

「コアテーマ 2 テストモジュールによる劣化因子の明確化」

I. はじめに

コアテーマ 2 では、劣化箇所が可視化可能なモジュールや故意に劣化因子を含むテストモジュールならびにセンシング技術を開発し、モジュール性能劣化因子を明確化することを目的に研究を進めている。具体的には、劣化箇所が可視化可能なテストモジュールならびに劣化因子を含むテストモジュールの開発、劣化状況を把握できるセンシング技術の開発、劣化因子の評価を通じた、モジュール部材ならびに構造に対する要求特性の明確化を目指している。

これまでに、結晶シリコン系太陽電池モジュールならびに薄膜シリコン系太陽電池モジュールへの水蒸気浸入の影響、端子箱のポッティング材からのモジュールへの水蒸気浸入の影響、タブ配線の接続劣化の影響、マイクロクラックの影響について、それぞれテストモジュールを試作して試験を実施した。これらの試験ならびに被試験モジュールの分析等を通じて、バックシートの要求特性については、水蒸気と封止材の反応も含めて考慮すべきとの知見等が得られている。

コアテーマ 2 の参加機関は表 I-1 に示すように、一般会員 3 機関、特別会員 4 機関から成る。

表 I-1. コアテーマ 2 参加機関

一般会員	特別会員
ダイキン工業株式会社	太陽光発電技術研究組合
東洋紡株式会社	長州産業株式会社
(旧・東洋紡績株式会社)	一般社団法人日本電機工業会
日立化成株式会社	ジャパンソーラーファクトリー株式会社
(旧・日立化成工業株式会社)	(旧・YOCASOL 株式会社)
(順不同)	(順不同)

(独立行政法人産業技術総合研究所：増田 淳)

II. 結果と考察

サブテーマ 1 結晶シリコン太陽電池モジュールへの水蒸気浸入の影響

II-1. 結晶シリコン太陽電池モジュールの水蒸気浸入に起因する劣化要因の解明

結晶 Si 系太陽電池が要求する水蒸気バリア性は、 $0.5\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ とも $2.0\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ とも言われているが、それらの科学的根拠について言及された報告事例はほとんどない。また、水蒸気浸入に伴う劣化の加速試験として「高温高湿（ダンプヒート、以下 DH）試験」があり、電極や配線の腐食を引き起こすとされているが、それらの具体的なメカニズムまでは明らかにされていない。

コアテーマ 2 の本テーマは、水分浸入の主経路であるバックシートに意図的に水蒸気バリア性の低い材料を用い、水蒸気浸入量とモジュール劣化の相関性を見出すことを目的とした。また、材料として高温高湿下において化学的に安定なフッ素樹脂を使用することで、試験時間と内部への水蒸気浸入量を積算評価することも視野に入れて実験を開始した。

II-2. フッ素樹脂をバックシートに使用した太陽電池モジュールの作製

バリア性の異なるフッ素樹脂として、ポリクロロトリフルオロエチレン (PCTFE)、テトラフルオロエチレン・ヘキサフルオロプロピレン共重合体 (FEP)、テトラフルオロエチレン・ヘキサフルオロプロピレン・エチレン共重合体 (EFEP)、テトラフルオロエチレン・エチレン共重合体 (ETFE) を使用した。これらをフィルム状に成型し、従来のバックシートと同様にモジュールを作製した (図 II-2-1)。

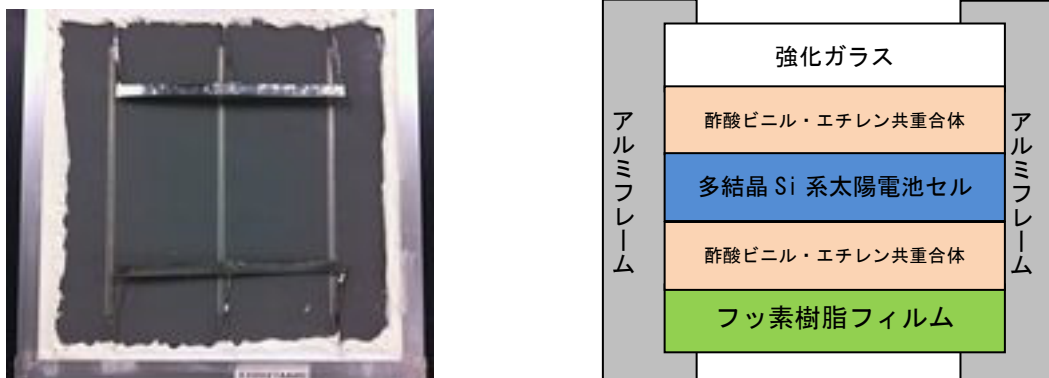


図 II-2-1. フッ素樹脂を用いて作製した太陽電池モジュール
(左) 外観写真 (右) 断面模式図

使用したフィルムは PCTFE ($50, 75 \mu\text{m}$), FEP ($100 \mu\text{m}$), EFEP ($100 \mu\text{m}$), ETFE ($50 \mu\text{m}$) で、それぞれの水蒸気透過量 (40°C , $90\%RH$ 条件下) は以下の通り。

PCTFE ($50 \mu\text{m}$): $0.2 \text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ PCTFE ($75 \mu\text{m}$): $0.15 \text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ FEP ($100 \mu\text{m}$):
 $1 \text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ EFEP ($100 \mu\text{m}$): $5 \text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ ETFE ($50 \mu\text{m}$): $12 \text{g/m}^2 \cdot \text{day}$

II-3. 非破壊分析による太陽電池モジュールの劣化分析と考察

これらのモジュールを 40℃, 90%RH 下および 85℃, 85%RH 下で静置し、外観の変化およびモジュール特性の測定を行った。結果を図 II-3-1 および図 II-3-2 に示す。

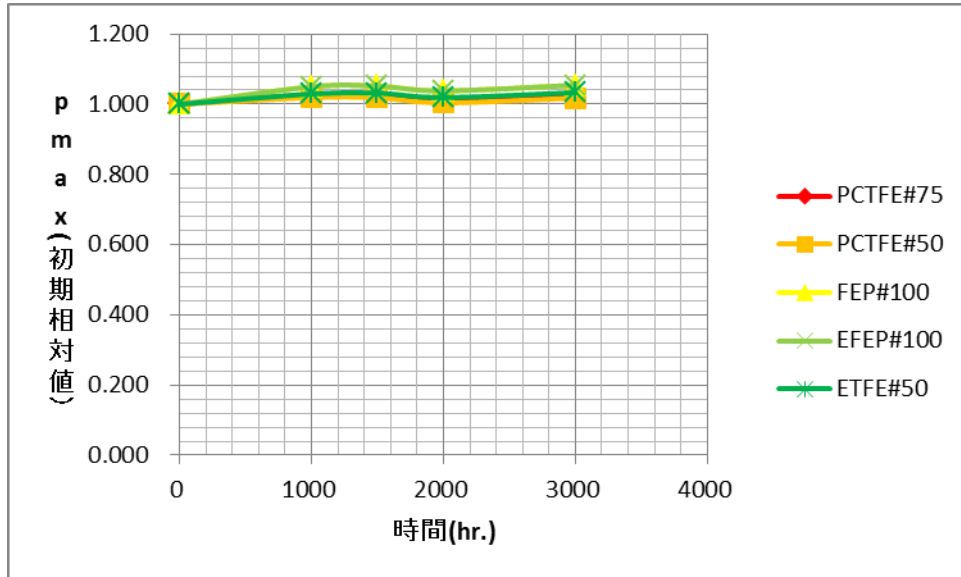


図 II-3-1. 40℃, 90%RH 条件下で 3000 時間経過したモジュールの最大発電量の推移

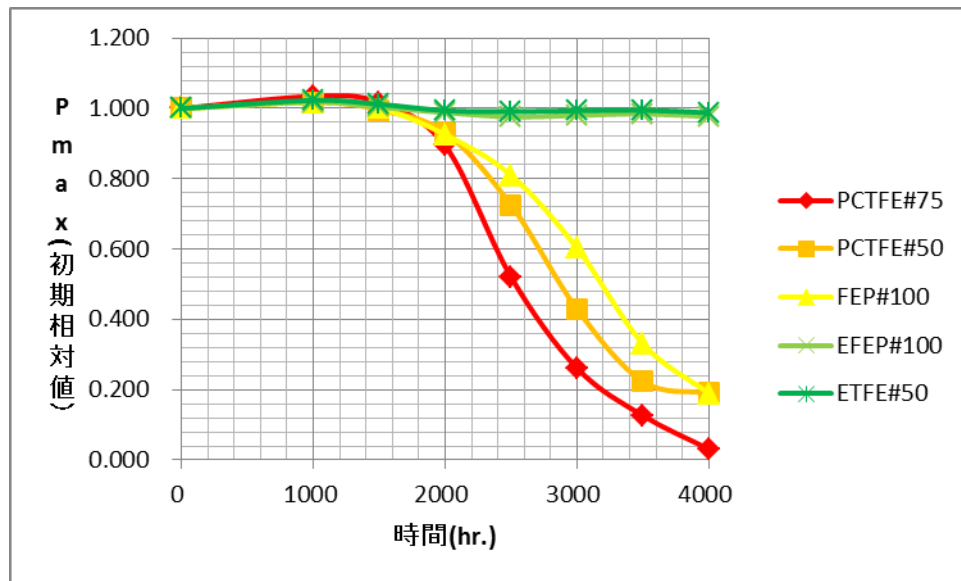


図 II-3-2. 85℃, 85%RH 条件下で 4000 時間経過したモジュールの最大発電量の推移

40℃, 90%RH の条件下では、太陽電池モジュールはどのバックシートを用いても発電特性に変化は見られなかったが、85℃, 85%RH の条件下では 1000 時間あたりから裏面のタブ電極に変色が認められ、時間を追うごとに変色部分が拡大していった。また発電特性でも 2000 時間あたりから最大発電量の低下が見られ、その後、急激に最大発電量は低下していった。意外なことに、水蒸気バリア性に優れている PCTFE (75 μm : 0.15 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, 50 μm : 0.2 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$), FEP (100 μm : 1 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$) フィルムを用いたモジュールほど発電特性の低下が大きい傾向が見られた。さらにコンソーシアム標準のバックシートである PVF/PET/PVF タイプ (水蒸気バリア性: 約 2 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$) が 85℃, 85%RH 条件下で発電

特性が低下し始める 3000 時間を超えても、EFEP (5 g/m²・day), ETFE (12 g/m²・day)フィルムを用いたモジュールは性能を維持しており、4000 時間でも初期値の 99%を保持する結果であった。また、EFEP フィルムを用いたモジュールは、裏面のタブ電極に暗灰色の物質の付着が確認されているが、ETFE フィルムを用いたモジュールについては、タブ電極の変色は見られなかった (図 II-3-3、図 II-3-4)。

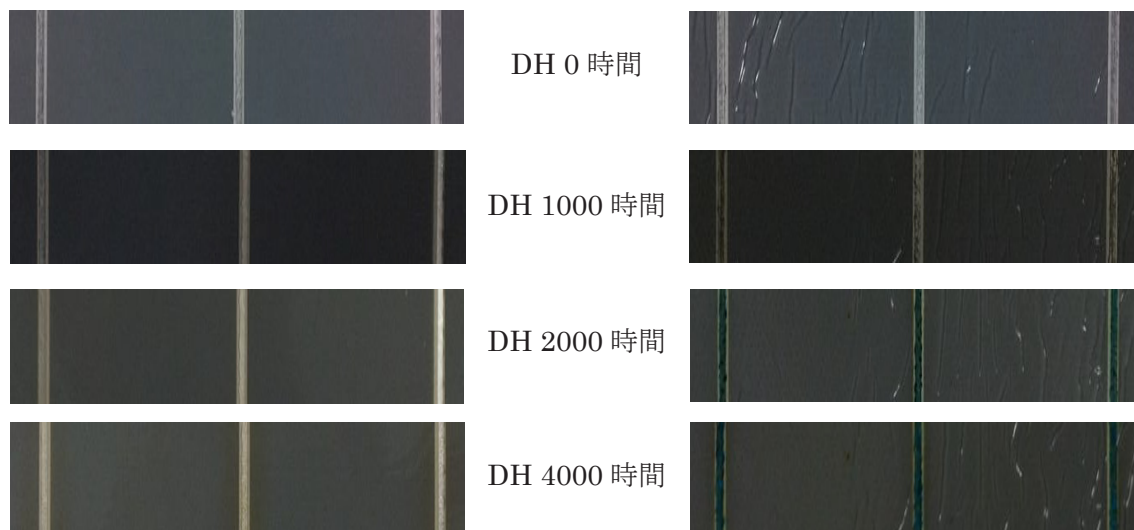


図 II-3-3. 85°C, 85%RH 条件下で環境試験を行ったモジュールの裏面外観
(右 : PCTFE 使用、左 : ETFE 使用)

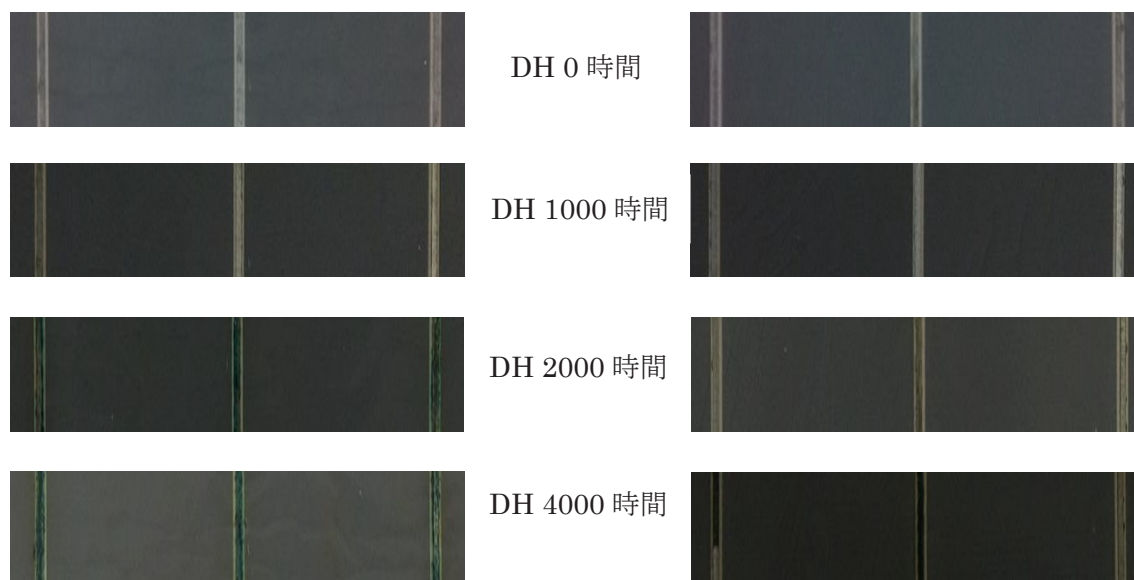


図 II-3-4. 85°C, 85%RH 条件下で環境試験を行ったモジュールの裏面外観
(右 : FEP 使用、左 : EFEP 使用)

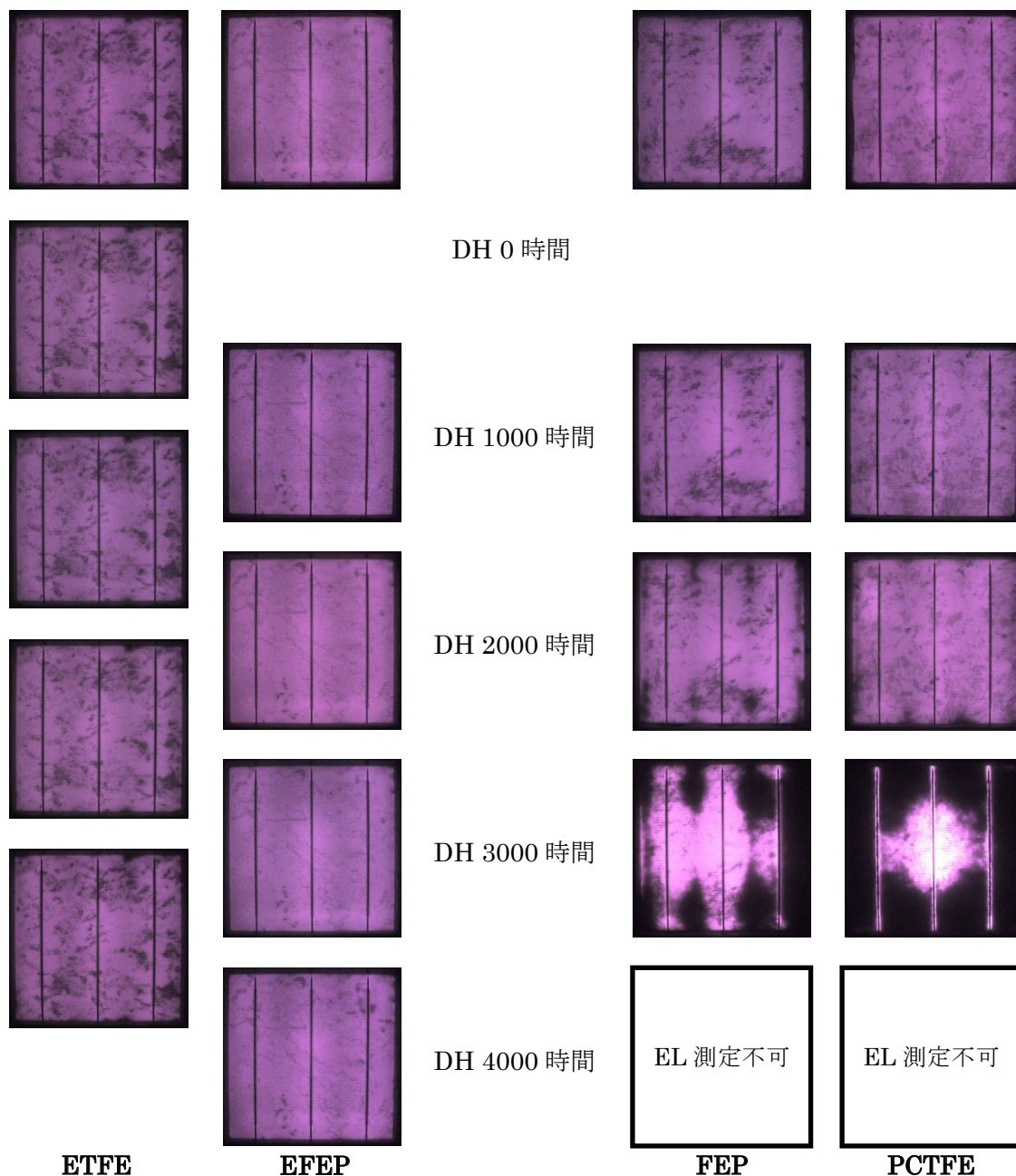


図 II-3-5. 85℃, 85%RH 条件下で環境試験を行ったモジュールの EL 画像

モジュールの EL 画像を図 II-3-5 に示す。Pmax が低下していない ETFE や EFEP を用いたモジュールは EL 画像でも初期のころから変化が見られない。一方で、FEP や PCTFE を用いたモジュールでは、DH2000 時間あたりからモジュールの端部、およびタブ電極の間から暗部が拡大し、DH3000 時間ではタブ線の周囲のみが発光しており、DH4000 時間では、測定することが出来なかった。

モジュールの発電特性を I-V 特性に注目する (図 II-3-6~図 II-3-9) と、Pmax の低下が起きていない ETFE や EFEP を用いたモジュールでは、I-V カーブの変化もほとんどない事が分かる。一方で、Pmax の低下が起きている PCTFE や FEP を用いたモジュールでは、DH2000 時間からフィルファクター (以下、FF) の低下が見られ、DH2500 時間からは Isc

の低下が見られる。これらの一連の現象は、EL 画像における暗部の増加と符合していることから、当該モジュールの発電特性が DH2000 時間以降、不可逆的に劣化が進行していることを示している。また、DH2500 時間以降の劣化は I_{sc} の低下が大きいことから、配線および電極部に何らかの異常があると考えられる。配線の変色が始まっているのは DH1000～1500 時間であり、変色以外の劣化が内部で起きている可能性が考えられる。

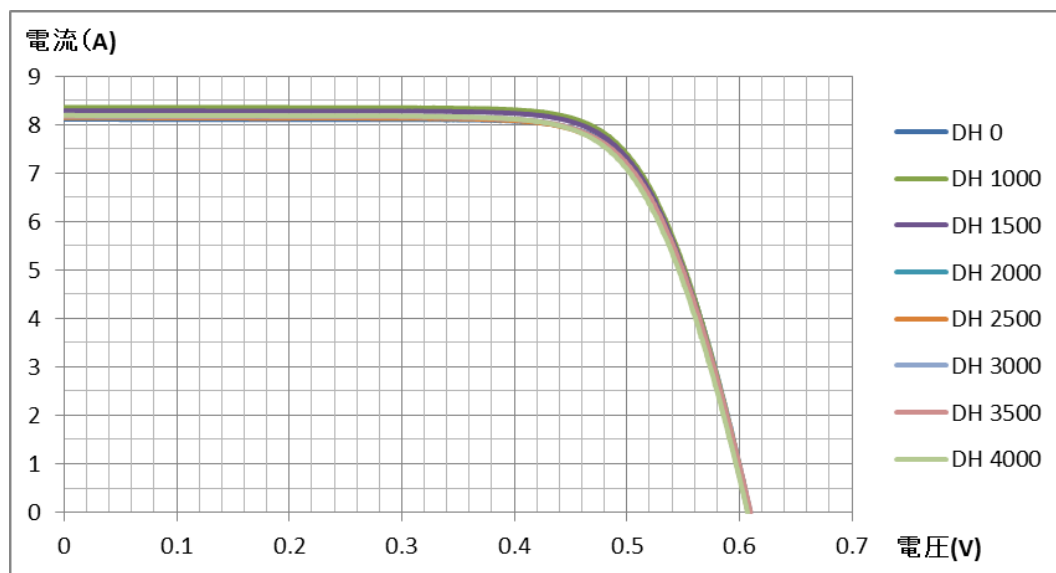


図 II-3-6. DH 試験による ETFE フィルムを用いたモジュールの I-V カーブの変化

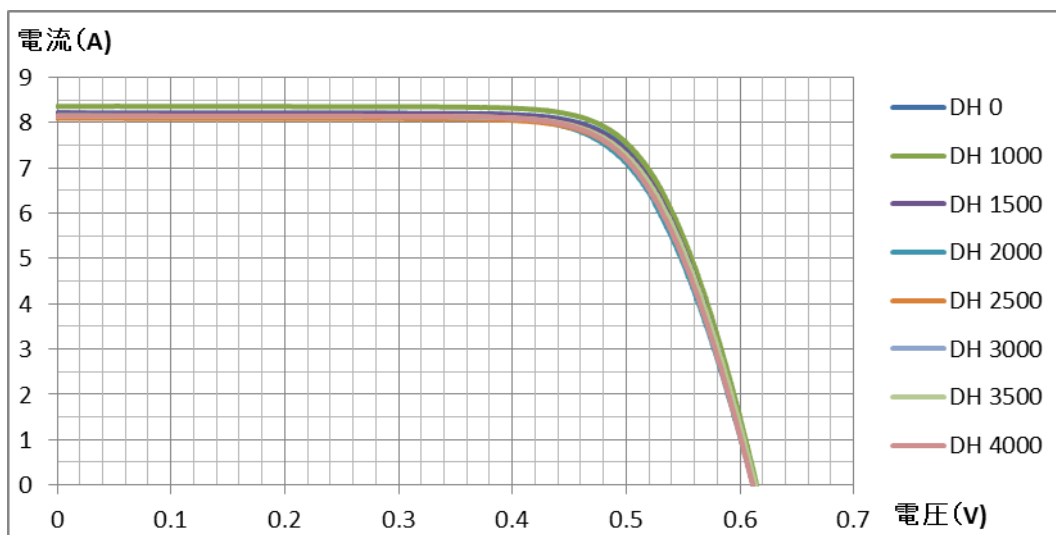


図 II-3-7. DH 試験による EFEP フィルムを用いたモジュールの I-V カーブの変化

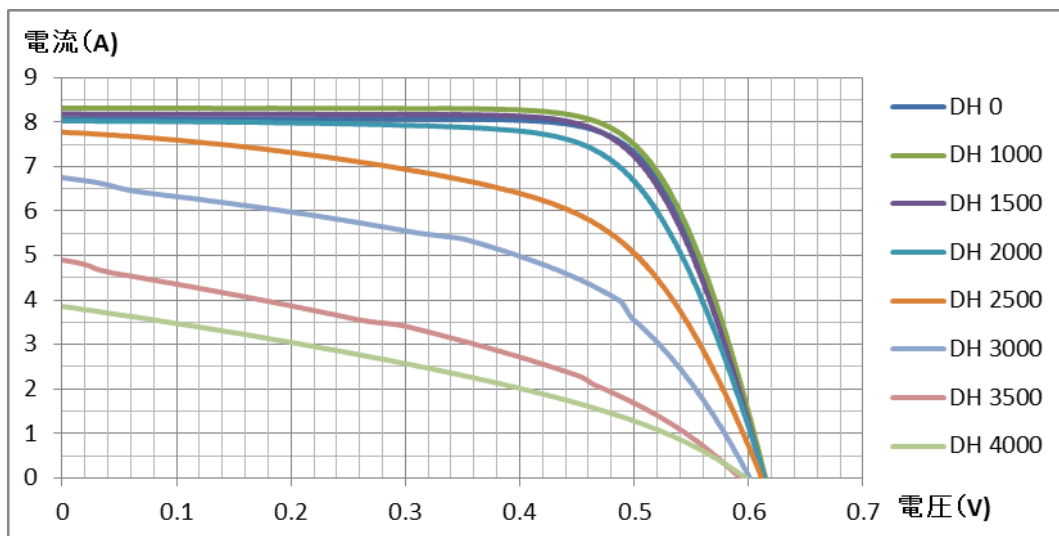


図 II-3-8. DH 試験による PCTFE フィルムを用いたモジュールの I-V カーブの変化

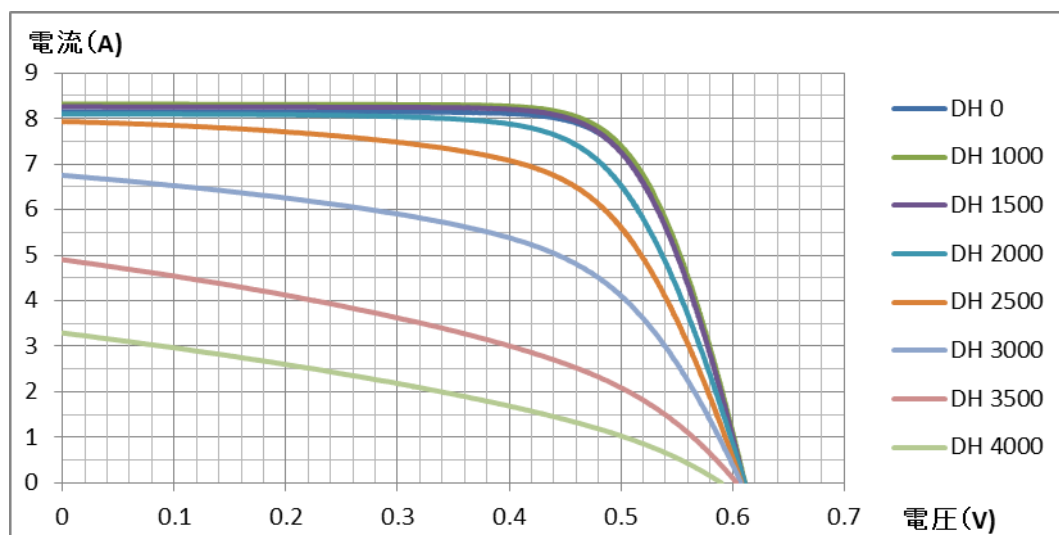


図 II-3-9. DH 試験による FEP フィルムを用いたモジュールの I-V カーブの変化

II-4. 破壊分析による太陽電池モジュールの劣化分析と考察

先述したように、配線の変色以外の要因による劣化が推測されるため、太陽電池モジュールを解体し、特に変色した配線周りを中心に内部を詳細に分析した。対象とするモジュールは、劣化による影響を見やすくするために、最も劣化の大きい PCTFE フィルムを用いたモジュール (DH4000 時間後) にて行った (図 II-4-1)。

図 II-4-2 にサンプルの断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した画像を示す。受光面 (タブ線が未変色) 側の銅配線は、右側がわずかに銀電極から浮き上がっているが、銅配線や銀電極の形状自体は崩れていない。一方で、バックシート (タブ線が変色) 側の銅配線は銀電極から完全に離れてしまっており、また銀電極自身も Si ウエハから一部がはがれてしまっている。また、銅配線を覆っているハンダも離れてしまっており、右側にはタブ配線から何かが漏出したような物質が円状に集積している様子が見える。

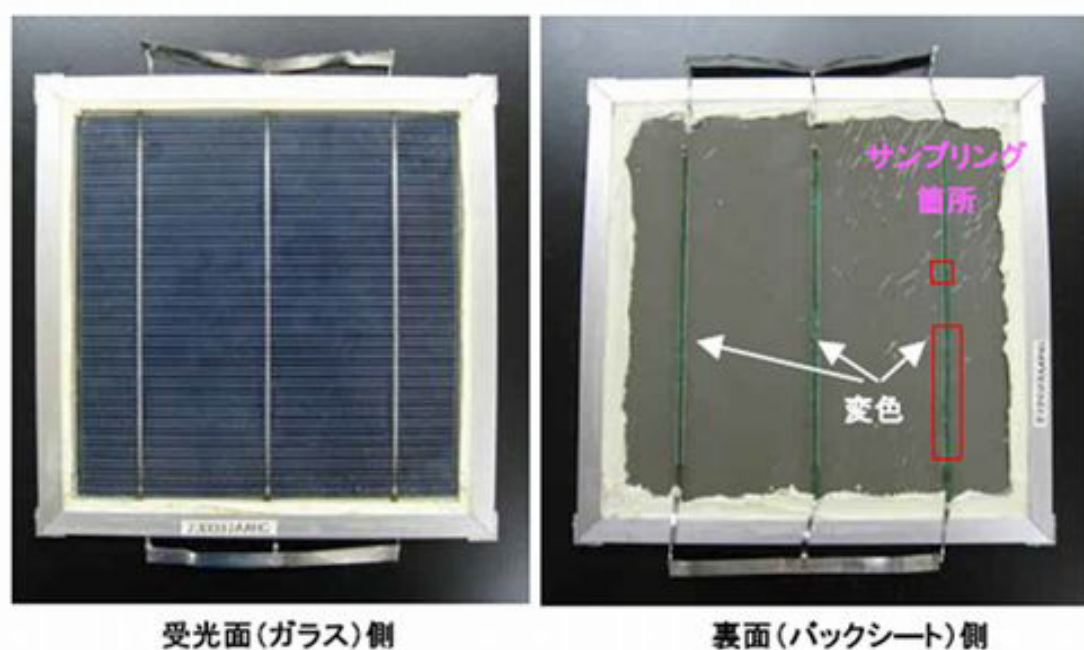


図 II-4-1. 破壊分析を行った太陽電池モジュール（PCTFE 使用）の外観

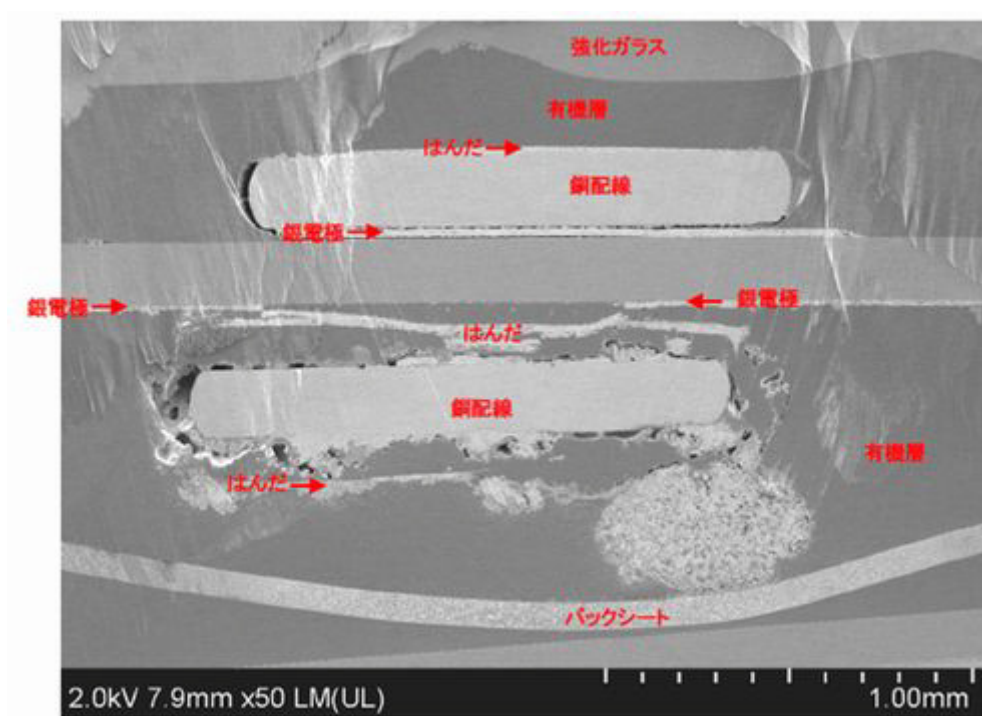
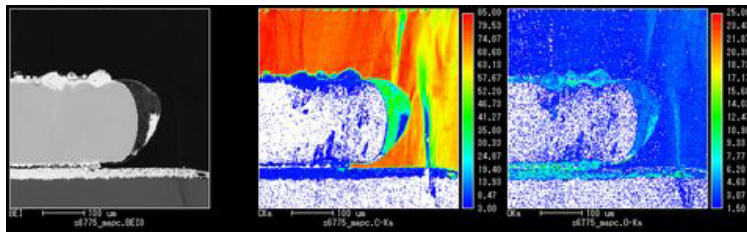
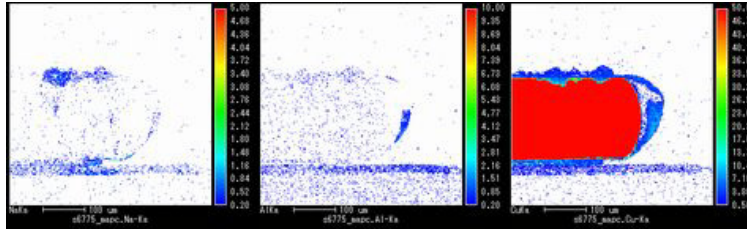


