

### 「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。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。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、両者を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。

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。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。また、特に第II期コンソーシアム後半においては、最近大きな注目を集めている電圧誘起劣化(PID)に関する試験にも注力した。

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／加速試験相関、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、エスペック）

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 ジャパンソーラーファクトリー株式会社 (旧・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

### サブテーマ1 PID加速試験法開発

#### II-1. 背景と目的

太陽電池モジュール（以下、PVモジュールと略記する）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大型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、長期間に渡り屋外曝露されたPVモジュール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加速試験方法の開発も必要とされる。また、現在のPVモジュール型式認証など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、20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。本検討では、上記の背景を基盤として、PVモジュールの長期信頼性確保に向けた加速試験方法開発の具体例として、大型太陽光発電システム（高システム電圧構成）などでの発生が懸念されるPID（Potential-Induced Degradation）について、塩水噴霧試験との組合せによる加速化検討を実施した。

海岸付近に設置されたPVモジュールの長期曝露経験から、塩水噴霧ストレスはPVモジュールに多様な悪影響を与えることが知られている（フレーム・架台やエッジシール樹脂の腐食、および部材・セルなどの変色による受光量低下やセル劣化）[1]。これらの塩水噴霧ストレスによる悪影響を再現・加速するための屋内試験方法としてIEC 61701 (Ed. 2):

2011 試験規格が制定されているが [2]。しかし、当該試験規格に沿って実施した PV モジュール試験では、絶縁レベルの低下（ただし、合否判定基準を上回り合格判定となる）や軽微な影響（金属製ジャンクションボックスの表面腐食・モジュール表面ガラスと封止材の剥離強度の多少の低下・インタコネクタの若干の腐食）が観察されるという報告はあるが、発電性能の低下などは確認されていない [1, 3]。これらの点から、この塩水噴霧試験により、部材などの特性変化に関わる影響（金属腐食・絶縁低下など）は再現できるが、塩水噴霧ストレスによる PV モジュール出力への影響は、この塩水噴霧試験により再現・加速されないほどの長期曝露により顕在化する可能性も示唆される。

数年前から注目を集めている PID による PV モジュール発電性能の低下は、JPL (Jet Propulsion Laboratory) や NREL (National Renewable Energy Laboratory) および FSEC (Florida Solar Energy Center) の先駆的な屋内試験・屋外試験結果をベースに [4~6]、その特徴的な劣化性状や劣化メカニズムが明らかにされてきた。この劣化性状や劣化メカニズムは、以下のようにまとめることができる。

- ・ p 型セルを用いた PV モジュールの場合、接地されたフレームに対してセルに大きなマイナス電圧を負荷することで、並列抵抗 (Rsh) の低下による出力低下が生じ、出力低下が進行した場合は Rsh 低下にともなう開放電圧 (Voc) の低下も見られる [7~10]。
- ・この Rsh 低下は、セル表面に付設されているフィンガグリッド間で観察されており、このインタグリッドにおいて pn 接合の破壊が進行すると考えられる [11, 12]。
- ・PID による出力低下は、高温保持や逆電圧負荷により回復する [7~9, 11]。
- ・PID による出力低下は、PV モジュールが設置された（あるいは試験された）環境（温度・湿度および負荷電圧）に依存し、温度・湿度・負荷電圧が増大することで出力低下レベルが大きくなる [13~15]。また、この高電圧負荷状態におけるフレームーセル間のリーク電流も上記環境に影響される。このリーク電流総量と PID による出力低下レベルは相関する場合もあるが、常に相関しているとは言えないとする報告もある [4~7, 9, 13, 15~19]。
- ・この PID 現象は、PV モジュールを構成する部材の変更・改変により防止することが可能である。たとえば、ナトリウムイオンの遊離量が低い石英ガラスや化学強化ガラスをフロントガラスに使用することや [13, 20]、体積抵抗率の高い封止材を使用すること [7, 9, 13, 16, 21]、セル表面に蒸着された反射防止膜 (SiN) の電気伝導性を増大させることなどにより PID 現象の発生を抑制できることが知られている [7, 9, 18, 22]。
- ・現状では、PID 発生メカニズム (pn 接合破壊) について 2 つの仮説が提案されている。ひとつは、フレームーセル間の高電圧によりフロントガラスから遊離したナトリウムイオンがセル表面の反射防止膜に集積され [13, 14, 22~25]、この正電荷により集積された電子と二重層を形成することでセル表面に部分的ではあるが強力な電場が発生し、この電場の影響によりセル上層部の n 層の一部が p<sup>+</sup>性状へ反転する。その結果、新たに形成された n<sup>+</sup>-p<sup>+</sup>接合部でトンネル電流が流れることにより並列抵抗の低下 (pn 接合破壊) が生じるとする仮説である [24]。また、セル表面の反射防止膜層に集積されたナトリウムイオンは、その正電荷同士の電氣的斥力により側面方向に移動するが、何らかの原因で移動が制限された場合は、セル（シリコン結晶）に存在する積層欠陥に沿ってセル内に侵入して直接的に pn 接合を破壊する第 2 の仮説も提案されている

[25~27]。なお、両仮説とも、PID 性状の確認などで明らかにされたセル表面へのナトリウムイオンの集積を基盤知見としており、高電圧負荷によりセル表面に集積されたナトリウムイオンが主要因として機能している点についての差異はない。

- ・屋外曝露試験（高電圧負荷状態）では、ある型式の PV モジュールについては 1 年以内に PID による出力低下が確認されている。また、同型式の PV モジュールを用いた屋内試験（60°C/85% RH、-1,000 V）では、同程度の出力低下および類似劣化性状（屋外曝露で確認されていない直列抵抗（Rs）の変化を生じないレベルの劣化性状）が再現でき、この試験条件では屋外曝露に比べて 400 倍以上の加速が可能とされている [10]。

上記した劣化性状やメカニズムなどから、塩水噴霧ストレスによる PV モジュール劣化は、PID に比べて比較的緩やかに進行する可能性が高いと考えられる。この点から、塩水噴霧ストレスを前処理として、高電圧ストレスを負荷する連続試験を実施することで、初期劣化による出力低下ではなく、塩水噴霧ストレスを受ける場所に設置された PV モジュールにおける長期的劣化が再現・加速できる可能性が示唆される。このため、PV モジュールの長期信頼性確保に向けての加速試験方法の具体例構築を目的として、塩水噴霧試験と PID 試験の連続試験を行った。

## II-2. 実験方法

### ①実験用 PV モジュール

本項の実験で使用した PV モジュール（4セルモジュール：40 cm × 40 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（詳細は下記参照）[28]。

PV セル：	多結晶シリコンセル（p 型）、156 mm x 156 mm、t = 180 μm
ガラス：	白板半強化ガラス、400 mm x 400 mm、t = 3.8 mm
封止材：	EVA（Fast Cure）、t = 450 μm
バックシート：	3 層構造シート（T/P/T）、t = 326 μm
配線材料：	バスバー配線                      銅芯・Sn-Pb めっき、w = 1.3 mm 横タブ配線                          銅芯・Sn-Pb めっき（銀入り）、w = 6.0 mm
フレーム：	アルミニウム
端子箱：	樹脂製（バイパスダイオードなし・ポッティング実施）
端面シール材：	シリコーンシーラント（端子箱とバックシート間も本シール材で封止）

### ②塩水噴霧試験

塩水噴霧試験は、2 種の試験規格（JIS H 8502: 1999 [8.1 項] および IEC 61701: 2011）にしたがって実施した（図 II-2-1） [29, 2]。

JIS H 8502:1999（以下、JIS 法と略記）にしたがう塩水噴霧試験においては、5% 塩化ナトリウム水溶液による塩水噴霧工程（1~2 ml/h/80 cm<sup>2</sup>、35°C、2 時間）・乾燥工程（60°C /20~30% RH、4 時間）および湿潤保持工程（50°C />95% RH、2 時間）を 1 サイクルとする塩水噴霧サイクルを 120 サイクル繰り返した。

IEC 61701: 2011（以下、IEC 法と略記）による塩水噴霧試験では、上記と同様の塩水噴

霧工程および湿潤保持工程 (40°C/>90% RH、22 時間) を 4 回繰り返した後に乾燥工程 (23°C /40~55% RH、72 時間) を実施する塩水噴霧サイクルを、当該 IEC 規格で定められる「厳しさ：6」にあたる 8 回繰り返した (塩水噴霧工程・湿潤保持工程は、合計 32 サイクル実施したことになる)。

この塩水噴霧試験においては、発電特性および絶縁試験 (湿潤状態および乾燥状態) を下記の「④ PV モジュール特性解析」にしたがい実施した。

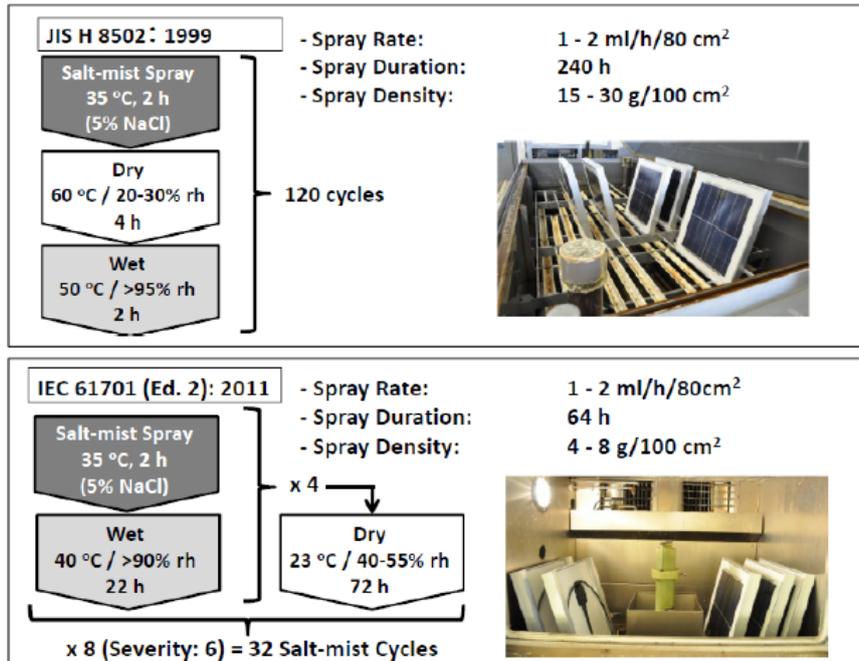


図 II-2-1. 塩水噴霧試験ダイアグラム (写真は試験槽内への PV モジュール設置状態を示す：フロントガラス側およびバックシート側噴霧)

### ③ PID 試験およびリーク電流測定

塩水噴霧試験を実施した PV モジュールは、PID 評価システム (ESPEC、AMI-020-PID および絶縁ラックを具備した恒温恒湿チャンバ [PR-4J] により構成される) を用いて、60°C /85% RH 条件において PID 試験を実施した (フレーム：接地、セル：-1,000 V 印加) [10]。なお、この高電圧ストレスは、当該 PID 評価システムに装備されている「電圧印加遅延機能」を用いて、試験槽内が所定の温度・湿度に到達した後に負荷した。フレームーセル間のリーク電流は、電荷移動量を定量化するために、6 分ごとに測定した。また、塩水噴霧試験と同様に、発電特性および絶縁試験 (湿潤状態および乾燥状態) を、下記の「④ PV モジュール特性解析」にしたがい実施した。

### ④ PV モジュール特性解析

湿潤漏れ電流試験は、IEC 61215: 2005 (10.5 項) にしたがって実施した [30]。本検討で用いた絶縁抵抗測定システムでの検出限界は 10 kΩであり、これは、本検討で用いた PV モジュールの面積から、1.6 kΩm<sup>2</sup>に相当する。なお、湿潤漏れ電流試験における絶縁抵抗測定は、測定温度に大きく影響されるため、あらかじめ各種温度で測定した PV モジュールの絶縁抵抗値から検量線を作成し、22°Cにおける校正値を絶縁抵抗値として用いた。また、乾燥状態の絶縁抵抗値は、IEC 61215: 2005 (10.3 項) にしたがって測定した。

発電特性は、ソーラシミュレータ (SPI-SUN Simulator 1116N) および EL イメージング装置 (ITES、PVX100) を用いて評価した。

供試 PV モジュールを構成するセル中の Rsh 低下部位を検出するために、レーザスキャンニング装置 (NPC、String Laser Machine) を用いた。本装置は、PV モジュールに定電圧バイアス (電圧値可変) を負荷しながら LBIC (Laser-Beam Induced Current) マッピングを行う機能を持っている。この定電圧バイアスにより、レーザスキャンを行っているセルで生じる抵抗が補正できる (他のセルは補助光で照射されているために抵抗は増大しない)。いわば、レーザスキャン中のセルは (通常の光曝露時において) 影が掛かっている状態にあたるために、定電圧バイアスにより、この影の影響を補正しているものと考えてよい。この定電圧バイアスの最適化と数段階の画像処理を行うことで、Rsh 低下部位が明瞭にイメージングできる。

Rsh 低下部位をマッピングする別方法としてロックインサーモグラフィ (Lock-in-Thermography、以下 LIT と略記) を用いた。本検討においては、PV モジュールに負荷する電圧をコントロールする関数発生器と赤外線カメラ (CEDIP Silver-480M) および低電圧電源を接続して、光照射下の電圧負荷によって生じる PV モジュールの温度変化部位をイメージングした。なお、この定電圧負荷は、順方向 (0~+3 V) および逆方向 (0~-3 V) を 0.5 Hz で実施した。

PV モジュールの発電特性パラメータ (光起電流 ( $I_{ph}$ )・逆飽和電流 ( $I_0$ )・ダイオード理想係数 ( $n$ )・ $R_s$ ・ $R_{sh}$ ) は、ソーラシミュレータで測定した電流-電圧データ (I-V データ) から、Zhang らの方法を改変して抽出した [31]。取得した I-V データは、二分法により発電特性パラメータ ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $n$ ) の粗抽出を行った。これらを初期値として、Zhang らの方法にしたがい、Lambert W 関数計算プログラムと Microsoft Excel に搭載されているソルバー機能を利用して発電特性パラメータの精密推定を行った。

## II-3. 実験結果

### ① 塩水噴霧試験

塩水噴霧試験は、塩水噴霧工程・乾燥工程・湿潤保持工程の順序および塩水噴霧量の異なる 2 種の塩水噴霧腐食試験規格にしたがって実施した。JIS 法に規定される塩水噴霧腐食試験方法は金属メッキの腐食耐性を評価する試験方法として規格化されており、ISO 14993 試験規格と同等である [32]。一方、IEC 法に規定される塩水噴霧腐食試験は、IEC 60068-2-52: 1996 をもとに、PV モジュール向け塩水噴霧試験方法として規格化されている [33]。JIS 法においては、塩水噴霧工程・乾燥工程・湿潤保持工程が単純に繰り返され、塩水噴霧工程のすぐ後に乾燥工程が実施されることにより、塩分濃縮にともなうナトリウムイオン・塩化物イオンの金属メッキ層への侵入を促進している。それに対して、IEC 法においては、塩水噴霧工程後に比較的長時間の湿潤保持工程へすぐ移行されることが特徴となっている。

図 II-3-1 に示すように、湿潤状態での絶縁抵抗値は、塩水噴霧を実施していない対照 PV モジュールに対して、JIS 法においては約 2/3、IEC 法においては約 3/4 まで低下したが、IEC 61215: 2005 (10.15 項) に規定する合否判定基準 (40 M $\Omega$ m<sup>2</sup>: 本検討で使用した PV モジュールでは 250 M $\Omega$ に相当) を大幅に上回っていた [30]。また、乾燥状態での絶縁抵

