

## 第 4 章

### A 会員の研究成果

## 「コアテーマ1 長期曝露モジュールの詳細調査」

### I. はじめに

コアテーマ1では、長期曝露された太陽電池モジュールの調査を通じて、実際使用されたモジュールがどのように劣化しているのか理解し、高信頼性モジュール開発の課題を明らかにすることを目指している。そこで下記のような方針に基づいてモジュール調査を進めている。

1. 多岐にわたる屋外曝露モジュールをそれぞれ一定数調査し、曝露サイト毎、モジュールタイプ毎、型式/年式毎の劣化に関する網羅的な統計情報を得る。
2. 上記モジュールの非破壊分析、破壊分析を行い、マイクロレベルでの劣化現象を追求し、メカニズムを解明する。
3. 上記メカニズムを基に、高信頼性モジュール開発に向けた技術課題、評価手法の提案を行う。

コアテーマ1の参加機関は表 I-1 に示すように、一般会員 6 機関、特別会員 4 機関から成る。

表 I-1. コアテーマ1 参加機関

一般会員	特別会員
大日本印刷株式会社	石川県工業試験場
帝人デュポンフィルム株式会社	太陽光発電技術研究組合
デュポン株式会社	一般社団法人日本電機工業会
東京エレクトロン株式会社	学校法人立命館
凸版印刷株式会社	
日立化成工業株式会社	
(順不同)	(順不同)

(日立化成工業株式会社：清水 成宜)

### II. 結果と考察

#### II-1 調査方法

最初のステップとして曝露サイトからの取り外しや中古モジュール販売業者からの購入を通じて、調査モジュールを集め、各モジュールに ID を付与して管理する。次にそれらモジュールに対し、外観異常の検査、電流-電圧 (I-V) 特性、エレクトロルミネッセンス (EL) 画像測定、熱画像測定などの非破壊検査を実施する。次に非破壊検査で推定した劣化因子、

劣化箇所の情報を基に破壊分析による詳細な分析を行う。最後に部材間の相互作用や設置環境を考慮し、劣化メカニズムを推定していく。図 II-1-1 に調査フローを示す。

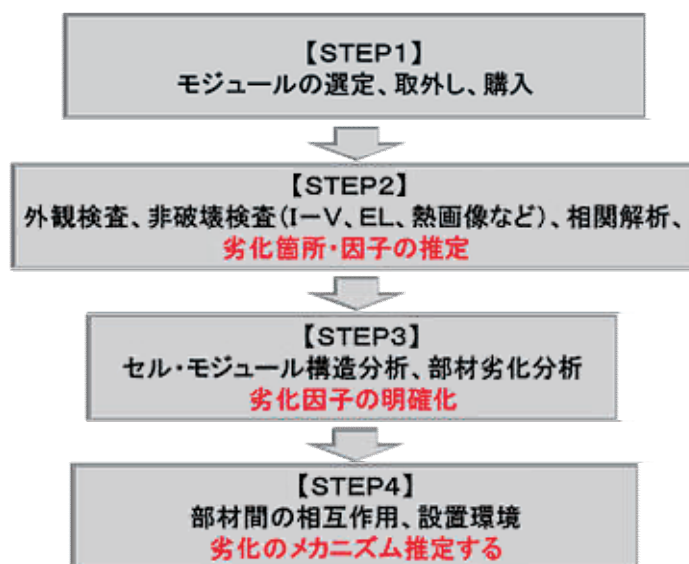


図 II-1-1. 曝露モジュール調査のフロー

(日立化成工業株式会社：清水 成宜)

## II-2 調査対象モジュール

本研究では、産総研四国センター（香川県）設置中の B 社製単結晶モジュール、石川県工業試験場（石川県）設置中の D 社製多結晶モジュール、JQA ソーラーテクノセンター（静岡県）に設置されていた C 社製多結晶モジュール、六甲新エネルギー実験センター（兵庫県）に設置されていた B 社製単結晶モジュール、ネクストエナジー・アンド・リソース株式会社から購入した複数メーカーにおける中古モジュール（過去に屋外曝露されていた）を調査の対象とした。以下に調査モジュールの詳細を示す。

### II-2-1 産総研四国センター

産総研四国センターの建屋屋上には、B 社製単結晶モジュール 720 台、47.52 kW の発電システムが稼動している。これは 1985 年に愛媛県西条市に設置されたものの一部が 1994 年に移設されたものである。途中 1990 年～1994 年まで一時倉庫で保管されていた可能性があり、合計約 22 年間（最大で 27 年間）曝露されていると考えられる。720 台の中から取外しモジュールを選定するため、稼動中のモジュールの外観検査と、熱画像測定を実施した。全てのモジュールの受光面には黄変が観られ、約 1/3 のモジュールには端子箱裏に焦げのような異常が観られた。また熱画像測定でも一部のモジュールにホットスポットが認められた。図 II-2-1-1 に曝露モジュールの外観、黄変と端子箱裏の焦げの異常、熱画像を示

す。取り外しモジュールとして、熱画像で発熱が観られたモジュール 1 台、端子箱裏に焦げがあり熱画像に異常がないモジュール 1 台、システム電圧が高い位置のモジュール 2 台、システム電圧が低い位置のモジュール 2 台を選定した。産総研四国センターでは同型式の未曝露モジュールが保管されていたので、この 1 台を併せて合計 7 台のモジュールを調査する。



図 II-2-1-1. 産総研四国センターの曝露モジュール（左）黄変と端子箱裏の焦げ（中央）  
発熱異常のモジュール（右）

## II-2-2 石川県工業試験場

石川県工業試験場には、1998年に導入した図 II-2-2-1 に示すような総出力 209.28 kW の太陽光発電システムがある。傾斜角度 16.7°の大屋根には、D 社製合計出力 192.96 kW の多結晶モジュール 1608 台を、南向き及び北向きに各 804 台設置している。また、屋根中央部にある大屋根と同角度の越屋根には、同メーカー製で合計出力 16.32 kW の単結晶モジュール 120 台を、南向き及び北向きに各 60 台設置している。2012 年現在まで系統連系による発電を継続しており、構内電源として利用している。2003 年に保守のため南向き多結晶モジュールの内 159 台を新品と交換したが、本研究では、このうち多結晶モジュールを対象として、次の要領で調査モジュールを選定した。まず、劣化による発熱が疑われるモジュールを抽出するため、稼働中の太陽電池の熱画像を、高所作業車を用いて 2~15 m の距離から撮影した。その結果、図 II-2-2-2 に示すように、セルや端子箱周辺で局所的に発熱しているモジュールが確認できた。このような特徴的な発熱を示すモジュールを、南向きのモジュールから計 8 台選定した。また、この他に、南向き及び北向きの双方より無作為に各 8 台を選定した。これら選定した計 24 台の調査モジュールの分析を行う。

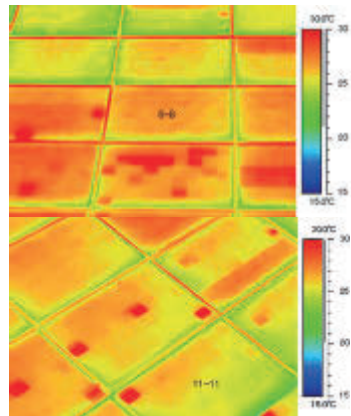


図 II-2-2-1. 石川県工業試験場の太陽電池モジュール 図 II-2-2-2. 発熱異常のモジュールの例

### II-2-3 ソーラーテクノセンター、六甲エネルギー実験センター

産業技術総合研究所つくばセンター（茨城県つくば市）の2-6棟には数百台に及ぶ曝露済み太陽電池モジュールが保管されている。約20年前に製作されたモジュールである。これらはNEDOのニューサンシャイン計画の中で用いられ、静岡県浜松市および兵庫県神戸市で10年程度、屋外曝露されたモジュールであると考えられている。曝露試験終了後にそれらモジュールの一部が産総研つくばセンターに引き取られ、さらに約10年間倉庫に保管されていた。浜松市で曝露されていたモジュールは、ソーラーテクノセンター（静岡県浜松市）において、(財)日本品質保証機構（JQA）が「太陽電池システム評価技術の開発」のために1990年から2001年にかけて評価を行ったものの一部と推測される。一方、神戸市で曝露されていたモジュールは、関西電力（株）六甲新エネルギー実証試験センターにおいて、(財)電力中央研究所が実施した「太陽電池システム実証技術の開発（高密度系統連系試験）」の研究で使用されたと考えられている。この中から浜松市で曝露されていたと考えられるC社製多結晶モジュールc2-02及び兵庫県に設置されていたと考えられるB社製単結晶モジュールc2-01各30台ずつを調査対象とする。

表 II-2-1. 調査対象の太陽電池モジュール

メーカー	型式	種類	製造年	使用場所	曝露期間(年)	台数
A	c2-03	単結晶	2001	愛知	9	10 (25)
B	c2-01	単結晶	1989	六甲	11	30
	c2-11	単結晶	1991,92	宮古島	19~17	10
	c2-12	単結晶	-	岐阜県	—	10
	c2-01	単結晶	1991	宮古島	19~17	10
	c2-13	単結晶	1985	香川県	22 (27)	6
C	c2-06	多結晶	2000	埼玉	10	4 (88)
	c2-08a	多結晶	1991,94	宮古島	19~16	5
	c2-08b	多結晶	1993	宮古島	17	5
	c2-02	多結晶	1991,92	浜松	10	30
D	c2-09	単結晶	1993	宮古島	17	10
	c2-04	単結晶	2002	神奈川	5	3 (17)
	c2-10	単結晶	2005	鹿児島	5	10 (24)
	c2-17	多結晶	1997	石川	14	24
	c2-05	多結晶	1999, 00	関東	9	10 (16)
E	c2-07	薄膜 Si	1996	群馬	15	10

※台数における ( ) 数字は、I-V データの提供を受けた台数を表す。

#### II-2-4 中古モジュールの購入

さらに調査対象を拡大するため、6 メーカー、13 型式、合計 114 台、1 型式あたり数台～10 台をネクストエナジー・アンド・リソース株式会社から購入した。これらは 10 年以上曝露されているものを中心に、外観異常があるもの、I-V 曲線に異常があるものなどを選定した。本研究ではその中から曝露年数や設置場所の情報がある 5 メーカー、11 型式を非破壊検査の対象と決めた。単結晶モジュール 6 型式、多結晶モジュール 4 型式、薄膜系太陽電池が 1 型式である。またネクストエナジー・アンド・リソース株式会社からは、購入した一部のモジュールについてそれと同型式、同期間、同じ場所で曝露されていたモジュール数十台分の I-V データを別途提供頂いた。

以上の調査モジュールの一覧表を表 II-2-1 に示す。

調査モジュールは 1 台ずつ c2-XX-YYYY という ID 番号を付与し、テプラシールで貼り付け産総研九州センターで保管している。ID において c2 は II 期コンソーシアムを意味し、XX は型式毎に区別した番号、YYYY はモジュール毎に区別した番号を意味している。

## II-2-5 非破壊検査方法

非破壊検査として外観検査、I-V 測定、EL 測定、熱画像測定を実施した。外観検査はモジュール一台ずつ外観写真を撮影するとともに、セル、配線、ガラス、封止材、バックシート、端子箱について観察し、異常の有無及び異常内容を確認した。I-V 測定は、ソーラーシミュレーター（PVS1222i-L、日清紡メカトロニクス製）を用いて 5 回測定した平均値を求めた。得られた I-V データから屋外曝露モジュールの劣化因子を推定するために、同じ型式のモジュールについて、最大電力（Pmax）の低下率に対する他の I-V パラメータ（最適動作電圧 Vpm、最適動作電流 Ipm、開放電圧 Voc、短絡電流 Isc）の低下率との相関解析を行った。各モジュールの銘板に定格値として記されている Ipm 相当の電流を順方向に印加し、EL カメラシステム（PVX100、アイテス製）を用いて EL 測定を行った。熱画像は、暗状態で順方向に電圧を印加して測定する方法（以降、順方向熱画像と記す）及び太陽光を照らしてモジュールを短絡させ測定する方法（以降、Isc 熱画像と記す）の 2 通りについて測定した。順方向熱画像測定は EL 測定と同様の電流値を流し、5 分経過後に赤外線サーモグラフィ装置（H2630 NEC Avio 赤外線テクノロジー製）を用いて撮影した。Isc 熱画像はモジュールを短絡させた後、受光面を太陽に向け、5 分後に同様の赤外線サーモグラフィ装置で測定した。なお上記の測定は、モジュールの端子箱におけるバイパスダイオードが搭載された状態で実施した。

（日立化成工業株式会社：清水 成宜）

## II-3 非破壊検査の結果

### II-3-1. A 社製モジュール

#### (1) 調査対象

型式： A 社製 c2-03

タイプ： 単結晶 Si

定格値：  $P_{max} = 175 \text{ W}$ ,  $V_{oc} = 65.7 \text{ V}$ ,  $I_{sc} = 3.64 \text{ A}$ ,  $V_{pm} = 52.9 \text{ V}$ ,  $I_{pm} = 3.31 \text{ A}$

定格から算出される  $FF = 73.2\%$

#### (2) 外観

外観上の異常は、受光面、バックシート面ともに見られなかった。外観の一例を図 II-3-1-1 に示す。



図 II-3-1-1. c2-03 モジュールの外観写真

#### (3) I-V 特性の統計解析

定格値を基準とした出力低下率のヒストグラムを図 II-3-1-2 に示す。(以下の I-V データについては 10 台のうち 9 台のデータを示している。これは入手直後の I-V 測定条件に不備があることが判明したので後日再測定したデータであるが、すでに 1 台を構成プロファイル用に破壊分析に供してしまっていたためである。) 概ね 9~15%程度の  $P_{max}$  低下を示すと示唆された。なお、N 数が 10 と少なめであることから、分布形状による統計分析は妥当でないと判断した。

次に、定格値を基準として I-V パラメータ ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{pm}$ ,  $I_{pm}$ ,  $FF$ ) の低下率を  $P_{max}$  低下率についてプロットした (図 II-3-1-3)。 $\Delta V_{oc}$ ,  $\Delta I_{sc}$ ,  $\Delta I_{pm}$  と  $\Delta P_{max}$  の相関は比較的弱めであった一方で、 $\Delta V_{pm}$  と  $\Delta FF$  が  $\Delta P_{max}$  と強い相関を示すことが分かった。これは本型式の主要な劣化モードが直列抵抗の増大であることを示唆している。なお、 $\Delta V_{oc}$  については相関係数が小さめとの結果が得られているが詳細不明である。

ここで上記 I-V データは産総研九州センターが保有するソーラーシミュレーターによる測定値 (以下 AIST 値) だが、ネクストエナジー・アンド・リソース株式会社は保有する全てのモジュールについて同社保有のソーラーシミュレーターでデータ (以下 NE 値) を採取している。NE 値の提供を受け統計解析をおこなったところ、AIST 値と同様の結果が得られている (図 II-3-1-4)。また、NE 値について購入分と保有全モジュールの f 検定を行い、ランダムサンプリング性を確認した (表 II-3-1-1)。従って、購入した 10 台のモジュールの AIST 値は本型式における一般的な劣化データとして扱えることと示唆された。但し AIST 値と



NE 値の間にはデータに若干のバイアスがあり、特に Voc と Isc については相関が弱めであるため、データの取り扱いには注意が必要である。

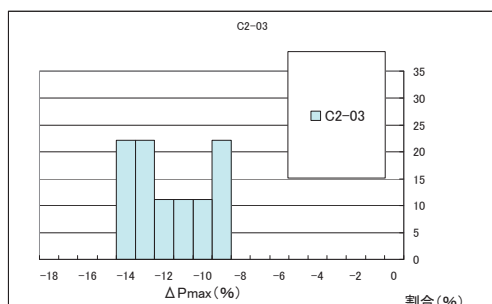
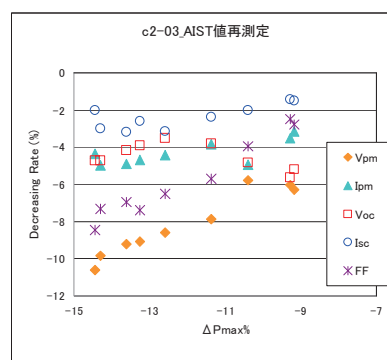


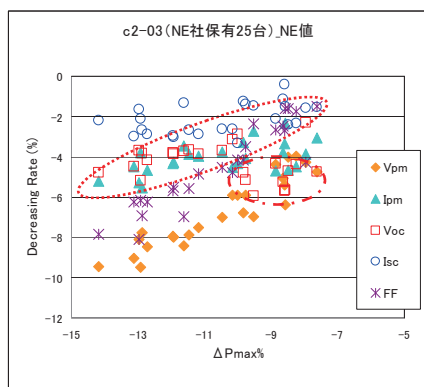
図 II-3-1-2. Pmax のヒストグラム



型番	$\Delta V_{pm}$	$\Delta I_{pm}$	$\Delta V_{oc}$	$\Delta I_{sc}$	$\Delta FF$
c2-03	0.97	0.71	-0.51	0.74	0.98

図 II-3-1-3. I-V パラメータ散布図 (AIST 値)

なお、図 II-3-1-4 の散布図のうち Vpm データ (□) については赤点線 (---および---) の枠で示すように 2 種類のモードが混在しているようにも見える。図 II-3-1-2 のヒストグラムや図 II-3-1-3 の AIST データにおいてもそれを支持する傾向が見られており、現在調査中である。



型番	$\Delta V_{pm}$	$\Delta I_{pm}$	$\Delta V_{oc}$	$\Delta I_{sc}$	$\Delta FF$
c2-03	0.93	0.53	-0.18	0.47	0.92

図 II-3-1-4. I-V パラメータ散布図 (NE 値)

表 II-3-1-1. Pmax データの f 検定結果

	購入分	すべて
平均	155.90	156.54
分散	13.33	11.40
観測数	9	25
自由度	8	24
観測された分散比	1.17	
P(F<=f) 両側	0.36	
F 境界値 両側	2.36	

以下、一例として出力低下最小モジュール (c2-03-1008) と出力低下最大モジュール (c2-03-1002) についての各種測定データ比較の結果を紹介する。

#### (4) I-V 特性

図 II-3-1-5 に出力低下最大モジュールおよび最小モジュールの I-V 曲線、表 II-3-1-2 にパラメータの値、定格値からの低下率、両者間の比を示す。両者の間には FF で差があるが、これは Vpm の差によるものであると示唆され、図 II-3-1-3 ならびに図 II-3-1-4 の散布図に見られる傾向と一致した。

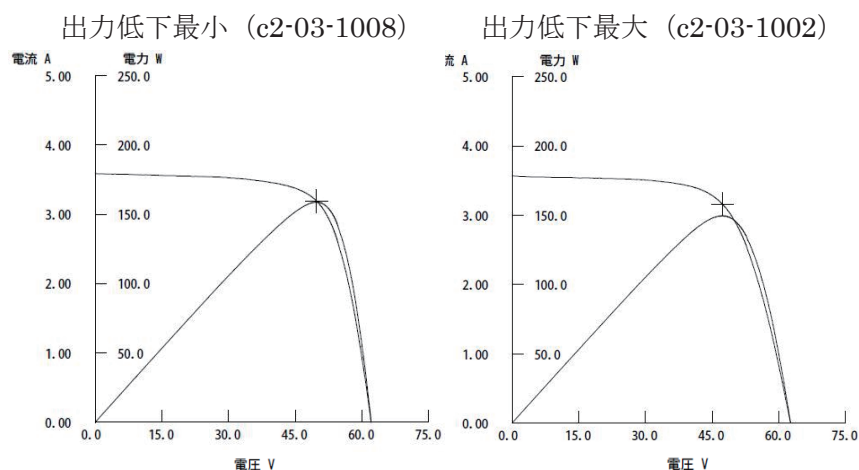


図 II-3-1-5. 出力低下最小および最大モジュールの I-V 曲線

表 II-3-1-2. 出力低下最小および最大モジュールの I-V パラメータ

	Pmax [W]	Voc [V]	Isc [A]	Vpm [V]	Ipm [A]	FF [-]	Memo
定格	175.00	65.70	3.64	52.90	3.31		
c2-03-1008							出力低下最小
測定値	158.75	61.99	3.59	49.71	3.19	0.71	
低下率 <sup>a)</sup>	9.28%	5.65%	1.43%	6.03%	3.50%	-	
c2-03-1002							出力低下最大
測定値	149.72	62.60	3.57	47.28	3.17	0.67	
低下率 <sup>a)</sup>	14.45%	4.71%	2.01%	10.62%	4.35%	-	
Ratio <sup>b)</sup>	106.04%	99.02%	100.59%	105.13%	100.88%	106.47%	

a) 低下率 = (定格値 - 測定値) / 定格値

b) Ratio = c2-03-1008値 / c2-03-1002値

### (5) EL 画像、熱画像

図 II-3-1-6 に EL の異常部拡大画像を示す。本型式全体で見られる特徴、ならびに出力低下と関連のありそうなポイントを以下に示す（工程由来で生じた模様で、出力に関係ないと思われる特徴については割愛する）。

異常① セルの周辺から暗化。

異常② 一部のセルが全体的に暗化。経時発生なのかどうかの判断は困難だが、暗部に見られるバスバー電極付近の発光は電極高抵抗化を反映している可能性があり、I-V 特性との一致が示唆される。

異常③ バスバーに直交する破線状暗化。周辺画像よりフィンガー断線はないと推定。

異常④ クラック状欠点。周辺画像より断線はなく、出力には影響が少ないと推定。

特徴 出力低下が大きいほうが、①、②の傾向がやや強いように見える。

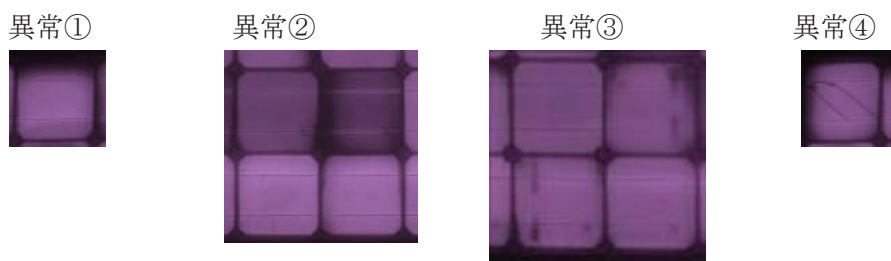


図 II-3-1-6. EL 画像で見られた異常の拡大写真

図 II-3-1-7 に出力最大品・最小品の EL 画像、順方向熱画像・Isc 熱画像を示す。EL 画像では出力差による暗化傾向を反映した結果が得られているが、熱画像を見ると欠点部位と発熱の部位は必ずしも一致しない。順方向熱画像でのフレーム近傍での発熱や Isc 熱画像でのホットスポット化などが出力低下モジュールで見られているが、温度レンジが狭いため、この熱画像だけでは傾向は判断できないといえる。なお、Isc 熱画像での右下部の発熱は地熱が外乱として含まれている可能性が高い。

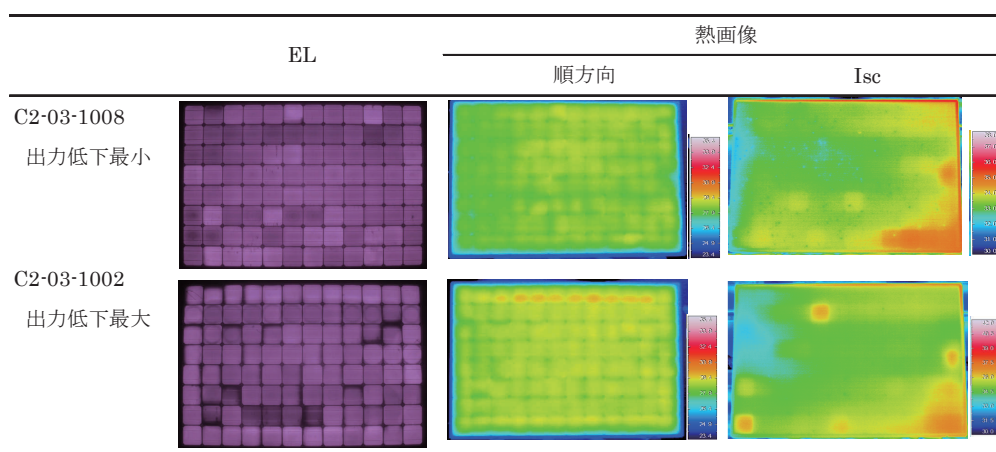


図 II-3-1-7. 出力低下最小および最大モジュールの EL 画像、順方向熱画像、Isc 熱画像

#### まとめ

A 社製モジュールでは I-V 測定より直列抵抗増加起因での劣化モードが示唆された。後節で取り扱うデータについても同様の考察・解釈を行うこととする。また、NE 値との整合性を f 検定で確認した。EL 画像からは複数の暗化モードが確認され、出力低下が大きいほどやや顕著になる傾向が見られた。順方向熱画像についてはフレームに沿って発熱している様子が確認されているが、その温度差は小さく、解釈にあたっては注意が必要といえる。

(帝人デュポンフィルム株式会社：鈴木 健太郎、  
帝人デュポンフィルム株式会社：田名部 佳那)

### II-3-2 B 社製モジュール

B 社製モジュールについて、表 II-3-2-1 に定格値、図 II-3-2-1 に Pmax の劣化割合の分布、図 II-3-2-2 に Pmax 劣化と I-V パラメータとの相関、表 II-3-2-2 に相関解析から得られた相関係数を示す。結果については、型式毎に述べる。

表 II-3-2-1. 調査モジュールの定格値の一覧

型式	Pmax (W)	Vpm (V)	Ipm (A)	Voc (V)	Isc (A)
c2-01Ro	47.2	15.9	2.97	19.8	3.35
c2-01Mi	47.0	15.4	3.05	19.8	3.35
c2-11	65.0	21.3	3.05	記載なし	記載なし
c2-12	100	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし
c2-13	66.0	27.8	3.12	22.8	2.89

Ro：六甲、Mi：宮古島での曝露を意味する

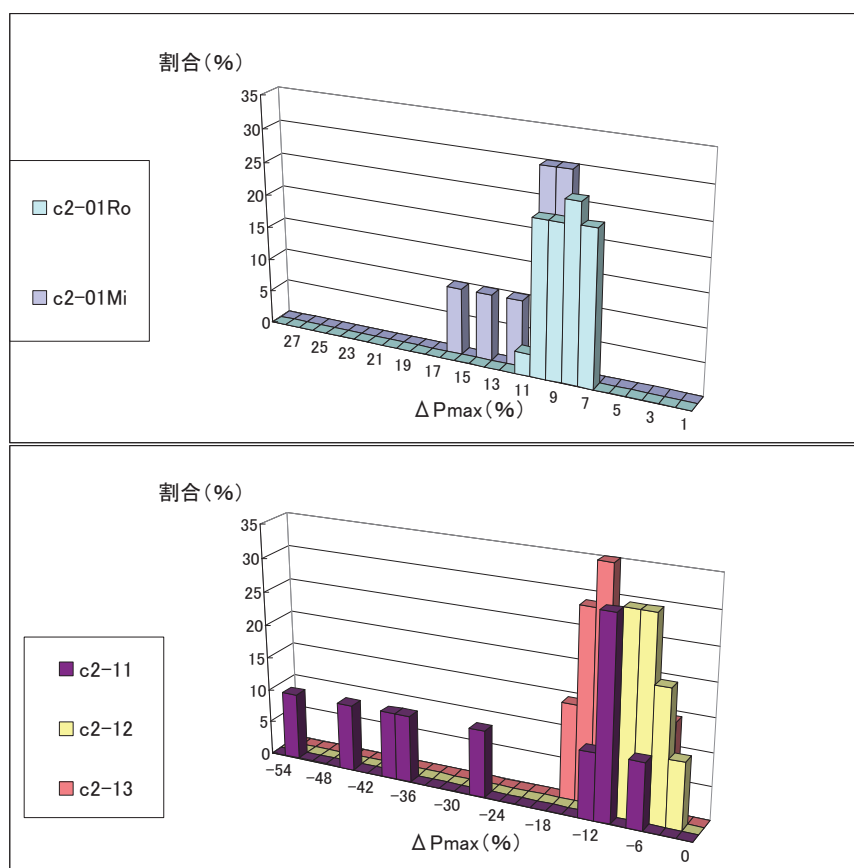


図 II-3-2-1. 各調査モジュールにおける Pmax の劣化割合の分布

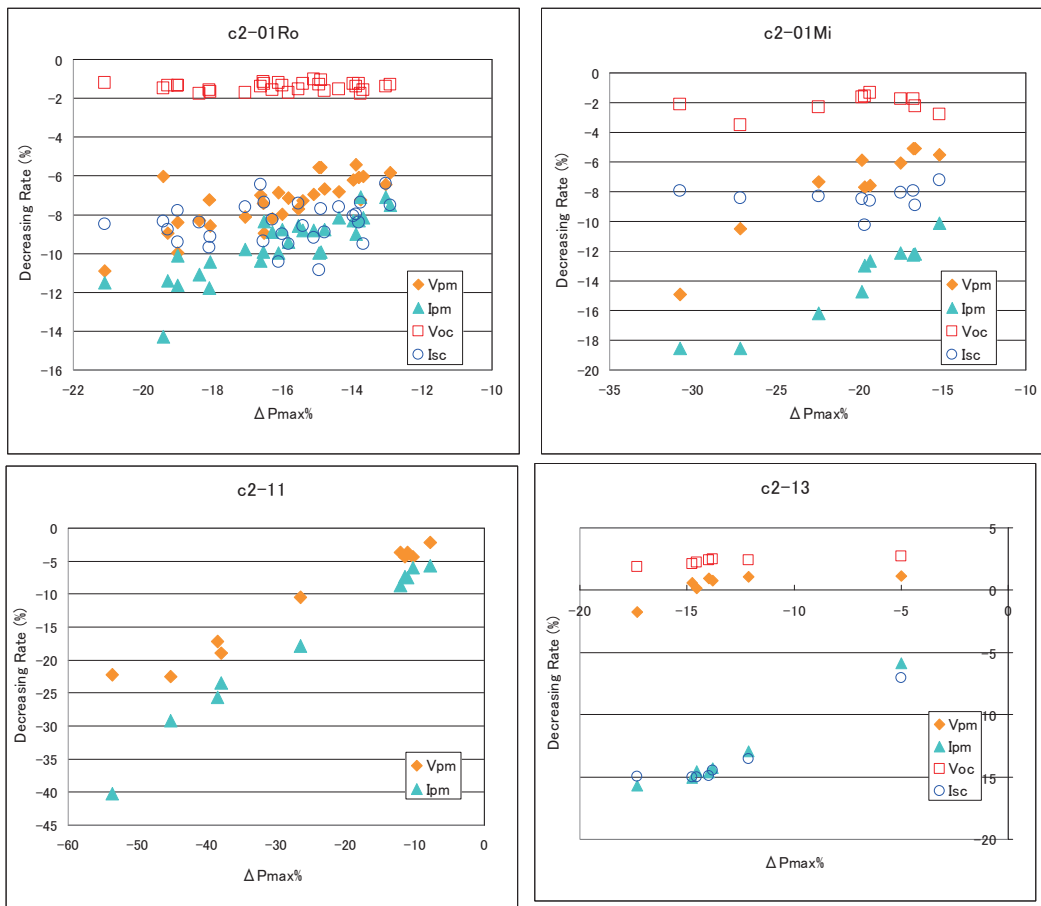


図 II-3-2-2. 各調査モジュールにおける Pmax 劣化と I-V パラメータとの相関

表 II-3-2-2. Pmax 劣化と I-V パラメータとの相関係数

型式	$\Delta V_{pm}$	$\Delta I_{pm}$	$\Delta V_{oc}$	$\Delta I_{sc}$
c2-01Ro	0.75	0.85	0.06	0.20
c2-01Mi	0.95	0.96	0.35	0.01
c2-11	0.99	0.99	—	—
c2-13	0.92	0.94	0.88	0.73

### II-3-2-1 c2-01Ro モジュール

#### (1) 外観

封止材に関しては黄変、セル周辺部の剥離、バックシートに関しては焦げ、変形、その他タブ線の変色が観察された。

## (2) I-V 特性の統計解析と I-V カーブ

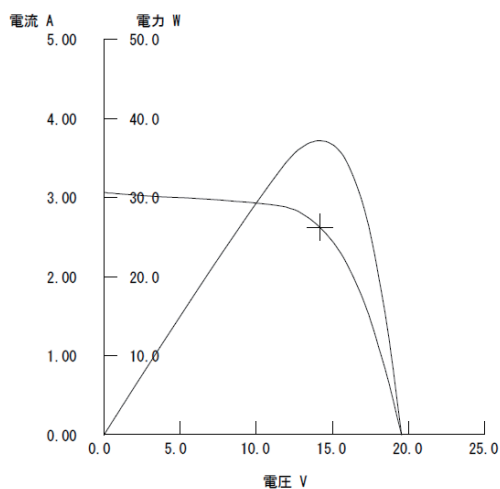


図 II-3-2-3. Pmax が最も低いモジュール (c2-01-289) の I-V カーブ (左)

Pmax は平均 16.1%劣化していた。ΔPmax は ΔVpm、ΔIpm と相関性が高い。

## (3) EL 画像、熱画像

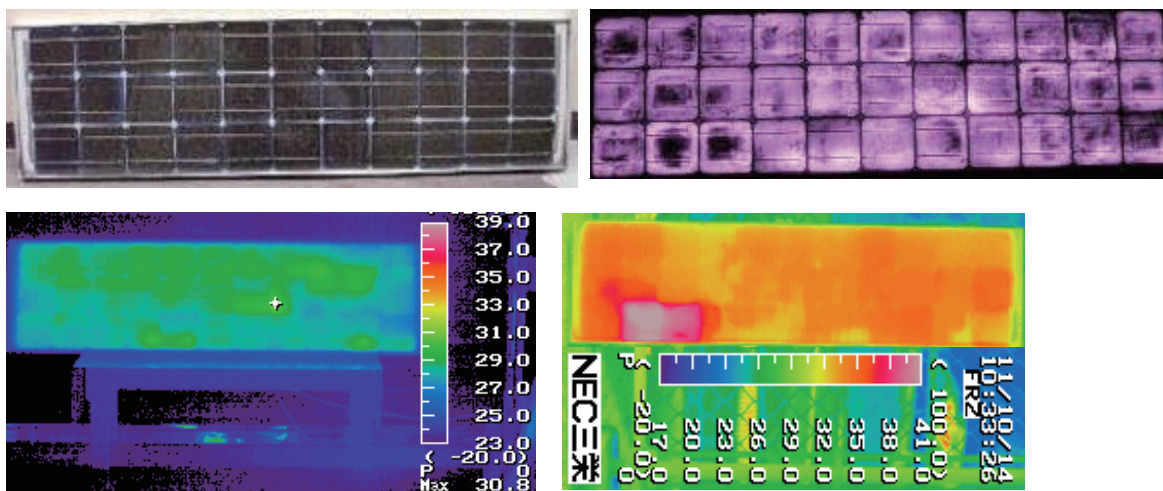


図 II-3-2-4. Pmax が最も低いモジュール (c2-01-289) の外観画像 (上左)、EL 画像 (上右) と順方向熱画像 (下左)、Isc 熱画像 (下右)

EL 画像に関して、発光していない黒い部分が多いほど Pmax が低いという特徴があった。又黒い部分はタブ線の間にある事が多い。タブ線の一部に強く白く発光しているものがある。電流集中していると考えられ、順方向熱画像でやや発熱していることが確認された。黒く発光していない部分が劣化と関係があり今後分析が必要と考えられる。

## II-3-2-2 c2-01Mi モジュール

### (1) 外観

封止材に関しては黄変、セル周辺部の変色と剥離、バックシートに関してはキズ、その他タブ線の変色が観察された。同型式 (曝露地六甲) と同じ傾向であった。

(2) I-V 特性の統計解析と I-V カーブ

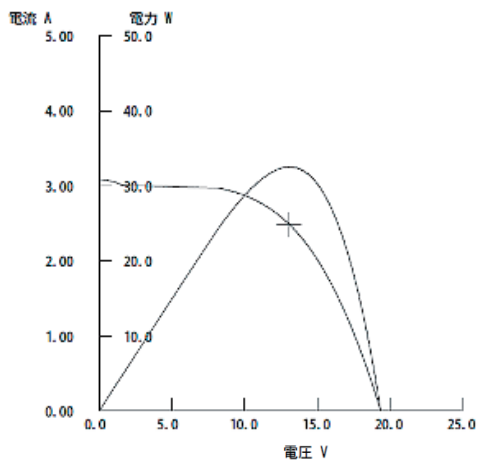


図 II-3-2-5. Pmax が最も低いモジュール (c2-01-1078)の I-V カーブ (左)

$\Delta P_{max}$  は 17-19 年曝露で-20.5%であった。 $\Delta P_{max}$  は  $\Delta V_{pm}$ 、 $\Delta I_{pm}$  と相関性が高い。六甲曝露地品と同様の結果であった。I-V カーブに関しては、 $I_{sc}$  付近に特徴的な変化点があったがこの現象はこのモジュールのみで、全体で見られるものではなかった。

(3) EL 画像、熱画像

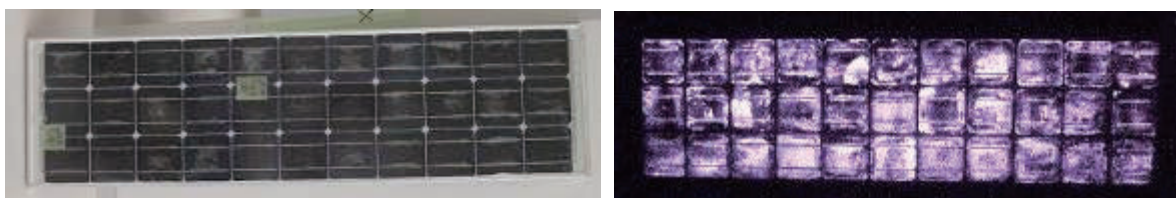


図 II-3-2-6. Pmax が最も低いモジュール (c2-01-1087) の外観画像と EL 画像

EL 画像に黒く発光していない部分が多いモジュールほど  $P_{max}$  が低い特徴があった。この EL 画像では見えにくいですが、全体的に見るとタブ線の間が暗い傾向があった。

II-3-2-3 c2-11 モジュール

(1) 外観

封止材に関しては黄変、セル周辺部の変色と剥離、バックシートに関してはキズ、その他タブ線の変色が観察された。

(2) I-V 特性の統計解析と I-V カーブ

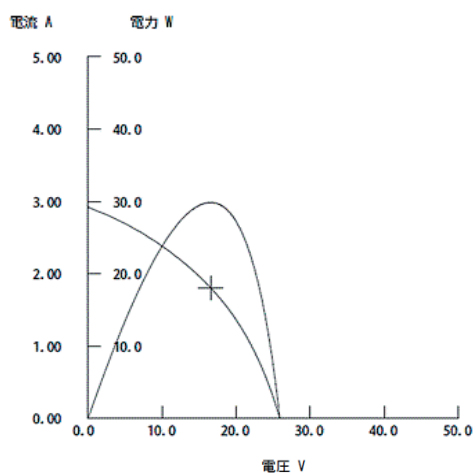


図 II-3-2-7. Pmax が最も低いモジュール (c2-11-1070)の I-V カーブ (左)

$\Delta P_{max}$  は 17-19 年曝露で-25.43%と同曝露期間の c2-01 (宮古島) と比較して高い値を示した。定格値に関して  $P_{max}$ 、 $I_{pm}$ 、 $V_{pm}$  の記載しかなく  $I_{pm}$ 、 $V_{pm}$  に関してのみ相関調査を行った。 $\Delta P_{max}$  は  $\Delta V_{pm}$ 、 $\Delta I_{pm}$  とともに相関性が高い結果を得た。I-V カーブは特徴的な曲線を示した。

### (3) EL 画像、熱画像

EL 画像で黒い部分が多いほど  $P_{max}$  が低い傾向であった。黒い部分はタブ線の間で発生している傾向がある。c2-01（宮古島）と比較してこの黒い部分が多い。 $P_{max}$  が最も低いモジュールは特に顕著にこの現象が確認でき、今後詳細分析を行う。

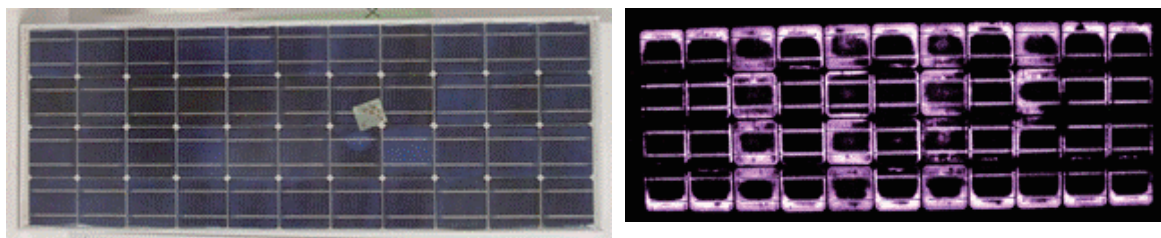


図 II-3-2-8.  $P_{max}$  が最も低いモジュール（c2-11-1070）の外観画像と EL 画像

## II-3-2-4 c2-12 モジュール

### (1) 外観

封止材に関してはセル周辺部の変色、剥離が観察された。

### (2) I-V 特性の統計解析、I-V 特性

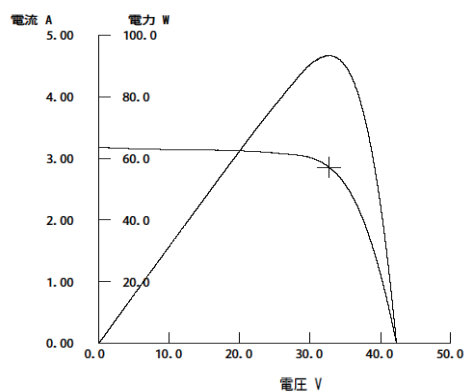


図 II-3-2-9.  $P_{max}$  が最も低いモジュール（c2-12-1083）の I-V カーブ（左）

定格値が  $P_{max}$  のみのため相関解析ができていない。 $P_{max}$  の平均低下率は 5.65%であった。

### (3) EL 画像

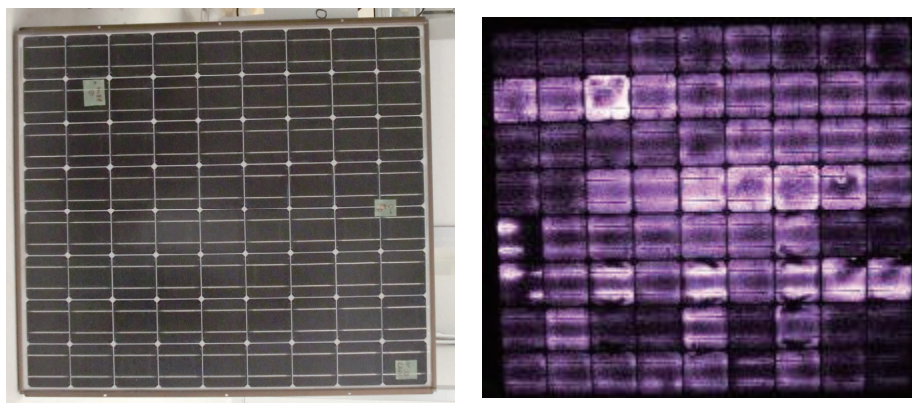


図 II-3-2-10.  $P_{max}$  が最も低いモジュール（c2-12-1083）の外観画像と EL 画像



EL画像に関して、発光していない黒い部分が多いほどPmaxが低いという特徴があった。又黒い部分はタブ線の間にある事が多い。タブ線の一部に強く白く発光しているものがある。電流集中していると考えられ、順方向熱画像でやや発熱していることが確認された。黒く発光していない部分が劣化と関係すると思われるので今後詳細に分析する。