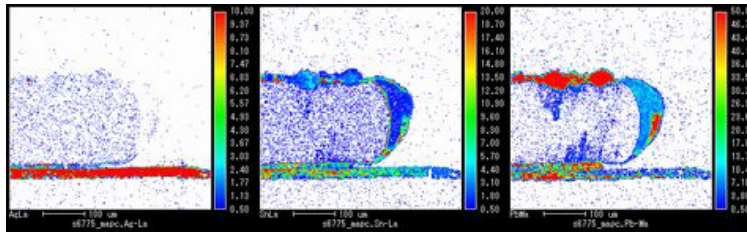
図 II-4-2. 破壊分析を行った太陽電池モジュール（PCTFE 使用）の断面 SEM 画像



SEM 画像 C (炭素) O (酸素)

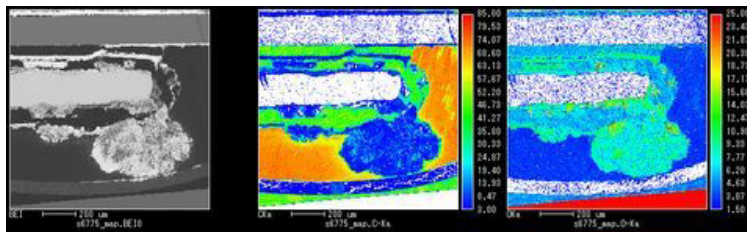


Na (ナトリウム) Al (アルミニウム) Cu (銅)

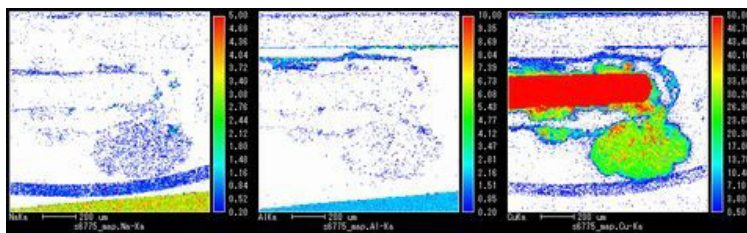


Ag (銀) Sn (すず) Pb (鉛)

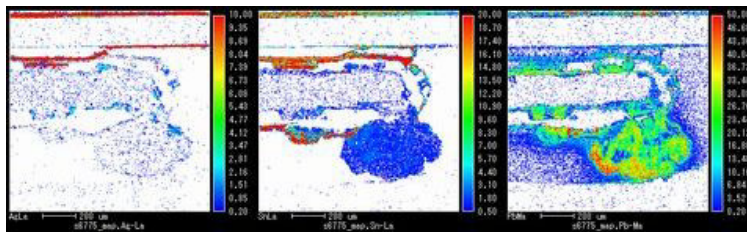
図 II-4-3. 太陽電池モジュール (PCTFE 使用) の断面元素マップ (受光面側)



SEM 画像 C (炭素) O (酸素)



Na (ナトリウム) Al (アルミニウム) Cu (銅)



Ag (銀) Sn (すず) Pb (鉛)

図 II-4-4. 太陽電池モジュール (PCTFE 使用) の断面元素マップ (バックシート側)

断面をさらに詳細に分析するために電子線マイクロ分析（EPMA）で断面の元素マッピングを行った（図 II-4-3、II-4-4）。受光面側では、一部でハンダに含まれる鉛原子やガラスに含まれるナトリウム原子が偏析している。バックシート側では、銀電極の主成分である銀原子がシリコンウエハから剥がれていることが観察された。また、右にある円状の物質は炭素、酸素、銅、すず、鉛、ナトリウムの複合物であることから、ハンダ成分と銅配線成分と EVA 由来物の複合体であると考えられる。また、EVA 中に広く鉛原子が拡散している様子も伺えたことから、DH 試験によって配線のハンダ成分である鉛が EVA 中に拡散することでハンダが変質し、配線と電極との接着性低下、ハンダで被覆されている配線中の銅の腐食を引き起こしている可能性が示唆される。

EPMA で示唆された「EVA 中への鉛原子の拡散」を検証すべく、LA-ICP-MS（レーザー気化誘導結合プラズマ質量分析法）により EVA 中に拡散している金属を解析した。図 II-4-5 には、LA-ICP-MS の解析位置を示す。

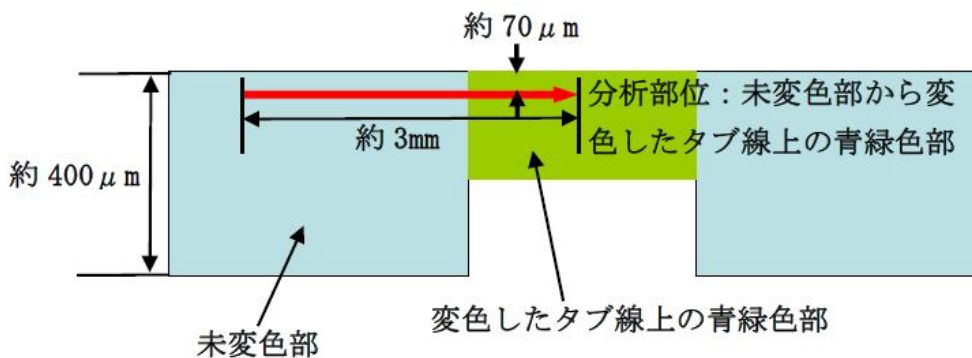


図 II-4-5. LA-ICP-MS で分析した EVA（バックシート側）の模式図

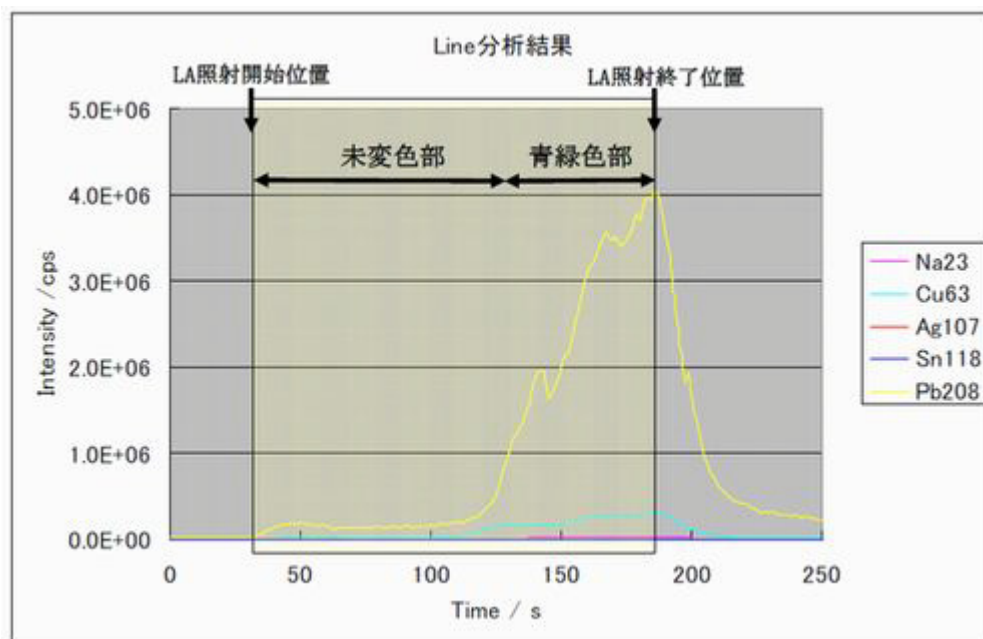


図 II-4-6. LA-ICP-MS の分析結果（バックシート側）

変色しているタブ線上にある EVA と未変色部の境界線上をライン分析した。結果を図 II-4-6 に示す。最も多く検出されたものは鉛原子であり、タブ線上の中央付近ほど高濃度で EVA 中に存在していることが分かった。同様に銅原子、ナトリウム原子の順に検出強度が高く、検出挙動も同様である。一方でハンダの主成分であるすず原子は未変色部と変色部の境界付近で最も多く検出されており、他の元素とは異なる傾向であった (図 II-4-7)。

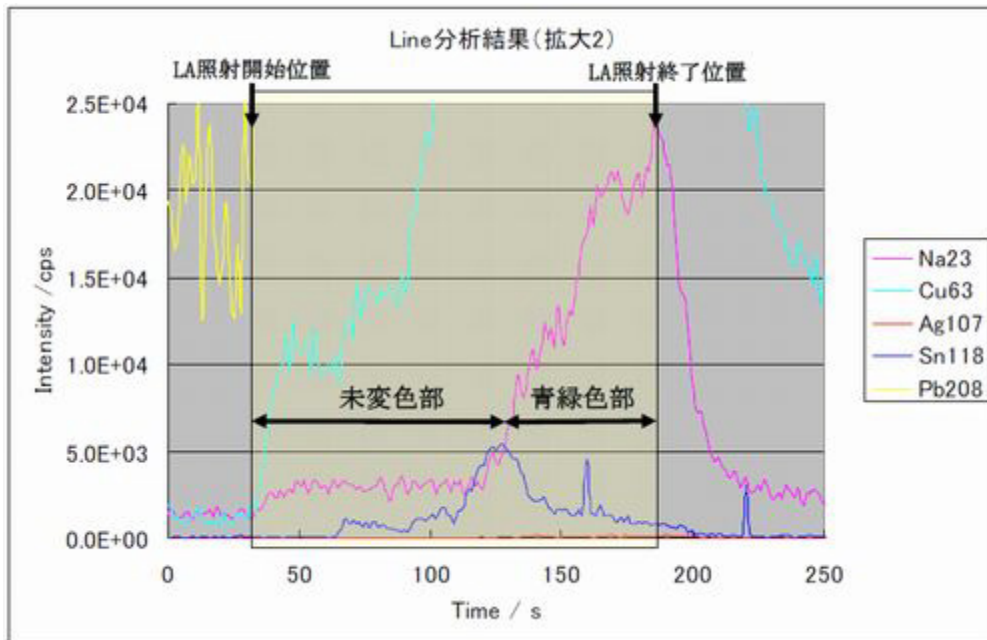


図 II-4-7. LA-ICP-MS の分析結果 (II-4-6 の拡大図)

配線周りの金属が、浸入した水によってイオン化し、EVA 中の水を媒介して拡散したのであれば、金属の分布はイオン化傾向に依存すると考えられる。今回の LA-ICP-MS の結果では、EVA 中の金属濃度は $Pb > Cu > Na > Sn > Ag$ であることから、水を媒介とした金属イオンの拡散であるとは考えにくい。また、図 II-3-1 のように湿潤環境下であっても温度が低い条件ではモジュールの発電性能劣化やタブ配線の変色現象は起きておらず、また、図 II-3-2 のように、バックシートの水蒸気透過率とも相関しないことから、水蒸気のモジュール内への浸入が、直接的に配線や電極にダメージを与えているのではないと推察される。

変色している物質の同定を行うために、ラマンスペクトル分析を試みた。まず、外観を観察する (図 II-4-8) と受光面側には白色部と灰色部が存在することが分かる。一方でバックシート側には、青緑色部と褐色部が存在していることが分かる。またそれぞれのタブ線の接着状態は、受光面側のタブ線はしっかりと接着していたが、バックシート側のタブ線は接着力が失われていた。

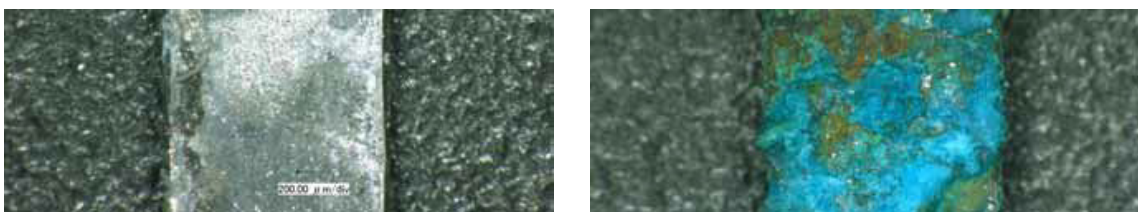


図 II-4-8. ラマンスペクトル分析を行ったタブ線 (左: 受光面側、右: バックシート側)

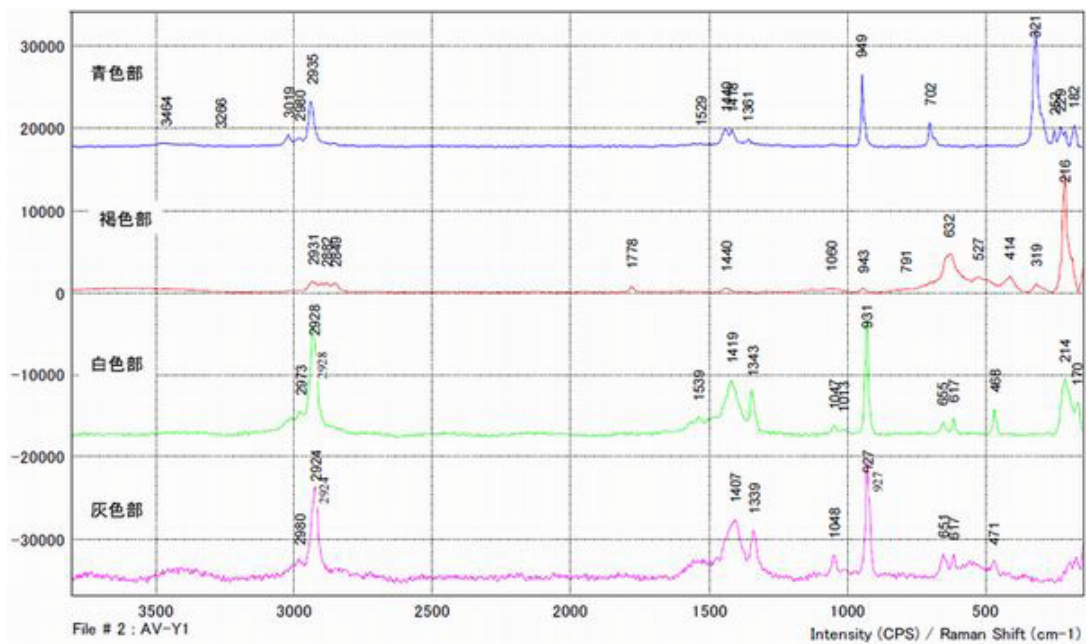


図 II-4-9. ラマンスペクトル

バックシート側のタブ線にある青緑色部のラマンスペクトル(図 II-4-9)は、酢酸銅の水和物とほぼ一致している。また褐色部は酸化銅(I)に相当するピークが観測されている。受光面側の白色部と灰色部はいずれも酢酸塩に相当するスペクトルであり、炭酸塩に相当するピークも確認されている。また、低波数側のスペクトルが白色部と灰色部では異なることから、金属種、あるいは金属周りの結合が異なる物質であることを示唆している。いずれにせよ、タブ線の変色物質には酢酸塩が多く含まれていることが明らかとなった。また、IR スペクトル(図 II-4-10)からは、EVA 中にも酢酸塩由来のピークが検出されている。IR、ラマンスペクトルと LA-ICP-MS による EVA 中の鉛の拡散を総合すると、EVA 中に拡散している金属は酢酸塩として存在していると推測される。

EVA に含まれる酢酸量を調べるために、イオンクロマトグラフィによる酢酸の定量分析を行ったところ、バックシート側の EVA には受光面側の EVA の約 10 倍の酢酸が含まれていることが分かった(表 II-4-1)。このことから、EVA 中の酢酸はバックシートから透過してきた水蒸気と槽内の温度によって加水分解が促進されて発生したものと推察される。

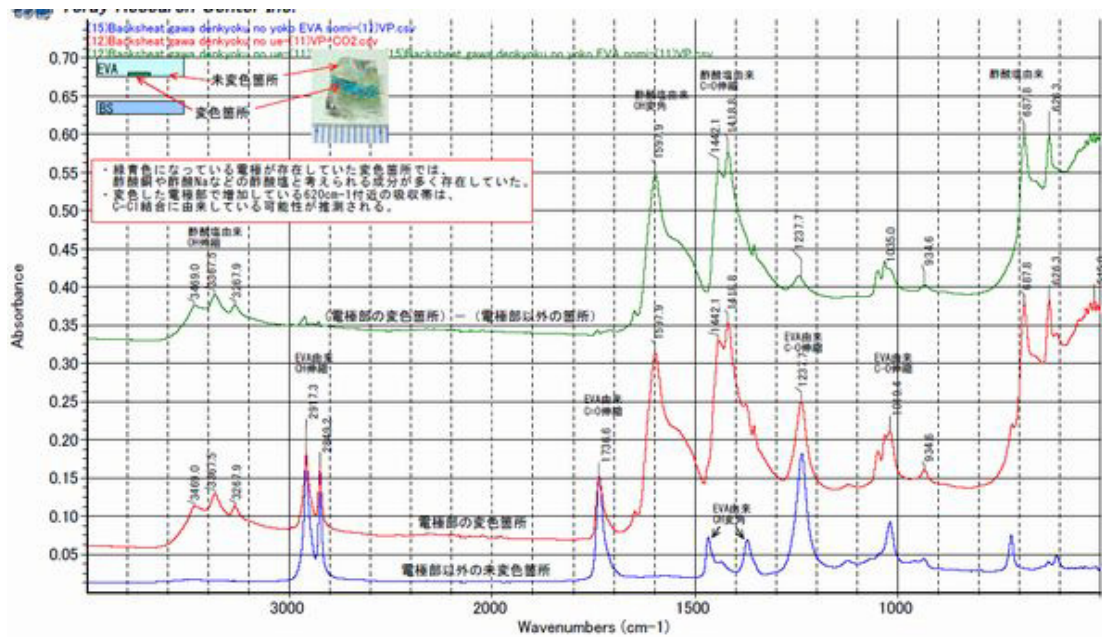


図 II-4-10. EVA の IR スペクトル (バックシート側)

表 II-4-1. EVA 中に含まれる有機物のイオンクロマトグラフィによる測定値

試料	成分	含有量 (単位: $\mu\text{g/g}$)		
		n=1	n=2	平均値
裏面	酢酸 (CH_3COO^-)	25000	23000	24000
	ギ酸 (HCOO^-)	< 300	< 300	< 300
	Cl^-	7	5	6
表面	酢酸 (CH_3COO^-)	2400		
	ギ酸 (HCOO^-)	< 30		
	Cl^-	9		

注1. 上記の値は試料 1g あたりの成分量 ($\mu\text{g/g}$) である。

注2. 裏面は試料解体 (採取) からの繰返し数 n=2 で分析を行った。

注3. 記号「<」は定量下限未満であったことを示す。数値は下限値である。

注4. ギ酸の定量下限値は、酢酸が高濃度であったために高くなっている。

上記の分析結果を踏まえて考察すると、EVA が浸入してきた水によって加水分解され、酢酸を生成する。生じた酢酸が配線の金属成分である鉛、銅などと反応し、酢酸塩を作ることでタブ線を変質、腐食していく。また、これらの一連の化学反応は温度によって反応速度が変わる。反応が進行すると、タブ線が腐食されて銀電極との接着性が失われ、セル内の接触抵抗が増大し、直列抵抗が増大して I_{sc} が低下する。その結果、最大発電量が低下してモジュール性能が劣化するというメカニズムが推測される。

II-5. インターコネクターに含まれる鉛と DH 試験との関係性

破壊分析によって、EVA 中にハンダ由来の Pb(鉛)が拡散するなど、著しい変質を遂げていたことが分かったのを受けて、インターコネクターに Pb フリーの材料を用いて DH 試験を行った。左側のグラフは I-V カーブであり、縦軸は電流(A)、横軸は(V)としている。右側は Pmax の時間推移(縦軸は初期の Pmax を 1 とした相対値、横軸は DH 時間(h)である。それぞれのモジュールに使用した BS の種類を赤字で記載している (図 II-5-1)。

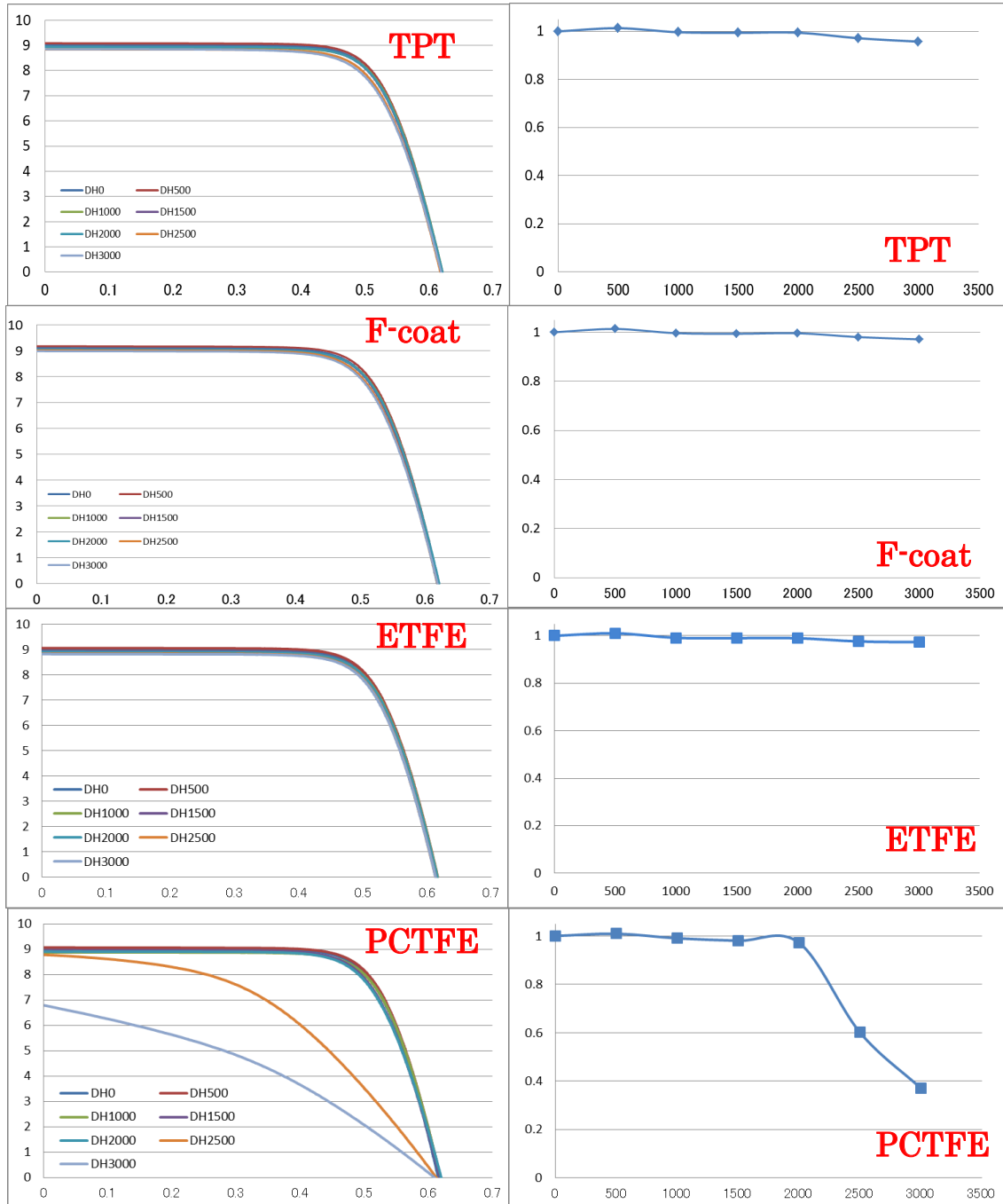
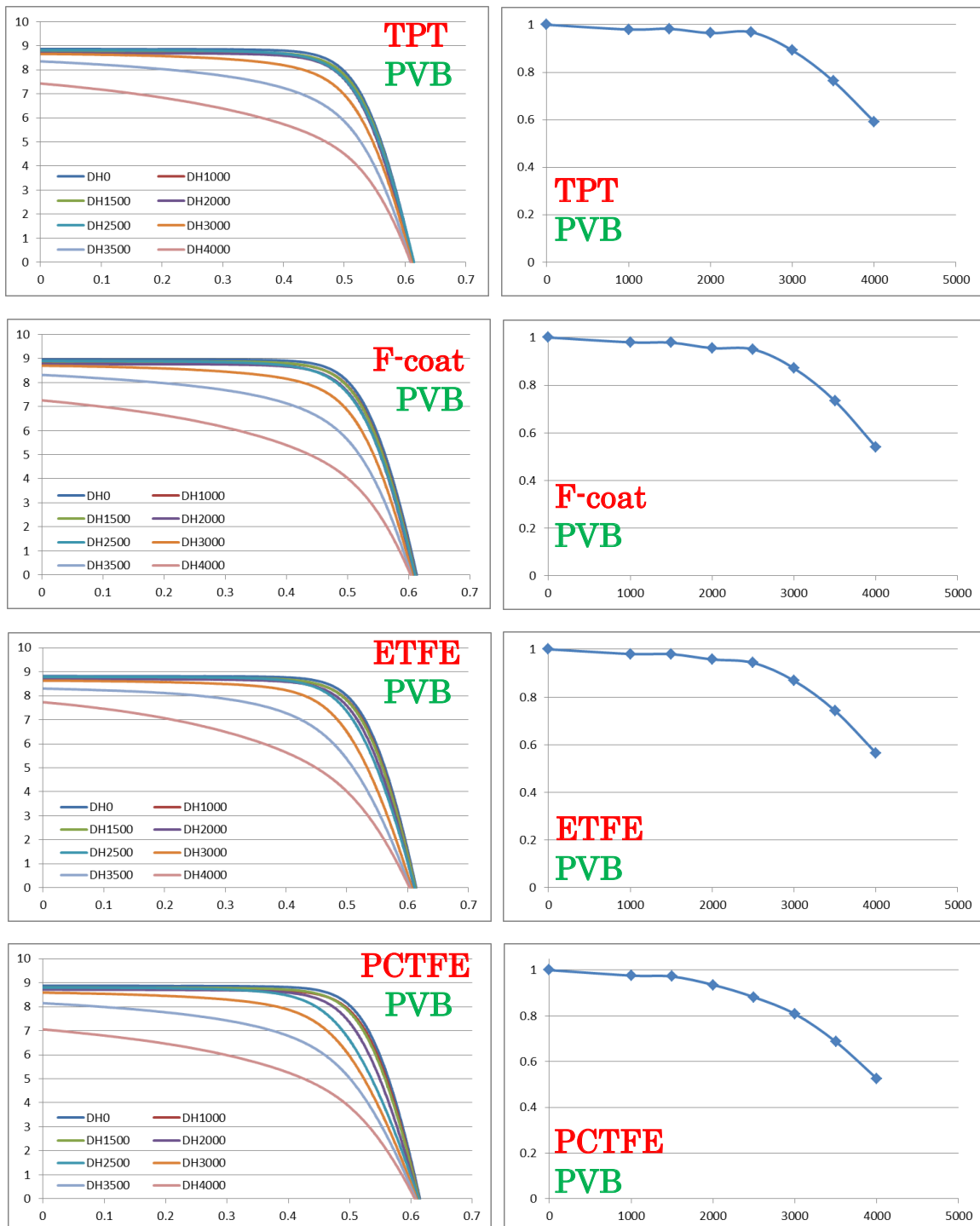


図 II-5-1. Pb フリーハンダを用いたモジュールの DH 試験時間と発電特性の推移

BS に PCTFE を用いた場合の劣化の速さは、これまでの Pb ハンダと同様である。詳細は破壊分析等を実施する必要があるが、インターコネクターに含まれる Pb が湿熱負荷による劣化の主要因ではないことが推察できる。

II-6. 封止剤の加水分解による有機酸の影響比較

太陽電池の保護材料に用いられる EVA 樹脂は、時間の経過とともに徐々に、空気中の水分と反応し加水分解し、酢酸が生じる。そこで、EVA 以外の樹脂、すなわち加水分解による酢酸等の生成物の少ない樹脂を用いて DH 試験を実施し、各時間の発電特性を測定した。図 II-6-1 は、左側が I-V カーブ（縦軸は電流(A)、横軸は(V)）、右側は Pmax の時間推移（縦軸は初期の Pmax を 1 とした相対値、横軸は DH 時間(h)）である。それぞれのモジュールに使用した BS の種類を赤字で、使用した封止剤を緑字で記載している（PVB（ポリビニルブチラール）、熱可塑（熱可塑性樹脂 アセチル基を含まない））。



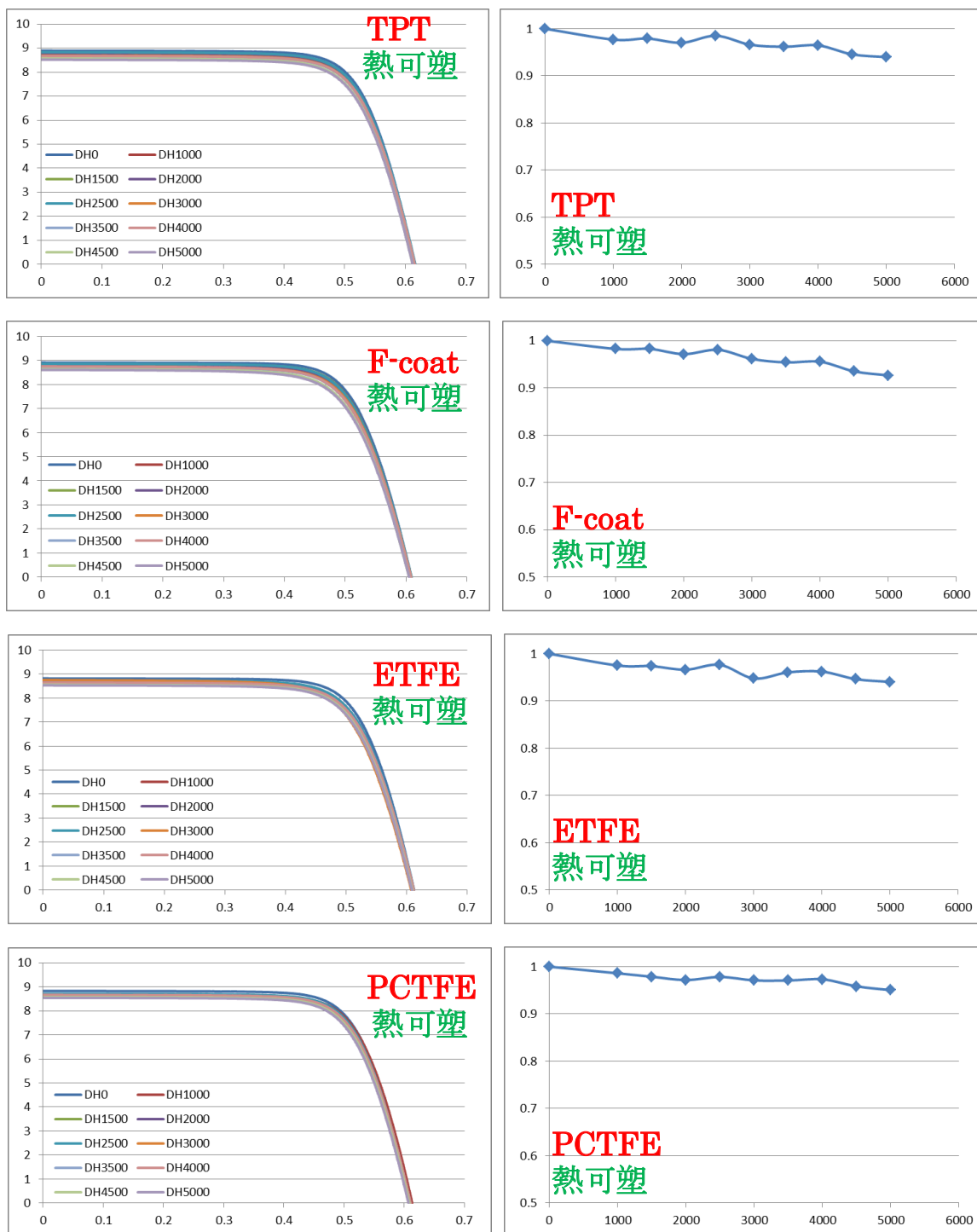


図 II-6-1. PVB および熱可塑性樹脂を用いた各種 BS 搭載モジュールの DH 試験時間と発電特性の推移

この結果から考察すると、少量でも有機酸が発生する場合、長時間の DH 試験によって劣化が起きることが分かった。一方で、加水分解による有機酸の発生がない熱可塑性樹脂を用いた場合、DH5000 時間まで経過しても急激な Pmax の低下は生じない。太陽電池モジュールにとって封止剤からの有機酸の生成および滞留は、長期信頼性に関わる大きな要因である。

