

凸版試作品バリア BS⑤、⑥および 2 種類の封止材（EVA；コンソーシアム標準品、オレフィン系；凸版市販品 AZ1001）と、コンソーシアム標準部材と組み合わせ、タンデム薄膜シリコンの太陽電池ミニモジュール（約 18cm 角）を作製した。比較用としてコンソーシアム標準アルミ BS を使用したモジュールを作製した。

III.1.3 ミニモジュール加速劣化試験および評価

作製したミニモジュールは DH 試験を実施し、500 時間（必要に応じて 250 時間）ごとにモジュールを取り出して I-V 測定を行った。

III.2.結果および考察

III.2.1.バックシートの水蒸気バリア性とモジュール出力低下の関係

まず、水蒸気バリア性の異なるバックシートと、コンソーシアム標準部材（封止材は EVA を使用）を組み合わせ、ミニモジュールの DH 試験結果を報告する。

本コンソーシアムでは、モジュール出力性能の劣化基準を「初期（DH0h）の最大出力（Pmax）から 5%低下」としており、これを「コンソ劣化基準」と記す。DH500h 経過後はいずれのモジュールも Pmax の上昇が見られたが、これは DH 試験の熱によるアニール効果と考えられる。しかし、1000h でバリア性の最も低いバリア BS①がコン

ソ劣化基準を超える P_{max} 低下となり、DH 試験が進むごとにバリア性の低いバックシートから P_{max} が低下していった (図 1)。DH 試験後はバックシートの水蒸気バリア性が低くなるほど P_{max} の低下が大きくなる傾向となった。一例として、DH1500h 後の ΔP_{max} とバックシートのバリア性との関係を図 2 に示す。なお、コンソ標準アルミ BS (水蒸気透過率：不明) を使用したミニモジュールでも、DH 試験 2750h でコンソ劣化基準を超える P_{max} 低下が確認された。 P_{max} が低下したモジュールの I-V 特性を見ると、いずれも直列抵抗の大幅な増加による曲線因子の低下が確認された。このように水蒸気バリア性の低いバックシートを用いたモジュールほど P_{max} が低下していることから、バックシート面から浸入した水分または水分と EVA が反応して発生した酢酸が直列抵抗値の増加に影響を与えていると推測される。またアルミ BS に関しては、バックシート面からの水分浸入はほぼないと考えられるため、モジュール端面から浸入した水分も P_{max} 低下に影響していると推測される。

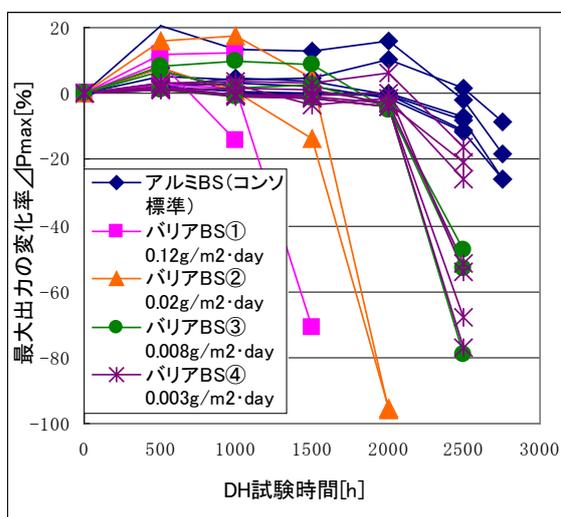


図 1 DH 試験後の最大出力の変化

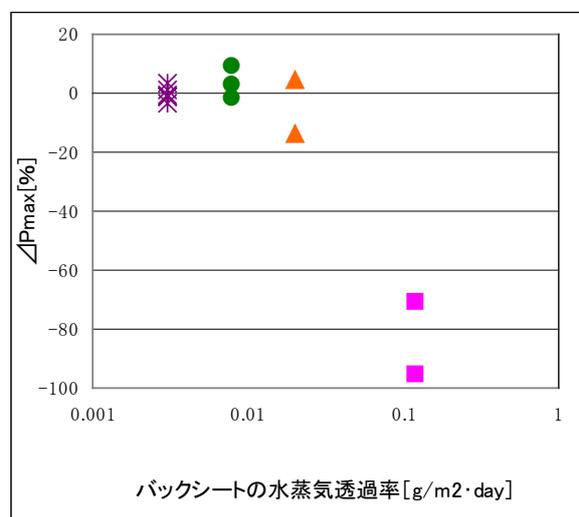


図 2 DH 試験 1500 h 後の ΔP_{max} とバックシートバリア性

III.2.2.モジュール出力低下の原因

次に水蒸気バリア性の異なるバックシートと 2 種類の封止材 (EVA、オレフィン系) を組み合わせたミニモジュールの DH 試験結果を報告する。

封止材に EVA を用いた場合、DH2500h で急激に P_{max} が低下しコンソ劣化基準を超える劣化となった (図 3)。III.2.1 と同様にバックシートの水蒸気バリア性が低いほど P_{max} の低下が大きいという傾向が見られた。I-V 特性を見ても、直列抵抗の増加により曲線因子が低下している。一方で、オレフィン系封止材を用いた場合は、バックシートの水蒸気バリア性によらず P_{max} の低下が小さいことが確認された (図 4)。今回使用したオレフィン系封止材の特徴としては、加水分解により酢酸が発生しないこと、また EVA に比べて水蒸気透過率が小さいことなどが挙げられる。前者が有効だとすれば、バックシート面あるいはモジュール端面から浸入した水分だけでは P_{max} の低下は起こら

ず、水分と反応して発生した酢酸の影響により P_{max} が低下したことが推測される。またオレフィン系の水蒸気透過率が小さいことが有効だとすれば、水分のみで P_{max} が低下したとしても、その時間を長引かせることができると考えられる。実際には両方の効果である可能性もあり、よりバリア性が低い（水蒸気透過率が数 $g/m^2 \cdot day$ 程度）バックシートを用いてモジュールを作製し、水分のみでも P_{max} 低下に影響するのか検証を行っているところである。

また、 P_{max} が低下したモジュールは直列抵抗が増加していることと、モジュールの構成がスーパーストレート型であることを考慮すると、裏面電極の腐食などがおこっている可能性が考えられるが、破壊分析が必要となるため確認はできていない。

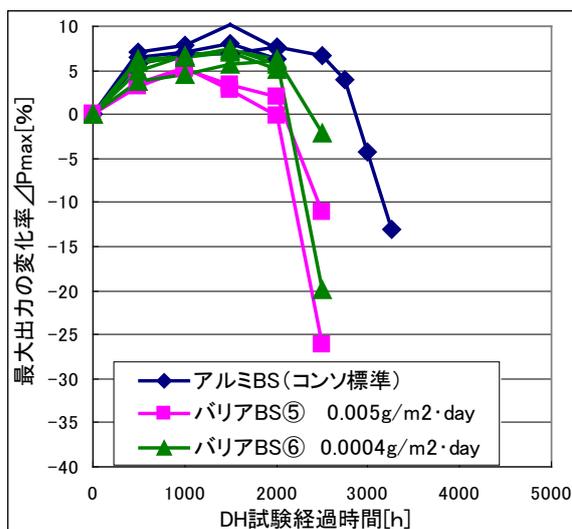


図3 DH試験後の最大出力の変化
(封止材：EVA)

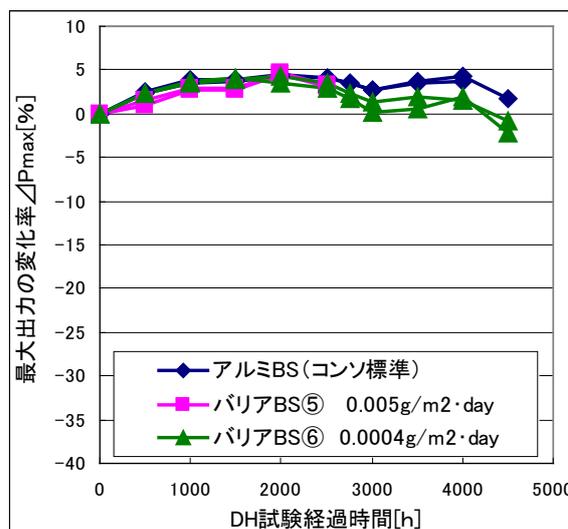


図4 DH試験後の最大出力の変化
(封止材：オレフィン系)

IV. まとめ

バリア性の異なるバックシートとコンソ標準部材を用いて作製したミニモジュールは、バックシートの水蒸気バリア性が低くなるほど DH 試験後の出力低下が大きくなる傾向となった。DH3000h 以降出力を維持したバリア BS はなく、アルミ BS でさえも DH3000h を超えて急激に出力低下している。このことから、出力低下を抑えるためには、バックシートだけでは不十分である可能性があり、モジュール端面のシール性を向上させることなども併せて検討する必要があると思われる。