抗値は、この塩水噴霧試験においては低下を確認できなかった。図 II-2-1 に示すように、PV モジュールの塩水を噴霧するサイドを変えて塩水噴霧試験を実施した（以下、受光面から塩水を噴霧した場合をフロントガラス側（F）、反対面から塩水を噴霧した場合をバックシート側（B）と呼称する）。実施した 2 種の塩水噴霧試験（JIS 法・IEC 法）ともに、この噴霧サイドの違いによる湿潤絶縁抵抗の違いは観察されなかった（乾燥絶縁抵抗も同様）。これらの結果は、塩水噴霧ストレス負荷中のフレームーセル間の絶縁抵抗は、塩水噴霧方法や塩水噴霧サイドにより影響されないことを示している。

PV モジュールの発電出力は、塩水噴霧試験（2 方法・2 サイド）により大きな変化を示していない（図 II-3-2(b)）。これらの結果から、一定レベルの絶縁性低下を除いて、PV モジュールの電気特性は、塩水噴霧ストレスより大きな影響を受けないことが確認できた。

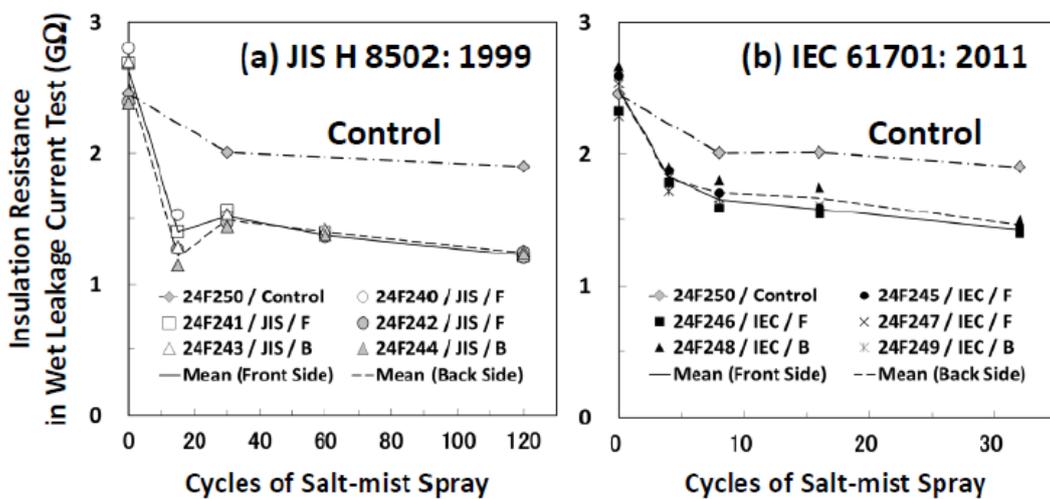


図 II-3-1. 塩水噴霧試験における湿潤抵抗値変化（図中のリストは、以下の様式で各試験モジュールを示す：モジュール ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面）

## ② 塩水噴霧前処理後の PID 試験

塩水噴霧ストレスを負荷した PV モジュール（上記）と塩水噴霧ストレス無負荷モジュール（コントロールモジュール）を用いて PID 試験を実施した。負荷する高電圧ストレスは、欧州の大型太陽光発電システムなどで用いられているシステム電圧(1,000 V)を想定して、フレーム（接地）に対してセルを-1,000 V とした。

PID 試験中の湿潤状態での絶縁抵抗変化を図 II-3-2(a)に示す。IEC 法によりバックシート側から塩水噴霧を行った PV モジュール（IEC/B）を除いた PV モジュールでは、湿潤状態での絶縁抵抗は 1 GΩ以上で推移した。また、乾燥状態で測定した絶縁抵抗は、すべての PV モジュールにおいて低下を認めなかった。PID 試験中に湿潤状態での絶縁抵抗が低下した IEC/B モジュールでは、高電圧負荷後 24 時間以内に約 0.34 GΩ (48 MΩm<sup>2</sup>に相当する)まで低下した（これは、合否判定基準：40 MΩm<sup>2</sup>をやや超えただけの絶縁抵抗値である）。この結果から、IEC/B モジュールは高電圧負荷の初期において、劣化を超越した絶縁破壊を生じているものと結論した。

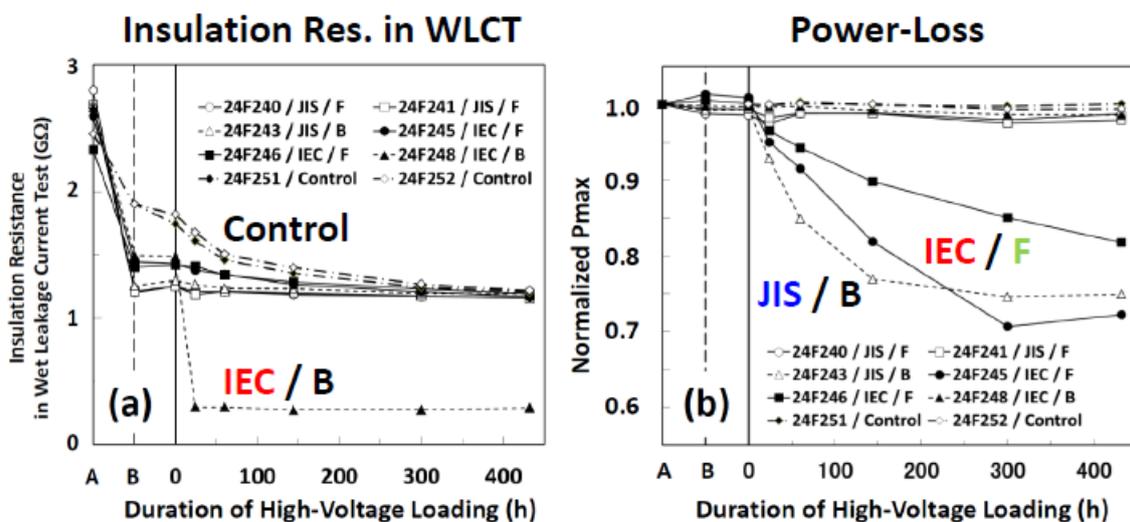


図 II-3-2. PID 試験における湿潤抵抗値変化 (a) および出力変化(b)

図中のリストは以下の様式で各試験モジュールを示す：モジュール

ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面

また横軸中の A・B は、塩水噴霧試験の前後でのそれぞれの値を示す

図 II-3-2(b)に示すように、2 種の塩水噴霧試験中では出力低下は認められないが、高電圧負荷中のみ出力低下が観察された。高電圧負荷中の出力低下は、JIS 法によりバックシート側から塩水噴霧した PV モジュール (JIS/B)、および IEC 法においてフロントガラス側から塩水噴霧した PV モジュール (IEC/F) においてのみ観察され、他のモジュール (JIS/F・IEC/B・コントロールモジュール) では出力低下は生じていなかった。IEC/B モジュールについては、上記したような絶縁破壊により出力低下が発生しなかったものと考えられる。JIS/B モジュールおよび IEC/F モジュールについては、出力低下が高電圧ストレス負荷後 24 時間でも観察され、高電圧ストレス負荷時間にしたい出力低下が大きくなり、その低下は 300 時間ではほぼ安定した。出力低下の時間依存性から、JIS/B モジュールの出力低下率は (IEC/F モジュールに比して) 若干大きいように思われる。コントロールモジュールでは高電圧ストレス負荷によっても全く出力低下が観察されないことから、本検討に用いた PV モジュールは塩水噴霧処理を行わない限り PID 現象を発生しないことが確認できた。つまり、これまで報告されている PID 試験条件においても PID 現象を発生しないコントロールモジュールにおいてさえ、塩水噴霧ストレスを前処理として負荷することで PID 現象を誘導できることが示された。

### ③ PID 試験による電荷移動量と出力低下の関連性

PID 試験 (高電圧ストレス負荷状態) では、フレームからセルに微小なリーク電流が流れる。この微小電流による電荷移動量と出力低下の関係を明らかにするため、正確に微小電流が測定できる PID 評価システムを本検討では用いた。測定した電流値から、既報にしたがい PV モジュールの単位周辺長 (cm) あたり移動した電荷量 (C : Coulomb) を計算した [13]。

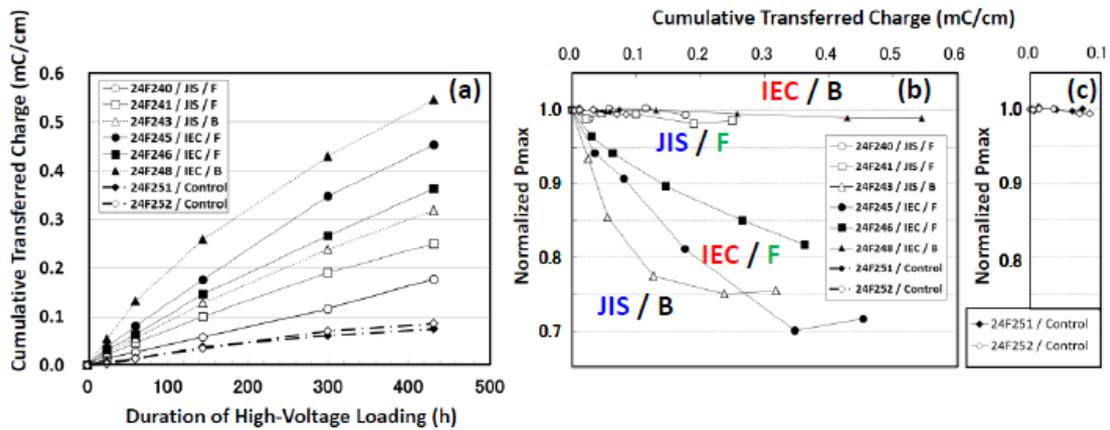


図 II-3-3. PID 試験における電荷移動量 (a) 電荷移動量・出力変化相関 (b・c)

図中のリストは、以下の様式で各試験モジュールを示す：モジュール

ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面

積算電荷移動量の時間依存性を図 II-3-3(a)に示す。IEC/B モジュール（絶縁破壊モジュール）において最大の電荷移動が確認できるとともに、他の PV モジュールでは、高電圧ストレス負荷時間の増大にとともにほぼ直線的に電荷移動量は増大した。この電荷移動量は塩水噴霧方法により異なり、電荷移動量の多い順に、IEC/F > JIS/B > JIS/F > コントロールの各 PV モジュールとなった。加えて、高電圧ストレス負荷段階での電荷移動量は時間依存的に増加し、突発的変化が生じていないことから、この電荷移動量の差異は前処理段階（塩水噴霧ストレス段階）に生じた差異に起因していることが示唆された。

図 II-3-3(b)および図 II-3-3(c)に、電荷移動量と出力変化の相関を示した。コントロールモジュールにおいては、432 時間の高電圧ストレス負荷でも 0.1 mC/cm 以下の電荷移動量であり、その際の出力低下は無視できるレベルであった。IEC/B モジュールについては、432 時間の高電圧ストレス負荷で 0.5 mC/cm を超える電荷移動が生じているが、大きな出力低下は検出されていない。JIS/F モジュールでは、432 時間の高電圧ストレス負荷で 0.2 ~ 0.3 mC/cm の電荷移動が生じているが、この PV モジュールでも 2% 以下の出力低下に留まっている。これらに対して、JIS/B モジュールおよび IEC/F モジュールにおいては、出力低下は電荷移動量とほぼ相関して増大している。これらの結果は、電荷移動量の増大と出力低下のレベルが必ずしも関連するものではなく、むしろ電荷移動量は PID による出力低下には必要な条件ではあるが、PID による出力低下レベルを決定する条件ではないことを示している。

#### ④ 塩水噴霧・PID 連続試験に供された PV モジュールの性状確認

##### ④-1 光照射条件下および暗条件下における電流-電圧 (I-V) カーブ

高電圧ストレス負荷を実施している期間の各 PV モジュールの I-V カーブを測定した (図 II-3-4 および図 II-3-5)。明条件下で測定した I-V カーブ (図 II-3-4) から明らかなように、どの PV モジュールにおいても  $I_{sc}$  と  $V_{oc}$  はほとんど変化していない。また、図 II-3-2(b) で示すように JIS/F・IEC/B およびコントロールの各モジュールでは出力低下は見られないが、I-V カーブにおいても初期状態とほとんど変化を示していない。これらに対して、JIS/B および IEC/F モジュールでは、高電圧ストレス負荷の時間が増大するとともに、Fill Factor が 69% から 52~54% (432 時間負荷) に低下していた。これは、高電圧ストレス負荷による出力低下は、Fill Factor 低下に起因していることを示している。

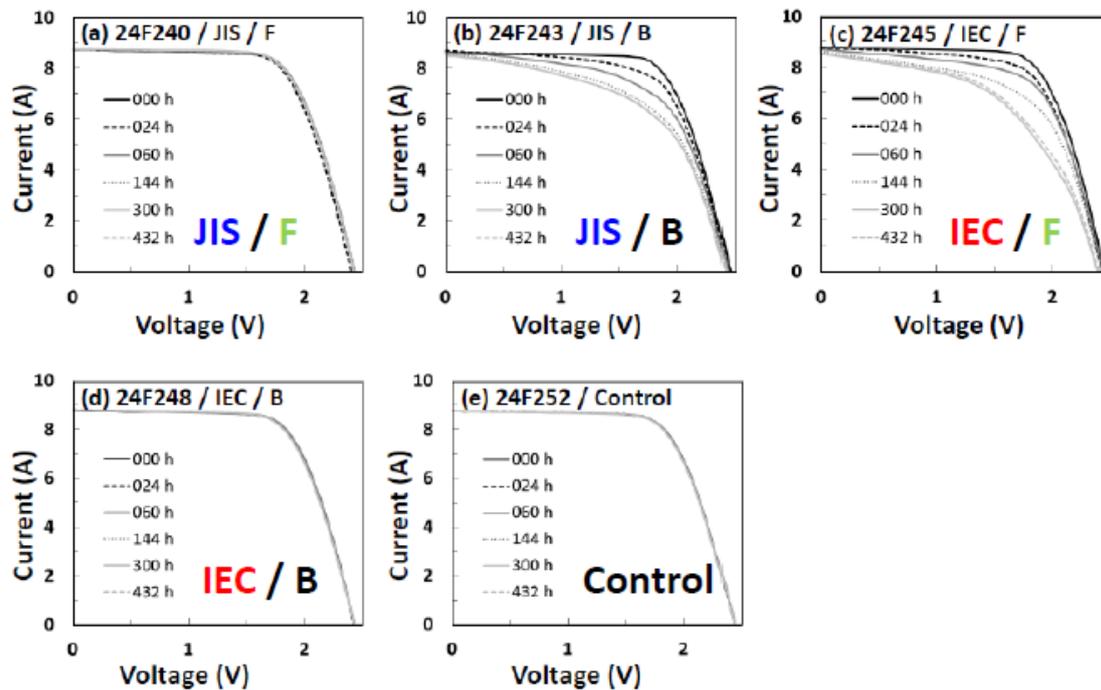


図 II-3-4. PID 試験における明条件下での I-V カーブ (各図のサブタイトルは、以下の様式で各試験モジュールを示す：モジュール ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面)

図 II-3-5 に示す暗条件下での I-V カーブ測定では、測定器の不具合で初期状態を確認できていないが、JIS/B および IEC/F モジュールでは、第 3 象現での I-V カーブの傾きが増大することが明確になった (他のモジュールでは、第 3 象現の電流値はゼロに近い値を示している)。これらの結果は、JIS/B モジュールおよび IEC/F モジュールで観察された高電圧ストレス負荷による出力低下は、セル中の pn 接合の破壊 (並列抵抗の低下) に起因する ohmic 状態出現が影響していることを示している。