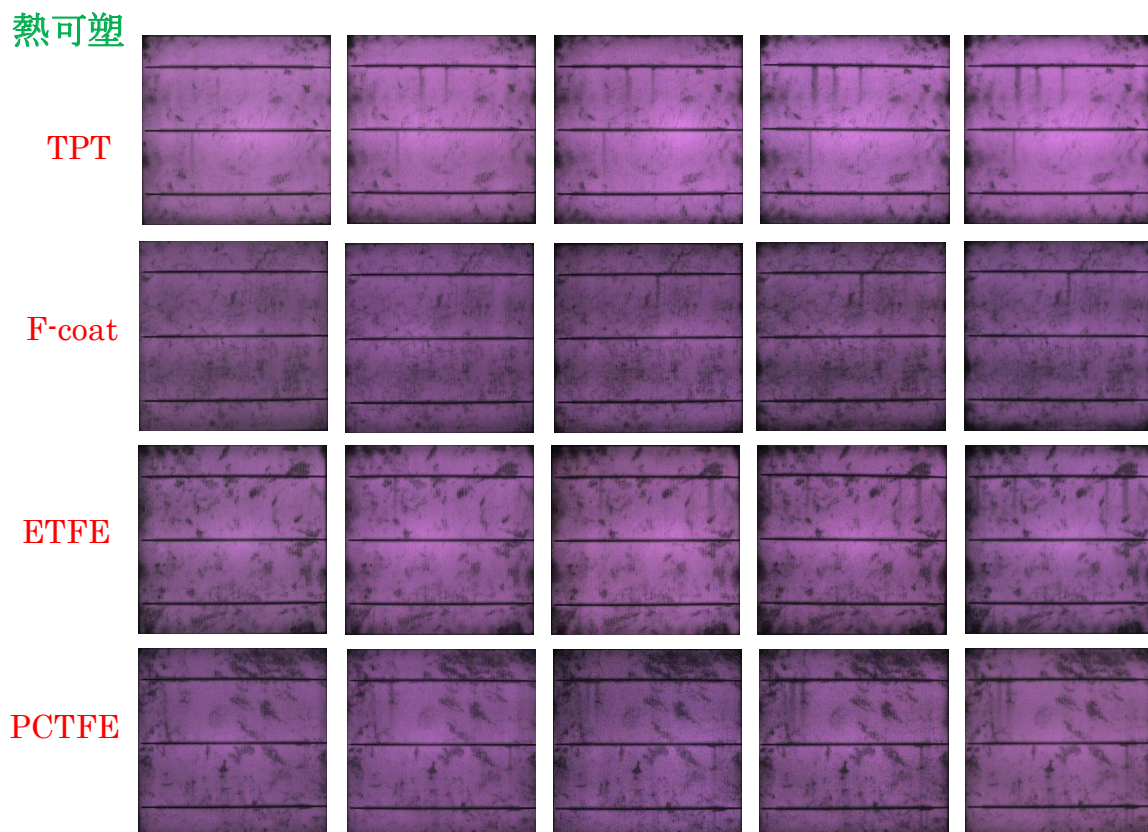
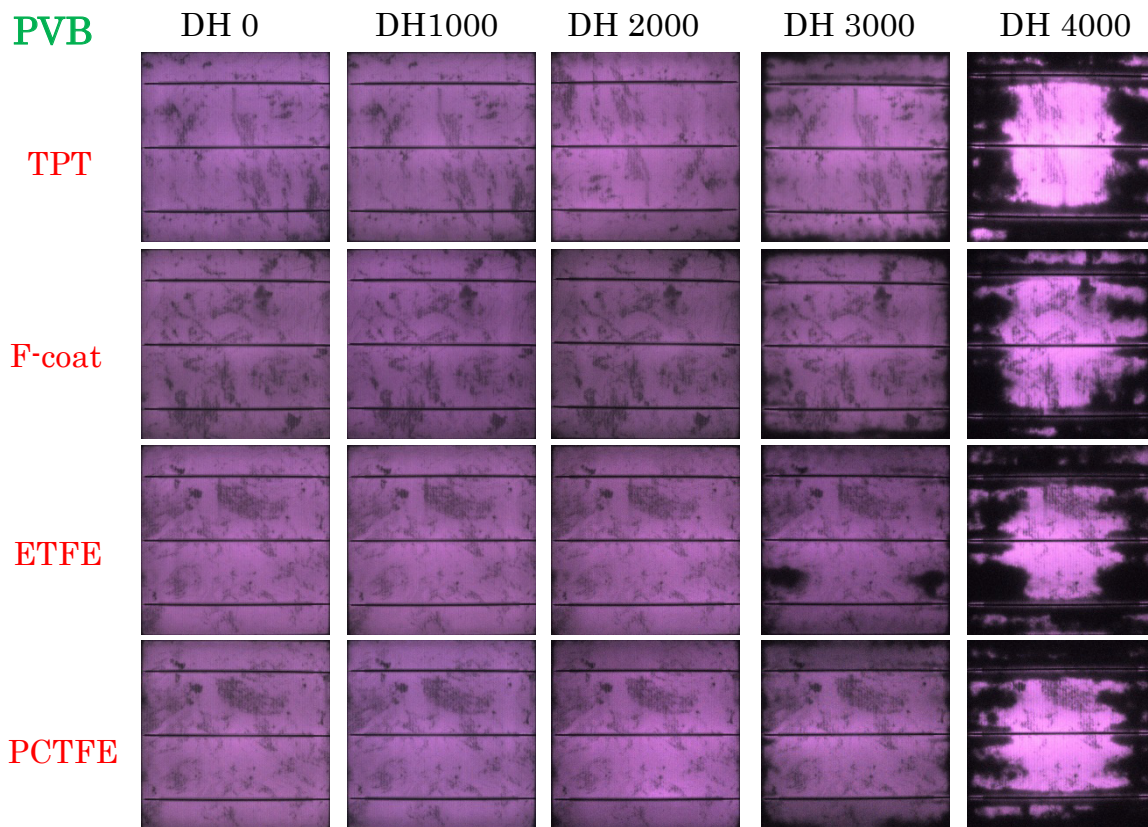


図 II-6-2. PVB および熱可塑性樹脂を用いた各種 BS 搭載のモジュールの DH 試験時間と発電特性の推移

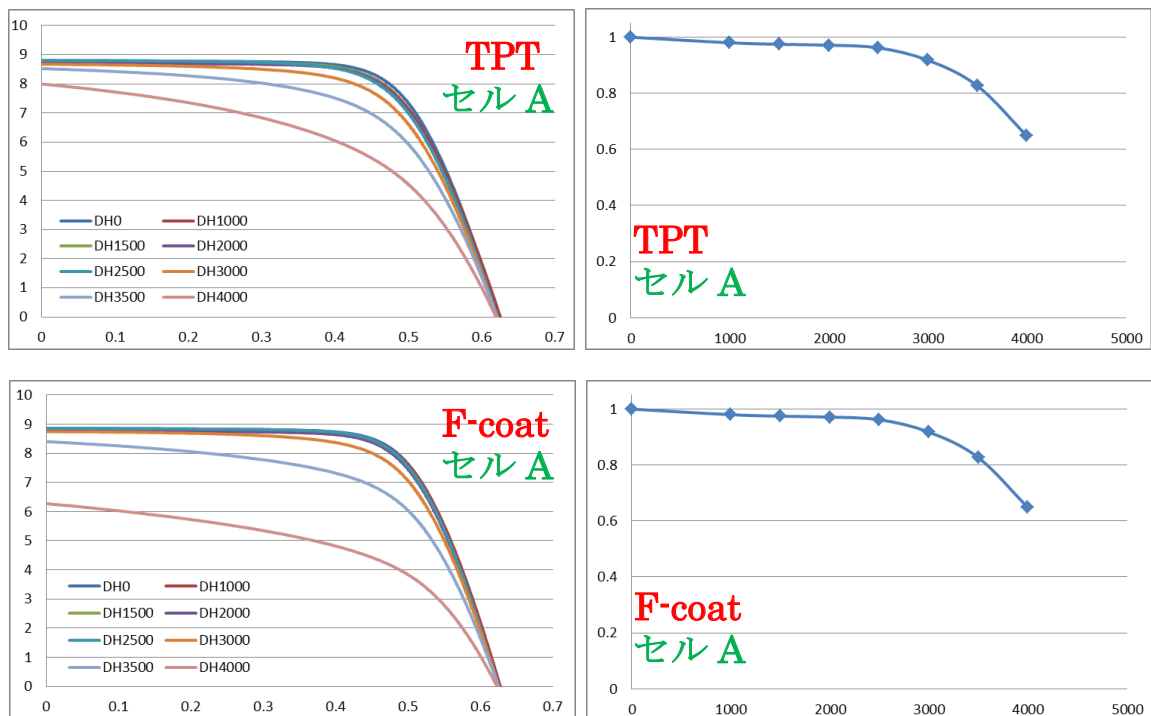
PVB樹脂を使用した太陽電池モジュールのDH時間毎のEL画像(図II-6-2)を見ると、EVA樹脂を使用した時と同様に、モジュールの外周部から暗部が拡大していることがわかる。I-Vカーブの変化も類似していることから、劣化機構もEVAを使用した時と同様であると類推される。熱可塑性樹脂を使用した方は、Pmaxは時間経過とともに少しずつ下がっているが、EL画像では暗部の拡大は見られない。これらの事から酢酸等の有機酸の発生・滞留とフィンガー電極の劣化メカニズムはほぼ同じものであると考えられる。

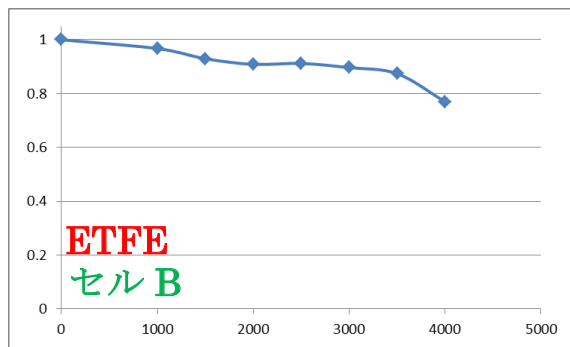
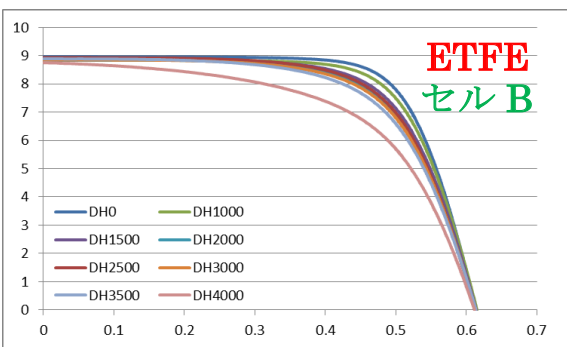
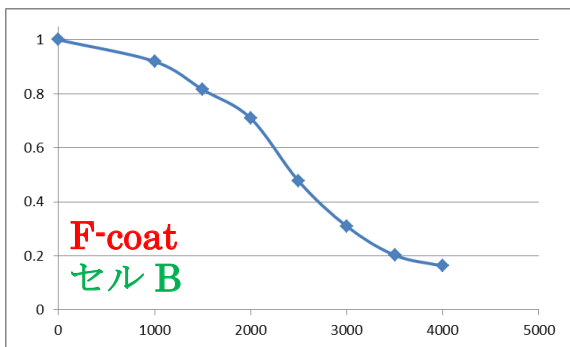
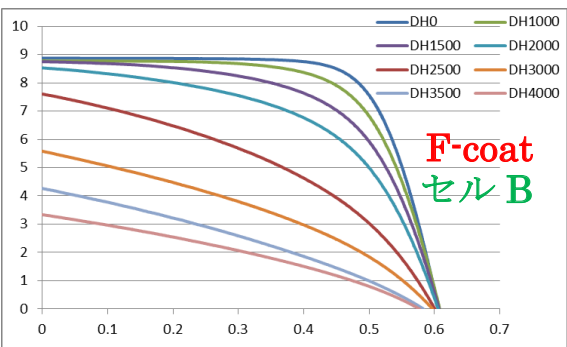
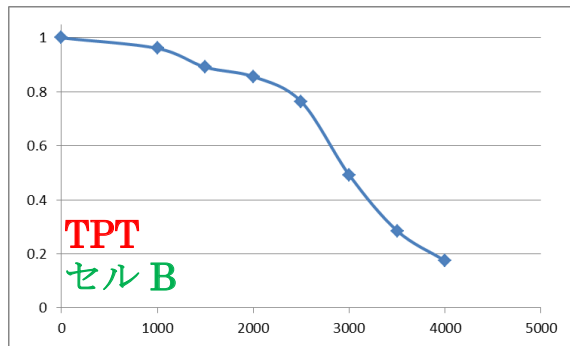
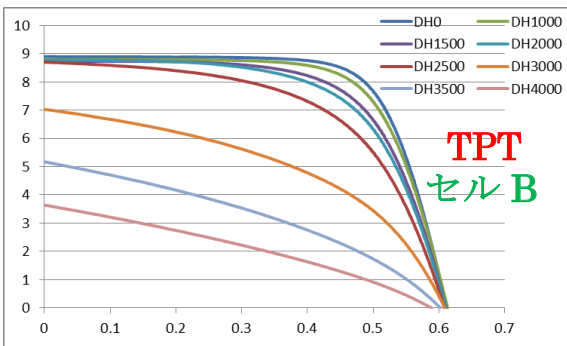
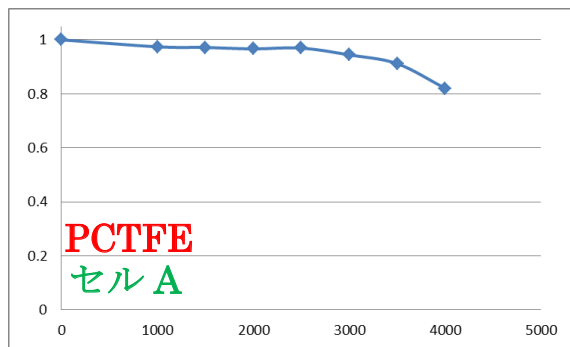
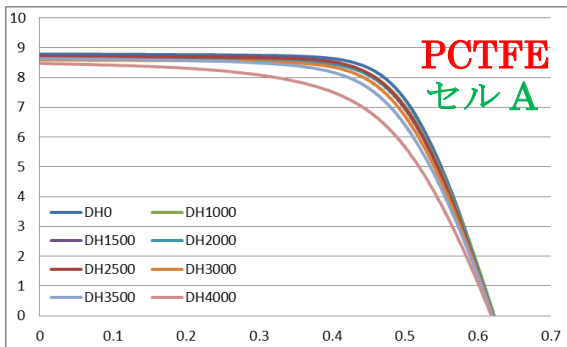
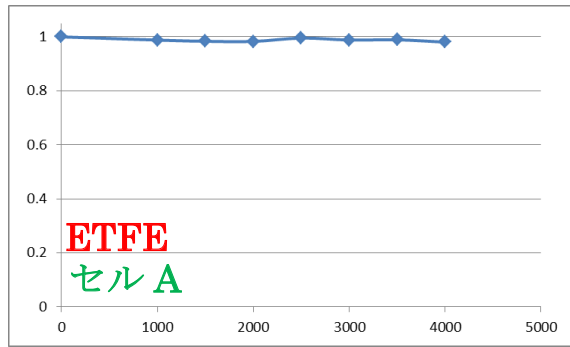
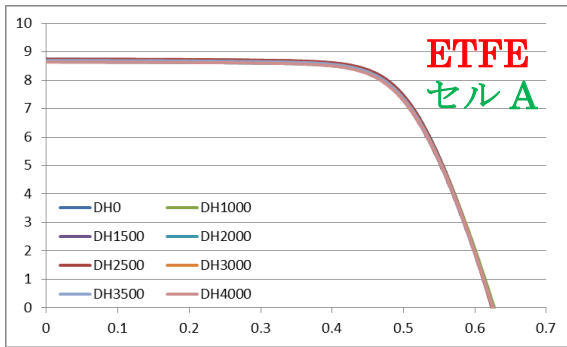
PVB樹脂を使用したモジュールではBSの違い、特にPCTFEとTPTやF-coatとは、あまり差が見られず、またETFEでも特性が劣化した。ここで使用したPVB樹脂は従来の2倍ほど厚みがあった。そのため、封止剤そのものが内部で生じた有機酸の拡散を防ぐ役割をした、あるいはEVAよりも高い吸水率のため、水に溶解しやすい有機酸が封止剤中で蓄えられやすくなっている可能性が考えられる。

現在、ポリオレフィン系樹脂(アセチル基を含まない)を用いて同様の試験を実施中であるが、DH2000までは変化が見られていない。

II-7. 太陽電池セルによる有機酸の影響比較

フィンガー電極を作製する焼成貫通(ファイアスルー)と呼ばれる方法は、様々な特許が今なお出願されており、太陽電池にとって重要な技術である。このフィンガー電極そのものの信頼性は、本コンソーシアムではセルを自作できないので、市場で流通しているセルを入手し、これまでの太陽電池セルと同じ条件で比較することで、違いが現れるのかを調べた。結果を図II-7-1に示す。(縦軸は電流(A)、横軸は電圧(V))、右側はPmaxの時間推移(縦軸は初期のPmaxを1とした相対値、横軸はDH時間(h))赤字はBS、緑字はセル種類)。封止材には、すべてEVAを用いた。





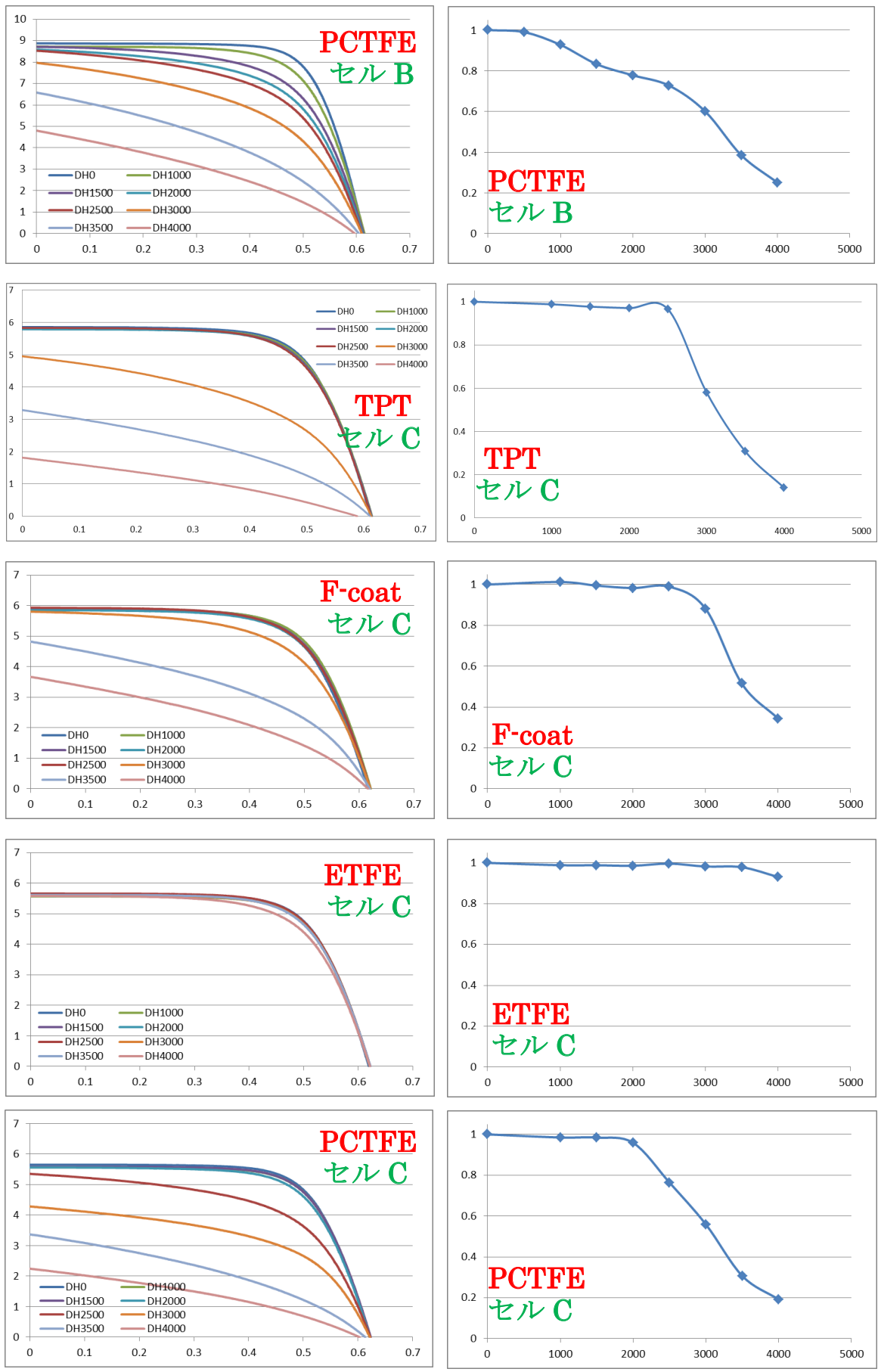


図 II-7-1. セル A、B および C を用いた各種 BS 搭載モジュールの DH 試験時間と発電特性の推移

セル A、B は多結晶シリコンセル、セル C は単結晶シリコンセルである。セル A~C の DH 試験後の発電特性として共通しているのは、ETFE を BS として使用した場合の発電維持性能の高さである。ETFE は他の BS に比べて酢酸ガスの透過性が高く、EVA 樹脂中で加水分解によって生じた酢酸をただちに大気中に逃がすためと考えられる。これは、BS を使わずに作製した太陽電池モジュールを使った DH 試験でも同様の結果を得ていることから明らかである（図 II-7-2 参照）。また、水蒸気バリア性に優れた PCTFE フィルムを用いたモジュールは、どれも発電特性の長寿命化に寄与していない。これらの事から、結晶 Si 系太陽電池においては、水蒸気バリア性の向上は長期信頼性とは直結せず、酢酸の滞留量の抑制は長期信頼性に直結すると推察される。

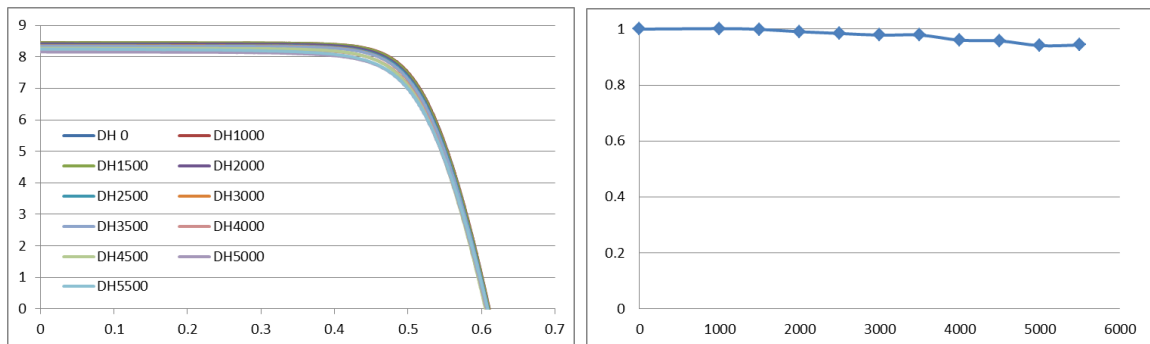


図 II-7-2. BS 未搭載のモジュールの DH 試験時間と発電特性の推移

セル A については、BS に PCTFE を用いた場合の発電特性が、他のものよりも劣化が遅い傾向があった。セル B については、これまでのコンソーシアムでの DH 試験の結果から大きく逸脱しているが、この試験において作製したモジュール全てで同様の傾向があり、後日再試験を実施したが大きな変化はなかった。電極焼成条件等、酢酸に弱い何らかの要因を初期段階から内包していると考えられるが、詳細な考察は今後の課題である。セル C については、シリコンセルの種類と湿熱負荷に対する劣化現象には関連はないことが明らかとなった。ただし、全体的に発電特性の劣化開始時間が早い傾向がある。

II-8. 太陽電池セルによる有機酸の影響比較

EL 画像の暗部は何らかの異常によって発光不良となっている。原因としては、pn 接合不良か、配線の通電不良のどちらかが考えられるが、酢酸による配線腐食の影響を鑑みれば後者の可能性が高い。そこで、1 枚の結晶シリコンセルに対して部分的に光を照射し発電特性を測定した。結果を図 II-8-1 に示す。縦軸は電流(A)、横軸は電圧(V)を示す。

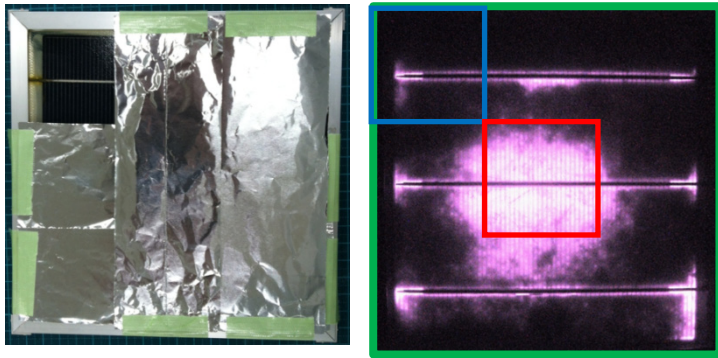


図 II-8-1. 受光エリアを限定したモジュールの外観図（左上、BSはPCTFEを使用）と試験モジュールのEL像（右上）、およびI-VカーブのDH時間毎の推移

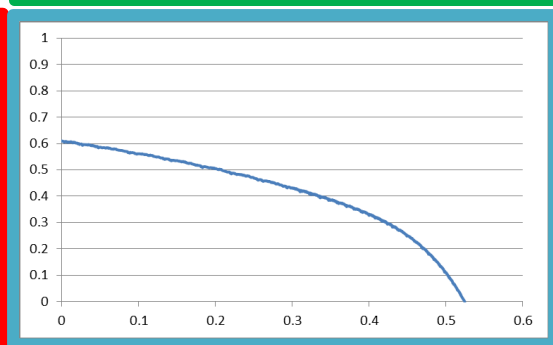
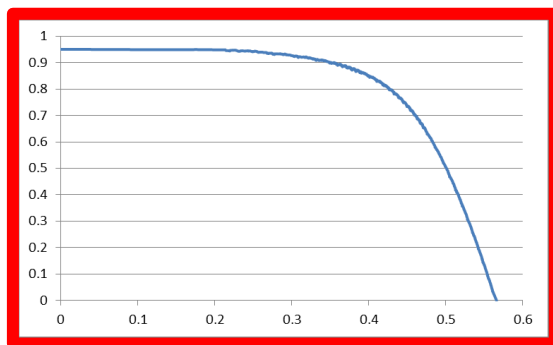
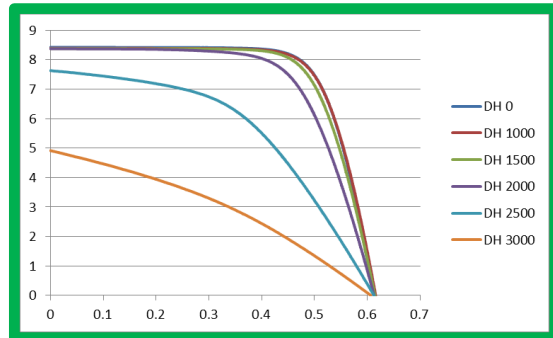


図 II-8-2. 受光エリアを限定したモジュールのI-Vカーブ（図 II-8-1のEL内の赤枠部分と青枠部分が、それぞれ赤枠のグラフ、青枠のグラフに対応）

BSにPCTFEを用いた太陽電池モジュールのDH3000時間後のI-Vカーブを図 II-8-2に示す。縦軸は電流(A)、横軸は電圧(V)を示す。アルミ箱で光を当てたい部分以外を遮蔽し、ソーラーシミュレーターで発電特性を測定した結果を表 II-8-1に示す。

表 II-8-1. 受光エリアを限定したモジュールの発電特性パラメーター

	Pmax	FF	Voc	Isc	Vpm	Ipm	Rs	Rsh
DH0 (試験前)	3.886	0.74	0.61	8.612	0.483	8.041	0.009	24
DH3000	1.015	0.341	0.607	4.912	0.346	2.931	0.072	0.22
DH3000-center	0.343	0.637	0.566	0.950	0.418	0.819	0.11	112
DH3000-corner	0.136	0.425	0.524	0.609	0.364	0.373	0.16	2.4

受光面は全体の1/9程度のため、Iscは低く算出されている。注目すべきはFFである。大きく劣化した太陽電池モジュールでも、ELで明るく見える部分は、初期のモジュールと

比較しても大きな差はなく、ダイオードとしての特性を失っていない。一方、ELで暗く見える部分は、値は低いものの発電そのものは行われている。

ELは外部から強制的に電流を流すため、抵抗の小さな部分に電流が集中し、正常な部分だけが強く発光する。結晶シリコンセルそのものが変化しない限り、ELの暗部でもキャリアの生成は行われている。例えば、ELではほとんど発光しなくなるまで劣化したモジュールのフォトルミネッセンス（以下、PL）画像を撮影したところ、十分な発光現象を見ることができる（図 II-8-3）。すなわち、結晶シリコンセルの光電効果によるキャリア生成そのものは、湿熱負荷によって変化していないと考えられる。一方で、EL明部のみに光を照射した時のI-Vカーブは、正常な状態のものに近いことから、EL暗部の拡大は、バスバー電極やインターコネクターに起因するものではなく、生成されたキャリアを収集するフィンガー電極の異常に起因することが推察される。

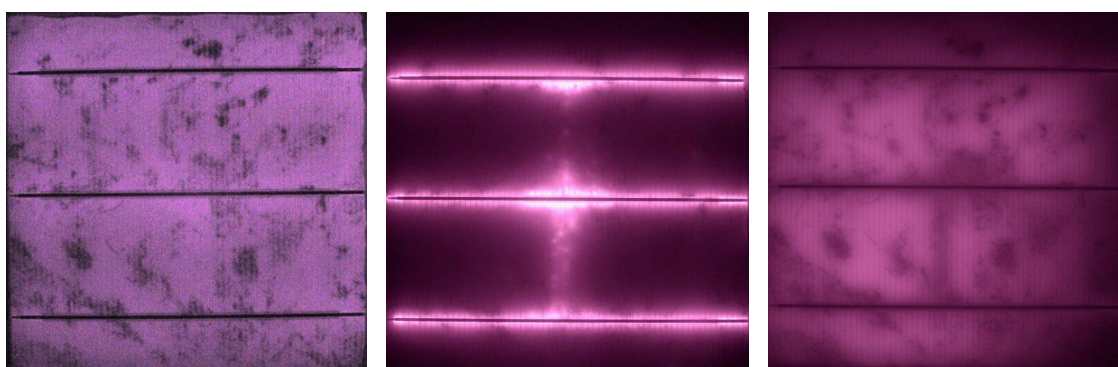


図 II-8-3. 試験前のモジュールの EL 画像（左）、DH4000 時間後のモジュールの EL 画像（中）と DH4000 時間後のモジュールの PL 画像（右）

DH 試験による太陽電池モジュールへの湿熱負荷によって、封止剤から生じる酸（酢酸など）は、太陽電池セルの電極にダメージを与え、結晶シリコンセルから生成したキャリアの伝導性を低下させる。そのプロセスとして、①封止剤への水分浸入→②封止剤の加水分解による有機酸の生成および滞留→③有機酸による電極の腐食→④太陽電池の内部抵抗の増大→⑤シリーズ抵抗増大に伴う I_{pm} 、 FF 、 P_{max} の低下、が推察される。ここでの直接的なメカニズムは、有機酸による電極の腐食、特に接触抵抗の増加が考えられる。

EVA の吸水率は 0.1%(1000ppm)程度であり、酢酸は数百～数千 ppm が検出されている事を考慮に入れば、系内の pH は金属のイオン化が起きるに十分な酸性雰囲気である。また、酢酸の存在はガラスからの Na イオン溶出を加速させる因子であるため、PID 現象の誘発も危惧される。酢酸の発生を抑制するレベルの水蒸気バリア性は少なくとも PCTFE のような $10^{-1}g/m^2 \cdot day$ 程度では不十分であり、金属箔や酸化物蒸着層による高精度なバリア膜を必要とする。ただし、金属箔は絶縁性、酸化物蒸着層はコストが問題となる。

モジュール内部の有機酸の生成ではなく滞留を防ぐ役割として、外部への酢酸放出は有効なアプローチであると考えられる。最も有効な方法はバックシート側からの放出であり、実運転環境下において、いかに酢酸を放出することができる構造を有しているかという点は、今後のバックシートの設計・評価の観点として有用である。

（ダイキン工業株式会社：午坊 健司）

サブテーマ2 薄膜系モジュールに対する湿熱負荷

本サブテーマにおいては、主に薄膜アモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池モジュールを対象として、水蒸気バリア性能が異なるバックシートを用いたモジュールの湿熱劣化加速試験を行うこと、また、モジュールの劣化に関係があると考えられる封止材の種類とバックシートのバリア特性の組み合わせがモジュール劣化に及ぼす影響について評価することを通じて、薄膜 a-Si 太陽電池モジュールの劣化メカニズムを明らかにし、劣化防止の方策を探ることを目的に研究を行った。