また、封止材にオレフィン系を用いることで出力低下を抑えられることも、本研究から明らかになった。オレフィン系封止材を用いたモジュールは、バックシートのバリア性によらず DH 試験後の出力低下が起こっておらず、出力低下の直接的な原因は水分ではなく酢酸であるという可能性が示唆された。

しかしながら、モジュールの屋外曝露時の寿命と加速劣化試験との関係には未だ不明なところが多く、薄膜シリコン太陽電池モジュールに必要なバリア性を明確にするまでには至っていない。

「はんだ代替導電フィルムによるタブ線の低温接続技術～セルの反り解析からの接続最適化～」

日立化成株式会社

I. 目的

結晶系の太陽電池の低コスト化を実現するためには、発電効率向上、製造コスト削減及び信頼性向上が必須とされる。セルの薄化に伴い、従来のはんだ接続ではタブ線接続時の熱応力がセル割れ等の要因となり、製造歩留まり低下が懸念されている。そこで、低応力かつ安定した導電接続を可能にするはんだ代替部材の開発を目的に、低温接続可能な導電フィルムの適用を検討した。

II. 研究開発目標

本研究では、結晶系太陽電池セルに対する CF 接続を検討し、IEC 規格以上の長期信頼性をクリアする導電フィルム接続モジュールの開発を目標としている。

III. 研究開発の成果

III.1 導電フィルム (CF) を用いた接続プロセス

導電フィルム (以降 CF と呼ぶ) とは熱硬化性の接着フィルム内部に Ni 等の導電性粒子を分散させたもので、均一な厚さのフィルム形体となっており、接着後に導電性が付与される。図 1 に CF を用いた太陽電池セルに対するタブ線接続プロセスを示す。相互の電気的接続は、CF をバスバー電極部へ設置し、タブ線を供給して 180 °C 以下の低温で熱圧着することで達成される。はんだ接続に見られるフラックス残渣による周辺部汚染やはんだの濡れ不良など、信頼性に関わる初期不具合を起こすことがなく、かつ低温接続が可能であるので、今後の薄型セルへの低応力接続部材として有効であると考えられる。また、CF は導電性と接着性を併せ持つことから、バスバー電極以外へ接続も容易となる。

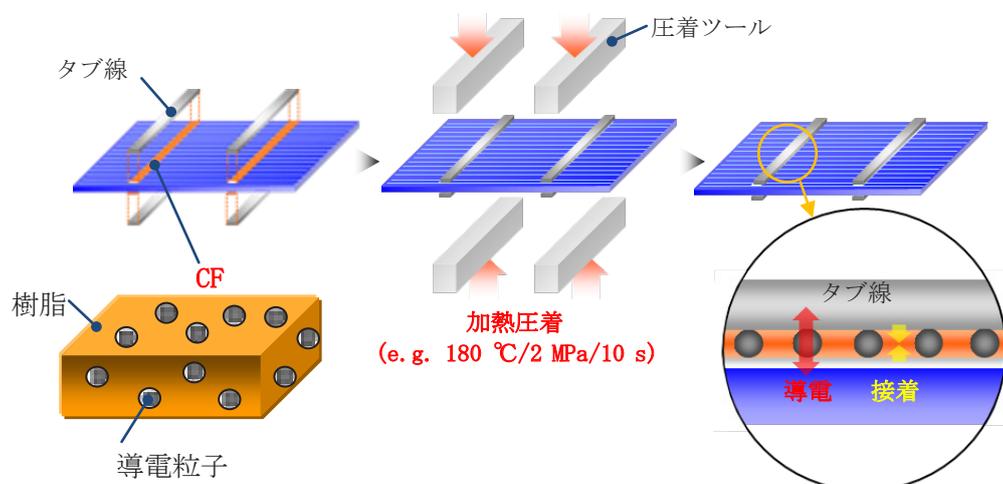


図 1 導電フィルム (CF) による太陽電池セルのタブ線接続

III. 2 セルの温度に対する反り解析

CF 接続においては、導電性と接着性を併せ持つことから、バスバー電極パターンに関わらずに、SiNx 面や Al 電極面にも接着・接続することが可能である。そこで、集電効率に有利に働くことを予想し、図 2 のようにセルの表裏ともに、セルの端から端までタブ線を接続した。しかしながら、この場合では通電を伴う温度サイクル試験 200 サイクル後にタブ線下のセル端に割れが生じた (図 3)。

太陽電池セルの構造は、図 4 に示すように表裏非対称構造で、裏面は Al 電極が全面に印刷・焼成されているために、元々受光面に凸の反りが見られる。本研究で用いたセル (Q6LTT3-180, Q-Cells) について、反りの温度に対する変化を図 5 に示す。温度の上昇とともにセルの反りは変化し、70~90 °C で反りの向きは反転する。通電を伴うことによる温度上昇の加速に加えて、セル反りの変化はタブ線を接続した後のセルにおいても同様の挙動を示すため、セルや接続部にかかる応力の向きは複雑になっており、特にセルの端部ではその応力が大きいため、セルの割れの原因になっていると推察した。