### II-3-2-5 c2-13 モジュール

産総研四国センターに設置のモジュールから、以下の6台と未曝露品1台を選出した。

- ・ホットスポット、端子箱裏の焦げがあったものを研究員が選出、設置30度、2台
- ・システム電圧最高、次高、最低、次低ゾーンから各1台、業者選定、設置10度、4台

#### (1) 外観

封止材に関しては黄変、バックシートに関しては膨れ、端子箱裏の焦げ、その他フレーム歪みが観察された。

#### (2) I-V 特性の統計解析と I-V カーブ

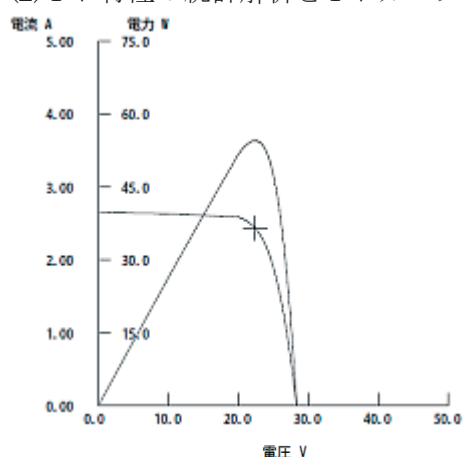


図 II-3-2-11. Pmax が最も低いモジュール (c2-13-1115) の I-V カーブ (左)

N数が6と少ないが、 $\Delta P_{max}$ は $\Delta V_{pm}$ 、 $\Delta I_{pm}$ と相関性が高い結果を得た。 $\Delta Voc$ に関して相関係数は高いが、傾きが小さく相関性は低いと考えられる。 $P_{max}$ の平均低下率は14.4%であった。

#### (3) EL 画像、熱画像

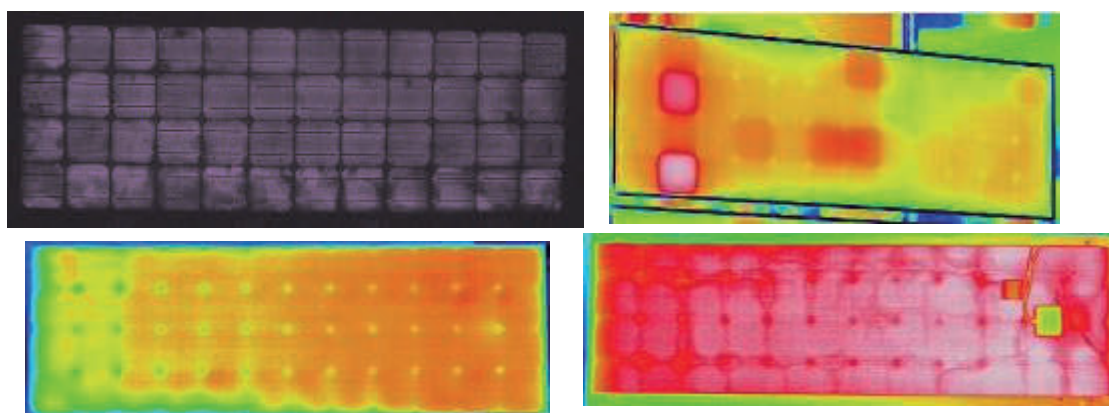


図 II-3-2-12. Pmax が最も低いモジュール (c2-13-1115) の EL 画像 (左上)、Isc 熱画像 (右上)、順方向熱画像ガラス面 (左下)、バックシート面 (右下)

Ipm 相当電流で EL 画像を撮影しているが非常に暗い。明るさコントラストを上げて確認すると黒い部分があるセルが一部に存在することがわかった。ホットスポットが発生していたモジュールを選定したが、選定品以外も全モジュールにホットスポットが確認された。又未曝露品でもホットスポットが確認された。ホットスポット発生場所に関して順方向熱画像との相関性はなかった。

なお、未曝露品は定格値との出力差は-5.0%、黄変などの外観異常、EL 画像の異常は観られなかった。

#### まとめ

B 社製モジュールでは型式毎に共通した劣化として、外観として観察された封止材の黄変、剥離、セル周辺の変色、タブ線の変色が挙げられる。また EL で観察された黒く発光していないセルが多いほど劣化が大きい事、黒く発光していない部分はタブ線の中のセル中心部にあることが多い事が挙げられる。今後分解調査などを行い、劣化状態を詳しく観察し詳細を分析したいと考える。

(大日本印刷株式会社：門脇 将)

### II-3-3 C社製モジュール

調査した C 社製モジュールの定格値を表 II-3-3-1 に示す。

表 II-3-3-1. 調査モジュールの定格値

型式	Pmax (W)	Vpm (V)	Ipm (A)	Voc (V)	Isc (A)
c2-02	51	16.9	3.02	記載無し	記載無し
c2-06	70	9.48	7.38	11.9	7.76
c2-08a	62.7	20.7	3.03	記載無し	記載無し
c2-08b	62.7	20.7	3.03	記載無し	記載無し

モジュールは全て多結晶シリコン型である。c2-08a と c2-08b はほぼ同型式であり、違いはフロントガラスの EVA 側エンボスの有無のみと考えられる。外観写真を図 II-3-3-1 に示す。

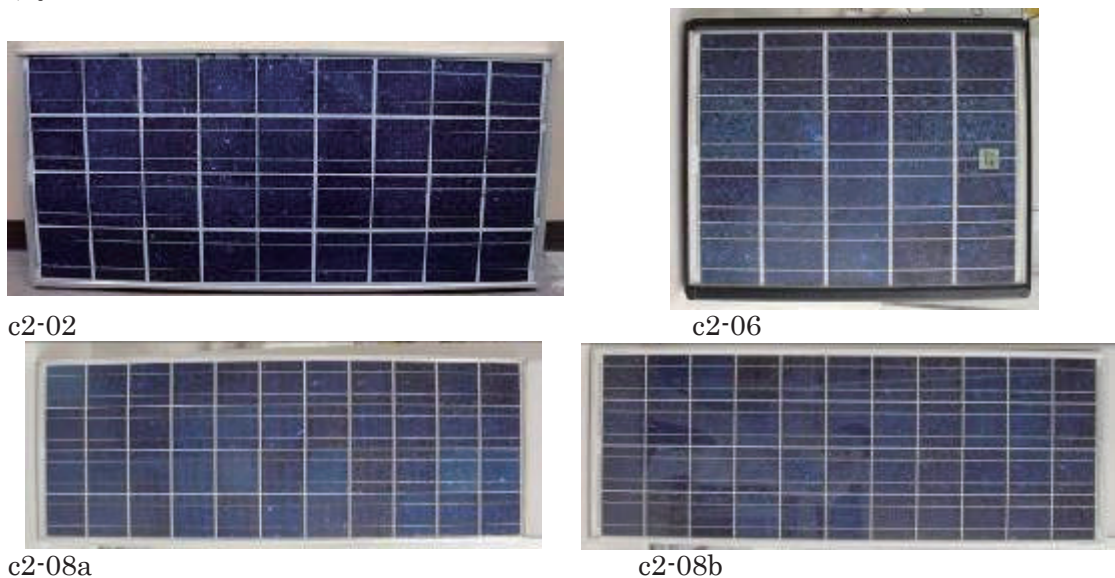


図 II-3-3-1. 調査モジュールの外観写真

外観観察について、c2-02 については異常が皆無であった。c2-06 では受光面から見て端子箱の位置に若干の変色が観られた。c2-08a では一部のモジュールのバックシートに僅かなキズがあり、c2-08b ではバックシートに雨水が溜まってできたような変色と一部セルに僅かな変色が観られた。

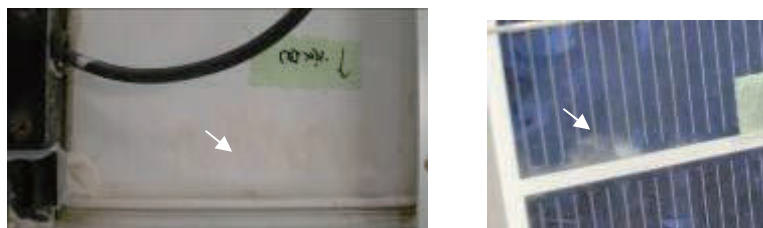


図 II-3-3-2. c2-08b の外観異常

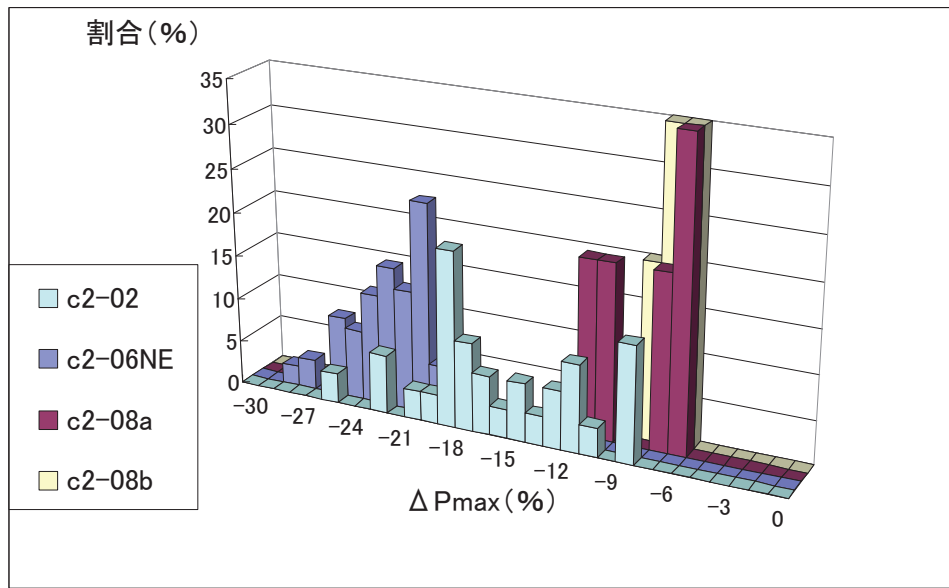


図 II-3-3-3. 各調査モジュールにおける Pmax の劣化割合の分布

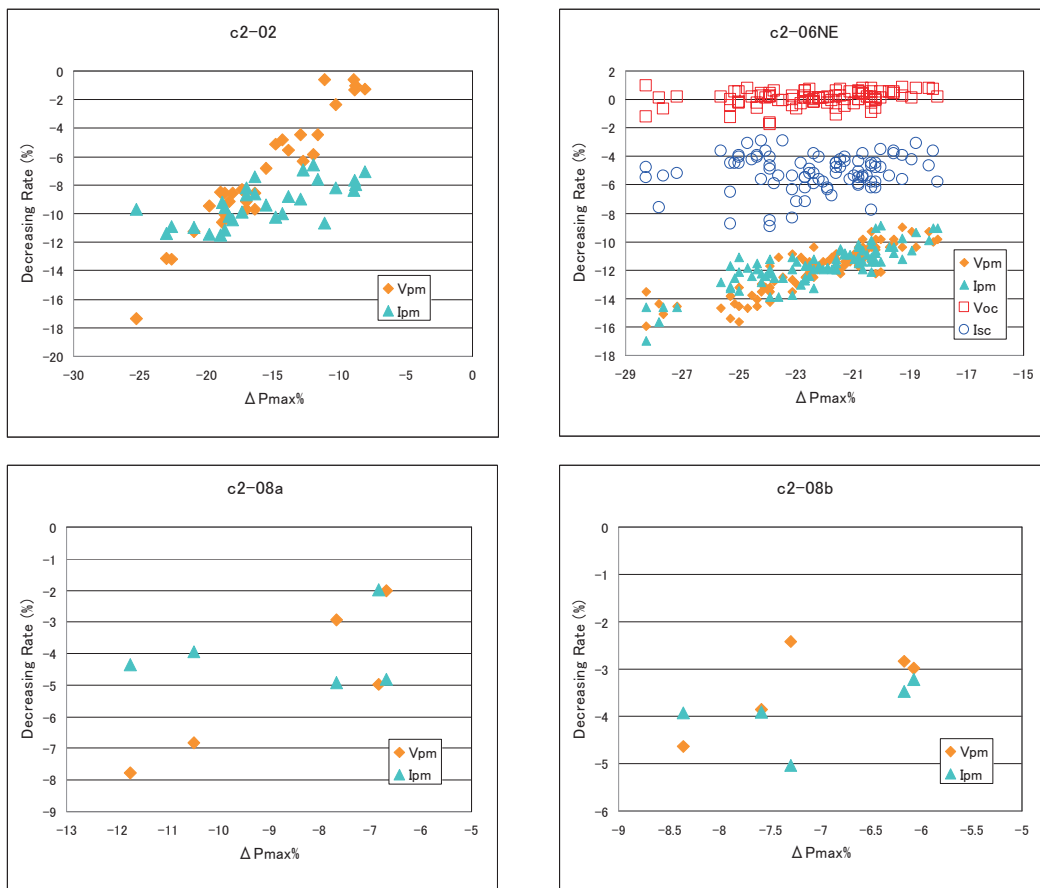


図 II-3-3-4. 各調査モジュールにおける Pmax 劣化と I-V パラメータとの相関

表 II-3-3-2. 調査モジュールの相関係数

型式	$\Delta V_{pm}$	$\Delta I_{pm}$	$\Delta Voc$	$\Delta I_{sc}$
c2-02	0.96	0.68	—	—
c2-06	0.88	0.83	0.28	0.12
c2-08a	0.88	0.20	—	—
c2-08b	0.73	0.51	—	—

各モジュールにおける Pmax 低下率の分布を図 II-3-3-3 に示す。c2-02 は平均 15.7%の Pmax 低下が観られバラつきが大きかった。c2-06 は平均 22.3%低下しており、調査したこのメーカーのモジュールでは最も低下率が大きかった。c2-08a と c2-08b は調査台数が 5 台ずつと少ないが、それぞれ平均 8.7%、7.1%と低下率が小さかった。

次に、Pmax 低下に対する相関を図 II-3-3-4 に示す。c2-06 については Voc、Isc、Vpm、Ipm の定格値があったが、他のモジュールは Vpm、Ipm のみであった。c2-02 モジュールの Pmax は Vpm の劣化と強い相関があり、相関係数は 0.96 と高かった。c2-06 は Ipm と Vpm に依存して低下しており、相関係数はそれぞれ 0.83、0.88 であった。c2-08a と c2-08b は台数が少なく統計的解釈が困難だが、c2-08a は Vpm に対する相関が強い傾向であった。

### II-3-3-1 c2-02 モジュール

図 II-3-3-5 に出力低下が大きい c2-02-479 モジュール (23.0%低下)、図 II-3-3-6 に出力低下が小さい c2-02-478 モジュール (8.1%低下) の非破壊検査結果を示す。

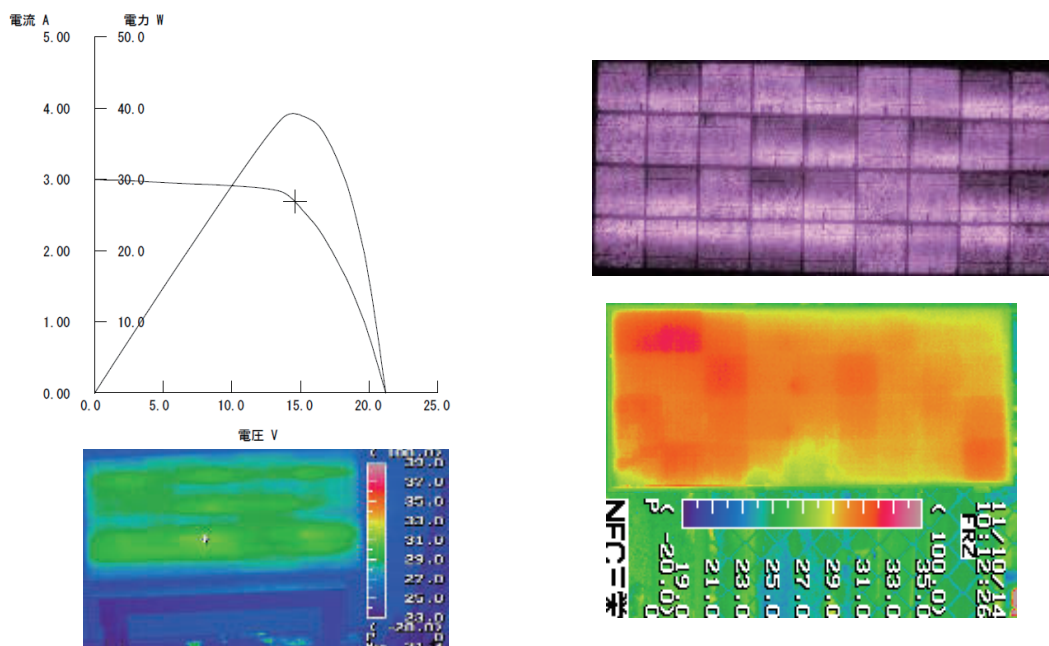


図 II-3-3-5. 劣化が大きい c2-02 モジュールの I-V 曲線 (左上)、EL 画像 (右上)、順方向熱画像 (左下)、Isc 熱画像 (右下)

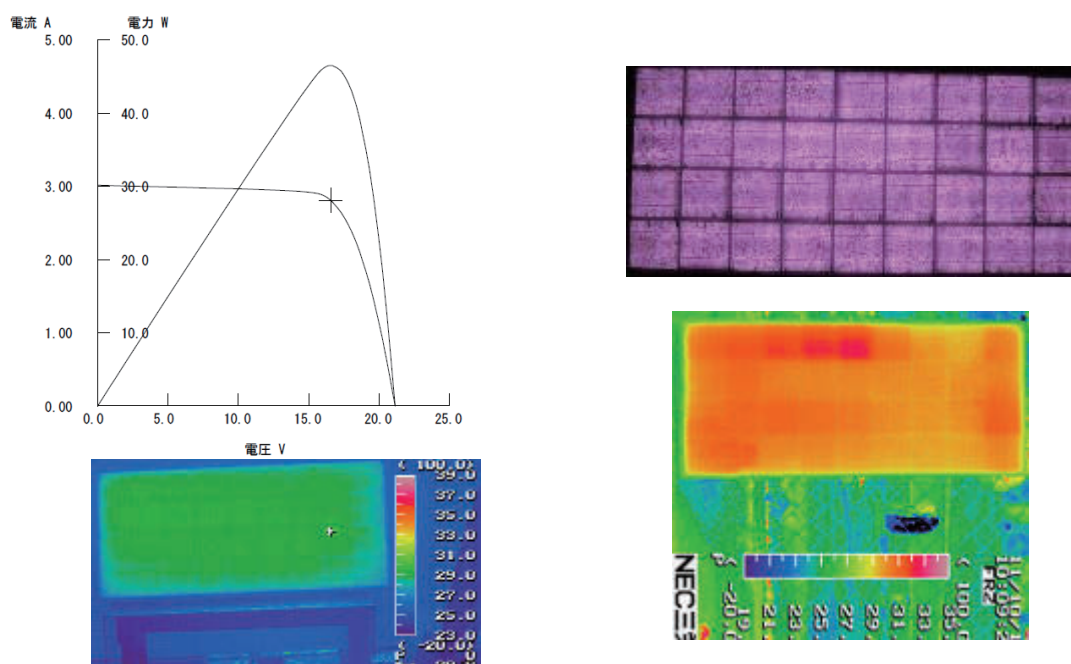


図 II-3-3-6. 劣化が小さい c2-02 モジュールの I-V 曲線（左上）、EL 画像（右上）、  
順方向熱画像（左下）、Isc 熱画像（右下）

c2-02-479 の EL 画像に特徴的な明暗現象が観られた。これは配線異常による電流集中のため起こると考えられ、セル片側の直列抵抗が増加した事で電流集中が起こり、EL の明暗現象や順方向熱画像における発熱が起こったと考えられる。EL 明暗は劣化したこの型式モジュール全てに観られた現象である。Isc 熱画像では劣化大小に関わらず同程度の発熱が観測されたが、劣化との関係については今後検討する。

### II-3-3-2 c2-06 モジュール

図 II-3-3-7 に出力低下が大きい c2-06-1022 モジュール（24.1%低下）、図 II-3-3-8 に出力低下が小さい c2-06-1024 モジュール（19.0%低下）の I-V 曲線と EL 画像を示す。

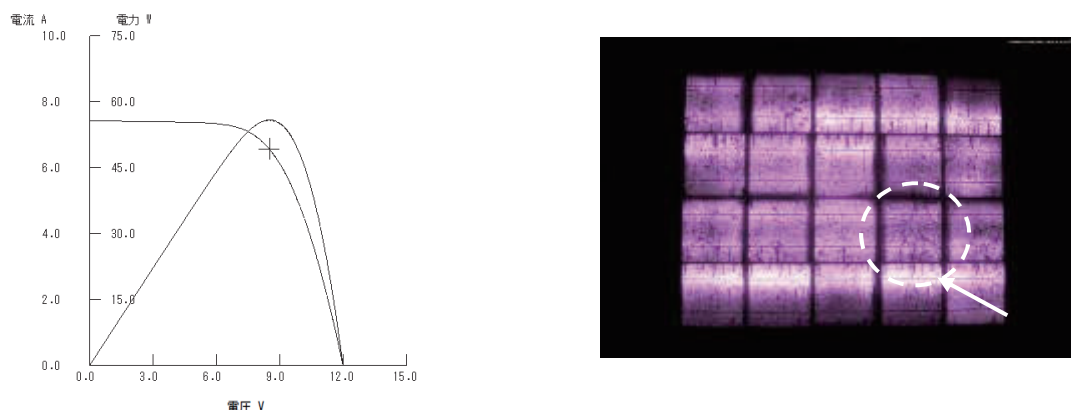


図 II-3-3-7. 劣化の大きい c2-06 モジュールの I-V 曲線、EL 画像

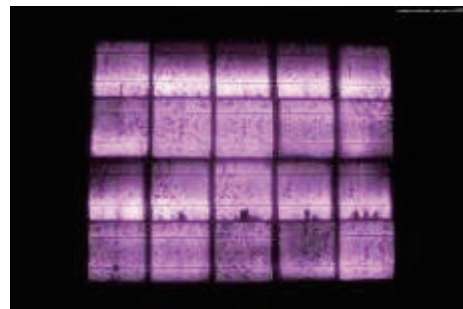
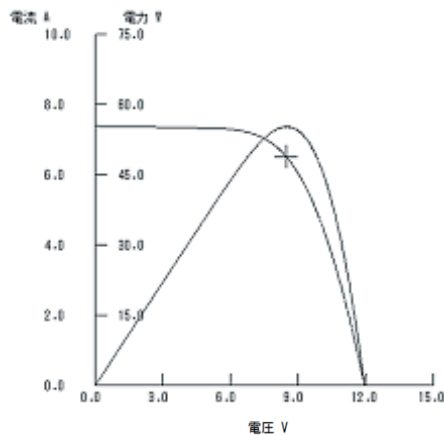


図 II-3-3-8. 劣化の小さい c2-06 モジュールの I-V 曲線、EL 画像

c2-06 モジュールでも c2-02 モジュールと同様の EL 画像の明暗現象が、4 台のモジュール全てに観られた。この型式も配線異常による劣化が要因と考えられる。また、図 II-3-3-7 右図に白丸で示すように、c2-02-1022 モジュールにはセル割れが起きていた。調査モジュール 4 台中 2 台にセル割れが確認されており、これも出力低下の要因である事が推測される。

### II-3-3-3 c2-08a モジュール

図 II-3-3-9 に出力低下が大きい c2-08a-1037 モジュール (11.7%低下)、図 II-3-3-10 に出力低下が小さい c2-08a-1035 モジュール (6.7%低下) の I-V 曲線、EL 画像、順方向熱画像を示す。劣化率の大きいモジュールには c2-02 や c2-06 と同様な EL 明暗現象が観られた。順方向熱画像においても EL 明暗箇所に沿った発熱が現れている。また c2-08a-1037 には一箇所強い発熱があった。今後詳細を分析する予定である。

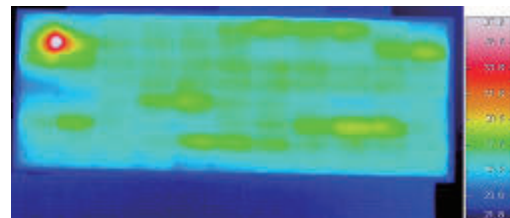
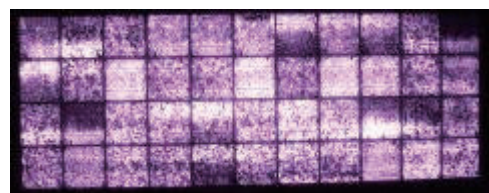
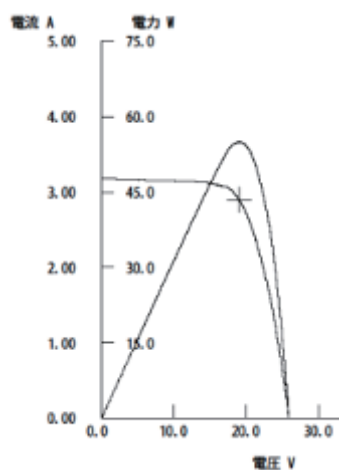


図 II-3-3-9. 劣化が大きい c2-08a モジュールの I-V 曲線、EL 画像、順方向熱画像

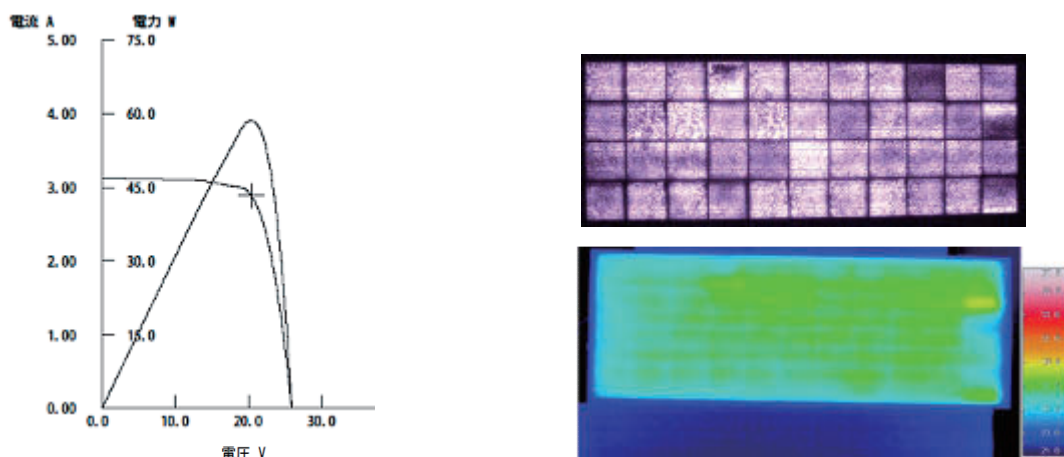


図 II-3-3-10. 劣化が小さい c2-08a モジュールの I-V 曲線、EL 画像、順方向熱画像

#### II-3-3-4 c2-08b モジュール

図 II-3-3-11 に出力低下が大きい c2-08b-1042 モジュール (8.4%低下)、図 II-3-3-12 に出力低下が小さい c2-08b-1035 モジュール (6.7%低下) の I-V 曲線、EL 画像、順方向熱画像を示す。この型式も一部に EL 明暗現象が観られており、劣化因子として配線異常が挙げられると考える。一方でこの型式の EL 画像にはセル全体が暗くなっていたり、セル中央部に暗部が生じていたりなど、他のモジュールには観られなかった現象もあるので、今後調査を進めたいと考える。

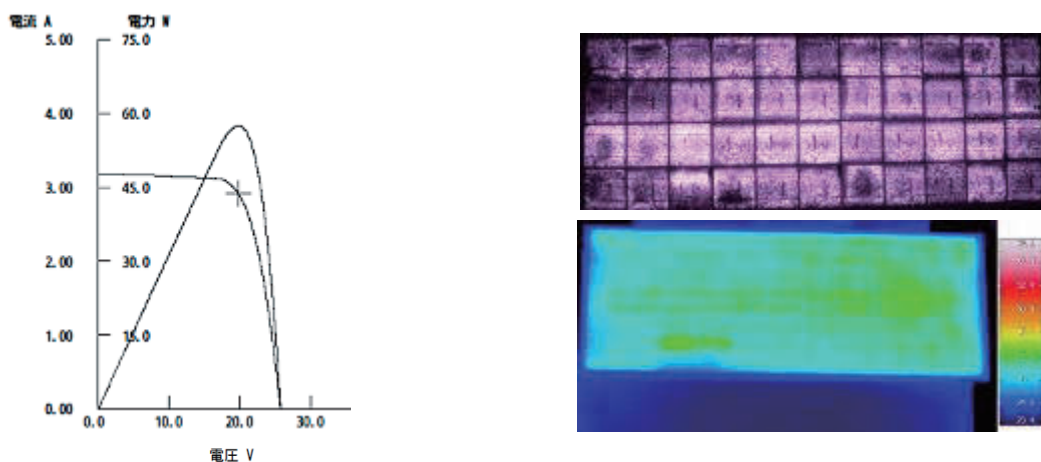


図 II-3-3-11. 劣化が大きい c2-08b モジュールの I-V 曲線、EL 画像、順方向熱画像



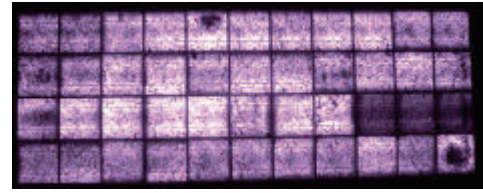
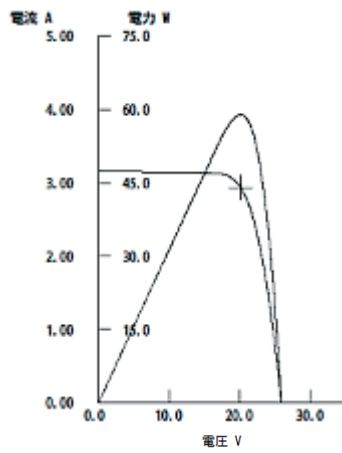


図 II-3-3-12. 劣化が小さい c2-08b モジュールの I-V 曲線、EL 画像、順方向熱画像

### まとめ

C 社製モジュールでは型式毎に共通した劣化として、EL 明暗現象として観察された配線異常があると考えられる。今後分解調査などを行い、劣化状態を詳しく観察し詳細を分析したいと考える。

(日立化成工業株式会社：清水 成宜)

#### II-3-4. D 社製モジュール

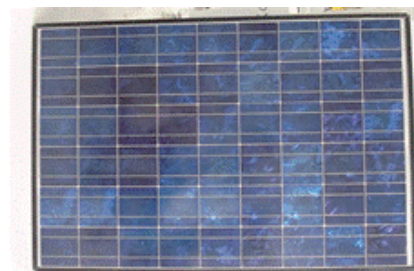
各調査モジュールについて、表 II-3-4-1 に定格値、図 II-3-4-1 にモジュールの外観写真、図 II-3-4-2 に  $P_{max}$  の劣化率の分布、図 II-3-4-3 に  $P_{max}$  劣化と I-V パラメータとの相関、表 II-3-4-2 に相関解析から得られた相関係数を示す。結果については型式毎に述べる。

表 II-3-4-1. 調査対象モジュールの定格値

型式	$P_{max}$ (W)	$V_{pm}$ (V)	$I_{pm}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)
c2-04	143	27.77	5.15	33.8	5.90
c2-05	125	26.0	4.81	32.3	4.56
c2-09	70	17.3	4.05	記載なし	記載なし
c2-10	132	26.8	4.93	33.5	5.53
c2-17	120	25.7	4.67	31.9	5.31



c2-04



c2-05



c2-09



c2-10



c2-17 (未曝露)



c2-17 (曝露品)

図 II-3-4-1. 調査モジュールの外観写真

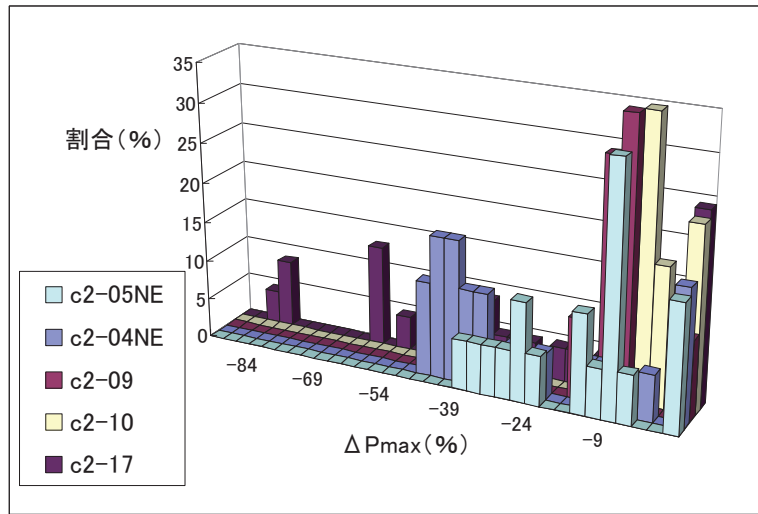
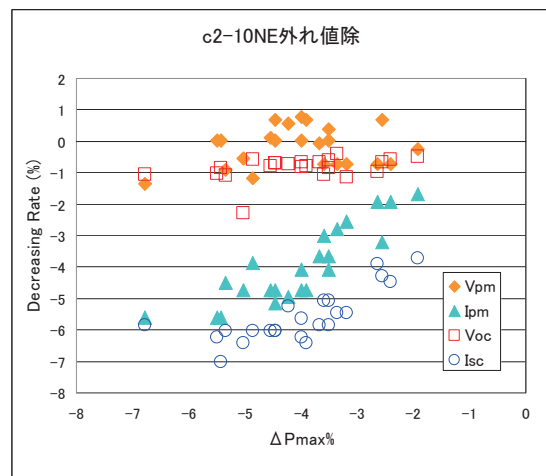
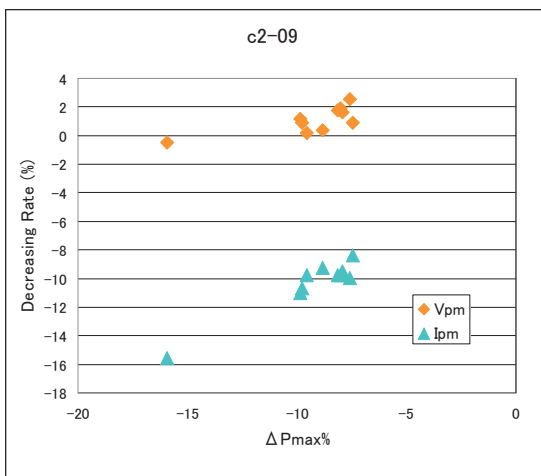
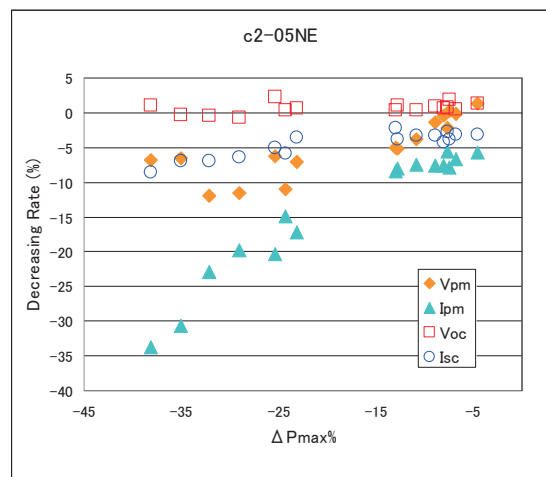
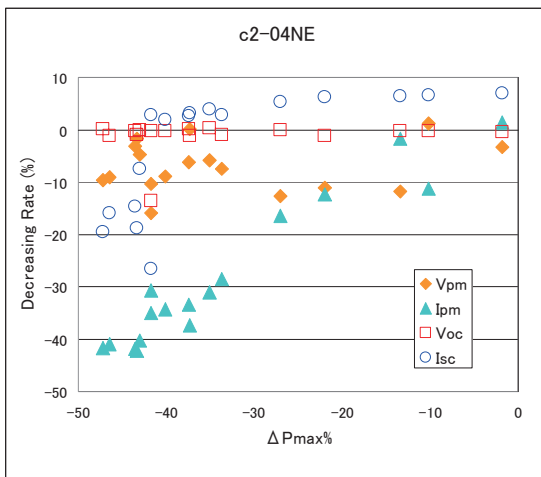


図 II-3-4-2. 各調査モジュールにおける Pmax の劣化割合の分布



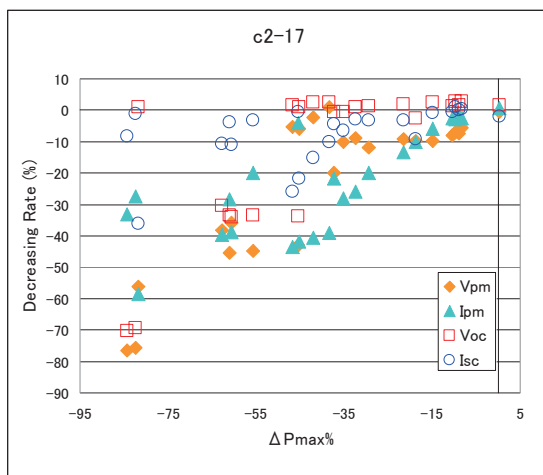


図 II-3-4-3. 各調査モジュールにおける  $\Delta P_{max}$  と各 I-V パラメータの相関

表 II-3-4-2. 各モジュールの  $\Delta P_{max}$  との相関係数

型式	$\Delta V_{pm}$	$\Delta I_{pm}$	$\Delta V_{oc}$	$\Delta I_{sc}$
c2-04	0.15	0.96	0.16	0.67
c2-05	0.82	0.97	0.36	0.89
c2-09	0.74	0.96	NA	NA
c2-10	0.19	0.87	0.39	0.77
c2-17	0.84	0.77	0.73	0.49

### II-3-4-1 c2-04 モジュール

#### (1) 外観検査

外観異常としては、バックシートの傷が確認されたが、経年劣化によるものであるかは定かではない。それ以外の異常は特に確認されなかった。

#### (2) I-V 特性解析

最大出力変化率 ( $\Delta P_{max}$ ) に対する各 I-V パラメータの変化率をプロットしたところ、 $\Delta P_{max}$  と最大出力動作電流の変化率 ( $\Delta I_{pm}$ ) との間に強い相関があることが示された(図 II-3-4-3)

#### (3) EL 画像および I-V カーブ

EL 画像検査により、全 3 モジュールにおいて、セル割れ(図 II-3-4-4 赤丸部位) および同一セル内での暗化と発光強度の増加が確認された(図 II-3-4-4 白丸部位)。これは配線不良によるセル片側への電流集中によるものだと考えられ、I-V カーブからは、バイパスダイオードの作動が確認され、EL 暗部の多いストリングスにおける直列抵抗増加が予想される。

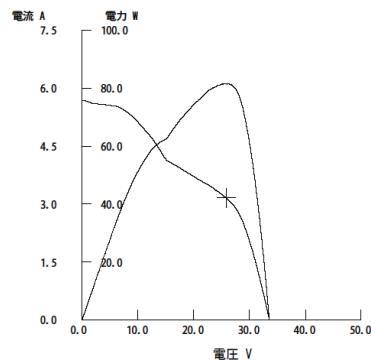
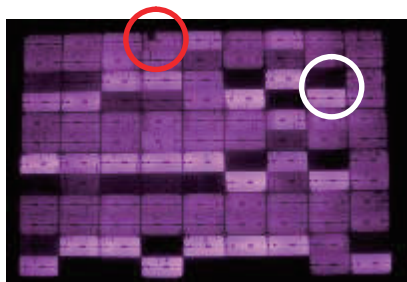


図 II-3-4-4. EL 画像および I-V カーブ

### II-3-4-2 c2-05 モジュール

#### (1) 外観検査

外観異常としては、セルの変色が全 7 モジュール中 2 つのモジュールで確認された。バックシートでは、剥がれやへこみが確認された。その他、バックシートの傷が確認されたが経年劣化によるものであるかは定かではない。

#### (2) I-V 特性解析

$\Delta P_{max}$  に対する各 I-V パラメータの変化率をプロットしたところ、 $\Delta P_{max}$  と  $\Delta I_{pm}$  との強い相関が示された。また、短絡電流の変化率 ( $\Delta I_{sc}$ ) との相関性も有しているが、図 II-3-4-3 における傾きの大きさから、その影響は  $\Delta I_{pm}$  程ではないことが示されている。

#### (3) EL 画像および I-V カーブ

EL 画像検査により、約半数のモジュールでセル割れ (図 II-3-4-5 赤丸部位) が確認された。また、同一セル内での暗化と発光強度の増加が確認され、このようなセルが多いほど  $P_{max}$  低下が大きいことが確認された (図 II-3-4-5 白丸部位)。このような暗化および発光強度の増加は、配線不良によるセル片側への電流集中によるものだと考えられる。

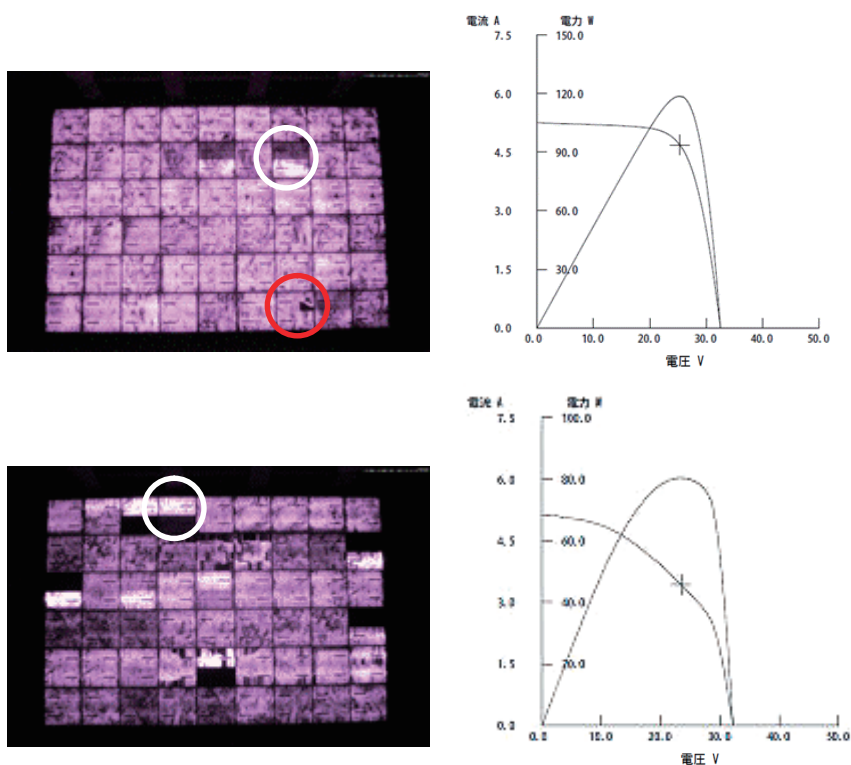


図 II-3-4-5. EL 画像および I-V カーブ

(上) Pmax 低下の小さいモジュール、(下) Pmax 低下の大きいモジュール

### II-3-4-3 c2-09 モジュール

#### (1) 外観検査

外観異常としては、白濁（一部は配線に沿った白濁）、配線部異常などが確認された。バックシートでは、膨れや変色、チョーキングなどが確認された。その他、バックシートの傷が確認されたが経年劣化によるものであるかは定かではない。