II-9. モジュール作製

透明蒸着バリアフィルムを使用し、耐候性にも考慮した部材構成のバリアバックシート 1A~1G の 7 種類を用意した。これら 7 種のバリアバックシートはすべて透明であり、モジュールに組み込んだ状態でバックシート側からモジュール内部の状態を目視観察することが可能である。また、これらのバリアバックシートと比較するため、コンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート (1H)、およびバリアバックシートと同じ厚みの耐候性 PET 単層フィルム (PET)、さらに、コンソーシアム標準アルミ箔ラミネートバックシート (PAP) も使用した。バリアバックシートおよび PET 単層フィルムには、使用する封止材の種類に応じて当社独自の易接着コーティングやコロナ処理を施し、封止材との接着性を付与した。

本研究で使用するバックシートは、その構成によって水蒸気バリア特性が異なっており、さらに本研究ではバックシートによって異なる DH 試験の経過による水蒸気バリア特性の変化にも着目している。表 II-9-1 に各バックシートの初期の水蒸気透過率 (WVTR@40°C/90%RH) を示す。図 II-9-1 には DH 試験の累積によるバックシートの単位面積当たりの積算水蒸気透過量の推移を示す。積算水蒸気透過量は、バックシート単体で 85 °C/85%RH の DH 試験を行い、測定ポイントごとに DH 試験を休止して測定した 40 °C/90%RH における水蒸気透過率 (WVTR) の変化から、測定ポイント間の WVTR 変化を直線と仮定して各測定ポイント間で積分を取り、DH 試験時間ごとに合算したものである。なお、コンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート (1H) のデータはバックシートメーカーから提供された水蒸気透過率のデータから求めたものである。

表 II-9-1. バックシートの初期の水蒸気透過率

バックシート呼称	1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G	1H	PET
水蒸気透過率 WVTR [g/m ² ·day]	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	6.0

表 II-9-1、図 II-9-1 から、バリアバックシート 1A、1C、1G とコンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート 1H の水蒸気バリア性能は DH 試験を経ても初期に比べて大きく低下しないことが分かる。バリアバックシート 1B は初期の DH 試験の段階で水蒸気バリア性能が PET 単膜に近いレベルまで低下している。バリアバックシート 1D、1E、1F は DH 試験の初期では水蒸気バリア性能を維持するが、DH 試験の累積に伴って徐々に水蒸気バリア性能が低下することが分かる。

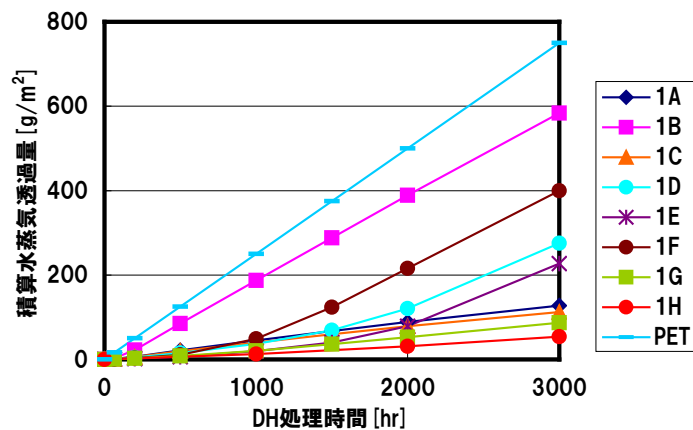


図 II-9-1. バックシートの積算水蒸気透過量の推移

薄膜 a-Si 太陽電池セルはコンソーシアム標準品を使用した。コンソーシアム標準作業に準じてタブ線の取り付け、部材の積層、真空ラミネート、アルミフレームの取り付けを行い、評価用モジュールを作製した。モジュールからの配線の取り出しは端子箱を使用せず、モジュール端部から直接タブ線を取り出す方法とした。モジュールの構成と作製したモジュールの外観の一例を図 II-9-2 に示す。

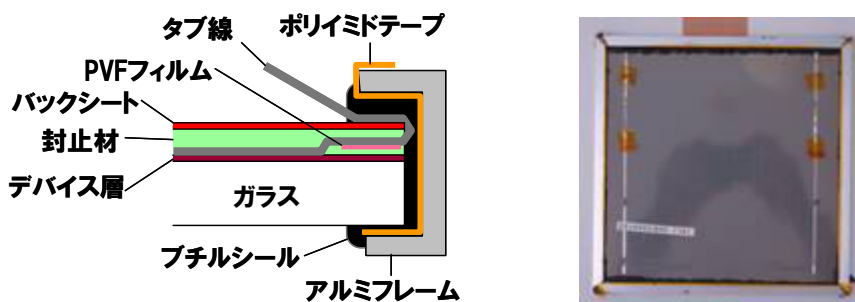


図 II-9-2. 評価モジュールの構造と外観

II-10. モジュール内への水分浸入の確認

バックシートの水蒸気バリア性能とモジュール内に浸入する水分の関係を確かめるため、水分と反応して青色から赤色に色が変わる乾燥度試験紙（アドバンテック東洋製）を封入し、EVA を封止材に用いたダミーモジュールを作製して DH 試験を行った。図 II-10-1 にダミーモジュールの構成を示す。

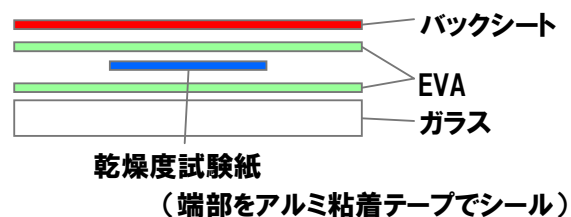


図 II-10-1. 乾燥度試験紙封入ダミーモジュール

図 II-10-2 に水蒸気バリア特性が異なる 3 種類のバリアバックシートを用いて作製したダミーモジュールと、比較としてアルミ箔をバックシートとして用いたダミーモジュールの DH 試験の経時における変化を示す。

図 II-10-2 からバリアバックシートの水蒸気バリア性能が低いものほど乾燥度試験紙が元の青色から赤色に早く変色しており、水蒸気バリア性能が低いバックシートを用いたモジュールではモジュール内部への水分浸入が速いことがわかる。水蒸気バリア性能が極めて高いアルミ箔を用いたサンプルでは、試験紙の色の変化はなかった。本評価に用いたバリアバックシートの中では中間の水蒸気バリア性能を持つバリアバックシート 1D のサンプルでは DH 処理 65 時間の時点で試験紙部分に膨らみが生じはじめ、その後、バリアバックシート 1D、1E のサンプルでは DH 処理 144 時間の時点ですべての試験紙部に膨らみが生じた。水蒸気バリア性能が最も低いバリア

バックシート 1B のサンプルはモジュール内への水分浸入が最も速く、試験紙が赤色に変色しているにもかかわらず、DH 処理 209 時間時点でも試験紙部に膨らみは生じなかった。膨らみは試験紙内部に溜まった気体による内圧で生じたものであり、モジュール内の何等かの反応により気体が生成したものと考えられた。

このダミーモジュールの試験では、封止材として EVA を使用している。EVA はエチレンと酢酸ビニルの共重合体からなり、分子内に官能基としてアセチルエステル基を有する。DH 試験のような湿熱環境下で水分が存在すると、アセチルエステル基のエステル結合が加水分解して酢酸が発生すると考えられる。そこで、1D、1E のサンプルで生じた膨らみ部分内部の気体をガス分析したところ、高濃度の二酸化炭素ガスが検出され、検出が予想された酢酸は検出されなかった。膨らみ内部の気体から酢酸が検出されず、二酸化炭素が検出された原因については以下のように考察している。本試験に使用した乾燥度試験紙は紙に塩化コバルトを含浸させたものであり、コバルト化合物と水分が反応して呈する色の変化で乾燥度を測るものである。コバルト化合物存在下では、酢酸等の有機物の酸化反応が促進されることが知られている。今回のダミーモジュール試験では、モジュール内に浸入した水分により EVA のアセチルエステル基が加水分解して酢酸が生成するものの、乾燥度試験紙に接した酢酸は、コバルト化合物の作用により速やかに酸化されて二酸化炭素ガスとなり、その内圧によって膨らみを生じたものと考えられる。水蒸気バリア性能が最も低いバリアバックシート 1B を用いたダミーモジュールで膨らみが生じなかったのは、バックシートのバリア性能が低いことで、内部で生成した二酸化炭素ガスがバックシートを透過し、膨らみを生じるほど内圧が高まらなかったためと考えられる。

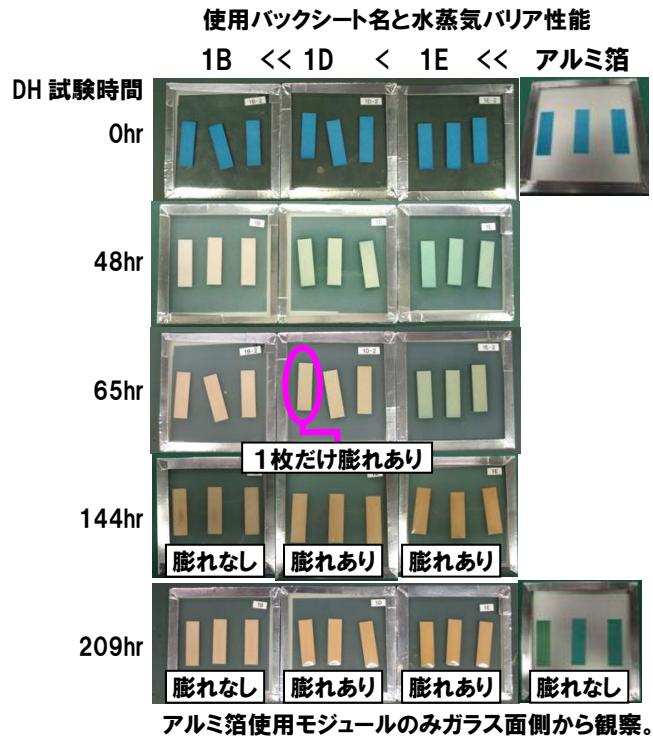


図 II-10-2. 乾燥度試験紙封入ダミーモジュールの DH 試験経時変化

II-11. EVA 封止モジュール内の酢酸定量

前項でも述べたように、EVA 封止モジュールに水分が浸入した場合にはモジュール内に酢酸が生成すると考えられ、酢酸量はバックシートの水蒸気バリア性能に影響されると考えられた。そこで、モジュールを DH 処理した場合のモジュール内の酢酸量とバックシートの水蒸気バリア性能の関係を評価した。

4 種のバックシートを用い、バックシート/EVA/ガラスの積層構成で端部を耐熱アルミ粘着テープでシールしたダミーモジュールを作製し、85 °C/85%RH の DH 試験を 65 時間もしくは 500 時間行った。DH 試験後のモジュールから取り出した EVA を純水抽出してイオンクロマトグラフィーで酢酸イオンを測定することで、モジュール内の EVA 中に生成、滞留している酢酸量の定量を行った。図 II-11-1 に、使用したバックシートの DH 経時の WVTR 変化とダミーモジュールのバックシート面積から求めた積算水蒸気透過量と、ダミーモジュール内の EVA に含まれる酢酸量の関係を示す。

いずれのバックシートを用いた場合も、DH 試験の経過による積算水蒸気透過量の増加につれて EVA 中の酢酸量は増加する傾向にあるが、水蒸気バリアフィルムを積層したバリアバックシート 3 種の中では、水蒸気バリア性能が低いバックシートを用いるほど、積算水蒸気透過量の増加に対する酢酸量の増加の傾きが小さくなる傾向が認められた。バリアフィルムを含まない PET フィルム単膜をバックシートとした場合の積算水蒸気透

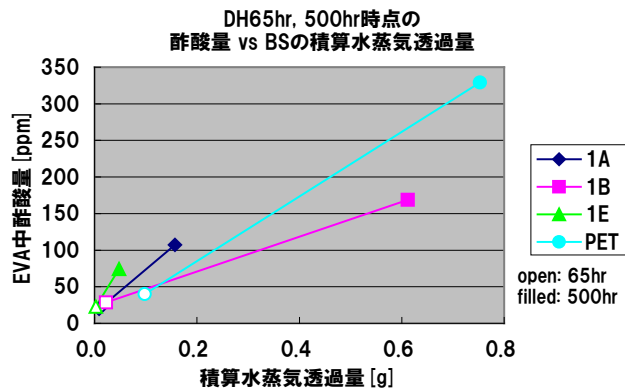


図 II-11-1. 積算水蒸気透過量と EVA 中の酢酸濃度の関係

過量と酢酸量の関係はバリアバックシートとはやや異なる。バックシートのバリア性能によって積算水蒸気透過量の増加と酢酸量の変化の関係が異なる原因として、生成した酢酸がバックシートを透過することによるモジュール内の酢酸滞留量の減少や DH 試験中の高温条件下での水蒸気透過率と 40°C/90%RH で測定している WVTR とのズレ、モジュール内の水分量によるバックシートの水蒸気透過への影響などの可能性が考えられる。

II-12. 薄膜アモルファスシリコン太陽電池モジュールの DH 試験

上記の検討を踏まえ、モジュール内への水分浸入とそれに伴う EVA の加水分解で生成する酢酸がモジュール劣化に及ぼす影響を評価するため、バリア特性が異なるバックシートと、EVA および他の数種の封止材を用いて薄膜 a-Si モジュールを作製した。作製したモジュールは初期の発電特性の評価、EL 画像の撮影、外観の確認の後、DH 試験に投入し、DH 処理時間 500 時間ごとにモジュールを取り出して発電特性、EL 画像、外観変化の評価を行った。

II-12-1. EVA 封止モジュールの DH 試験

水蒸気バリア特性が異なる 5 種類のバリアバックシート (1B、1C、1D、1F、1G) の他、バックシート 1H、PAP および PET フィルムを使用し、コンソーシアムの標準部材である EVA を封止材に用いた薄膜 a-Si モジュールを作製し、DH 試験を行った。

図 II-12-1-1 に DH 試験 500 時間ごとに評価した発電特性の主要パラメータの変化の推移を、初期値を 100 とした保持率で示す。

図 II-12-1-1 から EVA 封止モジュールで DH 試験による発電性能の低下が最も早く現れたのはバリア層を含まない単層の PET フィルムをバックシートに用いた水準 (25E746、25E747) で、DH 試験 1000 時間で出力が初期の 60%以下まで低下した。

次に発電性能の低下が早いのはバリアバックシート 1B を用いた水準 (24C922、24C923) であった。バリアバックシート 1B はバックシート単体での DH 試験で、初期の 500 時間で水蒸気バリア性能が PET 単層フィルム並みに低下したもので、バリア性能の耐湿熱性が低いバックシートと言える。

以下、バリアバックシート 1F (24C928、24C929)、バリアバックシート 1D (24C926、24C927)、バリアバックシート 1C (24C924、24C925)、バリアバックシート 1G (24C930、24C931) の順に発電性能が低下した。バリアバックシート 1F、1D はバックシート単体の評価では DH 試験を進めると水蒸気バリア性能が大きく低下する特徴があり、発電特性の低下がバックシートの水蒸気バリア性能の低下に対応している。

コンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート 1H はバックシート単体では長時間の DH 試験を経ても水蒸気バリア性能の低下が小さい特徴を有するが、バックシート 1H を使用したモジュール (24C932、24C933) では、DH 試験 1000 時間までは発電性能の低下はほとんど見られないものの、1500 時間で急激に出力が低下した。バックシート 1H を用いたモジュールの DH1500 時間前後での急激な発電性能低下は追加の水準 (24E206、24J376、24J377) でもほぼ再現される現象である。

コンソーシアム標準のアルミ箔ラミネートバックシート (PAP) を用いたモジュールは DH 試験 2000 時間までは出力の低下はなく、DH2000 時間以降の出力低下も緩やかであった。

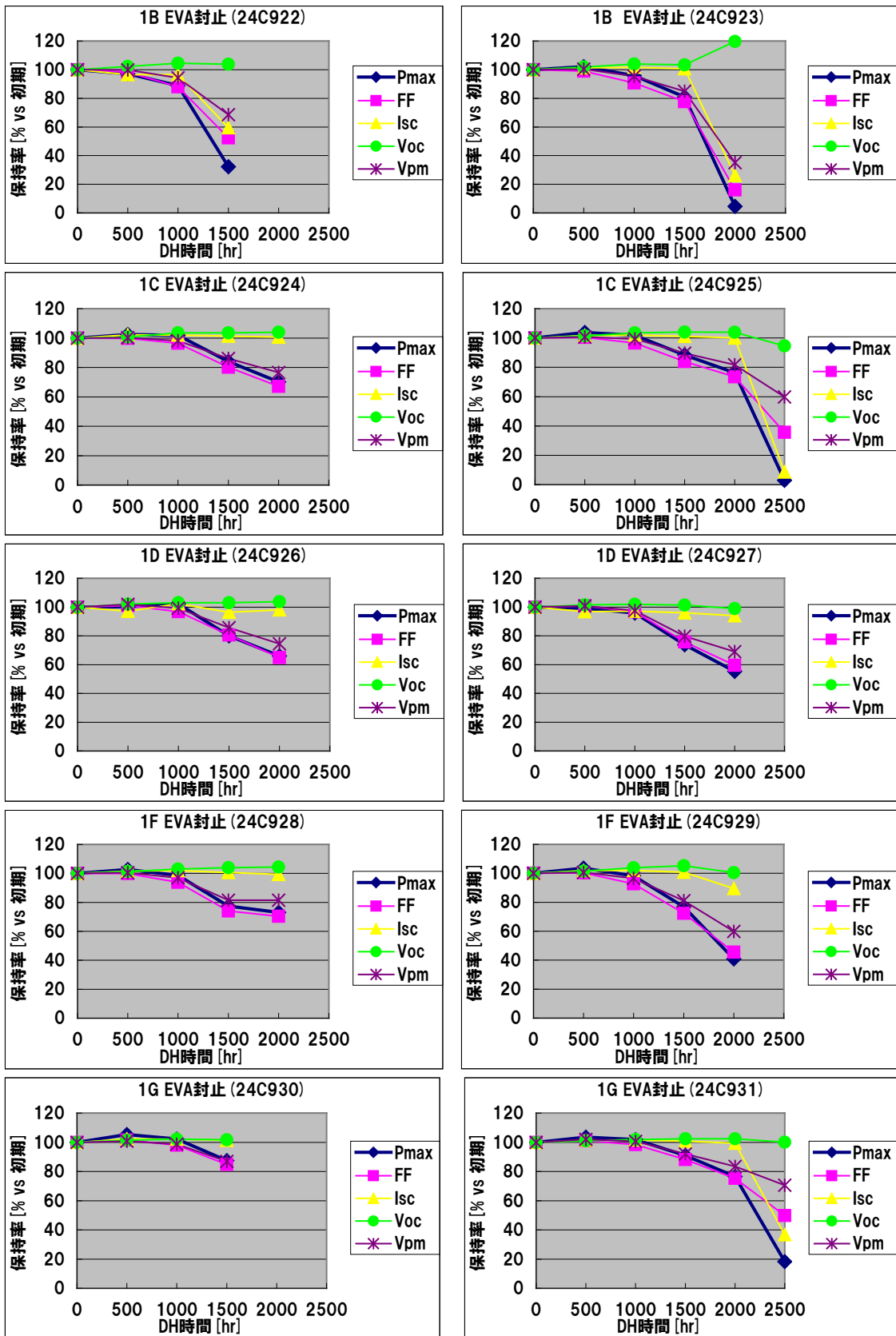


図 II-12-1-1. EVA 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化

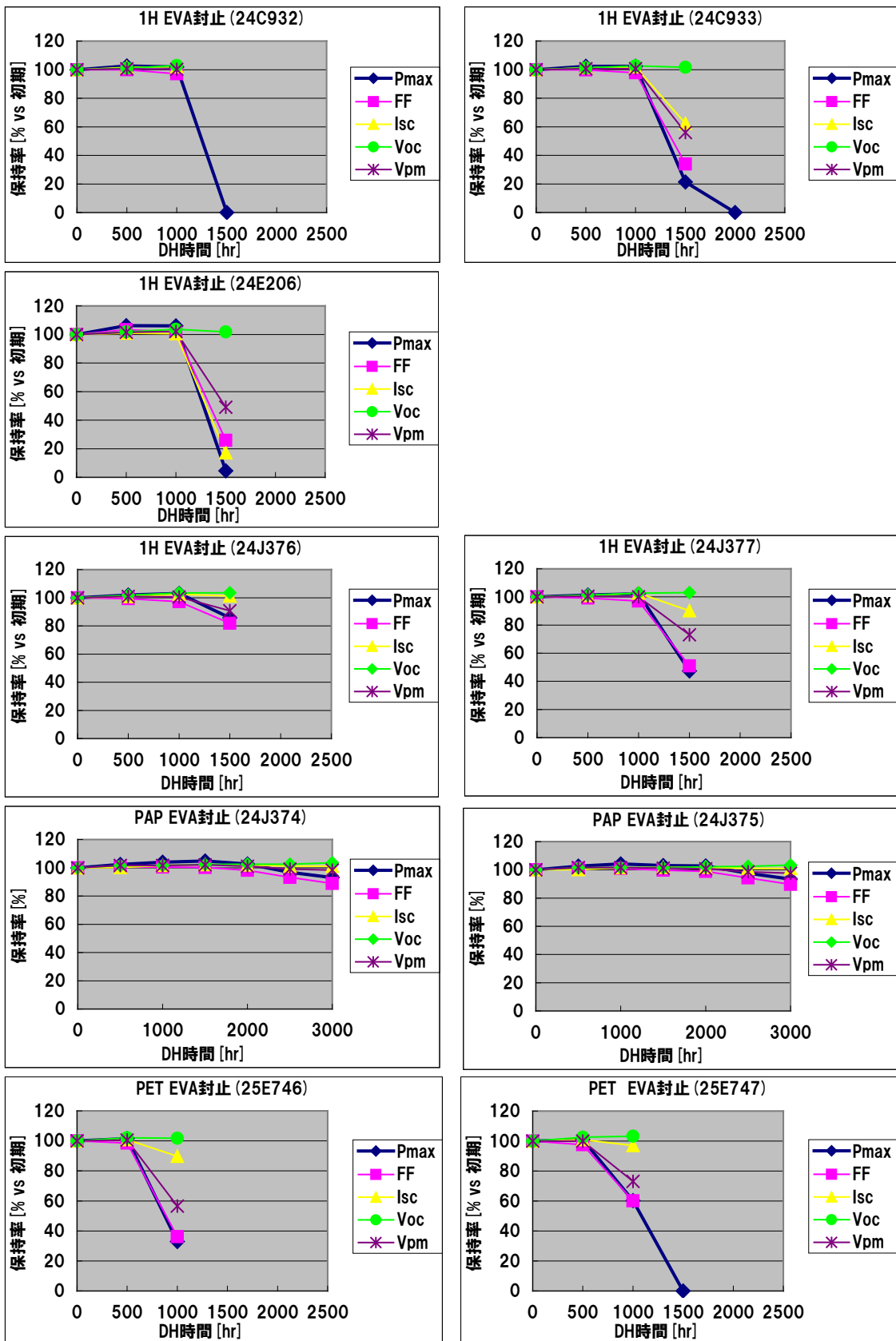


図 II-12-1-1 (つづき) . EVA 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化

II-12-2. PVB 封止モジュールの DH 試験

水蒸気バリア特性が異なる 4 種類のバリアバックシート (1A、1B、1F、1G) の他、バックシート 1H、PAP および PET フィルムを使用し、封止材には水分が浸入しても酢酸の生成が少ないとされる PVB を用いた薄膜 a-Si モジュールを作製し、DH 試験を行った。

図 II-12-2-1 に DH 試験 500 時間ごとに評価した発電特性の主要パラメータの変化の推移を、初期値を 100 とした保持率で示す。

PVB 封止モジュールでは、バリア層を含まない単層の PET フィルムをバックシートに用いた場合 (24C880、24C881) にも、EVA 封止モジュールのように DH1000 時間程度の早い時点での発電特性の低下はなく、他の 4 種のバリアバックシートの水準も含めて、バックシートの水蒸気バリア性能による発電特性の低下に EVA 封止モジュールほどの違いは見られなかった。コンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート 1H を用いた水準では、n=2 のサンプルのうち一方 (24J370) で、EVA 封止モジュールと同様に DH1500 時間で急激な発電性能低下が見られた。

コンソーシアム標準アルミ箔ラミネートバックシート (PAP) を用いた水準 (24J368、24J369) は EVA 封止の場合に見られた DH2000 時間以降の出力低下もなく、DH 試験を 3000 時間まで行っても発電性能はほとんど変化しなかった。

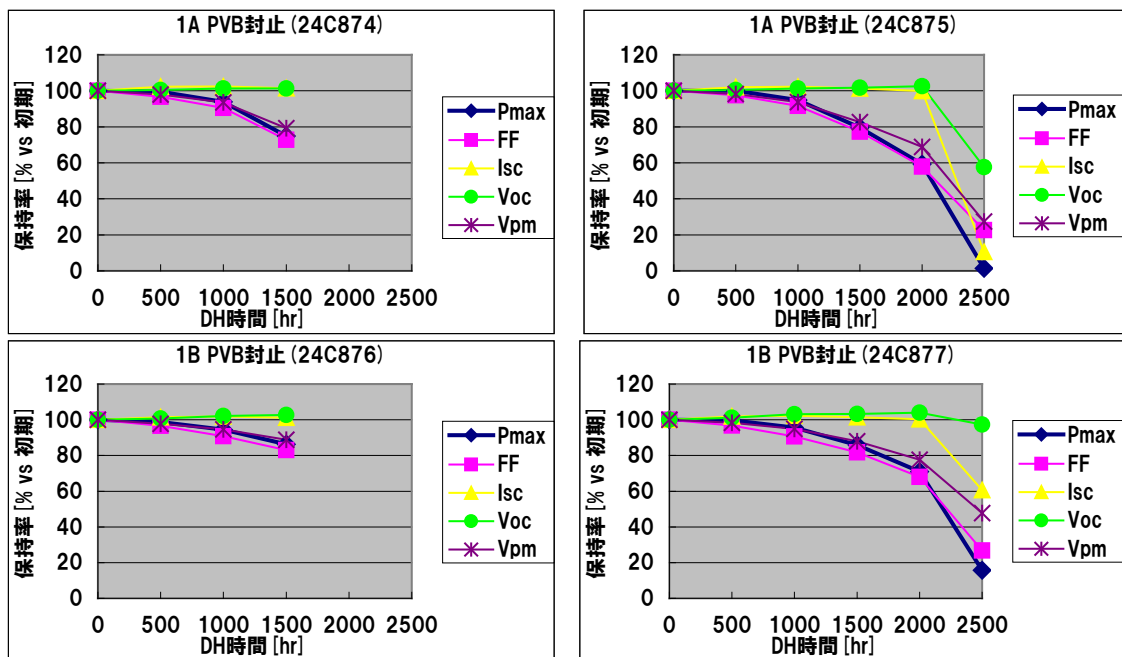


図 II-12-2-1. PVB 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化

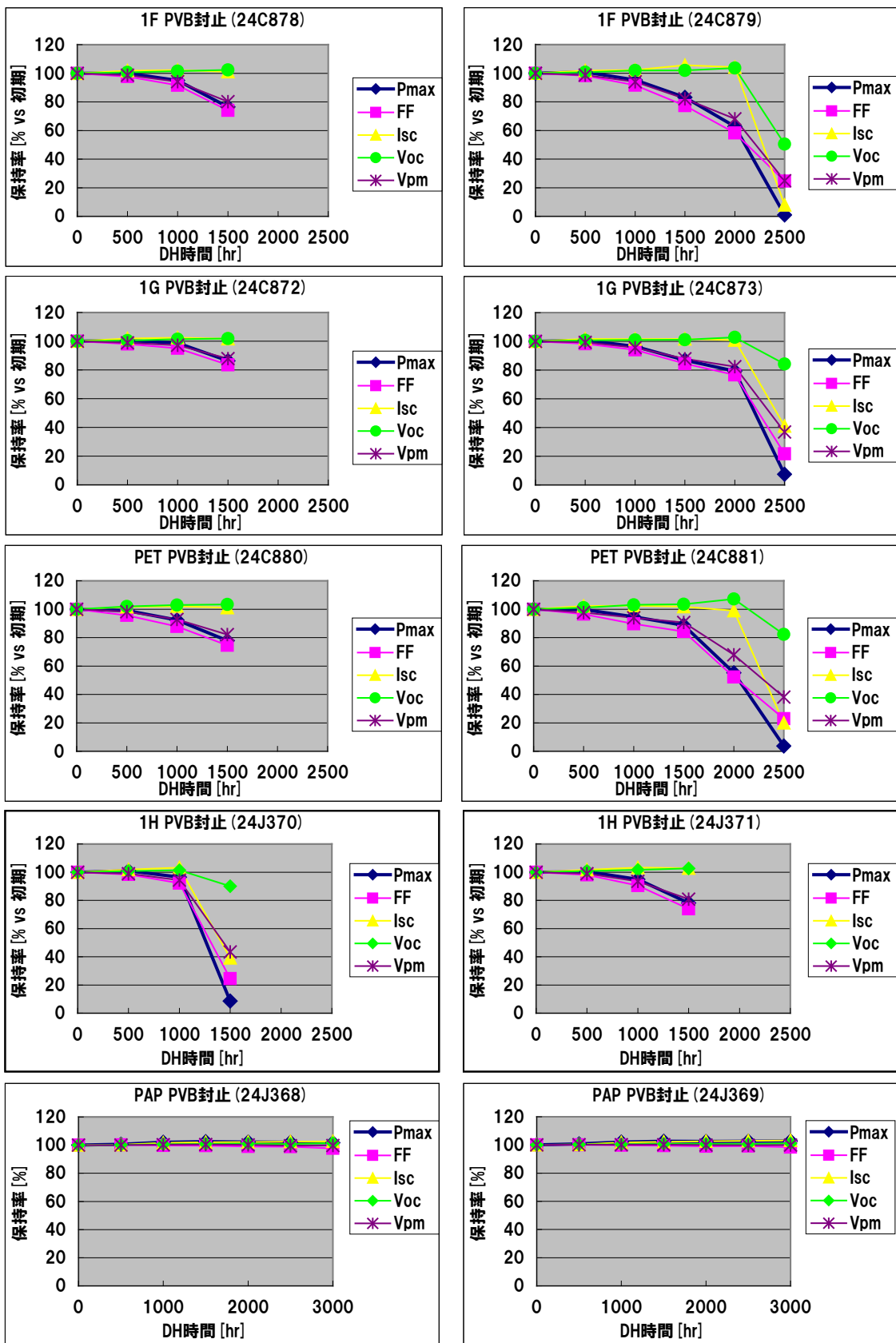


図 II-12-2-1 (つづき) . PVB 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化

II-12-3. EVA 封止モジュールと PVB 封止モジュールの劣化状態の解析

図 II-12-3-1、図 II-12-3-2 は、それぞれ前項の結果から EVA 封止モジュール、PVB 封止モジュールの DH 試験に伴う最大出力 Pmax の変化をまとめたものである。

EVA 封止モジュールでは、水蒸気バリア性能が低いバックシートを用いたモジュールほど、出力低下が早いものに対して、PVB 封止モジュールは PET 単膜や 1B といったバリア性能が低いバックシートの水準でも、バリア性能が高いバックシート 1G に近い出力低下の推移を示した。PVB 封止モジュールは、PET 単膜レベルの水蒸気バリア性能が低いバックシートでも無機蒸着バリア層を持つバリアバックシート並みの耐湿熱性を確保できるメリットがあると言える。EVA 封止モジュールでは、バックシートの水蒸気バリア性能が低いほど、モジュール内への水分浸入量が多く、EVA の加水分解による酢酸が多く発生してモジュールの劣化に寄与している可能性が示唆される。一方、バックシート 1G 程度の水蒸気バリア性能で EVA 封止と PVB 封止で劣化の差が小さくなり、PVB 封止モジュールでも出力が低下してしまうことは、酢酸以外の劣化因子が関与している可能性を示唆している。DH 試験による劣化で出力が大きく低下した PVB 封止モジュールでは、同レベルに出力低下した EVA 封止モジュールにはあまり見られない開放電圧 Voc の低下がしばしば見られるという特徴もあり、PVB 封止モジュールの特異な劣化因子の可能性については、モジュールの破壊分析も含めた検討を進めている。

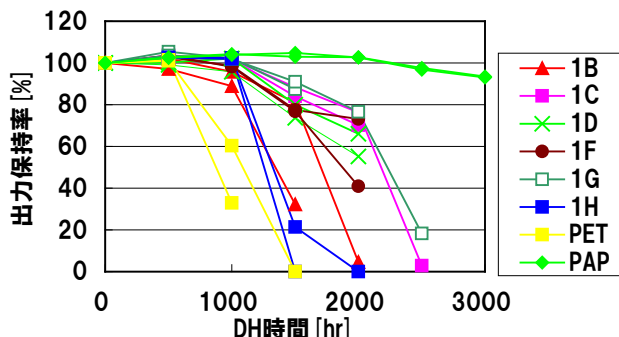


図 II-12-3-1. EVA 封止モジュールの出力変化

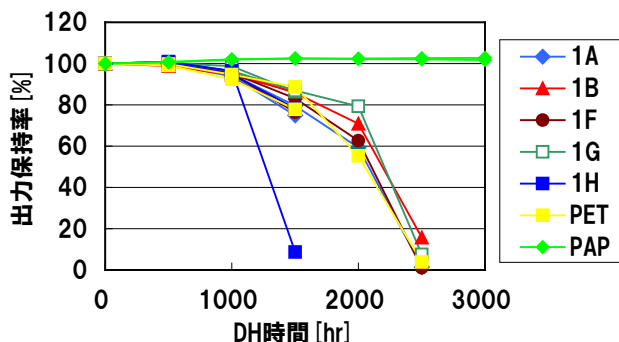


図 II-12-3-2. PVB 封止モジュールの出力変化

コンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート 1H はバックシート単体での DH 試験ではバリアバックシート 1G と同等以上のバリア性能を維持するが、バックシート 1H を用いたモジュールは EVA 封止モジュール、PVB 封止モジュールともに DH1500 時間前後で急激に出力が低下している。モジュールに組み込んで DH1500 時間を経過したバックシート 1H の外観を図 II-12-3-3 に示す。バックシートを構成する内部の部材（シリカ蒸着バリアフィルム？）のほぼ全面に細かい波打ち状のシワが発生しており、さらに、波打ち状のシワに直交する方向に走るスジも見える。このスジはバックシート内部の部材のクラックによるものと考えられる。