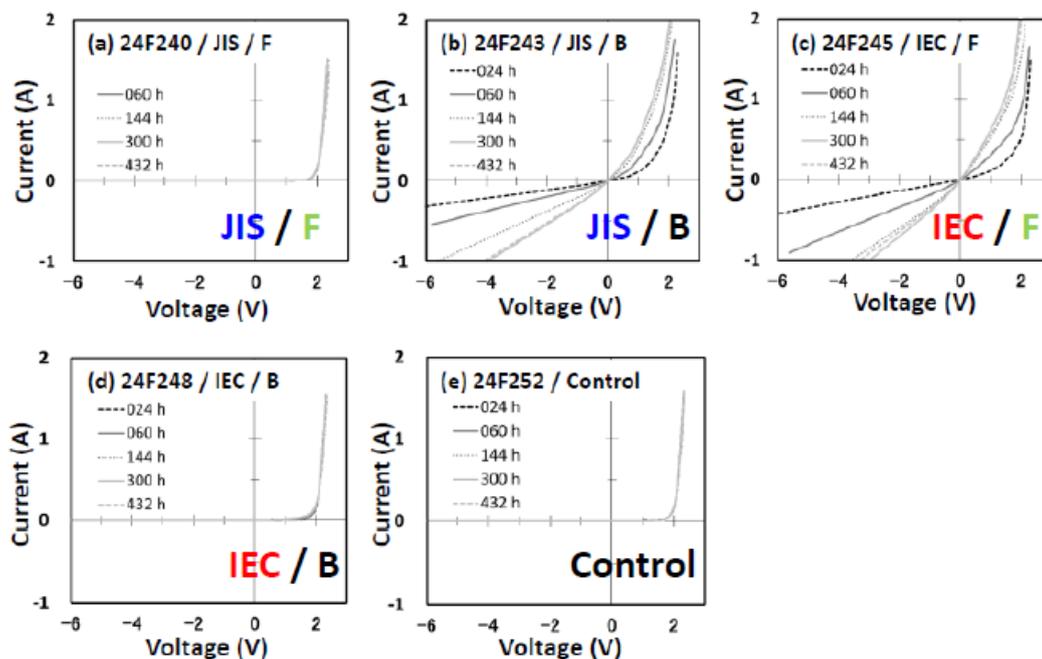


図 II-3-5. PID 試験における暗条件下での I-V カーブ (各図のサブタイトルは、以下の様式で各試験モジュールを示す：モジュール ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面)

#### ④-2 PID 試験中の EL イメージ変化

発電特性の変化がほとんど生じなかった JIS/F・IEC/B・コントロールモジュールでは、PID 試験中のすべての時期において、初期状態と変化のない EL イメージが得られた（図 II-3-6）。一方、大きな出力低下を示した JIS/B・IEC/F モジュールでは、高電圧ストレス負荷によりセルの一部分やセル全体の暗輝度化が進行した（図 II-3-6）。この暗輝度化は、高電圧ストレス負荷：24 時間後には、モジュール端部（バスバーに平行なセル端やモジュール角部）の一部に暗輝度部が観察され、これらがその後増大するとともに、PID 現象の EL イメージでよく見られるセル全体の暗輝度化に移行した。

Salt-Mist	Module ID	Duration of High-Voltage Loading (h)				
		0	24	60	144	300
JIS H 8502 : 1999	F 24F240					
	B 24F243					
IEC 61701 : 2011	F 24F245					
	B 24F248					
Control	- 24F252					

図 II-3-6. PID 試験における EL イメージ（塩水噴霧方法は、試験規格名および噴霧モジュール面で示す：F=フロントガラス面噴霧、B=バックシート面噴霧）

#### ④-3 レーザスキャンニング法および LIT 法による出力劣化モジュールの性状解析

レーザスキャンニング法を用いた PV モジュール解析では、レーザ照射しているセルに 0.2 V の定電圧を負荷して、セル内の Rsh 低下部位を画像化した。これは、I-V カーブにおけるゼロ電圧付近での電流値を画像化していることとなり、本方法において暗輝度部位として検出される部位は Rsh 低下部位と考えられる。図 II-3-7 および図 II-3-8 に示すように、コントロールモジュールでは全く暗輝度部位は検出されなかったが、JIS/B・IEC/F モジュールにおいてはモジュール端部（バスバーに平行なセル端やモジュール角部）に斑点状暗輝度部位が確認できた。これらの暗輝度部位は、バスバーに垂直なセル端では検出されていない。

LIT 法による解析は、セル特性の水平分布を検出する方法として広く用いられている [34, 35]。しかし、本方法の PV モジュールへの適用にあたっては、下記 2 点の課題がある [36]。

- ・セルにおける熱変動はフロントガラスや封止材で拡散され、解像度の良い LIT 像を得ることが困難。

- ・ PV モジュール中に劣化セルが含まれる場合は、この劣化セルが影響して、他のセルに等しくバイアス電圧が負荷されない場合がある。

この第 2 の課題を回避し、出来るだけ多くの劣化部位を検出する目的で、光照射条件下で PV モジュールの LIT 解析を行った。これは、光照射により、劣化セルの健全部分からの発電電流や健全セルからの発電電流が、全セルに（出来るだけ多く）バイアス電圧を負荷することになり、可能な限り多くの劣化部位を検出できるようになることを期待したためである。また、順方向・逆方向の各バイアス電圧で LIT 解析を行うことで、より多くの劣化部位の検出が可能と判断した。この LIT 解析で温度上昇部位として検出される部位は、これらバイアス電圧による電流集中が生じて発熱した部位と考えられる。また、バスバー・フィンガグリッド部における  $R_s$  増大により補完的に他の  $R_s$  健全部位・ $R_s$  低下部位で温度上昇が観察される場合を除いて、この温度上昇はセルの  $R_{sh}$  低下部位を示していると考えられる。図 II-3-7 および図 II-3-8 に示すように、上記レーザスキャンニング解析によって検出された  $R_{sh}$  低下部位と類似した部位（バスバーに平行なセル端やモジュール角部）で、LIT 解析による温度上昇が確認できた（フィンガグリッドとの位置関係を明確に出来るほどの解像度は得られなかった）。

これらの結果から、塩水噴霧後の PID 試験による劣化は、バスバーに平行なセル端やモジュール角部での  $R_{sh}$  低下が起因している可能性が示された。

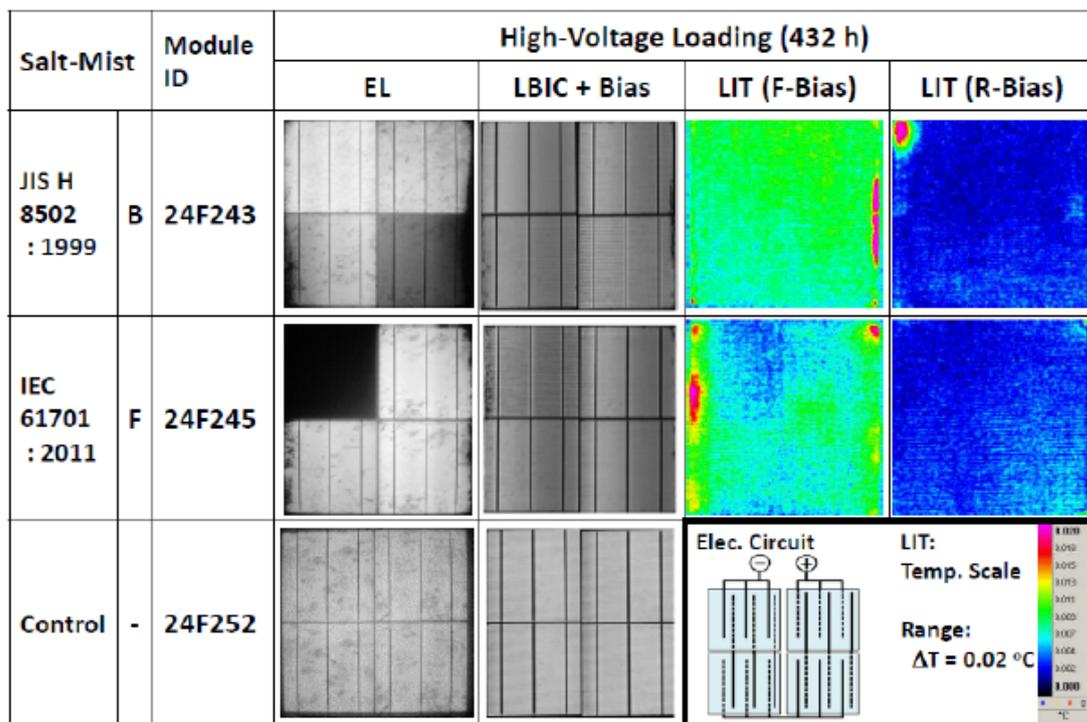


図 II-3-7. PID 試験（432 時間）における EL イメージ・レーザスキャンニング解析イメージ(LBIC + Bias) および LIT イメージ（順方向バイアス[F]・逆方向バイアス[R]）  
 塩水噴霧方法は試験規格名および噴霧モジュール面で示した：  
 F=フロントガラス面噴霧、B=バックシート面噴霧

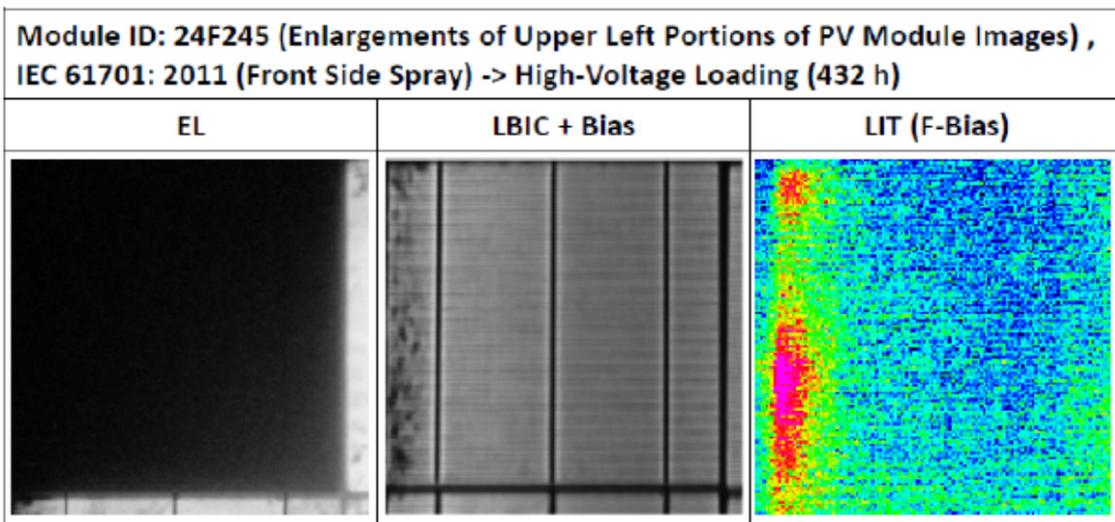


図 II-3-8. PID 試験 (432 時間) における EL イメージ・レーザスキャンニング解析  
イメージ(LBIC + Bias)  
および LIT イメージ (順方向バイアス[F])  
PV モジュール ID および試験方法は、最上段に示した

#### ④-4 PID 試験後の出力低下モジュールの出力回復および再低下

既に報告されているように、PID 現象を発現した PV モジュールでは、出力低下後に高温処理や逆電圧処理を行うことで出力が回復することが知られている。本検討において塩水噴霧ストレス後に高電圧ストレスを負荷して出力低下した PV モジュールにおいても、図 II-3-9 に示すように、4 か月間の室温放置で (完全に初期状態までは回復しないが) 出力回復が確認できた (図 II-3-9 : RT, 4 months カラム)。また、この一部出力が回復した PV モジュールに高電圧ストレス (-1,000 V、100 時間) を負荷することで、出力低下現象が再度発現した (図 II-3-9、-1000 V、100 h カラム)。逆電圧処理についても、この出力低下 PV モジュールに逆方向の高電圧ストレスを負荷することで、出力が一部回復することが確認できた (+1000 V、6 h)。高温処理や逆電圧処理におけるストレスパラメータ (温度・電圧・時間) を変更した場合に引き起こされる出力低下などの詳細は未測定ではあるが、従来知られている PID 現象の特徴的出力変動パターンが、これら塩水噴霧ストレス後に高電圧ストレスを負荷して出力低下した PV モジュールにおいても確認できたものと考えられる。

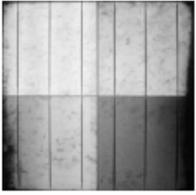
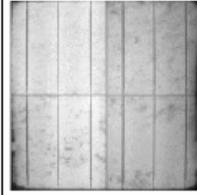
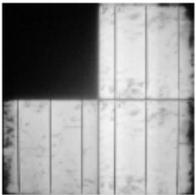
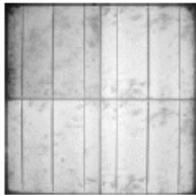
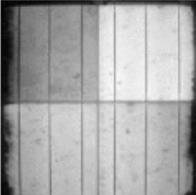
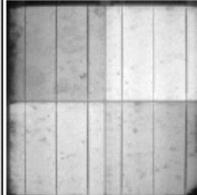
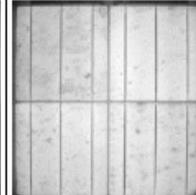
Salt-Mist		Module ID	Evolution of PID in Alternation Manner			
			-1000 V, 432 h	RT, 4 months	-1000 V, 100 h	+1000 V, 6 h
JIS H 8502 : 1999	B	24F243				
		24F245				
IEC 61701 : 2011 Cont.	F	24F246				

図 II-3-9. PID 試験における EL イメージ (回復・再劣化・再回復変化)  
塩水噴霧方法は試験規格名および噴霧モジュール面で示した：  
F=フロントガラス面噴霧、B=バックシート面噴霧

#### ④-5 発電特性パラメータ推定による出力劣化モジュールの性状解析

塩水噴霧ストレス後に高電圧ストレスを負荷した PV モジュールの出力低下原因を明確にするために、各供試 PV モジュールの発電特性パラメータを、ソーラシミュレータで測定した I-V データから抽出した ( $V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot I_{ph} \cdot I_o \cdot n \cdot R_s \cdot R_{sh}$ )。ソーラシミュレータによる I-V データ測定は各 PV モジュールについて 5 回実施し、 $V_{oc}$  および  $I_{sc}$  については平均値を代表値とした。他の発電特性パラメータ ( $I_{ph} \cdot I_o \cdot n \cdot R_s \cdot R_{sh}$ ) は、各 PV モジュールの全測定データから Zhang らの方法を改変して推定した。最も出力低下した PV モジュールにおいても、測定した I-V データと推定発電特性パラメータから計算した I-V データの平均二乗誤差 (RMSE) は 0.07 以内に収まっていた。

これら発電特性パラメータの PID 試験中の変化を図 II-3-10 および図 II-3-11 に示す。出力変化の生じなかったコントロールモジュールなどでは、すべての発電特性パラメータは変化していない(図 II-3-10)。出力低下が観測された JIS/B・IEC/F モジュールでは、 $I_o \cdot n \cdot R_s \cdot R_{sh}$  が変化しており、 $V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot I_{ph}$  に変化は見られなかった (図 II-3-11)。この出力低下 PV モジュールでは、 $R_{sh}$  が高電圧ストレス負荷後 24 時間以内に 1/5 程度に低下し、この  $R_{sh}$  レベルはその後も保持されたままであった。一方、 $I_o \cdot n \cdot R_s$  の大きな変動は、高電圧ストレス負荷後 60~100 時間後から生じており、それぞれ 300 時間で初期値の  $10^6$  倍・2.5~4 倍・10~30%になった。これらの結果から、塩水噴霧ストレス負荷後に高電圧ストレスを負荷した PV モジュールの出力低下は、大きく二つのフェーズに分割できる可能性が示された。すなわち、 $R_{sh}$  の大きな低下を生じる初期フェーズと、 $I_o \cdot n \cdot R_s$  が変動