#### (2) I-V 特性解析

本モジュールでは、開放電圧 Voc および短絡電流 Isc の定格値が表示されていないため、Vpm および Ipm のみを取り上げる。ΔPmax に対する変化率をプロットすると、ΔVpm および ΔIpm とともに相関性が示された。

#### (3) EL 画像および I-V カーブ

EL 画像検査からは、そもそもの ΔPmax 劣化が少ないこともあり、特別な異常は確認されなかった。しかし、比較的劣化度合いの大きいモジュールでは、配線の間 EL 暗化が確認される傾向にあった（図 II-3-4-6 白丸部位）。

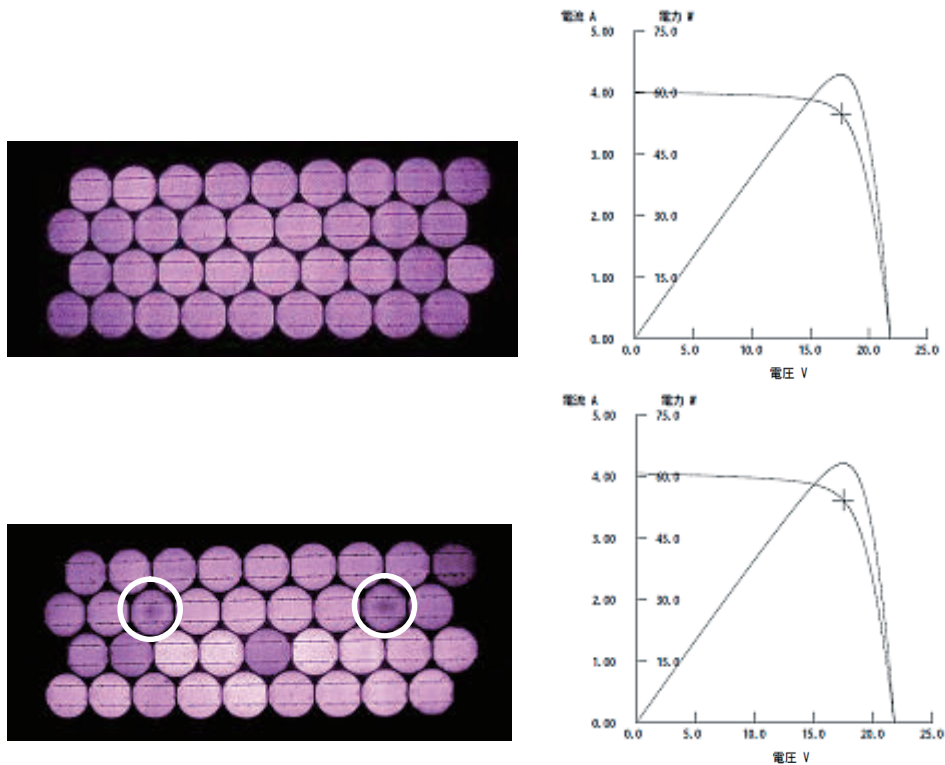


図 II-3-4-6. EL 画像および I-V カーブ

(上) Pmax 低下の最も小さいモジュール、(下) Pmax 低下が比較的大きいモジュール

本モジュールでは、外観検査では幾つかの異常が確認されたが、発電、I-V 特性や EL 画像などでは大きな劣化は確認されなかった。

### II-3-4-4 c2-10 モジュール

#### (1) 外観検査

外観異常としては、殆どのモジュールにおいて白濁が確認された。バックシートでは、一部のモジュールにて亀裂や変形などの激しい異常が確認されたが、本型式全体を通しては、特段の異常は確認されない。その他、バックシートの傷が確認されたが経年劣化によるものであるかは定かではない。

#### (2) I-V 特性解析

$\Delta P_{max}$  に対する変化率をプロットすると、 $\Delta I_{pm}$  および  $\Delta I_{sc}$  ともに相関性が示された。相関図の傾きから  $\Delta I_{pm}$  の与える影響が強いことが予測される。

#### (3) EL 画像、熱画像および I-V カーブ

本型式モジュールは、比較的新しくあまり劣化も進んでいないため、殆どのモジュール

において、EL 画像および熱画像からは大きな異常は確認されなかった。しかし、そのような中でも比較的劣化の程度の大きいモジュールでは、EL 画像においてセル内での明暗が大きいセルの数が多く、また一部ではセル割れや配線はずれと思われるものが多い傾向にあった（図 II-3-4-7 白丸部位）。

I-V 測定においても、Pmax 低下の小さいものと大きいものを比較したところ、大きな差は見られなかった。

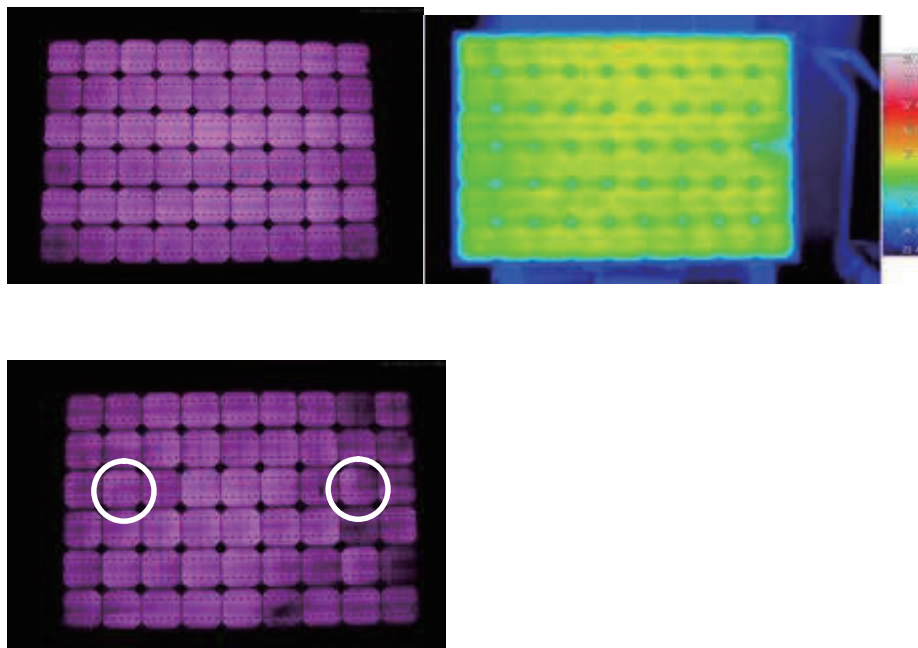


図 II-3-4-7. Pmax 低下の小さいモジュールの EL 画像（上左）および熱画像（上右）、Pmax 低下が比較的大きいモジュールの EL 画像（下）

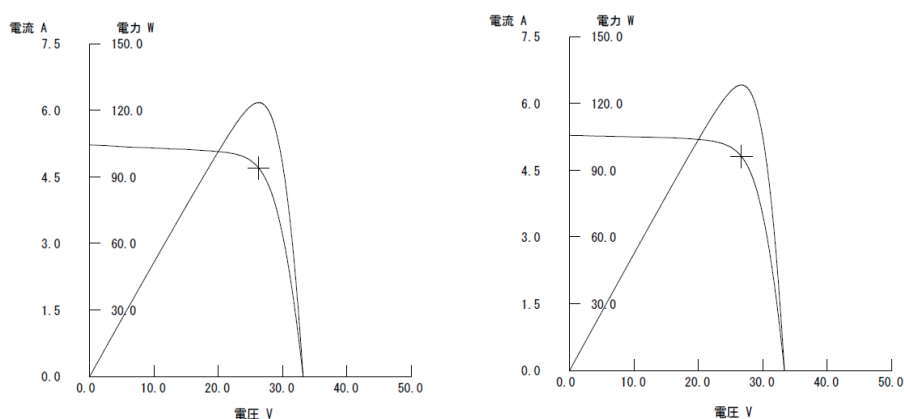


図 II-3-4-8. I-V カーブ  
（左）Pmax 低下が小さいモジュール、（右）Pmax 低下が比較的大きいモジュール



## II-3-4-5 c2-17 モジュール

### (1) 外観検査

本型式のモジュールには、石川県工業試験場で屋根に設置されて14年間屋外曝露されたもの、同試験場で展示されていて屋外では未曝露のもの、およびネクストエナジー・アンド・リソース株式会社より購入した未曝露のモジュールがある。これらを比較することで曝露による経年劣化の原因を明確にすることが可能であると考えられる。なお、曝露品モジュールは、同試験場周辺において2002年に発生した突風による機械的ストレスを受けている可能性があり、これを考慮に入れて評価を行う必要がある。

#### (1) モジュールの外観

未曝露モジュールについては一部のセルにおいて傷や変色が認められた。また、全てのモジュールでバックシートの全面に黄変が確認できた。また、多くのモジュールでしわも確認できた。曝露モジュールではセル割れが複数のモジュールで確認できたが、突風によるものかは、外観検査では判断できなかった。バックシートにおいては、全てのモジュールで著しい黄変が確認できた。さらに、多くのモジュールでバックシートのしわも確認できた。その他、バックシートに傷が確認されたが経年劣化によるものであるかは判断できなかった。

#### (2) I-V 特性解析

未曝露品もわずかなI-Vパラメータの低下が確認できた。これらの値は曝露モジュールの値と比較して小さいため、曝露によって劣化が促進されたと考えられる。曝露モジュールの $\Delta P_{max}$ に対する変化率は図II-3-4-3のようなプロットとなり、表II-3-4-2に示すように $\Delta V_{pm}$ 、 $\Delta I_{pm}$ および $\Delta V_{oc}$ において強い相関があった。特に $\Delta V_{pm}$ は相関が一番強いことから、 $\Delta P_{max}$ に与える影響が強いと予測できる。ただし、図II-3-4-2のヒストグラムに示す通り、 $\Delta P_{max}$ の値が個々のモジュールで大きくばらついているため、統計的な評価にはより多くのサンプル分析が必要であると考えられる。

#### (3) EL 画像、I-V カーブ

未曝露モジュールでは、図II-3-4-9左図の白丸部位に示すような、セルの割れが原因と考えられる一部が暗化したEL画像が、多数のモジュールで確認できた。曝露モジュールでも、セル割れが原因と考えられるEL画像の暗化が、多数のモジュールで確認できた。また、図II-3-4-9右図の白丸部位に示すような、セルの片側のみが暗化し、他方の発光が強くなっているEL画像も確認できた。これは、2並列の配線の内、片方で接続不良を生じたためと考えられ、接続不良を生じた側では電流が流れないため暗化し、他方は電流が集中することで発光が強くなる。モジュール内において、これらの原因で暗化したと考えられるセルの数は、未曝露モジュールより曝露モジュールの方が圧倒的に多く、暗化しているセルの数の増加に従って、 $P_{max}$ は著しく低下する傾向であった。図II-3-4-10に示すI-Vカーブも、曝露品は未曝露品に比べてなだらかな曲線であり、FF値も低い値であった。

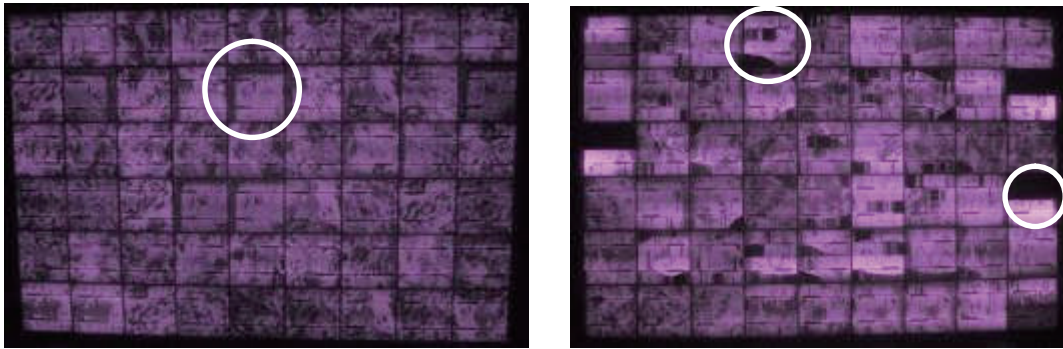


図 II-3-4-9. EL 画像 (左) 未曝露モジュール、(右) 曝露モジュール

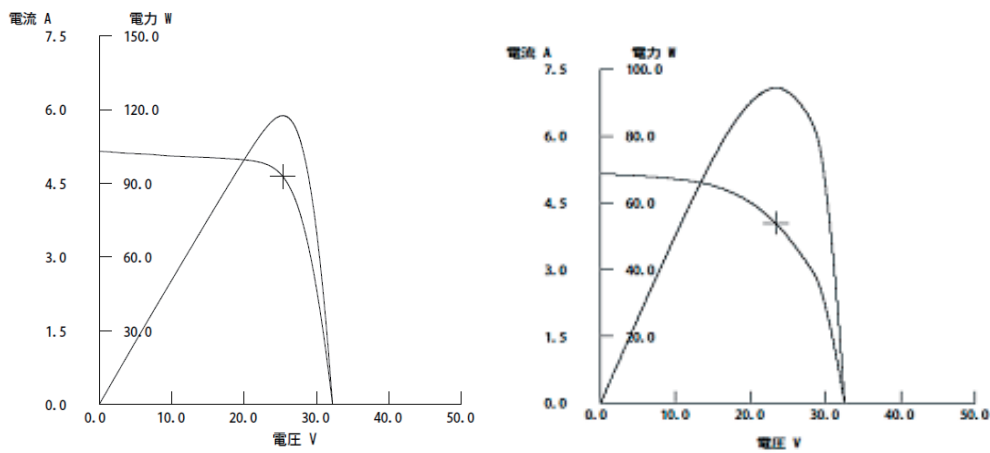


図 II-3-4-10. I-V カーブ (左) 未曝露モジュール、(右) 曝露モジュール

本型式のモジュールでは、未曝露品においてもセル割れや配線不良を有していた。曝露モジュールでは、それらが著しく増加することで発電量の低下につながっていると確認された。

### まとめ

D 社製モジュールにおいては、 $\Delta P_{max}$  が大きいものほど EL 画像においてセル割れや配線不良などに伴うセル片側の暗化などが著しく増加する傾向にあった。一方で 17 年の長期運転後も大きな問題のないモジュールも確認された。今後は、この差異がどのようなことに由来するのかを破壊分析などを用いて特定する必要がある。これらの活動を通じて、長期信頼性を有する太陽電池モジュールの構造や部材への知見を得ることができる可能性がある。

(デュポン株式会社：辺田 祐志、デュポン株式会社：小野里 淳、  
石川県工業試験場：橘 泰至)

### II-3-5. E 社製モジュール

c2-07 モジュールは薄膜シリコンタイプのモジュールで、屋外に約 15 年間曝露したものをネクストエナジー・アンド・リソース株式会社から 10 台購入し、劣化調査をおこなった。

#### (1) 曝露概要

曝露場所：群馬県前橋市

設置年：1996 年

撤去年：2011 年 3 月

調査台数：10 台

定格値： $P_{max} = 60 \text{ W}$ ,  $V_{oc} = 20 \text{ V}$ ,  $I_{sc} = 5.3 \text{ A}$ ,  $V_{pm} = 14 \text{ V}$ ,  $I_{pm} = 4.3 \text{ A}$

#### (2) モジュール概要

- ・モジュールサイズ：2600 mm×430 mm
- ・1 台のモジュールは、直列に接続された 10 台のセルで構成
- ・ステンレス鋼基板上に作製されたセルを 10 台直列接続し SUS 基板上でモジュール化
- ・トリプルジャンクション
- ・各セル間にバイパスダイオードを使用
- ・レーザーによるスクライブは行わず、結晶系と同様にグリッド電極として配線
- ・モジュール表面には ETFE フィルムを使用

#### (3) 外観検査

全モジュールで汚れと思われる外周部の変色が見られたが、それ以外の大きな外観変化はみられなかった。外観の一例を図 II-3-5-1 に示す。



図 II-3-5-1. c2-07 モジュールの外観写真

#### (4) I-V 特性の統計解析

本モジュールはサイズが大きいため産総研ソーラーシミュレーターでは測定できなかった。そのため本モジュールの I-V データは富士電機株式会社にて測定いただいた結果を使用している。

出力低下率の指標として、曝露後に測定した  $P_{max}$  と銘板値との差を  $\Delta P_{max}$  とした。なお、本来は銘板値ではなく初期値を使用すべきであるが、今回は初期値が不明なため、銘板値を初期値として使用した。 $\Delta P_{max}$  の分布を図 II-3-5-2 に示す。 $\Delta P_{max}$  は  $-20.9\sim -9.2\%$  の範囲に存在し、平均  $13.4\%$  の出力低下であった。

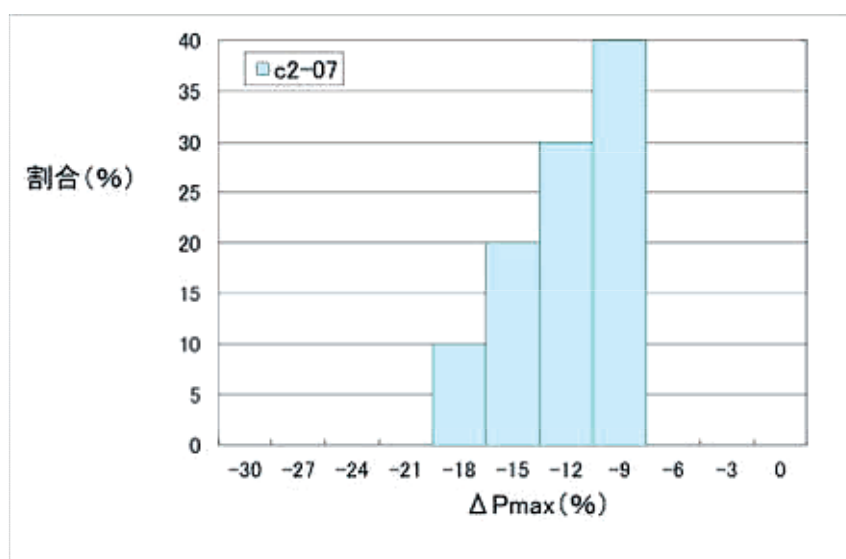


図 II-3-5-2. 出力低下率のヒストグラム

次に  $\Delta P_{max}$  と各 I-V パラメータ ( $\Delta I_{sc}$ 、 $\Delta V_{oc}$ 、 $\Delta I_{pm}$ 、 $\Delta V_{pm}$ ) の相関を図 II-3-5-3 に示す。なお、 $\Delta P_{max}$  と同様、他の I-V パラメータに関しても、曝露後に測定した値と銘板値との差を使用している。この結果より  $\Delta P_{max}$  は  $\Delta I_{sc}$  と  $\Delta I_{pm}$  に対して強い相関が見られることがわかった。図 II-3-5-4 に曝露後に測定した全モジュールの I-V カーブを示す。 $V_{oc}$  はモジュール間でほとんどばらつきがなく、かつ定格値 (20 V) と比べほとんど変化がないのに対して、 $I_{sc}$  はモジュール間でばらつきが大きいことがわかる。本モジュールは 10 台のセルの直列構造であるため、モジュールの電流値が最も電流値の低いセルで律速している可能性があり、セルに分解した詳細調査が必要と思われる。セル毎に分析調査することで、光劣化を含むセル自身の劣化によるものか、モジュールとしての劣化によるものなのかを切り分けることが可能となるため、今後の調査項目として検討する。

また、発電層が多層構造であることより、I-V 測定時のスペクトルミスマッチ誤差も懸念される。晴天日の屋外 I-V 測定を行い  $I_{sc}$  の比較による誤差検証も予定している。

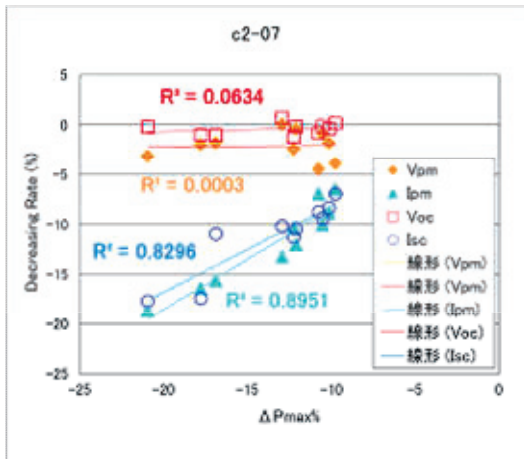


図 II-3-5-3.

Δ Pmax と各種 I-V パラメータ低下率の相関

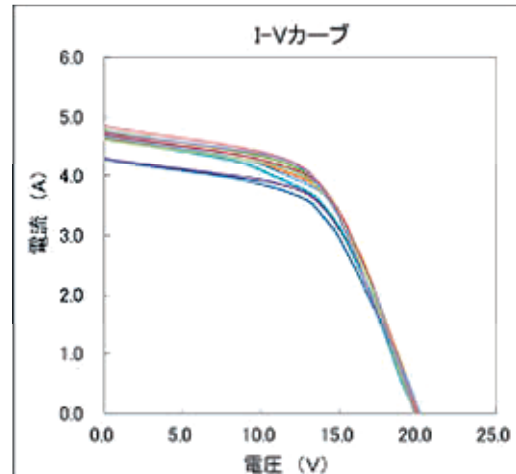


図 II 3-5-4. I-V カーブ

#### (4) EL 画像、熱画像

全モジュールの EL 画像を図 II-3-5-5 に示す。なお、モジュールのサイズの関係で 1 回の測定にてモジュール全体が測定できなかったため、3 箇所に分けて測定し、得られた画像を 1 つのモジュールとして合成した。出力が最も小さい c2-07-1026 は、極端に EL 画像が暗いのが分かるが、それ以外のモジュールに関しては明暗と出力の相関はないように見える。c2-07-1026 は特有の劣化モードによるものである可能性がある。今後熱画像との関連も含めた調査、考察を行っていく。



図 II-3-5-5. EL 画像

また、図 II-3-5-6 のとおり、3 台のモジュールで配線に沿った暗部が確認され、配線の接続不良によるものと推測される。なお、図 II-3-5-7 のとおり、暗部が確認されたモジュールが必ずしも出力に影響を与えているとは言えなかった。

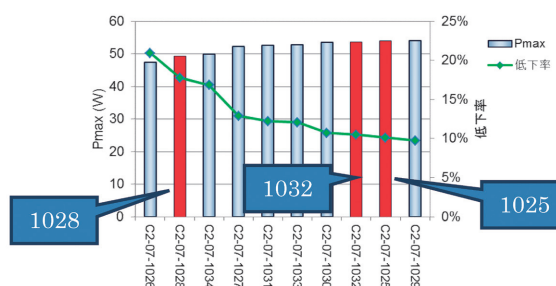
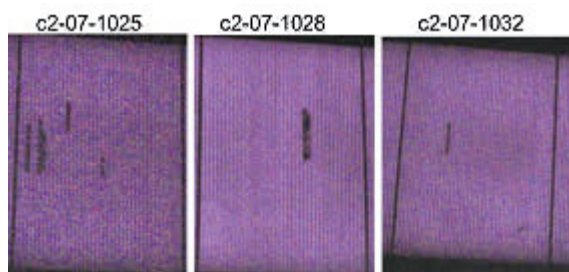


図 II-3-5-6. 配線に沿った暗部の EL 画像

図 II-3-5-7. 配線に沿った暗部が確認されたモジュールの出力トレンド

現時点では任意の 2 モジュールのみ熱画像測定を実施(最も出力が大きかった c2-07-1029 と比較的出力が小さかった c2-07-1034 の 2 モジュール)。測定は順方向にバイアスをかけて屋内で測定した。また EL と同じく数箇所に分けて測定し、得られた画像を合成した。熱画像によりモジュール内発熱分布をクリアに確認することができており、今後、全モジュールの測定を実施し、出力との相関を調査する。

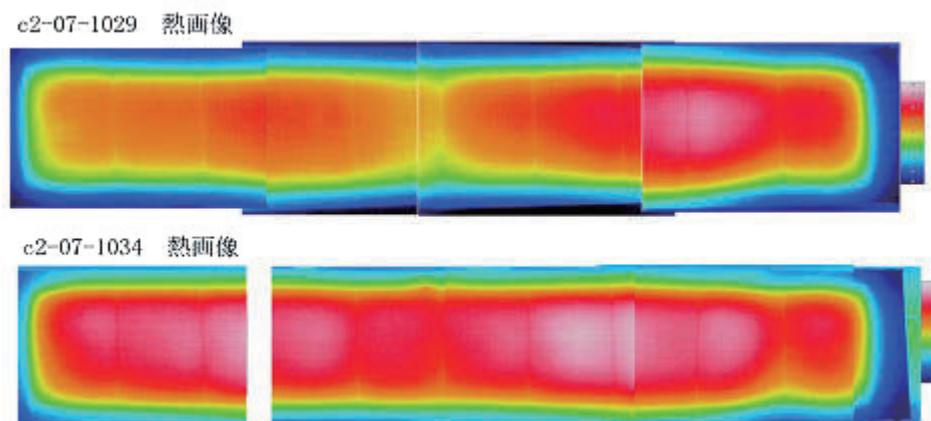


図 II-3-5-8. 熱画像結果

## まとめ

E 社製薄膜シリコン中古モジュールについて非破壊分析を実施し、その劣化機構について検討を行った。取得した I-V カーブより、本モジュールの劣化は  $I_{sc}$  及び  $I_{pm}$  起因によるものと推測される。ただし、I-V の出力の傾向と外観や EL の傾向に明確な関連性が見られていない。そのため今後、全モジュールでの熱画像測定や屋外での I-V 測定、さらにはモジュールを分解してセル毎の出力測定を行い、劣化機構を解明していく必要がある。

(東京エレクトロン株式会社：田中 秀樹)

## II-4 新しい分析法の開発

LSI など半導体素子の劣化メカニズムを解明する技術分野がある。太陽電池モジュールは LSI などと同じ Si 材料を用いたものがほとんどであり、太陽電池としての機能も半導体材料のもっている特性を利用したものである。しかし残念ながら半導体分野で使われている故障解析技術をそのまま太陽電池に利用する事は現状では困難である。あまりにも大きさが違いすぎる事が最大の問題である。

LSI においても不良の原因となっている部位を探し出す過程 (localization) は故障解析技術の主要な部分である。太陽電池においても今後発展させる必要がある重要な課題になっている。

これまで述べてきたモジュールの劣化解析の次のステップとして、不良部位をさらに限定するため、セルレベルでの観察を検討した。主に浜松ホトニクス株式会社の装置<sup>※)</sup>を用いてどの程度のことができるか実験した。

※) PV イメージング評価装置と太陽電池発熱解析装置。PV イメージング評価装置は CCD カメラによって EL 像を観察する装置であるが、検出器の冷却などにより高感度化ができる。太陽電池発熱解析装置は、通常の赤外線カメラの検出器がボロメーターであるのに対して半導体 InSb を備えており、検出感度・解像度ともに高い。また両装置とも画像のスーパーインポーズ機能など画像処理ソフトが豊富である。

### II-4-1 セルレベルでの解析

モジュールレベルでの観察によってその機種で優勢な劣化モードや問題となるセルが絞り込まれてくると、次はセルレベルでの観察が重要になってくる。破壊を前提に不良解析を進めているモジュールであるので、図 II-4-1-1 に示すようにバックシートを一部はがしてセルのバスバー部から直接電極を取り出し、セルごとの I-V 特性、EL 像、さらに熱画像などを観察する。

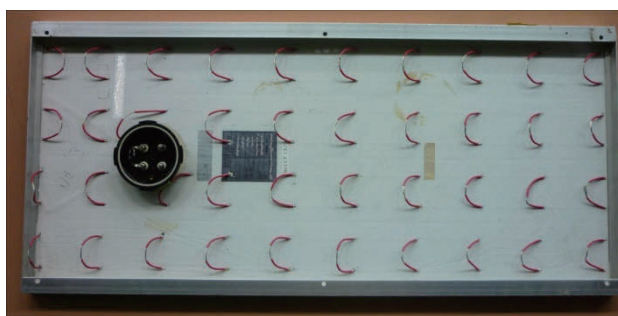


図 II-4-1-1.バックシートを一部破壊し、セルから直接電極を取りだしているモジュールの外観写真

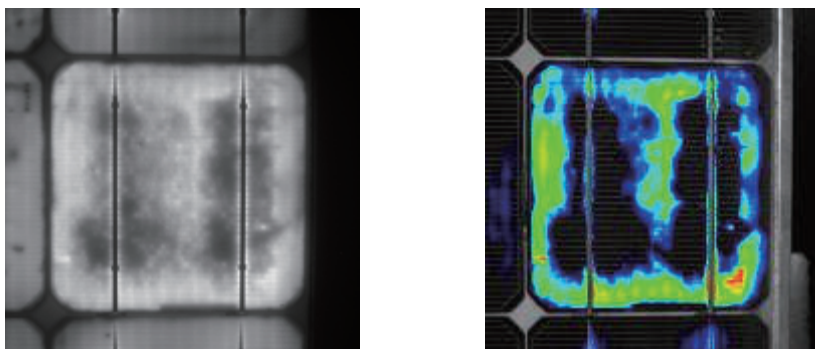


図 II-4-1-2. セル EL 像 (左)、EL 像と外観写真を重ね合わせた写真 (右)

図 II-4-1-2 はセルの EL 画像をセル外観写真に重ね合わせ、セルのどの部分が EL の輝度の大小と対応しているかを見たものである。EL 画像も輝度に応じて着色表示している。

## II-4-2 セルレベル解析例 (シャント劣化が疑われるモジュールの場合)

### II-4-2-1 各セルのシャント抵抗の測定

シャント抵抗は直列抵抗と異なり測定が容易であるため、モジュールの状態ですべてのセルに非破壊的に測定する方法も開発されている。残念ながら今回の研究ではまだ一度も実施していない。

### II-4-2-2 低電流 EL 像

通常の EL 像は短絡電流  $I_{sc}$  に近い電流を順方向に流して発光を観察する。流す電流を減らしていくと、各セルの輝度は減少する。しかし各セルの輝度の減少は同じでなく、特に大きく輝度が減少するセルが存在する場合がある。そのセルにおける漏れ電流が多い (シャント抵抗の低下が大きい) ため、輝度の低下が大きくなると考えられ、シャント不良のセルを見つける方法として知られている。図 II-4-2-1 にその例を示す。II-4-2-1 に述べた各セルのシャント抵抗測定と併用することで、シャント劣化の状態が一望できることが期待される。

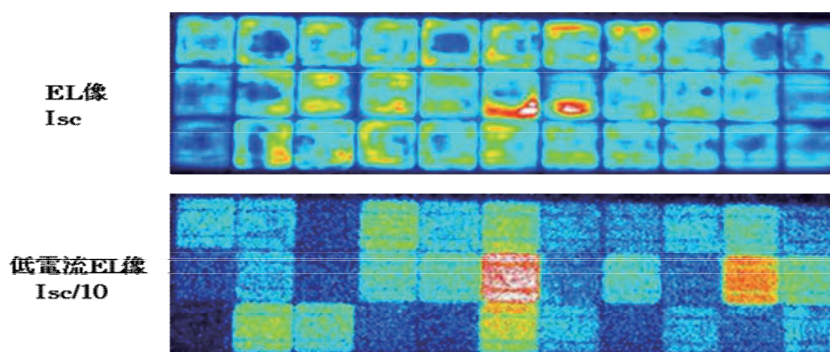


図 II-4-2-1. 低電流 EL 像によるシャント低下セルの検出



### II-4-2-3 逆バイアス印加による発光の観察

シャント不良は症状的にはセルのエッジ部（pn 接合周辺端部）での分離が十分でないために生じることが多い。周辺部でなくても接合部のある種の欠陥によって起こることもある。セルを製造するときに生じたシャント不良を観察し、分類した報告がある<sup>1)</sup>。観察されるシャント不良を 9 つの種類に分類している。ただしこれは製造する時に発生する不良である。我々が問題にしているのは経年変化として生じるものである。どの程度同じで、どの程度異なるものか、これまで報告はない。

半導体の pn 接合部に逆方向に電界を印加すると接合部の欠陥部に高い電界がかかり、発光することが知られている。半導体分野ではリーク発光とよばれて、不良解析に用いられている手法である。太陽電池では EL 像を観察する同じ光学系で、モジュールに印加する電界を反転させて観察することができるので、逆バイアス EL 像と呼んでいる<sup>2,3)</sup>。図 II-4-2-2 にモジュールに逆バイアスを印加して発光を観察した写真を示す。

さらに図 II-4-2-3 に一番明るく発光しているセルの拡大写真と、図 II-4-1-2 と同じように外観写真と重ね合わせて表示した像を示す。発光強度に応じた着色処理が施してある。発光は主にセル周辺とフィンガー電極の所で起こっている。モジュールの最初の状態が不明なので、経年的にこのような状態になったと断定できないのが現状である。次に述べる発熱の観察と併用することでシャント劣化の起こっている場所を知る有力な方法になる。

逆バイアスによる発光のスペクトルは通常の順バイアスによる EL 発光より短波長側にあり、可視光を含む。しかし EL 発光よりはるかに微弱な発光なので完全な暗室が必要である。

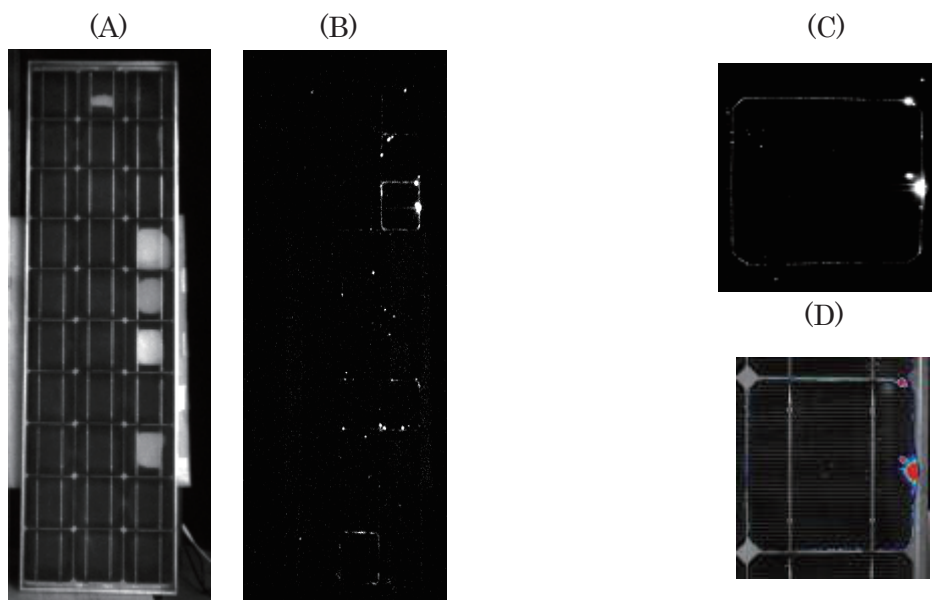


図 II-4-2-2. 外観(A)と  
逆バイアス EL 像(B)

図 II-4-2-3. セルの発光像(C)  
と重ね合わせ画像(D)

#### II-4-2-4 逆バイアス印加による発熱の観察

接合部の電気特性が欠陥のため線形に近くなると、逆バイアス下で微弱な電流が流れるようになる。このような現象は発熱を伴うため赤外像として観察できる。図 II-4-2-4 に逆バイアスによる発熱像 (B) を順バイアスによる発熱像 (A) とともに示す。順バイアスの発熱は直列抵抗の増加現象の観察によく使われるものである。浜松ホトニクス製の太陽電池発熱解析装置は解像度・感度ともに高いためバスバー部分の発熱が鮮明な像となっている。ただしこの場合、発熱部が初期値からの出力低下に影響しているかどうかは不明である。

逆バイアスの発熱像 (図 II-4-2-4 (B)) は逆バイアス発光像 (図 II-4-2-2 (B)) と対比すべきものである。両者は同じではないが良く似た像になっている。発光部が更に劣化して発熱部になっていくという推定を裏付けているように見える。

今回の実験では、逆バイアスでの発熱・発光が多いセルはシャント抵抗が下がっているというところまでは確認できていない。実はセルレベルの観察は出来ておらず、逆バイアスはモジュール全体にかかっている。シャント抵抗の下がったセルでは印加電圧が低下しているはずである。セル単位で電極を取り出し、I-V 特性・EL 像と共に逆バイアスでの発光・発熱を同じ条件で観察することが必要である。また通常の EL カメラ、赤外線カメラで接写することによって得られるデータと浜松ホトニクス製の装置でないとれないデータを見極める必要がある。

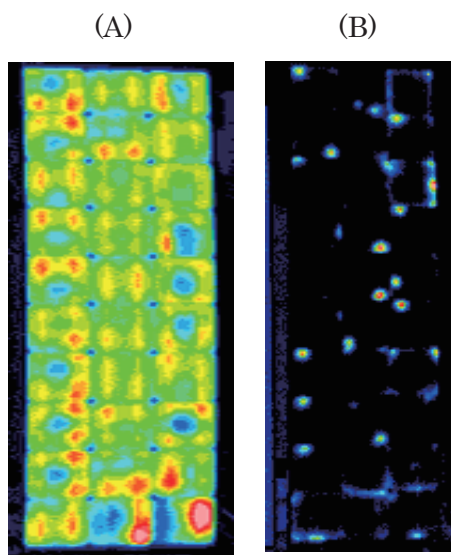


図 II-4-2-4. 順バイアス発熱像(A)と逆バイアス発熱像(B)

## 参考文献

- 1) O. Breitenstein, L.P. Rakotoniaina, M.H. Al Rifai and M. Werner, “Shunt type in crystalline silicon solar cells”, Prog. Photovolt.: Res. Appl. **12** (2004) 529.
- 2) A. Kitiyanan, A. Ogane, A. Tani, T. Hatayama, H. Yano, Y. Uraoka and T. Fuyuki, “Comprehensive study of electroluminescence in multicrystalline silicon solar cells”, J. Appl. Phys. **106** (2009) 043717.
- 3) E. Sugimura, S. Takamoto, K. Hirata, A. Tani and T. Fuyuki, “Spatially resolved electroluminescence imaging of shunt sources in crystalline silicon solar cells”, 21st Int. Photovoltaic and Science and Engineering Conf., Fukuoka, 2011.