バックシート 1H は単体では水蒸気バリア性能の耐湿熱性に優れるが、モジュールにラミネートされた状態で DH 処理されるとバックシート構成部材の熱収縮などによる応力を生じてバックシート内部の部材にシワが発生したと考えられ、このような状態ではシリカ蒸着バリア層に欠陥が発生していると考えられる。さらにバックシート 1H を構成する部材が

DH 試験により劣化して脆化し、応力によりクラックを生じたと考えられる。バックシート 1H は DH1000 時間から 1500 時間の間でバリア層の欠陥やクラックの発生によりバックシートとしてのバリア性能が PET 単膜にも劣るレベルまで急激に低下した状態になり、大量の水蒸気がモジュール内に浸入することで DH1500 時間で発電特性の急激な低下を招いたと考えられる。

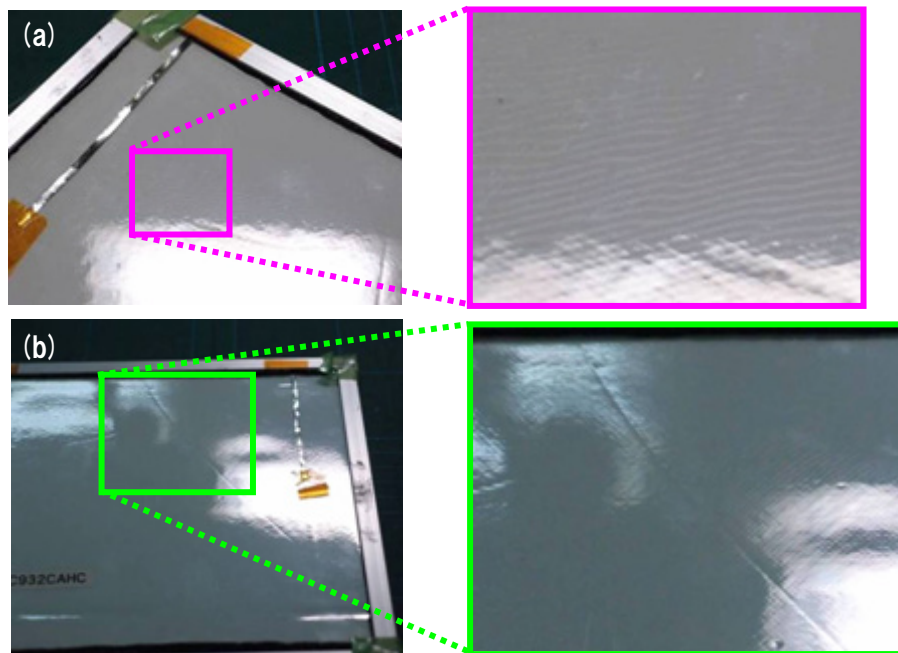


図 II-12-3-3. DH 試験 1500 時間経過したモジュールのバックシート 1H
(a)シワ (b)スジ (クラック)

アルミ箔ラミネートバックシート PAP を用いたモジュールの DH 耐性はいずれも非常に高いが、それでも EVA 封止の場合には、DH2000 時間以降、緩やかな発電特性の低下が見られた。

図 II-12-3-4、図 II-12-3-5 にそれぞれ EVA 封止モジュール、PVB 封止モジュールの DH 試験時間ごとの EL 画像を示す。

図 II-12-3-4、図 II-12-3-5 から、EVA 封止、PVB 封止に関わらず、発電特性の低下が始まったモジュールでは EL 発光が弱まった暗部が発生しており、発電特性の低下の進行に伴って暗部の拡大、暗部の輝度低下が顕著になる様子が確認できる。特に発電特性が大きく低下したモジュールでは、EL 発光がまったくない無発光部ができたり、モジュール全面で発光しない状態となったりしている。前項までの結果から、EL 像の暗部発生を伴う発電特性低下の初期段階は主に最適電圧 V_{pm} の低下を伴う曲線因子 FF の低下による出力 P_{max} の低下であり、モジュールの直列抵抗 R_s の増加が初期の発電性能低下の主な要因と考えられる。劣化が進行して無発光部が発生したモジュールは短絡電流 I_{sc} の低下も見られることから、無発光部は発電に寄与しなくなっていると考えられる。

バリアバックシート 1A~1G、コンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート 1H、PET 単膜をバックシートに用いたモジュールでは、劣化による EL 暗部はモジュール面内にランダムに発生しており、主にモジュール端部のシール部分ではなくバックシート面から透過、浸入した水分の影響で劣化が起こっていると考えられる。

アルミ箔ラミネートバックシート PAP を用いたモジュールはモジュール面内からランダムに発生する劣化はなく、バックシート PAP の水蒸気バリア性能が極めて高いことが分かる。しかし、EVA 封止モジュールでは DH 試験 2000 時間以降、発電性能の低下とともにモジュールの上下端部（スクライブ線を縦に見たとき）から EL 暗部が拡大しており、モジュール端部からの水分浸入によるモジュール劣化の影響が認められる。バックシート 1H 使用の PVB 封止モジュールでもモジュール端部からの水分浸入は EVA 封止モジュールと同様に起こっていると考えられるが、発電性能の低下、EL 暗部の拡大はほとんど見られず、EVA 封止モジュールの劣化には水分だけでなく、EVA の加水分解による酢酸の生成も影響していることを示していると考えられる。

モジュールID	24C922	24C923	24C924	24C925	24C926	24C927	24C928	24C929	24C930	24C931	24C932	24C933	24J374	24J375	25E746	25E747
バックシート水準	1B		1C		1D		1F		1G		1H		PAP		PET	
初期 EL 画像																
DH500hr 時 EL 画像																
DH1000hr 時 EL 画像																
DH1500hr 時 EL 画像																
DH2000hr 時 EL 画像																
DH2500hr 時 EL 画像																
DH3000hr 時 EL 画像																

図 II-12-3-4. EVA 封止モジュールの DH 試験による EL 画像変化

モジュールID	24C874	24C875	24C876	24C877	24C878	24C879	24C872	24C873	24C880	24C881	24J370	24J371	24J368	24J369
バックシート水準	1A		1B		1F		1G		PET		1H		PAP	
初期 EL 画像														
DH500hr 時 EL 画像														
DH1000hr 時 EL 画像														
DH1500hr 時 EL 画像														
DH2000hr 時 EL 画像														
DH2500hr 時 EL 画像														
DH3000hr 時 EL 画像														

図 II-12-3-5. PVB 封止モジュールの DH 試験による EL 画像変化

モジュールの劣化状態を確認するため、デジタルマイクロスコープを用いて、ガラス基板側からモジュール外観の拡大観察を実施した。

図 II-12-3-6、図 II-12-3-7 にそれぞれ DH 試験で劣化した EVA 封止モジュール、PVB 封止モジュールの EL 像とマイクロスコープ像を示す。EVA 封止モジュールは、発電特性の低下が小さい時点では外観上の特徴はあまり見られないが、発電特性が大きく低下したモジュールでは、特に EL 像の暗部に当たる部分でデバイス層に丸い腐食痕が連なったような外観を呈することが分かる。コンソーシアム標準の薄膜 a-Si モジュールには 3 本で一組のスクライプ線があるが、そのうち、真ん中のスクライプ線 (P2) に着目すると、劣化が進んだ部位では未劣化の部位よりもスクライプ線 P2 が明るく見える点も特徴である。

PVB 封止モジュールでは、発電特性の低下がかなり進んだモジュールでも、EVA 封止モジュールのような腐食痕状の外観は見られない。EVA 封止モジュールの腐食状外観は EVA の加水分解で生成した酢酸によってモジュールを構成するデバイス層のいずれかの部位が腐食劣化したものと考えられる。

ID	封止材/BS DH時間 出力保持率	EL	ガラス基板側マイクロスコープ像			スクライプP2の詳細	
24C922	EVA/1B DH1500 RPmax=32.2%						
24C924	EVA/1C DH2000 RPmax=70.2%						
24C925	EVA/1C DH2500 RPmax=2.9%						
24C930	EVA/1G DH1500 RPmax=87.4%						
24C931	EVA/1G DH2500 RPmax=18.3%						
24C932	EVA/1H DH1500 RPmax=0%						
24C933	EVA/1H DH2000 RPmax=0%						

図 II-12-3-6. EVA 封止モジュールのマイクロスコープ観察結果

ID	封止材/BS DH時間 出力保持率	EL	ガラス基板側マイクروسコープ像		
24C875	PVB/1A DH2500 RPmax=1.4%				
24C877	PVB/1B DH2500 RPmax=15.8%				
24C881	PVB/PET DH2500 RPmax=3.8%				

図 II-12-3-7. PVB 封止モジュールのマイクروسコープ観察結果

劣化した EVA 封止モジュール 24C922 (バリアバックシート 1B 使用、DH1500 時間) の裏面封止材を剥がし、デバイス層の劣化状態を観察した。結果を図 II-12-3-8 に示す。EL 発光がある部分では裏面電極層は基板側に密着しており、容易には剥離しないが、EL 暗部に向かうにつれて基板側のシリコン層と裏面電極層の間が剥離し、裏面電極層が EVA 側に転写してしまう箇所が増え、その剥離部の形状は、マイクروسコープで観察された丸い腐食痕状の形状と一致した。さらに劣化が進んだ部位では、裏面電極層がシリコン層から完全に剥離していた。また、封止材を剥離したモジュールの内部からは酢酸臭が感じられた。

24C922 DH1500hr EL 像

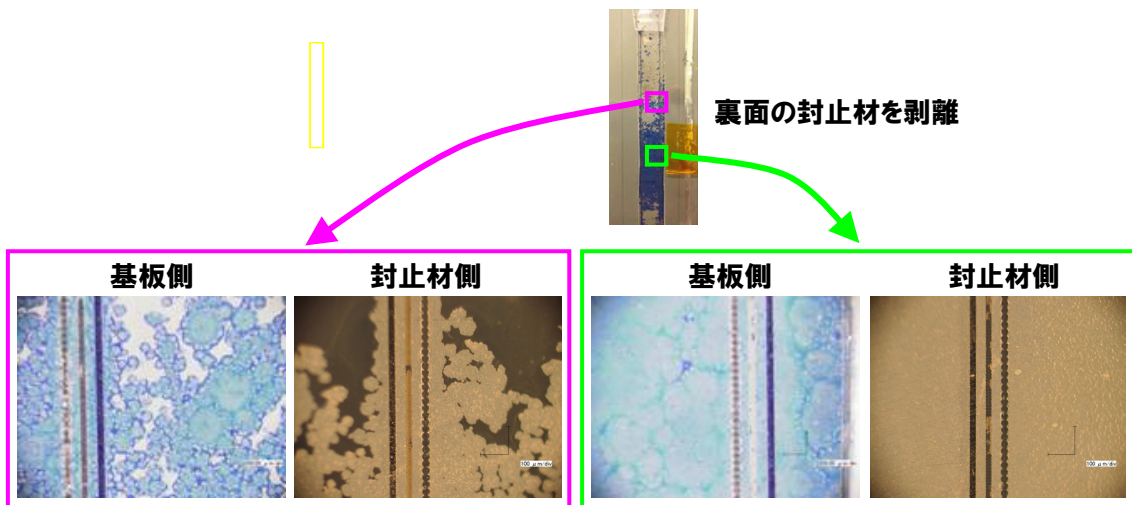


図 II-12-3-8. 劣化した EVA 封止モジュールの内部観察

コンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールのデバイス構成に関する詳細は不明だが、薄膜 a-Si モジュールの一般的な構成や、コンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールのスクライプ部の形状などから推定される積層構成などから、シリコン層と裏面電極の間には導電性酸化層（導電層）が存在していると推定される（図 II-12-3-9）。EVA 封止モジュールで見られる腐食痕状の劣化外観は、EVA が加水分解して生成した酢酸によりこの導電層が腐食溶解して生じたもので導電性は低下していると考えられる。さらに劣化が進んでシリコン基板と裏面電極層の間で導電層を介した密着性が失われると裏面電極層の剥離が生じるため、その部位の電流の取り出しができない状態になると考えられる。

EVA 封止モジュールの劣化部位で見られたスクライプ線 P2 が明るく見える現象も、P2 部のガラス基板側の透明電極層と、裏面電極層の間の導電層が酢酸の影響で腐食劣化し、屈折率の変化や剥離による空隙の発生などによってガラス側から見たときの光の反射率が変化して明るさが変わって見えたものと考えられる。

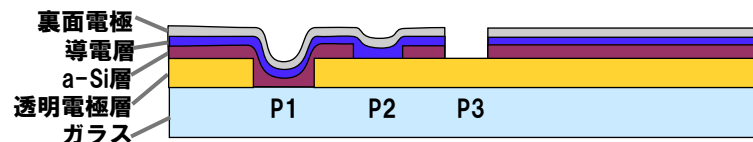


図 II-12-3-9. 薄膜 a-Si モジュールのスクライプ部周辺の推定積層構成モデル

II-12-4. 他の封止材を用いたモジュールの DH 試験

前項までの検討から、EVA を封止材として用いた薄膜 a-Si モジュールの DH 試験では、モジュール内に浸入した水分によって EVA のアセチル基が加水分解されることで発生する酢酸がモジュールの劣化、発電特性低下に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。一方で、PVB は酢酸の発生が少ないとされるが、バックシートの水蒸気バリア性能があるレベルの領域では、DH 試験を行った場合の EVA 封止モジュールと PVB 封止モジュールの出力低下は類似の推移を示しており、酢酸の影響が少ない PVB 封止モジュールの出力低下要因については、モジュールの破壊分析による解析を進めているところである。

太陽電池モジュールの封止材としては、EVA や PVB 以外にも多くの種類の封止材の使用が検討されており、そのうちいくつかはすでに実用化されている。それらの封止材の中には、酢酸が発生しないとされるものもある。

そこで、封止材から発生する酢酸が存在しない場合のバックシートのバリア性能の違いによる水分浸入量の違いの影響など、モジュールの劣化挙動を評価するため、酢酸が発生しない封止材として、コンソーシアム内で熱可塑性樹脂 (TPP) 並びにポリオレフィン (PO) と呼ぶ 2 種類の封止材を用いてモジュールを作製し、DH 試験を実施した。

II-12-4-1. 熱可塑性樹脂封止モジュールの DH 試験

(1) 薄膜 a-Si モジュールを用いた熱可塑性樹脂封止モジュールの DH 試験

EVA や PVB の場合と同様にコンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールを用い、水蒸気バリア性が異なるバックシートを用いて熱可塑性樹脂封止モジュールを作製し、DH 試験を実施した。

最初の 500 時間の DH 試験を終えた時点で発電特性を測定したところ、使用したバックシートの種類に関わらずすべてのサンプルで出力が得られなくなっていた。EL 画像測定でも全面がかなり暗くなっており、ところどころわずかに EL 発光が観察されるだけとなっていた (図 II-12-4-1-1)。DH 試験実施前の初期特性の評価では、発電特性、EL 画像とも異常は見られなかったことから、最初の 500 時間の DH 試験中に深刻な劣化が生じたと考えられた。

モジュールID	24E195	24E196	24E197	24E198	24E199	24E200	24E201	24E202	24E203	24E204
バックシート	1B		1C		1F		1G		PET	
初期 EL画像										
DH500hr時 EL画像										

図 II-12-4-1-1. TPP 封止薄膜 a-Si モジュールの EL 画像

熱可塑性樹脂封止薄膜 a-Si モジュールの劣化状態を確認するため、マイクロスコープによる外観観察を行った (図 II-12-4-1-2)。水蒸気バリアフィルム層のない PET 単膜をバックシートに用いたモジュールのセル面内にも、劣化した EVA 封止モジュールの腐食痕状のような異常は特に見られなかった。ただし、スクライブ P2 部分は未劣化品に比べて明るく見えたことから、スクライブ P2 部に裏面電極の剥離などの異常が生じている可能性が考えられた。

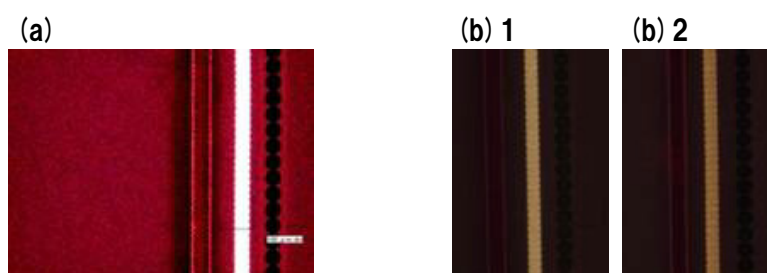


図 II-12-4-1-2. DH500 時間済み TPP 封止薄膜 a-Si モジュールの外観 (a)24E203 のセル面、(b)24E203(1)と未劣化モジュール(2)のスクライブ P2

DH 試験 500 時間済み熱可塑性樹脂封止薄膜 a-Si モジュールのスクライブ部の異常を確認するため、封止材、バックシートを剥離したところ、スクライブ P2 の裏面電極がセル側から剥離し、封止材側に転写していた (図 II-12-4-1-3)。この結果より、熱可塑性樹脂封止薄膜 a-Si モジュールは最初の DH 試験 500 時間の間にスクライブ P2 部の裏面電極とガラス基板側の透明電極との間の密着性が低下し、導通がなくなることで発電できなくなったものと考えられた。

熱可塑性樹脂封止材はモジュールにラミネートしたときの裏面電極との密着性が高く、かつ、常温時には EVA や PVB に比べて硬い。そのため、DH 試験による温度変化で生じる裏面電極への応力変化が特にスクライブ部のような変形部で強く働き、コンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールとの組み合わせでは、スクライブ部の裏面電極がこの応力に耐えられずに剥離を生じたと考えられた。

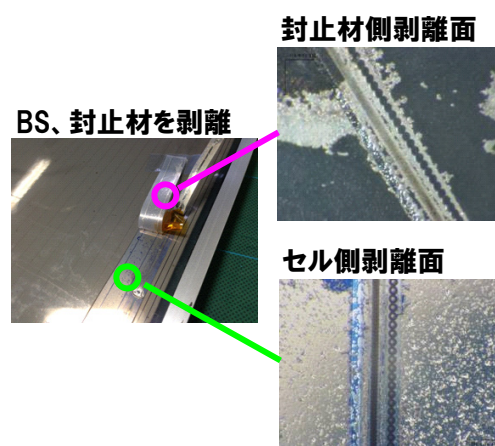


図 II-12-4-1-3. DH500 時間済み TPP 封止薄膜 a-Si モジュールの内部

コンソーシアム第Ⅱ期の後半では、標準の薄膜 a-Si モジュールに加えて、薄膜シリコンタンデムモジュールも標準モジュールとして使用できることになり、熱可塑性樹脂封止材とコンソーシアム標準薄膜タンデムモジュールの組み合わせであれば裏面電極の剥離による DH 試験初期の劣化が起こりにくい可能性があり、検討を行った。

(2) 薄膜シリコンタンデムモジュールを用いた熱可塑性樹脂封止モジュールの DH 試験

新しいコンソーシアム標準モジュールである薄膜シリコンタンデムモジュールを使用し、バックシートは水蒸気浸入の影響を見るためにバリアフィルム層を持たない PET 単膜および水蒸気バリア性能の耐湿熱性に優れたバリアバックシート 1G を用いて熱可塑性樹脂封止モジュールを作製して DH 試験を実施した。比較のため、同じ薄膜シリコンタンデムモジュールを使用し、バックシートはバリアバックシート 1G に近い水蒸気バリア特性を持つバリアバックシート 1C を用いて、封止材を EVA としたモジュールも作製して、同時に DH 試験を行った。

図 II-12-4-1-4 に DH 試験の経過に伴うモジュールの最大出力の推移を初期の最大出力に対する保持率で示した。図 II-12-4-1-5 には、各モジュールの EL 画像の推移を示した。

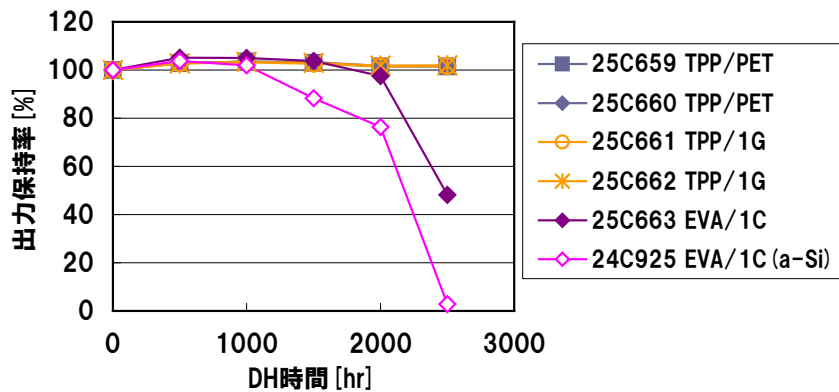


図 II-12-4-1-4. TPP 封止薄膜シリコンタンデムモジュールの DH 試験による出力保持率の推移

熱可塑性樹脂封止薄膜シリコンタンデムモジュールは、DH 試験 2500 時間を経過しても出力は低下せず、バックシートの水蒸気バリア性能の違いによる影響も見られない。EL 画像でも熱可塑性樹脂封止モジュールでは DH 試験 2500 時間でも暗部の発生は見られない。EVA を封止材に用いた場合に、コンソーシアム標準薄膜シリコンタンデムモジュールは、従来のコンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールに比べて出力の低下が始まる

モジュールID	25C659	25C660	25C661	25C662	25C663	24C925
モジュール	タンデム					a-Si
封止材/バックシート	TPP/PET		TPP/1G		EVA/1C	
初期						
DH500hr						
DH1000hr						
DH1500hr						
DH2000hr						
DH2500hr						

図 II-12-4-1-5. TPP 封止モジュールの EL 画像

DH 試験時間は 1000 時間近く伸びており、コンソーシアム標準薄膜シリコンタンデムモジュールがコンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールに比べて DH 試験に対する耐性が高い可能性はあるが、それでも DH 試験における発電特性の耐久性に関しては熱可塑性樹脂封止が EVA 封止にして優位にあると考えられる。

II-12-4-2. ポリオレフィン封止モジュールの DH 試験

ポリオレフィンを封止材とし、バックシートは水蒸気浸入の影響を見るためにバリアフィルム層を持たない PET 単膜および水蒸気バリア性能の耐湿熱性に優れるバリアバックシート 1G、さらにコンソーシアム標準シリカ蒸着バックシート 1H を用い、コンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールを用いてモジュールを作製し、DH 試験を実施した。ポリオレフィン封止の場合には熱可塑性樹脂封止の場合と異なり、コンソーシアム標準薄膜 a-Si モジュールで DH 試験を行っても、スクライブ部がすぐに劣化することもなく試験は継続可能であった。

図 II-12-4-2-1 に DH 試験の経過に伴うモジュールの最大出力の推移を初期の最大出力に対する保持率で示した。図 II-12-4-2-2 には、各モジュールの EL 画像の推移を示した。

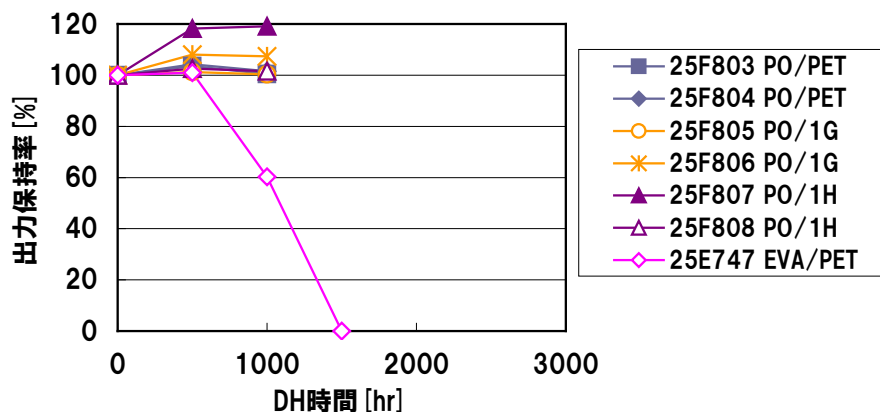


図 II-12-4-2-1. PO 封止薄膜 a-Si モジュールの DH 試験による出力保持率の推移

DH 試験が 1000 時間まで経過した時点では、バックシートの種類によらずポリオレフィン封止モジュールには出力の低下は見られない。PET フィルムをバックシートに用いた水準同士で比べても EVA 封止モジュールに比べてポリオレフィン封止モジュールの出力低下が遅くなっていることが分かる。EL 画像では、バックシートに PET フィルムを用いた水準でわずかに暗部が見え始めているが、EVA 封止モジュールに比べると劣化は少ないと言える。

ID	25F803	25F804	25F805	25F806	25F807	25F808
封止材/バックシート	PO/PET		PO/1G		PO/1H	
初期						
DH500hr						
DH1000hr						

図 II-12-4-2-2. PO 封止モジュールの EL 画像

これまでの DH 試験では、熱可塑性樹脂封止モジュール、ポリオレフィン封止モジュールともバックシートのバリア性能によるモジュール劣化の影響の違いはまだ出ておらず、

薄膜シリコンタンデムモジュールと薄膜 a-Si モジュールの劣化状態の違いなど新たに検討すべき項目も出てきている。目標とする薄膜シリコン系モジュールの劣化への水分浸入の影響の把握に向けて、引き続きコンソーシアム研究期間内の評価を継続する。

(東洋紡株式会社：濱本 史郎)

サブテーマ 3 端子箱のポッティング材からのモジュールへの水蒸気浸入の影響

太陽電池モジュールにおいて、バックシートの水蒸気透過率は信頼性の上で重要なファクターであると考えられているが、端子箱部についてはバックシートに穴を開け、中から配線を取り出しており、バックシートの水蒸気透過率とは関係なく水分が入ることが懸念される。本テーマでは端子箱からの水分浸入が結晶系や薄膜系の太陽電池モジュールへ与える影響を調査し、対策することを目的とする。

II-13. 結晶系太陽電池モジュールの高温高湿 (DH) 試験

コンソーシアム標準の結晶系 4 セルモジュール (セル: 多結晶シリコン、封止材: EVA、バックシート: TPT) において、端子箱へポッティング材 (シリコン系) を充填するモジュール、充填しないモジュールをそれぞれ作製し、それらのモジュールについて DH 試験 (85 °C、85 %RH) を 4000 h 実施した。図 II-13-1 に DH 試験前後の電気的特性を、図 II-13-2 に DH 試験前後の I-V カーブを、図 II-13-3 に DH 試験前後の EL 画像を示す。図 II-13-3 の黄色の点線は端子箱がある箇所を示す。

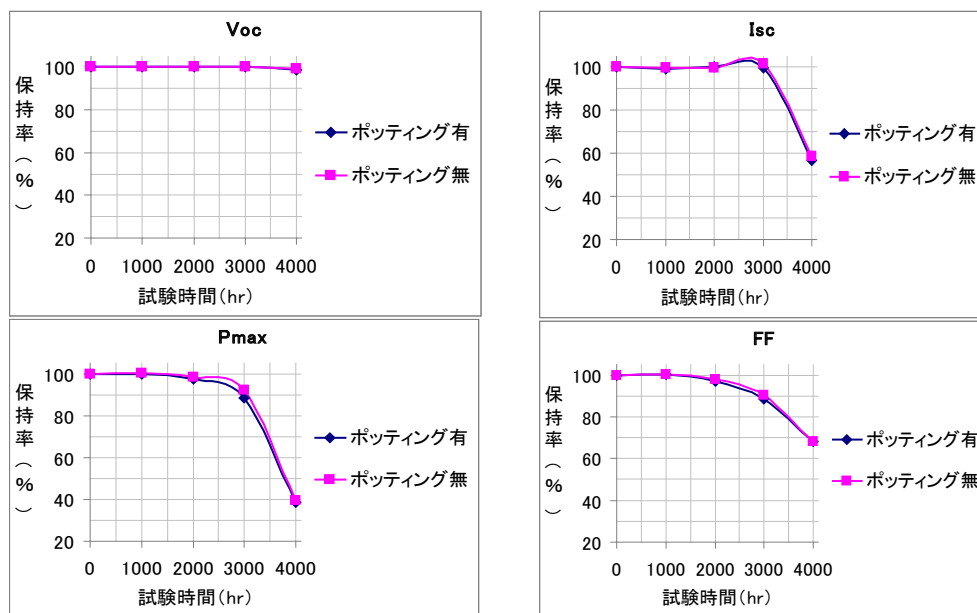


図 II-13-1. DH 試験前後の電気的特性

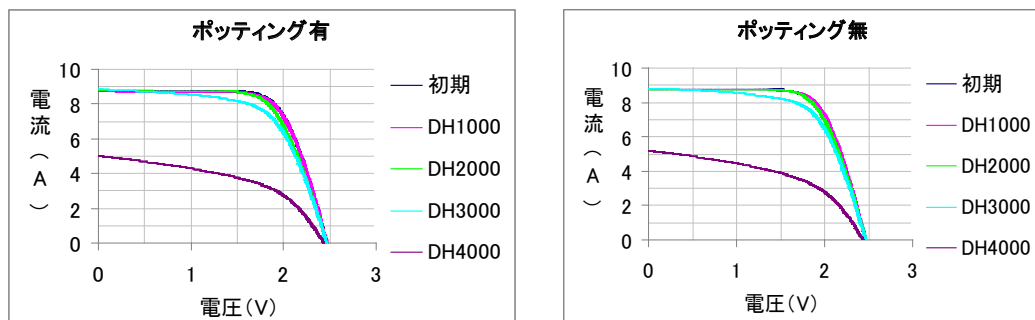


図 II-13-2. DH 試験前後の I-V カーブ

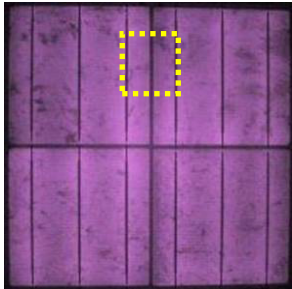
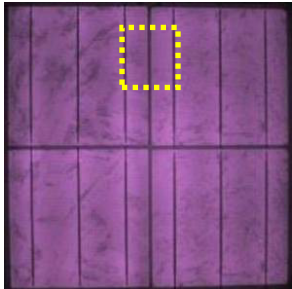
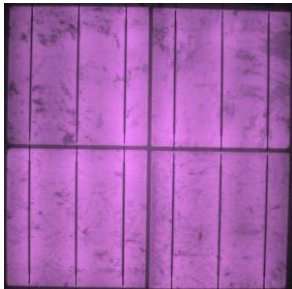
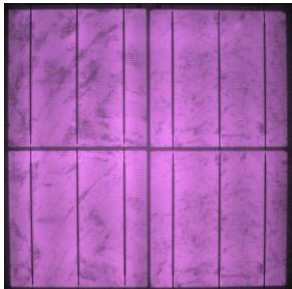

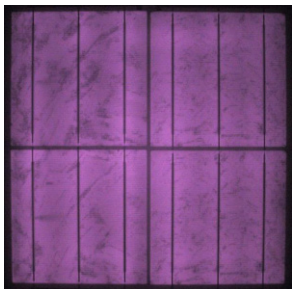
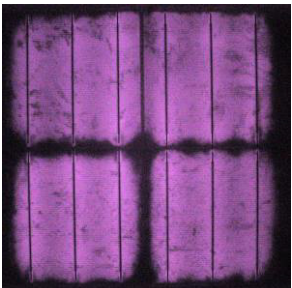
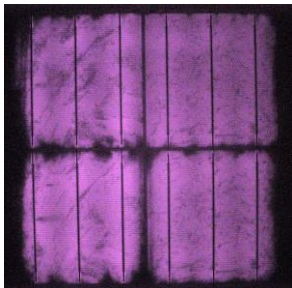
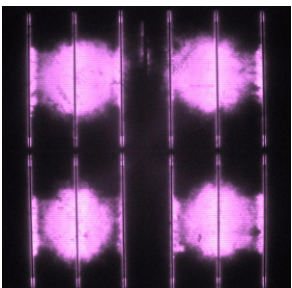
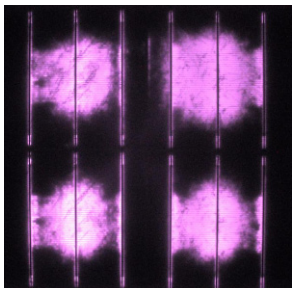
	ポッティング有	ポッティング無
初期		
DH1000 後		
DH2000 後		
DH3000 後		
DH4000 後		

図 II-13-3. DH 試験前後の EL 画像

ポッティング材の有無にかかわらず、電気特性、I-V、EL 全てほぼ同様の傾向となっている。DH2000 から FF 低下により出力が低下し始める。DH4000 では I_{sc} も大きく低下す

る。EL 画像は DH3000 でセル周辺部から暗部が広がっているが、端子箱部はそこまで広がっていない。これはタブ線とセルの間に絶縁として PVF シートを敷いていることもあるが、端子箱部はポッティング材の有無にかかわらず、バックシート部に比べ水分が入りやすい分、抜けやすくもあり、滞留しにくい構造であるため、酢酸が発生しにくいもしくは発生した酢酸が抜けていくためであると考えられる。