する後期フェーズの分割が可能であると考えられる。また、図 II-3-4 および図 II-3-5 で示した出力低下にともなう I-V カーブの変化 (ohmic 化) は、これら発電特性パラメータの変化に依存しているものと考えられる (pn 接合の一部で破壊が起こり、 $R_{sh}$  が急速に低下し、その後  $n \cdot I_o$  が増大する過程が想定される)。なお、後期フェーズで生じる  $R_s$  の低下は、上記劣化にともない特定セルの全体的抵抗が低下した結果により生じた見掛けの低下かも知れない。

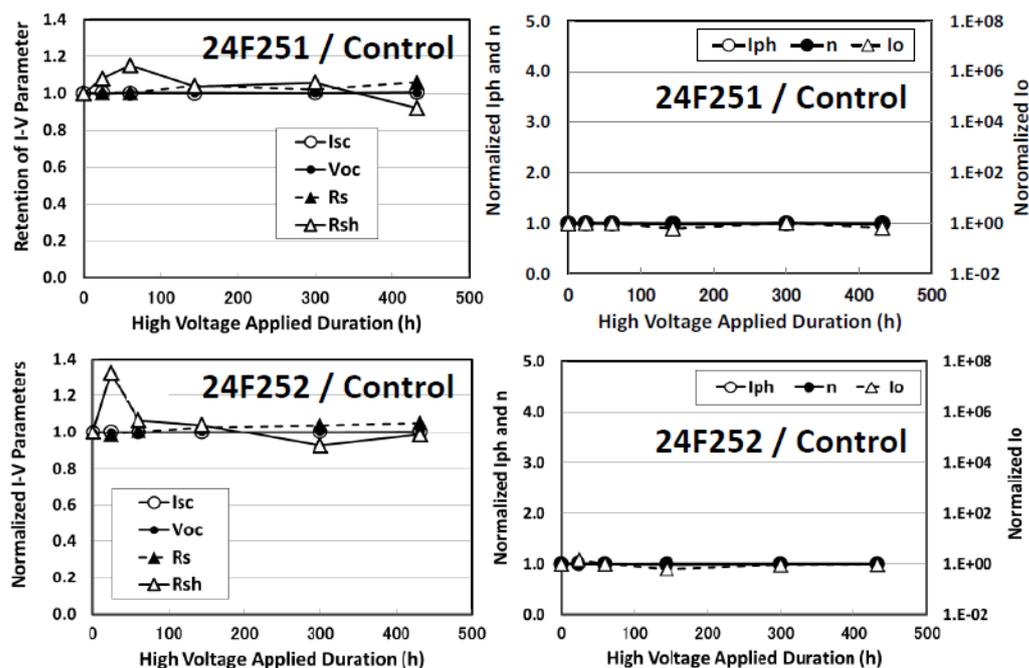


図 II-3-10. PID 試験における発電特性パラメータ変化 (コントロールモジュール) 各図のサブタイトルは以下の様式で各試験モジュールを示す：  
モジュール ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面

塩水噴霧ストレス負荷後に PID 試験を行った全モジュール (コントロールモジュールを含む) における出力変化と各発電特性パラメータ変化 ( $R_{sh} \cdot R_s \cdot I_o \cdot n$ ) の散布図を図 II-3-12 に示した。  $R_s$  低下・  $I_o$  増加および  $n$  増加の各変化率は出力低下と相関する可能性があるが ( $R_s$  に関しては直線相関、  $I_o \cdot n$  に関しては片対数相関)、  $R_{sh}$  低下との相関関係は確認できなかった。また、  $R_{sh}$  が初期値の約 1/3 以下に低下することで、出力低下が発現することが分かる。これは、  $R_{sh}$  変化が本来持つ発電特性への影響であるとも考えられるが (初期状態で高い  $R_{sh}$  レベルにある場合、多少  $R_{sh}$  が低下しても発電能力には大きな影響を与えない)、塩水噴霧ストレス負荷後に PID 試験を行ったことがどのように影響しているかは不明である。

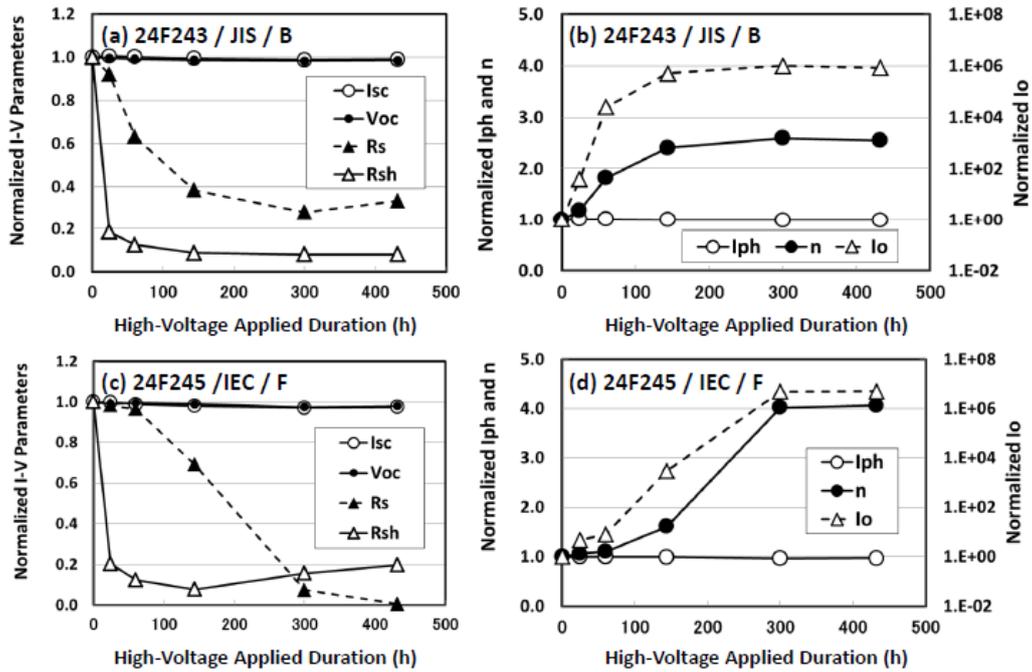


図 II-3-11. PID 試験における発電特性パラメータ変化 (劣化モジュール)  
 各図のサブタイトルは以下の様式で各試験モジュールを示す：  
 モジュール ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面

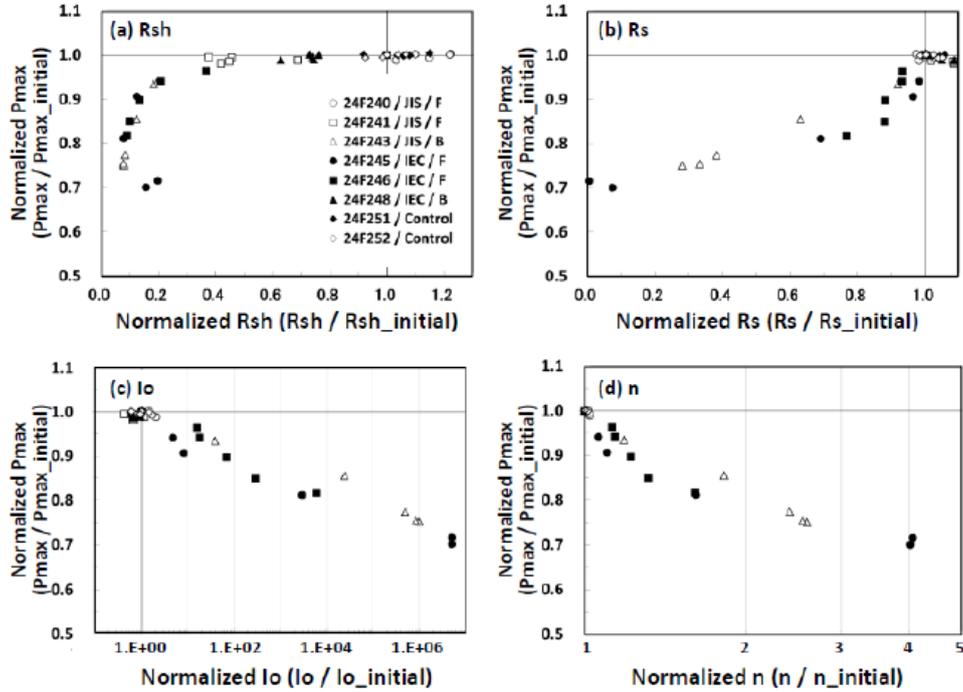


図 II-3-12. PID 試験における発電特性パラメータと出力変化の相関  
 図中のリストは以下の様式で各試験モジュールを示す：  
 モジュール ID / 塩水噴霧方法 / 塩水噴霧面

### II-2-3. 考察

本検討においては、ある種の塩水噴霧ストレスを負荷した後に高電圧ストレス負荷を行うことにより、供試 PV モジュールに大きな出力低下が生じることを示した。また、この出力低下の特徴は（明暗条件下での I-V 特性・EL イメージ・Rsh 低下部イメージ・発電特性パラメータ変化）、これまで報告されている PID 現象による出力低下の特性と極めて類似していた。これらの結果から、塩水噴霧ストレスによる前処理は PID を加速しているものと結論した。

塩水噴霧ストレスについては、噴霧塩水量の効果と塩水噴霧直後の保持環境（乾燥あるいは湿潤）の効果を確認するために、2 種類の塩水噴霧試験を実施した。加えて、霧状の塩水が噴霧される PV モジュール面をフロントガラス側とバックシート側に変えて実験を行った。上記したように、IEC/B モジュールでは、高電圧ストレス負荷後に極めて短時間で絶縁不良が発生した。これは、塩水噴霧ストレス期間中にフレームーセル間に導通ルートが形成されたのち、PID 試験中の高温高湿環境と高電圧負荷が影響して、この導通ルートが固定化されたためと考えられる。なお、この導通ルート固定化により、PID 試験中のリーク電流が他の PV モジュールに比して大きくなるとともに、この導通ルートをリーク電流が主に流れるために出力低下が生じなかったものと推定される。絶縁不良を起こしていない他の PV モジュールの出力低下の傾向は、出力低下が大きい順に「JIS/B  $\geq$  IEC/F > JIS/F」となった。上記の IEC/B モジュールにおける高電圧ストレス負荷すぐの絶縁不良も塩水噴霧前処理と高電圧ストレス負荷の影響と考えられるため、この塩水噴霧・PID 連続試験における劣化の大きさは、大きい順に以下のようにまとめられる。

$$\text{IEC/B} > \text{JIS/B} \geq \text{IEC/F} > \text{JIS/F}$$

JIS 法は、IEC 法に比べて、総塩水噴霧量が約 3.75 倍であるとともに、塩水噴霧工程後は乾燥保持工程に移る（IEC 法では、比較的長い湿潤保持工程が、塩水噴霧工程の直後に実施される）。この塩水噴霧量・塩水噴霧後工程の異なる 2 種の塩水噴霧ストレス負荷の違いから、総塩水噴霧量は劣化の程度とは直接関係なく、塩水噴霧工程後に湿潤保持工程を行う方法で、より劣化が大きいことが強く示唆される（上記の劣化順序を、方法別にまとめると「IEC > JIS」となるため）。また、霧状の塩水を噴霧する PV モジュール面については、上記の劣化順序は「B（バックシート側） > F（フロントガラス側）」とまとめられるため、バックシート側に塩水が噴霧された方が、フロントガラス側に噴霧された場合より、大きな劣化を引き起こしたものと考えられる。フロントガラス側に噴霧した場合でも、霧状の塩水の廻り込みにより、バックシート側にも一定量の塩水が噴霧されることが十分に想定できるため、フロントガラス側噴霧においても（バックシート側には及ばないが）PV モジュールの劣化が誘発されたものと考えられる。これらの結果から、塩水噴霧ストレスによる PID 加速は、塩水噴霧後の湿潤保持およびバックシート側に噴霧された塩分量に依存していることが示唆される。

これまでに、PID を引き起こす重要な因子としてナトリウムイオンが指摘されている。p 型セルを用いた PV モジュールにおいて、高温高湿環境中でフレームがセルに対して高電圧（プラス）となる場合には、フロントガラスから遊離したナトリウムイオンがセル表面に移行し、セル表面の反射防止膜に集積することが報告されている [13, 14, 22~25]。この集積ナトリウムイオンが、セルのバンド構造に影響する結果として PID が発生するという仮

説と、シリコン結晶に存在する積層欠陥を通してセル内にナトリウムイオンが侵入し pn 接合を破壊することで PID が発生するという仮説が、現在提案されている [22~27]。本検討の場合は、コントロールモジュールにおいて高電圧ストレス負荷のみでは出力低下を誘発しなかった点から、フロントガラスから遊離したナトリウムイオンは PID を引き起こすには十分でないことが推定される。本検討の結果を説明する考え方として、外来ナトリウムイオンが、フレームと PV ラミネート（ガラス・封止材・バックシートの積層体）の間隙を通るか、あるいはエッジシール部のシール材中を拡散してセル表面に到達した可能性が考えられる。このような経路でナトリウムイオンが侵入した場合には、総塩水噴霧量および塩水噴霧時間は IEC 法よりも JIS 法で大きいため、劣化レベルは「JIS > IEC」の順と予想される。しかし、上記したように実験結果は「IEC > JIS」であることから、このエッジシール部を通過してのナトリウムイオン侵入は否定される。これに代わる（PID を引き起こす）ナトリウムイオンの供給ルートとして、外部のナトリウムイオンがバックシートを通り、封止材中に拡散する経路が推定される。

現時点では、外来ナトリウムイオンがバックシートと封止材中を移動したという直接的証拠は得られていないが、下記の点から、外来ナトリウムイオンのセル表面への移動は十分に推定可能である。

- ・劣化程度の大きい IEC 法では、バックシート上の大量のナトリウムイオンは、湿潤保持工程で長期間に渡り高湿状態に曝されている。
- ・高湿状態においては、ポリマ材料の非晶部分に存在する分子間隙は、水蒸気やガス・小型イオンが透過するのに十分なサイズである [37]。
- ・上記の分子間隙のようなナノレベルの細孔においては、飽和水蒸気圧が外部より低下しており、浸透した水蒸気は容易に凝縮して水となり、これが細孔内（分子間隙）を満たす[38]。
- ・バックシート中および封止材中のナトリウムイオン濃度は、バックシート上のナトリウムイオン濃度より十分に低い。
- ・バックシート表面に噴霧された塩水は、水に溶解イオン化しており、これらは、バックシート中の分子間隙に形成された水の中に移動することができる（塩水噴霧工程中および湿潤保持工程中）。
- ・バックシート中や封止材中のナトリウムイオン濃度はバックシート上の当該濃度に対して低いため、（セル表面の封止材中を含めて）バックシート中や封止材中に拡散しやすい。このようなナトリウムイオンの拡散は、全封止材中のナトリウムイオンが等濃度になるまで続くと予想される。

このバックシートを透過するナトリウムイオン移動に関する推定は、本検討結果である劣化順序（IEC > JIS）とよく適合している（JIS 法では、塩水噴霧工程後すぐに乾燥工程を実施するために、IEC 法に比べて劣化が抑制されている）。このため、セル上の封止材中にも外来ナトリウムイオンが浸透した結果として、従来から報告されている PID 性状が、本検討でも観察されたものと考えられる。

塩水噴霧ストレス負荷後に高電圧ストレスを負荷したモジュール（JIS/B・IEC/F）では、Rsh 低下部位がモジュール端部（バスバーに平行なセル端やモジュール角部）で確認できた。同様な現象は、Hacke らにより高電圧ストレス負荷状態で屋外曝露した PV モジュール