(独立行政法人産業技術総合研究所：阪本 貞夫)

## III. まとめ

調査モジュールの選定から非破壊検査まで、単結晶シリコン、多結晶シリコン、薄膜シリコンモジュール 15 型式 187 台を対象に劣化調査を実施した。そして以下のようにメーカー毎、型式毎に固有の劣化傾向があることがわかった。A 社製モジュールでは直列抵抗増加の劣化が推測される。B 社製モジュールでは封止材の黄変や剥離、EL 画像の暗化が観られた。C 社製モジュールでは、配線劣化による抵抗増加起因の EL 明暗現象が劣化の主要因と考えられる。D 社製モジュールではセル割れや配線異常による極端な発電出力劣化が確認された一方で、型式によって 17 年の長期曝露でほぼ劣化がないものもあった。E 社製薄膜シリコンモジュールは、Isc 及び I<sub>pm</sub> 起因による劣化と推測されるが、分光感度を考慮すると I-V 評価方法にまだ見直すべきところがある。

劣化調査に伴う新しい分析手法として、高感度な EL 装置やサーモグラフィ装置を用いたシャント抵抗劣化の評価に取り組んでいる。低電流 EL 像はシャント劣化したセルを検出できる可能性があり、逆バイアス印加による EL 測定や熱画像測定ではセル内のシャント劣化箇所を特定できる可能性がある。

今後は、推定された劣化因子を明確にするため、破壊分析による詳細調査を実施する。また、これら太陽電池モジュールの構造を把握し、部材毎の劣化を調べ、発電出力劣化との関連を検証し、設置環境なども踏まえた劣化メカニズムを明らかにしていく。分析手法の開発と併せ、調査項目毎に小テーマを設定し図り取り組む予定である。

(日立化成工業株式会社：清水 成宜)

## 謝辞

薄膜シリコンモジュールの I-V 測定を実施頂いた富士電機株式会社、高感度 EL およびサーモグラフィ装置の評価を実施頂いた浜松ホトニクス株式会社、中古モジュールの I-V データを提供頂いたネクストエナジー・アンド・リソース株式会社に感謝する。

## 「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
東洋紡績株式会社	長州産業株式会社
日立化成工業株式会社	一般社団法人日本電機工業会
(順不同)	YOCASOL 株式会社
	(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侵入の影響

#### II-1. 結晶シリコン太陽電池モジュールの水蒸気侵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、 $0.5 \text{ g/m}^2\text{day}$  とも  $2.0 \text{ g/m}^2\text{day}$  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、水蒸気侵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、水分侵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)。

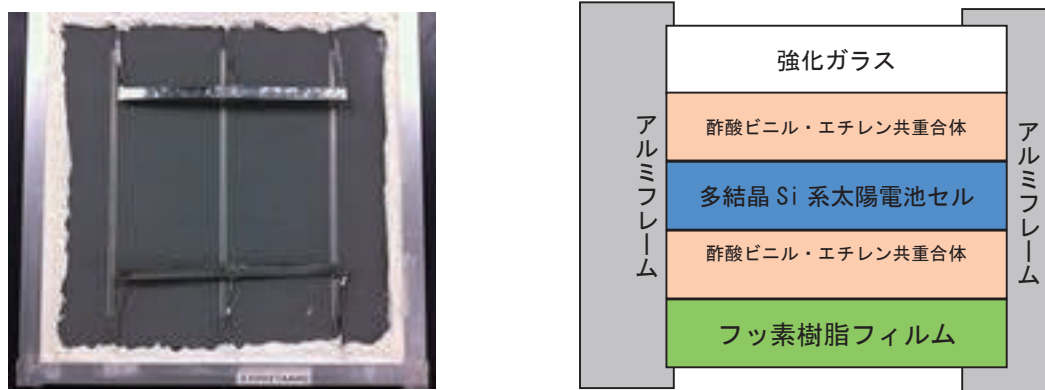


図 II-2-1. フッ素樹脂を用いて作製した太陽電池モジュール

(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 ( $100 \mu\text{m}$ ) で、それぞれの水蒸気透過量 ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $90\%RH$  条件下) は以下のとおりである。

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

### 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

作製したモジュールを、85℃、85%RH、40℃、90%RH 下で静置し、外観変化の観察およびモジュール特性の測定を行った。

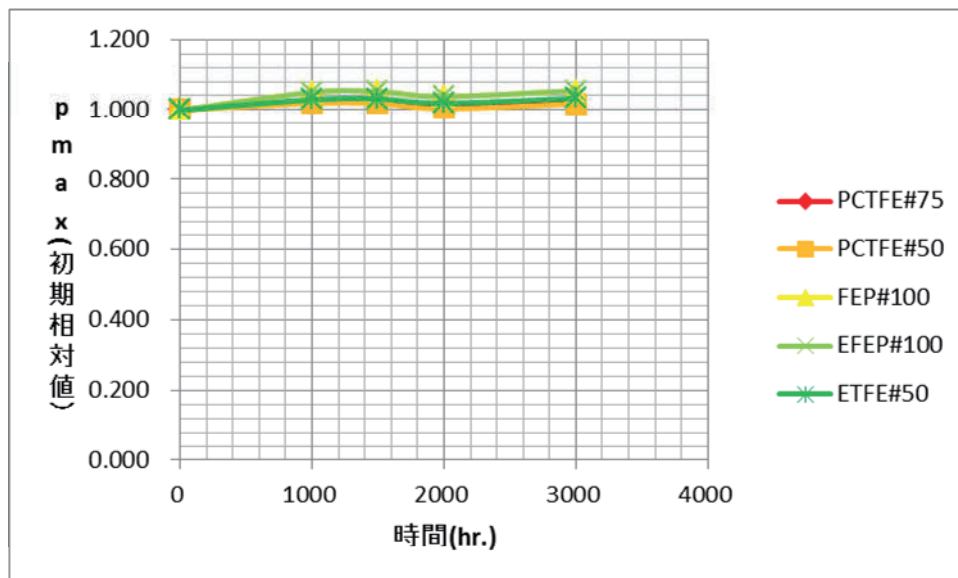


図 II-3-1. 40℃、90%RH 条件下で 3000 時間経過したモジュールの最大発電量の推移

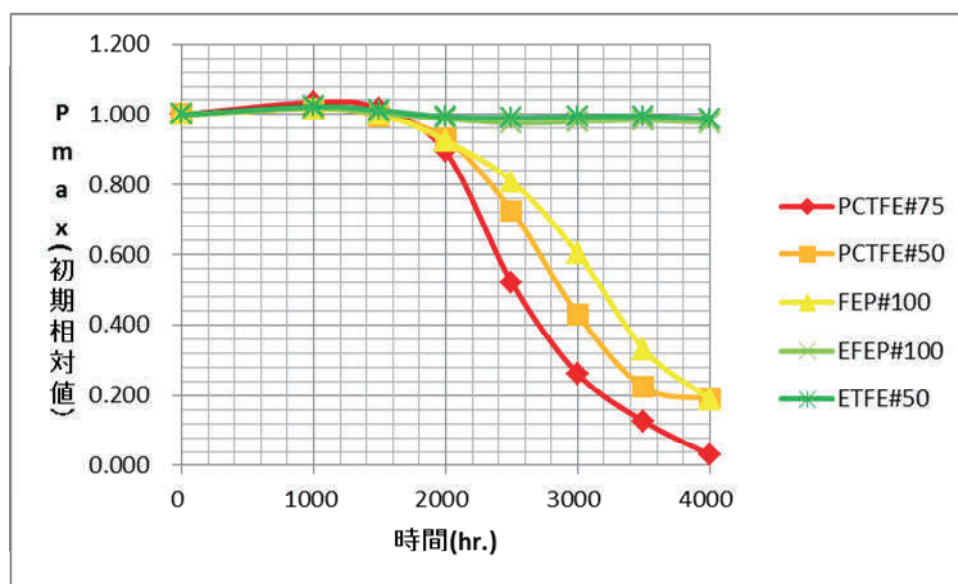


図 II-3-2. 85℃、85%RH 条件下で 4000 時間経過したモジュールの最大発電量の推移

40℃、90%RH の条件下では、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、最大発電量は急激に低下していった。意外なこ

とに水蒸気バリア性に優れている PCTFE (75  $\mu\text{m}$ : 0.15 g/m<sup>2</sup>day、50  $\mu\text{m}$ : 0.2 g/m<sup>2</sup>day) あるいは FEP (100  $\mu\text{m}$ : 1 g/m<sup>2</sup>day) フィルムを用いたモジュールで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 g/m<sup>2</sup>day) が 85 °C、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/m<sup>2</sup>day) や ETFE (12 g/m<sup>2</sup>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)。

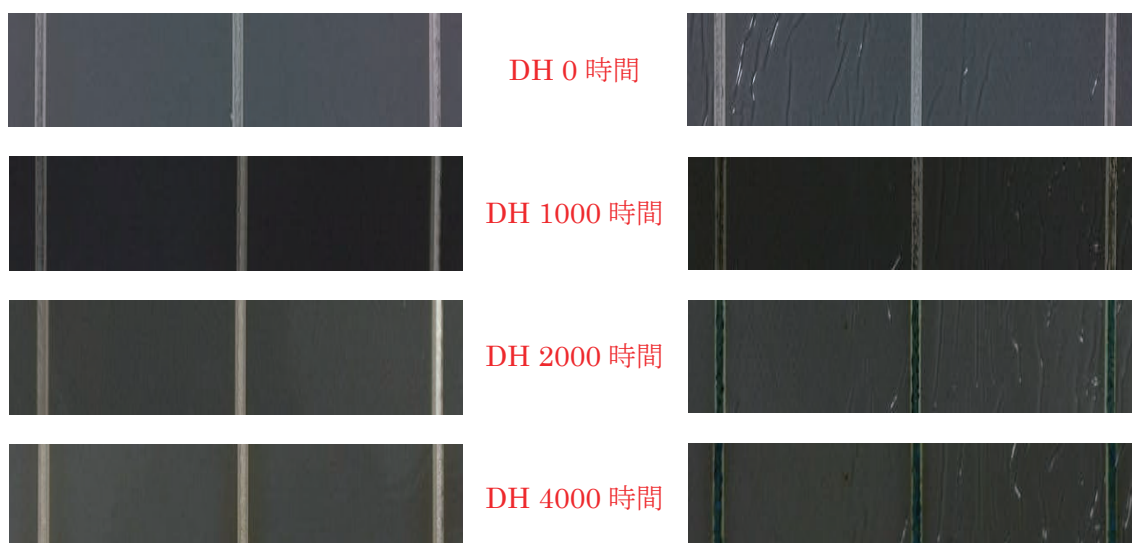


図 II-3-3. 85 °C、85%RH 条件下の環境試験後のモジュールの裏面  
(左 : ETFE、右 : PCTFE (75  $\mu\text{m}$ ))



図 II-3-4. 85 °C、85%RH 条件下の環境試験後のモジュールの裏面 (左 : EFEP、右 : FEP)

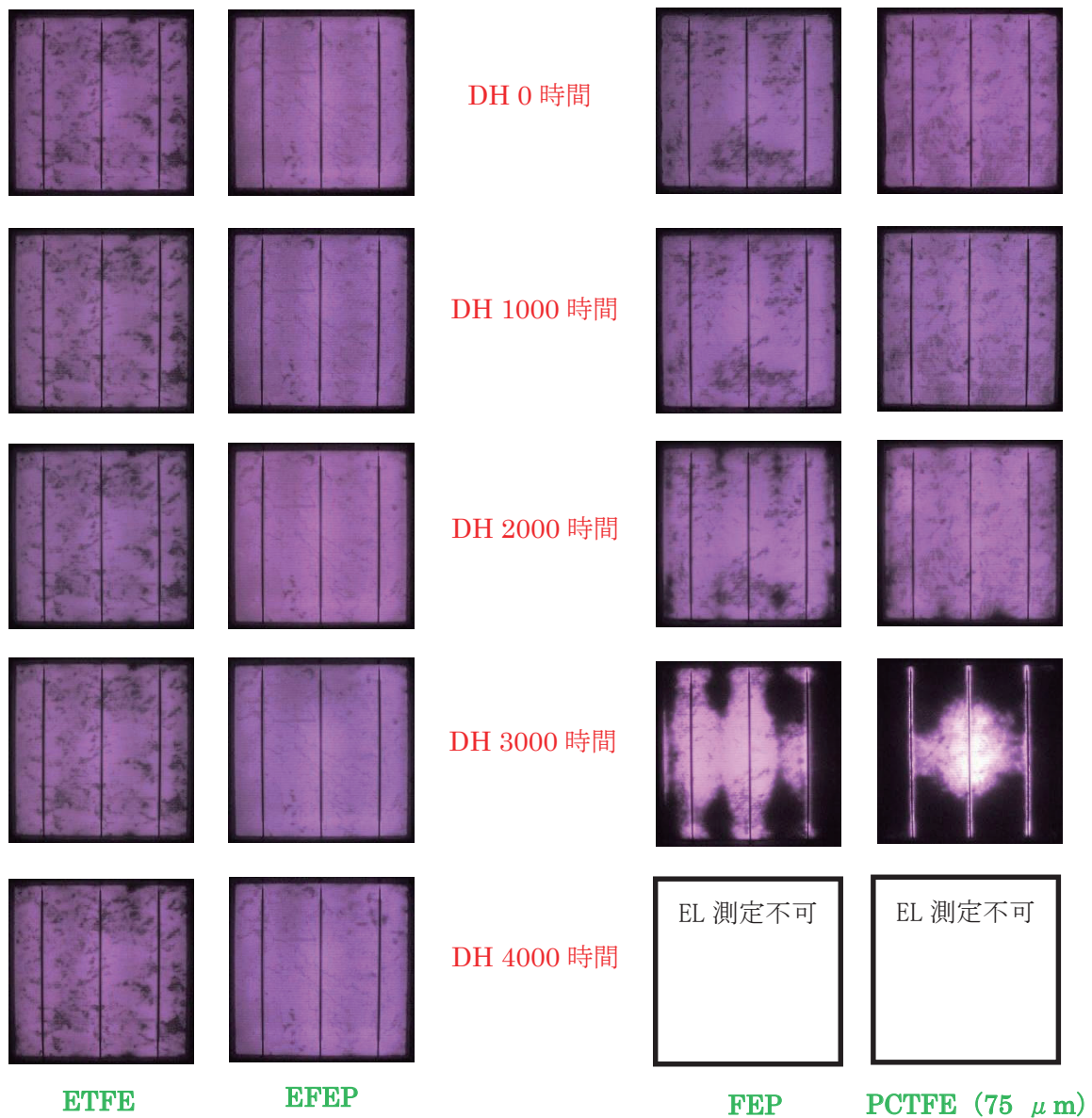


図 II-3-5. 85 °C、85%RH 条件下で環境試験を行ったモジュールの EL 画像

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 I-V 特性に注目すると（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  $I_{sc}$  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、DH2000 時間以降、当該モジュールの発電特性の劣化が不可逆的に進行していることを示している。なお、配線の変色は DH1000～1500 時間から始まる。

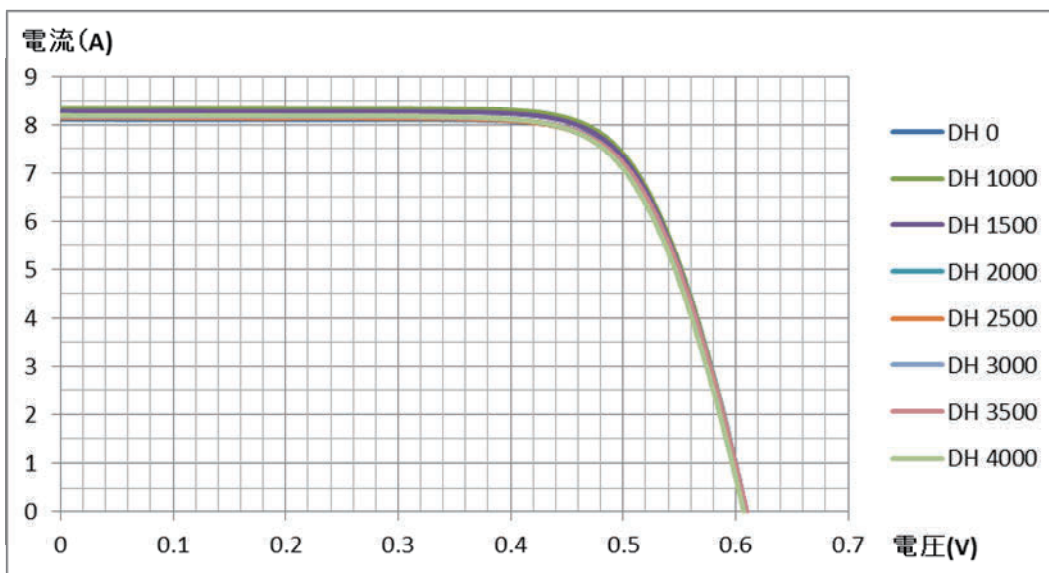


図 II-3-6. ETFE フィルムを用いたモジュールの DH 試験による I-V カーブの変化

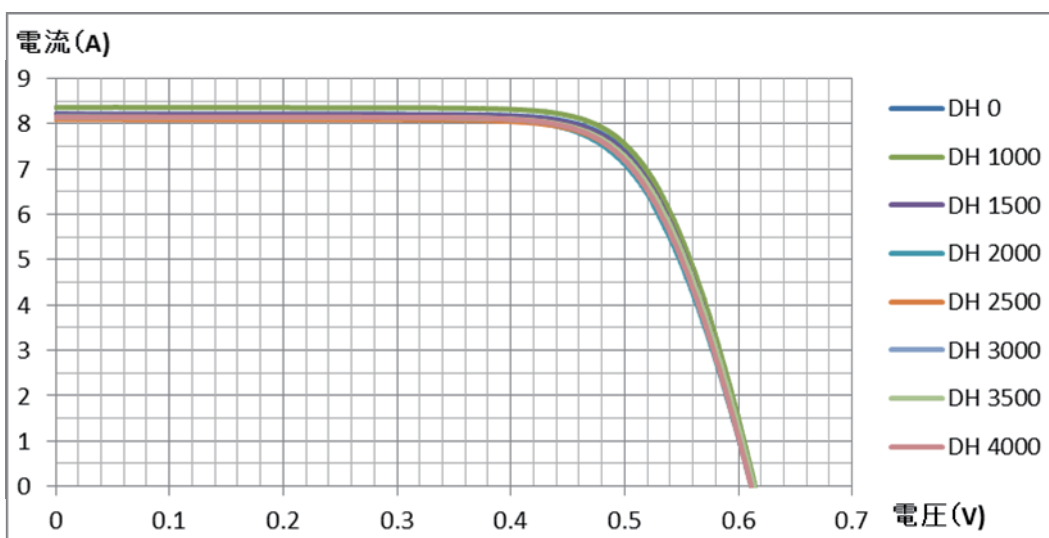


図 II-3-7. EFEP フィルムを用いたモジュールの DH 試験による I-V カーブの変化

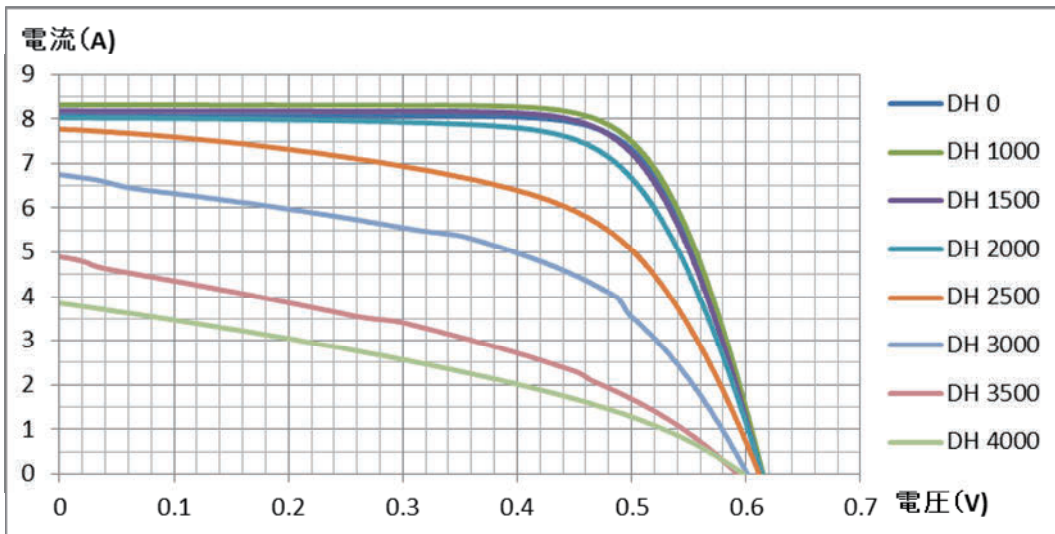


図 II-3-8. PCTFE フィルム (75  $\mu\text{m}$ ) を用いたモジュールの DH 試験による I-V カーブの変化

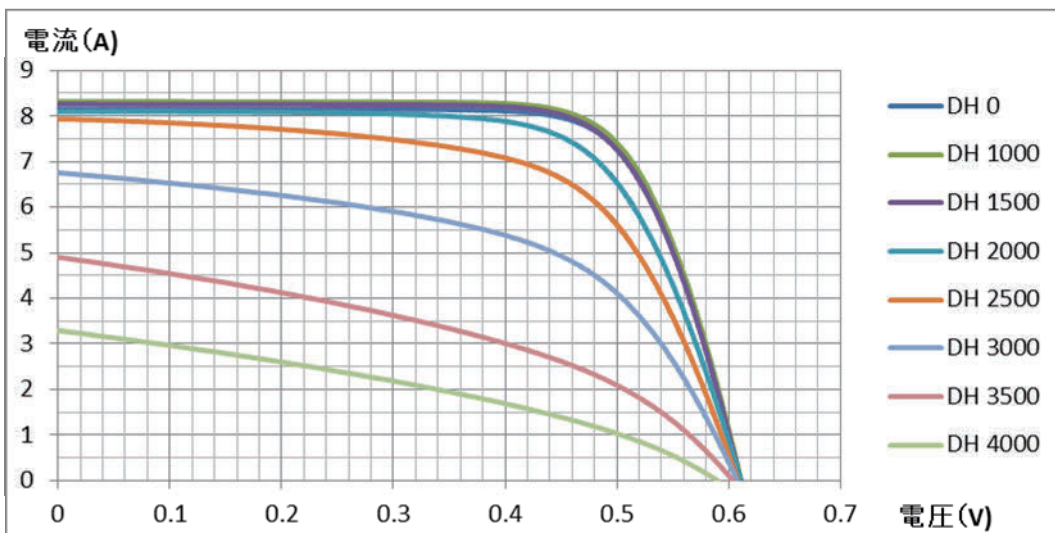


図 II-3-9. FEP フィルムを用いたモジュールの DH 試験による I-V カーブの変化

#### II-4. 破壊分析を用いた太陽電池モジュールの劣化に関する考察

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 (75  $\mu\text{m}$ ) を用いたモジュールにて行った (図 II-4-1)。

サンプルの断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した画像を図 II-4-2 に示す。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おり、また銀電極自身も Si ウエハから一部がはがれている。

また、銅配線を覆っているハンダも離れており、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。

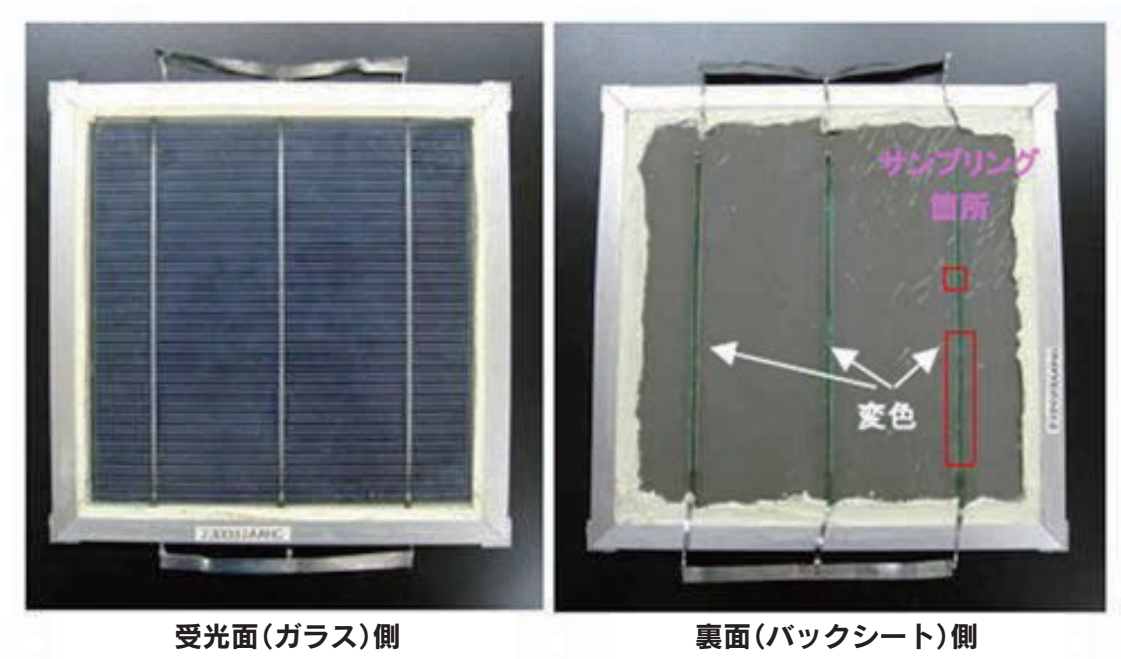


図 II-4-1. 破壊分析を行った太陽電池モジュール（PCTFE 使用）の外観

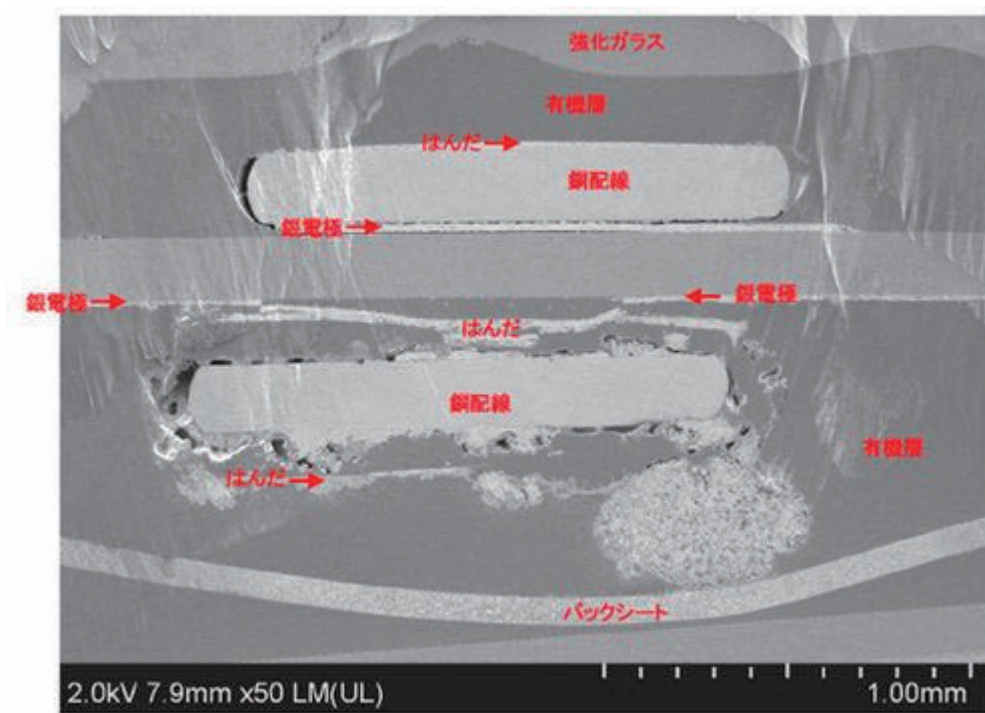
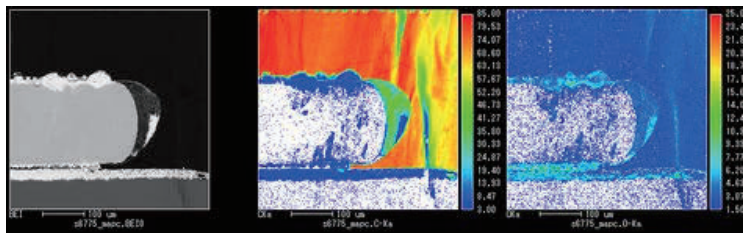
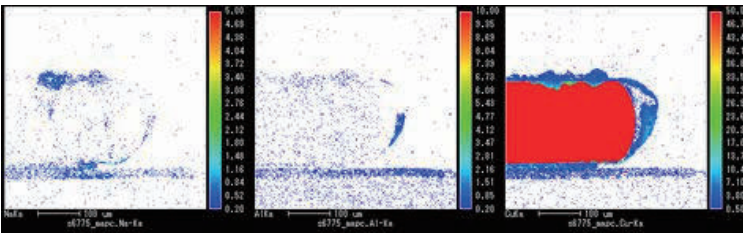


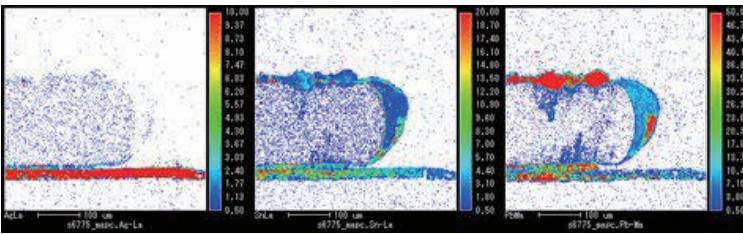
図 II-4-2. 破壊分析を行った太陽電池モジュール（PCTFE 使用）の断面 SEM 画像



SEM 画像                    C (炭素)                    O (酸素)

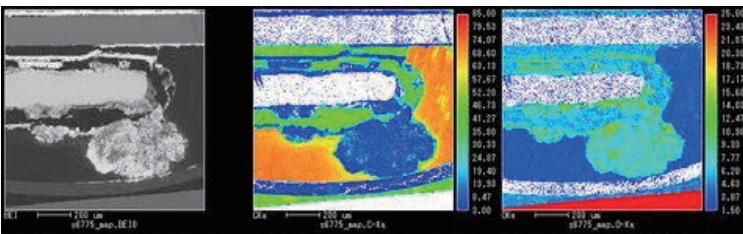


Na (ナトリウム)    Al (アルミニウム)    Cu (銅)

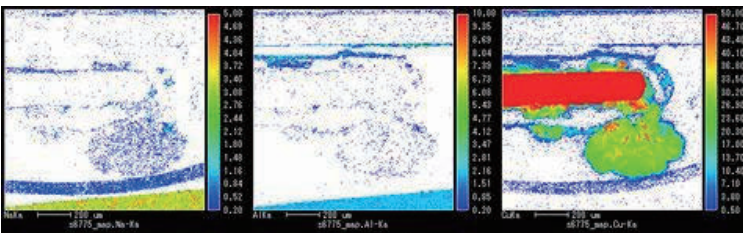


Ag (銀)                    Sn (すず)                    Pb (鉛)

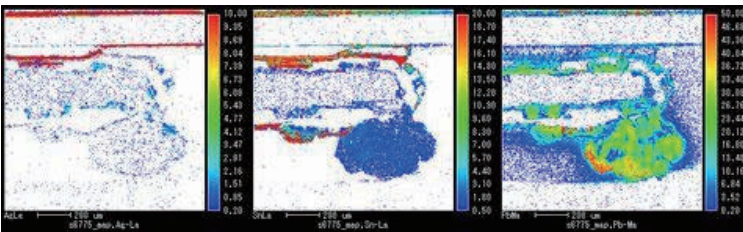
図 II-4-3. 太陽電池モジュール (PCTFE 使用) の断面元素マップ (受光面側)



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（レーザー一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）。

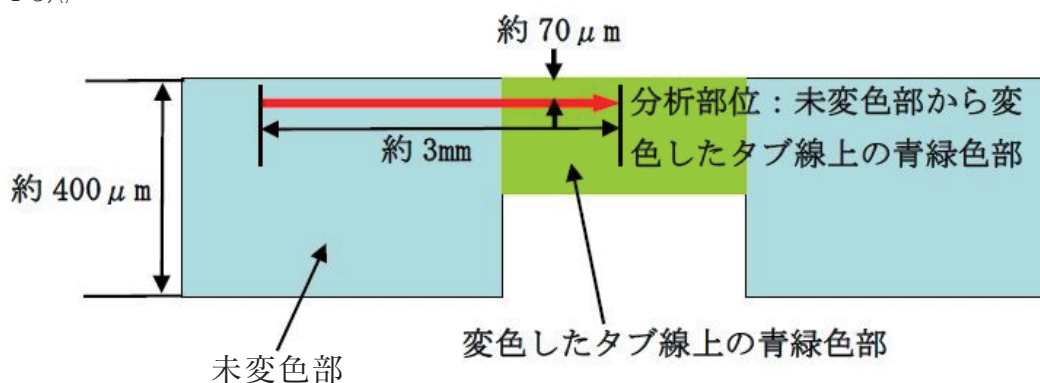


図 II-4-5. LA-ICP-MS で分析した EVA（バックシート側）の模式図

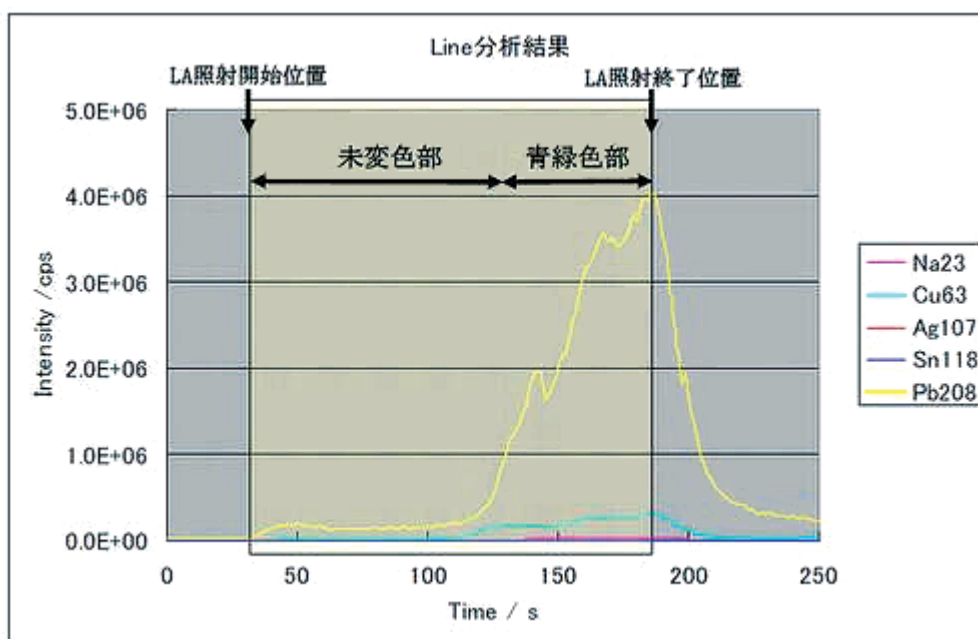


図 II-4-6. LA-ICP-MS による分析結果（バックシート側）

変色しているタブ線上にある EVA と未変色部の EVA 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、ナトリウム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錫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）。

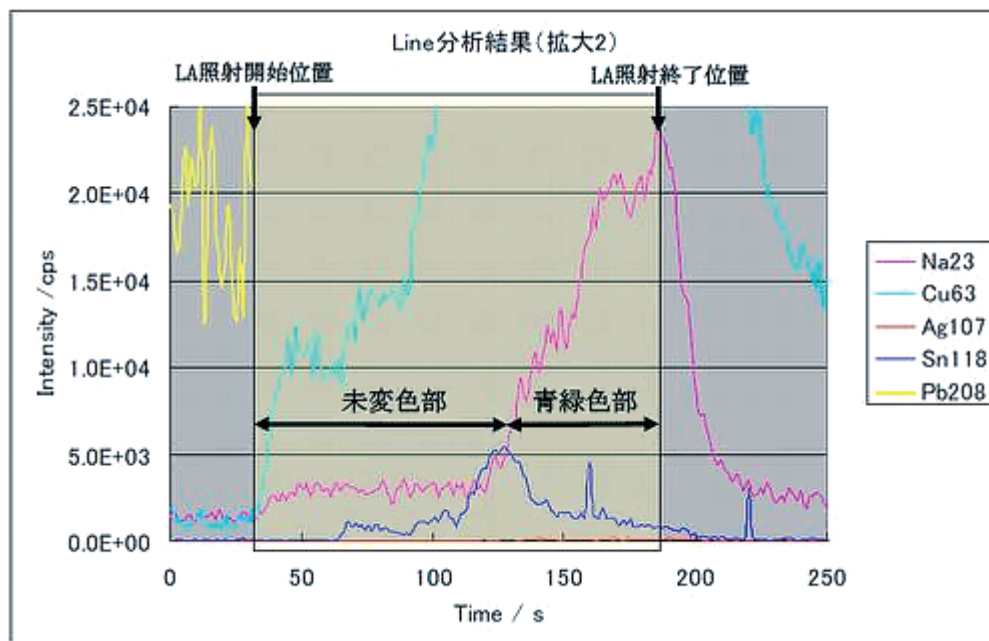


図 II-4-7. LA-ICP-MS(図 II-4-6 の拡大図)

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 に示すように、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 に示すように、バックシートの水蒸気透過量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、外観を観察すると（図 II-4-8）、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。

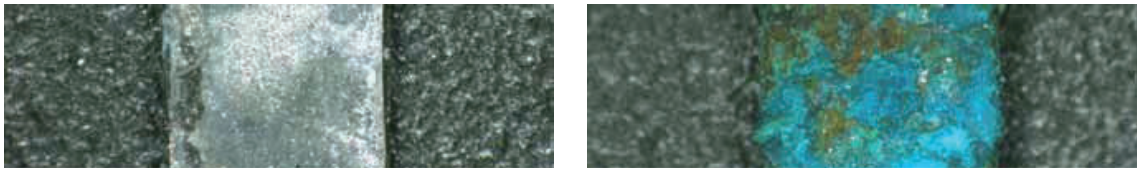


図 II-4-8 ラマンスペクトル分析を行ったタブ線 (左：受光面側、右：バックシート側)

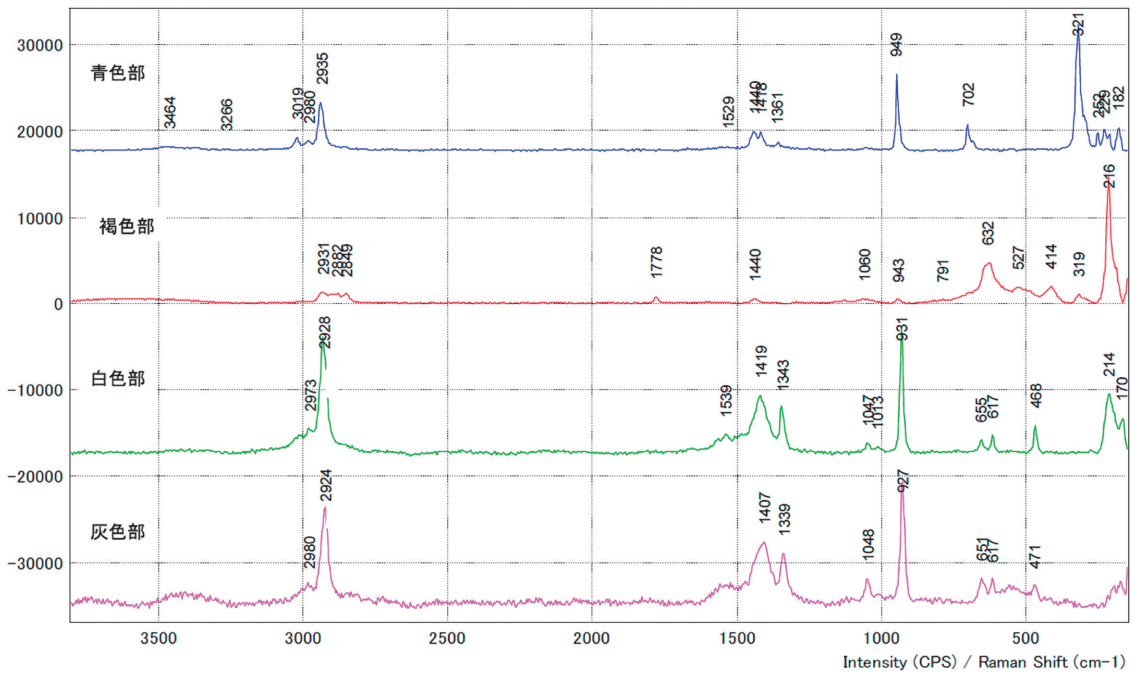


図 II-4-9 タブ線のラマンスペクトル

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ー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、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 EVA の加水分解が促進されて酢酸が発生したものと推察される。

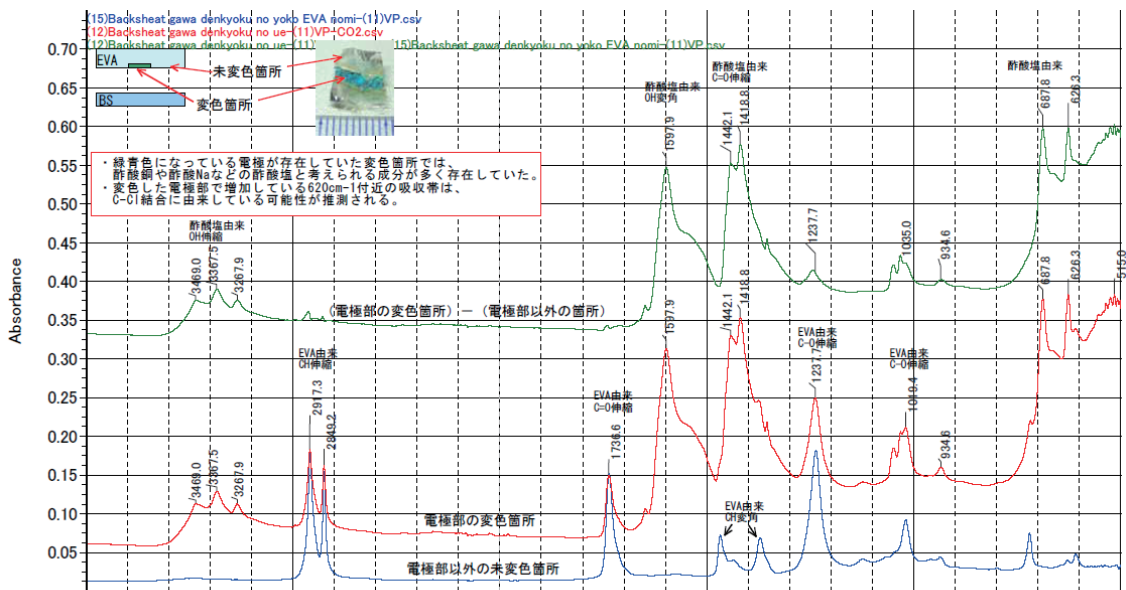


図 II-4-10. EVA の IR スペクトル (バックシート側)

表 II-4-1. イオンクロマトグラフィーにより求められた EVA 中の酢酸、ギ酸等の含有量

試料	成分	含有量 (単位: $\mu\text{g/g}$ )		
		n=1	n=2	平均値
裏面	酢酸 ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ )	25000	23000	24000
	ギ酸 ( $\text{HCOO}^-$ )	< 300	< 300	< 300
	$\text{Cl}^-$	7	5	6
表面	酢酸 ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ )	2400		
	ギ酸 ( $\text{HCOO}^-$ )	< 30		
	$\text{Cl}^-$	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。一方で、水蒸気バリア性の低い ETFE などではモジュールの劣化が見られない。この理由として、生じた酢酸がバックシートを通じて系外に放出されている可能性が考えられる。第 II 期コンソーシアム後半のテーマとして、これらの腐食モードの詳細解明と、屋外曝露モジュールでの劣化の相関性を検証していく。

(ダイキン工業株式会社：午坊 健司)

## サブテーマ 2 薄膜シリコン太陽電池モジュールへの水蒸気侵入の影響

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、薄膜アモルファスシリコン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-5. 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ックシートを 7 種類用意した。これら 7 種の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。

本研究のバックシートは、使用した透明蒸着バリアフィルムの種類によって水蒸気バリア特性が異なっている。表 II-5-1 に使用したバックシートの呼称と各バックシートの単位面積当たりの積算水蒸気透過量を示す。積算水蒸気透過量は、85 °C/85%RH の DH 試験を経たバックシートの 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点間で積分を取り、DH 試験 1000 時間までを合算することにより求めた。バックシート呼称 PET は透明蒸着バリアフィルムを含まない耐候性 PET フィルム単膜をバックシートとしたものである。

表 II-5-1. バックシートの DH 試験 1000 時間時点の積算水蒸気透過量

バックシート呼称	1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G	1H	PET
積算水蒸気透過量 [g/m <sup>2</sup> ]	44.9	186.9	39.7	37.0	19.8	48.6	20.6	12.5	250.0

薄膜アモルファスシリコン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。配線のモジュールからの取り出しは端子ボックスを使用せず、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-5-1 に示す。

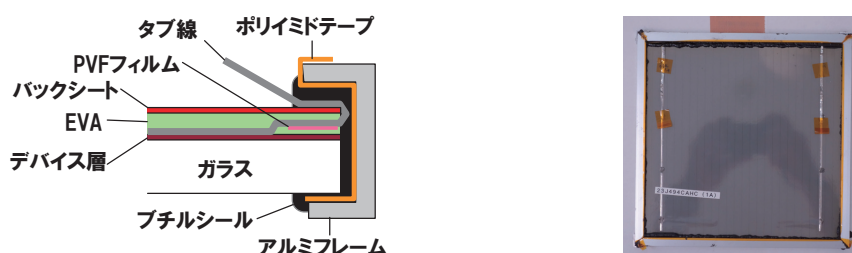


図 II-5-1. 評価モジュールの構造と外観

## II-6 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、DH 試験を行った。図 II-6-1 にダミーモジュールの構成を示す。

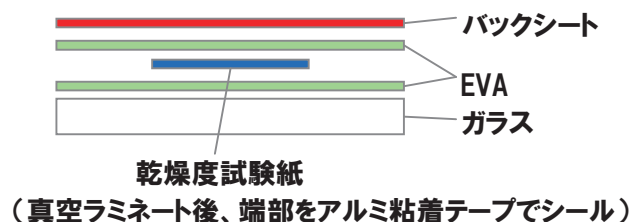


図 II-6-1. 乾燥度試験紙封入ダミーモジュール

図 II-6-2 に水蒸気バリア特性が異なる 3 種類の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-6-2 から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。本評価に用いたバックシートの中では中間の水蒸気バリア性能を持つ 1D のバックシートのサンプルでは 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関わらず、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。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た。水蒸気バリア性能が最も低いバックシート 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。

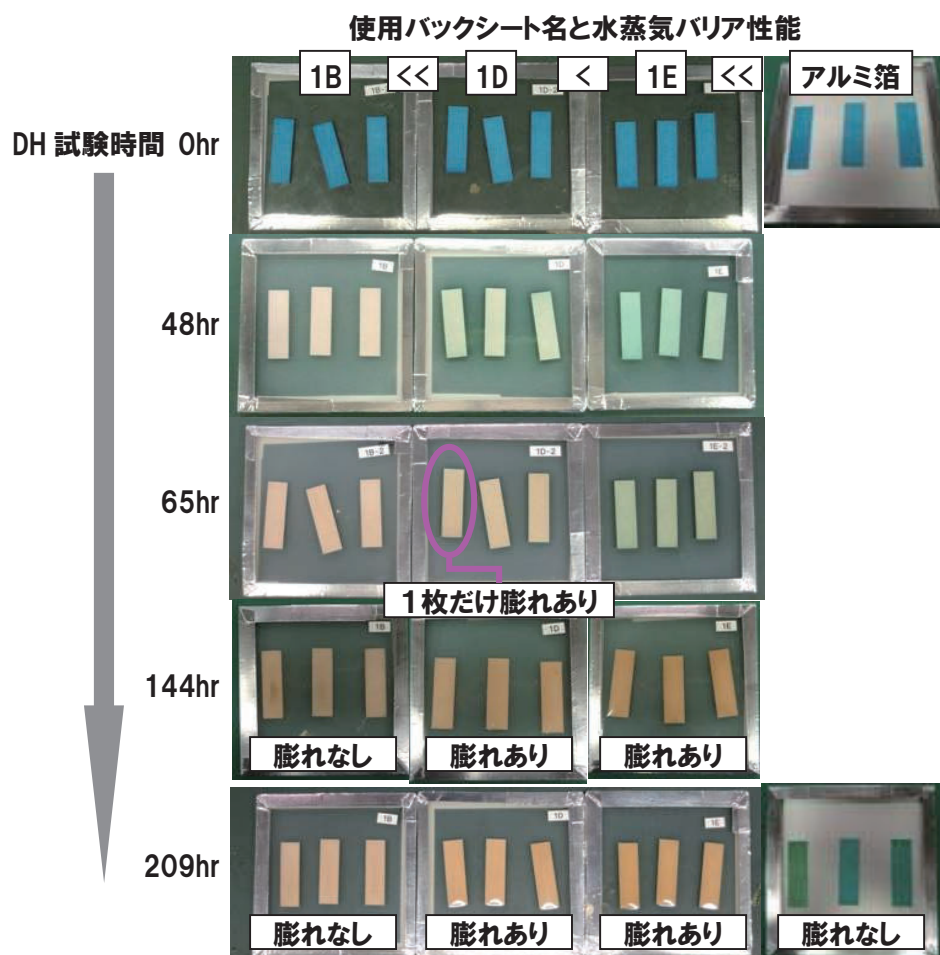


図 II-6-2. 乾燥度試験紙封入ダミーモジュールの DH 試験経時変化

### II-7. 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-7-1 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。