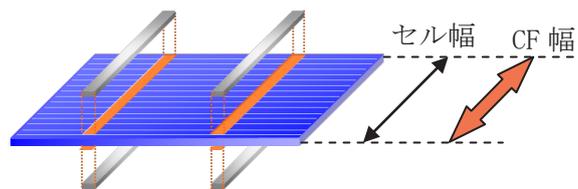


図 2 CF 接続長さ

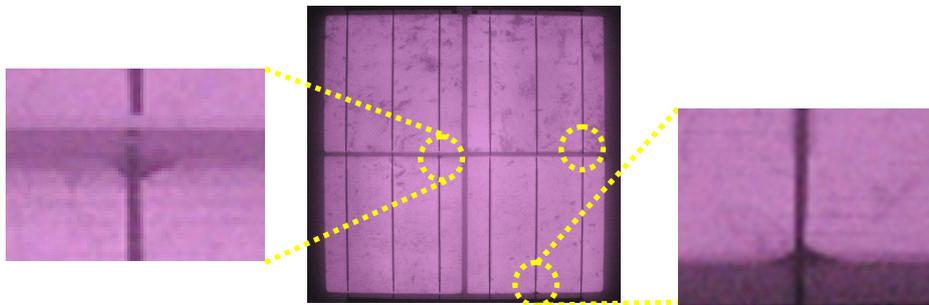


図 3 EL 画像

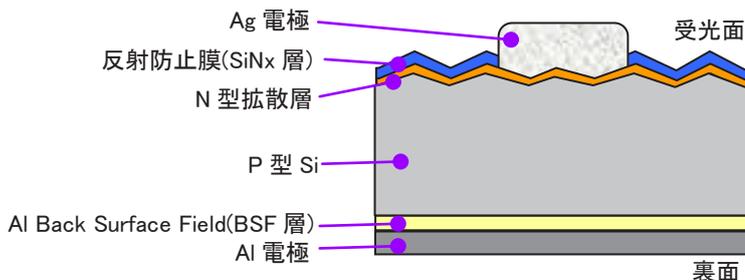


図 4 太陽電池セルの構造の概略図

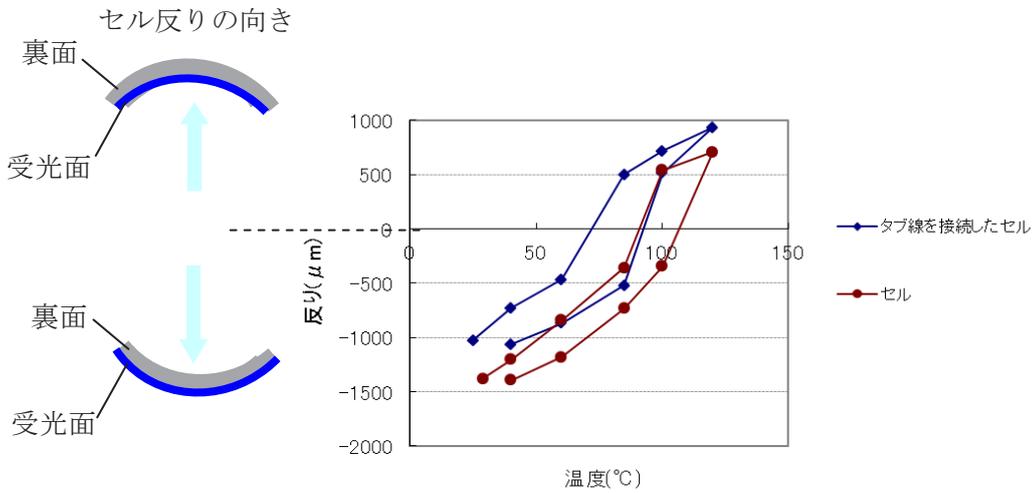


図5 セルの反り変化

III. 3 接続最適化

そこで、セルの端への応力を緩和するため、図6に示すように、セル端部にCFを設置しない部分（非接続部）を設け、CF接続長さを最適化した。非接続部は0 mm、5 mm、10 mm及び15 mmと設定してタブ線を接続し、それぞれ4セルモジュールを作製した。これらのモジュールについて、IEC規格（IEC61215）に準じた温度サイクル（TC）試験を実施し、I-V特性変動を調べた。TC試験は、-40 °Cから85 °Cの温度サイクル中に、モジュール温度が25 °Cを超えるとときに最大出力電流（ I_{pm} ）相当の電流（8.1 A）を通电した。図7に、TC試験による初期特性を1としたときの最大出力（ P_{max} ）の変化を示す。非接続が0 mm、5 mm、及び10 mmではTC400サイクル後に P_{max} が低下したが、非接続15 mmでは初期からの変化はほとんどなかった。また非接続15 mmのTC試験400サイクル後のEL画像ではセル割れはなく、初期と比較して変化は見られなかった（図8）。非接続部を0 mm及び15 mm設けた市販サイズモジュールの初期特性については、表1に示すように同等であり、非接続部15 mmの場合も特性への影響はなく、EL画像も良好であった。

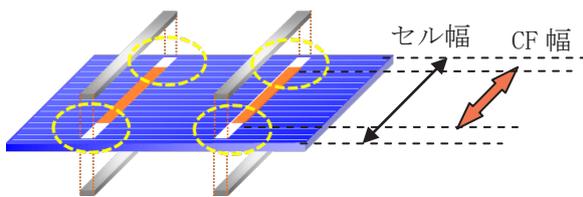


図6 非接続部を設けたCF接続

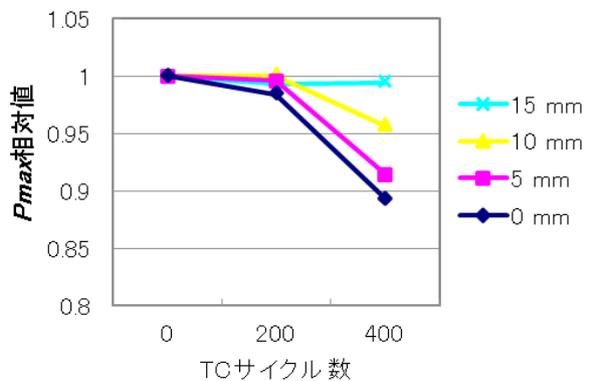


図7 非接続部の長さ
とTC試験時の特性変化

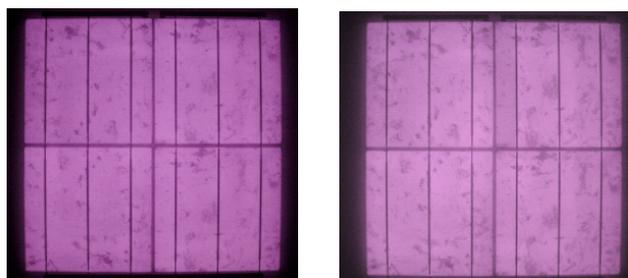
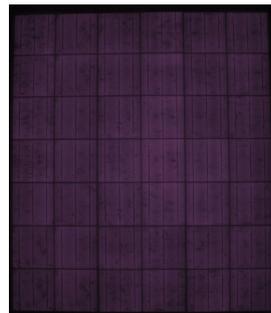


図 8：非接続 15 mm の 4 セルモジュール EL 画像 (左)初期 (右) TC400 サイクル後

表 1 市販サイズモジュールの初期特性

非接続部の長さ	15 mm	0 mm
短絡電流 (I_{sc})	8.68	8.74
開放電圧 (V_{oc})	25.9	25.8
最大電力 (P_{max})	170.1	170.2
FF	0.76	0.76
EL 画像		

IV. まとめ

本研究ではセルの反り挙動を解析し、CF 接続の最適化を行った。その結果、セル端部に非接続部分を設けることによって、TC400 サイクルで初期からの変化はほとんどなく、IEC 規格以上の信頼性を得た。非接続部を設けた場合の初期特性は、非接続部を設けない場合と同等であった。このことから、セル端部に非接続部を設けることによって、信頼性良好なモジュールを作製できることが分かった。

セルの反り挙動は Si 厚さ、Ag 電極及び Al 電極の厚み、及びそれらの物理物性などによって異なる。また、セル反りの信頼性への影響は、タブ線、封止材及びバックシートなどのモジュール部材の物性とも相関性を持つと考えられ、これらについて引き続き解析していく予定である。

「結晶シリコン太陽電池のバックシートによる発電量への影響について」

富士フイルム株式会社

I. 目的

結晶シリコン太陽電池（以下 c-Si）の発電量に影響するバックシート（以下 BS）の特性として「水蒸気透過性」、「反射率」が知られている¹⁾。しかし、これまで行われた実験は比較する BS の素材や接着剤など複数の要因が重なっており、「水蒸気透過性」や「反射率」を単純に評価できる系ではないケースが多かった。そのため、本研究の目的は、単純な系で上記を明らかにすることである。

II. 研究開発目標

本研究では、c-Si の発電量に対する、BS の「水蒸気透過性」と「反射率」の影響を、単純な系で明らかにする。

具体的には、「水蒸気透過性」や「反射率」の異なる BS は構成を統一して作製し、産総研 PV コンソーシアムのインフラを活用して c-Si モジュールにこれらを組み込み、初期/湿熱経時^{*}後のモジュール性能の評価を行う。

^{*}IEC の定めるモジュール認証用試験（Damp Heat 試験：DH 試験）の条件 85°C/85%RH

III. 研究開発の成果

1. 発電量に対する BS の水蒸気透過性の影響について

1-1 実験

a) 各モジュール

単セルモジュールを表 1 に記載の部材及び条件にて作製した。なお、アルミフレームについては、単セル・結晶系用を用い、配線は標準的な引出し方法に従い、エッジ部より取り出した。絶縁性を確保する為、カプトンテープをアルミフレームと配線との間に貼り付けた。アルミフレームの封止は、側面からの水蒸気浸入の影響をなくするため、ブチルゴムを用いた。

表1 モジュール作製条件

セル	Qセルズ社156mm角 3本バスバー（標準部材）
ガラス	AGC社 180mm角 白板半強化ガラス（標準部材）
封止剤	サンピック社 EVA (Fast Cure Type)（標準部材）
ラミネート	PVコンソーシアム標準条件

b) BS

表 2 に記載の BS (計 4 種) を作製した。接着剤等の劣化の影響を排除する為、他部材を貼り合さず、水蒸気透過性を変えた PET フィルム単体を BS として使用した。

表2 BSの内容と水蒸気透過性

水準名	水準内容		初期水蒸気透過性 ($g/m^2 \cdot d$)
TPTタイプ	産総研PVコンソーシアム標準品 (Control) Al箔なし	—	2 (公表値)
FF-04-BS	当社PET上に蒸着膜の厚みのみ を変えて成膜したフィルム	接着剤無し	3
FF-05-BS		接着剤無し	0.1
FF-06-BS		接着剤無し	0.09

c) DH 試験

恒温恒湿試験機（ESPEC 製）を使用して DH 試験を行った。取出しは 1000 時間ごとに行い、4000 時間まで試験を行った。

d) モジュール特性評価方法

モジュール特性として、最大電力（以下 Pmax）と EL 画像を評価した。Pmax はソーラーシミュレータ（SPI-SUN SIMULATOR 1116N）を、EL 画像はエレクトロルミネッセンス測定装置（PVX100）を用いた。

1-2. 結果

図 1 に DH 試験後のモジュール性能を示す。Pmax を測定し、初期値との相対値として示した。また、図 2 に EL 画像を示す。Control として用いた TPT タイプでは DH4000 時間で大きな出力低下が見られた。一方、FF-04～FF-06 は水蒸気透過性によらず、大きな出力低下は見られなかった。EL 画像についても、DH4000 時間後に TPT タイプは端部から輝度が低下しているのに対し、FF-04～FF-06 は何れも輝度の低下が見られなかった。