II-14. 薄膜系太陽電池モジュールの DH 試験

コンソーシアム標準の薄膜モジュール（セル：アモルファスシリコン、封止材：EVA、バックシート：PAP）において、図 II-14-1 に示すようにポッティング材、配線取り出し方法、絶縁シートを変えたモジュールをそれぞれ作製し、それらのモジュールについて DH 試験（85 °C、85 %RH）を実施した。ポッティング材の水蒸気透過率はシリコーン：200 g/m²day 程度、ポリウレタン：9 g/m²day である。ポリウレタン系のポッティング材は出光興産株式会社から試作品のサンプル提供を受けた。バックシートの配線取り出し部の穴や PAP 絶縁シートの端部はアルミがむき出しであるため、絶縁のためにポリイミドテープを貼ってある。図 II-14-2 に DH 試験前後の電気的特性を、図 II-14-3 に DH 試験前後の I-V カーブを、図 II-14-4 に DH 試験前後の EL 画像を示す。図 II-14-4 の黄色の点線は端子箱がある箇所を示す。

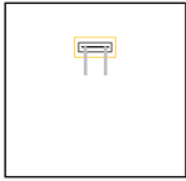

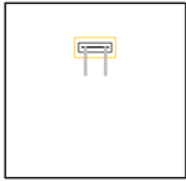

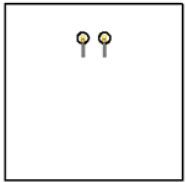

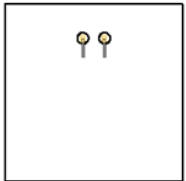

	ポッティング材	配線取り出し方法	絶縁シート
パターン①	シリコーン	 <p>32×9mm の穴から配線を取り出す (従来法)</p>	 <p>バックシート EVA リード線 PVF EVA a-Si</p> <p>PVF (ポリフッ化ビニル樹脂フィルム)</p>
パターン②	ポリウレタン	 <p>32×9mm の穴から配線を取り出す (従来法)</p>	 <p>バックシート EVA リード線 PVF EVA a-Si</p> <p>PVF (ポリフッ化ビニル樹脂フィルム)</p>
パターン③	ポリウレタン	 <p>4×1mm の穴から配線を取り出し ブチルで埋める (ブチル法)</p>	 <p>バックシート EVA リード線 PVF EVA a-Si</p> <p>PVF (ポリフッ化ビニル樹脂フィルム)</p>
パターン④	ポリウレタン	 <p>4×1mm の穴から配線を取り出し ブチルで埋める (ブチル法)</p>	 <p>バックシート EVA リード線 PAP EVA a-Si</p> <p>PAP バックシート (PET/アルミ/PET)</p>

図 II-14-1. 試験体作製パターン

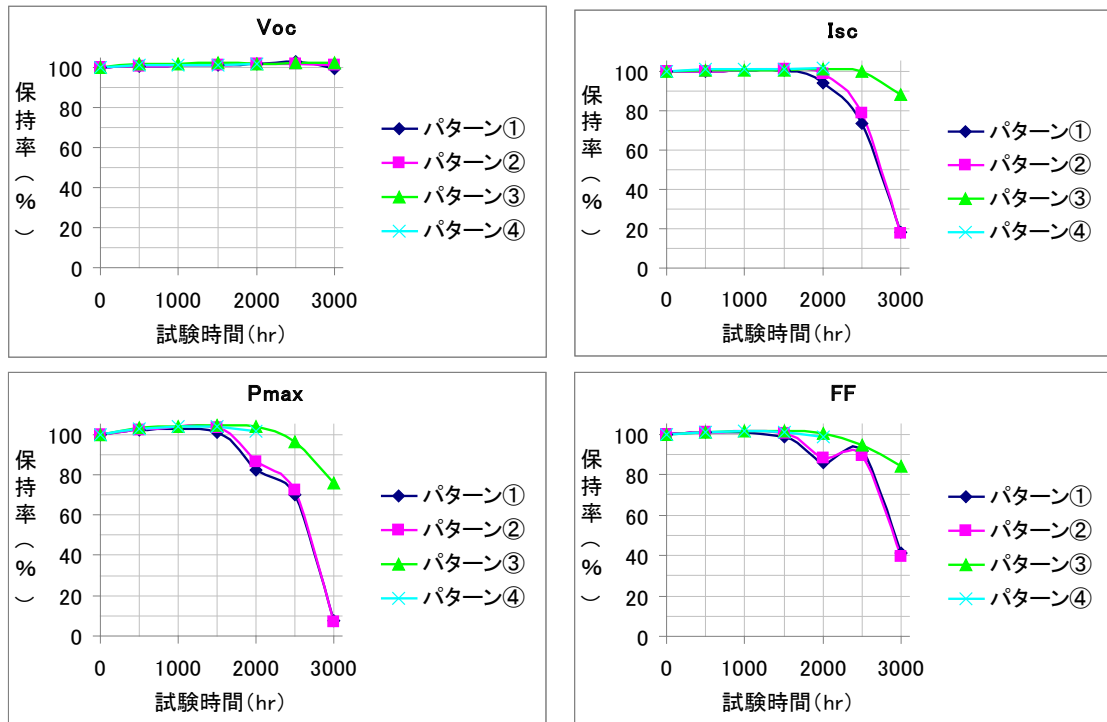


図 II-14-2. DH 試験前後の電気的特性

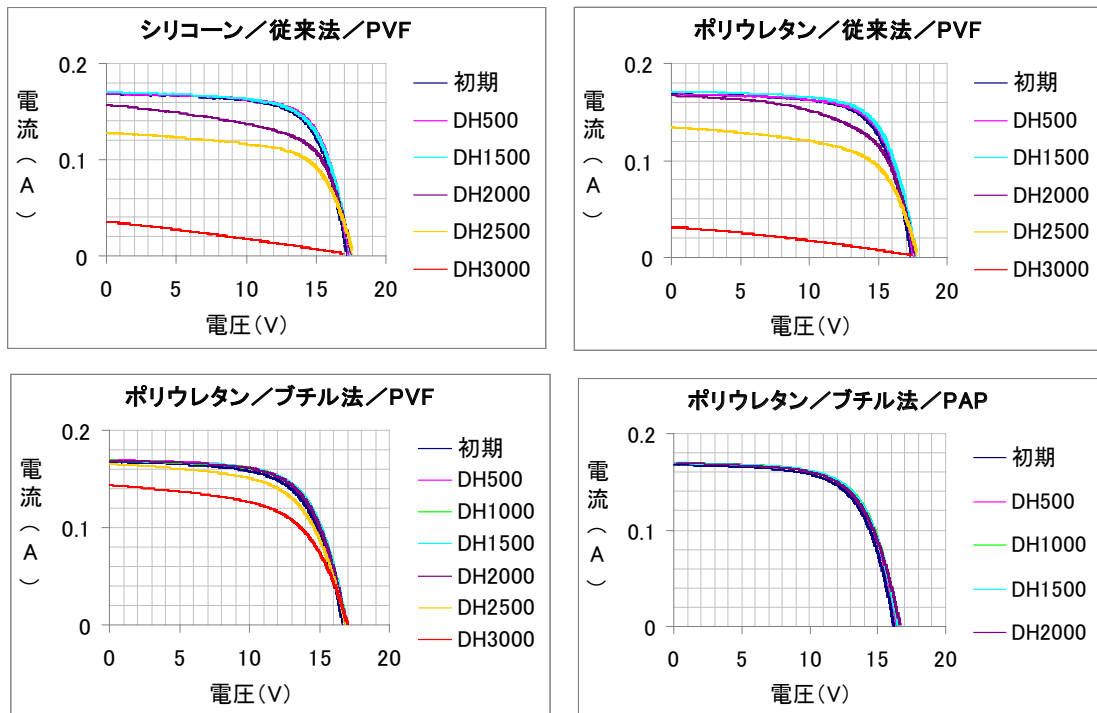


図 II-14-3. DH 試験前後の I-V カーブ

	パターン① シリコーン 従来法 PVF	パターン② ポリウレタン 従来法 PVF	パターン③ ポリウレタン ブチル法 PVF	パターン④ ポリウレタン ブチル法 PAP
初期				
DH500				
DH1000				
DH1500				
DH2000				
DH2500				
DH3000				

図 II-14-4. DH 試験前後の EL 画像

パターン①と②はポッティング材違いの比較であり、DH1000～2000 の EL 画像の暗部の大きさに若干差があるが、ほぼ同様の傾向で出力低下する。パターン③においては、DH2500 で EL 画像の端子箱部の暗部が確認されたが、パターン①②に比べるとかなり水分

の浸入を抑えていると言える。出力についてもパターン①②は DH3000 で 10%以下まで低下したのに対し、パターン③は 75%と高い保持率を維持している。パターン④は DH2000 までのデータではパターン③とほぼ同等の保持率であるが、EL においてモジュール上下と絶縁シート周りに暗部が広がっている。

II-15. 考察

結晶系太陽電池モジュールの DH 試験について、ポッティング材の有無の差異は見られなかった。結晶系太陽電池モジュールの DH 試験における劣化原因は、水分浸入により EVA の加水分解が起り、発生した酢酸等がセルの電極を高抵抗化させると考えられており、水分が直接の原因ではない。このため、端子箱部から水分が浸入しても抜けていく構造であれば出力には影響しないと考えられる。

薄膜系太陽電池モジュールの DH 試験について、ポッティング材の違いによる有意差は見られなかった。これについては水分が端子箱の上からではなく、側面のバックシートとポッティング材の接着面を伝って浸入した可能性が考えられる。ブチル法では取り出しの穴を小さくし、モジュールの端面封止に使用しているブチルと同じものを取り出しの穴に埋めたことで水分浸入量をかなり抑えられたと考えられる。また、パターン④は配線取り出し部直下の絶縁シートを水蒸気透過のない PAP にすることで、アモルファスシリコンまで水分が到達するのを遅らせる狙いであったが、パターン③よりも早くに絶縁シート周りに EL 暗部が見られた。これは絶縁シートが水分を通さない分、その外周により多くの水分が回ってしまったためだと考えられる。

サブテーマ 3 のまとめ

結晶系太陽電池モジュールにおいて、ポッティング材の有無は DH 試験の結果に影響しない。しかしこれはあくまで出力への影響であって、ポッティング材による絶縁性や放熱性はここでは考慮していないことを言及する。

薄膜系太陽電池モジュールにおいて、配線の取り出し法を変えることで水分浸入による出力低下を遅らせることができた。水分がアモルファスシリコンへ到達するのを遅らせればよいため、更なる工夫の余地はあると思われる。

(長州産業株式会社：上野 清志)

サブテーマ4 マイクロクラックがモジュールの信頼性に及ぼす影響

市場における太陽電池セルのマイクロクラックは結晶シリコン太陽電池モジュールの問題の一つであり、出力低下に繋がる可能性がある。本テーマでは、マイクロクラックを人工的に発生させたセルを用いてモジュールを作製し環境試験や荷重試験を実施することで、マイクロクラックの成長の有無や太陽電池モジュールの電気的特性への影響を調査し、実曝露で起こりうる現象を明らかにすることを目的とする。

II-16. マイクロクラック再現方法

II-16-1. レーザーによる再現

セルの受光面側からファイバーレーザー（波長：1063 nm、出力：50 W）にてバスバーを跨ぐ傷を付けた（図 II-16-1-1 参照）。傷の深さは約 50 μm である。

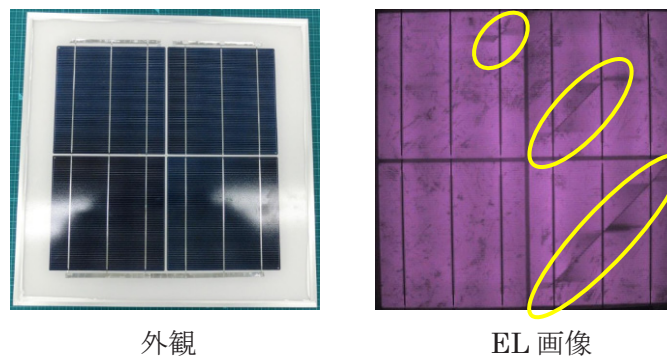


図 II-16-1-1. レーザーによるマイクロクラック再現モジュールの外観と EL 画像

II-16-2. 物理衝撃による再現

セルの裏面側から鉄球、ドライバー、スクレーパーを用いて物理的な衝撃を与え、マイクロクラックを再現した（図 II-16-2-1 参照）。このとき、目視でも判るクラックが入ったものは除外し、EL で見たときだけマイクロクラックが確認できたセルのみを使用した。

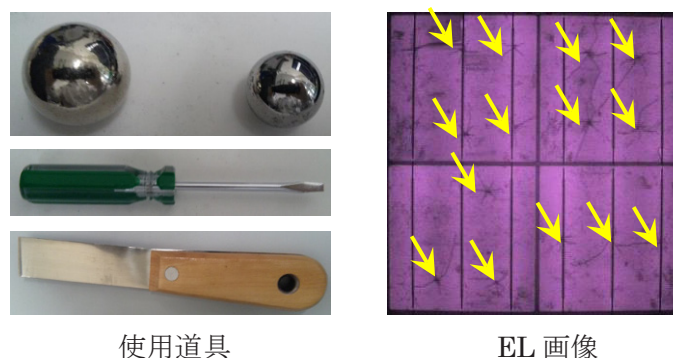


図 II-16-2-1. 使用道具とマイクロクラック再現セルの EL 画像

II-17. 4セルモジュールの温度サイクル (TC) 試験

マイクロクラック無しの4セルモジュール、レーザーによりマイクロクラックを再現した4セルモジュール、物理衝撃によりマイクロクラックを再現した4セルモジュールにおいてTC試験を実施した。試験条件はIEC61215に準じて $-40^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$ を6時間以内に1サイクルさせているが、通電は行っていない。

図II-17-1にTC試験前後の各電気的特性 (V_{oc} 、 I_{sc} 、 P_{max} 、 FF) の保持率を示す。

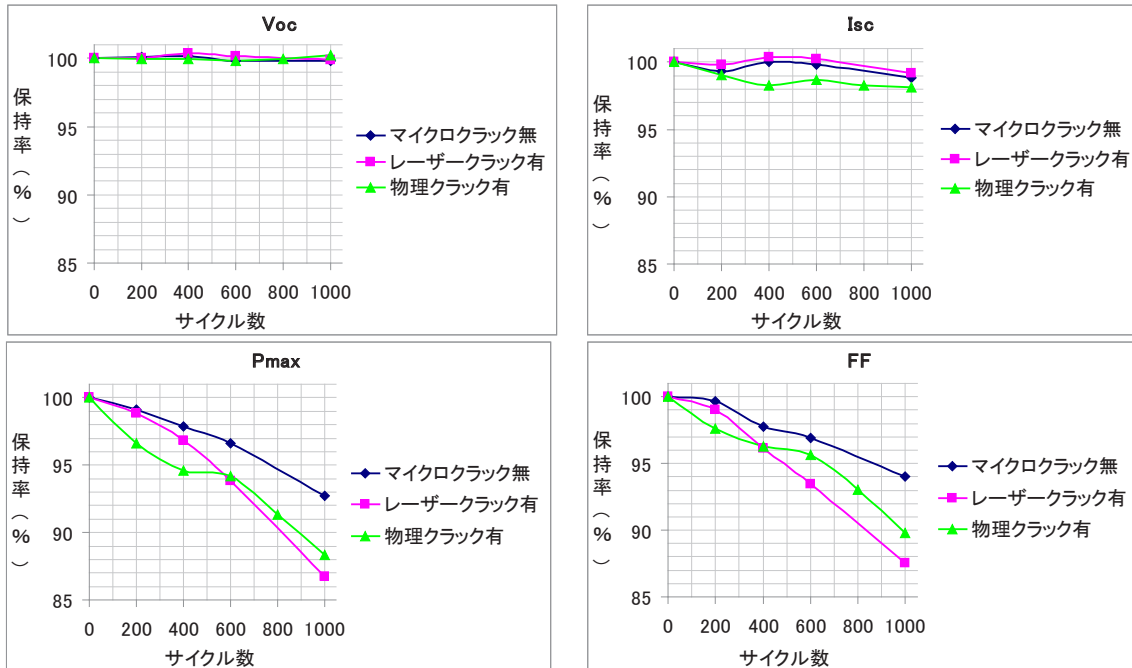


図 II-17-1. TC 試験前後の電気的特性

全てのモジュールにおいて FF 低下が主原因で出力が低下している。マイクロクラック無モジュール、レーザーによるクラック有モジュールについてはほぼ直線的に FF が低下しているが、レーザーによるクラック有モジュールの方が顕著に低下している。物理衝撃によるクラック有モジュールは他のモジュールに比べて早い段階で出力低下するが、その後低下の度合いは緩やかになる。

図II-17-2にTC試験前後のEL画像を示す。レーザーによるクラック有モジュールのEL画像について、初期からレーザークラックとバスバーの接点付近に暗部が見られるが、試験が進むにつれ新たな暗部発生やバスバーに沿った暗部発生が見られた。物理衝撃によるクラック有モジュールはTC200で暗部が多く発生し、それ以降はほぼ変化がないことが分かる。これらはレーザークラック有モジュールの出力が顕著に低下したこと、物理衝撃によるクラック有モジュールは初期のTCで大きく低下したと一致する。

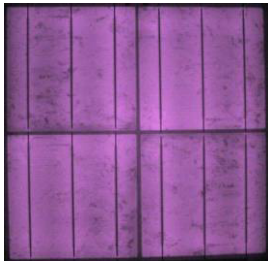
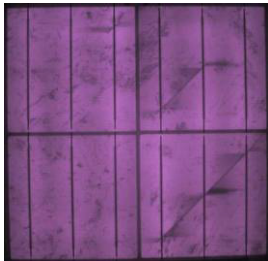
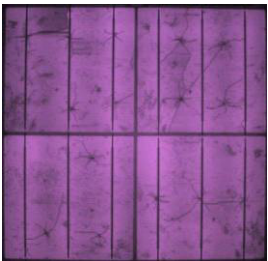
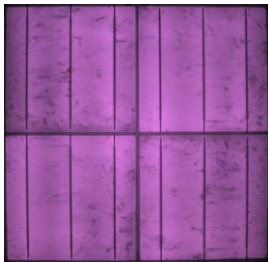
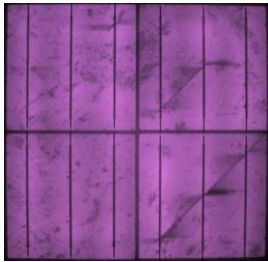
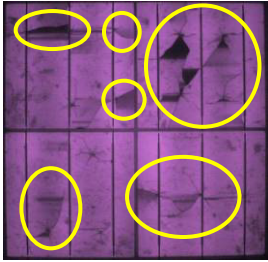
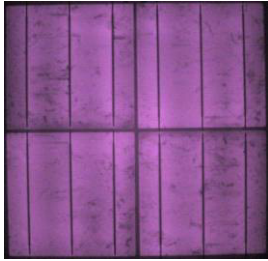
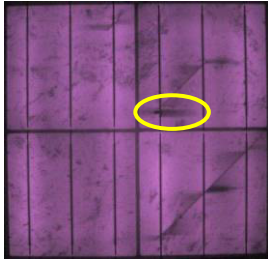
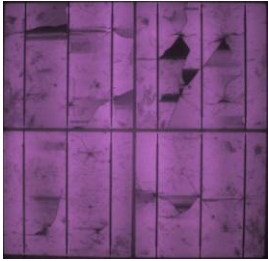
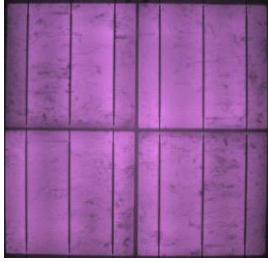
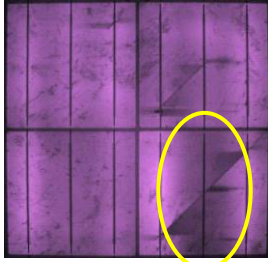
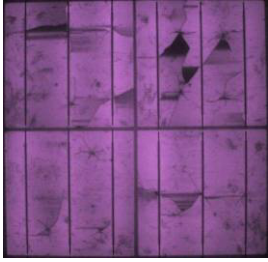
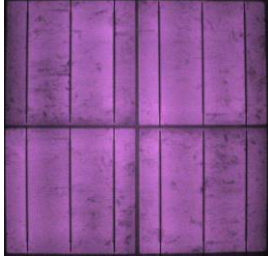
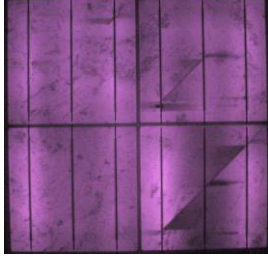
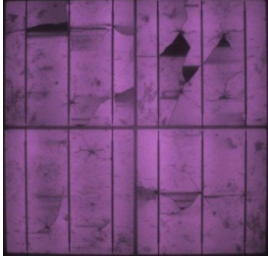
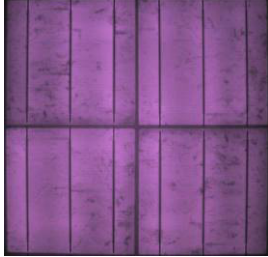
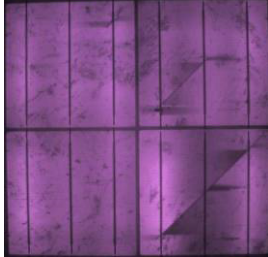

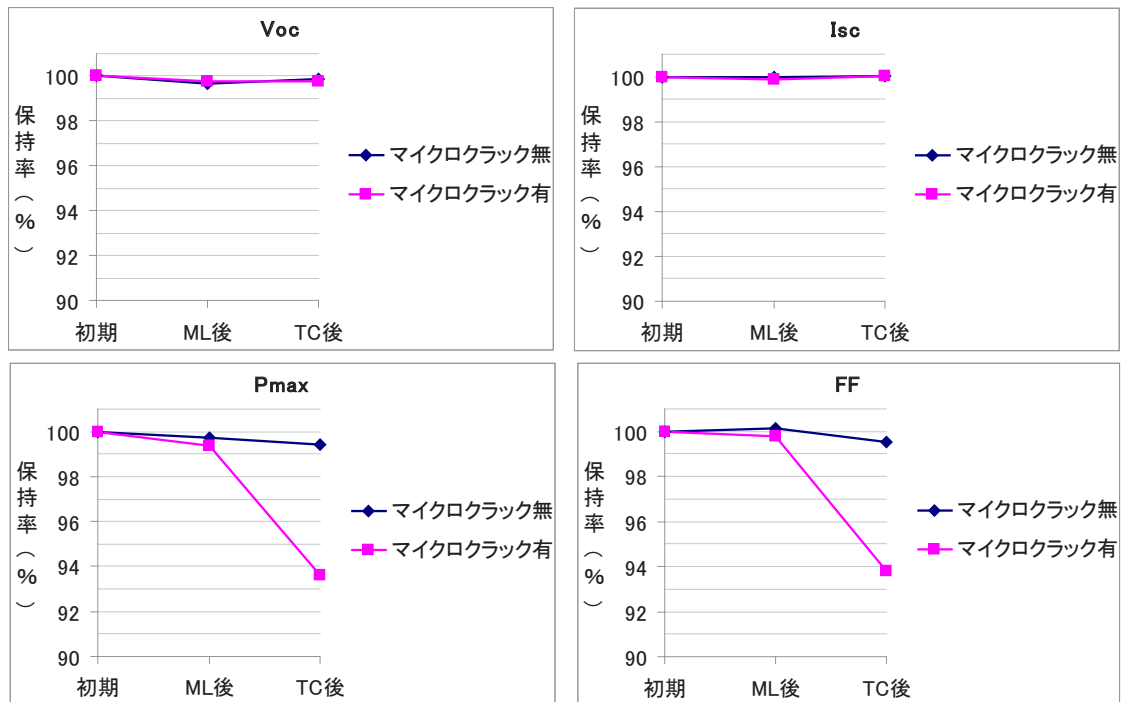
	マイクロクラック無	レーザークラック有	物理クラック有
初期			
TC200			
TC400			
TC600			
TC800			
TC1000			

図 II-17-2. TC 試験前後の EL 画像

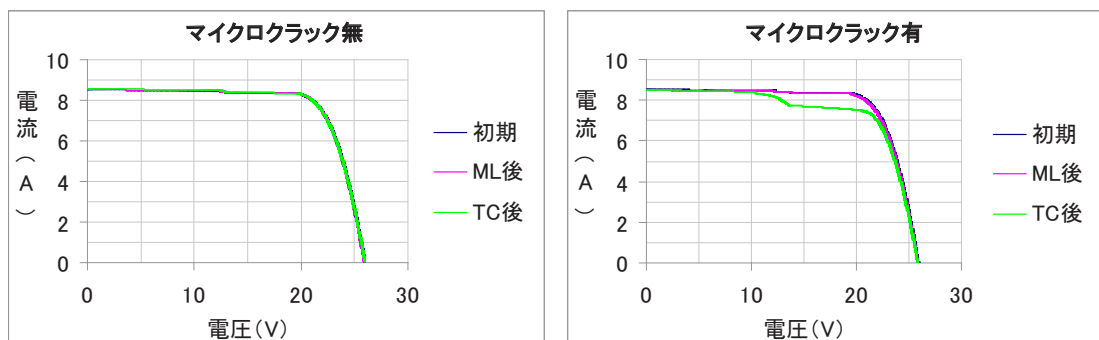
II-18. 42セルモジュールの機械的荷重（ML）試験+TC試験

実曝露環境下では温度変化によるストレスの他、風や積雪等の機械的荷重も存在する。これらがマイクロクラックに与える影響を調査するため、マイクロクラック無しの42セルモジュール、物理衝撃（鉄球）によりマイクロクラックを再現した42セルモジュールにおいてML試験を実施した後、同モジュールにおいてTC試験を実施した。ML試験はIEC61215に準じ、正荷重+2400Paを1時間加え、その後負荷重-2400Paを1時間加え、これらを3サイクル繰り返した。TCは200サイクル実施した。

図II-18-1にML、TC試験前後の電気的特性を、図II-18-2にML、TC試験前後のI-Vカーブを、図II-18-3にML、TC試験前後のEL画像を示す。



図II-18-1. ML、TC試験前後の電気的特性



図II-18-2. ML、TC試験前後のI-Vカーブ

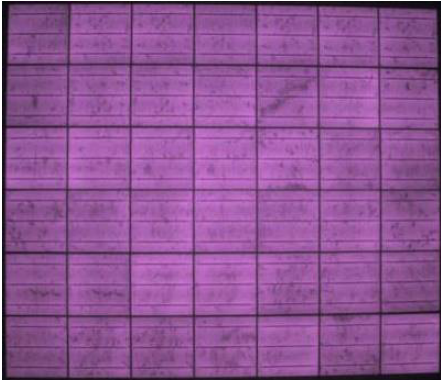
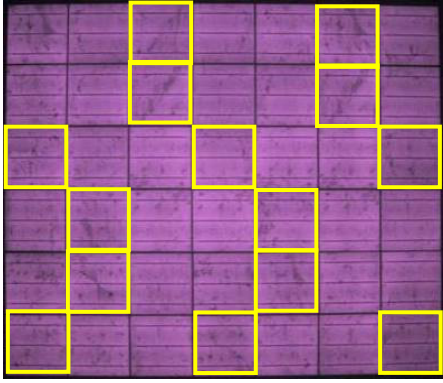
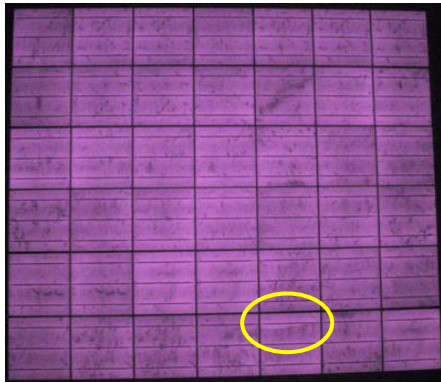
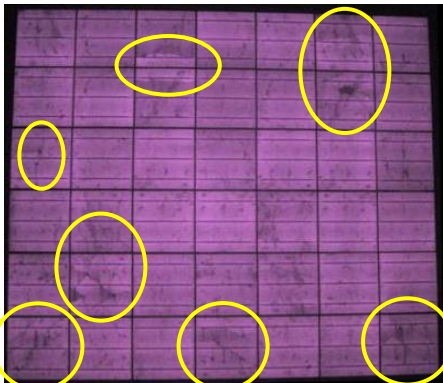
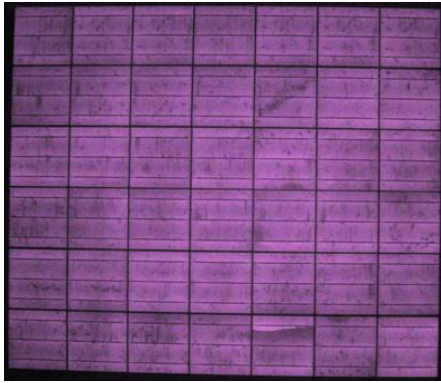
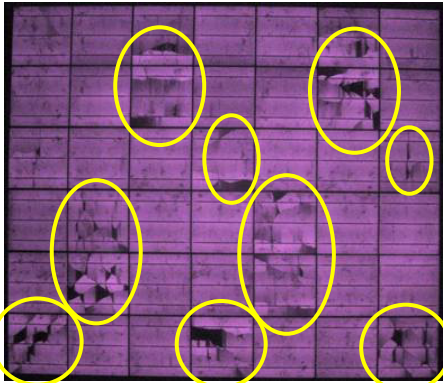
	マイクロクラック無	マイクロクラック有
初期		
ML 後		
TC 後		

図 II-18-3. ML、TC 試験前後の EL 画像

マイクロクラック有モジュールの初期の EL 画像において、黄色の枠に囲まれたセルに予めマイクロクラックを発生させているが、ML 試験後にそれらのセルでマイクロクラックの成長が確認できた。しかし電気的特性への影響は小さく、出力低下は 1%未滿となっている。その後の TC によって、マイクロクラックを発生させたセルのほとんどで暗部が拡大し、出力も大きく低下した。I-V カーブから発電部が減少したことによる動作点の低下により出力が低下していることがわかる。

II-19. 42セルモジュールの Dynamic Mechanical Load (DML) 試験+TC 試験

モジュールが受けるストレスとして、積雪のような静的荷重の他に動的荷重も想定され、近年、DML 試験のような新しい試験も提案されている。DML がマイクロクラックを内包したモジュールに与える影響を調査するため、マイクロクラック無しの42セルモジュール、物理衝撃（鉄球）によりマイクロクラックを再現した42セルモジュールにおいてDML試験を実施した後、同モジュールにおいてTC試験を実施した。DML試験は、正荷重+1000Paを加え、その後負荷重-1000Paを加える。これらを3サイクル/minの速度で1000サイクル繰り返した。また、一定サイクルごとに荷重を加えていない状態、+1000Paを加えた状態、-1000Paを加えた状態のELを測定した。TCは800サイクル実施した。

図 II-19-1 に DML、TC 試験前後の電気的特性を、図 II-19-2 に DML、TC 試験前後の I-V カーブを、図 II-19-3、図 II-19-4 に DML、TC 試験前後の EL 画像を示す。