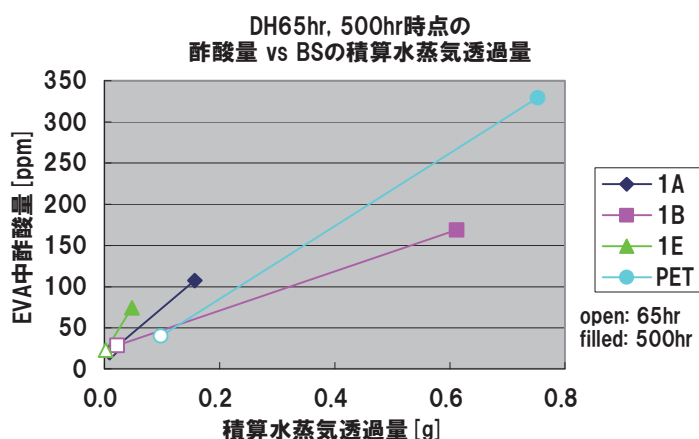


図 II-7-1. 積算水蒸気透過量と EVA 中酢酸濃度の関係

いずれのバックシートを用いた場合も、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-8. 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、バリア特性が異なるバックシート、水分による酢酸生成量レベルが異なる封止材を用いて薄膜アモルファスシリコンモジュールを作製し、DH 試験を実施した。モジュール内への水分の浸入とそれに伴う酢酸の発生が発電特性やその他のモジュール劣化に及ぼす影響を評価することで、薄膜アモルファスシリコンモジュールの劣化機構を解明するとともに、モジュールの信頼性を改善する方策を検討している。

### II-8-1. EVA 封止モジュールの DH 試験

水蒸気バリア特性が異なる 7 種類のバックシートを使用し、コンソーシアムの標準封止材である EVA を用いた薄膜アモルファスシリコンモジュールを作製した。同じ水準のバック

クシートを用いて作製したモジュールの枚数は 2 枚ずつである。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。

図 II-8-1-1 に EVA 封止モジュールの DH 試験 500 時間ごとの発電特性パラメータの変化を示す。ほとんどのモジュールで DH 試験 500 時間経過時にアニール効果によると思われる短絡電流  $I_{sc}$ 、開放電圧  $V_{oc}$  の初期値に対する向上が見られ、それに伴って最大電力  $P_{max}$  の向上が見られた。DH500 時間時点で  $I_{sc}$  の低下が見られる一部のモジュールについては、モジュール作製時点で本来通電がないはずのエッジアイソレーション外側の一部のセルに通電があることが EL 画像で確認されており、この部分の発電への寄与が DH 処理後に消失したものと考えられる。水蒸気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に用いたモジュールは DH500 時間時点で発電特性が評価できないほど劣化した。DH 試験 1000 時間経過時点では、ほとんどのモジュールで主に直列抵抗  $R_s$  の増加による曲線因子  $FF$  の低下が見られた。

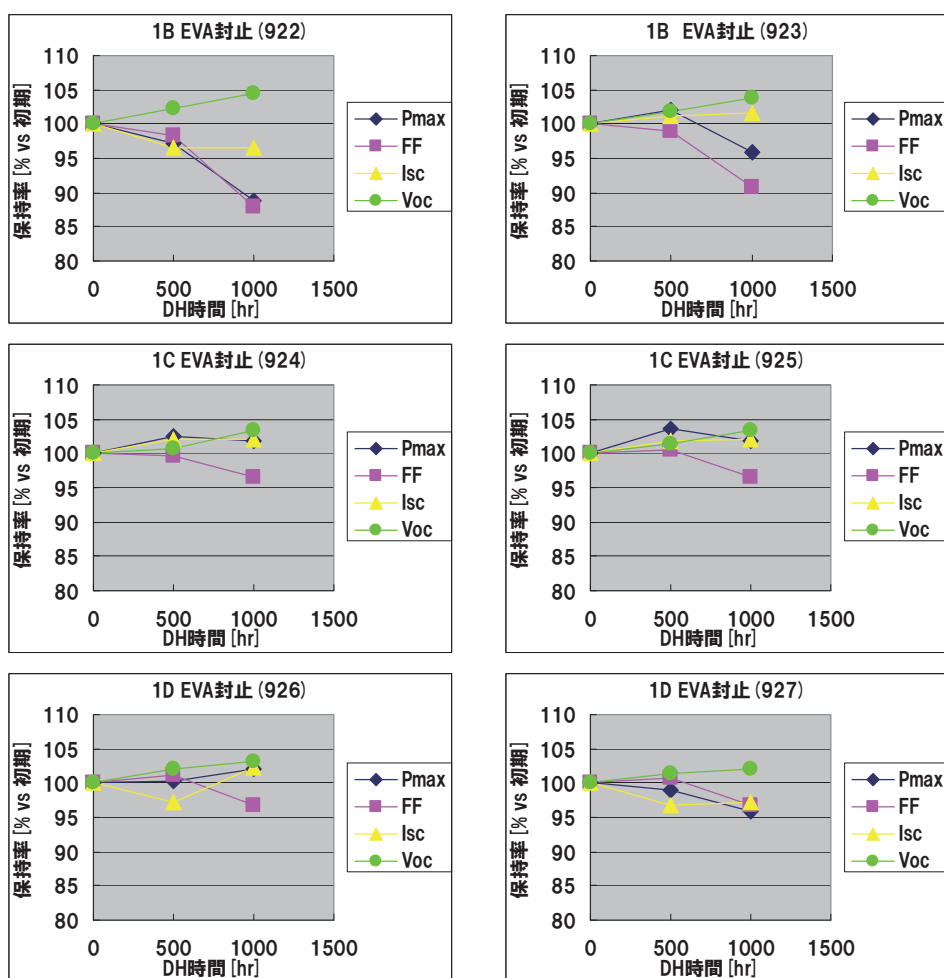


図 II-8-1-1. EVA 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化

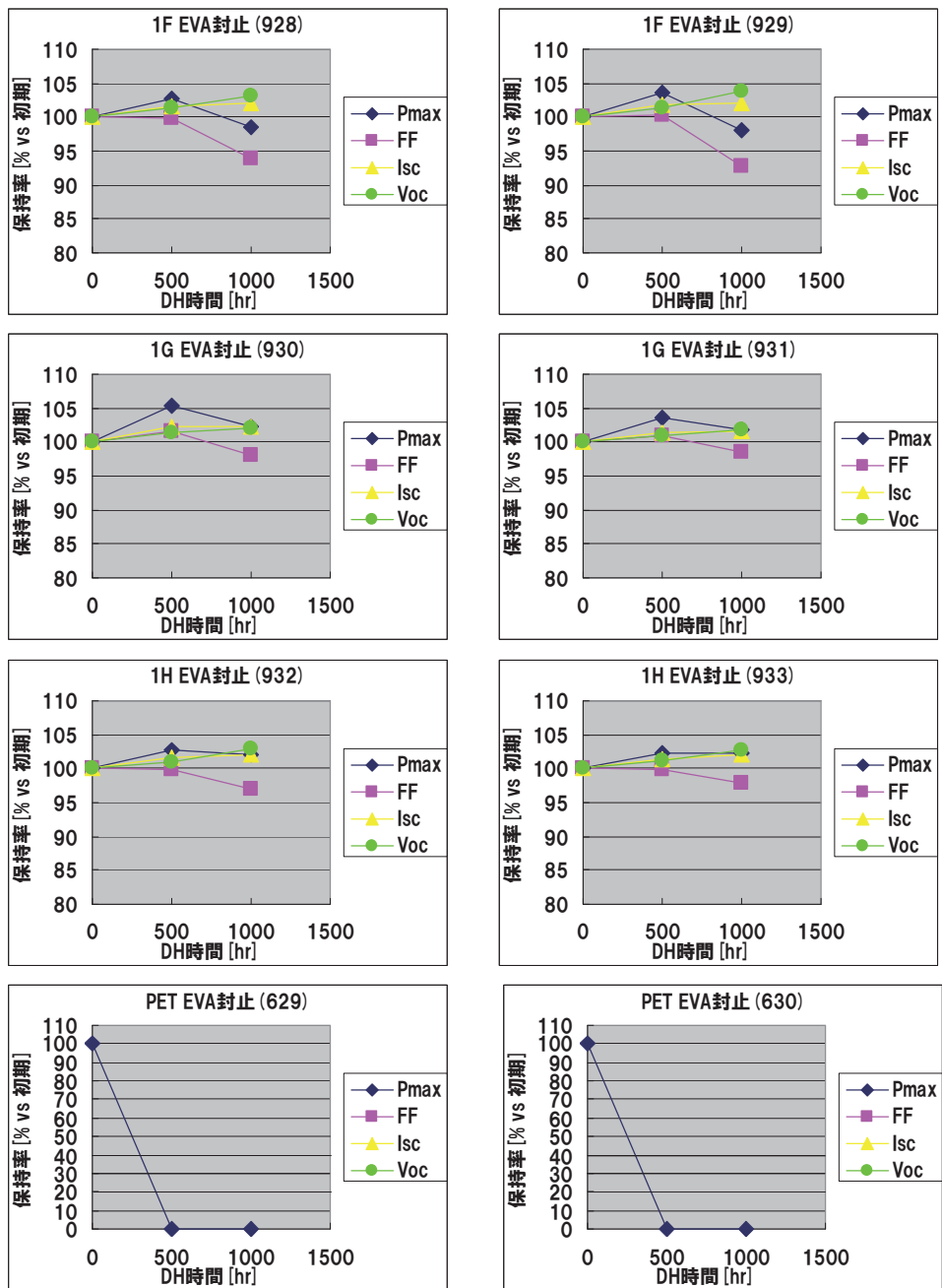


図 II-8-1-1 (つづき) . EVA 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化

## II-8-2. PVB 封止モジュールの DH 試験

水分との反応で酢酸を発生する EVA に対する比較として、アセチルエステル基の含有量が少なく、加水分解による酢酸の発生が EVA に比べて極めて少ないとされるポリビニルブチラール (PVB) を封止材に用いてモジュールを作製し、EVA 封止モジュールと同様に DH 試験を実施し、評価した。

図 II-8-2-1 に PVB 封止モジュールの DH 試験 500 時間ごとの発電特性パラメータの変化

を示す。PVB 封止モジュールでもアニール効果によると思われる  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$  の増加が認められるが、特に DH500 時間時点の  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$  の増加は EVA 封止モジュールに比べると小さく、また、PVB 封止モジュールは EVA 封止モジュールに比べて DH 経時の FF の低下が大きめであり、そのため、 $P_{max}$  の低下も EVA 封止モジュールに比べて大きい。ただし、EVA 封止の場合、PET 単膜バックシートを用いた場合には DH500 時間で発電特性の測定が不可能となったが、PVB 封止モジュールは DH500 時間、DH1000 時間も発電可能であり、水分浸入量が多い場合に EVA 封止との劣化状態の違いがある可能性が考えられる。

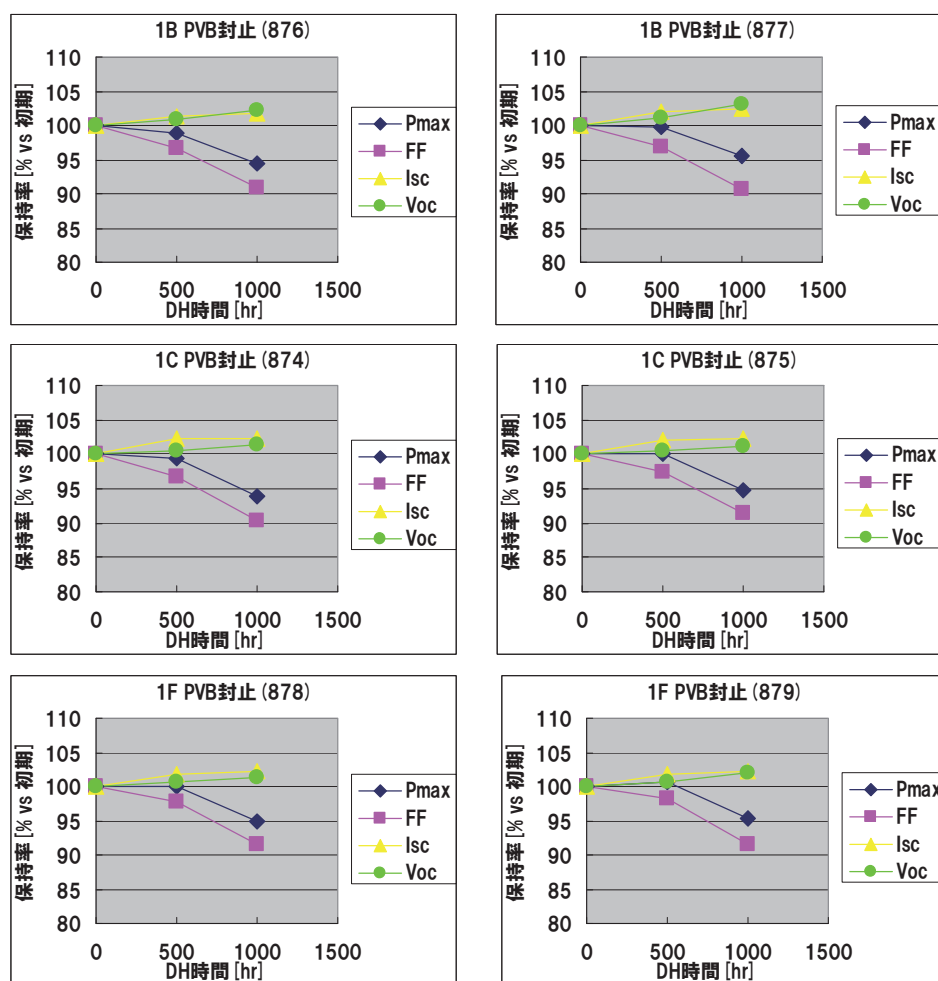


図 II-8-2-1. PVB 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化



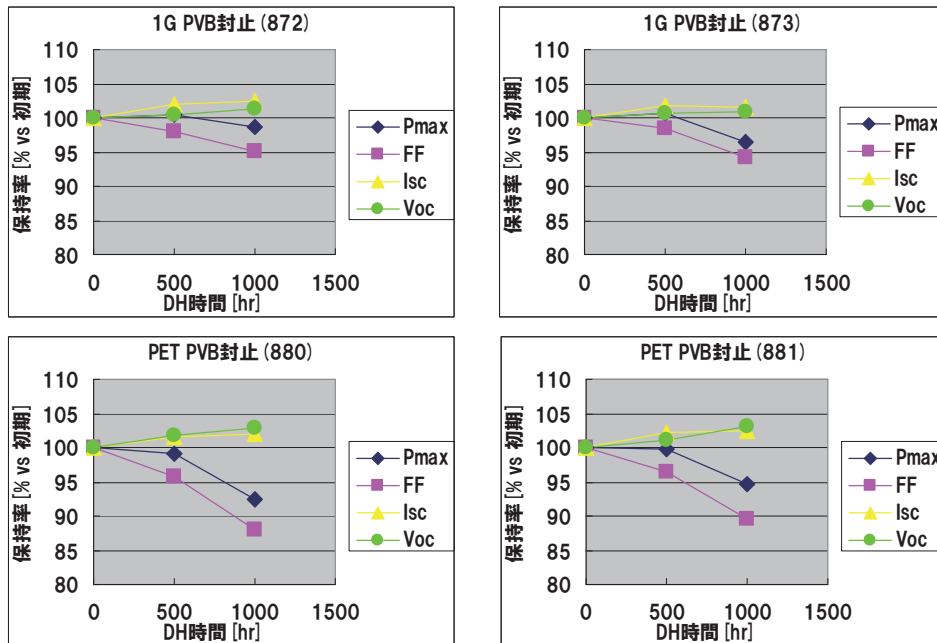


図 II-8-2-1 (つづき) . PVB 封止モジュールの DH 処理時間に対する発電特性の変化

### II-8-3. 発電特性変化に対するバックシートのバリア特性と封止材の影響

II-8-1 項、II-8-2 項に示した EVA 封止モジュール、PVB 封止モジュールの DH 試験経時による発電特性の変化の結果から、DH1000 時間におけるバックシートの積算水蒸気透過量に対する Pmax の保持率の変化を図 II-8-3-1 に示す。これより、EVA 封止モジュールは積算水蒸気透過量の増加につれて Pmax が低下しているのに対して、PVB 封止モジュールは積算水蒸気透過量が少ない領域での Pmax 低下は EVA 封止モジュールよりも大きいものの、積算水蒸気透過量が約 40 g/m<sup>2</sup> よりも大きい場合は水蒸気透過量が増えてもほぼ一定の Pmax 保持率を保っていることがわかる。特に、DH1000 時間時点の積算水蒸気透過量が 250 g/m<sup>2</sup> に達する PET 単膜を用いた場合に EVA 封止モジュールは発電性能を失っているのに対して、PVB 封止モジュールは Pmax 保持率 92%以上を保持しており、PVB 封止モジュールは大量の水分浸入でも劣化が少ないと言える。

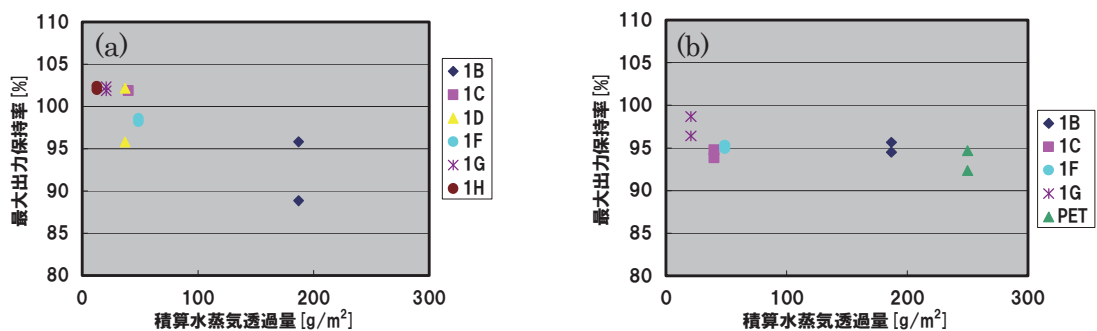


図 II-8-3-1. DH1000 時間処理時点の積算水蒸気透過量と Pmax 保持率変化  
(a) EVA 封止モジュール、(b) PVB 封止モジュール

#### II-8-4. DH 試験経過モジュールの EL 画像解析

EVA 封止モジュール、PVB 封止モジュールの DH500 時間、DH1000 時間経過時の EL 画像をそれぞれ図 II-8-4-1、図 II-8-4-2 に示す。DH500 時間時点では、EVA 封止モジュール、PVB 封止モジュールともに EL 画像上で暗部の発生など劣化の兆候を示すものは見られない。DH1000 時間時点では、EVA 封止モジュールのうち Pmax の低下が大きめなくつかのモジュールで面内に広く広がった暗部が薄く見え始めており、また多くの EVA 封止モジュールでモジュール端部に暗部の発生が見られるのに対して、PVB 封止モジュールでは、DH1000 時間時点でも面内、端部のいずれにも暗部の発生は見られない。

#### II-9. まとめ

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評価から、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内部への水分浸入が速く、封止材に EVA を用いた場合にはアセチルエステル基の加水分解による酢酸の発生が多いことが分かった。

水蒸気バリアバックシートを用いた薄膜アモルファスシリコンモジュールの DH 試験では、EVA 封止したモジュールでバリア性能が低いバックシートを用いたものほど、大きな出力低下が見られたのに対して、PVB 封止モジュールでは、水分透過量の多いバックシートでも出力の低下が抑えられた。

EVA 封止モジュールと PVB 封止モジュールの DH 試験での劣化状態の比較を行うことで、薄膜アモルファスシリコンモジュールの劣化に対する水分の影響と酢酸の影響を分離できる可能性があり、引き続き評価を継続する。

(東洋紡株式会社：濱本 史朗)

図 II-8-4-1. EVA 封止モジュールの EL 画像の DH 試験による変化

モジュールID	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933
ハックシート水準	1B		1C	1C	1D	1D	1F	1F	1G	1G	1H	
初期 EL画像												
DH500hr時 EL画像												
DH1000hr時 EL画像												

図 II-8-4-2. PVB 封止モジュールの EL 画像の DH 試験による変化

モジュールID	876	877	874	875	878	879	872	873	880	881
ハックシート水準	1B	1B	1C	1C	1F	1F	1G	1G	PET	PET
初期 EL画像										
DH500hr時 EL画像										
DH1000hr時 EL画像										

### 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太陽電池モジュールへ与える影響を調査・分析することを目的とする。

## II-10 試験方法

### II-10-1. 結晶系モジュール

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（シリコーン系）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 3 枚ずつ作製し、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。

### II-10-2. 薄膜系モジュール

コンソーシアム標準の薄膜系ミニモジュール（セル：アモルファスシリコン、封止材：EVA、バックシート：アルミ入り）において、シリコーン系のポッティング材を使用したモジュール、ポリウレタン系のポッティング材を使用したモジュールをそれぞれ 3 枚ずつ作製し、それらのモジュールについて DH 試験を実施した。なお、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。

## II-11. 結果と考察

### II-11-1. 結晶系モジュール

結晶系 4 セルモジュールにおいて、ポッティング材有り／無しモジュールの DH 試験前後の出力特性を図 II-11-1-1 に示す。

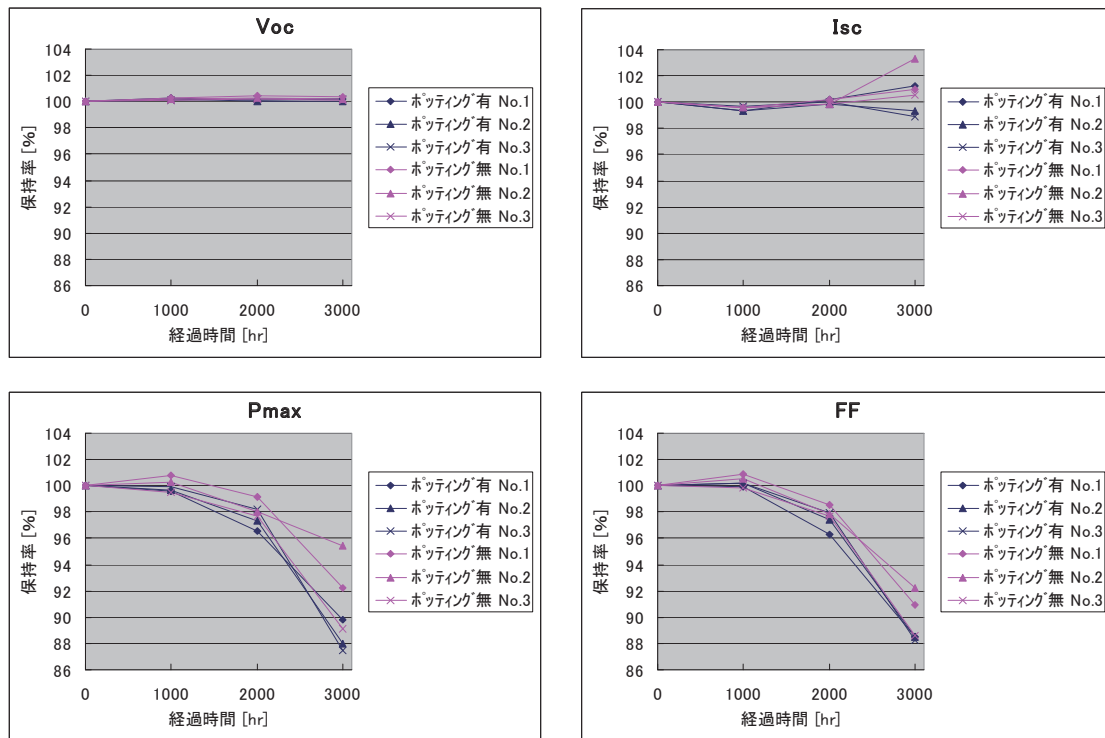


図 II-11-1-1. 結晶系モジュール DH 試験前後の出力特性

経過時間が進むに連れ、FF 低下により Pmax が低下している。2000 h 以降、ポッティング無しの方が若干保持率が高い傾向にあるが、その測定では、ソーラーシミュレーターの校正が不十分であった可能性があり、検証を進めている。

図 II-11-1-2 に DH 試験前後の EL 画像を示す。


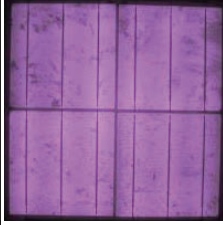
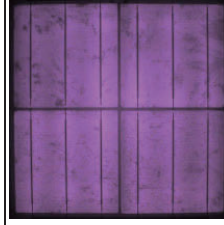
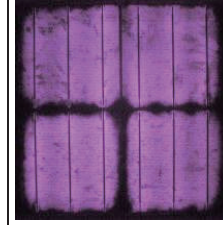

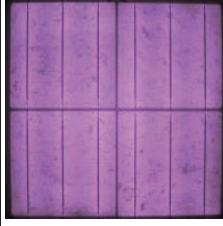
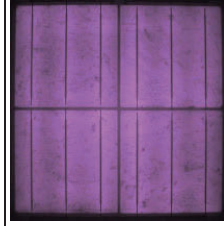
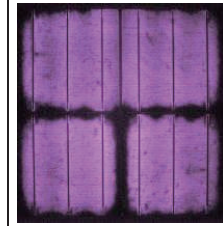

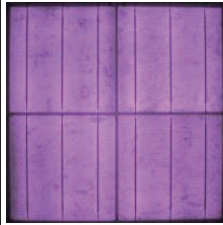
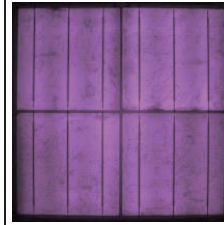
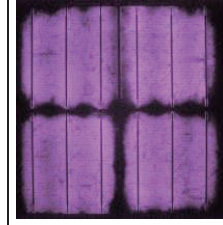

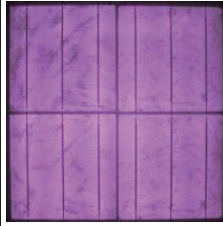
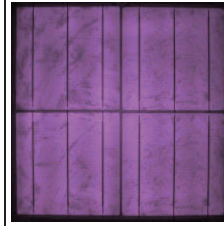
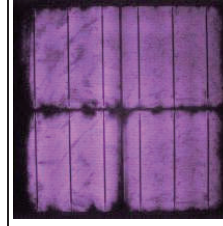

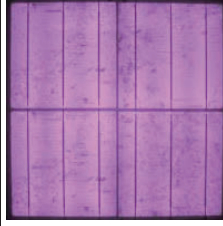
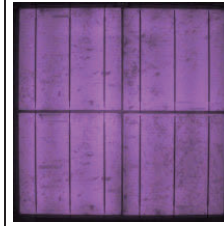
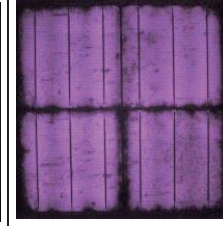


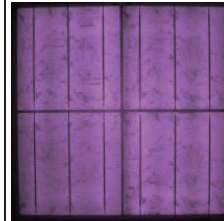
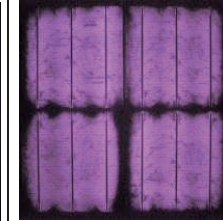
		DH0	DH1000	DH2000	DH3000
ポッティング材有り	No.1				
	No.2				
	No.3				
ポッティング材無し	No.1				
	No.2				
	No.3				

図 II-11-1-2. 結晶系モジュール 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、DH3000 でセル周辺部から暗部が広がっているが、端子箱部ではさほど暗部が広がっていない。これは、端子箱部からの水分浸入はあるが、逆に水分が出て行く通路にもなり、水分が留まらないため、例えば EVA の加水分解等、劣

化の原因となる現象が他の箇所よりも遅くなるからだと考えられる。

今後、引き続き DH 試験を継続し、EL 暗部の拡がり方に注目する。

## II-11-2. 薄膜系モジュール

薄膜系ミニモジュールにおいて、シリコン系もしくはポリウレタン系ポッティング材を用いて作製したモジュールの DH 試験前後の出力特性を図 II-11-2-1 に示す。

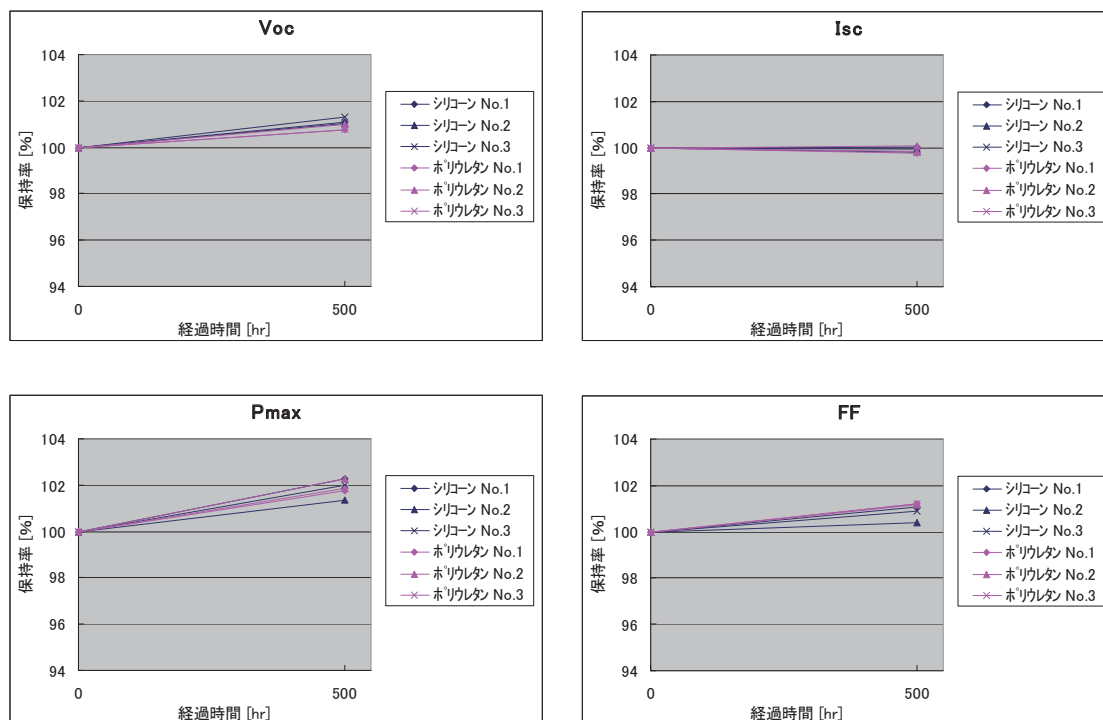


図 II-11-2-1 薄膜系モジュール DH 試験前後の出力特性

ポッティング材の種類にかかわらず、Voc、FF の微増により Pmax が増加しているが、これは薄膜シリコンのアニール効果によるものと考えられる。500 h の段階ではポッティング材の種類による出力特性の差はまだ見られない。

		No.1	No.2	No.3
シリコーン系ポッティング材	DH0			
	DH500			
ポリウレタン系ポッティング材	DH0			
	DH500			

図 II-11-2-2. 薄膜系モジュール DH 試験前後の EL 画像

図 II-11-2-2 に DH 試験前後の EL 画像を示す。試験前から存在した暗部が 500 h 経過後には消えており、アニール効果が原因であると考えられる。また、シリコーン系ポッティング材を使用したモジュールは端子箱部にわずかに暗部が見られるが、出力に影響を及ぼすほどではなく、アニール効果による回復の影響の方が大きい。一方、ポリウレタン系ポッティング材を使用した場合には、端子箱部の暗部は観測されない。

薄膜シリコン系太陽電池では、端子箱部からの水分浸入による劣化が問題となっており、本試験では端子箱部の EL に差異が見られたことから、ポッティング材の選定によっては端子箱からの水分浸入を抑えられることを示唆する結果が得られた。今後も DH 試験を継続する。

(長州産業株式会社：上野 清志)



#### サブテーマ 4 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配線劣化は発電出力を低下させる要因として重要な問題と認識されている。本研究では、テストモジュールを用いて信頼性試験における配線劣化の再現を試みる。温度サイクル試験においてタブ線の接続強度と配線劣化の関係を調査する。

#### II-12 実験方法

コンソーシアムの標準部材を使用し作製した、タブ線の接続強度が異なる市販サイズモジュールの温度サイクル試験に対する信頼性を検証する。タブ線のはんだ接続には、産総研九州センター所有の自動ストリング装置（エヌ・ピー・シー社製）を用いた。接続の温度条件を表 II-12-1 に示す。標準条件に対して温度を低くした 3 条件について検討した。まず接続強度評価用のストリングセルを作製して 90 度ピール試験を実施し、明らかにピール強度に差がある条件 No. 1 と標準条件で市販サイズモジュールを作製することを決めた。初期状態の I-V と EL を測定して、温度サイクル試験（TC： $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）を 400 サイクルまで実施し、劣化状態を調べた。

表 II-12-1. タブ接続工程における温度条件

条件	ピン時間(s) 抑え/加熱	ホットエア(°C)			ホットエア高さ (mm)			テーブル温度 (°C)				
		L	C	R	L	C	R	余熱		配線	徐冷	
No. 1	3.0/2.0	350	350	350	80	80	80	80	120	160	80	50
No. 2	3.0/2.0	400	400	400	80	80	80	80	120	160	80	50
No. 3	3.0/2.0	450	450	450	80	80	80	80	120	160	80	50
標準	3.0/2.0	450	450	450	80	80	80	80	120	180	80	50

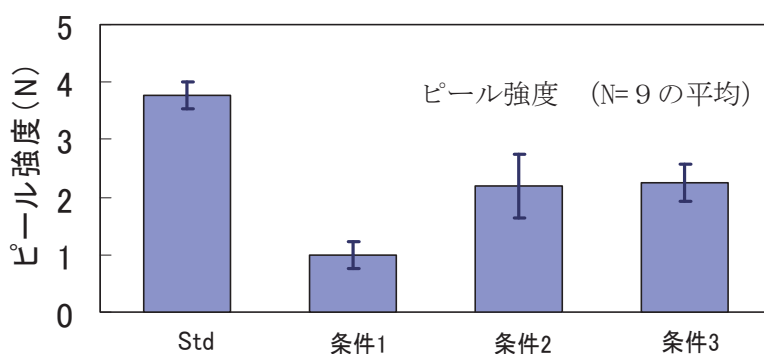


図 II-12-1. 接続条件によるタブ線とセル電極のピール強度

## II-13. 実験結果

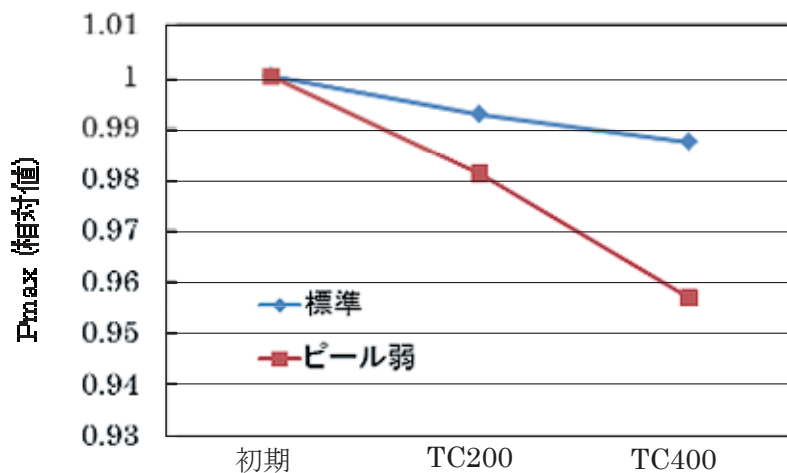


図 II-13-1. 温度サイクル試験に対する Pmax の変化

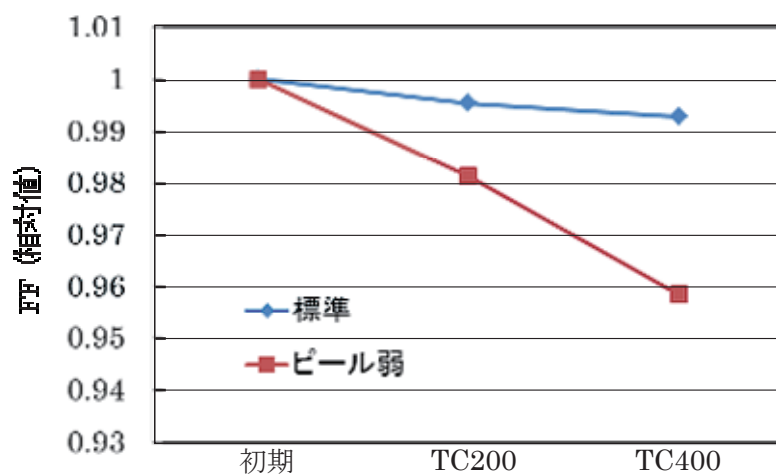


図 II-13-2. 温度サイクル試験に対する FF の変化

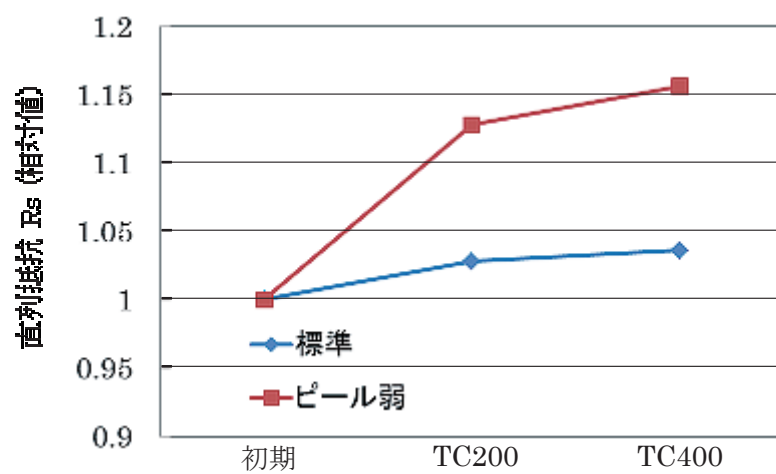


図 II-13-3. 温度サイクル試験に対する直列抵抗 Rs の変化

図 II-13-1、図 II-13-2、図 II-13-3 に、TC 試験に対する Pmax、FF、直列抵抗の変化を示す。標準条件では Pmax が 400 サイクル後に約 1.3%低下していたのに対して、ピール強度の弱いモジュールでは約 4.2%低下していた。図 II-13-2 からわかるように、FF は Pmax と同様に低下している。劣化要因として、図 II-13-3 から直列抵抗値 Rs の大きな増加が考えられる。次に、EL 画像の結果を図 II-13-4 に示す。標準条件のモジュールでは初期から TC400 まで EL 画像に変化は観られない。しかしピール強度の弱いモジュールでは、TC200 においてタブ線接続不具合で観られる EL 明暗現象がセル 1 枚に現れている。TC400 ではその明暗現象がセル 4 枚に増えている。またこの現象はモジュールの周辺部に起きるといふ特徴がある。以上の結果から、直列抵抗増加の要因は、タブ線の接続が一部電極から離れることから起きると考えられる。またモジュール周辺部のセルに異常が起きていることから、温度サイクルによるストレスは周辺部が大きいということが示唆された。




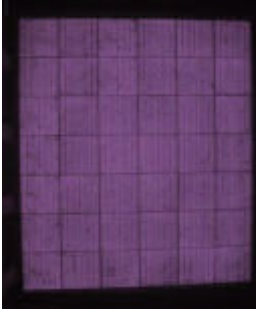
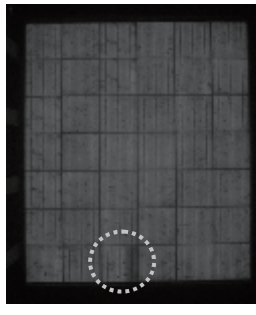

接続条件	初期	TC200 サイクル	TC400 サイクル
標準条件 ピール強度：約 4 N			
低温条件 ピール強度：約 1 N			

図 II-13-4 温度サイクル試験に対する EL 画像の変化

#### まとめ

タブ線とセル電極のピール強度を標準の約 4 N から 1 N に下げると、温度サイクル試験で接続不具合が再現できることがわかった。ただし、Pmax の低下率は TC200 で約 1.9% であり、これは IEC の規格を十分満たすものである。つまりその程度のピール強度でも認証試験に合格し、市場に出回る可能性があることがわかった。今後はタブ線の接続不具合を断面観察などのマイクロな視点で分析する予定である。

(日立化成工業株式会社：清水 成宜)

## サブテーマ5 マイクロクラックの影響

本サブテーマではマイクロクラックを再現し、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特性への影響を調べることを目的とする。

### II-14. マイクロクラック再現方法及び試験方法

#### II-14-1. 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-14-1-1 右図の楕円で囲んだ箇所参照）。傷の深さは約 50  $\mu\text{m}$  である。

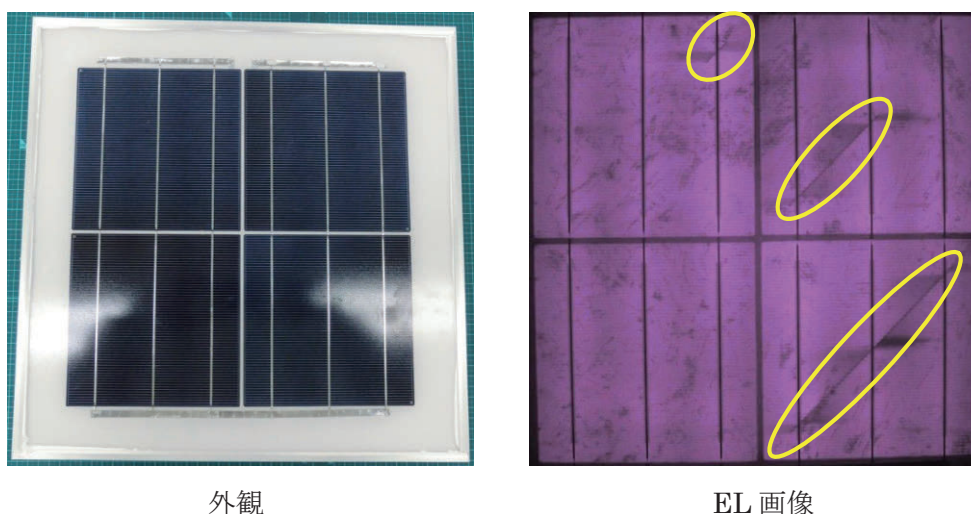


図 II-14-1-1. レーザーによるマイクロクラック再現モジュールの外観と EL 画像

モジュール部材については全てコンソーシアム標準部材（セル：多結晶、封止材：ファーストキュア EVA、バックシート：TPT）を使用した。レーザーにより傷を付けた 4 セルモジュールを 3 枚、傷を付けていない 4 セルモジュールを 3 枚それぞれ作製し、TC 試験（-40  $^{\circ}\text{C}$  から 85  $^{\circ}\text{C}$  までの温度サイクル試験）を実施した。