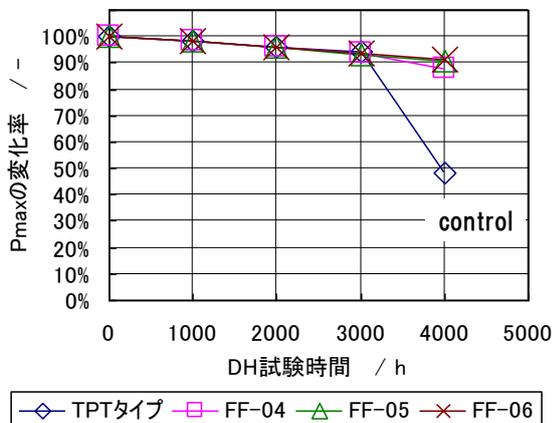


図1 DH試験による発電量の変化

これより、c-Si モジュールにおいて、BS の水蒸気透過性は、0.09～3g/m²・d の範囲で、Pmax の低下に寄与しないことが示された。また、出力低下した TPT タイプのモジュールでは、配線材の腐食が認められた。原因は明らかではないが、TPT タイプに用いている BS（貼り合せに使用している接着剤を含む）が水蒸気透過性以外の要因で腐食を起こしていると考えざるを得ない。

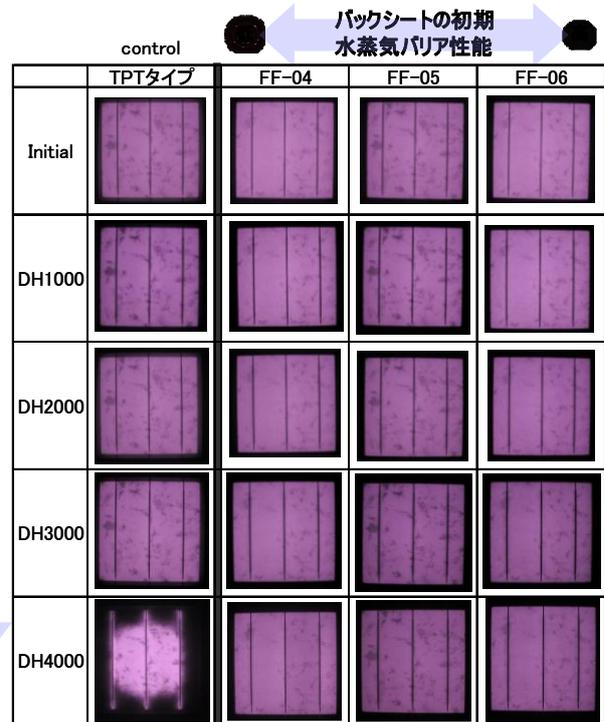


図2 EL 発光分布画像

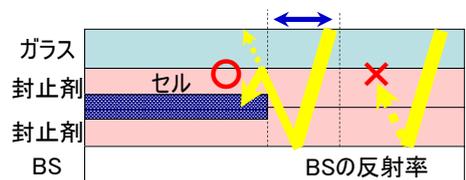


図3. BSで反射されセルに入射する光

2. 発電量に対するBSの反射率の影響について

図3のように、セルに直接入射しなかった光の一部は、BSで反射されてセルに入射する(図3中の○)。このため、BSの反射光の発電への寄与を調べた。

表3 モジュール作製条件

2-1 実験

a) 各モジュール

表3に記載の条件と表4に記載の反射率を変えたBSを用いて4セルモジュールを作製した。

セル	Qセルズ社156mm角 3本パスパー (標準部材)
ガラス	AGC社 400mm角 白板半強化ガラス (標準部材)
封止剤	サンピック社 EVA (Fast Cure Type) (標準部材)
ラミネート	PVコンソーシアム標準条件

表4 BSの特性一覧

BSに入射する光量の影響を見るために、図4に示すように、アルミ箔で被覆することで、セル周囲のBSに当たる光の範囲を変更したモジュールを作製した。

水準名	水準内容	反射率(%) @550nm
FF-07-BS	当社PET上に、白色顔料の量を変えた層を設けたフィルム	81
FF-08-BS		60
FF-09-BS		6

なお、以降は、BSに当たる光の範囲を、セル周囲のBS露出幅で、表記した。

b) モジュール特性評価方法

P_{max} はソーラーシミュレータ (SPI-SUN SIMULATOR 1116N) を用いて測定した。

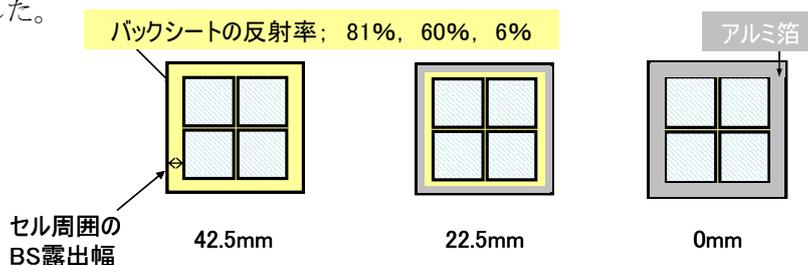


図4 セル周囲のBS露出幅を変更したモジュールの作成方法

2-2 結果

2-2-1 BSに入射する光量の影響について

図5にセル周囲のBS露出幅を変更したモジュールの発電性能を示す。BSの反射率が6%、セル周囲のBS露出幅が0mm時の P_{max} 値を基準とし、相対値で示した。セル周囲のBS露出幅が大きくなると、 P_{max} 相対値が増加し、40mm前後を越えると発電量は、ほぼ一定となった。

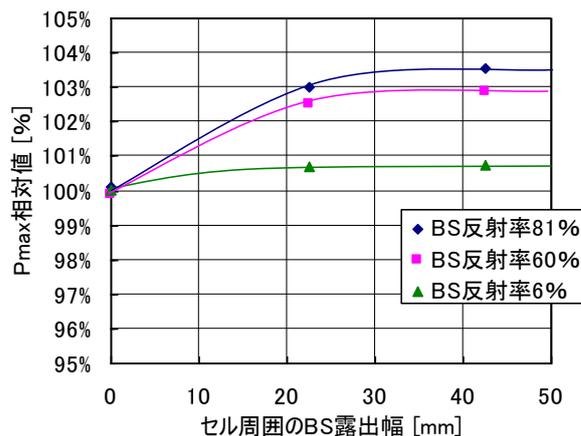


図5 セル周囲のBS露出幅と P_{max} の関係

2-2-2 BSの反射率の影響について

図5のデータをBSの反射率と P_{max} 相対値の関係で示した(図6)。BSの反射率と P_{max} 相対値は一次の相関が認められた。反射光を最も発電に使える条件(セル周囲のBS露出幅が40mm前後以上)において、BSの反射率が0%と100%の場合とで、 P_{max} 相対値

は約 4%の差であった。また、セル周囲の BS 露出幅が 0mm では BS の反射率の影響が小さい。これはセル間が 2~3mm と狭いため、BS からの反射光が垂直に近くなり、セル表面に入射できないことを示唆している。

2-2-3 市販の c-Si モジュールにおける BS の反射率の影響について

市場に流通する c-Si モジュールのセル-セル間やセル外周の面積はモジュール全体の 10%以下であり（例：産総研 Full サイズモジュールは 10%）、今回の評価系で定義したセル周囲の BS 露出幅は 0~7.5mm に相当する。これを基に図 5 と図 6 のデータから算出した BS の反射率と Pmax 相対値の関係を図 7 に示した。仮に、極端な反射率 0%と 100%の BS で比較しても、Pmax 相対値の差は 1.5%であり、発電効率 15%のモジュールと仮定すると、発電効率で 0.2%分にとどまる。

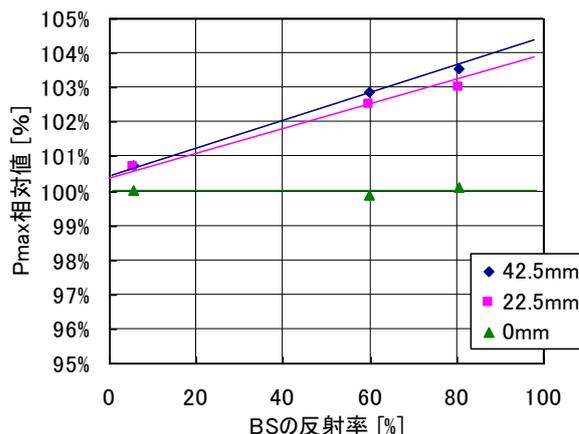


図6 BSの反射率とPmax相対値の関係

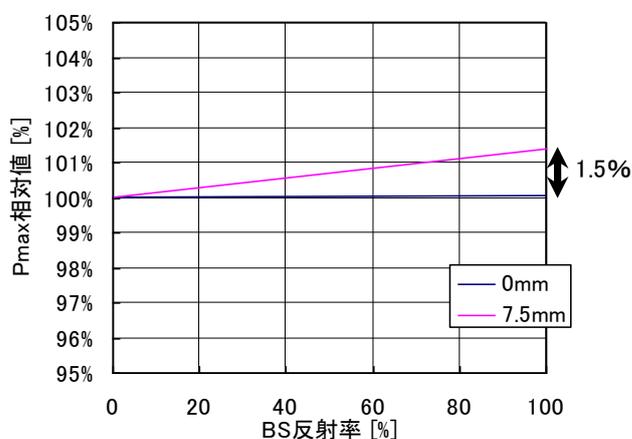


図7 市販のモジュールで予測されるセル周囲の BS露出幅におけるBSの反射率とPmaxの関係

IV. まとめ

BS の「水蒸気透過性」や「反射率」を BS の構成を統一した単純系で評価を行い、下記のことを明らかにした。

1. 水蒸気透過性

- BS の水蒸気透過性が 0.09~3g/m²・d の範囲において、DH4000 時間までは Pmax の変化と水蒸気透過性との関係は見られなかった。

2. 反射率

- 市販のモジュール形態において、極端な反射率 0%と 100%の BS を用いた場合でも、発電効率 15%のモジュールと仮定すると、0.2%分にとどまることが示された。