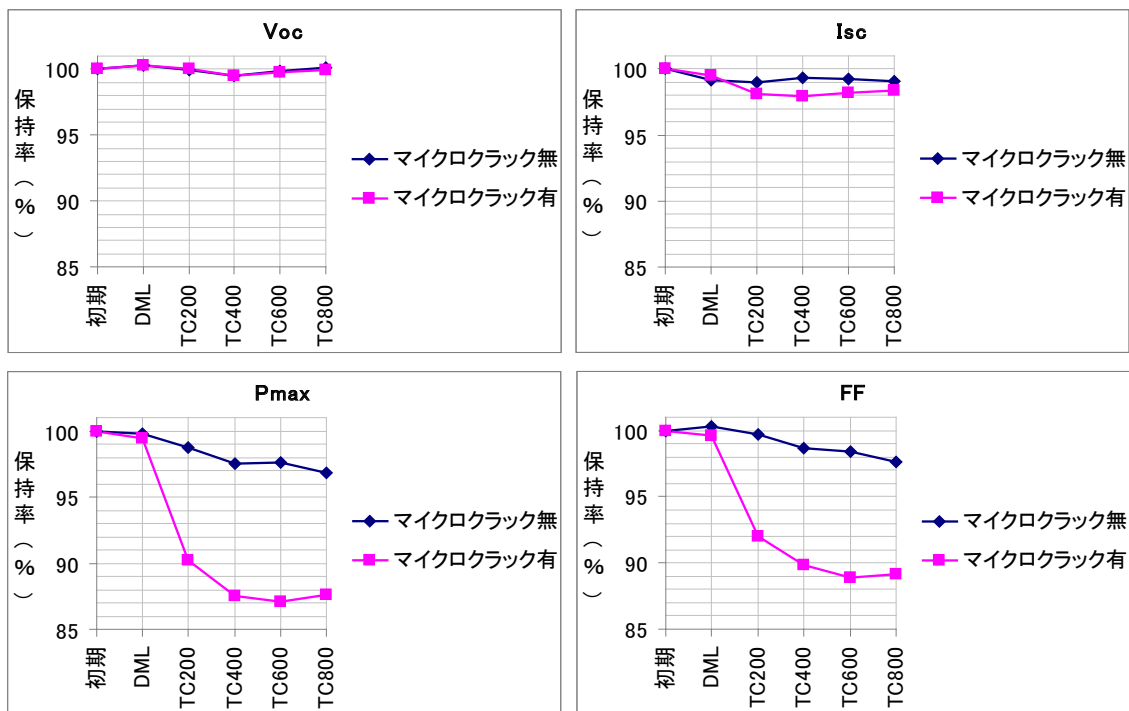


図 II-19-1. DML、TC 試験前後の電気的特性

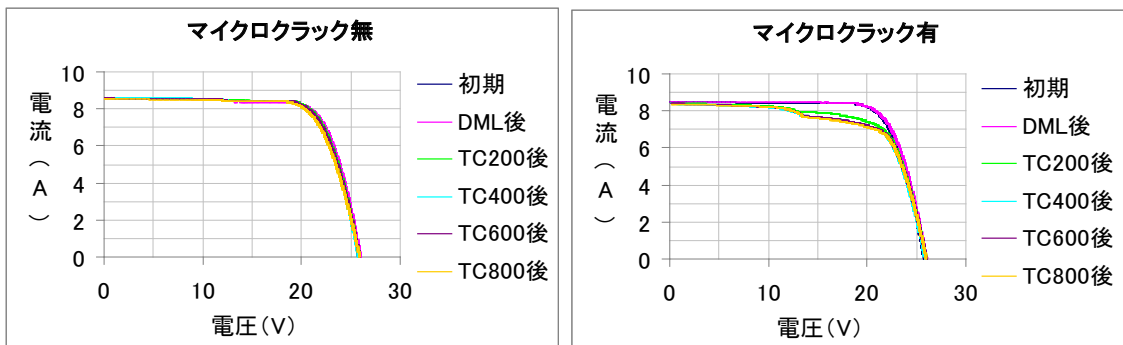


図 II-19-2. DML、TC 試験前後の I-V カーブ

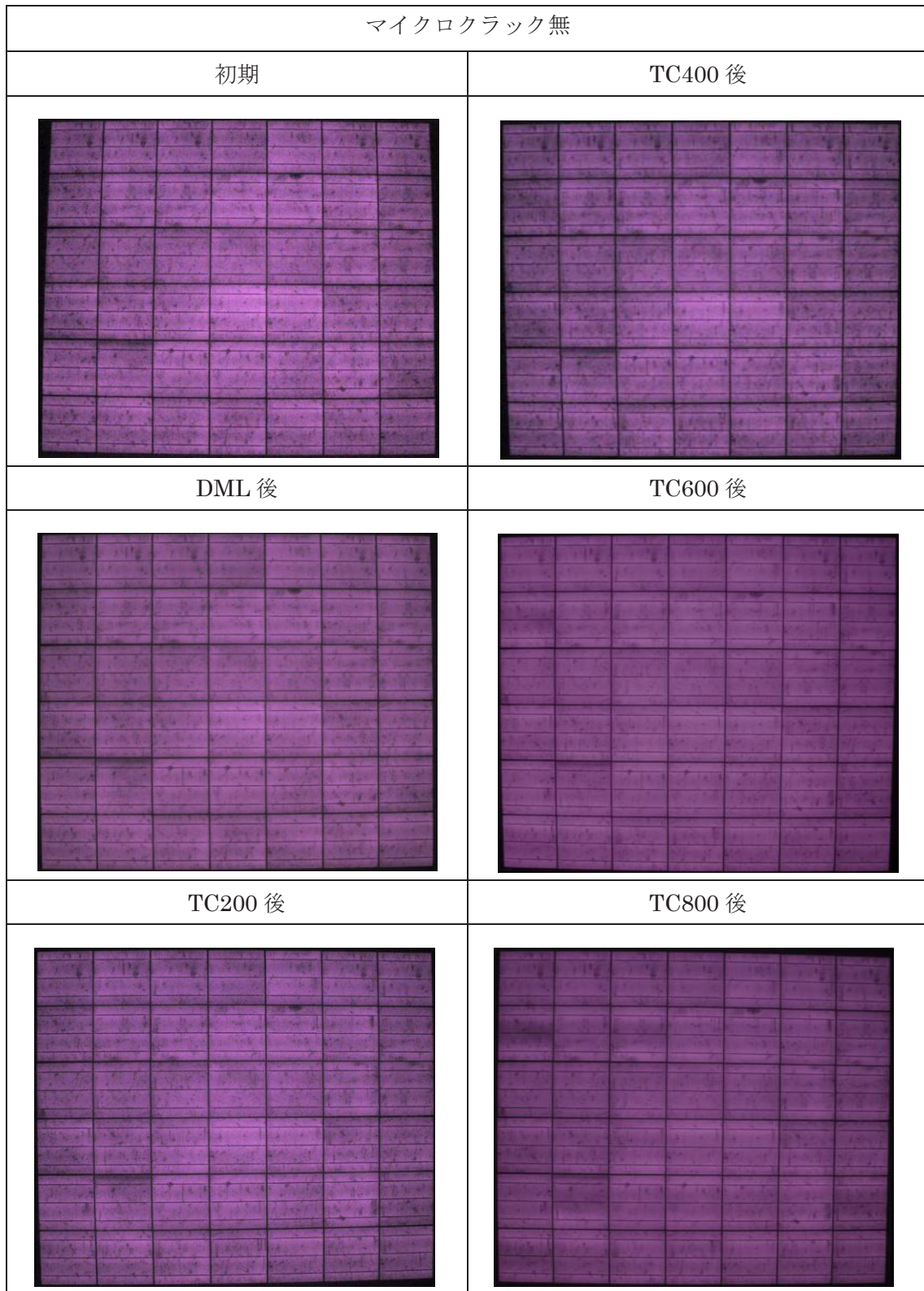


図 II-19-3. DML、TC 試験前後の EL 画像 (マイクロクラック無)

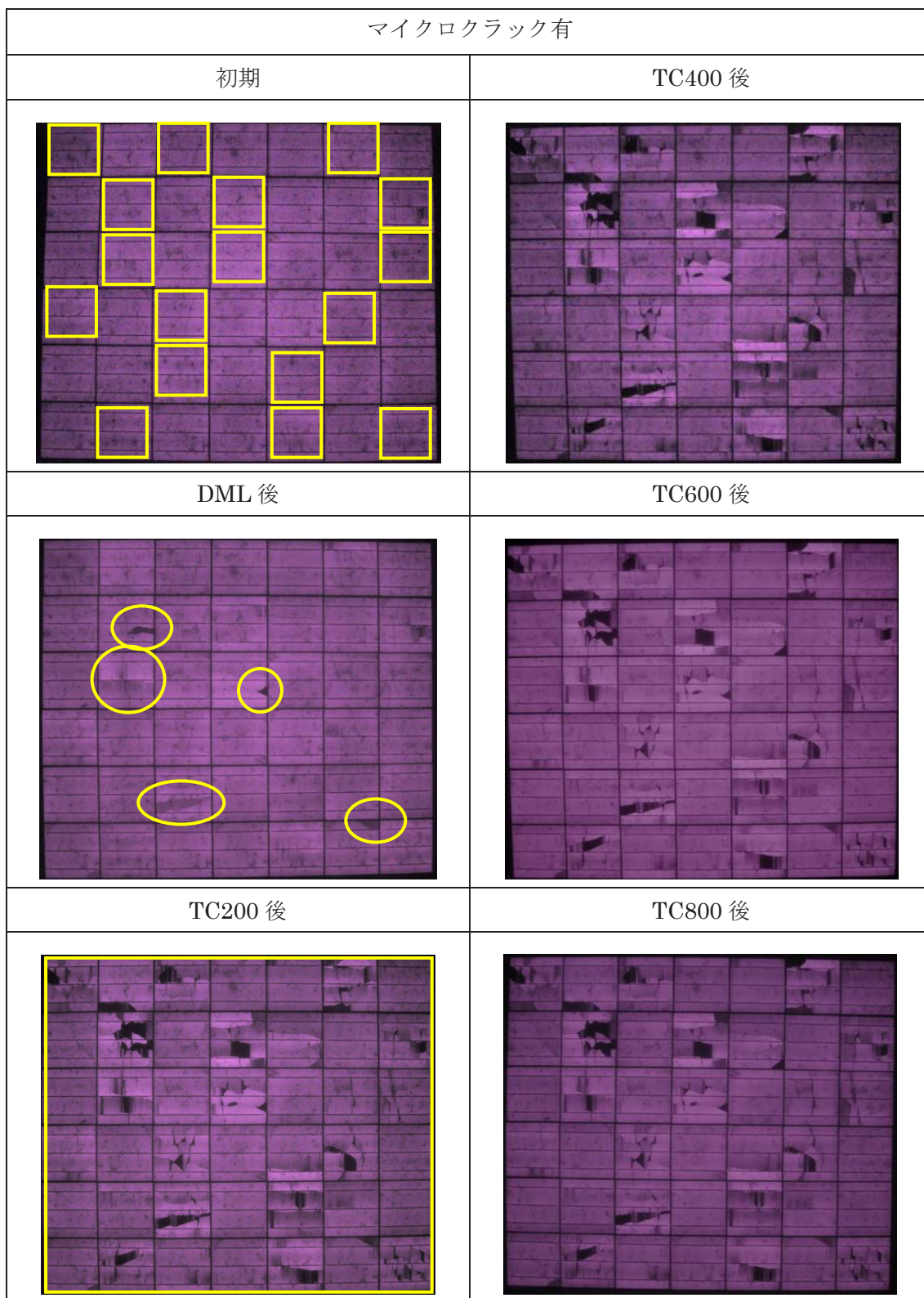


図 II-19-4. DML、TC 試験前後の EL 画像 (マイクロクラック有)

マイクロクラック有モジュールの初期の EL 画像において、黄色の枠に囲まれたセルに予めマイクロクラックを発生させているが、DML 試験後にそれらのセルの一部でマイクロクラックの成長やフィンガー破断による若干の暗部発生が確認できた。しかし電気的特性へ

の影響は小さく、出力低下は1%未満となっている。その後の TC によって、マイクロクラックを発生させたセルのほとんどで暗部が拡大し、出力も大きく低下した。I-V カーブから発電部が減少したことによる動作点の低下により出力が低下していることがわかる。TC により大きく出力低下した後、TC を継続しても低下の度合いは小さい。また TC により多く発生した EL 暗部は TC を継続しても増加していないことから、TC においてはマイクロクラックがフィンガーまで達した部分を破断させるストレスが加わるが、破断箇所を増やしたり、新たにマイクロクラックを発生させるほどのストレスは加わらないと言える。

図 II-19-5 にマイクロクラック有モジュールにおいて、DML 試験中の状態、荷重を加えていない状態、正負の荷重を加えた状態での EL 画像を示す。

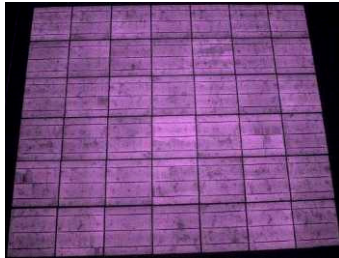
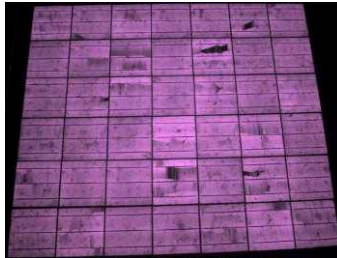
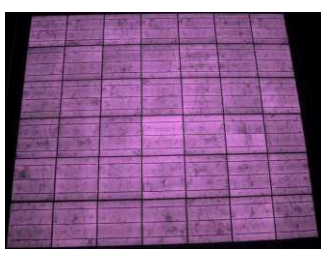
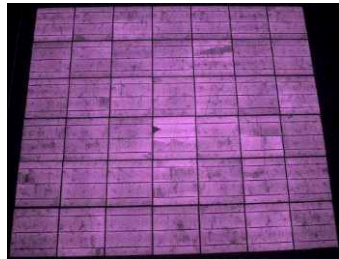
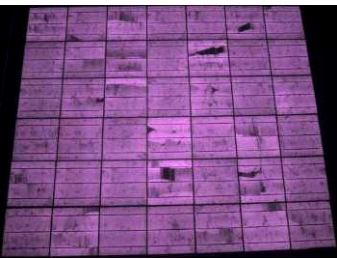
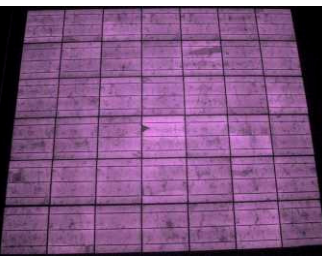
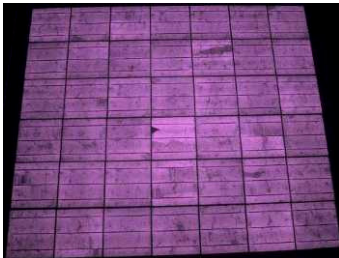
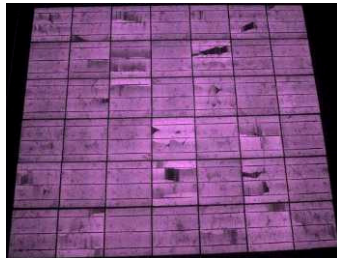
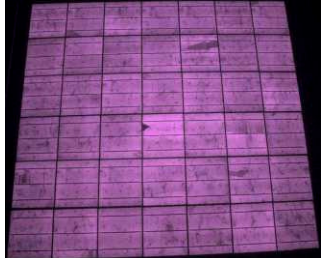
マイクロクラック有		
100 サイクル, 0Pa	100 サイクル, +1000Pa	100 サイクル, -1000Pa
		
500 サイクル, 0Pa	500 サイクル, +1000Pa	500 サイクル, -1000Pa
		
1000 サイクル, 0Pa	1000 サイクル, +1000Pa	1000 サイクル, -1000Pa
		

図 II-19-5. DML 試験中の EL 画像 (マイクロクラック有)

各サイクル数において、+1000Pa を加えた状態のときのみ暗部が増大していることがわかる。これは図 II-19-6 に示すように、正荷重を加えた状態では中立軸を境に上側は圧縮の力が加わり、下側は引張の力が加わる。セルは中立軸よりも下側に位置しているため、引張の力が加わり、マイクロクラックがフィンガーまで達している場合はそこが破断するため EL が暗くなる。負荷重を加えた際はセルには圧縮の力が働くため、マイクロクラックがフィンガーまで達していても接触はしたままである。

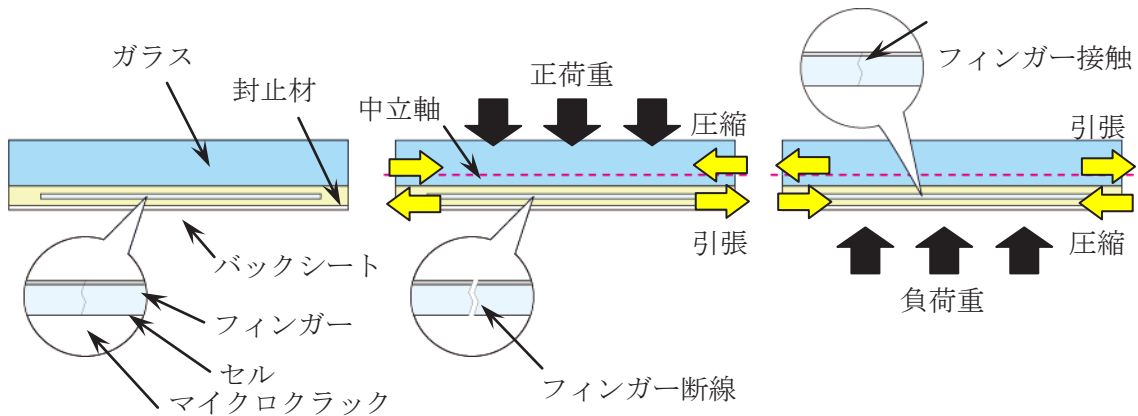


図 II-19-6. 荷重を加えた際のモジュール断面模式図

II-20. 42セルモジュールのDML・TCシーケンシャル試験

DMLとTCのストレスがマイクロクラックを内包したモジュールへ与える影響をより詳細に調査するため、DMLとTCのシーケンシャル試験を実施した。DMLやTCの条件はサイクル数以外、DML+TC試験と同様であるが、マイクロクラック有モジュールにおいては全てのセルに物理衝撃によりマイクロクラックを発生させている。表 II-20-1 に試験シーケンスを示す。DML、TC の後ろの数字はサイクル数を示す。初期と各シーケンス後に出力、ELを測定した。

表 II-20-1. 試験シーケンス

シーケンス No.	sample1	sample2	sample3
	マイクロクラック無	マイクロクラック有	マイクロクラック有
1	DML50	DML50	—
2	TC50	TC50	TC50
3	DML50	DML50	—
4	TC50	TC50	TC50
5	DML50	DML50	—
6	TC50	TC50	TC50
7	DML50	DML50	—
8	TC50	TC50	TC50
9	—	—	DML50
10	—	—	TC50

図 II-20-1 に DML・TC シーケンシャル試験前後の電気的特性を、図 II-20-2 に DML・TC シーケンシャル試験前後の I-V カーブを、図 II-20-3～図 II-20-5 に DML・TC シーケンシャル試験前後の EL 画像を示す。

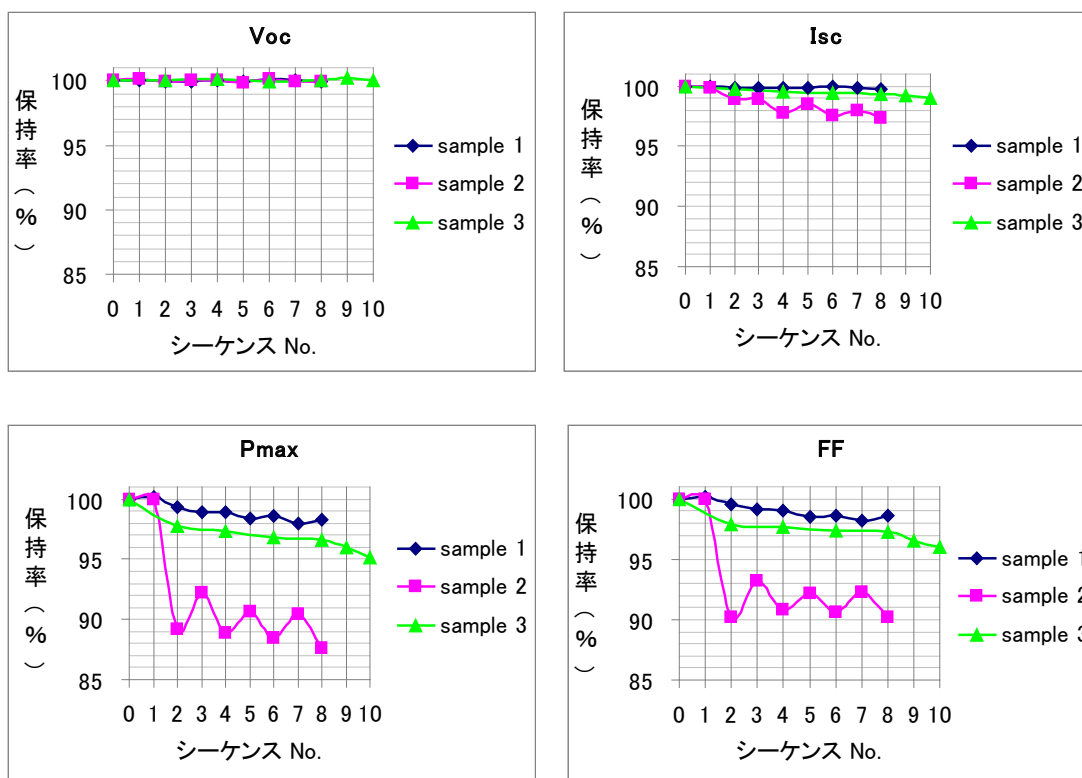


図 II-20-1. DML・TC シーケンシャル試験前後の電気的特性

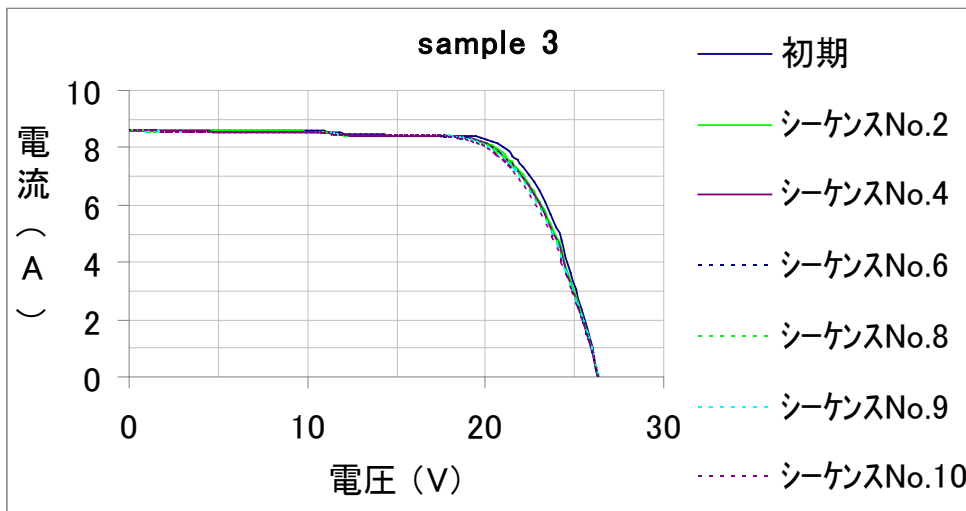
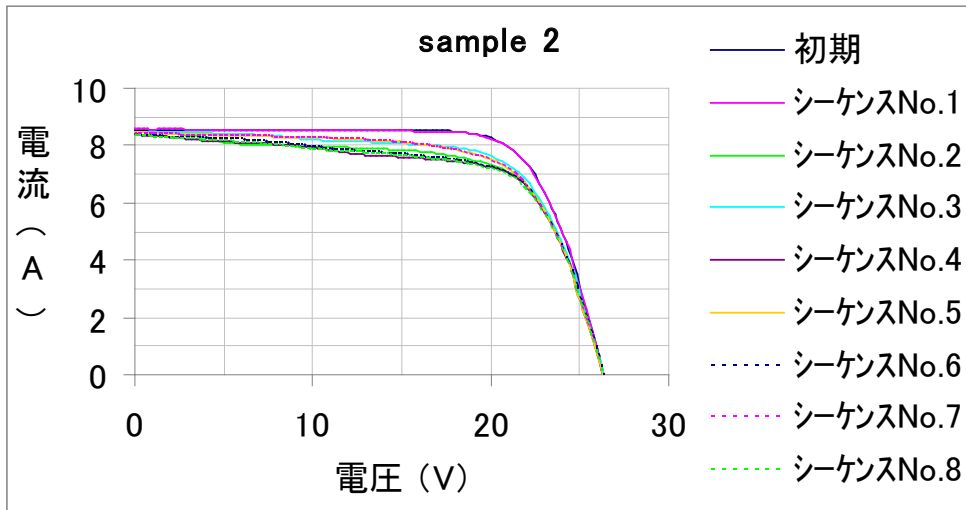
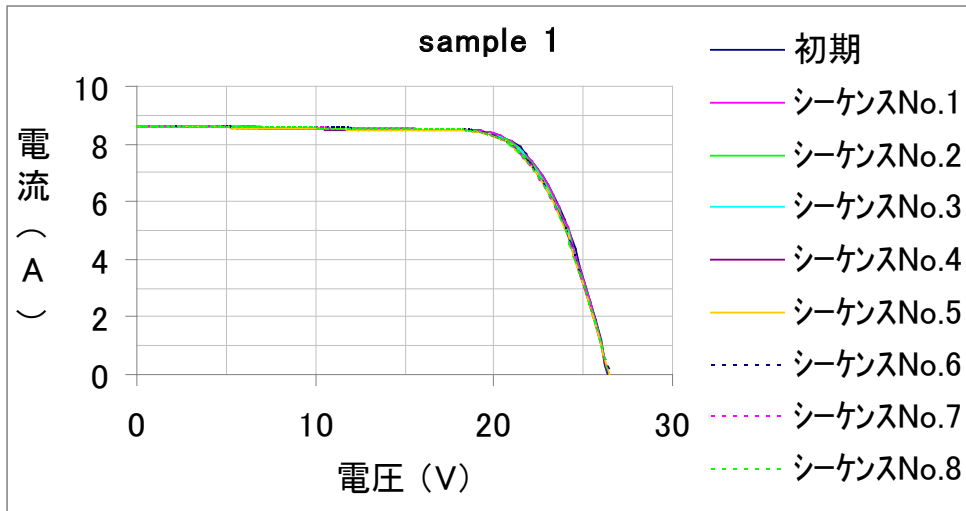


図 II-20-2. DML・TC シーケンシャル試験前後の I-V カーブ

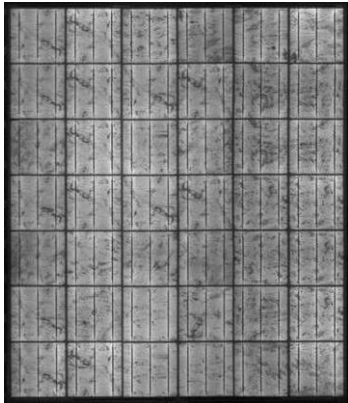
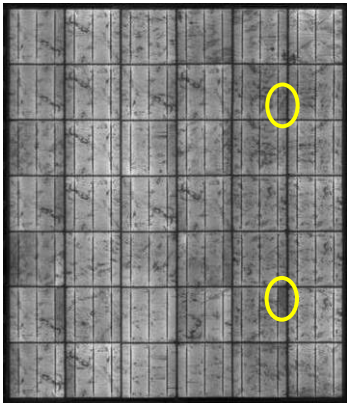
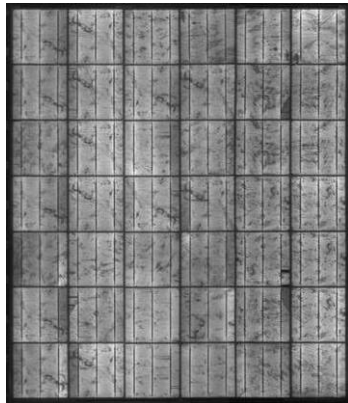
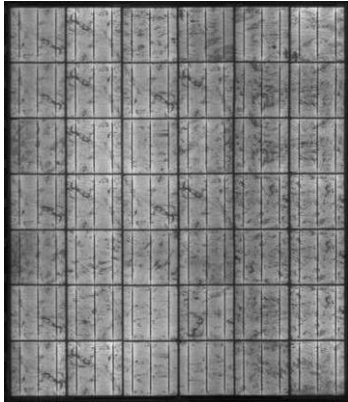
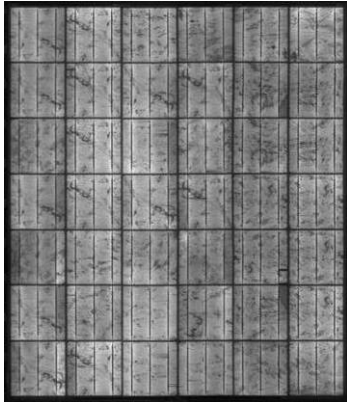
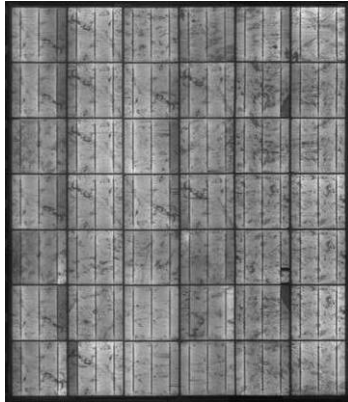
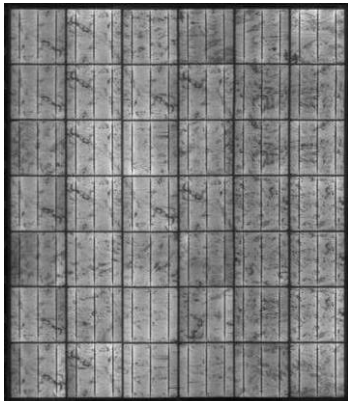
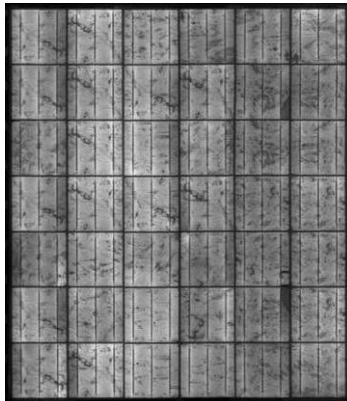
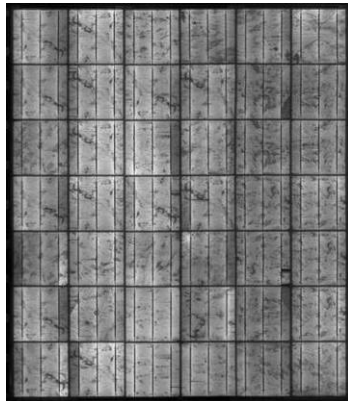
sample1 (マイクロクラック無)		
初期	シーケンス No.3 DML/TC=100/50	シーケンス No.6 DML/TC=150/150
		
シーケンス No.1 DML/TC=50/0	シーケンス No.4 DML/TC=100/100	シーケンス No.7 DML/TC=200/150
		
シーケンス No.2 DML/TC=50/50	シーケンス No.5 DML/TC=150/100	シーケンス No.8 DML/TC=200/200
		

図 II-20-3. DML・TC シーケンシャル試験前後の EL 画像 (sample1)

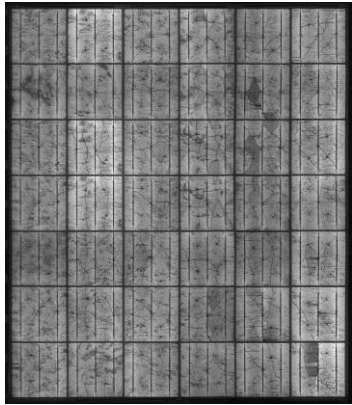
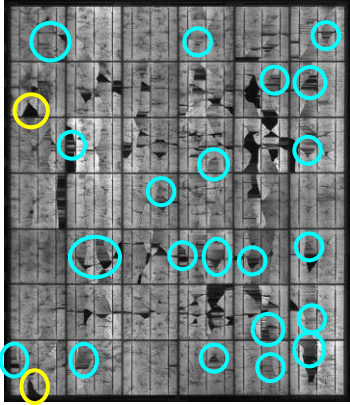
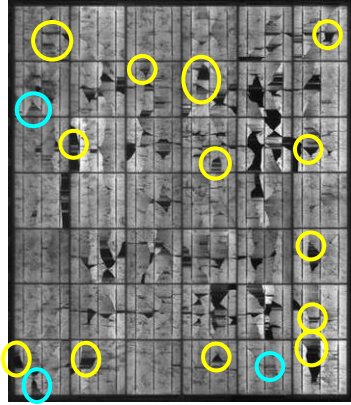
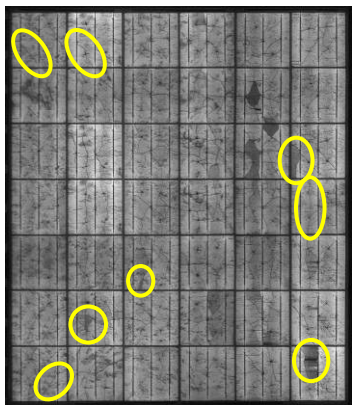
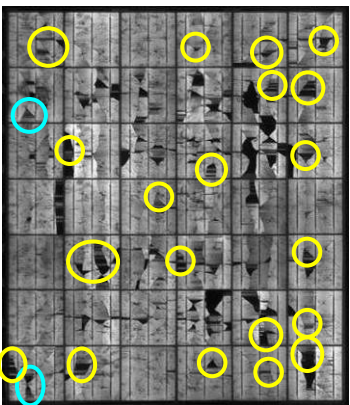
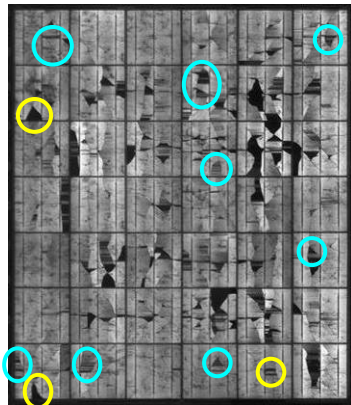
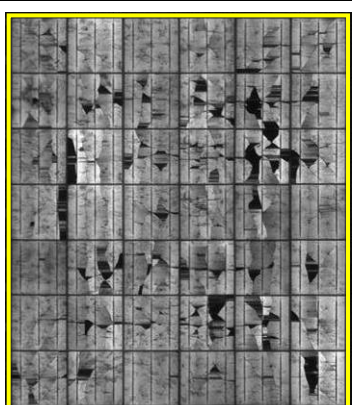
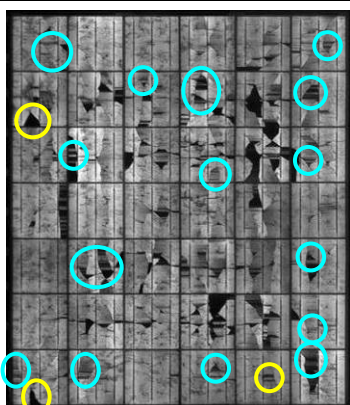
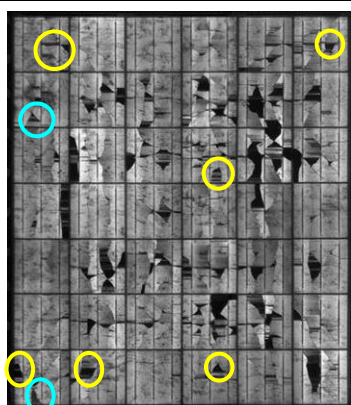
Sample2 (マイクロクラック有)		
初期	シーケンス No.3 DML/TC=100/50	シーケンス No.6 DML/TC=150/150
		