#### II-14-2. 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-14-2-1 右図の矢印箇所参照）。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。

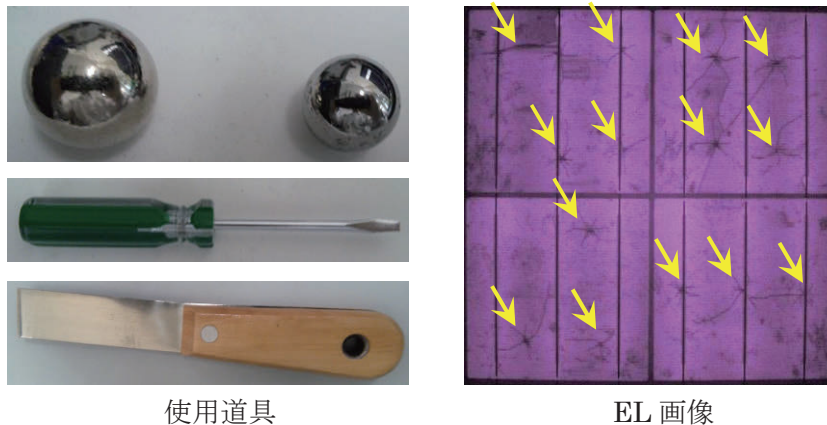


図 II-14-2-1. 使用道具とマイクロクラック再現セルの EL 画像

物理衝撃によりマイクロクラックを再現したセルを用いた 4 セルモジュールを 3 枚作製し、TC 試験を行っている。これは現在試験中であり、結果はまだ出ていない。

同じく、物理衝撃によりマイクロクラックを再現したセルを用いてフルサイズモジュール（42 セルモジュール）とマイクロクラック無しの標準フルサイズモジュールをそれぞれ 1 枚ずつ作製した。このとき、バックシートは裏面から外観が観察できるように透明の PET 系を使用した（図 II-14-2-2 参照）。これらのモジュールは機械的荷重試験（+2400 Pa を 1 h 保持、その後-2400 Pa を 1 h 保持、これを 3 サイクル繰り返す）を実施した。



図 II-14-2-2. 透明バックシートを使用したモジュール裏面外観

## II-15. 結果と考察

### II-15-1. レーザーによるマイクロクラック再現モジュールの TC 試験

レーザーによるマイクロクラック再現有り／無しでのモジュールにおける TC 試験前後の出力特性を図 II-15-1-1 に示す。

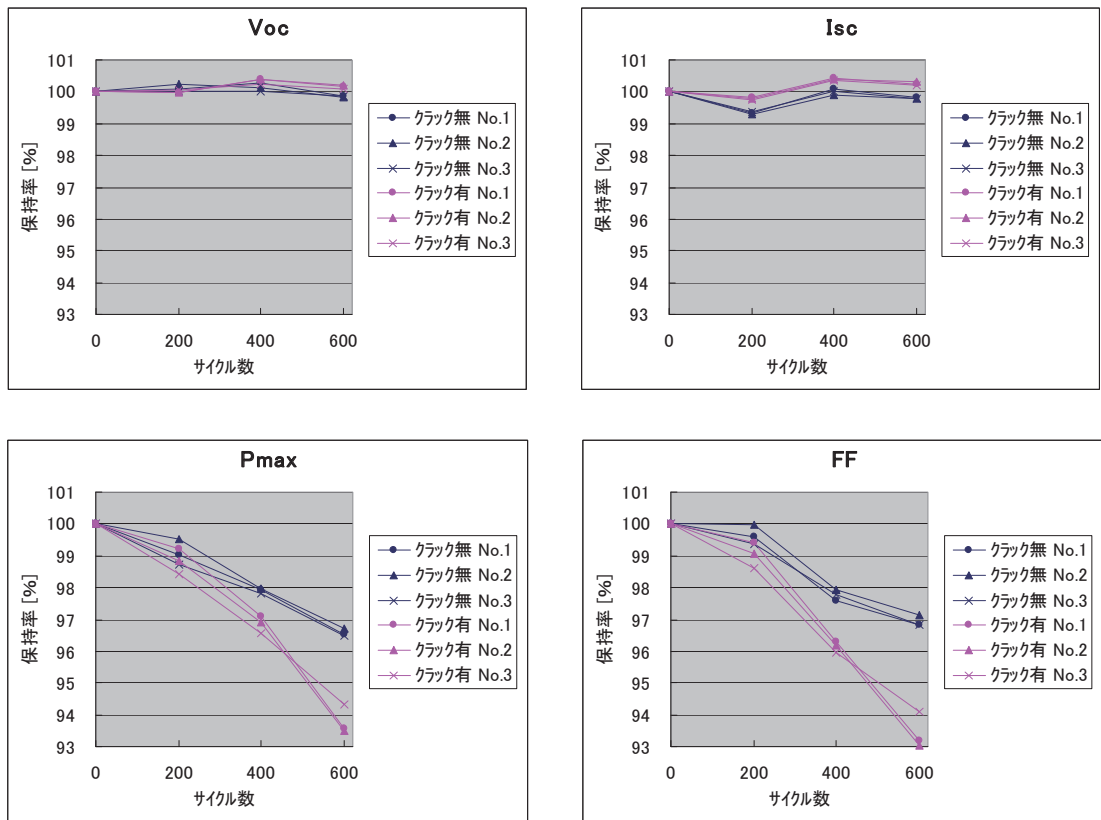


図 II-15-1-1. TC 試験前後の出力特性

各モジュールにおいて、Voc、Isc はほぼ変化しておらず、FF 低下により Pmax が低下しているが、レーザーによるマイクロクラック再現モジュールの方が顕著に低下していることがわかる。これは、レーザーを受光面から照射しているため、フィンガーをレーザーで破断している。この破断されたフィンガー部分が温度サイクルにより剥がれて高抵抗化し、FF が低下したものと考えられる。

		TC0	TC200	TC400	TC600
マイクロクラック再現無し	No.1				
	No.2				
	No.3				
マイクロクラック再現有り	No.1				
	No.2				
	No.3				

図 II-15-1-2. TC 試験前後の EL 画像

図 II-15-1-2 に TC 試験前後の EL 画像を示す。レーザーを照射することで破断したフィンガー部分が暗くなっている箇所があることがわかる。また、試験が進むに連れ、図 II-15-1-2 中に楕円で囲んで示すように、破断したフィンガー近傍の暗部が新たに発生する

箇所や暗部が拡大する箇所が見られた。このことから、フィンガー破断した部分は熱膨張係数の違いによるストレスを受けやすく、剥がれやすいことが考えられる。

セル受光面からレーザー照射して再現したマイクロクラックは実際にセル内部に発生したマイクロクラックとは性質が異なると考えられるが、マイクロクラックがフィンガー破断まで発展したときには今回の試験のような影響が出るものと考えられる。

## II-15-2 物理衝撃による再現モジュールの機械的荷重試験

図 II-15-2-1 に機械的荷重試験前後の各パラメータの保持率を示す。

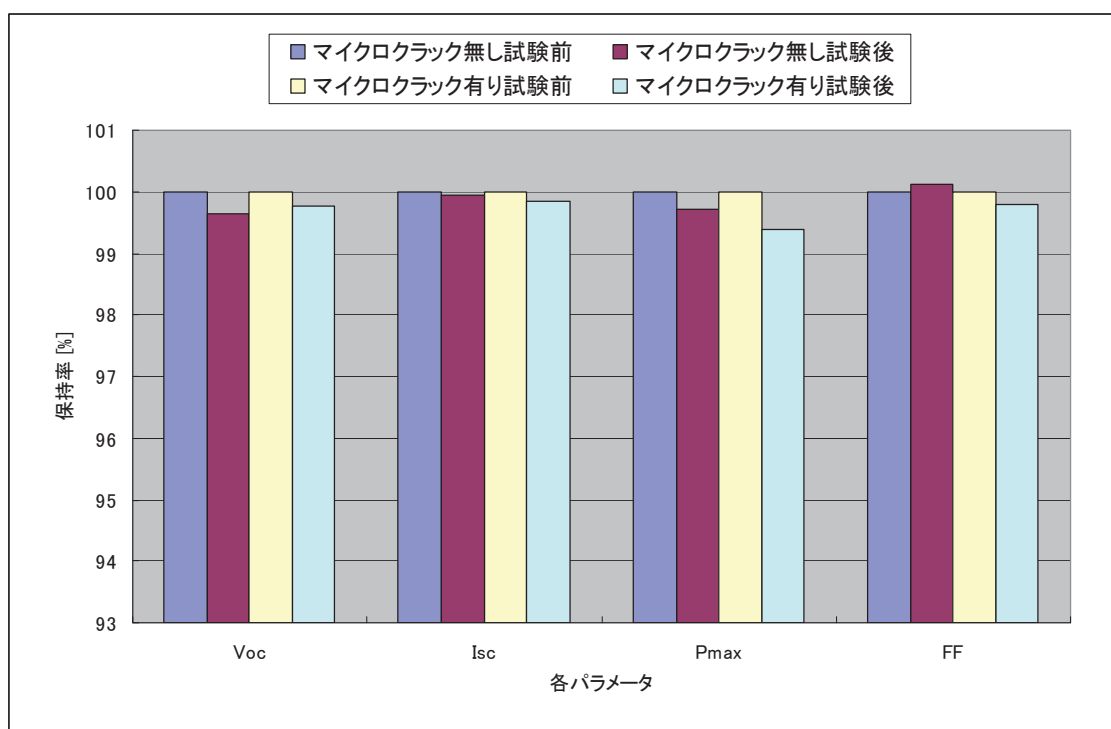
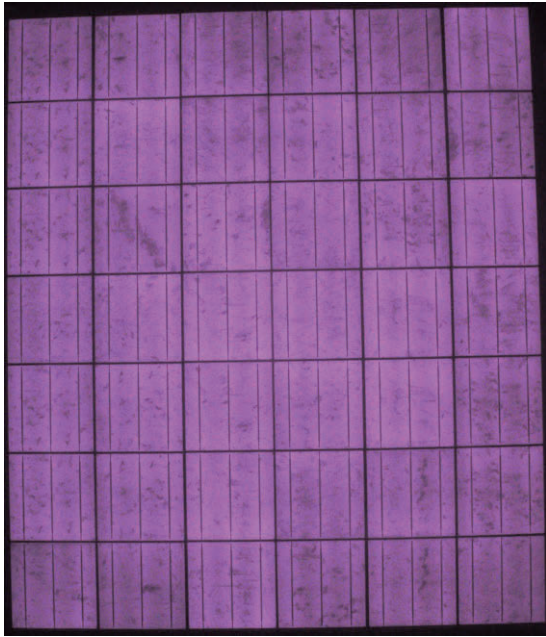


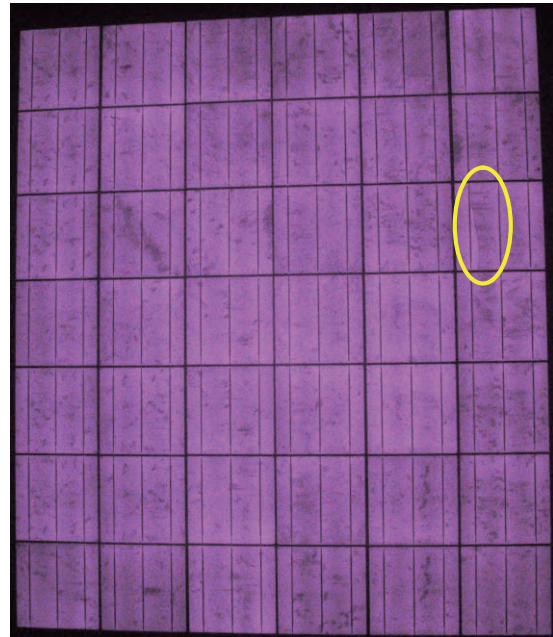
図 II-15-2-1. 機械的荷重試験前後の各パラメータの保持率

物理衝撃によるマイクロクラック有り／無しのモジュールのいずれにおいても、試験後に Pmax がわずかに低下しているが、いずれも 1%以下であり、マイクロクラックによる影響はほとんどないと考えられる。

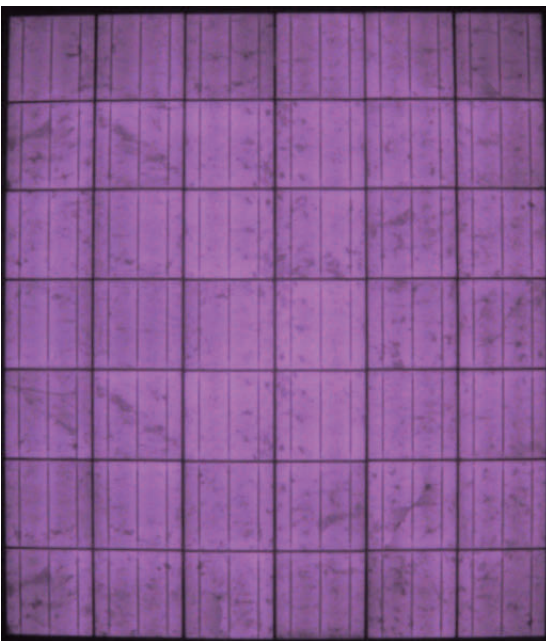




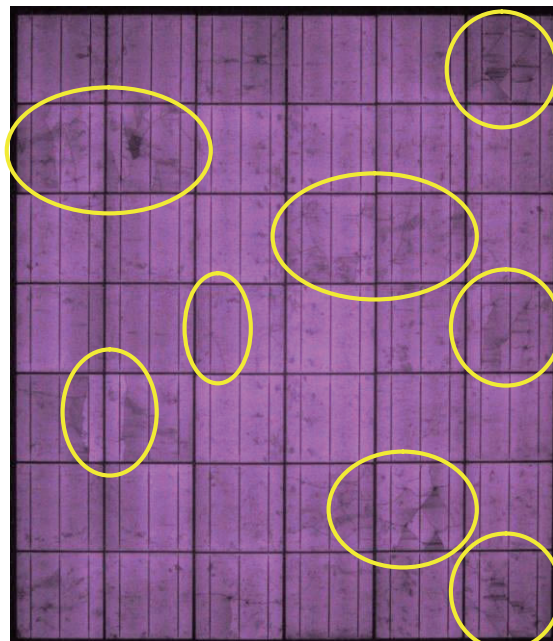
マイクロクラック無し試験前



マイクロクラック無し試験後



マイクロクラック有り試験前



マイクロクラック有り試験後

図 II-15-2-2. 機械的荷重試験前後の EL 画像

図 II-15-2-2 に機械的荷重試験前後の EL 画像を示す。マイクロクラック無しのモジュールも機械的荷重試験後に一箇所マイクロクラックの発生が観察された。マイクロクラック有りモジュールについては、楕円で囲んだ箇所に示すように、マイクロクラックのほとんどが成長し、暗部も増加している。それにもかかわらず、出力低下率が 1%以下であったこ

とについては、マイクロクラック自体の出力への影響はそれほどでもなく、マイクロクラックや機械的荷重によってフィンガーが破断し、セルとの密着が弱くなると出力への影響が出てくると考えられる。本試験ではマイクロクラックの成長は顕著に見られたが、EL暗部は全体の割合から見るとそこまで影響は大きくない。

本試験では+2400 Pa を 1 h 保持、その後-2400 Pa を 1 h 保持し、これを 3 サイクル繰り返し返しているが、これよりも小さい荷重であっても、サイクル数が多い方がフィンガーへかかるストレスは大きいかもしれない。今後は Dynamic Mechanical Load 試験 (+1000 Pa → -1000 Pa を 3 サイクル/min で 1000 サイクル) 等を検討する。

(長州産業株式会社：上野 清志)

### III. まとめ

結晶シリコン太陽電池モジュールにおいては、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。薄膜シリコン太陽電池モジュールにおいても同様の指針が得られるかについては、封止材による差異の検討も含め、試験を進めているところである。水分に脆弱と考えられる薄膜シリコン太陽電池モジュールに関しては、水蒸気バリア性が高いポッティング材の優位性が見えつつある。結晶シリコン系モジュールにおいては、配線強度の適正な管理が重要なことも示された。さらに、マイクロクラックが加速試験により伸長することも明らかになり、セルならびにストリングス作製時の EL 等での品質管理の重要性が改めて示唆された。第 II 期コンソーシアム後半は、これらのテーマに関して、試験・分析を継続するとともに、ホットスポット起因による劣化についてもテストモジュールを試作して検証を進め、モジュールの劣化要因ならびに部材に要求される特性を明確にしていく。

(独立行政法人産業技術総合研究所：増田 淳)



## 「コアテーマ 3 新規信頼性試験法の開発」

### I. はじめに

太陽電池モジュールの寿命については、「NEDO 太陽光発電ロードマップ (PV2030+) (2009年6月)」において、目標(技術開発の完了)として「2017年に寿命25年、2025年に30年(40年の技術)」が掲げられている。一方、太陽電池モジュールの性能保証として、近年、多くのメーカーは20年~25年の保証を謳っている。このような長寿命が要求される製品を短時間で加速評価する手法はまだ確立されていないが、2012年7月より施行された再生可能エネルギーの固定価格買取制度もあり、30年を超えるような高信頼性太陽電池の評価方法が期待されている。

期待寿命が30年を超えるような高信頼太陽電池モジュールを評価するための加速試験においては、劣化のモード(メカニズム)が変わっては意味がないため、ストレスを大きくするにも限界がある。その結果、30年相当の寿命試験を行うには、複合加速試験を行っても数ヶ月(例えば、30年の寿命評価を200倍の加速試験で行っても55日)を要する。

太陽電池モジュールの劣化症状あるいは不具合症状には、こげ(封止材、裏面材、セル)、変色(セル、封止材、裏面材)、割れ(セル、裏面材、ガラス)、発熱(セル、端子箱)、電気的特性劣化(直列抵抗増加、シャント抵抗低下、出力低下)などがあり、これらを引き起こす因子としては、温度、湿度、光(UV)、電流、電圧、機械的な力(風圧)などが想定される。この症状と因子の関係、すなわち、劣化メカニズムの解明ができれば、そのメカニズムを再現し、短時間で結果の出る加速試験の開発に着手できる。

すなわち、劣化症状から劣化メカニズムを推定し、劣化因子を特定し、再度、因子を組み合わせた試験方法の構築、試験後の劣化症状にて再現性を確認し、試験方法の完成というのが、一つの進め方であろう[アプローチ1]。もう一つは、想定される劣化因子単体あるいは劣化因子を組み合わせた試験を行い、その結果、発生する劣化症状がどのように進行し、どのような劣化症状に分類されるかを把握するとともに、フィールドで発生している劣化症状と比較し、劣化メカニズムの特定という進め方もある[アプローチ2]。また、ある劣化症状を発生させるための劣化のパス(経路)は一つとは限らない。従って、アプローチ2をアプローチ1と並行して進めておくことは、複数パスの推定に役立つこともある。これらの関係を整理したものを図I-1および図I-2に記す。

本コアテーマでは、「主要な劣化因子を複合化させた加速試験法や高加速試験による試験時間の短縮等、新規信頼性試験法の開発」、「新規信頼性試験装置の開発」を目的とし、最終的には、「開発成果の規格・標準への反映」を目標としている。また、そのために、コアテーマ1、2の成果も踏まえ、連携してテーマを推進することとしている。

コアテーマ3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機関から成り、各サブテーマの参加機関は以下のとおりである。

(1) 屋外曝露/加速試験関連、確認試験(担当:東京エレクトロン、デュポン、コアテ

ーマ1連携)

- (2) 太陽電池モジュール劣化における温湿度影響の検討 (担当: エスペック)
- (3) 加速条件: 光-温湿度複合 (担当: エスペック、(アルバック)、TG5 連携)
- (4) 電位差起因: PID 試験 (担当: 長州産業)

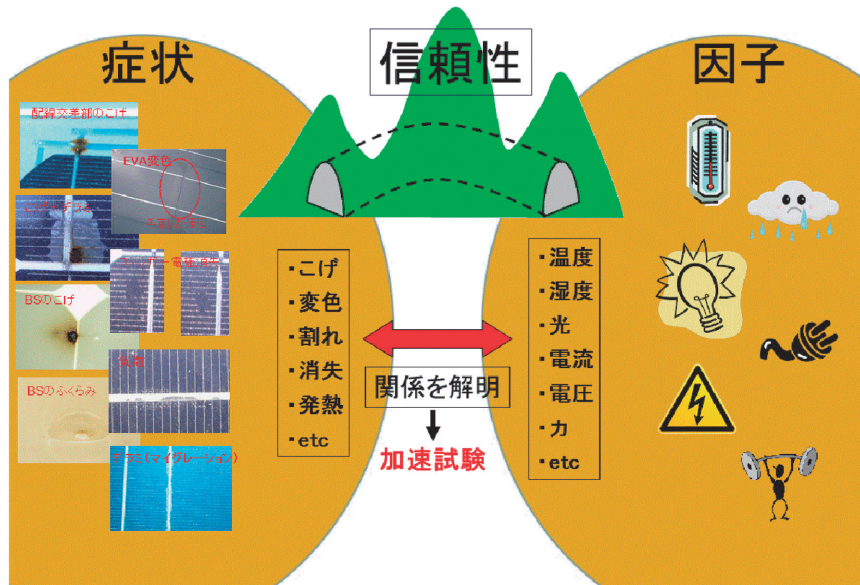


図 I-1. 因子、症状、加速試験の関係

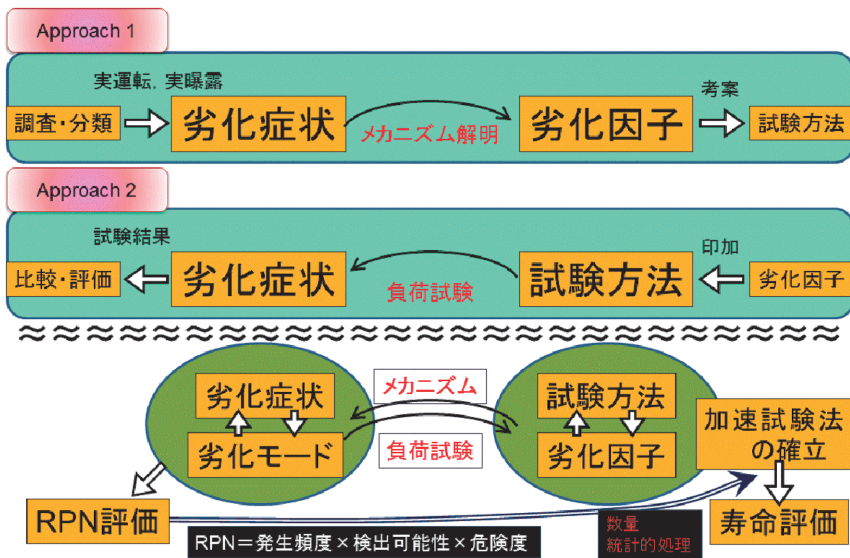


図 I-2. アプローチの方向と加速試験法確立へのチャート

表 I-1. コアテーマ 3 参加機関

一般会員	特別会員
株式会社アルバック エスペック株式会社 デュポン株式会社 東京エレクトロン株式会社 (順不同)	株式会社カネカ 太陽光発電技術研究組合 長州産業株式会社 一般社団法人日本電機工業会 三菱電機株式会社 YOCASOL 株式会社 (順不同)

(独立行政法人産業技術総合研究所：土井 卓也)

## II. 結果と考察

### II-1. 屋外曝露／加速試験関連、確認試験

太陽電池モジュールの寿命を的確に予測する信頼性試験の実現には、実環境（屋外曝露）で発生した劣化を適切に再現させることが必要である。現在のところ、太陽電池モジュールの評価法としては IEC61215 で規格化されている高温高湿試験（DH 試験）、温度サイクル試験（TC 試験）や結露凍結試験（HF 試験）などが広く用いられている。しかしながら、これら規格試験の実施により生じた太陽電池モジュールの劣化と屋外曝露による劣化の相関性については未知の部分が多いのが実情である。

そこで今回、長期屋外曝露を経た中古モジュールに対して既存の加速試験を施し、屋外曝露により発生した劣化が推測通りに加速されるか多角的に評価（目視評価、I-V 特性、EL 画像）を行い、既存試験法の妥当性を検証することとした。

本調査を行うにあたり着目した劣化モードおよび評価方法は以下の通りである。

#### (1) 剥離劣化モード

剥離劣化モードを有する屋外曝露モジュールに対して、DH 試験あるいは HF 試験が、この劣化モードを発現させるものと推測し、これら試験を行い、屋外曝露と同様の剥離現象が新たに発生するか目視確認する。

#### (2) 配線劣化モード

本コンソーシアム第 I 期活動の成果として、タブ配線部位の接続異常および異常個所の特定手法が報告されている<sup>1)</sup>。この報告に記載されている配線部位に接続不良を有するモジュールに対して TC 試験を行い、温度ストレスにより配線劣化が再現されるか EL 画像を用いて確認する。

#### II-1-1. 評価対象に用いた中古モジュール

本研究を行うにあたり、各再現試験において適切な対象モジュールの選定が必要となる。

つまり、既に剥離劣化および配線劣化を有するモジュール、もしくは潜在的にこれらの劣化を秘めているモジュールを評価対象とする必要がある。評価対象に用いたモジュールを表 II-1-1-1 に示す。

DH 試験による剥離再現検討には、既に剥離劣化を有する 2 型式のモジュールから各 1 台を選定した（コンソーシアム ID=CNS2010-244、257）。CNS2010-244 はバックシートにアルミ層を含み、257 はアルミ層を持たない構成である。同様に CNS2010-248、264 の 2 台を HF 試験用に選定した。一方、TC 試験による配線劣化の再現試験には、EL 画像から配線部の異常が認められた同一型式から 2 台 CNS2010-159 および 164 を評価対象に選定した。これらのモジュールは、NEDO ニューサンシャイン計画の中で用いられ、静岡県浜松市および兵庫県神戸市で約 10 年間屋外曝露されたモジュールであると考えられている。詳細な来歴については、コアテーマ 1 の II-2-3 項を参照のこと。

表 II-1-1-1. 評価対象の太陽電池モジュール

評価項目	コンソーシアムID	型式	曝露地	Siタイプ	サンプル概要	加速試験
剥離劣化	CNS2010-244	A	神戸市	単結晶	一部剥離 アルミBS	DH
	CNS2010-257	B	↑	↑	一部剥離	DH
	CNS2010-248	A	↑	↑	剥離無 アルミBS	HF
	CNS2010-264	B	↑	↑	一部剥離	HF
配線劣化	CNS2010-159	C	浜松市	多結晶	配線劣化	TC
	CNS2010-164	C	↑	↑	配線劣化	TC

## II-1-2. DH、HF 試験による剥離劣化の加速性検証実験

### II-1-2-1. 外観比較

前述した剥離劣化を有する中古モジュールに対して DH 試験（85 °C/85%、1000 時間）、HF 試験（10 サイクル）をそれぞれ実施し、既存剥離の変化および新たな剥離が生じるか目視評価を行った。試験前後におけるモジュール外観の変化を図 II-1-2-1～4 に示す。

予想に反して DH 試験、HF 試験後にはタブ線沿いに観られた剥離の縮小または消失が確認された（図 II-1-2-1, 2, 4）。これは DH、HF 試験中の熱により封止材とセル間の剥離の再溶着が起きたためと推測される<sup>2)</sup>。一方、セル外周部の剥離に関しては一部拡大している様に見受けられた。また、CNS2010-257 の DH 試験においては、試験前には確認されなかったセル上タブ線間に軽度の白濁が認められた。剥離なしモジュール CNS2010-248 に関しても、HF 試験後に新たな剥離の発生は観られなかった（図 II-1-2-3）。これらの事象から、単に剥離劣化と言っても発生部位や形態、形状により発生メカニズムが大きく異なることが分かる。また、試験後の特徴的な劣化としてモジュール全面に発生した黄変が挙げられる。黄変の発生程度は HF 試験よりも DH 試験の方が大きく、さらにバックシート中の Al

層の有無で比較すると Al 層を持たないバックシート、つまり CNS2010-257 における黄変が最も顕著であった。これらモジュール全面に発生した黄変は、試験前には観られなかった劣化モードである。したがって、DH、HF 試験により屋外曝露とは異なった劣化モードを誘発させていることが明らかとなった。

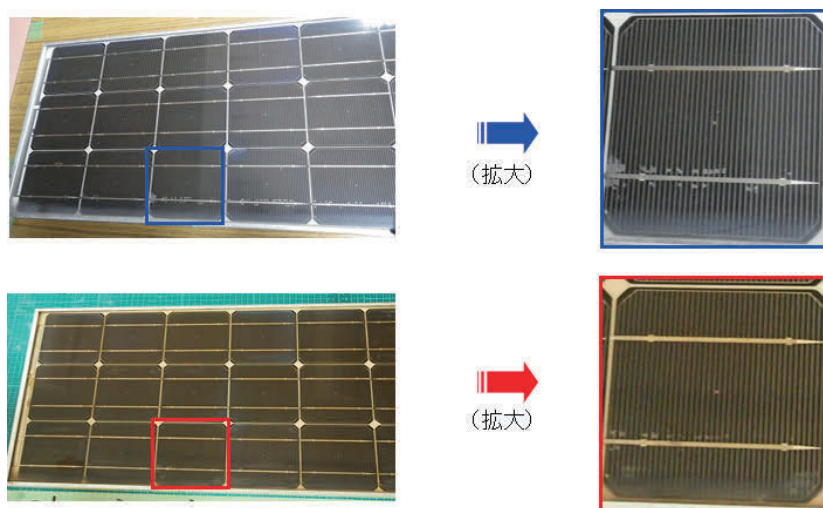


図 II-1-2-1. CNS2010-244 の DH 試験前後における外観変化  
(上：試験前、下：試験後)

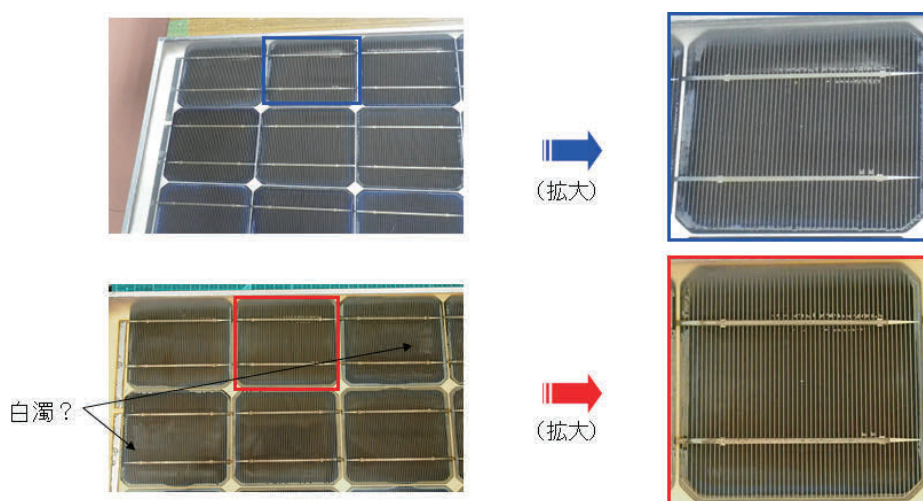


図 II-1-2-2. CNS2010-257 の DH 試験前後における外観変化  
(上：試験前、下：試験後)



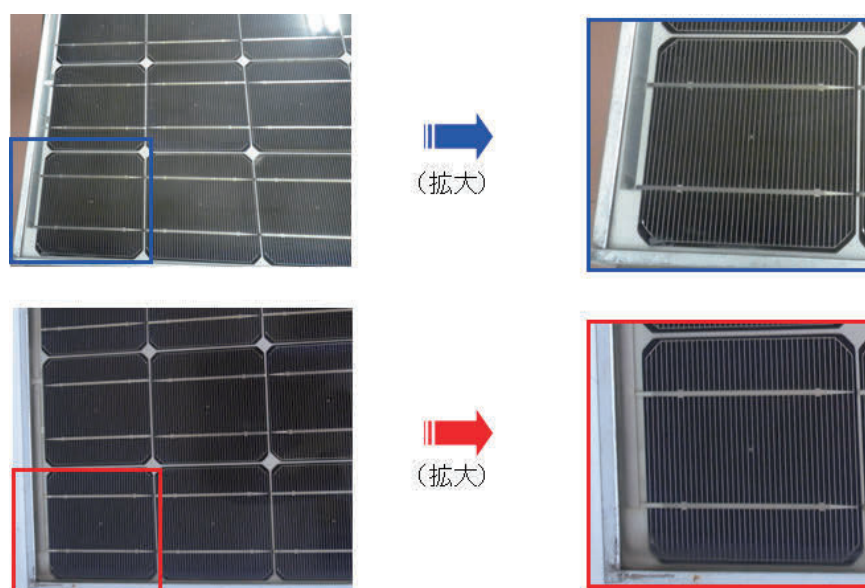


図 II-1-2-3. CNS2010-248 の HF 試験前後における外観変化  
 (上：試験前、下：試験後)

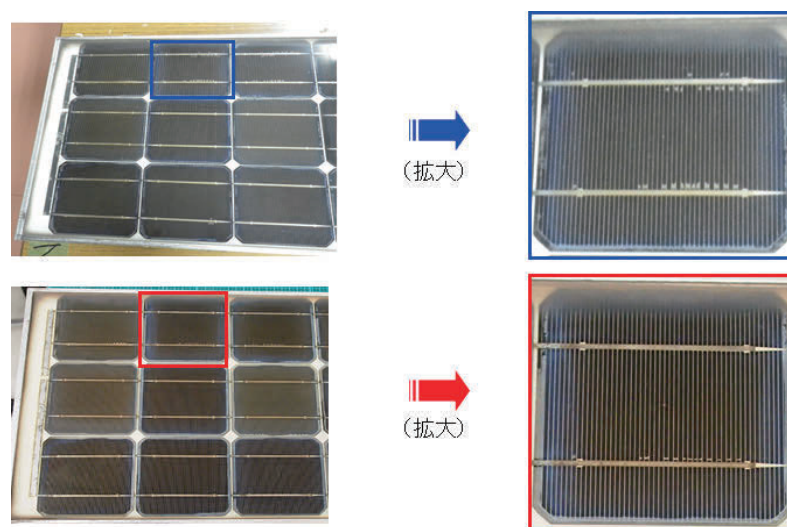


図 II-1-2-4. CNS2010-264 の HF 試験前後における外観変化  
 (上：試験前、下：試験後)

#### II-1-2-2. I-V、EL 測定結果と考察

続いて、DH、HF 試験前後の I-V 出力測定結果、I-V 曲線および EL 画像を表 II-1-2-1、図 II-1-2-5～7 に示す。なお、I-V 測定にはソーラーシミュレーター (PVS1222i-L、日清紡メカトロニクス社製) を用いて 5 回測定し、平均値を用いた。EL 測定は、各モジュールの定格値に記載された最適動作電流値 ( $I_{pm}$ ) 相当の電流を順方向に印加し、EL カメラシステム (PVX100、アイテス社製) を用いて測定した。

表 II-1-2-1. 試験前後における I-V 測定結果

CNS2010-244 (Al層有りバックシート)

	Pmax (W)	Ipm (A)	Vpm (V)	Isc (A)	Voc (V)
定格値	42.0	2.90	14.5	3.26	18.0
DH試験前	38.4	2.79	13.8	3.05	17.9
DH試験後	32.0	2.52	12.7	3.05	17.8

CNS2010-248 (Al層有りバックシート)

	Pmax (W)	Ipm (A)	Vpm (V)	Isc (A)	Voc (V)
定格値	42.0	2.90	14.5	3.26	18.0
HF試験前	39.4	2.85	13.8	3.12	17.8
HF試験後	39.0	2.84	13.7	3.13	17.8

CNS2010-257

	Pmax (W)	Ipm (A)	Vpm (V)	Isc (A)	Voc (V)
定格値	47.2	2.97	15.9	N/A	N/A
DH試験前	38.4	2.69	14.4	3.15	19.6
DH試験後	20.6	1.79	11.5	2.75	19.4

CNS2010-264

	Pmax (W)	Ipm (A)	Vpm (V)	Isc (A)	Voc (V)
定格値	47.2	2.97	15.9	N/A	N/A
HF試験前	41.0	2.80	14.7	3.10	19.6
HF試験後	36.9	2.66	13.9	3.05	19.5

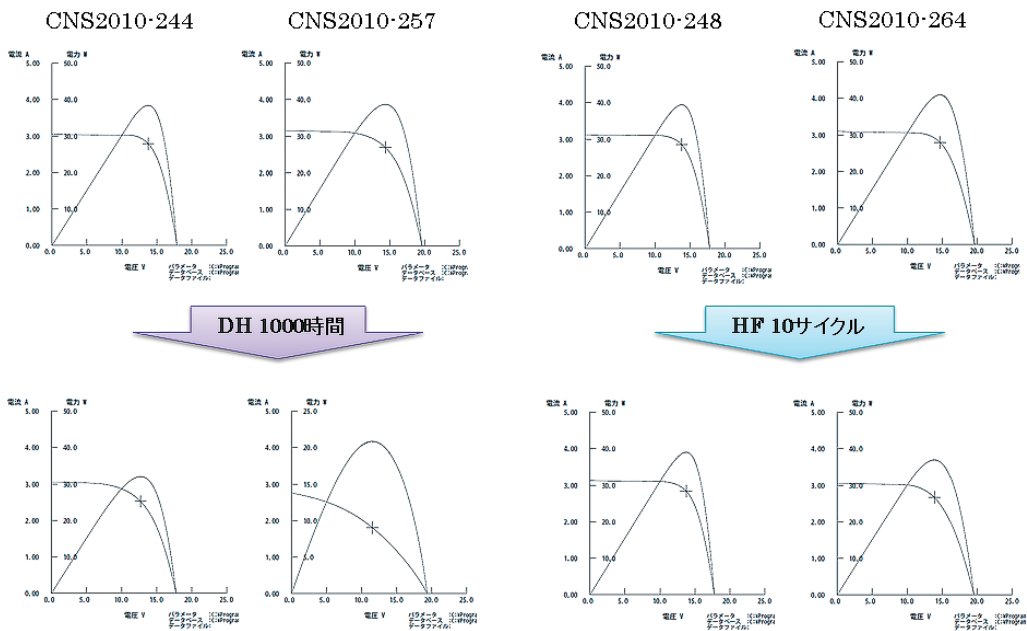


図 II-1-2-5. 試験前後における I-V 曲線の変化

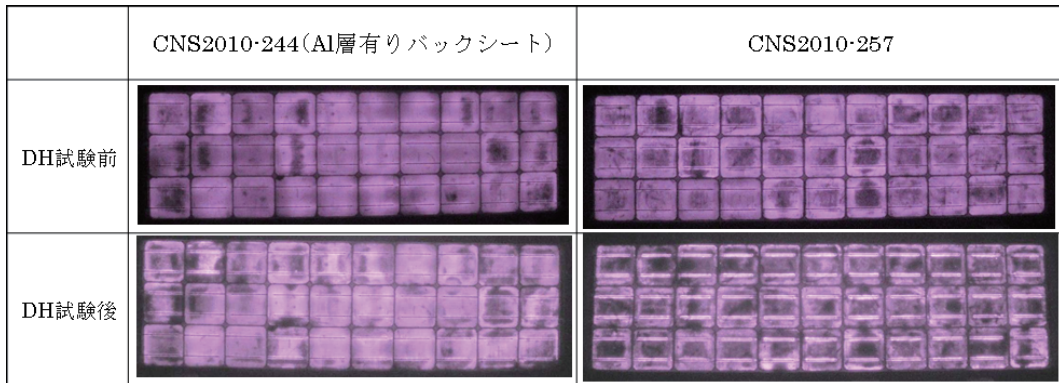


図 II-1-2-6. DH 試験前後における EL 画像の変化

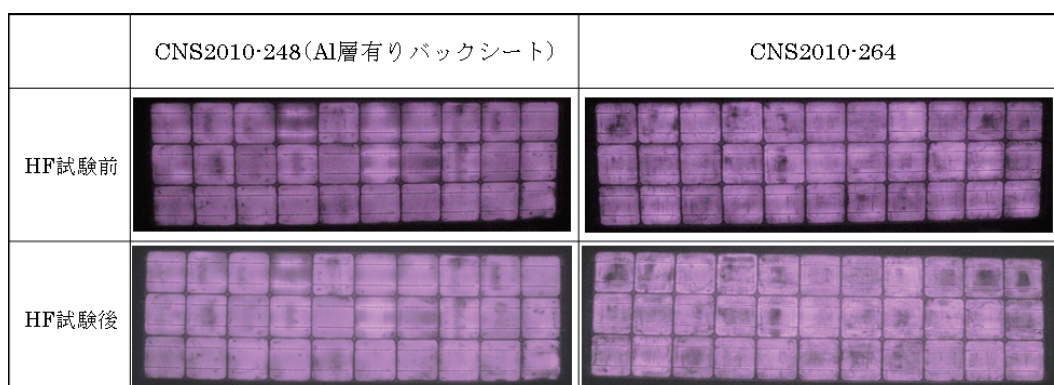


図 II-1-2-7. HF 試験前後における EL 画像の変化

HF 試験では、I-V 測定値、EL 画像ともに試験前後で大きな変化は観られなかった（表 II-1-2-1、図 II-1-2-5、図 II-1-2-7）。一方、DH 試験では最大出力（Pmax）に大幅な低下が認められた。EL 画像からも DH 試験によりセルの暗部が増加し、劣化が進行している様子が見て取れる（図 II-1-2-6）。特にバックシートに Al 層を持たない CNS2010-257 の変化は顕著で、タブ線周辺に電荷が集中していることが確認できる。また、I-V 曲線にて大幅な FF の低下（Rs 増加および Rsh 低下）や Isc も低下していることから複数の劣化要因が考えられる。

今回、剥離劣化の再現に着目して既存規格である DH、HF 試験の試験法および条件の妥当性について検証を行った。前述した通り、DH、HF 試験による剥離劣化の再現は観られず、むしろ、剥離の縮小や消失、セル上のタブ線間の白濁や黄変といった実環境とは異なる劣化モードの促進を示す結果が得られた。EL 画像からも劣化が最も顕著であった CNS2010-257 では配線部に電荷が集中しており、試験前後の画像を見比べると同一の劣化を示していないことが伺える。以上、外観目視評価、非破壊分析結果から現行 DH、HF 試験の屋外曝露との相関性は乏しいといえる。

### II-1-3. TC 試験による配線劣化の加速性検証実験

配線部の接続異常を有する中古モジュールに対して TC 試験（200 サイクル）を実施し、配線劣化が促進されるか否か EL 画像から判定した。EL 画像による配線劣化の検出は接続部位の微妙な接触に左右される。このため、本検討は試験数 N=2（同型式モジュール）にて評価を行った。試験前後における I-V 出力測定結果、I-V 曲線および EL 画像を表 II-1-3-1、図 II-1-3-1、II-1-3-2 に示す。

表 II-1-3-1. TC 試験前後における I-V 測定結果

CNS2010-159						CNS2010-164					
	Pmax (W)	Ipm (A)	Vpm (V)	Isc (A)	Voc (V)		Pmax (W)	Ipm (A)	Vpm (V)	Isc (A)	Voc (V)
定格値	51.0	3.02	16.9	N/A	N/A	定格値	51.0	3.02	16.9	N/A	N/A
TC試験前	45.6	2.91	15.7	3.18	21.3	TC試験前	46.2	2.91	15.9	3.19	21.3
TC試験後	46.7	2.92	16.0	3.18	21.3	TC試験後	45.7	2.90	15.7	3.18	21.2