参考文献 1) 第 I 期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム成果報告書。

「当社開発封止材ハイミラン®ES を使用したモジュールの実証試験」

三井・テュポノボリケミカル株式会社

I. 目的

太陽電池封止材はセルの保護と同時に透明性や耐電圧性、長期耐久性が必要とされ、更にコスト低減の為に材料の汎用性とモジュールの生産効率が問題となる。当社は自社開発封止材ハイミラン®ES を使用し、実際に太陽電池モジュールの長期耐久性を確認して市場からの要望が強い長寿命化への展望を得られるどうか、また発電効率の向上に寄与する封止材を開発する目的で本コンソーシアムに参加した。第Ⅱ期では、一般的な Al フレームを用い封止材に EVA を使用した標準モジュールとの比較に加え、フレームの無い合わせガラス構成における調査、さらには裏面に白色封止材を用いたモジュールの発電への影響調査も行ったため報告する。

II. 研究開発目標

- ・当社封止材ハイミラン®ES の性能確認
- ・成形条件の最適化(モジュールのラミネート条件)：セル割れ無し、残留気泡無し
- ・加速試験の実施：DH 試験, TC 試験(通電有無), HF 試験
- ・シール, フレーム無しでの性能影響確認
- ・バックシートの影響差 確認(水蒸気透過性の差, Al 層有無, ガラス使用)
- ・封止材の透明性, 光透過性が発電性能に及ぼす影響確認
- ・開発品の評価

III. 研究開発の成果

<(1)長期耐久試験：c-Si 4セル系モジュール シール剤有り、フレーム有り>

提供標準部材の内、封止材「ファーストキュア EVA」のみ当社品ハイミラン®ES に置き換えた c-Si 4セル系標準モジュールを作製し長期試験(ダンプヒート、サーマルサイクル、結露凍結)を実施。バスバー配線本数、インターコネクター、Box 等 若干の差がある中での比較。耐久試験における性能維持の用途は Pmax. 低下率 < 5%とした。

[試験モジュールの構成概略]

白板半強化ガラス / 封止材 / c-Si 4セル(156mm 角)×4 / 封止材 / TPT
シリコンシール/Al フレーム有り
封止材：ファーストキュア EVA(比較品), 当社封止材①

【加速試験の実施：DH試験、TC試験(通電有無)、HF試験】

(c-Si 4セル系 ダンプヒート試験) 表1, 図1

封止材にファーストキュアEVAを用いたモジュールではAIST作製品、当社作製品共に発電効率が低下した。それに比べ、当社封止材①モジュールはDH4000時間時点でPmax.低下率5%以内を維持していることを確認した。

表1. ①モジュールのDH試験

	Pmax / W
初期	14.76
DH1000	14.93
DH2000	14.65
DH3000	14.47
DH4000	14.42
変化率/%*	-2.30

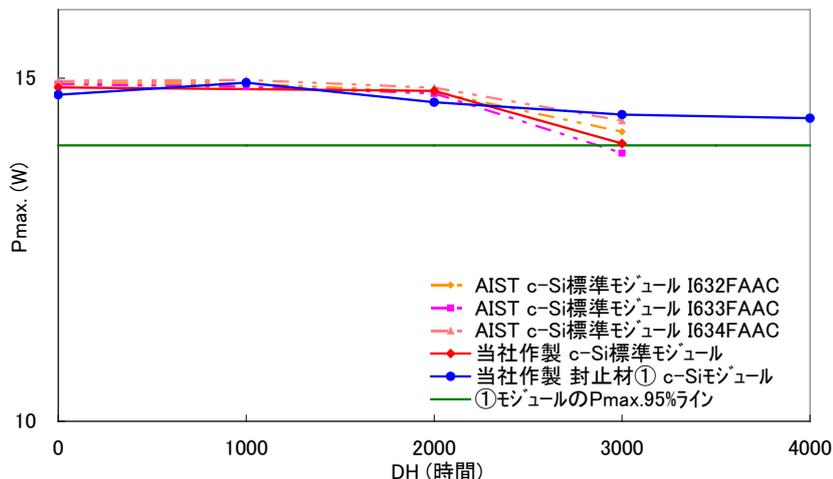


図1. DH試験の影響(Pmax.)

(c-Si 4セル系 サーマルサイクル(TC) / 結露凍結(HF) 試験) 表2, 図2

表2, 図2に示すように通電無しではTC50/HF10, TC400時点でPmax.低下率は5%以内の維持が確認された。また、通電(初期Ipm 8.04A)有りでも600サイクルまでPmax.低下率5%以内の性能維持が確認された。

表2. ①モジュールのTC/HF試験

	Pmax / W
初期	14.59
TC50/HF10	14.77
TC250	14.43
TC450	14.47
変化率/%*	-0.82

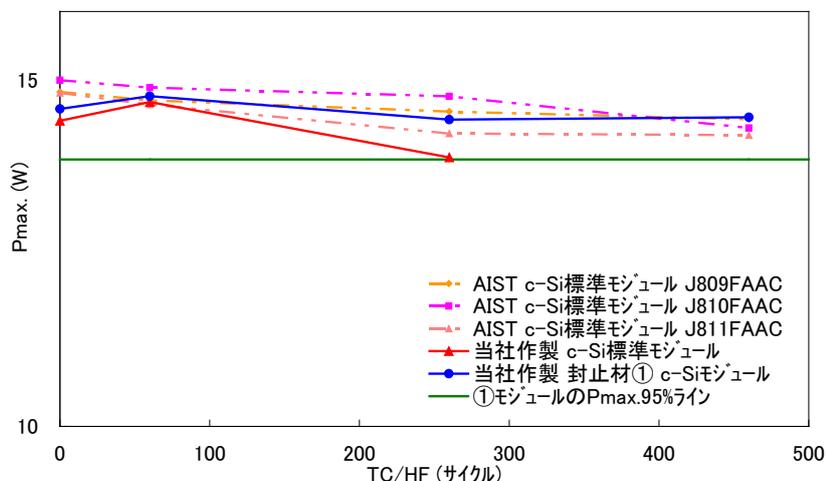


図2. TC/HF試験の影響(Pmax.)

<(2)長期耐久試験：c-Si 1セル系モジュール 合わせガラス構成 シール剤無し、フレーム無し>

提供標準部材の内、封止材「ファーストキアEVA」のみ当社品ハイミラン®ESに置き換えたc-Si 1セル系合わせガラス構成のモジュールを作製し、長期試験(ダンプヒート、120°C加熱試験)を実施。シール剤、Alフレームの無い構成における発電効率の変化を調査。さらに120°Cで長期加熱試験によりホットスポットの影響を調査。耐久試験における性能維持の目途はPmax.低下率<5%とした。図3にDH試験10000時間の結果を示す。

[試験モジュールの構成概略]

白板半強化ガラス / 封止材 / c-Siセル(156mm角) / 封止材 / 白板半強化ガラス
 シリコンシール/Alフレーム無し
 封止材：当社封止材② (開発品)

【加速試験の実施：DH試験、120°C加熱試験】

(c-Si 1セル系 ダンプヒート試験) 表3, 図3

表3、図3に示すようにシール剤、Alフレームの無い合わせガラス構成のモジュールにおいて、当社封止材②モジュールはDH10000時間時点でPmax.の低下率5%以内を維持していることを確認した。また、120°C加熱を継続した試験においても、当社封止材②モジュールでは加熱2000時間後のPmax.の低下率は5%以内であり、性能劣化がみられなかった。