シーケンス No.1 DML/TC=50/0	シーケンス No.4 DML/TC=100/100	シーケンス No.7 DML/TC=200/150
		
シーケンス No.2 DML/TC=50/50	シーケンス No.5 DML/TC=150/100	シーケンス No.8 DML/TC=200/200
		

図 II-20-4. DML・TC シーケンシャル試験前後の EL 画像 (sample2)

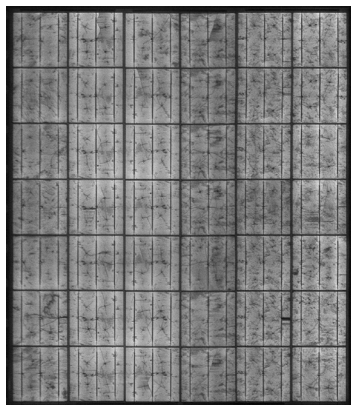
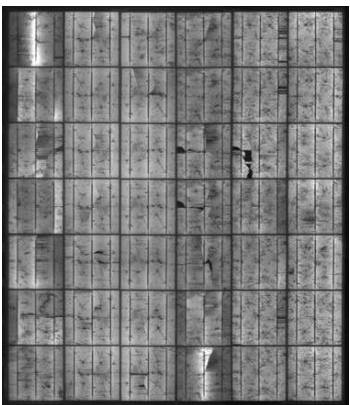
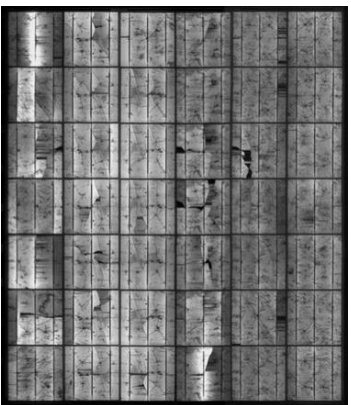
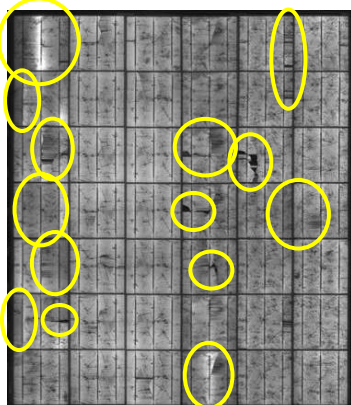
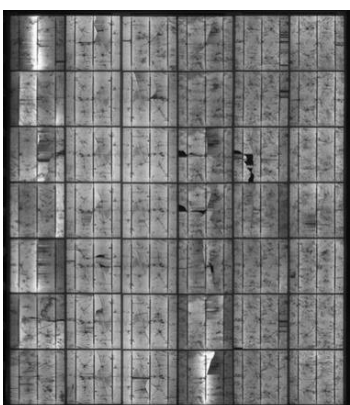
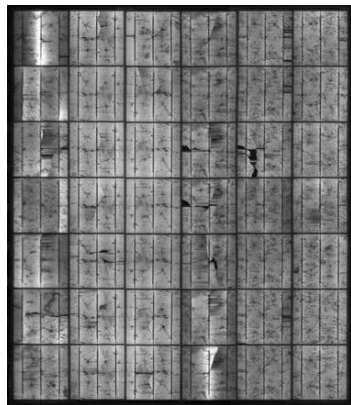
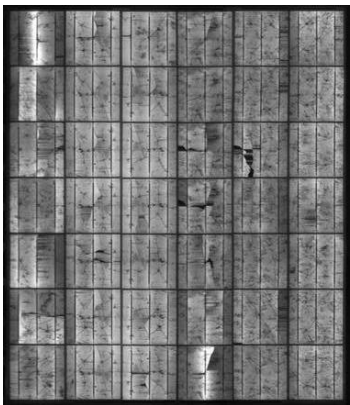
Sample3 (マイクロクラック有)		
初期	シーケンス No.6 DML/TC=0/150	シーケンス No.10 DML/TC=50/250
		
シーケンス No.2 DML/TC=0/50	シーケンス No.8 DML/TC=0/200	—
		
シーケンス No.4 DML/TC=0/100	シーケンス No.9 DML/TC=50/200	—
		

図 II-20-5. DML・TC シーケンシャル試験前後の EL 画像 (sample3)

sample1 (マイクロクラック無) において、初回の DML では出力低下はなく、その後のシーケンスにて徐々に低下する。EL 画像については 2 回目の DML でマイクロクラックが 2 箇所発生し、その後の TC でその部分のフィンガーが破断し暗部が発生した。sample2 (マ

マイクロクラック有)において、初回の DML では出力低下はなく、その後の TC で大きく出力低下する。その後の DML で若干出力が回復し、その後の TC でまた低下する。このように、初回の DML 以降、TC で出力が低下し、DML で出力が回復するという傾向がある。EL 画像についても、図 II-20-4 の青色の丸(輝度が回復)と黄色の丸(輝度が減少)で示すように同様の傾向があり、初回の DML で若干のクラック成長や暗部発生はあるもののほとんど変化はないが、その後の TC においてほとんどのセルでフィンガー破断による暗部の発生が確認された。その後は DML にて暗部が薄くなる箇所が見られ、TC で再び暗部が濃くなるが、試験が進むにつれその箇所は減少する。I-V カーブについては DML 後の TC でフィンガー破断し未発電領域が増えたことによる動作点の低下が見られる。sample3 (マイクロクラック有)においては、初回の TC で sample1 に比べ大きく低下するが、sample2 の DML 実施後ほどではない。その後徐々に低下するが、TC 後の DML や、その後に TC を実施しても大きな低下は見られなかった。EL 画像では初回の TC 後に暗部の発生が見られるが sample2 の DML 実施後ほどではない。その後も EL 画像はほとんど変化がない。

II-21. 考察

これまでの試験結果から、まず ML や DML はマイクロクラックを成長させたり、新たに発生させたりする。また、マイクロクラックがフィンガーまで達していなかった部分もフィンガーまで達するが、接触はしているため出力へ大きな影響はない。ただし、正荷重が加わった状態ではセルに引張応力が加わるためフィンガーまでマイクロクラックが達している場合にはその部分が破断し出力低下を招く可能性がある。TC はフィンガーを破断する方向にストレスが加わると考えられ、マイクロクラックがフィンガーまで達していれば TC によりフィンガーが破断し出力低下を招く。また、TC にはラミネート時にモジュール内に発生する残留応力を緩和する効果もあると考えられる。これにより、TC を先に実施した場合は、DML を先に実施した場合に比べて、その後の DML や TC においてもフィンガー破断は少ない。図 II-21-1 に DML と TC がマイクロクラックに与える影響の模式図を示す。マイクロクラック有のモジュールに対して先に DML を実施するとマイクロクラックがフィンガーまで達し、その後の TC のストレスでフィンガーが破断する。先に TC を実施するとフィンガーを破断させる方向にストレスが加わるが、マイクロクラックはフィンガーまで達していないのでフィンガーは破断しない。その後に DML を実施するとマイクロクラックがフィンガーまで達するが破断はしない。また、残留応力が緩和することでその後の DML のストレスによる影響が少なく、フィンガーは維持される。このように、DML と TC を組み合わせた試験を実施する場合は順番が重要となる。

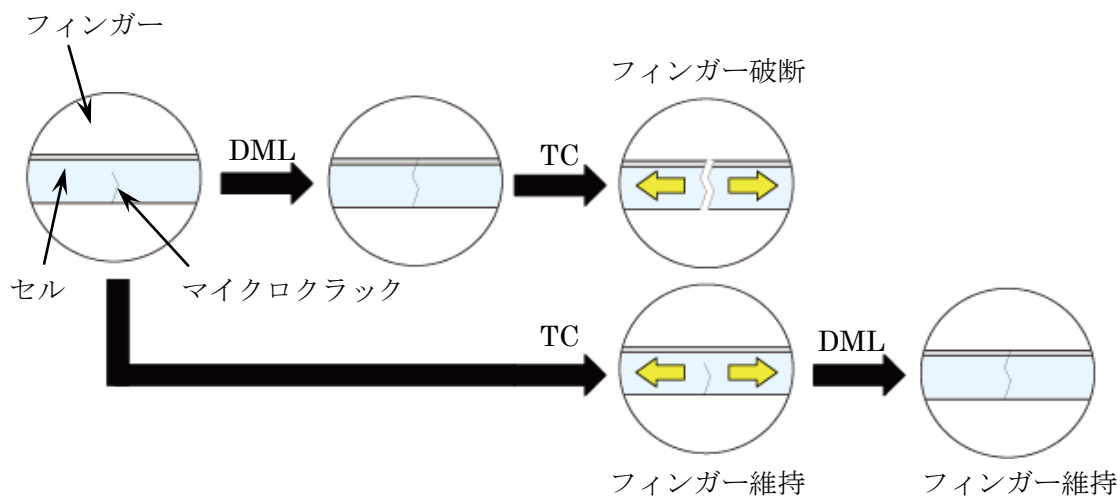


図 II-21-1. DML と TC がマイクロクラックに与える影響

サブテーマ 4 のまとめ

本テーマではマイクロクラック有/無のモジュールにおいて ML や DML、TC 試験を実施し、それぞれの試験でどのような現象が起こり出力へどう影響するかを調査した。その結果、ML、DML と TC ではストレスの加わり方が違うことを明らかにした。実曝露環境下において、モジュールが受けるストレスは昼夜の温度差の他にも風や積雪の荷重がある。これを想定して DML と TC を組み合わせることにより TC を加速させられる可能性があるが、条件等更なる検討が必要である。

(長州産業株式会社：上野 清志)

サブテーマ 5 タブ配線の接続劣化の影響

太陽電池モジュールにおいて、タブ配線接続はモジュール信頼性に密接に係わる重要なプロセスである。本研究では、現行はんだ接続の接続状態を観察し、配線劣化再現を目的として市販サイズモジュールにおける接続状態と信頼性の相関性について調査した。また、接続均一性に優れる導電フィルムを適用した市販サイズモジュールの信頼性について検討し、高効率化モジュールへの導電フィルム適用可能性についても検討した。

II-22. 接続状態

タブ線とセル Ag バスバー電極（以降バスバー電極と呼ぶ）の接続は、タブ線に被覆されたはんだによって接続される。このはんだ接続の接続強度を調べるために、セルに接続されたタブ線の 90 度ピール試験を実施した。その結果を図 II-22-1 に示す。はんだ接続は、金属結合していることから 2 N 以上の比較的高いピール強度を示すが、そのプロファイルは起伏が激しく、一部で 1 N 未満の部分もあった。この接続状態を詳しく調べるために、X 線 CT を用いて、図 II-22-2 に示すようなタブ線接続断面を観察した。図 II-22-3 に観察した接続断面を示す。図 II-22-3 に示すようにはんだ接続では多数のボイドがはんだ層内に観察され、これらが接続強度に不均一をもたらす要因となっていると推察する。

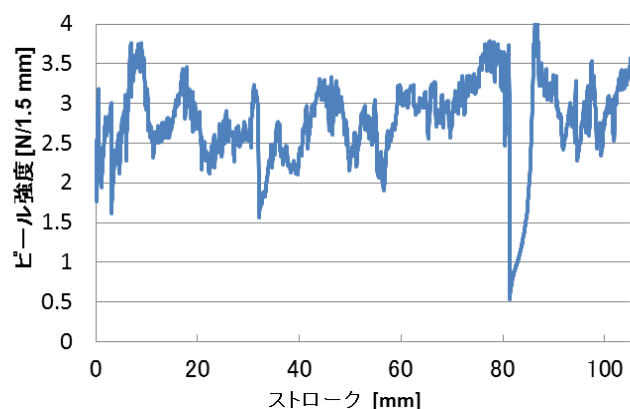


図 II-22-1. 接続のピール強度

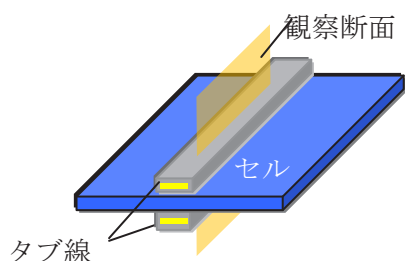


図 II-22-2. X線 CT で観察した断面

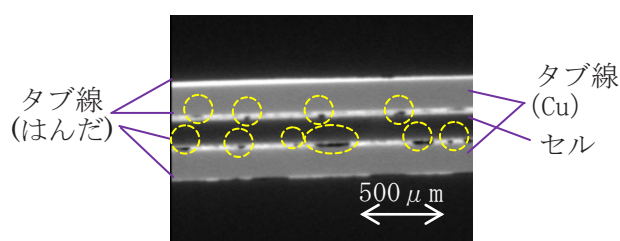


図 II-22-3. はんだ接続の X線 CT 画像
(丸囲みはボイド)

II-23. タブ配線の接続劣化の影響

不均一な接続が及ぼす影響を調べるために、タブ線接続の温度条件について、表 II-23-1 に示す標準条件及びタブ線のピール強度を約 1 N に下げた低温条件を設定し、それぞれの条件で作製した市販サイズモジュールについて、温度サイクル試験 (-40⇔85°C、TC) を実施した。その結果、ピール強度約 1 N では、図 II-23-1 に示すように、 P_{max} は TC サイクル数が増すごとに低下した。また、図 II-23-2 及び図 II-23-3 から明らかのように、FF が低下するのに伴って直列抵抗が増加した。これらのことから、 P_{max} の低下は接続部での抵抗増加による特性変化と考えられ、接続不具合による特性への影響を再現できることが分かった。また、表 II-23-2 に示すように、ピール強度が約 1 N では TC 後にストリング端部のセルに EL 明暗が出現しやすい。このことから TC によるストレスはモジュール周辺部が大きいということが示唆された。不均一な接続がストリング端部に存在する場合、不具合の原因となる可能性が高いと考えられる。

表 II-23-1. タブ線接続工程における温度条件

条件	ピン時間(s)	ホットエア(°C)			ホットエア高さ(mm)			テーブル温度 (°C)				
		抑え/加熱	L	C	R	L	C	R	余熱	配線	徐冷	
標準	3.0/2.0	450	450	450	80	80	80	80	120	180	80	50
低温	3.0/2.0	350	350	350	80	80	80	80	120	160	80	50

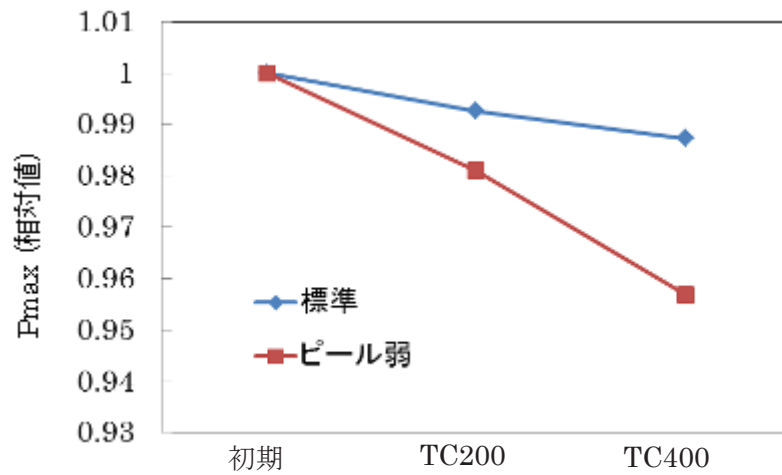


図 II-23-1. 温度サイクル試験に対する Pmax の劣化

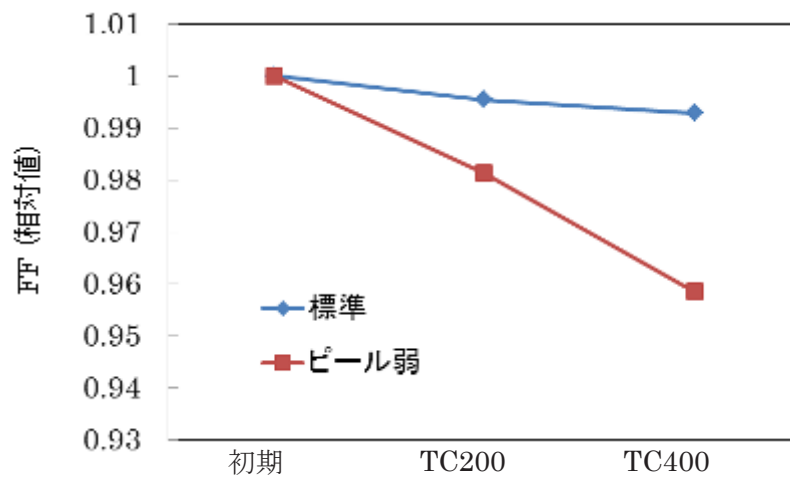


図 II-23-2. 温度サイクル試験に対する FF の劣化

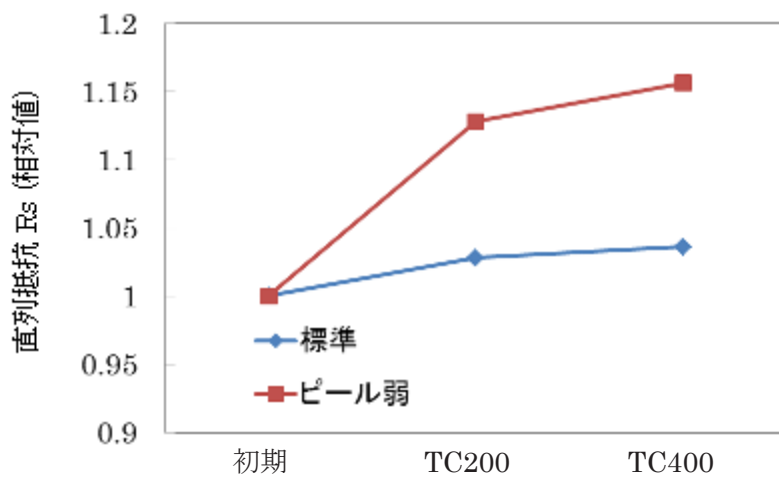



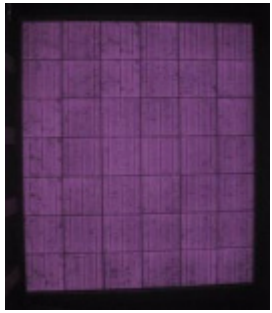
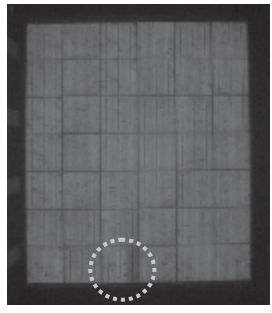
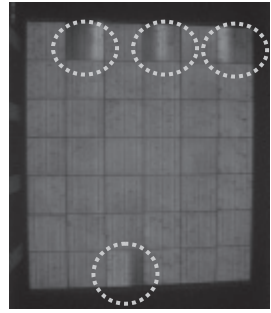


図 II-23-3. 温度サイクル試験に対する直列抵抗 Rs の変化

表 II-23-2. はんだ接続強度を変えたときの EL 画像の変化

接続条件	初期	TC200cycle	TC400cycle
標準条件 ピール強度：約 4 N			
低温条件 ピール強度：約 1 N			

II-24. 導電フィルム (CF) 接続

II-24-1. 導電フィルム (CF) を用いた接続プロセス

導電接着フィルム (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態となっており、接着後に導電性が付与される。図 II-24-1-1 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。相互の電氣的接続は、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。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の接続も容易となる。

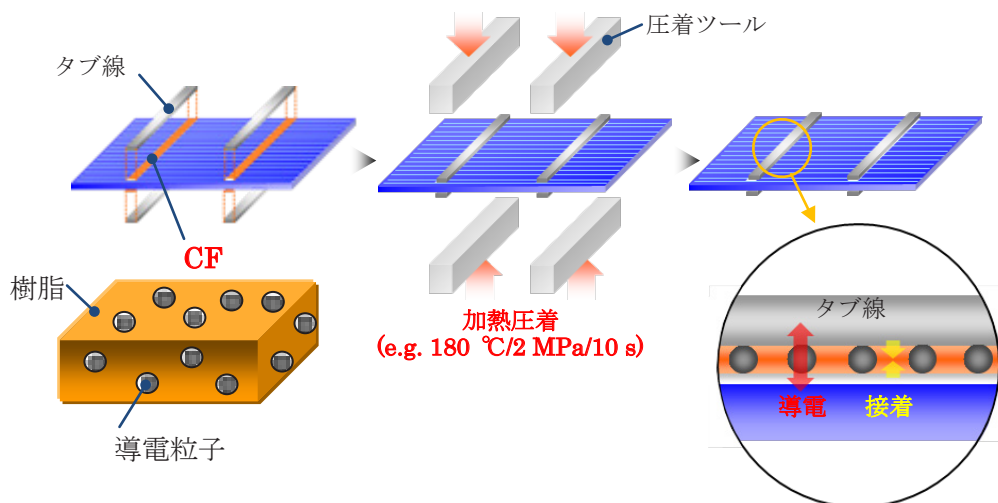


図 II-24-1-1. 導電フィルム (CF) による太陽電池セルのタブ線接続

CF を用いて接続したタブ線の 90 度ピール試験の結果を図 II-24-1-2 に示す。CF 接続は、約 2 N の均一なピール強度を示した。また、接続断面の X 線 CT 画像を、図 II-24-1-3 に示す。CF 接続ではボイドは全く見られず、均一な接続であった。これらのことから、CF 接続は、はんだ接続と比べて安定で均一な接続であることが分かった。

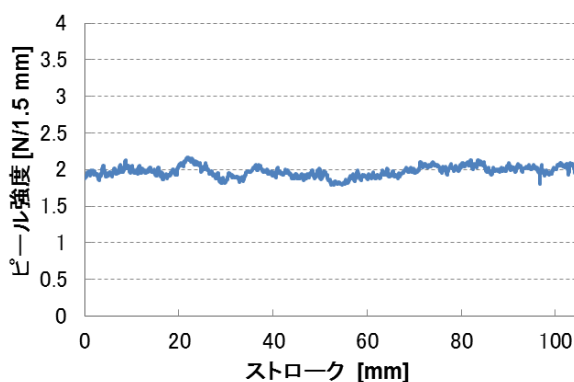


図 II-24-1-2. 接続のピール強度

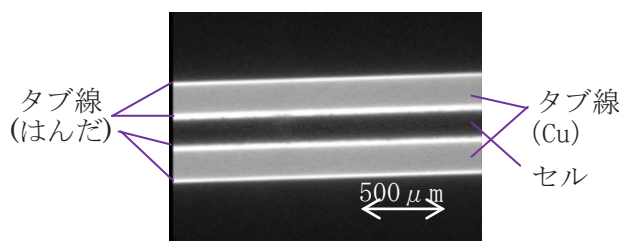


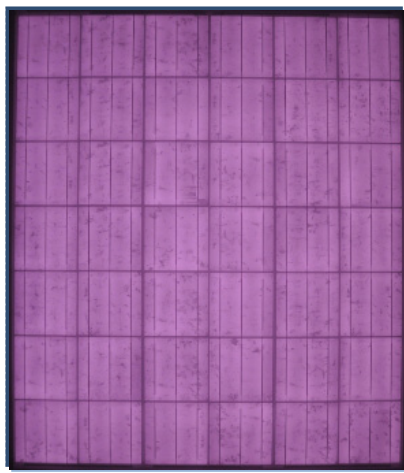
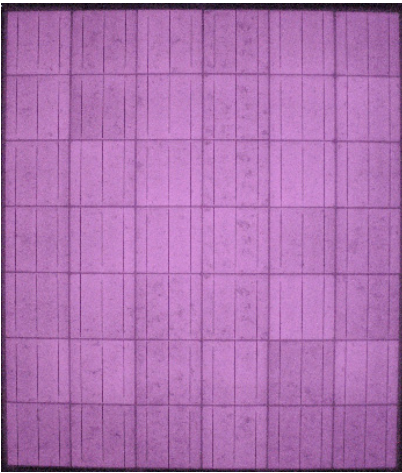
図 II-24-1-3. CF 接続の X 線 CT 画像

II-24-2. 導電フィルム (CF) 接続モジュールの検討

コンソーシアムの標準セル (Q6LTT3-200, Q-Cells) を用いて CF 接続とはんだ接続の市販サイズモジュールの特性を比較した。表 II-24-2-1 に示すように、CF 接続は、はんだ接続と同等の初期特性を得た。また、TC 試験 200 サイクル (TC200) 後の CF 接続モジュール

ルははんだ接続モジュールに比べて Pmax 変化が 0.5%小さかった。このことから、CF 接続モジュールがはんだ接続モジュールと同等以上の信頼性を得ることを確認した。

表 II-24-2-1. CF 接続モジュールとはんだ接続モジュールの比較

項目		CF 接続	はんだ接続
初期特性	Voc (V)	25.9	25.9
	Isc (A)	8.65	8.66
	Pmax (W)	170.0	169.9
	FF	0.76	0.76
TC200cycle	Pmax 変化率	-0.3%	-0.8%
	EL		

II-24-3. 高効率化モジュールの検討

次に、高効率モジュールの実現を目的に、受光面のバスバー電極を省いたバスバーレスセル（図 II-24-3-1）への接続を検討した。バスバーレスセルは、バスバー電極を省いた分の SiNx 面積増加に伴ってセルの開放電圧 (Voc) が増加し、Ag 使用量を削減できるため低コスト化にも寄与する¹⁾。バスバーレスセルの適用可能性を検討するために、はんだ接続及び CF 接続でそれぞれストリング作製した。接続には、はんだ接続及び CF 接続それぞれの専用自動ストリング装置を使用した。ストリング後、目視による接続状態の確認をしたところ、はんだ接続では半数以上のセルに接続不良が見られたが、CF 接続では 100%、接続が可能であった。このことは、図 II-24-3-2 に示すように、はんだ接続ではフィンガー電極だけに接続しているのに対して、CF 接続ではフィンガー電極で導通を得てフィンガー間では接着しているため接続が安定していることによると考える。図 II-24-3-3 にタブ線の 90 度ピール強度を示す。はんだ接続では最大 0.5 N であるのに対して、CF 接続では 2 N 以上の均一な接続強度を示した。これらのことから、バスバーレスセルは CF で良好に接続できることが分かった。実際に CF 接続で作製したバスバーレスセルのストリングを図 II-24-3-4 に、それをを用いて作製した市販サイズモジュールを図 II-24-3-5 にそれぞれ示す。

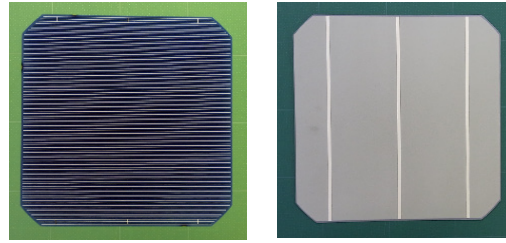


図 II-24-3-1. バスバーレスセル (左)受光面、(右)裏面

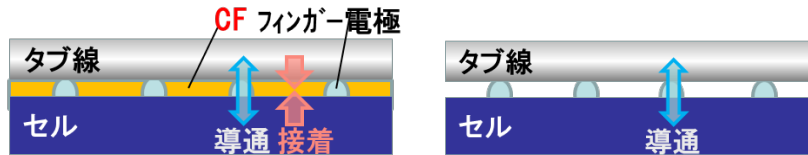


図 II-24-3-2. バスバーレスセルの接続断面模式図 (左)CF 接続、(右)はんだ接続

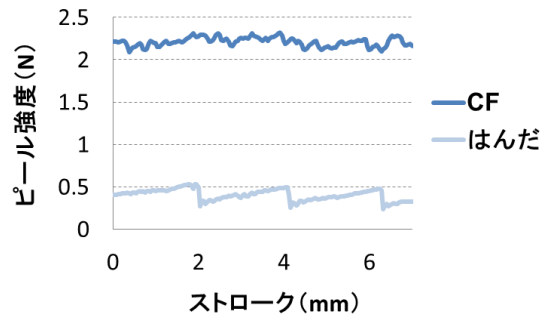


図 II-24-3-3. バスバーレスセルのタブ線ピール強度

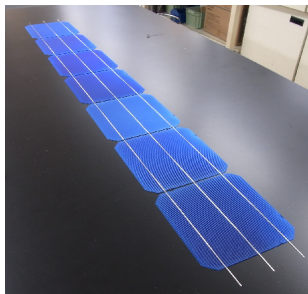


図 II-24-3-4. CF 接続で作製したバスバーレスセルのストリング

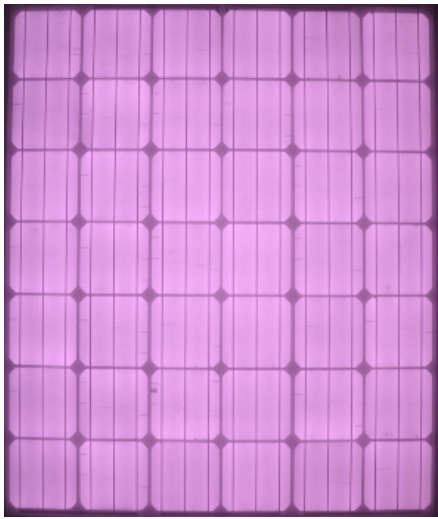
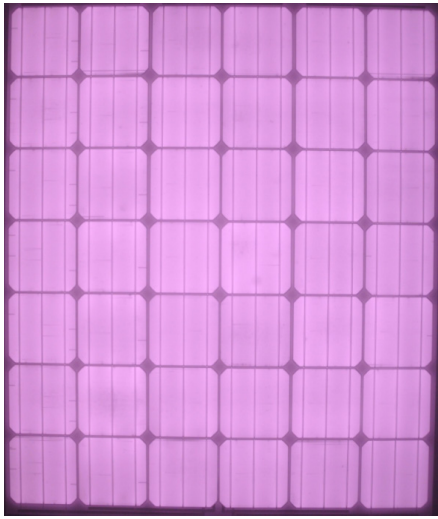


図 II-24-3-5. CF 接続で作製したバスバーレスセルの市販サイズモジュール

次に、タブ線を種々変えて、CF 接続を適用したバスバーレスセルモジュールの特性を評価した。タブ線は現行のタブ線 (SSA-TPS0.2×1.5(20), 日立電線と Light-Capturing Ribbon と呼ばれる高効率タイプのタブ線 (LCR0.26X1.5, Ulbrich) について検討した。LCR は表面に凹凸形状を有しており、本来、発電に寄与しないタブ線上に入射した光を、光の散乱効果でセルに再入射させて出力アップを図るものである²⁾。CF はタブ線の形状をそのまま接続できるため、LCR の接続には好適と考えられる。

特性と EL 画像を表 II-24-3-1 に示す。EL 画像から、CF とバスバーレスセルを用いて良好な市販サイズモジュールを作製できることを確認した。また、光拡散タイプのタブ線を適用することで、標準的なタブ線を用いたモジュールに比べて短絡電流 (Isc) は 1.5% 向上した。

表 II-24-3-1. バスバーレスセルを用いた CF 接続市販サイズモジュールの特性と EL 画像

タブ線	SSA-TPS	LCR
Voc (V)	26.5	26.5
Isc (A)	8.94	9.07 (1.5%up)
Pmax (W)	178.8	183.2 (2.5%up)
FF	0.75	0.76
EL		

サブテーマ 5 のまとめ

- はんだ接続の接続劣化を再現したところ、はんだ接続のピール強度を 4 N から 1 N にした結果、市販サイズモジュールに接続不具合が生じることが分かった。
- CF 接続の接続状態は、はんだ接続と比較して均一な接続であった。
- コンソーシアム標準セルを用いた市販サイズモジュールの信頼性評価結果から、CF 接続モジュールの TC200cycle 後の出力低下率ははんだ接続に比べて 0.5% 小さく、CF 接続モジュールの信頼性ははんだ接続と同等以上であることを示した。
- CF 接続はバスバーレスセルへの接続性に優れ、CF 接続を用いて良好なバスバーレス市販サイズモジュールを作製した。
- CF を適用して LCR を用いたバスバーレス市販サイズモジュールを作製したところ、LCR モジュールは標準タブ線モジュールに比べて Isc が 1.5% 向上することを確認した。

参考文献

- [1] Y. Zemen, R. Alam, S. Pingel: Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2013, pp. 3114-3118.
 [2] Ulblich社ホームページ <http://www.pvribbon.com/>

(日立化成株式会社：木沢 桂子、清水 成宜)

III. まとめ

結晶シリコン太陽電池モジュールの劣化を化学的劣化と物理的・機械的劣化に分類し、前者に関しては、モジュール内に浸入した水蒸気と EVA 封止材の反応によって生成する酢酸のモジュール内での滞留を抑止することが、バックシートの設計上重要であるとの知見を得た。さらには、加水分解により酢酸等の有機酸を発生させない封止材の開発も重要である。後者に関しては、セルがあらかじめ内包するマイクロクラックが劣化を加速すること、さらには、このような劣化が TC 試験と DML 試験の組合せで効果的に加速可能なことも示すことができた。また、配線の接着強度の適正な管理が重要なことも示された。さらに、CF を使用した配線が、信頼性にも優れ、次世代モジュールの配線方法として有望との結果も得た。

薄膜シリコン太陽電池モジュールにおいても、封止材の開発に関しては同様の指針が得られるが、水蒸気そのものでもモジュールが劣化するため、バリア性の高いバックシートの開発も重要である。水分に脆弱である薄膜シリコン太陽電池モジュールに関しては、端子箱からの配線の引き出し箇所の封止方法も劣化抑止のために重要との知見を得た。

(独立行政法人産業技術総合研究所：増田 淳)