ルにおいても報告されている [10]。この報告では、屋外曝露した当該 PV モジュールのサーモグラフィ解析を行い、モジュール端部（バスバーに平行なセル端）で Rsh 低下が進行している可能性を示した。この Rsh 低下が推定される位置は、本検討で示したレーザスキャン解析や LIT 解析の結果と類似しているため、このようなモジュール端部（バスバーに平行なセル端）での Rsh 低下パターンは、塩水噴霧ストレスによる PID 加速に限られた特徴ではないものと考えられる。この Rsh 低下パターンが発生する原因は確定できていない。しかし、バスバーに平行なセル端と異なり、バスバーに垂直なセル端では、セルとつながった横タブ線がフレームに最も近くに位置することが、この原因となるものと推定される。バスバーに垂直なセル端では、この横タブ線が高電圧ストレス負荷の際のマイナス電極端となり、フレーム（プラス電極）との間でリーク電流が発生したものと考えられるが、バスバーに平行なセル端ではセルが直接マイナス電極端となり、このセル端付近にリーク電流が集中するものと想定している。この推定は、モジュール角部では、横タブ線がフレームとの間に挿入されていないために、Rsh 低下部位となっている実験結果と良く適合する。

塩水噴霧ストレス後の PID 試験で生じる出力低下は、PID 試験中の電荷移動量と相関していなかった。事実、JIS/B・IEC/F モジュールでは 0.063 mC/cm で 5%以上の出力低下を示しているが、コントロールモジュールを含む他の PV モジュールではほとんど出力低下を示していない。この電荷移動量と出力低下が相関していない現象は、塩水噴霧ストレスを前処理として行ったためではないと考えられる。なぜなら、塩水噴霧ストレスを負荷しない屋内 PID 試験および屋外 PID 試験においても、この非相関が示されているためである [18.19]。これらの既報と本検討での結果から、一定の電荷移動量が PID を引き起こすためには必要ではあるが、PID による劣化レベルは電荷移動量には規定されていないと考えられる。

本検討では、発電特性パラメータを光照射下で得た I-V データから推定した。光照射下で得た I-V パラメータを利用した理由は、以下の 2 点である。

- ・屋外設置された市販 PV モジュールにおいて、発電特性パラメータ推定の元データとなる I-V データは、比較的簡単に取得できないといけない。暗条件下において、逆電圧負荷状態の I-V データを得て Rsh を推定するにはバイパスダイオードを取り外す必要があるが、このダイオードの取り外しは（通常メンテナンスとしては）複雑であるとともに、I-V データの変化を招く可能性もある。
- ・暗条件下 I-V データ取得では、バスバーやフィンガグリッドを流れるバイパス電流は、これらコンタクト部分付近だけで p 層から n 層に流れる。一方、明条件下での I-V データ取得では、この pn 接合層のほぼ全面で発電電流が流れる。この違いにより、暗条件下では、発電状態の明条件下とは異なる発電特性パラメータが推定される可能性がある。

明条件下と暗条件下で取得した I-V カーブから、PID 現象が進行するのにもない、PV モジュールの電気特性は ohmic 化することを示した。また、この ohmic 化は、発電特性パラメータのうち、 $Rsh \cdot I_o \cdot n$  の変化と符合することが確認できた。PID 現象の進行にともなう Rs 減少も観察されたが、これは特定セル中の pn 接合がほとんど破壊されたことにより、この特定セルに流れる電流が増加したため、見掛けの Rs 低下が生じたものと考えている。

なお、PID 試験の後期フェーズでは、極端な pn 接合破壊部位が生じるとともに、Rs 低下と  $I_o \cdot n$  の極めて大きな増大が同時に生じていた。上記した Rs 低下が見掛けの低下であるか否かは、出力劣化モジュールの各々のセルの発電特性から、今後確認しないとイケない。

本検討時点で知る限りにおいて、PID における出力低下過程が 2 フェーズに分かれる点の報告は無い。また、この出力低下は多少の Rsh 低下では生じない点についても報告は無い。ただし、PID 過程の初期に Rsh 低下が生じる点や [7~11, 39]、出力低下レベルと Rsh 低下レベルが相関しない点はすでに報告されている [7, 9]。これらの点から、塩水噴霧ストレス後の PID 試験による出力劣化が 2 フェーズで生じる点が、この塩水噴霧前処理によるか否かは明確には出来ていない。しかし、厳しい試験条件 (85°C/85% RH) で高電圧ストレスを負荷した際には、通常の試験条件で見られる PID モードとは異なる劣化モードが誘発されることが報告されている [8]。本検討で示した後期フェーズの劣化モードは、この厳しい試験条件で見られた劣化モードに該当する可能性もある。

近年、海岸付近にも大型太陽光発電システムの設置が進んでいる。これらの施設で使用される PV モジュールには、塩害を防止するための措置が執られている (たとえば、PV モジュール内への塩分侵入を防ぐための十分なエッジシールなど)。本検討で示したように、もし PV モジュール外のナトリウムイオンがバックシートを透過して PID を誘導するならば、これら PV モジュールには、その長期信頼性を確実にするために、新しい対策を施す必要がある。たとえば、海岸から 20 m あるいは 900 m での飛来塩分量は、それぞれ数十~数 mdd (mg salt/dm<sup>2</sup>/day) と報告されている [40, 41]。また、この飛来塩分量は海岸からの距離にしたがい減少し、海岸直ぐ近くでは 40 mdd 以上、海岸から 1 km で約 10 mdd、2 km で約 5 mdd、4 km で約 2.5 mdd の飛来塩分量が提示されている [42]。本検討において大きな出力劣化を引き起こした IEC 法で噴霧された総噴霧塩分量は 4,000~8,000 md (mg salt/dm<sup>2</sup>) であり、単純にこの噴霧塩分量をもとに計算すると、海岸から 1 km 地点で 1~2 年、2 km 地点で 2~4 年、4 km 地点で 4~9 年で、この総噴霧塩分量に達する。もちろん、この推定は単純計算の結果であり、実際の耐久性を示している訳では無い。しかし、この概算から、海岸付近に設置された PV モジュール内への塩分浸透が大きな脅威になる可能性も示される。

### サブテーマ 1 のまとめ

PV モジュールにおける長期信頼性試験方法の一例を提示するために、長い期間で劣化を生じる要因 (塩水噴霧ストレス) と比較的短期間で劣化を引き起こす要因 (高電圧ストレス) を組み合わせることで、長期要因による劣化が短期要因による劣化を加速する可能性を検討した。これは、PV モジュールの導入初期においては、PV モジュールを構成する部材などが設計性能を保持しているために短期要因による劣化を防止できた場合でも、長期間の稼働により部材性能などが低下することで、短期要因による劣化を防ぐことが困難になる現象を想定している。今回実施した塩水噴霧ストレスと高電圧ストレスに則して言えば、初期設置状態では高電圧ストレスによる PID は発生しないが、長期間の塩水噴霧ストレスに曝され外来ナトリウムイオンが PV モジュール内に十分蓄積した場合には、高電圧ストレスに対する耐性が低下して、PID 現象が発生する可能性を示したと考えられる。

以下に、本検討で得られた具体的成果をまとめる。

- ・PID 試験でも出力低下を示さない PV モジュールにおいても、塩水噴霧・PID 連続試験により大幅な出力低下が生じることを示した。
- ・出力低下が生じたモジュールの特性解析から、この出力低下は PID と極めて類似した特性を持つため、塩水噴霧処理により PID が加速されるものと結論した。
- ・塩水噴霧で加速される PID 現象は、塩水噴霧時の湿潤状態での保存とモジュール裏面に噴霧された塩水量に依存すると考えられた。
- ・バックシートを透過して封止材中に拡散したナトリウムイオンも、(従来報告されている) ガラスから遊離したナトリウムイオンと同様に、PID を誘発する重要な因子であると考えられた。セル・ガラス間の封止材中に拡散したナトリウムイオンがセル表面に移行し PID を引き起こす過程が想定される。
- ・誘起された PID 現象において、セルのバスバー平行側のモジュール側面で  $R_{sh}$  低下傾向が大きいことから、セルのバスバー垂直側のモジュール側面は、横タブ線により高印加電圧から隔離されている可能性が示された。
- ・PID 現象において、高電圧によるリーク電流は「必要条件」ではあるが「充分条件」ではないことが示唆された。
- ・PID 現象の進行にともなうモジュール電気特性のオーミック化が観察され、これは、モジュールの  $R_{sh} \cdot I_o \cdot n$  の変化に依存していた。
- ・PID 現象の進行にともないモジュール  $R_s$  の低下が確認されたが、これは特定のセルにおいて導電性が上昇した結果として、見掛けの直列抵抗低下が生じた結果と考えられる(更なる検討が必要ではあるが)。
- ・PID 現象の進行は、1)初期の  $R_{sh}$  低下、2)引き続きおこる  $I_o$  変化・ $n$  の変化の 2 フェーズに分割される可能性が示された。
- ・PID 現象における出力低下は、 $I_o$  変化・ $n$  変化および  $R_s$  変化とは相関性を示すが、 $R_{sh}$  変化については相関しない。
- ・海岸に隣接して設置された PV モジュールでのバックシートを介した塩分浸透は、PID による出力低下を引き起こす可能性がある。

## 謝辞

本検討は、下記の方々との議論およびサポートに負う部分大きい。各位のご協力に感謝申し上げます。

JFE テクノリサーチ株式会社

株式会社エヌ・ピー・シー

独立行政法人産業技術総合研究所

福島再生可能エネルギー研究所

西山 直樹氏・宇城 工氏

吉野 征治氏・渡部 信氏

白澤 勝彦氏

## 参考文献

1. Mathiak G, Althaus J, Menzler S, Lichtschläger L, Herrmann W, PV module corrosion from ammonia and salt mist – experimental study with full-size modules, Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, 24-28 September 2012; 3536 -3540.
2. International Electrotechnical Commission, Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules, CEI/IEC 61701:2011, Geneva, Switzerland, 2011.

3. Schinköthe P, Nieland S, Michael J, Kugler M, PV modules and components under extraordinary environmental conditions using the example of sodium chloride atmospheres, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September 2011; 3504-3508.
4. Ross RG, Smokler MI, Electricity from photovoltaic solar cells: flat-plate solar array project final report, Volume VI: Engineering sciences and reliability (JPL Publication 86-31), National Aeronautics and Space Administration: Springfield, USA, 1986: 19-30.
5. del Cueto JA, McMahon TJ, Analysis of leakage currents in photovoltaic modules under high-voltage bias in the field, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2002; 10: 15-28.
6. Dhare NG, Pethe SA, Kaul A, Outdoor monitoring and high voltage bias testing of PV modules as necessary test for assuring long term reliability, Proceedings of SPIE, San Diego, USA, 2009; 74120S.
7. Pingel S, Frank O, Winkler M, Daryan S, Geipel T, Hoehne H, Berghold J, Potential induced degradation of solar cells and panels, Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, USA, 20-25 June 2010; 2817-2822.
8. Hacke P, Terwilliger K, Glick S, Trudell D, Bosco N, Johnston S, Kurtz S, Test-to-failure of crystalline silicon modules, Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, USA, 20-25 June 2010; 244-250.
9. Berghold J, Frank O, Hoehne H, Pingel S, Richardson B, Winkler M, Potential induced degradation of solar cells and panels, Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 September 2010; 3753-3759.
10. Hacke P, Smith R, Terwilliger K, Glick S, Jordan D, Johnston S, Kempe M, Kurtz S, Testing and analysis for lifetime prediction of crystalline silicon PV modules undergoing degradation by system voltage stress, Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, USA, 3-8 June 2012; 1-8.
11. Schütze M, Junghanel M, Koentopp MB, Cwikla S, Friedrich S, Müller JW, Wawer P, Laboratory study of potential induced degradation of silicon photovoltaic modules, Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, USA, 19-24 June 2011; 821-826.
12. Hacke P, Glick S, Johnson S, Reedy R, Pankow J, Terwilliger K, Kurtz S, Influence of impurities in module packaging on potential-induced degradation, Presented at the 22nd Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes, Vail, USA, 22-25 July 2012.
13. Hacke P, Kempe M, Terwilliger K, Glick S, Call N, Johnston S, Kurtz S, Bennett I, Kloos M, Characterization of multicrystalline silicon modules with system bias voltage applied in damp heat, Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 September 2010; 3760-3765.
14. Koch S, Seidel C, Grunow P, Krauter S, Schoppa M, Polarization effects and tests for crystalline silicon cells, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September 2011; 1726-1731.
15. Hoffmann S, Koehl M, Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014; 22: 173-179.
16. Hacke P, Terwilliger K, Smith R, Glick S, Pankow J, Kempe M, Kurtz S, Bennett I, Kloos M, System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test, Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, USA, 19-24 June 2011; 814-820.
17. Schütze M, Junghanel M, Friedrichs O, Wichtendahl R, Scherff M, Müller J, Wawer P, Investigations of potential induced degradation of silicon photovoltaic modules, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September 2011; 3097-3102.
18. Koch S, Nieschalk D, Berghold J, Wendlandt S, Krauter S, Grunow P, Potential induced degradation effects on crystalline silicon cells with various antireflective coatings, Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, 24-28 September 2012; 1985-1990.
19. Lechner P, Sanchez D, Geyer D, Mohring HD, Estimation of time to PID-failure by characterisation of module leakage currents, Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, 24-28 September 2012; 3152-3156.
20. Kambe M, Hara K, Mitarai K, Takeda S, Fukawa M, Ishimaru M, Kondo M, Chemically strengthened cover glass for preventing potential induced degradation of crystalline silicon solar cell, Presented at the 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, USA, 16-21 June 2013.
21. Koch S, Berghold J, Nieschalk D, Seidel C, Okoroafor O, Lehmann S, Wendlandt S, Potential induced degradation effects and tests for crystalline silicon cells, Presented at Photovoltaic Module Reliability Workshop 2012, Golden, USA, 28 February - 1 March 2013.
22. Nagel H, Possible causes for PID of silicon cells, Presented at SOPHIA Workshop PV-Module Reliability, Lugano, Switzerland, 3-4 May 2012.
23. Naumann V, Hagendorf C, Grosser S, Werner M, Bagdahn J, Micro structural root cause analysis of potential induced degradation in c-Si solar cells, Energy Procedia, 2012; 27: 1-6.
24. Bauer J, Naumann V, Großer S, Hagendorf C, Schütze M, Breitenstein O, On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells, Physica Status Solidi Rapid Research Letters, 2012; 6: 331-333.
25. Naumann V, Lausch D, Großer S, Werner M, Swatek S, Hagendorf C, Bagdahn J, Microstructural analysis of crystal defects leading to potential-induced degradation (PID) of Si solar cells, Energy Procedia, 2013;