表3. ②モジュールのDH試験

	Pmax / W
	DH
初期	3.515
DH500	3.760
DH1000	3.600
DH5000	3.605
DH10000	3.565
変化率/%*	1.42

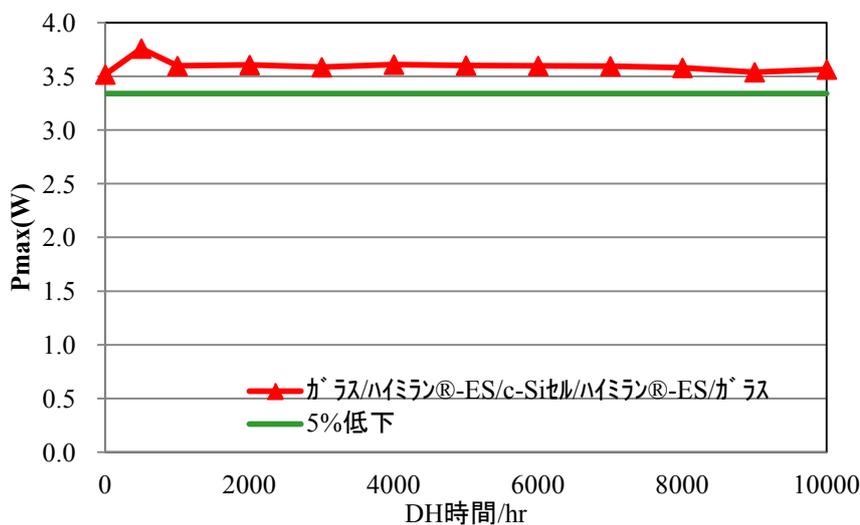


図3. DH試験の影響(Pmax.)

$$* \text{変化率}/\% = \frac{\text{Pmax. (耐久試験後最終値)} - \text{Pmax. (初期)}}{\text{Pmax. (初期)}} \times 100$$

<(3)白色封止材の発電への寄与：c-Si 1セル系モジュール シール剤無し、フレーム無し>

[試験モジュールの構成概略]

白板半強化ガラス / 表面封止材 / c-Si 1セル(156mm 角) / 裏面封止材 / TPT

表面封止材：当社開発 透明封止材③

裏面封止材：当社開発 透明封止材③(比較品)

当社開発 白色封止材④

【初期発電効率の測定】

(c-Si 1セル系 シール材、フレーム無) 表 4, 図 4

上記ガラスバックシート構成にて裏面封止材に白色品④を使用し、裏面に透明品③を使用した場合との初期発電効率の比較を行った。裏面白色封止材モジュールは、透明封止材使用モジュールに比べ Pmax で約 2.3%の向上がみられた。透明封止材構成においてもバックシートは白色の TPT を用いているが、封止材を白色化したほうが発電効率向上に対する貢献度が高いことがわかった。

表 4. 白色封止材の効果

表面封止材	高透明封止材	
裏面封止材	高透明封止材	白色封止材
Pmax/W	3.794	3.880
FF	0.705	0.717
Isc	8.645	8.695
Voc	0.6229	0.6225
Pmax 増加率/%		2.27

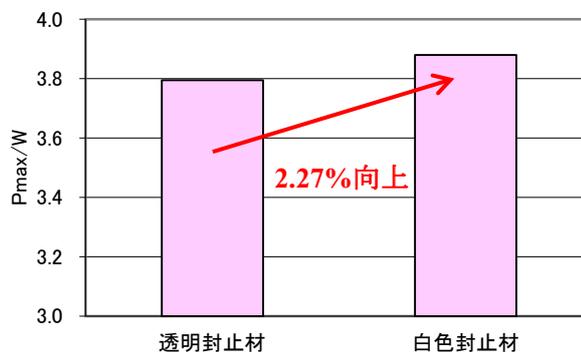


図4.白色封止材の効果(Pmax.)

IV. まとめ

当社封止材①を用いた c-Si モジュールでは DH4000 時間, TC50/HF10+TC400, TC(通電)600 を経過しても、Pmax 低下率は 5%以内に維持された。また、フレームを使用していない合わせガラス構成においても DH10000 時間、あるいは 120℃加熱試験 2000 時間後の Pmax 低下率は 5%以内であり、c-Si 系モジュールに対する実用性が十分にあるとの裏付けが得られた。さらに裏面に白色封止材④を使用したモジュールについては、裏面が透明封止材③のものより Pmax の向上が見い出され、封止材を白色化することによる発電効率への貢献の可能性が示唆された。

I. 目的

太陽電池市場の主流を占めている結晶シリコン系モジュールは、面積当たりの発電効率が比較的高いという利点があるが、車両や耐加重制限のある建築物においては、より軽量なモジュールが求められると考えられる。そこで、我々は、モジュール重量の約半分を占めるトップシートのガラスをアクリル樹脂に置き換えることで、結晶シリコン系モジュールの軽量化を目指した。

本検討では、アクリル樹脂製のトップシートを用いた太陽電池モジュールの信頼性について、種々の耐久試験特性を確認した（TC50/HF10、DH1000、TC200 および火災試験）。また、カバーガラスから封止層へのイオン性物質の拡散が原因の一つと考えられている PID 現象に対して、アクリル製トップシートの採用による抑制の効果を期待して高電圧印加試験を実施した。

これらの試験より、アクリル樹脂材料の太陽電池モジュールへの適用可能性の確認を目的とした。

II. 研究開発目標

トップシートとしてアクリル樹脂材料を用いた結晶シリコン系太陽電池モジュールの高信頼性の実証を目標とした。目標性能は、以下のとおりとした。

- ①TC50/HF10、DH1000、TC200 試験後の外観変化なし、Pmax 保持率 95%以上
- ②火災試験 C クラス合格
- ③耐 PID 特性の確認

III. 研究開発の成果

【検討内容】

a. 太陽電池モジュールの作製

表 1 の組み合わせで 4 セルミニモジュール（サイズ 400mm×400mm）、単セルモジュール（サイズ 180mm×180mm）を作製した。ラミネートは 135℃で実施し、標準ガラスモジュール（構成 A）については真空引き／急速プレス@1 気圧／プレス保持を 5 分／1 分／15 分で、樹脂モジュール（構成 B、C）は 10 分／1 分／15 分で実施した。

アクリル樹脂材料として、アクリルシート“アクリライト L”、およびアクリルフィルム“アクリプレ HBS006”（いずれも三菱レイヨン製）を用いた。図 1 にモジュールの部材構成の模式図を示した。

表 1. 太陽電池モジュールの部材構成※

構成	種類	トップシート	バックシート
A	標準 (ガラス)	白板強化ガラス 3.2mmt	TPT 0.3mmt
B	アクリルシート	アクリライト L 1.5mmt (三菱レイヨン)	アクリライト L 1.5mmt (三菱レイヨン)
C	アクリルフィルム	アクリプレん HBS006 0.125mmt (三菱レイヨン)	ガラスエポキシ板 1.6mmt

※セルと EVA については共通の仕様

セル：多結晶セル (6 インチ 200 μ mt、Q セルズ製)

EVA：ファストキュアタイプ (450 μ mt)

構成A



構成B



構成C



図 1. 太陽電池モジュールの部材構成

b. 試験項目および内容

①TC50/HF10、DH1000、TC200 試験

4セルミニモジュール B および C を用いて IEC61215 に基づく温湿度プロファイルにて自社で試験を実施した。試験前後にソーラーシミュレーターでの電流電圧特性評価および EL 像の測定を実施した。

②火災試験

表1のアクリルフィルムモジュール C と同一の構成で 6×7直モジュール (1166×986mm) を作製し、IEC61730-2 に基づく火災伝搬試験 (モジュール 4 枚使用。総寸法 1166×3944mm)、および飛び火試験を実施した。試験は、第三者試験機関で実施した。

③耐 PID 試験 (高温下電圧印加試験)

図 2 に示すように、単セルモジュール A、B、C の光入射面にアルミ板を設置し、モジュール電極との間に -1000 V のバイアス電圧をかけて 85 °C 条件下に設置した (2 時間、24 時間、48 時間)。

試験前後の電流電圧特性評価および EL 像を測定した。

また、同様に試験したモジュール A および C を分解し、セル表面を ToF-SIMS で分析した。



図 2. 耐 PID 試験

【結果】

①TC50/HF10、DH1000、TC200 試験

モジュール B は TC 試験の初期の数サイクルの段階で反りが生じ、TC50/HF10 試験後にはモジュール全体が大きく歪み、タブ配線の歪みとセルの割れが目視で確認された。TC50/HF10 試験においては、温度の昇降に伴ってアクリルシートが熱膨張、収縮を繰り返すため、セルや配線材などの部材にダメージを与えてしまう。そこで、この部材構成で 25℃ から 85℃ に昇温した場合のモジュールのセルにかかる応力を各部材の物性よりシミュレーションし、標準的な構成のモジュール A と比較した（1セル分の領域を想定して計算）。その結果、セル 1 枚にかかる最大主応力は、構成 A が 48MPa に対し、構成 B は 299MPa と相対的に大きな力がかかっていることが明らかとなった。一方、アクリルフィルムを用いた構成 C においては樹脂部材の厚みが薄くなっていることから、最大応力値が 66MPa に低減していることが示された。