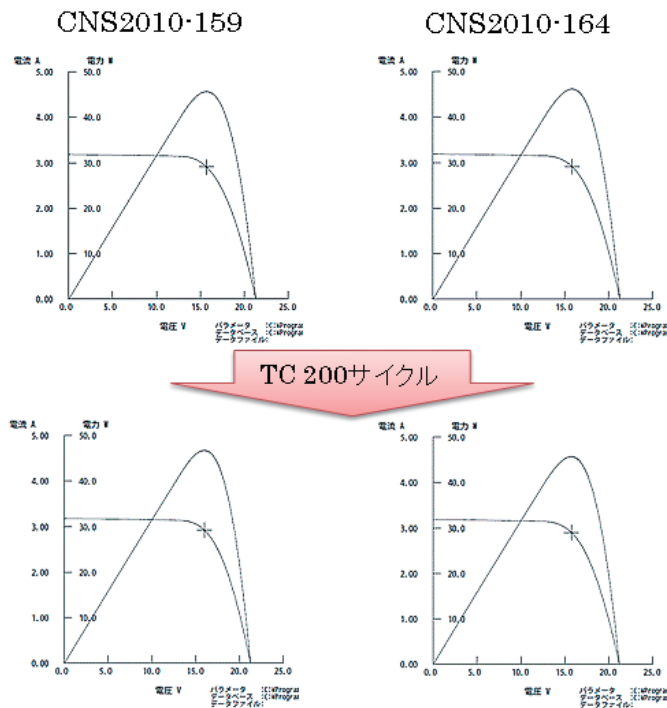


図 II-1-3-1. TC 試験前後における I-V 曲線の変化

	CNS2010-159	CNS2010-164
TC試験前		
TC試験後		

図 II-1-3-2. TC 試験前後における EL 画像の変化

TC 試験では、試験前後で顕著な外観変化は観られなかったため写真掲載は省略した。また、I-V パラメータおよび I-V 曲線も試験前後でほとんど変化しなかった（表 II-1-3-1、図 II-1-3-1、図 II-1-3-2）。EL 画像では、タブ線の接続不良に起因する明暗セルの増加は確認されず、一部のセルに関しては明暗差が解消されるといった予想と反する結果が得られた。これは、セル裏面接続部の微妙な接触が EL 画像の明暗差に影響したためと考えられる。

（デュポン株式会社：小野里 淳、東京エレクトロン株式会社：田中 秀樹、  
デュポン株式会社：辺田 祐志）

## II-2. 太陽電池モジュール劣化における温湿度影響の検討

### II-2-1. 背景と目的

太陽電池モジュール（以下、PV モジュールと略称する）の長期信頼性確保は、発電コストの低下による安心、安全な発電手段の普及拡大や低炭素社会実現だけでなく、電力の固定価格買取制度の導入などで注目される太陽光発電システムの投資効果増大などにも寄与する。この PV モジュールの長期信頼性を確保するためには、PV モジュールの劣化実態調査を通しての劣化状態や劣化メカニズムの解明だけでなく、劣化状態を的確に短期で再現することが可能な PV モジュール信頼性試験方法の開発が必要であることは言を待たない。また、現在の PV モジュール型式認証に使用されている試験方法は、5～10 年ほどの初期故障の防止、排除には有用であることは認識されているが<sup>3)</sup>、30 年を超えるような長期の信頼性を確保する手段とはなっていない<sup>4)6)</sup>。

本検討では、上記の背景を基盤として、屋外曝露で受ける環境ストレスのうち温度、湿度に注目し、その PV モジュールの発電特性低下への影響を中心に検討した。特に、温度、湿度ストレスを増大することで、PV モジュールの劣化が加速できることを明確に示し、その実際的適用条件（温度、湿度条件）を合わせて明確化することを目的とした。また、温度、湿度ストレスを劣化要因例として、PV モジュールの劣化を発電特性パラメータから再構築できる可能性を示すことで、他の環境要因による劣化も相加的、相乗的に付加できる試験方法のコンセプトを確認することも目的とした。これらの目的については、前述のような成果を得ることができ、目的のほとんどを達成したものと考えられる。

### II-2-2. 実験方法

#### ① 試験用 PV ミニモジュール

本項の実験で使用した PV ミニモジュール（1 セルモジュール：18 cm×18 cm）は、すべて本コンソーシアムで標準的に用いられている部材を用いて作製した（詳細は表 II-2-2-1 参照）<sup>7)</sup>。セルへのコレクションリボン（タブ線）の接合は、セル自動配線装置（エヌ・ピー・シー社製 NTS-150-S-H-3K）にて行い、各種部材と積層したのち真空ラミネータ装置（エヌ・ピー・シー社製 LM50X50S）にてラミネート試料とした。なお、使用した PV ミニモジュールについては、モジュール周囲へのフレーム設置を行っていない（フレームレスと称する）。

本コンソーシアムで標準的に用いられているモジュール構成（Intact Module）については、表 II-2-2-1 に示すコンソーシアム標準部材を用いた構成にて作製し、モジュール構成を変更したモジュール 3 種（アルミバックシート使用構成 [AL-BS]、バックシートレス構成 [BS Less]、バックシート/封止材レス構成 [BS-EVA Less]）については、それぞれの構成部材を変更してモジュール作製を行った（表 II-2-2-2 を参照のこと）。なお、バックシートレス構成 [BS Less] については、封止材（EVA）と接着性のないテフロンシートをバックシート<sup>8)</sup>の代替部材としてラミネートした後、テフロンシートを剥離することで封止材（EVA）

を露出させる作製方法により試料調製を行った。各構成の模式図と外観を、図 II-2-2-1 および図 II-2-2-2 に示す。

各ミニモジュールに接合したタブ線（プラス側、マイナス側各 3 本）は、それぞれの電極側で大型タブ線（6 mm 幅）に接合することで、両電極側のタブ線を結線した。

表 II-2-2-1. 本実験で使用したモジュール構成部材の仕様概要

部材	仕様	部材	仕様
PVセル	多結晶シリコンセル (156 x 156 mm)  3本バスバー方式 t = 180 μm Eff. = 16.6 %	バックシート	3層構造シート (T / P / T) t = 326 μm
			3層構造シート (P / A / P) アルミ層あり
ガラス	白板半強化ガラス 180 x 180 mm t = 3.2 mm	配線材料	銅芯 Sn-Pbめっき 1.5 mm幅
封止材	EVA Fast Cure Type t = 450 μm		銅芯 Sn-Pbめっき（銀） 6.0 mm幅

表 II-2-2-2. 本実験で使用したモジュール構成

モジュール構成	ガラス	受光面封止材	PVセル	裏面封止材	バックシート
標準構成 (Intact Module)	○	○	○	○	T / P / T
アルミバックシート構成 (AL-BS)	○	○	○	○	P / A / P
バックシートレス構成 (BS Less)	○	○	○	○	
バックシート/封止材レス構成 (BS-EVA Less)	○	○	○		

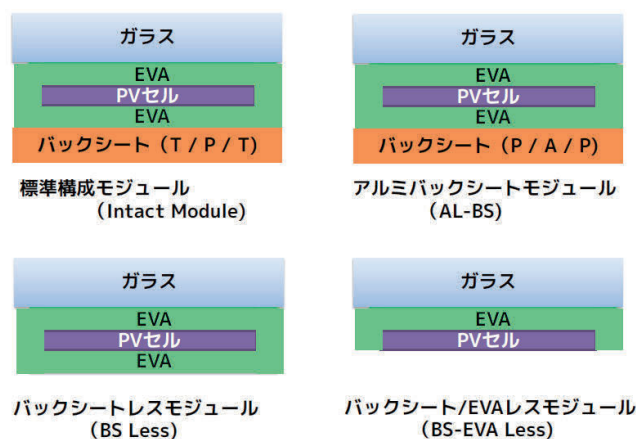


図 II-2-2-1. 本実験で使用したモジュール構成（模式図）

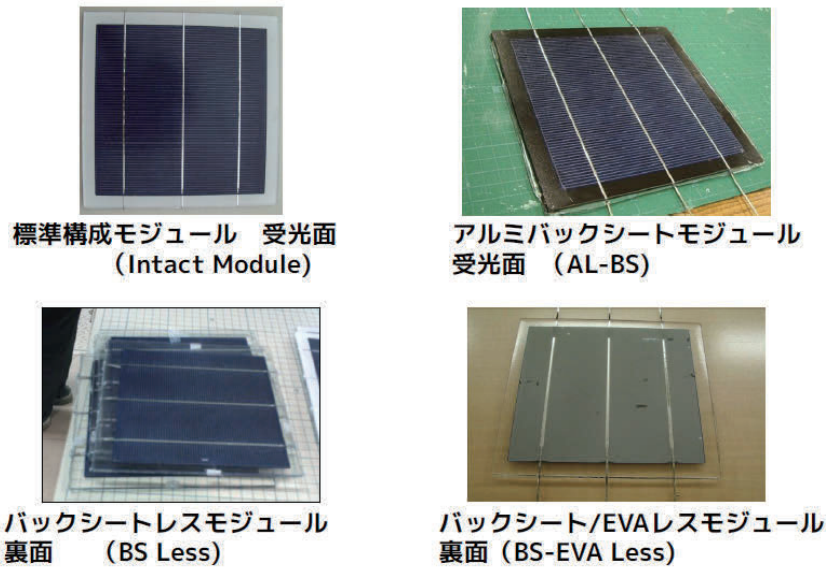


図 II-2-2-2. 本実験で使用したモジュール (外観)

表 II-2-2-3. 本実験で使用した高温高湿試験条件

試験条件	試験温度 (°C)	試験湿度 (% RH)	試験装置
高温高湿試験 (65/85)	65	85	エスペック製 環境試験器 PL-2KP
高温高湿試験 (85/85)	85	85	エスペック製 環境試験器 PL-2KP
高温高湿試験 (95/95)	95	95	エスペック製 環境試験器 PL-2KP
高温高湿試験 (105/100)	105	100 (不飽和)	エスペック製 不飽和型 HAST装置 EHS-221
高温高湿試験 (120/100)	120	100 (不飽和)	エスペック製 不飽和型 HAST装置 EHS-221

## ② 高温高湿 (温湿度変更) 試験

各温湿度の高温高湿試験は、高温高湿試験装置 (エスペック製 : PL-2KP) を用いて実施した。なお、105 °C/100%RH 試験および 120 °C/100%RH 試験については、不飽和型 HAST 装置 (エスペック製 : EHS-221) を用いて実施した。なお、各試験における試料数は 3 モジュール以上となることを企図したが、試験装置容量から一部の試験では試料数が 2 モジュールあるいは 1 モジュールとなった (試験条件の詳細は、表 II-2-2-3 を参照のこと)。

試験前および各試験における所定の試験時間経過後、試料は発電特性測定 (I-V 特性測定)、外観検査および EL 測定を行うことにより、各試料の特性劣化などを確認した。

なお、すべての高温高湿試験は PV セルの両電極を結線せずに、開放状態で実施した。

## II-2-3. 結果

### ① 標準構成モジュールにおける発電特性変化

各温湿度条件に長時間曝露した際の標準構成モジュールの発電特性変化を、図 II-2-3-1 に示す。I-V 特性測定より得られた最大電力 (Pmax) は、各試験条件とも試験時間の経過とともに減少した (図 II-2-3-1(a))。

IEC 61215 規定される結晶シリコン PV モジュール認証に関する高温高湿試験条件 (85 °C/85%RH、1000 時間) においては、約 2%の低下を示した。これは、モジュール周囲をフレームおよびエッジシール材で封止していない (本実験における) 試料においても上記規格の合格条件 (5%低下以下) を満たしており、結晶シリコン PV モジュールにおいてはモジュールエッジ部から浸透する水分は、Pmax 低下には大きく影響しない可能性が示唆された。

95 °C/95%RH 試験条件において、1000 時間で約 7%程度の低下を示すこと、および 105 °C/100%RH 試験条件では 500 時間以降で 10%以上の Pmax 低下を示すことから、温湿度ストレスの増大にともなって劣化が増大することが確認された。ただし、65 °C/85%RH 試験条件における Pmax 低下は、データのバラつきが大きいため低い温度ストレス条件において劣化の程度が軽減されるか否かについては明確に確認できていない。

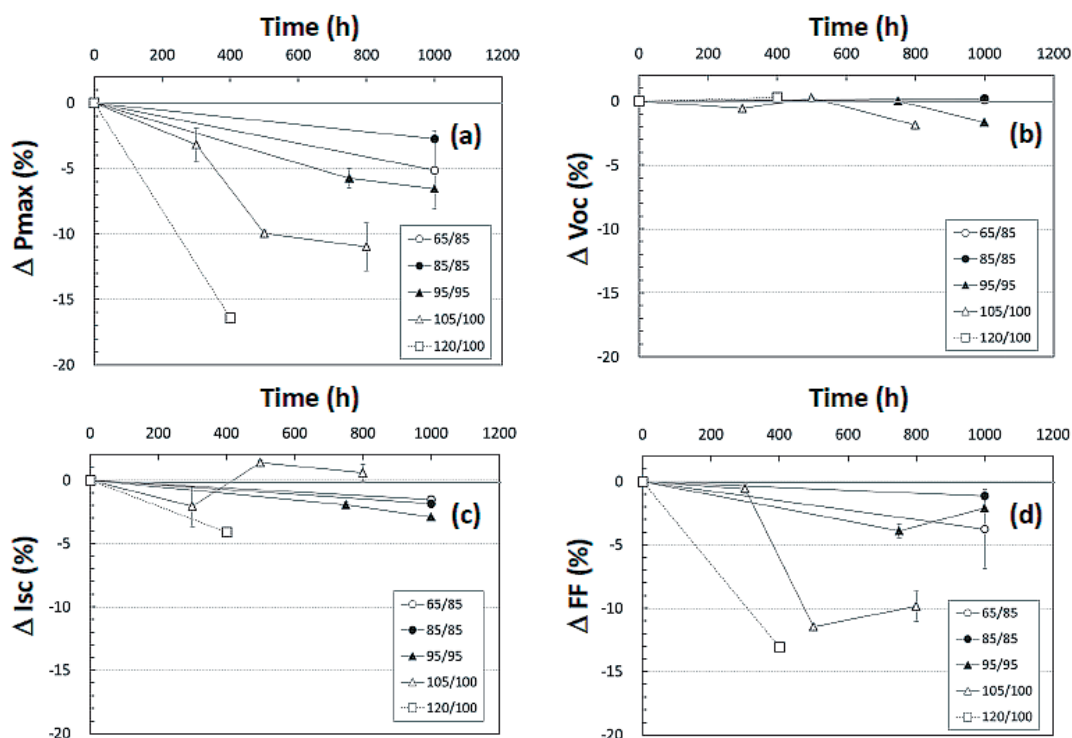


図 II-2-3-1. 高温高湿試験による発電特性パラメータ変化 (Intact Module)



なお、125 °C/100%RH 試験条件においては、400 時間曝露で 15%を超える Pmax 低下を確認したが、200 時間曝露における外観検査においてバックシートの崩落（バックシートの細片化をともなう剥離）が生じていることも観察されている（このために、他の試験条件との劣化メカニズムが異なる可能性があるが、125 °C/100%RH 試験条件は 1 試料においてのみ行った試験結果を示している）。

図 II-2-3-1(b)および図 II-2-3-1(c)に示すように、開放電圧 (Voc) および短絡電流 (Isc) については、試験時間の経過とともに低下する傾向も一部では観察されたが、Voc においては 2%以内、Isc においては 4%以内に収まっていることに加え、Pmax 低下と異なり試験時間との明確な関係は観測できなかった。一方、フィルファクタ (FF) 低下は Pmax 低下に似た傾向を示し、上記の Pmax 低下と温湿度ストレス強度との関係に似た傾向が観測された (図 II-2-3-1(d))。

ソーラーシミュレーターにおける I-V 特性測定においては、直列抵抗 (Rs)、並列抵抗 (Rsh) は I-V 特性曲線の Voc 付近および Isc 付近の傾きから計算されるが、電圧、電流のそれぞれゼロでの極限值を確定することは困難な面がある。そこで、Rs および Rsh に相当する発電特性パラメータとして、直列抵抗成分については Rs-like Parameter (Rs-LP) を、並列抵抗成分については、Rsh-like Parameter (Rsh-LP) を導入することとした。なお、Rs-LP および Rsh-LP は、それぞれ最大電圧 (Vpm) を開放電圧 (Voc) で除した数値 (Rs-LP = Vpm/Voc) と、最大電流 (Ipm) を短絡電流 (Isc) で除した数値 (Rsh-LP = Ipm/Isc) と定義した。これらパラメータについての各試験条件および試験時間経過にともなう変化を図 II-2-3-2(a)および図 II-2-3-2(b)に示すが、Rs-LP および Rsh-LP とも、試験時間経過や温湿度ストレスの増大にともない低下する傾向を示した。

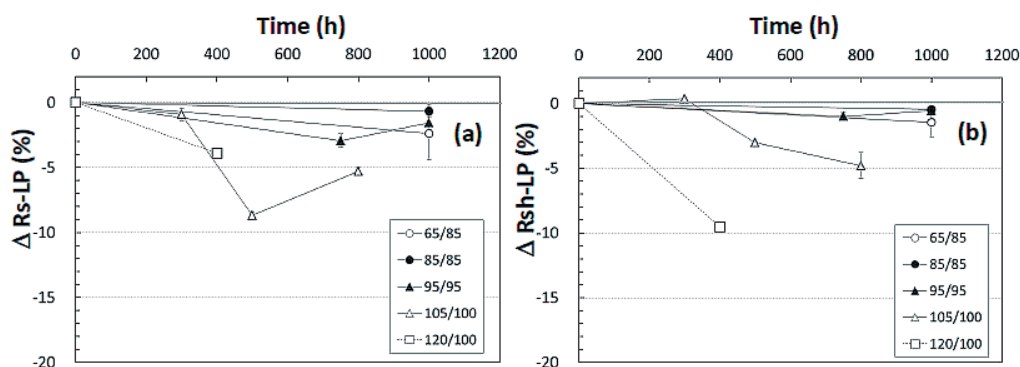


図 II-2-3-2. 高温高湿試験による発電特性パラメータ変化 (Intact Module)

## ② 標準構成モジュールにおける発電特性の相関解析

前述したように、高温高湿試験における Pmax は温湿度ストレスおよび試験時間の増大にともない低下する傾向にあるが、この Pmax 低下に寄与する主要発電特性パラメータを同定する目的で、各試験条件、試験時間を総合して、Pmax 低下と各発電特性パラメータの相関解析を行った。

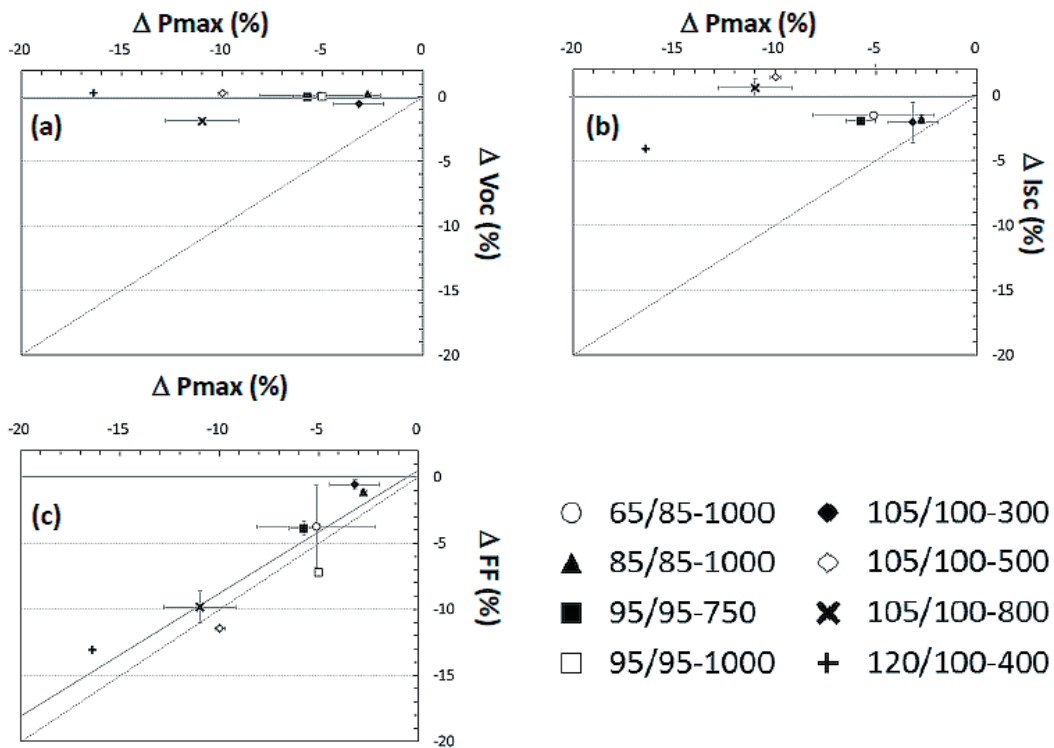


図 II-2-3-3. 高温高湿試験による発電特性：相関解析（Intact Module）

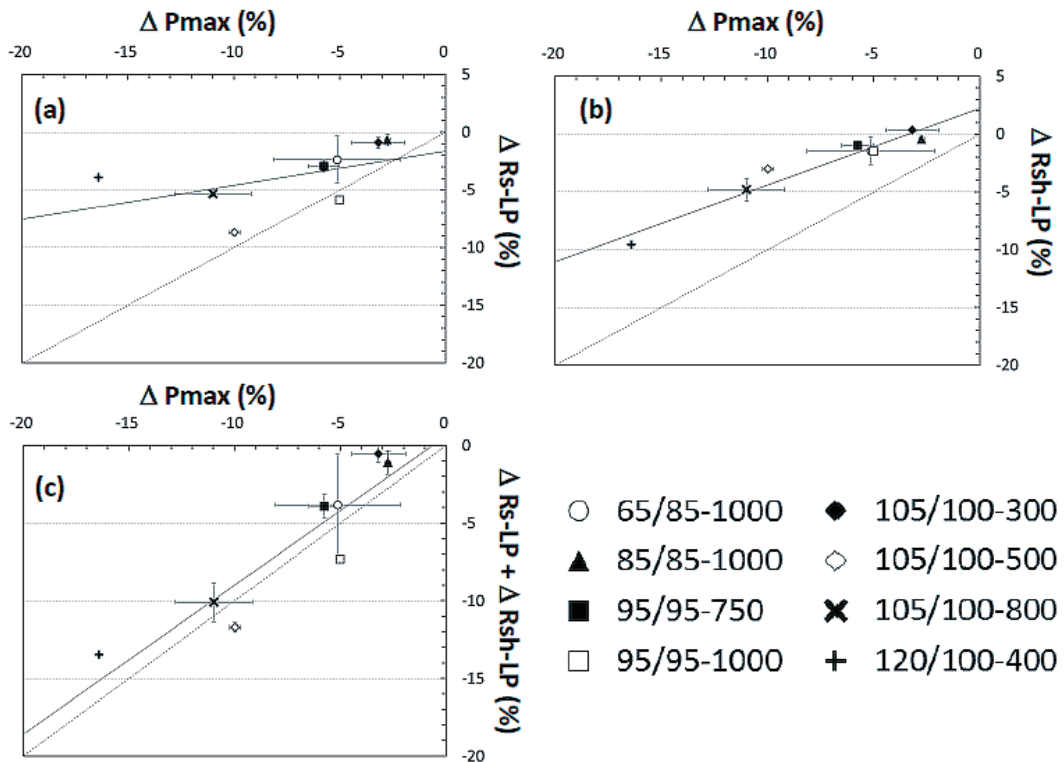


図 II-2-3-4. 高温高湿試験による発電特性：相関解析（Intact Module）

発電特性パラメータのうち Voc および Isc については、Pmax 低下と全く相関を示さず、Pmax が 10%超の大きな低下を示した場合においても、ほとんど 2%程度以下の低下に収まっていた (図 II-2-3-3(a)および図 II-2-3-3(b))。一方、FF 低下は、図 II-2-3-3(c)に示すように、Pmax 低下と明確な相関関係 (相関係数=0.9173) が示された。これらから、温湿度ストレスの変化とともに (Voc と Isc が相関して変動するのではなく)、FF が相関して変動することが強く示唆された。

Voc、Isc の変化によらない FF の変化は、Rs、Rsh の両者あるいは単独パラメータの変化によるものと考えられるため、Rs、Rsh の代替パラメータとして Rs-LP および Rsh-LP を用いて Pmax 低下との相関解析を行い、Pmax 変動に相関する FF 変動の要因の明確化を図った (図 II-2-3-4(a)および図 II-2-3-4(b))。図 II-2-3-4(a)に示すように、Rs-LP の低下は、Pmax 低下と弱いながらも相関を示し (相関係数=0.5117)、回帰直線の傾きは 0.296 であった。完全に Pmax 低下と Rs-LP 低下が相関し、その低下度合いが同等である場合の回帰直線の傾き (=1.0 : 図 II-2-3-4 においては点線で示す) の 1/3 程度であった。一方、Rsh-LP の低下は Pmax 低下と強く相関しており (相関係数=0.9708)、また回帰直線の傾きは 0.663 であり、Pmax 低下に大きく寄与している可能性が示された。なお、両抵抗パラメータ (Rs-LP、Rsh-LP) を足し合わせることで FF 低下と Pmax 低下の強い相関関係を再構成できるか否かを確認するため、両抵抗パラメータの低下率を足し合わせた抵抗成分パラメータ (R-LP) についての相関解析を行った (図 II-2-3-4(c))。その結果、R-LP 低下は Pmax 低下と強い相関を示し (相関係数=0.9199)、回帰直線の傾きも 0.959 と完全相関に近い値となった。これは、FF 低下と Pmax 低下の相関関係 (相関係数=0.9173、傾き=0.930) と類似しており、両抵抗パラメータの低下率を足し合わせた抵抗成分パラメータ (R-LP) により FF 低下と Pmax 低下の相関は説明可能と考えられる。また、Pmax 低下と相関する FF 低下については、約 2/3 が並列抵抗の低下が寄与し、残る 1/3 が直列抵抗の増大による可能性が示された。

### ③ 標準構成モジュールにおける外観変化および EL 像変化

上記の高温高湿試験において、65 °C/85%RH 試験条件から 105 °C/100%RH 試験条件においては、バックシートに多少の着色 (黄化) が観察されたが、特筆に値するモジュール外観変化は観察されなかった。ただし、120 °C/100%RH 試験条件では、前述したようにバックシートの崩落が 200 時間曝露で生じていた (図 II-2-3-5)。同条件での 400 時間曝露では、Pmax 低下が約 16%であり、他の試験条件に比して大きな低下が観察されることから、他の試験条件では生じないメカニズムによる劣化が生じている可能性も考えられる。しかし、発電特性の相関解析においては、他の試験条件同様、Pmax 低下と FF 低下が強く相関する回帰直線から大きく外れておらず、バックシート崩落などをともなう劣化メカニズムは発電特性の低下には強く作用しない可能性も示唆している。

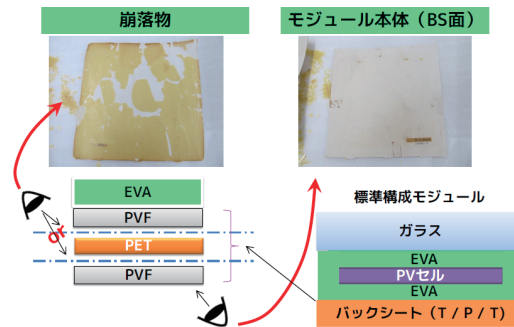


図 II-2-3-5. 120 °C/100%RH 条件 (200 h) におけるモジュール外観

それぞれの高温高湿試験条件での曝露前後の EL 像を図 II-2-3-6 に示す。120 °C/100%RH 試験条件での 400 時間曝露を除いて、曝露前後の EL 像には大きな変化は観察されていない。120 °C/100%RH (400 時間曝露) においては、モジュール周辺部に暗輝度部分が生じており、これまで報告されている長期間の高温高湿試験 (85 °C/85%RH : 3000 時間以上) で観察されるモジュール周辺部からの EL 暗輝度部増大との類似性が見られるが、バックシート崩落などによる影響を排除できず、長期間の高温高湿試験結果との明確な相関に言及することは困難である。

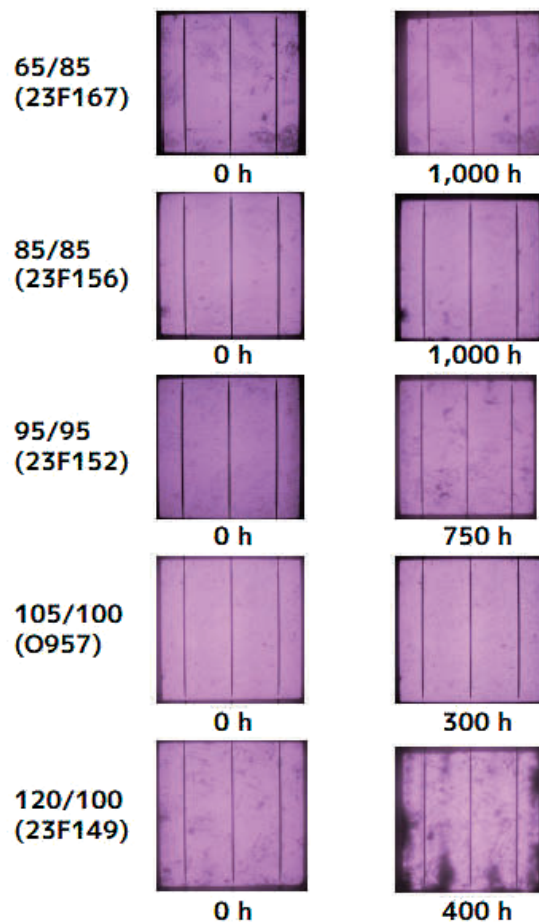


図 II-2-3-6. 各試験条件における EL 像 (Intact Module)

④ 構成変更モジュールにおける発電特性変化

モジュール構成を変更することにより PV セル近傍への水分浸透を変化させ、この水分浸透の発電特性に及ぼす影響を検討した。Intact Module においては、受光面はガラスにより水分浸透が防御されているが、裏面はポリマー材料（バックシート、封止材）により覆われているのみであり、これらポリマー材料の水分透過性が発電特性の低下に影響している可能性が考えられる。この可能性を明確化するため、裏面からバックシートを除いたバックシートレスモジュール (BS Less)、およびバックシートと裏面封止材 (EVA) を除いたバックシート/EVA レスモジュール (BS-EVA Less) を作製し、高温高湿環境 (85 °C/85%RH) に 1000 時間曝露した後の発電特性を評価した (図 II-2-3-7)。合わせて、Intact Module に使用した T/P/T (Tedler / PET / Tedler) 3 層構造バックシートに比べて水分透過性が極めて低いことが知られているアルミバックシート (PET / Aluminum / PET) を用いて、高い水分バリア性の影響も検討した (AL-BS)。

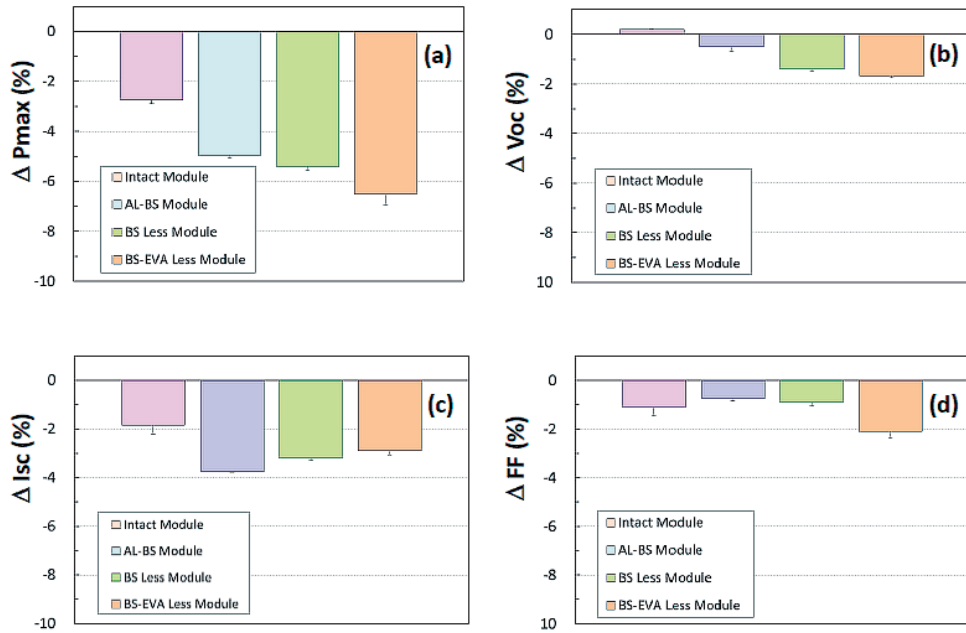


図 II-2-3-7. 1000 時間の高温高湿試験による発電特性パラメータ変化 (構成変更モジュール)

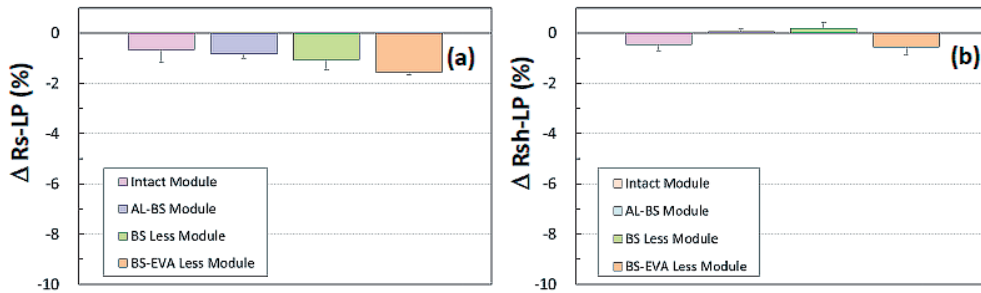


図 II-2-3-8. 1000 時間の高温高湿試験による発電特性パラメータ変化 (構成変更モジュール)

高温高湿環境（85 °C/85%RH）での 1000 時間曝露においては、これらの構成変更モジュールの Pmax 低下率は、Intact Module の Pmax 低下率（約 2%）より大きかったが（約 5~7%）、裏面からの水分透過が Intact Module に比して小さいと考えられる AL-BS においても Intact Module より大きい劣化を示したことは、裏面からの水分浸透による影響だけでなく、モジュール周辺部（エッジ）からの水分浸透の寄与も一定程度存在する可能性を示している（図 II-2-3-7(a)）。

これら構成変更モジュールにおける Voc、Isc、FF 低下については、図 II-2-3-7(b)、図 II-2-3-7(c)、図 II-2-3-7(d)にそれぞれ示した。これら 3 種の発電特性パラメータのうちでは、Isc 低下が比較的大きいことが分かる。なお、Rs-LP 低下および Rsh-LP 低下を図 II-2-3-8 に示したが、これらは 1000 時間曝露では極めて小さな低下を生じるのみで、上記の Pmax 低下とは直接関係していない可能性が大きい。

#### ⑤ 構成変更モジュールにおける発電特性の相関解析

Intact Module の高温高湿試験条件を変化させた場合と同様に、高温高湿環境（85 °C/85%RH）で構成変更モジュールの Pmax 低下と他の発電特性パラメータ低下の相関解析を行った（図 II-2-3-9）。上記のように、Voc、FF の低下と比して Isc 低下が比較的 Pmax 低下に寄与している可能性も考えられるが、想定したポリマー材料の有無による水分透過率の影響は明確に示すことができなかった。

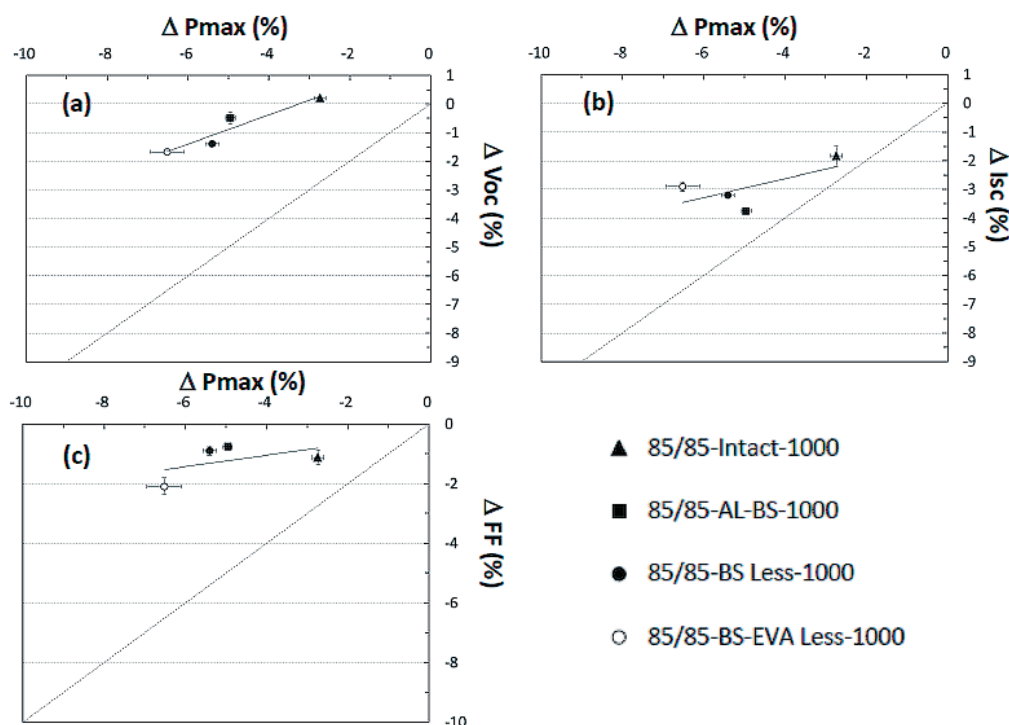


図 II-2-3-9. 高温高湿試験による発電特性：相関解析（構成変更モジュール）

⑥ 構成変更モジュールにおける外観変化および EL 像変化

図 II-2-3-10 に、構成変更を行ったモジュールを高温高湿環境（85 °C/85%RH）に 1000 時間曝露した際の EL 像を示す。BS-Less モジュール、BS-EVA Less モジュールとも Intact Module と同様に、EL 像では大きな変化は観察されなかった。また、AL-BS モジュールにおいても、Pmax の低下率と同様に EL 像には変化は観察されなかった。これらは、PV セルへの水分浸透（水分到達）と Pmax 低下は直接的には関連していない可能性を示している。

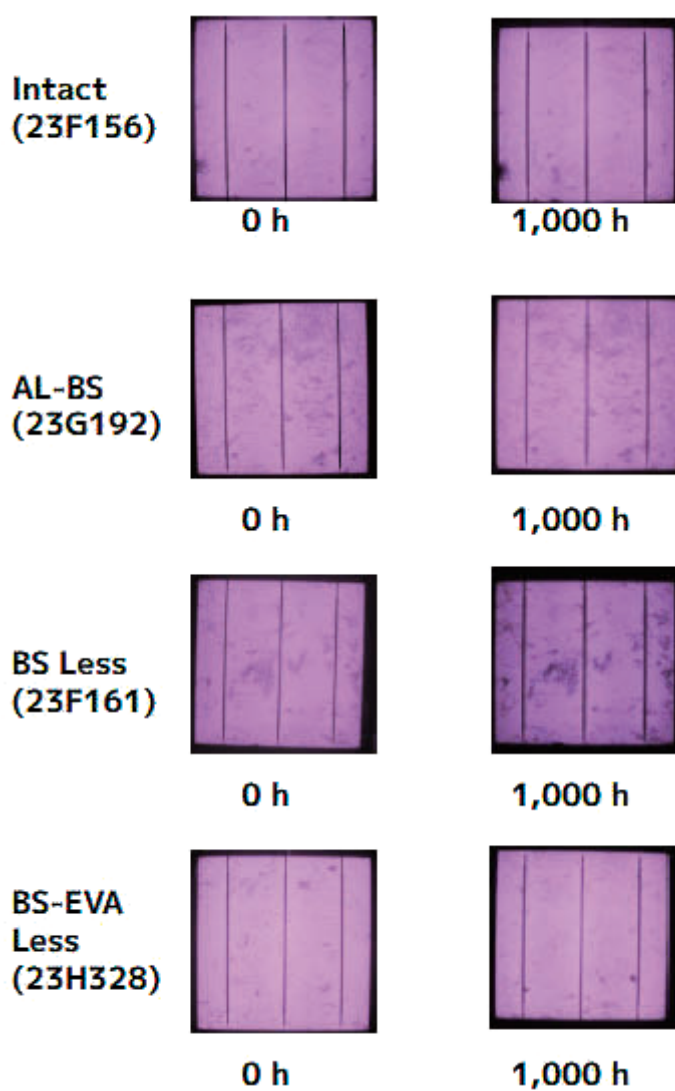


図 II-2-3-10. 構成変更モジュールにおける EL 像（85 °C/85%RH）

#### II-2-4. 考察

PV モジュールの屋外曝露試験結果については、その劣化メカニズム解明の観点から、多くの報告が行われているが、最近これまでの報告をまとめて（単結晶シリコンモジュール：42 報＋多結晶シリコンモジュール：20 報＝合計：62 報）、2000 年以前に生産された PV モジュールと 2001 年以降に生産された PV モジュールの劣化程度（劣化に關与する発電特性の低下率）を検討した報告が行われた<sup>8)</sup>。この報告によると、Pmax 低下率は以前から報告されているように 0.5～1%/年程度であり、2000 年を境界とする生産年により Pmax 低下率の平均値に変動はないが、単結晶シリコンモジュール、多結晶シリコンモジュールともに Pmax 低下率のバラつきは縮小していることが明らかにされた。また、両シリコンモジュールとも、Pmax 低下率は Isc 低下率と密接に相関し、これにともない FF 低下が生じていることが示された<sup>9)</sup>。これらから、屋外曝露においては、封止材の着色やデラミネーションにより Isc が低下し FF 低下を誘導するとともに、セルと封止材間のデラミネーションに水分が浸透することで腐食が生じて Rs が増大する劣化メカニズムが提案されている。

屋外曝露においては、これら光（UV）による着色などの劣化要因や周辺湿度（水分）の浸透による劣化などが複合され PV モジュールの劣化が生じるものと考えられる。しかし、環境ストレスとしての光、温度、湿度を強い強度で複合的に PV モジュールに負荷して劣化を加速し、それぞれの劣化メカニズムを個別に解析することは困難が多い。そこで、本検討においては、光要因を省いた温度、湿度要因について詳細な解析を行うことを目指した。