- 33: 76-83.
26. Naumann V, Lausch D, Graff A, Werner M, Swatek S, Bauer J, Hähnel A, Breitenstein O, Großer S, Bagdahn J, Hagendorf C, The role of stacking faults for the formation of shunts during potential-induced degradation of crystalline Si solar cells, *Physica Status Solidi Rapid Research Letters*, 2013; 7: 315–318.
  27. Naumann V, Lausch D, Hähnel A, Bauer J, Breitenstein O, Graff A, Werner M, Swatek S, Großer S, Bagdahn J, Hagendorf C, Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014; 120 (A): 383–389.
  28. Aoki Y, Okamoto M, Masuda A, Doi T, Tanahashi T, Early failure detection of interconnection with rapid thermal cycling in photovoltaic modules, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012; 51: 10NF13.
  29. Japanese Standards Association, Methods of corrosion resistance test for metallic coatings, JIS H 8502:1999, Tokyo, Japan, 1999.
  30. International Electrotechnical Commission, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval, CEI/IEC 61215:2005, Geneva, Switzerland, 2005.
  31. Zhang C, Zhang J, Hao Y, Lin Z, Zhu C, A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve, *Journal of Applied Physics*, 2011; 110: 064504 .
  32. International Organization for Standardization, Corrosion of metals and alloys - Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, "dry" and "wet" conditions, ISO 14993:2001, Geneva, Switzerland, 2001.
  33. International Electrotechnical Commission, Environmental testing - Part 2: Tests - Test Kb: Salt mist, cyclic (sodium, chloride solution), CEI/IEC 60068-2-52: 1996, Geneva, Switzerland, 1996.
  34. Sugianto A, Breitenstein O, Tjahjono BS, Lennon A, Mai L, Wenham SR, Impact of localized regions with very high series resistances on cell performance, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2012; 20: 452-462.
  35. Breitenstein O, Illuminated versus dark lock-in thermography investigations of solar cells, *International Journal of Nanoparticles*, 2013; 6: 81-92.
  36. Breitenstein O, Straube H, Lock-in thermography investigation of solar modules, *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September 2011; 1451-1453.*
  37. The Society of Polymer Science, Japan, *Polymers and Water* (in Japanese), Kyoritsu Shuppan; Tokyo, Japan, 1995.
  38. Charlaix E, Ciccotti M, Capillary condensation in confined media, In *Handbook of Nanophysics: Principles and Methods*, Ed. Sattler K, CRC Press; Boca Raton, USA, 2010; 12-1~12-17.
  39. Taubitz C, Schütze M, Koentopp MB, Towards a kinetic model of potential-induced shunting, *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, 24-28 September 2012; 3172-3176.*
  40. 山田義智、大城武、榊田佳寛、伊部博、海岸から飛来する塩分量の数値解析、*コンクリート工学年次論文集*、千葉、日本、1996 : 945-950.
  41. 佐藤國雄、笠原隆祐、塩野計司、移流沈降領域における飛来塩分量と風速の関係、*コンクリート工学年次論文集*、京都、日本、2003 : 851-856.
  42. 片脇清士、守屋進、箕作光一、飛来塩分量の特性と測定方法、*プレストレスコンクリート* 1985; 27: 68-73.  
(エスペック株式会社：棚橋 紀悟)

## サブテーマ 2 電圧誘起劣化 (PID) のメカニズム解明

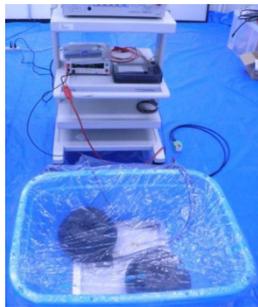
近年、電位差起因の劣化（電圧誘起劣化、Potential Induced Degradation; PID）が問題となっている。PID の劣化メカニズムは諸説あるが、まだ明確でない。本コアテーマでは PID のメカニズム解明を通じて、適正な PID 試験法を開発することを目的とする。

### II-3. 試験方法

表 II-3-1 に PID の各試験条件を、図 II-3-1 に各試験時の外観を示す。浸漬法は PI-Berlin が提案している方法の一つをベースとしているが、相違点として受光面が乾くことなく水を満たすために、モジュールの受光面を下にして水に浸漬させるという独自の手法である。チャンバー法は IEC 62804 の原案となっている条件を採用した。AIST 法は産業技術総合研究所にて実施されている方法の一つであり、この中では最も過酷な条件である。

表 II-3-1. PID 試験条件

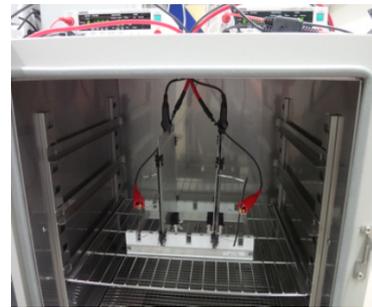
試験名	浸漬法	チャンバー法	AIST 法
温度	25℃	60℃	85℃
湿度	制御無し	85%RH	制御無し
印加電圧	フレームに対して 発電回路に -1000V	フレームに対して 発電回路に -1000V	アルミ板に対して 発電回路に -1000V
受光面の電極	水道水	湿度環境	アルミ板
試験時間	168 h	96 h	1 h~
試験槽	プラスチック容器	恒温恒湿槽	恒温槽
電源	絶縁抵抗計 TOS7200 (菊水電子工業製)		



浸漬法



チャンバー法



AIST 法

図 II-3-1. 各試験方法の試験時の外観

#### II-4. 予備試験の結果

本試験を実施する前に、コンソーシアム標準部材を用いた4セルモジュールを用いてPID発生を確認するための予備試験を実施した。試験方法は浸漬法としているが、試験時間は168 hに限定していない。また、PIDは自然放置や逆電圧印加により回復することが知られている。この予備試験で室温放置後、逆電圧を印加し、回復による効果も確認した。逆電圧印加の試験条件は印加電圧を+1000Vにすること以外は浸漬法と同様である。

図 II-4-1 に試験前後の Pmax 推移を、図 II-4-2 に試験前後の I-V カーブを、図 II-4-3 に試験前後の EL 画像を示す。

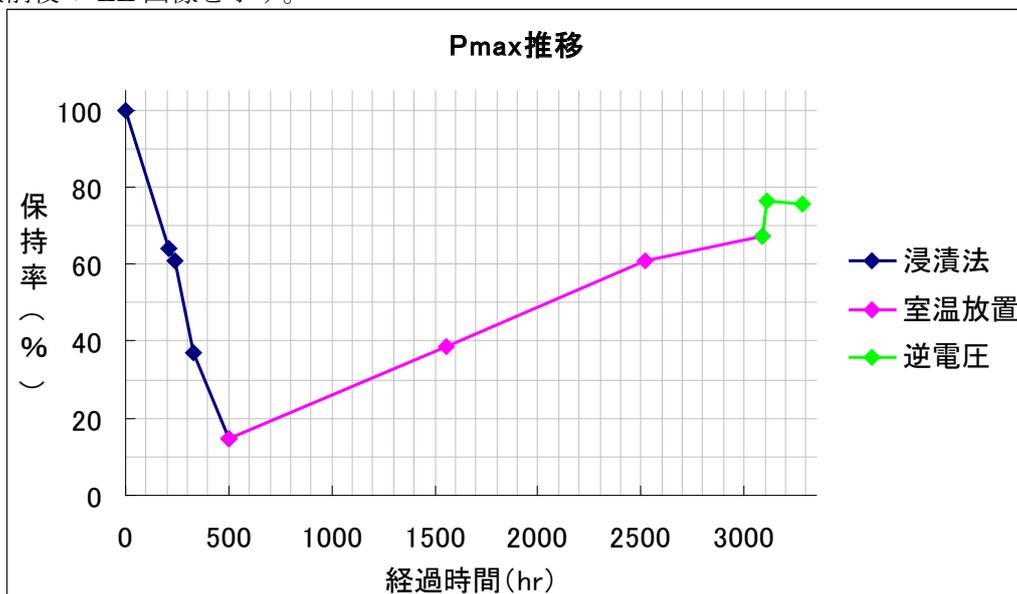


図 II-4-1. 試験前後の Pmax 推移

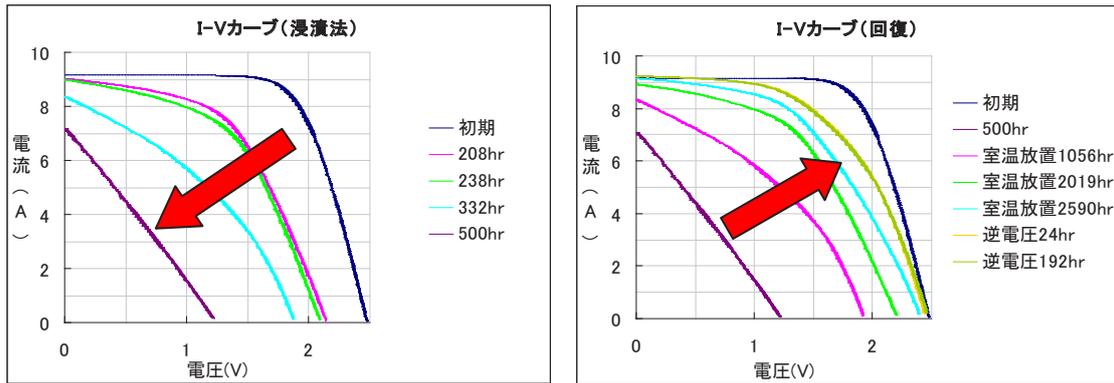


図 II-4-2. 試験前後の I-V カーブ

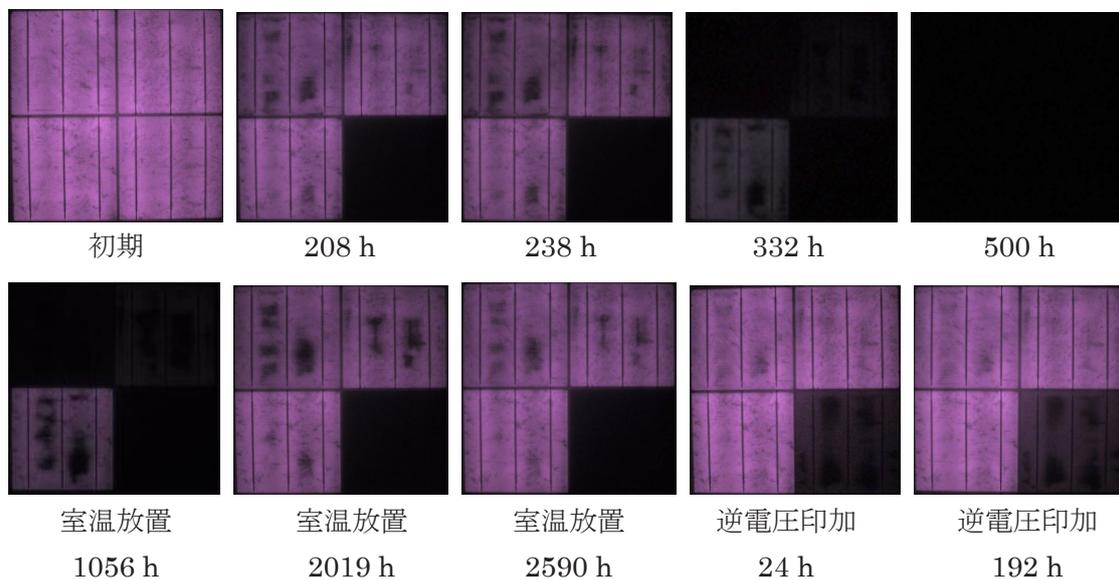


図 II-4-3. 試験前後の EL 画像

浸漬法を実施したところ、500 h で Pmax 保持率が 15% まで概ね直線的に低下した。その後、2590 h 室温放置すると 67% まで概ね直線的に回復した。さらにその後、24 h 逆電圧印加すると 76% まで回復したが、192 h まで継続してもそれ以上の回復は見られなかった。I-V カーブから、試験が進むにつれて  $FF \rightarrow V_{oc} \rightarrow I_{sc}$  と低下していき、回復過程ではその逆の順で回復していくことがわかる。EL 画像からセルが部分的に暗くなるモードと全体的に暗くなるモードがあり、部分的に暗くなるモードがある程度進むと全体的に暗くなることわかる。回復はその逆であるが、暗部が回復しない箇所もある。逆電圧で回復しない箇所はセル内部で何か不可逆な異常が起こっていることを示唆する。

図 II-4-4 に浸漬法 208 h までのモジュールの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、試験室設備の関係上、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-4-5 に示した様な関係があることが分かっている。図 II-4-4 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 h 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。

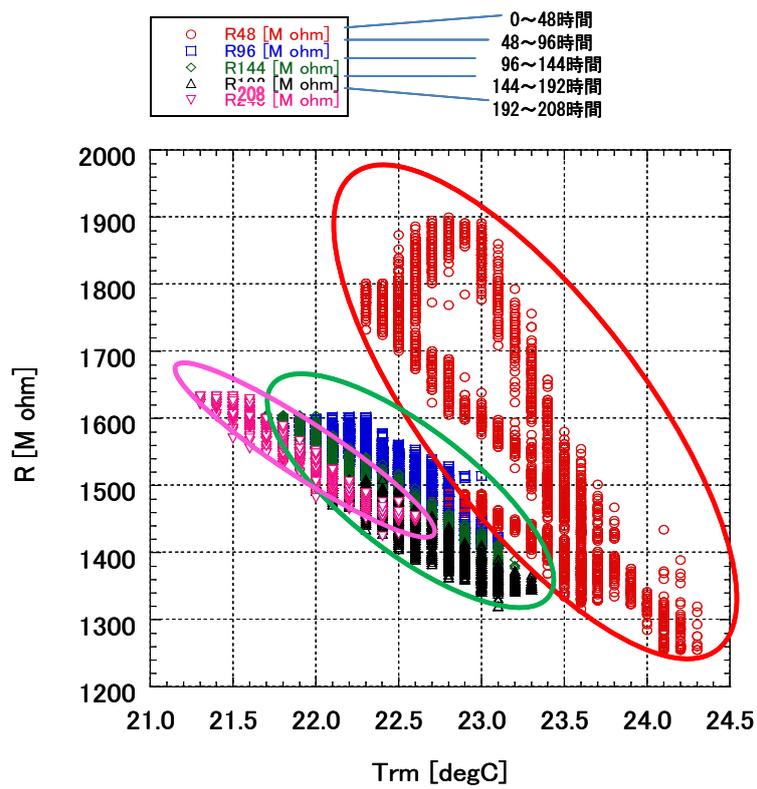


図 II-4-4. 温度と絶縁抵抗の関係

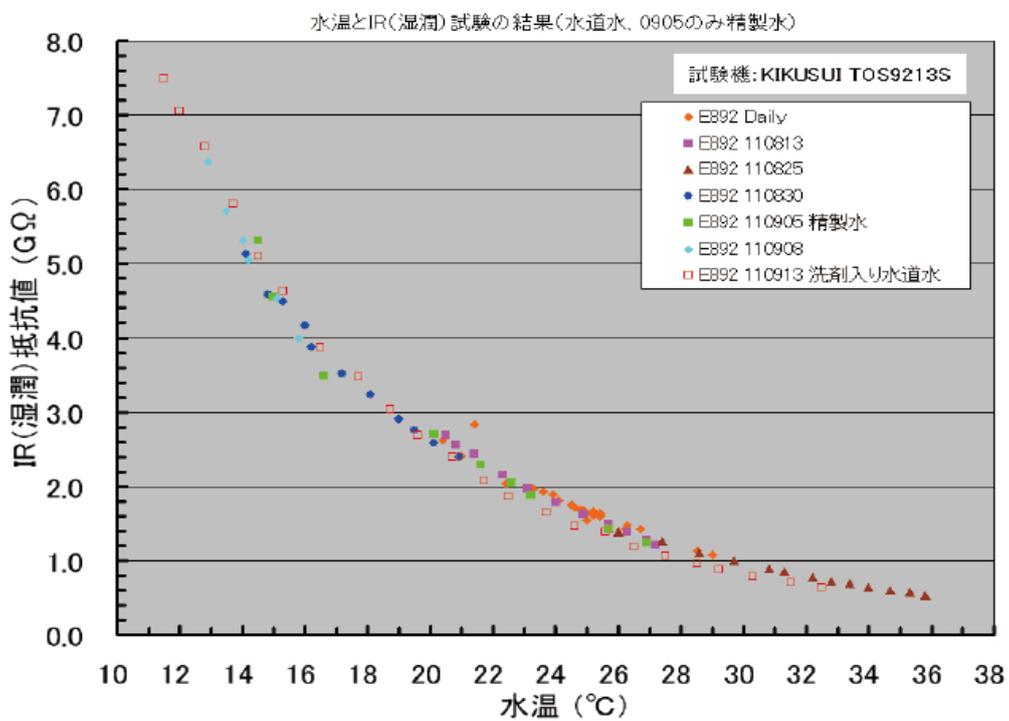


図 II-4-5. 水温と湿潤抵抗の関係 (第 I 期成果報告書より)

## II-5. 反射防止膜の効果

PID 対策の一つとして、モジュールの部材を最適化することが挙げられるが、セルの場合は反射防止膜をコントロールすることで PID を抑制できると言われている。ここでは、反射防止膜の成膜条件を変えたセルをモジュール化して PID 試験、評価を実施した。

### II-5-1. 試験体

表 II-5-1 に成膜条件を示す。異なる 3 種類の成膜装置を使用し、これにより多結晶、単結晶、屈折率や反射防止膜構成の違うセルを作製した。これらのセルをモジュール化し、浸漬法、AIST 法、またはその両方を実施した。

表 II-5-1. 成膜条件

記号	装置電極構成／成膜速度	セル	膜構成	屈折率
A	250 kHz ホローカソード／高速	多結晶	SiN 1 層	2.10
B	250 kHz 平行平板／中速	多結晶	SiN 1 層	2.09
C	40 kHz 平行平板／低速	多結晶	SiN 2 層	2.13 (Ave.)
D	250 kHz ホローカソード／高速	単結晶	SiN 1 層	2.04
E	250 kHz ホローカソード／高速	単結晶	SiN 1 層	2.19
F	250 kHz ホローカソード／高速	単結晶	SiN 1 層	2.10
G	250 kHz ホローカソード／高速	単結晶	SiN 2 層	2.13 (Ave.)