構成 C の 4セルモジュールについて TC50/HF10 試験を実施したところ、外観および EL に変化はなく、電流電圧特性の変化量も基準値以内となり（表 2）、シミュレーションの結果と対応するものとなった。同様に TC200 試験、DH1000 試験についても試験前後で外観、EL 像の変化はなく、電流電圧特性も基準値以内であった（表 2）。

表 2. モジュール C の耐久性試験後の外観および電流電圧特性

	試験後の 外観	試験後の電流電圧特性（試験前との相対値で表記）					
		Pm	Isc	Voc	Rs	FF	Eff
TC50/HF10	変化なし	0.979	0.991	0.996	1.020	0.991	0.979
DH1000	変化なし	0.985	0.981	0.999	1.020	1.005	0.985
TC200	変化なし	0.989	0.992	0.997	0.995	0.999	0.989

②火災試験

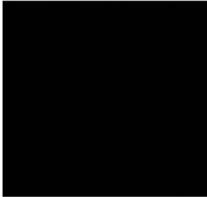
火炎伝搬試験、飛び火試験ともクラス C の試験に合格することが示された。これは、裏面側に剛性が高く、無機材を含むガラスエポキシ板を配したことで延焼が抑制され、また、モジュールを貫通するような欠陥が生じなかったためと考えられる。

③PID 試験

試験条件の妥当性を確認するために標準的な構成の A モジュールを用いて 2 時間実施したところ、最大発電量 Pm は、試験前の 4% 以下の値まで大幅に低下し、EL 像はセル全面に渡って暗転した。さらに、24 時間試験では Pm が試験前の 1% 以下となっていた。同様の試験をアクリル樹脂を用いたモジュール構成 B、C で実施したところ、24 時間試験時でも発電特性の変化がほとんど観測されなかった。表 3 に PID 試験前後の EL 像、発電特性の変化を示す（試験前の数値の相対値を表記）。さらに、アクリル樹脂モジュール B、C に

については、試験時間を 48 時間に延長しても共に発電特性、EL 像の変化がみられなかった。以上より、アクリルモジュールは PID 現象が起こりにくい構成であることが確認できた。

表 3. PID 試験前後の EL 像および発電特性の変化（試験前との相対値で表記）

構成	試験前	24hr後		48hr後	
A ガラス			Isc 0.488 Voc 0.048 FF 0.329 Pm 0.006	no data	
B アクリルシート			Isc 0.995 Voc 0.999 FF 1.000 Pm 0.993		Isc 0.997 Voc 1.003 FF 1.001 Pm 1.001
C アクリルフィルム			Isc 0.996 Voc 0.999 FF 1.000 Pm 0.995		Isc 0.999 Voc 1.001 FF 1.000 Pm 1.000

電圧印加試験後のセル上の Na 濃度に違いがあるかを確認するため、試験前後のモジュールを分解し、セル表面を ToF-SIMS で解析した（一次イオンとして Bi_3^{++} を用い、正イオン収集）。構成 A では試験前後で Na^+ イオンが約 6 倍に増加し、さらに、 Na_2OH^+ が 10 倍、 Na_3CO_3^+ が 70 倍の増加が確認された。これらの結果より、ガラスを用いた構成 A では電圧印加試験によってセル表面の Na に関連するイオン種の濃度が高くなっていることがわかった。

これに対して、アクリルフィルムモジュール C では、電圧印加試験前後でこれらのイオン種の濃度に殆ど変化がなく、PID が発生しない事象と対応するものとなった。

IV. まとめ

アクリルフィルムを用いた太陽電池モジュールは、一般的な構成の結晶シリコンモジュールの約半分の重量を達成するとともに、TC50/HF10、DH1000、TC200 試験、火災試験 C クラスに合格することがわかった。さらに、アクリル樹脂を用いたモジュールは耐 PID 特性を有することが確認できた。

これらの結果より、アクリル樹脂材料は太陽電池の構成部材としての能力が十分高いことが示された。

I. 目的

バックシートに焦点を絞り、発電効率への寄与あるいは、バックシートの劣化とモジュールの出力特性低下の相関について調査する。この調査によって得られたモジュールの劣化挙動とそのメカニズムをもとに、モジュールの長期安定稼働に必要なバックシートの構成について提案することを目的とする。

II. 研究開発目標

一般的にバックシートは、いくつかのフィルムが接着剤を用いて積層されている。但し、積層に用いられている接着剤は耐湿熱評価後に接着力の低下や層間での浮き等の不具合が確認されている。そこで、我々は構成中に接着剤層を含まないバックシートを開発した。本研究においては、接着剤層を含まないバックシートを用いて、85°C85%RHの湿熱促進試験(以下、DH)、-40°Cから85°Cの温度サイクル試験(以下、TC)、-40°Cから85°C85%RHの結露凍結試験(以下、HF)を実施し、接着剤を含むバックシートとモジュールの出力特性について比較を行う。

得られた結果から最終目標としてのバックシートの構成とモジュールの出力低下因子との関係を見出す。

III. 研究開発の成果

III-1) 使用したバックシートの構成

表1 バックシートの基本構成と特性および作製モジュール

サンプル名	層構成		耐久性*1)	作製モジュール	
	(最外層側)	(封止材側)		フル	4セル
構成①	特殊コート/PET①/特殊オレフィン①		2	○	○
構成②	特殊コート/PET②/特殊オレフィン①		1	-	○
構成③	特殊コート/PET②/接着剤/特殊オレフィン②		1	○	○
TPT	PVF/接着剤/PET/接着剤/PVF		-	-	○

構成③を基準として評価し、基準：1、基準より優：2で表記

*1)：バックシートを85°C85%RH2000hに投入した際の引張伸度保持率により評価

また、モジュール作製においては、産総研標準品を用いて、結晶系フルモジュールと結晶系4セルモジュールを作製し、各種耐久試験を実施した。

III-2) フルモジュールによる評価

フルモジュールでのテストは、構成①、③にて実施した。図1にDH後の最大出力維持

率、表 2 に DH3000h 後の発電特性維持率、図 2、3 に DH 前後の EL 画像を示した。接着剤層のない構成①は DH3000h 後も 93%程度出力維持率を示したが、DH2000h と比較し僅かに低下していた。これは、直列抵抗(R_s)の増加とフィルファクター(FF)が低下していることから電極などの劣化が要因であると考えられる。また、図 2 の EL 画像から DH2000h では発生していなかったセル一部分の暗部が確認されており、出力低下の要因となったと考えられる。一方、構成中に接着剤層を含む構成③は、DH3000h 後の P_{max} 維持率に著しい低下が確認された。図 3 の EL 画像をみるとセル周辺部に暗部が確認されており、発電面積の縮小により I_{sc} が低下し、 FF も低下している結果となった。この原因は、 R_s も増加しているためセル端部のフィンガー電極の劣化によるものと考えられる。図 4 に特殊オレフィン層と基材との接着力を示したが、構成①は基材接着力が DH3000h 後も変化が無いのに対し、

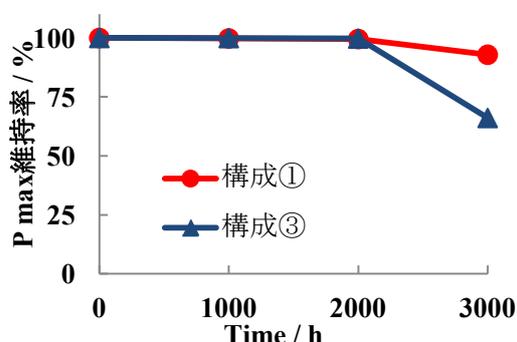


図1 DH後の P_{max} の維持率

表 2 DH3000h 後の発電特性(変化率)

	構成①	構成③
短絡電流(I_{sc})	98.9%	85.0%
開放電圧(V_{oc})	100.1%	99.8%
フィルファクター(FF)	92.7%	66.1%
直列抵抗(R_s)	140.0%	160.3%