米国ジェット推進研究所（JPL）で 1970 年代中盤から 1980 年代中盤まで約 10 年に渡って実施された「Flat-Plate Solar Array Project（FSA プロジェクト）」においても、当時の技術や部材で生産された PV モジュール（単結晶シリコンモジュールおよび多結晶シリコンモジュール）について、その長期信頼性を確認するために、本検討で行った方法と同様の方法を利用して、PV モジュール劣化に及ぼす温度、湿度の影響が検討された<sup>10)</sup>。この FSA プロジェクトにおいては、セル発電効率：8.4～12.6%の PV セルを用い、主として封止材をラミネーションする方法で積層体（ラミネート）を作り（一部はキャスト法を使用）、これにフレーム設置した PV モジュールを試験対象としている（モジュール発電効率：5.5～10.1%）。当時の技術、部材を利用した PV モジュールについて、Pmax 劣化への温度、湿度の影響を検討した結果から、高温高湿試験（85 °C/85%RH、1000 時間）が米国マイアミでの 20 年の劣化に相当するとの加速試験提案をしたことは有名である。具体的には、40 °C/93%RH、70 °C/85%RH、85 °C/70%RH、85 °C/85%RH、85 °C/<2%RH および 100 °C/<2%RH の各試験条件で、240 時間、480 時間、1080 時間、2160 時間、4320 時間および 8640 時間の曝露を行い（外部から PV モジュールの電極ケーブルを通して、1～100 mA の順方向バイアスを負荷する場合と負荷しない場合の両方法を実施）、各試験条件および曝露時間での I-V 特性を測定して発電特性の変化を観測した。この観測結果のうち、Grid-line corrosion の原因と考えられる Rs 変化を使用して解析した場合（Peck 則から 1%RH は 1 °C に相当すると考える）、米国マイアミでの屋外環境（昼夜の気象環境から Peck 則をベース



に気温、湿度の合計指標を使用)との相関から、上記の高温高湿試験(85 °C/85%RH、1000時間)が20年の劣化に相当するとの結論を得ている。

ただし、1970~1980年代当時のPVモジュールに関する製造技術および使用部材は、現在では大きく変化しており、Jordanらの報告にあるようにPmax劣化のバラつきは小さくなっている。そこで、現在の製造技術および部材を用いた結晶シリコンモジュールにおいて、Otthらが行った方法と同様の検討を行い、現在のPVモジュールの劣化要因を明確化することが重要であると考えた。類似の目的で、米国ソラリア社のWhitfieldらも多種類のPVセルを用いて同様の解析を行った結果を、2012年6月に開催された38th IEEE PVSC (Austin, Texas)で発表している<sup>11)</sup>。彼らの報告によれば、高温高湿試験における劣化はセルの種類に依存する可能性が高く、高温高湿試験のみ(より長期間の曝露を含む)では屋外曝露に相当する劣化を加速することが出来ない可能性が示されている。

本検討では、上記の知見を基盤として、100 °C以上での高温高湿環境を実現するHASTを含んで、65 °C/85%RH、85 °C/85%RH、95 °C/95%RH、105 °C/100%RH(不飽和)および120 °C/100%RH(不飽和)での高温高湿試験を行った。その結果、120 °C/100%RH条件では、モジュール構成部材のバックシートが崩落するという観察結果から、この試験条件では異なるメカニズムで劣化している可能性も大きいと考えられるが、温湿度ストレスの増大にともなうPmax低下とFF低下は極めて強く相関することや、このFF低下はRs増大とRsh低下の加算的効果により生じていることを明らかにした。なお、このRs増大およびRsh低下は浸透した水分による影響と考えられるため、モジュール構成を変更した変異モジュール(バックシートレスなど)を用いて高温高湿試験(85 °C/85%RH、1000時間)を実施したところ、PVセルへの水分浸透(水分到達)とPmax低下は直接的には関連していない結果を得た。

## II-2-5. 本節のまとめ

- ・高温高湿試験において温度、湿度を変化させ、温湿度ストレスの増大がモジュールの発電性能の低下を加速することを示した(極めて高いストレスの高温高湿試験条件においては、異なるメカニズムによる劣化が生じる可能性も合わせて示した)。
- ・温度、湿度ストレスの増大によるモジュール劣化加速は、Rs増大とRsh低下が加算的にFF低下を引き起こし、Pmax低下の主要因となっている可能性を示した。
- ・モジュールへの水分浸透(水分到達)とPmax低下は直接的には関連していない可能性を示した。
- ・温湿度ストレスによる劣化(Pmax低下)が、Rs増大とRsh低下により加算的に再構成されるFF低下を主要因とするように、他の環境ストレスによる劣化も相加的、相乗的に再構成できる可能性を示した。

(エスペック株式会社：鈴木 聡、エスペック株式会社：尾花 英一郎、  
エスペック株式会社：棚橋 紀悟)

## II-3. 加速条件：光－温湿度複合

QA フォーラム TG5 にて、欧州および米国とも連携して UV 照射試験条件の検討が要望されており、国内 TG5 リーダーからの要請もあり、本コアテーマ 3 と TG5 が連携して、4 セルモジュールでの UV 照射試験を実施し、得られる基礎データを本コンソーシアムの成果とするとともに TG5 へ提供することとで QA フォーラムへ貢献することとした。

### II-3-1. 複合加速試験装置の仕様

複合加速劣化試験装置の全景および納入時仕様をそれぞれ図 II-3-1-1、表 II-3-1-1 に示す。本装置の光源には水冷式の交流点灯型ロングアークキセノンランプを使用し、紫外線換算で最大 3UV の光照射（1UV = 60 W/m<sup>2</sup> @300～400 nm）が可能で、ランプを長手方向鉛直に 2 灯配置した状態でランプ周辺に曲面および平面反射板、ランプ前面に遮光板を設置することで、高さ 1218 mm×幅 445 mm の領域における光照射強度の場所むらを±15%以内に収めてある。また、同様の光照射槽を 3 列装備することで、同時に 3 台の太陽電池モジュールの試験が可能な仕様となっている。さらに、熱交換機と空冷ユニットの使用により、光照射のない状態で－40～90℃の環境試験に対応する仕様である。本装置で可能な試験の運転モードは以下の通りである。

運転モード 1：光照射試験（湿度制御不可）

運転モード 2：低温試験（光照射なし）

運転モード 3：乾燥試験（光照射なし）

運転モード 4：湿潤試験（光照射なし）

運転モード 5：注水試験（光照射なし）



図 II-3-1-1. 複合加速試験装置の全景

表 II-3-1-1. 複合加速試験装置の仕様

項目	仕様・性能
試験温度範囲(光照射無し)	-40~+90°C
試験温度範囲(光照射3sun以下)	+50~+90°C
試験槽内湿度(光照射なし, 室温以上)	最大85±5%RH
最大光照射強度	3UV (180W/m <sup>2</sup> @ 300-400nm)
光照射強度の場所むら	±15%以下(150W/m <sup>2</sup> 時)
最大試料寸法	1218H×445W×50D, 3枚

また、本装置は2009年に開始した本コンソーシアム第I期での光照射試験に供するために、3列の光照射槽の上下それぞれに40cm角モジュールを投入できるように、すなわち、長手方向鉛直に配置された2本のそれぞれが40cm角モジュールを照射するように試料固定用の治具を変更してある。更に、3列の光照射槽全体では、この寸法の試料を6台投入した場合に、各モジュール位置での裏面温度差が最小となるように試料背後の風向板を最適化してある。

### II-3-2. 試験条件確定のための予備試験

上記のように本装置の運転モードは光照射時に湿度制御ができないため、TG5との打合せの過程において、運転モード1(光照射試験)と運転モード4(湿潤試験)をシーケンシャルに行うということで光-温度-湿度の効果を見ることも検討されたが、まずは確実な成果を出すことを優先し、光照射試験単独で検討することとした。

光照射試験での最適な試験条件を決めるために、光照射強度、設定空気温度をパラメータとして、試験槽内に置かれた6台のモジュール裏面温度の分布を調べた。図II-3-2-1は鉛直に立てて投入されるモジュールをその裏面側から見た模式図である(紙面裏側に光源がある)。図には試料投入スロット(CH1~CH6)の位置ならびにモジュール裏面に貼付した熱電対の位置が示してある。図II-3-2-2に端子ボックスと熱電対の位置が分かる写真を示す。

表II-3-2-1に光照射強度を3UV、1.5UV、1.0UVの3水準とし、槽内へ流入する空気の設定温度をそれぞれ、85~25°C、65~45°C、85~45°Cとして槽内温度が安定した時のモジュール裏面温度(CH1~CH6の最低~最高)およびその温度差をまとめた。なお、3UV(180W/m<sup>2</sup>)照射時、設定空気温度が85°Cおよび65°Cの場合は槽内温度が安定しなかった。

この予備試験の結果、モジュール裏面温度の最高値、温度差、加速性を勘案し、試験条

件は光照射強度 1.5UV (90 W/m<sup>2</sup>)、設定空気温度 65 °C で実施することとした。

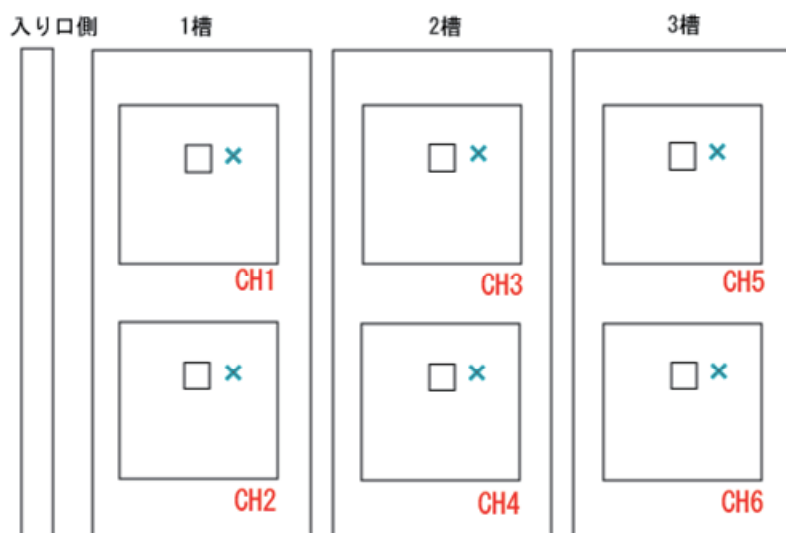


図 II-3-2-1. 試料配置と熱電対貼付箇所。裏面から見た模式図。CH1~CH6 は試料投入スロットと対応する熱電対の番号を示す。熱電対は各試料の端子ボックスの右（図中×印）に貼付（表から見た場合、左上セルの中央の裏面に相当）。



図 II-3-2-2. 端子ボックスと熱電対の位置

表 II-3-2-1. 光照射強度、設定空気温度と試料温度の関係

光照射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	設定空気 温度 [°C]	槽内安定 温度 [°C]	モジュール 裏面温度 [°C]	モジュール裏面 最大温度差 [°C]
180	85	N/A	N/A	N/A
180	65	N/A	N/A	N/A
180	45	45	83~96	13
180	25	25	60~80	20
90	65	65	85~91	6
90	55	55	76~81	5
90	45	45	66~72	6
60	85	85	99~103	4
60	70	70	85~90	5
60	65	65	81~84	3
60	45	45	61~65	4

### II-3-3. 試験計画と試験スケジュール

試験モジュールの構成は、本コンソーシアム標準のアルミフレーム有り 4 セルモジュール構造とし、封止材とバックシート（以下 BS と記す）は TG5 提供部材を使用し、それ以外の部材は本コンソーシアム標準のものを使用した。封止材は、2 種類（A=保管期限内 EVA、B=保管期限切れ EVA）とし、それぞれ n=3 でサンプルを準備した。光照射面はガラス面側あるいは BS 面側とし、BS 面側光照射量の割合については、2012 年 5 月 QA Forum Stresa 会議で示された Michel Köhl らのプレゼン資料から、BS 面側へ入射する UV 量はガラス面側の高々 5% 程度であることを勘案して、総光照射時間の 25% を当てる計画とした。表 II-3-3-1 にサンプル ID と光照射条件をまとめたものを示す。

試験 1RUN=330 時間とし、1RUN 毎に特性評価（I-V、EL、耐電圧、色調、外観）を実施することとした。試験スケジュールは以下の通りである。

表 II-3-3-1. サンプル ID と光照射条件

ID	封止材	UV330h (1RUN)	UV660h (2RUN)	UV990h (3RUN)	UV1320h (4RUN)
120410-01	A	未試験(コントロールとして使用)			
120410-02(CH1)	A	ガラス面	→	→	BS面
120410-03(CH4)	A	ガラス面	→	→	BS面
120410-04(CH5)	A	BS面	ガラス面	→	→
120710-01(CH2)	B	ガラス面	→	→	BS面
120710-02(CH3)	B	ガラス面	→	→	BS面
120710-03(CH6)	B	BS面	ガラス面	→	→

- 第 1RUN (330 時間) : 2012/7/27~2012/8/10 於 : つくば → 完了
- 第 2RUN (330 時間) : 2012/8/29~2012/9/12 於 : つくば → 完了
- 第 3RUN (330 時間) : 2012/11/5~2012/11/19 於 : 鳥栖 (装置移設後)
- 第 4RUN (330 時間) : 2012/11/26~2012/12/10 於 : 鳥栖

現在、鳥栖への移設が完了し、第 3RUN を実施中である。第 2RUN までの結果を次に示す。

#### II-3-4. 結果と考察

表 II-3-3-1 に示した通り BS 面への光照射は、第 4RUN に行うグループ (4 サンプル) と第 1RUN に行うグループ (2 サンプル) の大きく 2 つのグループに分けられる。ここでは、このグループ毎にデータをまとめて示すこととする。

図 II-3-4-1 および図 II-3-4-2 に、ガラス面から積算 660 時間照射した 4 サンプル (12410-02、12410-03、12710-01、12710-02) の  $I_{sc}$  の経時変化とこれらの I-V カーブの変化をそれぞれ示す。照射 330 時間後に  $I_{sc}$  が約 1% 低下した後は、I-V 特性の低下は進行していなかった。図 II-3-4-3 はこれらサンプルの EL 画像の経時変化を示したものである。照射 660 時間でも変化は見られなかった。表 II-3-4-1 はこれらサンプルの耐電圧試験の結果をまとめたものである。いずれのサンプルも絶縁試験、絶縁抵抗試験、湿潤漏れ電流試験の全てに合格しており、劣化は認められなかった。図 II-3-4-4 には色調の変化を封止材の種類別に分けて示した。色調は  $L^*a^*b^*$  表色系 ( $L^*$  : 黒→白、 $a^*$  : 緑→赤方向、 $b^*$  : 青→黄方向、それぞれ数値が負→正に増大した場合) で評価し、 $\Delta E^* = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2}$  である。色調は照射 330 時間後に増加しているが、その後の照射では増加は見られない。外観観察では、白濁や剥離などの発生は認められなかった。

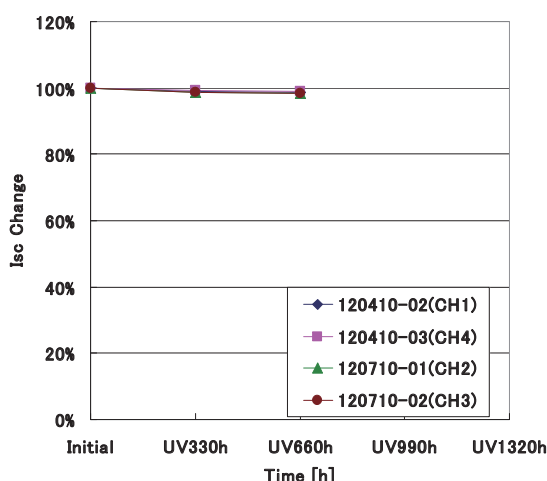


図 II-3-4-1.  $I_{sc}$  の変化率の試験時間依存性 (ガラス面から照射、660 h)

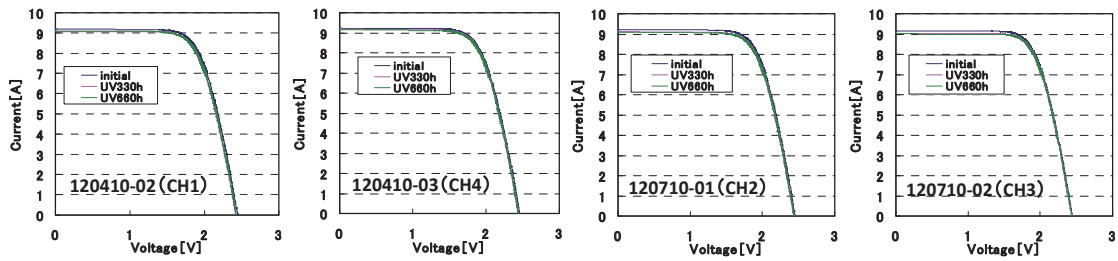


図 II-3-4-2. I-V カーブの変化（試料毎、ガラス面から照射、660 h）

ID	initial	UV330h	UV660h	UV990h	UV1320h
120410-02					
120410-03					
120710-01					
120710-02					

図 II-3-4-3. EL 画像の変化（ガラス面から照射、660 h）

表 II-3-4-1. 耐電圧試験の結果（ガラス面から照射、660 h）

120410-02(CH1)			湿潤漏れ電流・水温未測定			
耐電圧	絶縁 [ $\mu$ A]	合否	絶縁抵抗[G $\Omega$ ]	合否	湿潤漏れ電流[G $\Omega$ ]	合否
Initial	0	○	>99.9	○	4.54	○
UV330h	0	○	>99.9	○	0.690	○
UV660h	0	○	>99.9	○	0.957	○

120410-03(CH4)			湿潤漏れ電流・水温未測定			
耐電圧	絶縁 [ $\mu$ A]	合否	絶縁抵抗[G $\Omega$ ]	合否	湿潤漏れ電流[G $\Omega$ ]	合否
Initial	0	○	>99.9	○	4.54	○
UV330h	0	○	85.6	○	0.661	○
UV660h	0	○	>99.9	○	0.954	○

120710-01(CH2)			湿潤漏れ電流・水温未測定			
耐電圧	絶縁 [ $\mu$ A]	合否	絶縁抵抗[G $\Omega$ ]	合否	湿潤漏れ電流[G $\Omega$ ]	合否
Initial	1	○	10	○	1.52	○
UV330h	0	○	85.7	○	0.859	○
UV660h	0	○	>99.9	○	1.09	○

120710-02(CH3)			湿潤漏れ電流・水温未測定			
耐電圧	絶縁 [ $\mu$ A]	合否	絶縁抵抗[G $\Omega$ ]	合否	湿潤漏れ電流[G $\Omega$ ]	合否
Initial	1	○	10.7	○	1.25	○
UV330h	0	○	66.7	○	0.796	○
UV660h	0	○	>99.9	○	1.04	○

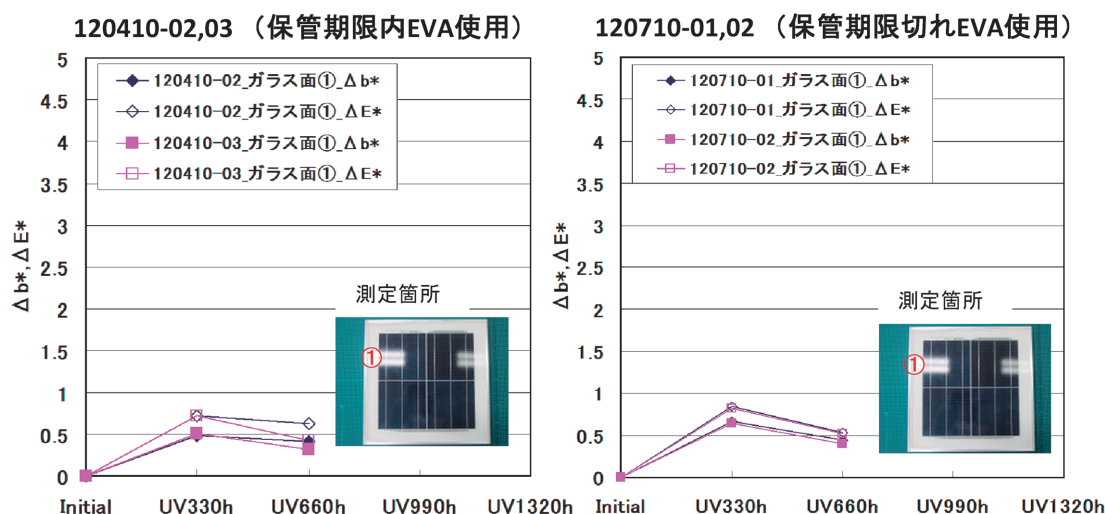


図 II-3-4-4. 色調の変化 (ガラス面から照射、660 h)

図 II-3-4-5 および図 II-3-4-6 に、BS 面から 330 h 照射後、ガラス面から 330 h 照射した 2 サンプル (120410-04、120710-03) の  $I_{sc}$  の経時変化とこれらの I-V カーブの変化をそれぞれ示す。BS 面から照射 330 時間後は I-V 特性の劣化は見られなかったが、その後ガラス面からの照射 330 時間後の測定では、 $I_{sc}$  が約 1% 低下した。図 II-3-4-7 はこれらサンプルの EL 画像の経時変化を示したものであるが、EL 画像の変化は認められなかった。表 II-3-4-2 はこれらサンプルの耐電圧試験の結果をまとめたものである。いずれのサンプルも絶縁試験、絶縁抵抗試験、湿潤漏れ電流試験の全てに合格しており、劣化は認められなかった。

図 II-3-4-8 には、色調の変化を測定場所別 (ガラス面側は、ガラス/EVA/EVA/BS 構成における BS の EVA 側までを測定、BS 面側は、BS の最外層を測定) に分けて示した。図 II-3-4-8 左のグラフからガラス面から 330 h 照射したことに対する色調の増分は 0.5~0.6 程度である。一方、図 II-3-4-4 からは、初期から UV330 h までの色調の増分は 0.5~0.7 であり、ほぼ同程度であることが確認できる。また、図 II-3-4-8 左のグラフの初期から UV330 h までの色調の増分が 0.1~0.3 程度あること、図 II-3-4-8 右のグラフからは、裏面から UV 照射していない UV330 h~UV660 h においても色調の変化が大きいことは、回り込み光 (治具の隙間を透過した光が照射面の反対側へ回り込んだ光) の可能性もあるが、熱による接着剤もしくは PET フィルムの変色進行の可能性が高い。



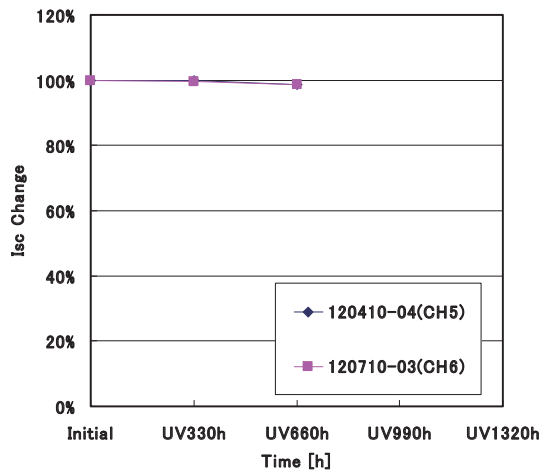


図 II-3-4-5.  $I_{sc}$  の変化率の試験時間依存性  
(BS 面から 330 h 照射後、ガラス面から 330 h 照射)

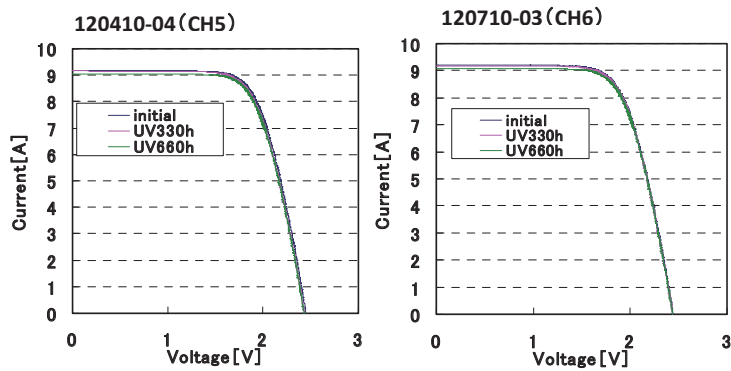


図 II-3-4-6. I-V カーブの変化 (試料毎、BS 面から 330 h 照射後、ガラス面から 330 h 照射)

ID	initial	UV330h	UV660h	UV990h	UV1320h
120410-04					
120710-03					

図 II-3-4-7. EL 画像の変化 (BS 面から 330 h 照射後、ガラス面から 330 h 照射)

表 II-3-4-2. 耐電圧試験の結果 (BS 面から 330 h 照射後、ガラス面から 330 h 照射)

**120410-04 (CH5)** 湿潤漏れ電流: 水温未測定

耐電圧	絶縁 [ $\mu\text{A}$ ]	合否	絶縁抵抗 [ $\text{G}\Omega$ ]	合否	湿潤漏れ電流 [ $\text{G}\Omega$ ]	合否
Initial	0	○	>99.9	○	5.00	○
UV330h	0	○	15	○	0.566	○
UV660h	0	○	>99.9	○	0.927	○

**120710-03 (CH6)**

	絶縁 [ $\mu\text{A}$ ]	合否	絶縁抵抗 [ $\text{G}\Omega$ ]	合否	湿潤漏れ電流 [ $\text{G}\Omega$ ]	合否
Initial	0	○	17.7	○	1.28	○
UV330h	0	○	85.7	○	0.879	○
UV660h	0	○	85.7	○	1.17	○

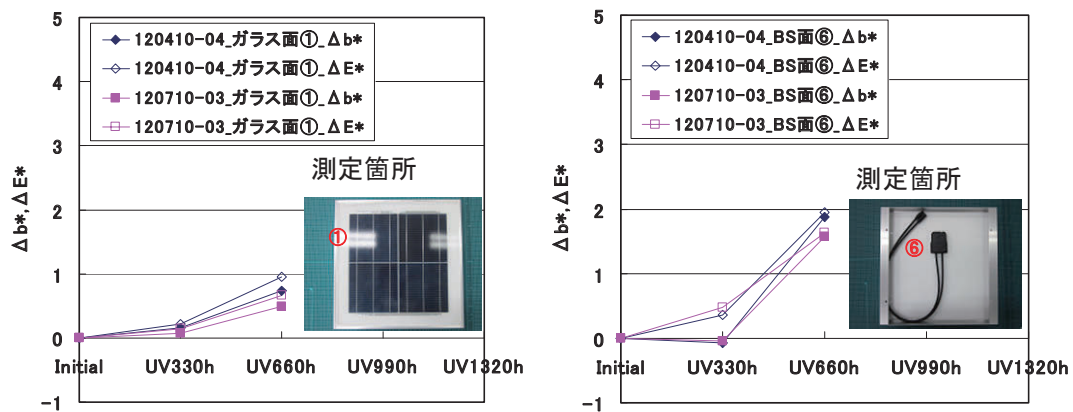


図 II-3-4-8. 色調の変化 (BS 面から 330 h 照射後、ガラス面から 330 h 照射)

(独立行政法人産業技術総合研究所：土井 卓也)

## II-4. 電位差起因：PID 試験

電位差起因の劣化（Potential Induced Degradation = PID）が注目されており、IEC TC82/WG2 への規格提案が NREL からなされている。そこで、本コアテーマにおいても PID 試験に関する基礎データを取得し、PID のメカニズム理解とその防止のための条件を検討することとなった。

### II-4-1. 試験方法

PID の試験条件を表 II-4-1-1、使用機器を表 II-4-1-2 に示す。本試験は PI-Berlin が提案している方法の一つをベースとしており、相違点として、受光面が乾くことなく水を満たすために受光面を下にして水没させるという手法を採用している。また、端面封止の隙間から水がバックシート側へ漏れることを考慮し、バックシート-アルミフレーム間と端子ボックス周りをパテで埋めることにより防水対策を施している。データロガーでは絶縁抵抗を電圧換算した値、モジュール周辺温度を記録し、試験終了後、時間経過における絶縁抵抗の推移、温度と絶縁抵抗の関係を評価できるようにした。

表 II-4-1-1. PID 試験条件

温 度	25 °C
湿 度	制御無し
印加電圧	フレームに対して発電回路に-1000 V
試験時間	168 h
水 張 り	受光面を水没
合 否	出力低下 5%以内であれば合格
備 考	試験後、4 時間以内に測定を行う

表 II-4-1-2. 使用機器

電 源	絶縁抵抗計 TOS7200（菊水電子工業製）
データロガー	GL820（グラフテック製）
試 験 槽	プラスチック容器

### II-4-2. 予備試験の結果と考察

本試験を行う前に、上記試験方法で PID 発生因子を含むモジュールの PID 発生を確認するため予備試験を実施した。試験風景を図 II-4-2-1 に示す。試験体はコンソーシアム標準部材の 4 セルモジュールにて実施した。208 時間の試験を行った後に、4 時間以内に測定し、さらに+30 時間の延長試験を行った。現時点ではこの後も延長試験を実施中である。

予備試験前後での I-V カーブを図 II-4-2-2 に、初期を 100%としたときの開放電圧 (Voc)、短絡電流 (Isc)、最大出力 (Pmax)、フィルファクタ (FF) の保持率を表 II-4-2-1 に示す。

Voc、FF 低下により Pmax が低下している。図 II-4-2-3 に EL 測定の結果を示す。208 時間後にはセルの 1 枚が完全に暗くなり、他のセルにも暗部が見られる。図 II-4-2-4 に時間と温度、図 II-4-2-5 に時間と絶縁抵抗、図 II-4-2-6 に温度と絶縁抵抗の関係を示す。本来、試験温度は 25 °C であるが、試験室の空調の関係で温度が安定しなかった。本コンソーシアム第 I 期の成果から、温度と抵抗の関係は図 II-4-2-7 に示した様な関係があることが分かっている。図 II-4-2-6 には温度以外の因子を含む可能性があったので、試験開始から 48 時間毎にマークを変えて示した。時間が経つごとに絶縁抵抗が低い方へ推移していることから、漏れ電流の増加を反映しているものと推定される。

また、データロガーのサンプリングは 200 ms 毎に行っており、試験中、絶縁抵抗のスパイク的な変動は見られなかったため、PID の発生もしくは漏れ電流の増加はある閾値から急激に起こるものではなく、徐々に起こっていると推察される。

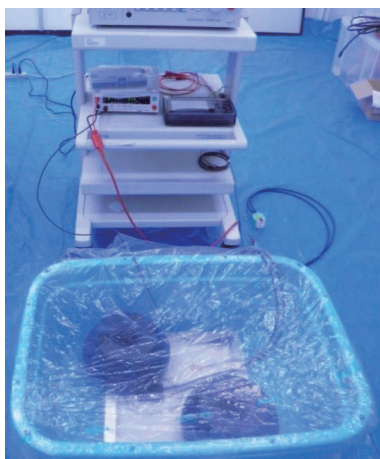


図 II-4-2-1. 試験風景

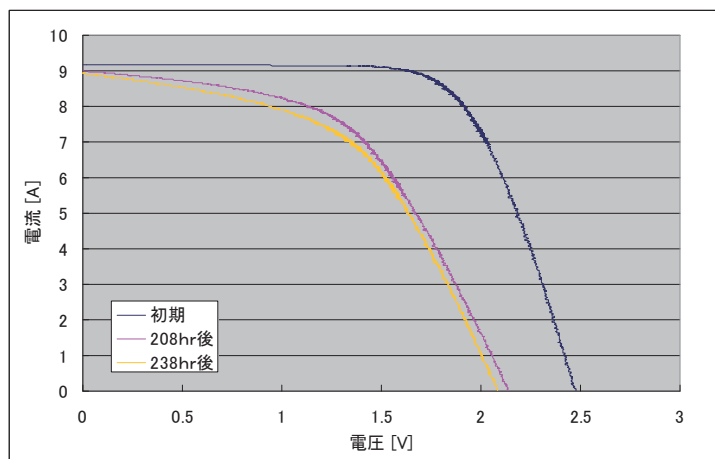
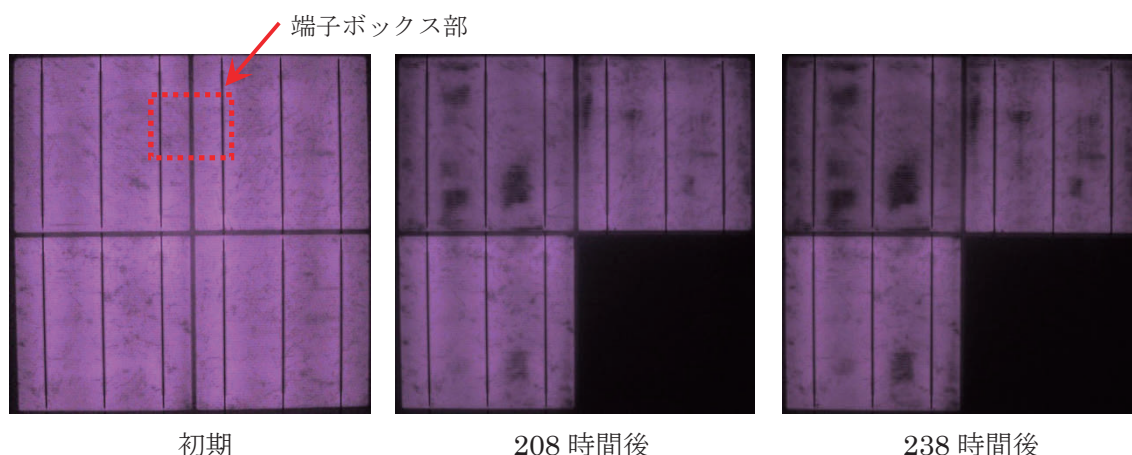


図 II-4-2-2. 試験前後の I-V カーブ



初期

208 時間後

238 時間後

図 II-4-2-3. EL 測定結果

表 II-4-2-1. 初期を 100%としたときの各パラメータの保持率

	Voc	Isc	Pmax	FF
初期	100	100	100	100
208 h後	86.5	98.2	64.1	75.4
238 h後	84.2	97.4	60.9	74.2

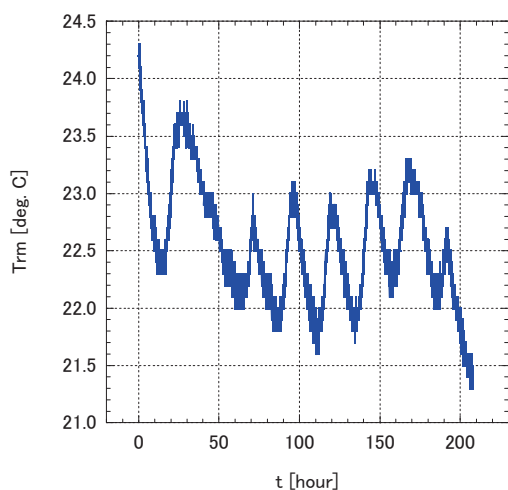


図 II-4-2-4. 時間と温度の関係

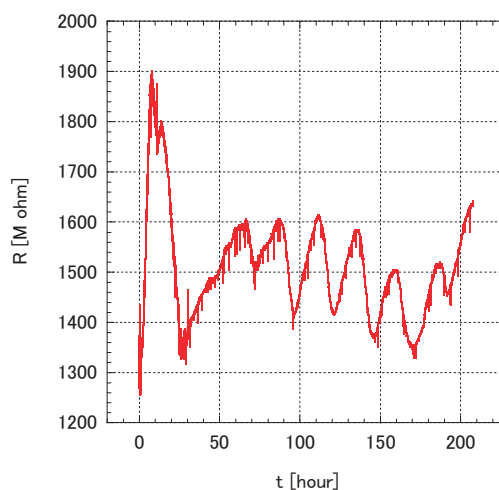


図 II-4-2-5. 時間と絶縁抵抗の関係

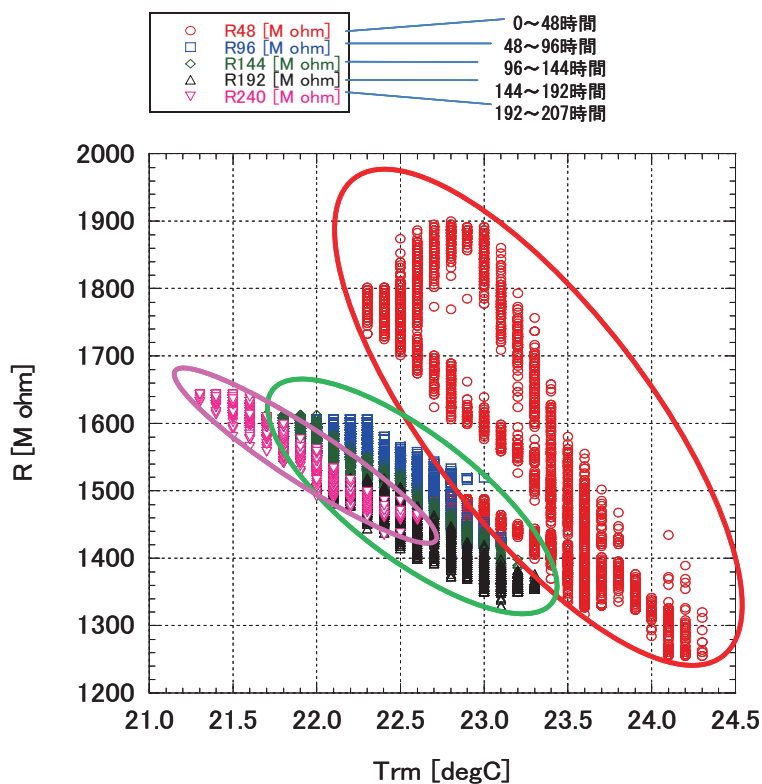


図 II-4-2-6. 温度と絶縁抵抗の関係

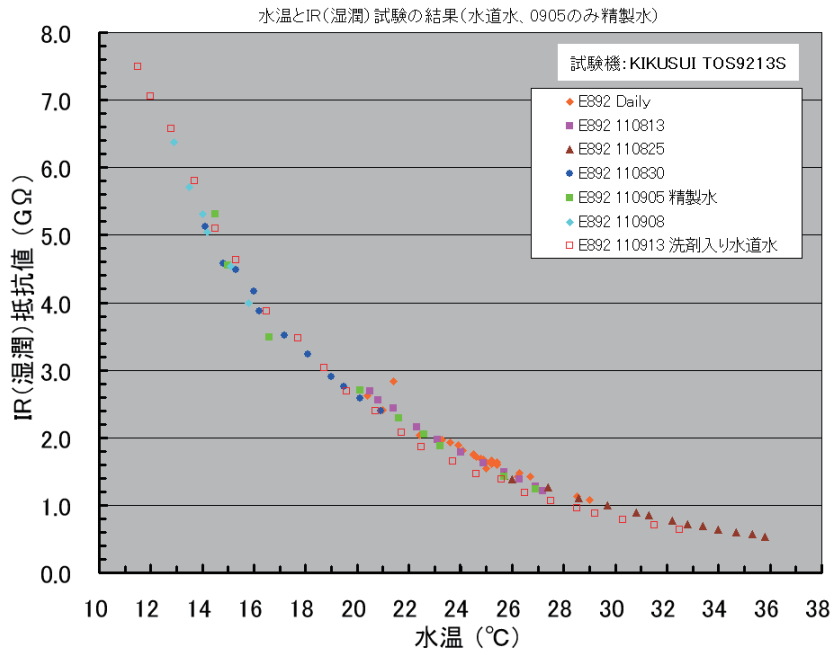


図 II-4-2-7. 水温と湿潤抵抗の関係 (第 I 期成果報告書より)

(長州産業株式会社: 上野 清志)

### III. まとめ

#### (1) 屋外曝露／加速試験相関、確認試験

剥離と配線劣化の再現に着目し、現行規格試験（DH、HF、TC）を特定の劣化症状を持つ中古ジュールに対して適用したが、劣化症状の発達などは起こらず、屋外曝露で示している劣化症状との相関は低いことが示された。今後は、単体試験の組合せ（複合 or シーケンシャル）や新たなストレス（UV、DML）なども含めて検討する予定である。

並行してコアテーマ 1 との連携をさらに深めて、実環境での劣化を部材レベルから適切に把握し、メカニズムを探ることで実曝露と相関性の高い試験法開発に役立てたい。

#### (2) 太陽電池モジュール劣化における温湿度影響の検討

本検討は、供試モジュールのプラスとマイナスの両電極を短絡させず開放状態で実施した点や、外部から PV セルに電流負荷を行わずに実施した点、および光照射を行わない高温高湿環境で実施した点から、PV セルへの電氣的負荷は考慮する必要はないため、PV セルの発電にともなう劣化効果は排除され、純粋に複合材としての PV モジュールの劣化を検討した結果であり、上記したように複合的劣化要因により生じる屋外曝露による劣化を、静的面から評価した結果と位置づけられる。本検討で示したような温度、湿度ストレスのみの増大によるモジュール劣化加速は、 $R_s$  増大と  $R_{sh}$  低下が加算的に FF 低下を引き起こし、これが  $P_{max}$  低下の主要因となっているという知見を、他の環境ストレスにおいても個々に積み重ねることで屋外曝露のような複合的劣化が再構成できる可能性を示した点を、約 1.5 年に渡る本コンソーシアム活動の成果としたい。

今後は、今回得た知見を詳細に検討することで、それぞれの高温高湿試験条件における劣化速度定数を確認することを通して、電氣的負荷の無い状態での加速係数や活性化エネルギーを明確にしていくとともに、他の環境要因（腐食に影響する酸素など）を付加して複合環境要因による発電特性低下を再構成する方向を検討していきたい。

#### (3) 加速条件：光－温湿度複合

最終的には、第 3RUN、第 4RUN の結果や破壊分析の結果を経ての判断となるが、BS 面色調変化については、BS 面への光照射を入れるタイミングにより、その後の変化が影響を受けるようであれば、ガラス面と BS 面を同時に光照射する（但し照射強度は異なる）必要があり、試験装置の準備を含めた詳細な調査が必要となることも想定される。

#### (4) 電位差起因：PID 試験

予備試験を通して PID の発生を確認できたが、モジュール内部でどのような現象が起きているかは明らかでない。今後はセル、封止材、ガラスに着目し、セルであれば反射防止膜の屈折率や膜厚を変化させたもの、封止材であれば絶縁性の違うもの、ガラスであれば無アルカリガラスなど、PID 発生因子を少なくした部材で比較試験を行う。さらに、単

セル、4セル、フルサイズ等、セルの直列数やモジュールのサイズ等により、PID の程度に差異が生じるかも確認する。また、PID 発生後のモジュール内部で何が起きているのかを明確にするため、必要に応じて破壊分析も行う予定である。

(コアテーマ 3 担当者全員)

#### 参考文献

- 1) S. Shimizu *et al.*: “*Failure Assessments for Outside-Exposed Photovoltaic Modules*”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 10NF04.
- 2) 平成 17 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書、「太陽電池評価技術の研究開発」、(独)産業技術総合研究所、(財)電気安全環境研究所、p. 33.
- 3) O. Haillant: *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** (2011) 1284.
- 4) J. H. Wohlgemuth and S. Kurtz: *Proc. 2011 IEEE Int. Reliability Physics Symp., 2011*, 5E.3.1.
- 5) J. H. Wohlgemuth and S. Kurtz: *Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2011*, p. 3601.
- 6) S. Kurtz, J. Granata and M. Quintana: *Proc. SPIE* **7412** (2009) 74120Z.
- 7) 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、産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター、2011.
- 8) D. C. Jordan and S. R. Kurtz: *Prog. Photovolt. Res. Appl.* (2011) DOI: 10.1002/pip.1182 (online published).
- 9) D. C. Jordan, J. H. Wohlgemuth and S. R. Kurtz: *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2012*, p. 3118.
- 10) D. H. Otth and R. G. Ross, Jr.: *Proc. 1983 Institute of Environmental Sciences 29th Annual Meeting, 1983*, p. 121.
- 11) K. Whitfield, A. Salomon, S. Yang and I. Suez: *Proc. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2012*, in press.

#### 謝辞

PID 試験の準備を進めるにあたっては、株式会社ケミトックスの坂本清彦様に多大な御助言を頂いた。また、菊水電子工業株式会社の奥川敦雄様、奥脇経三様、矢島芳昭様に絶縁抵抗試験器取扱いやエアコンパテの防水シールの転用など貴重な御助言を頂いた。ここに感謝する。