### II-5-2. PID 試験結果

図 II-5-1 に各モジュールの PID 試験前後の Pmax 保持率を、図 II-5-2 に各モジュールの PID 試験前後の I-V カーブを、図 II-5-3 に各モジュールの PID 試験前後の EL 画像を示す。浸漬法では D 以外のモジュールの差は見られなかったが、AIST 法では顕著な差が見られた。D のような低屈折率膜は極端に低下し、Pmax 保持率はほぼ 0% となった。また E のような高屈折率膜は高い PID 耐性を持つ。同じ成膜装置を使用し、膜層数を変えた F と G は若干 2 層の方が Pmax 保持率が高い結果となった。単結晶よりも多結晶の方が Pmax 保持率が高い傾向にあり、多結晶内でも成膜装置により差が見られた。

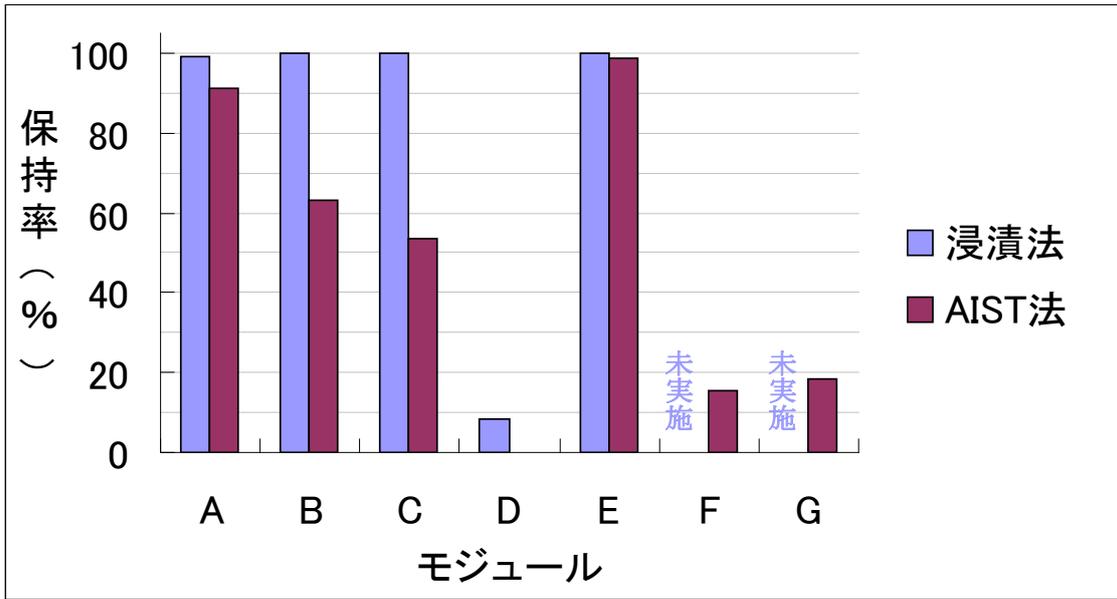


図 II-5-1. 各モジュールのPID試験後のPmax保持率

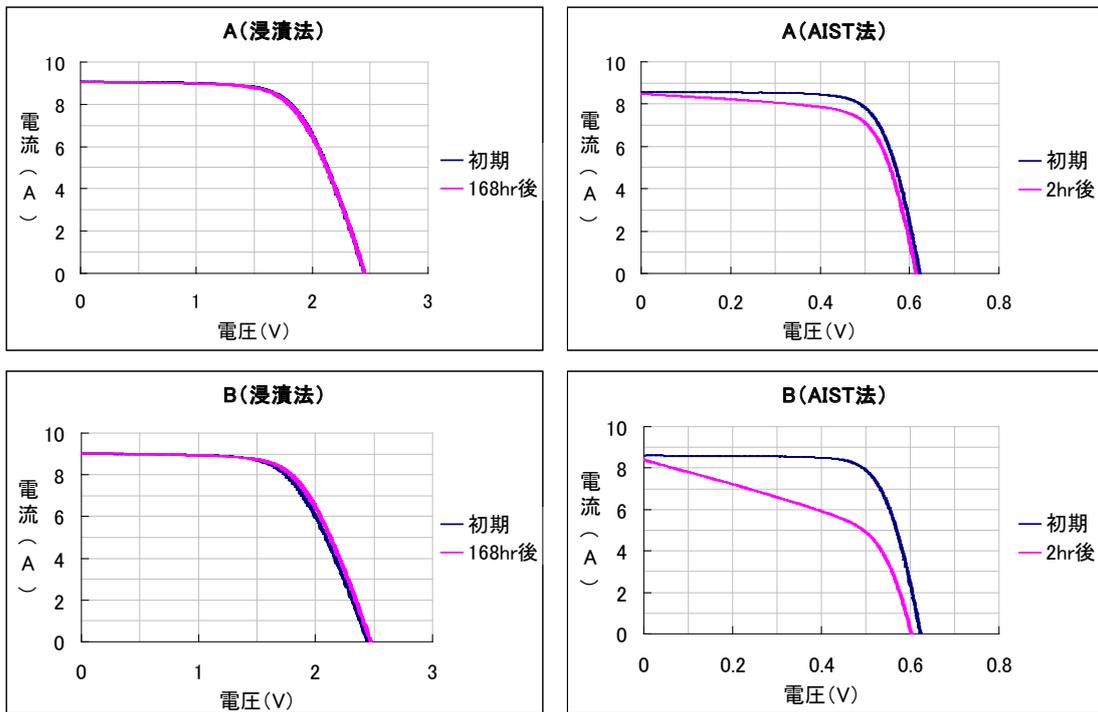


図 II-5-2. 各モジュールのPID試験前後のI-Vカーブ

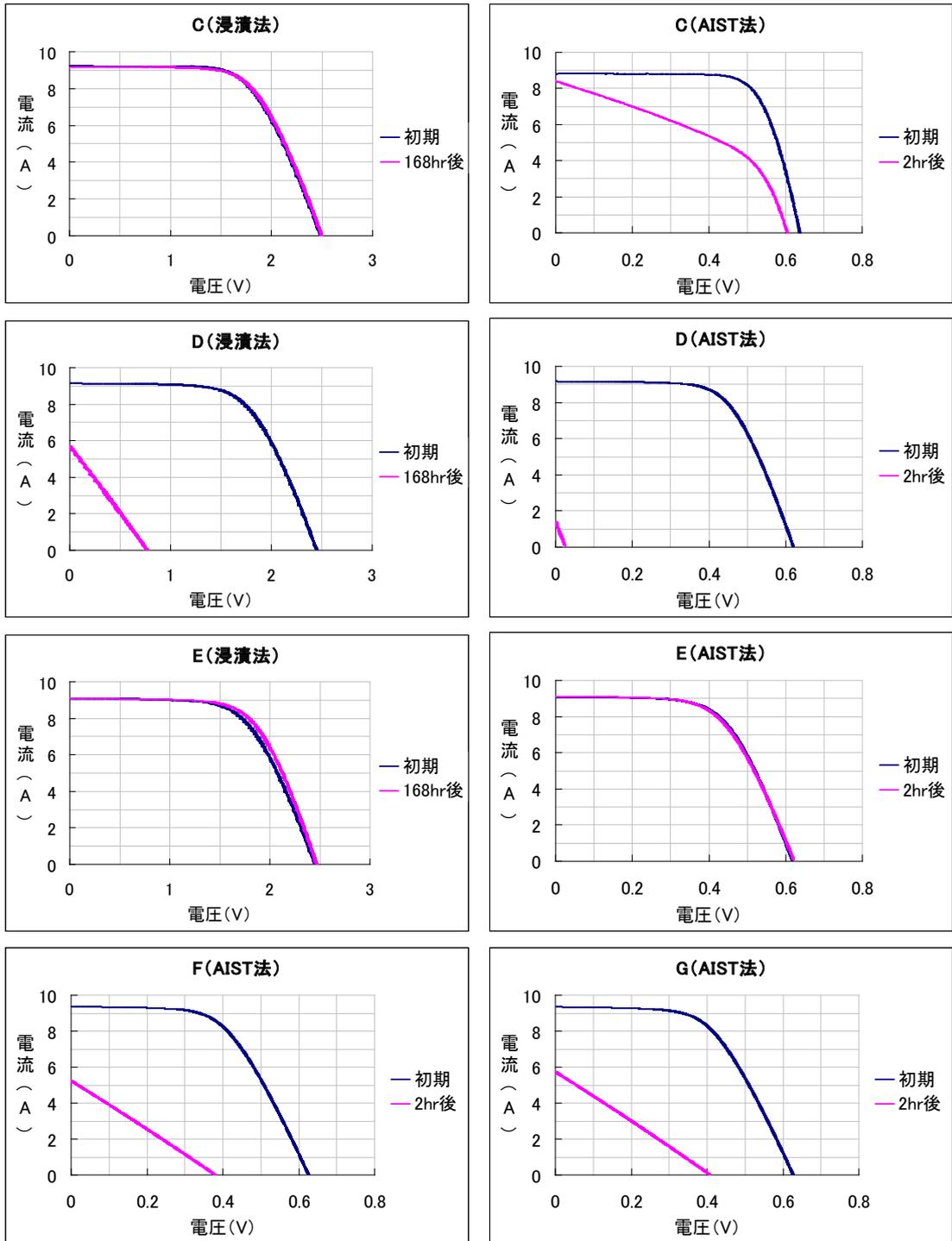


図 II-5-2. 各モジュールの PID 試験前後の I-V カーブ (つづき)

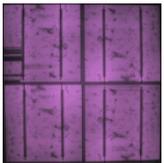
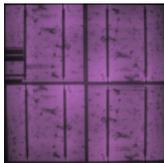
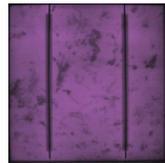
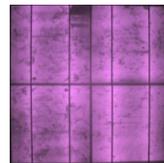
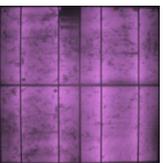
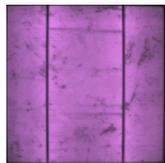
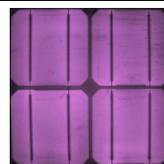
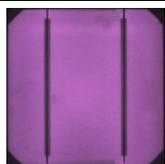
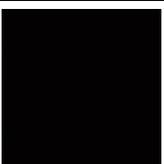
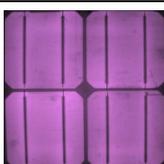
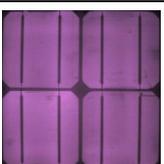
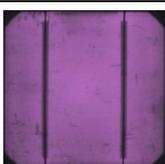
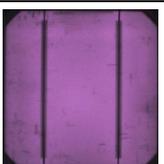
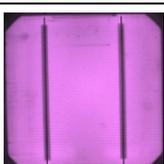
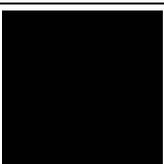
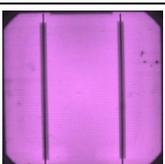
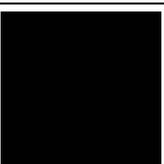
A (浸漬法)		A (AIST 法)	
初期	168 h 後	初期	2 h 後
			
B (浸漬法)		B (AIST 法)	
初期	168 h 後	初期	2 h 後
			
C (浸漬法)		C (AIST 法)	
初期	168 h 後	初期	2 h 後
			
D (浸漬法)		D (AIST 法)	
初期	168 h 後	初期	2 h 後
			
E (浸漬法)		E (AIST 法)	
初期	168 h 後	初期	2 h 後
			
F (AIST 法)		G (AIST 法)	
初期	2 h 後	初期	2 h 後
			

図 II-5-3. 各モジュールの PID 試験前後の EL 画像

### II-5-3. 反射防止膜の膜質評価

屈折率により PID 耐性に大きな差が出た理由として、反射防止膜の導電性の違いが考えられる。図 II-5-4 に V-Q (voltage – corona charge) 測定の結果を示す。縦軸は表面電圧を膜厚で除した値を示している。

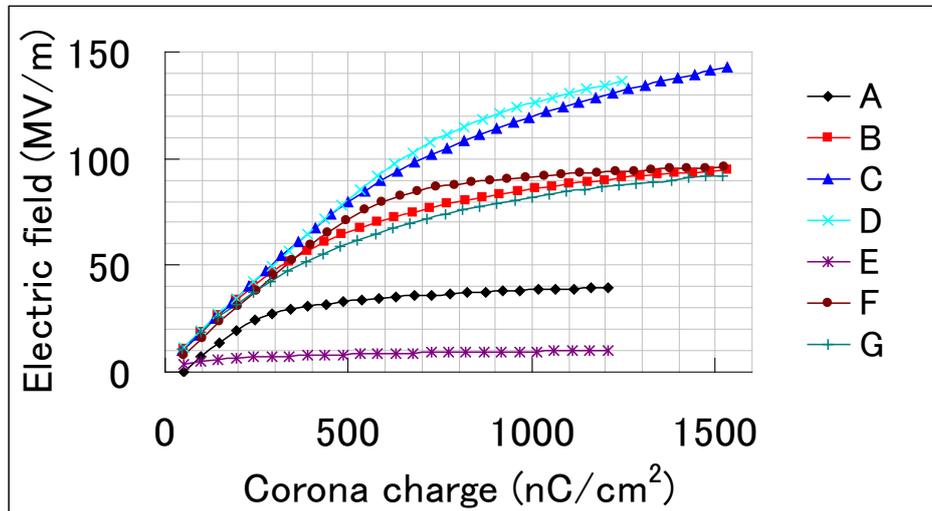


図 II-5-4. V-Q 測定結果

多結晶 3 種類で成膜装置違い (A~C) を比較すると、A の飽和電界が一番低く、反射防止膜の導電率が一番高いことを示す。これは PID の試験結果と相関があり、膜の導電率が高いほど PID 耐性が強い傾向にある。一般的に屈折率が高い方が Si リッチとなり、膜の導電率は上がる。しかし、A と B はほぼ同じ屈折率であり、C は A、B よりも高い屈折率であるにもかかわらず、A の導電率が最も高かった。これは成膜装置 (成膜条件) の違いにより導電率に差が生じ、それが PID 耐性の差に繋がったと考えられる。