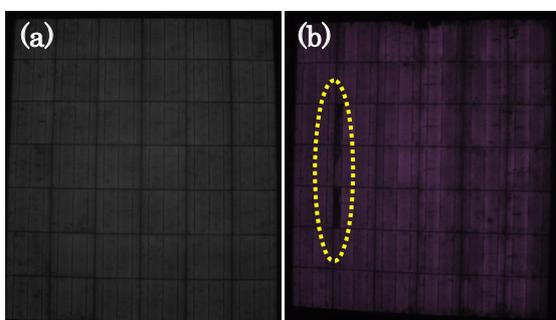


図2 構成①を用いたモジュールの DH 前後の EL 画像 (a)初期、(b) DH3000h 後

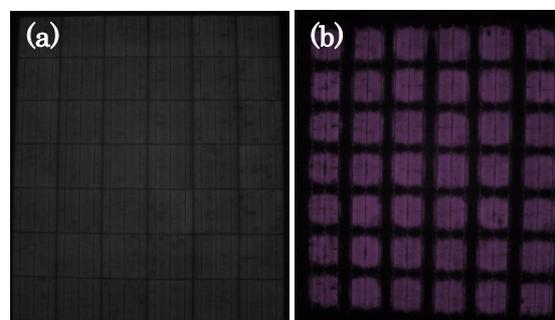


図3 構成③を用いたモジュールの DH 前後の EL 画像 (a)初期、(b) DH3000h 後

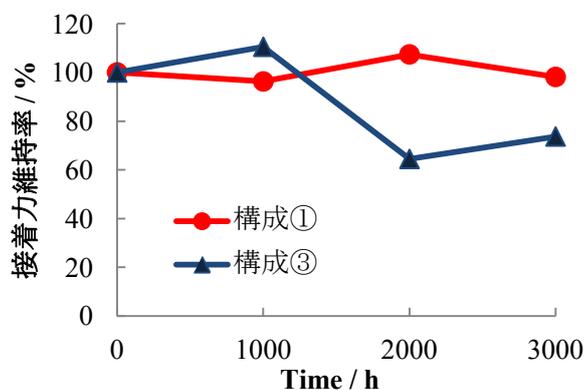


図4 DH 後の特殊オレフィン層の基材接着力

接着剤層を用いた構成③は接着剤の劣化による接着力低下が見られている。この出力低下の要因が接着剤の有無により生じたものかは現時点で不明であるため、現在原因調査を進めている。

TC および HF 試験後の Pmax 維持率と FF 維持率を図 5、6 に示した。構成①および構成③ともに TC50+HF10、TC200 試験後も Pmax、FF は 95%以上を維持していた。今回実施した TC および HF の条件では、接着剤有無による相違は確認されなかった。

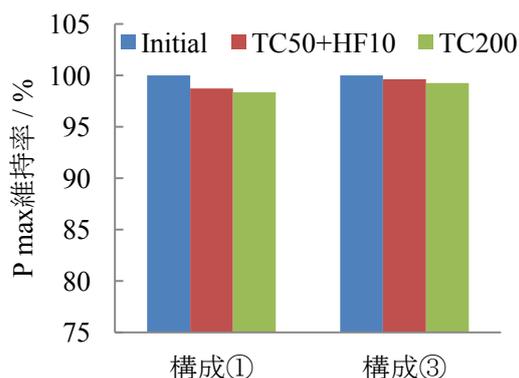


図 5 TC/HF および TC200 後の Pmax 維持率

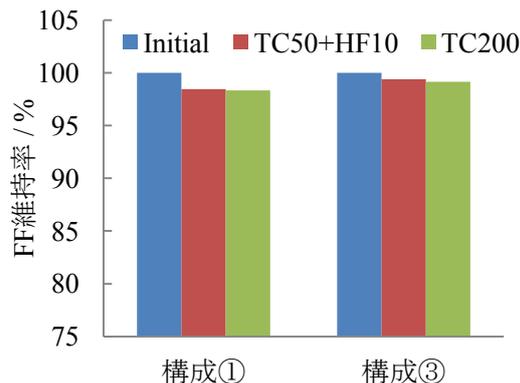


図 6 TC/HF および TC200 後の FF 維持率

III-2) 4セルモジュールによる評価

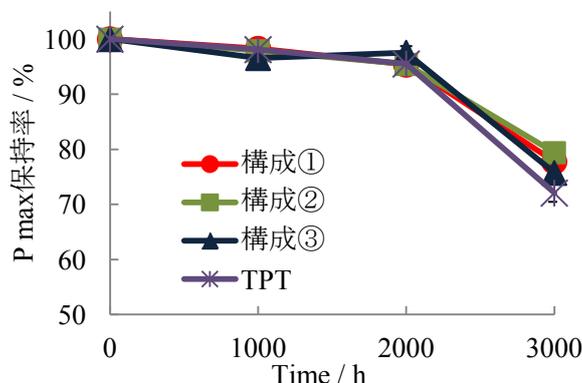


図 7 DH試験後のPmax維持率

図 7 に構成①～③および TPT を用いた 4セルモジュールの DH 後の Pmax 維持率を示した。どのバックシートも DH2000h までは Pmax95%以上を維持していたが、DH3000h 後に Pmax の低下が確認された。構成①におけるフルモジュールの評価結果では、DH3000h 後も 93%程度の維持率を示しており、相関性が得られていないが、構成③においては、同様な結果となった。DH3000h 後で Pmax の低下が確認されたため、発電特性を確認した。すべての構成で Voc は初期と同等な維持率を示したが、構成①、②は FF が低下し、構成③、

TPT は、Isc と FF が低下していた。さらに、EL 画像による解析を行った(図 8～11)。構成①、②は DH3000h 後も大きな変化は確認できないが、構成③、TPT はセル周辺部に暗部が確認され、Isc の低下を反映する結果となった。このことから、接着剤レスの構成①、

②と接着剤層を含む構成③および TPT では、異なった現象によりモジュール劣化が生じていると推察された。構成①、②では、FF のみが低下し、 R_s が増加していることから電極の腐食などの劣化が要因と考えられるが、構成③、TPT では、これらの劣化に加え、さらに I_{sc} の低下が引き起こされたため、セルとフィンガー電極間の接合部、フィンガー電極の劣化が生じたと推察している。

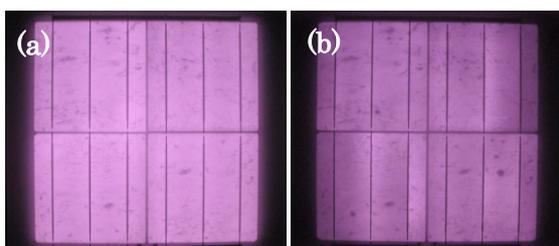


図 8 構成①を用いたモジュールの DH 前後の EL 画像 (a)初期、(b) DH3000h 後

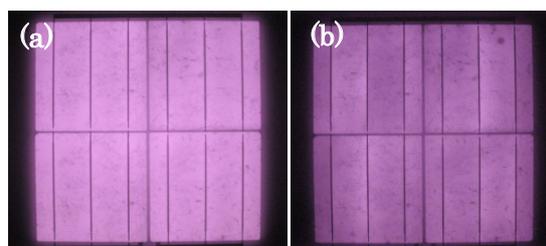


図 9 構成②を用いたモジュールの DH 前後の EL 画像 (a)初期、(b) DH3000h 後

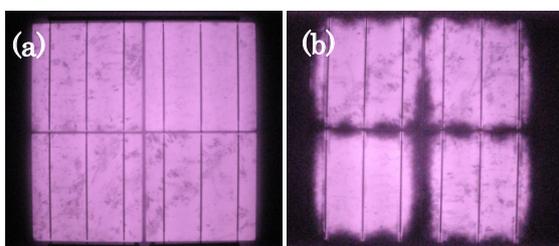


図 10 構成③を用いたモジュールの DH 前後の EL 画像 (a)初期、(b) DH3000h 後

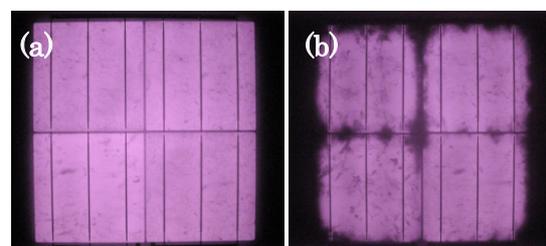


図 11 TPT を用いたモジュールの DH 前後の EL 画像 (a)初期、(b) DH3000h 後

IV. まとめ

バックシート構成中の接着剤層の有無や耐久性の異なる基材を用いた自社製バックシートと TPT を用いて、フルモジュールと 4 セルモジュールを作製し、耐久性の評価を実施した。その結果、フルモジュールおよび 4 セルモジュール共に接着剤層の有無によりモジュールの劣化度合いに差異が生じ、接着剤レスのバックシートの方がモジュール劣化を抑制する結果が得られた。