単結晶 3 種類で屈折率の違い (D~F) を比較すると、屈折率が低い方ほど飽和電界が大きい。また膜層数違い (F、G) を比較すると二層の G の方が若干飽和電界が小さい。これらは多結晶と同じく、PID の試験結果と相関があり、膜の導電率が高いほど PID 耐性が強い傾向にある。

単結晶と多結晶を比較すると、多結晶の方が PID 耐性が強い傾向にあるが、これは飽和電界の差だけでは説明できず、例えばテクスチャ形状やエッチング法の違いなど、他の要因が関与していると考えられる。

#### II-5-4. 二次イオン質量分析 (SIMS) による評価結果

表 II-5-1 に示す F の条件で作製したセルをモジュール化し、図 II-5-5 に示す未試験品と AIST 法を 1 h 実施 (左側半分のみ) にアルミ板貼付した試験品の EL 暗部と明部において、SIMS 分析を実施した。図 II-5-5 に各測定点の測定結果を、図 II-5-6 に各測定点の  $\text{Na}^+$  濃度の比較を示す。

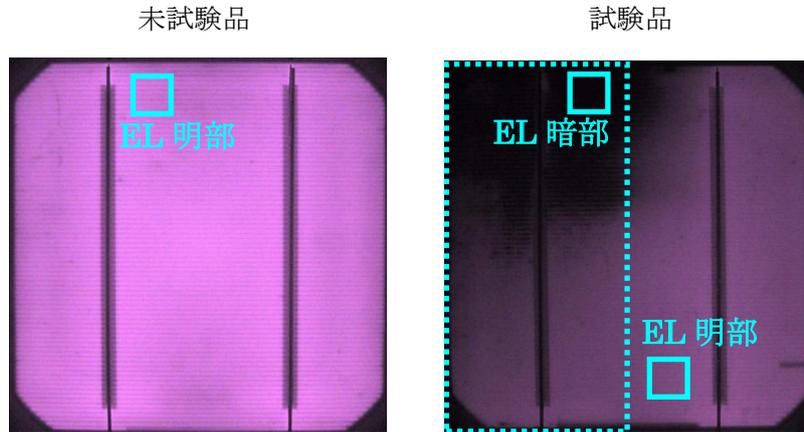


図 II-5-5. SIMS 分析測定箇所

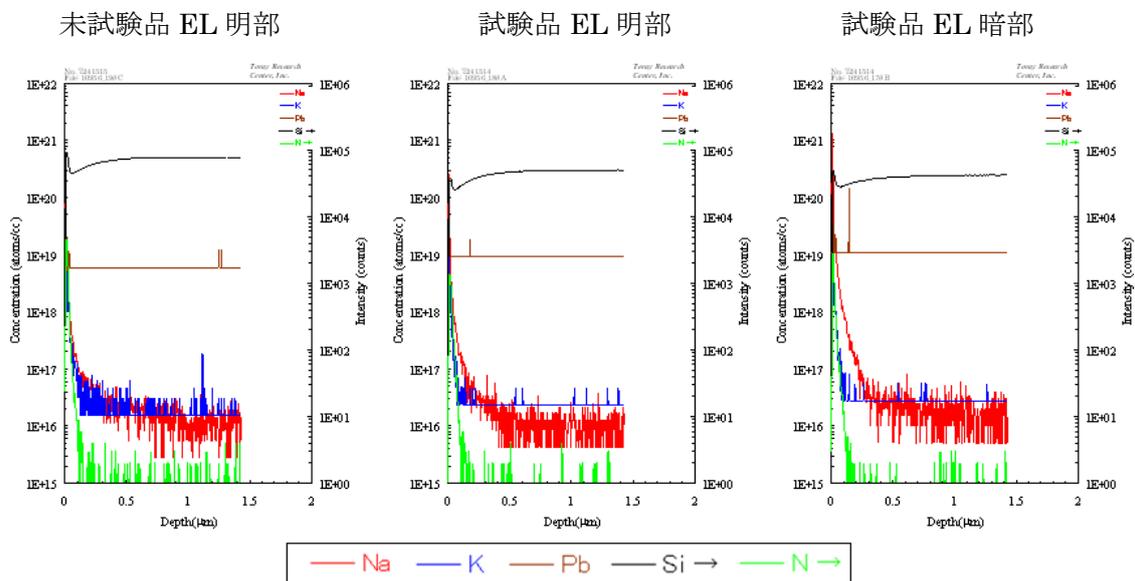


図 II-5-6. 各測定点の SIMS 分析結果

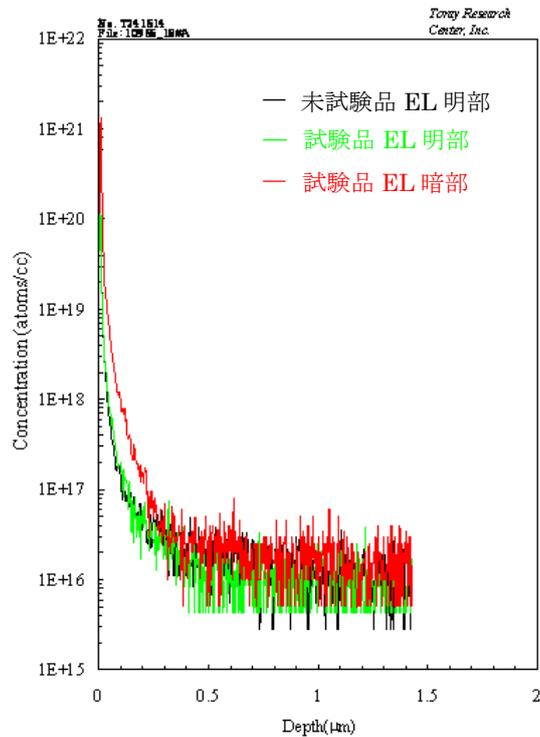


図 II-5-7. 各測定点の Na<sup>+</sup>濃度比較

図 II-5-6 から、試験後は Na が N よりも深い位置にあるため、Na が反射防止膜より深い位置へ入り込んでいることを示唆する。しかし、一般的なセルのテクスチャ高さは数～数十 μm 程あり、正確な分析ができていない可能性もある。

図 II-5-7 から、PID 試験後の EL 暗部では Na<sup>+</sup>の濃度が他の箇所比べて多くなっているが、同じ PID 試験品でも EL 明部では未試験品と同程度の濃度しかないことがわかる。これは PID 試験によりガラス上の電極(アルミ板)直下の反射防止膜上もしくは内部に Na<sup>+</sup>が拡散したことを示唆する。

#### II-5-5. フォトルミネッセンス (PL) 測定

コンソーシアム標準部材を用いた単セルモジュールを用いて AIST 法にて PID 試験を実施し、劣化度合いの違うサンプルを作製した。これらのモジュールを図 II-5-8 に示すようなイメージングユニットを用いて PL を測定した。

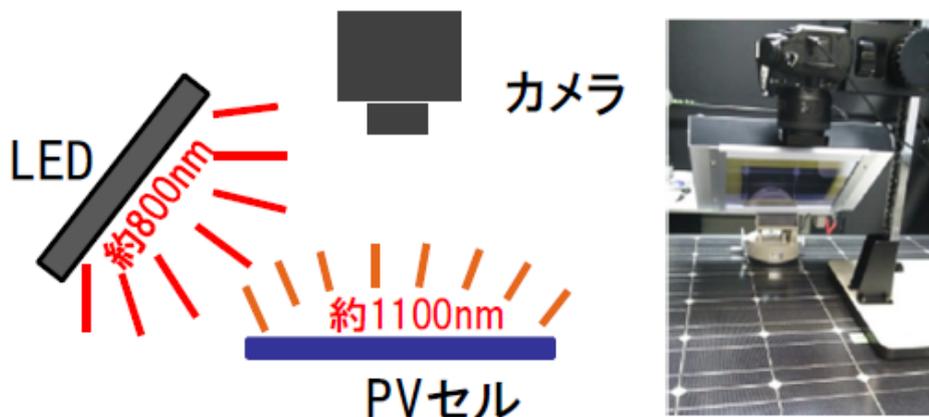


図 II-5-8. PL イメージングユニット

図 II-5-9 に未試験品、中程度劣化品、大幅劣化品の EL、PL 画像を示す。中程度劣化品の PL 画像は大幅劣化品と同様、発光していないことがわかる。これは劣化の程度に関係なく、セル内部で励起光により発生したキャリアが何らかの原因で非輻射性の再結合を起こしていることを示唆する。

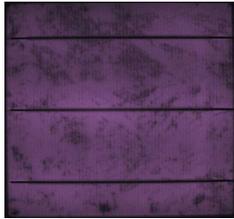
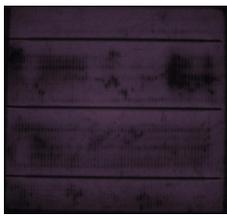
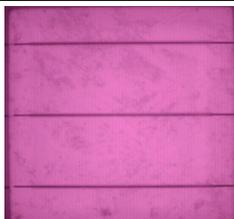
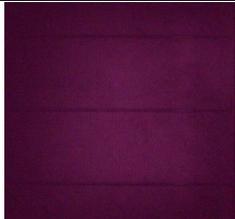
	未試験	中程度劣化	大幅劣化
EL 画像			
PL 画像			

図 II-5-9. 未試験品、中程度劣化品、大幅劣化品の EL、PL 画像

PL 画像測定に使用したものとは別に、コンソーシアム標準部材を用いた単セルモジュールを用いて AIST 法にて PID 試験を実施し、図 II-5-10 に示すように、未試験品の EL 明部、PID 試験品の EL 暗部（アルミ板直下）、PID 試験品の EL 明部（アルミ板無し部）の 3 箇所での PL 発光強度を測定した。また、それらの測定点について PL 発光寿命を測定した。図 II-5-11 に PL 発光強度の測定結果を、図 II-5-12 に PL 発光寿命の測定結果を示す。

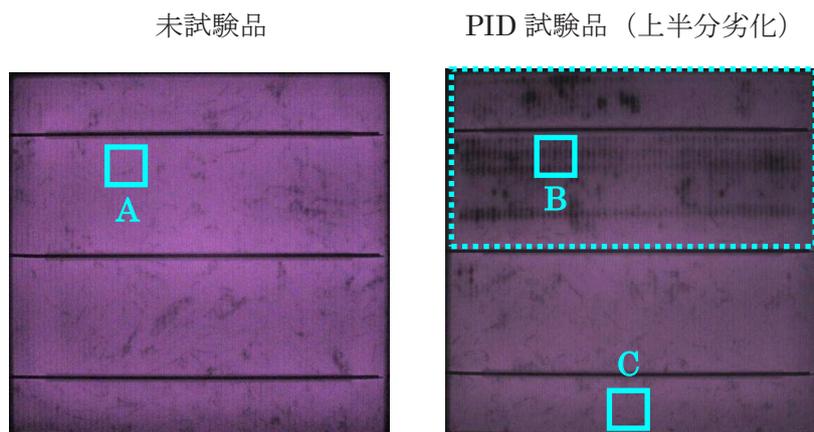


図 II-5-10. PL 発光強度測定箇所

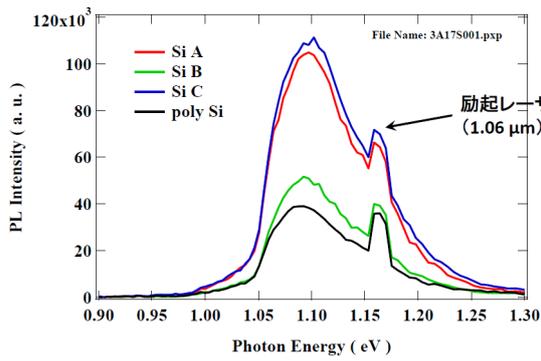


図 II-5-11. PL 発光強度測定結果

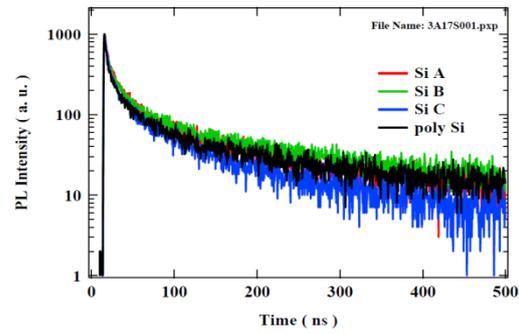


図 II-5-12. PL 発光寿命測定結果

図 II-5-11、図 II-5-12 の poly-Si はリファレンスのために測定した多結晶シリコンセルである。図 II-5-11 において、各測定点ともにピークは 1.1eV 付近である。1.17eV 付近に見られるピークは励起レーザーの影響である。PID 試験品の EL 暗部は PL 発光強度が低い。PID 試験品の EL 明部は未試験品と同等の PL 発光強度がある。それぞれの PL スペクトルの形状は発光強度に依存していない。図 II-5-12 において、PL 発光寿命に差は見られなかった。これらの結果は、PL 発光している領域の体積が、PID が進行するに従って減少するからであると考えられる。

図 II-5-13 に PID の進行の程度における Na 拡散模式図を、図 II-5-14 に PID の進行の程度における I-V カーブの推移を、図 II-5-15 に PID の進行の程度における pn 接合部の模式図を、表 II-5-2 に PID の進行の程度における各特性値の挙動を示す。

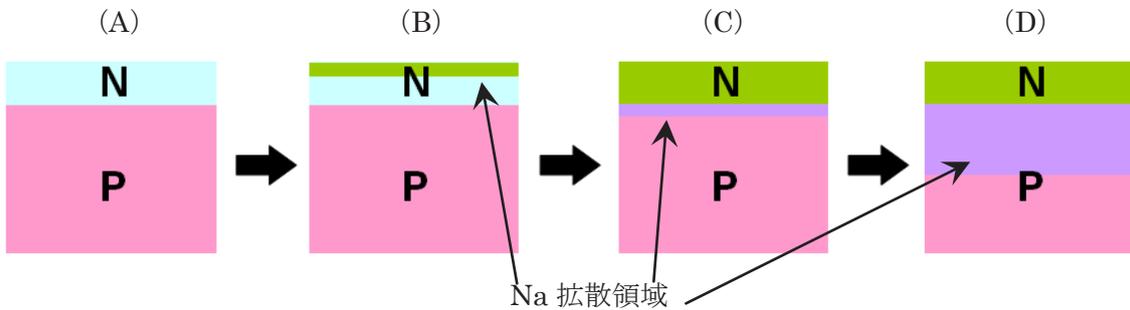


図 II-5-13. PID 進行度における Na 拡散模式図

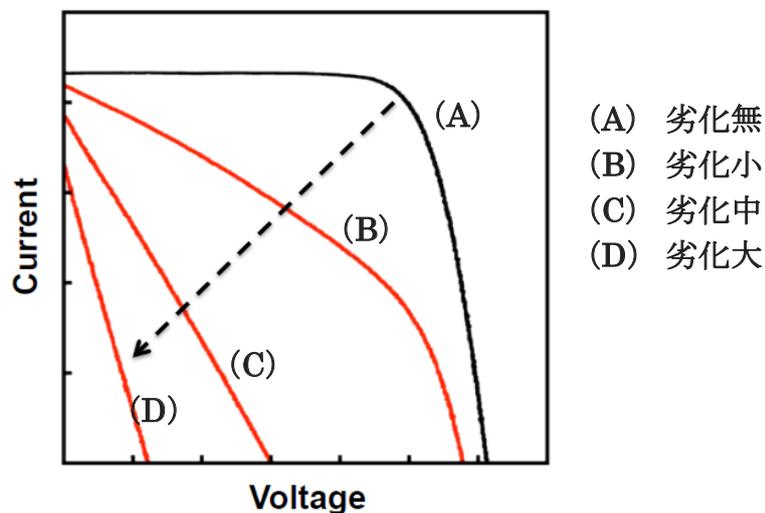


図 II-5-14. PID 進行度における I-V カーブの推移

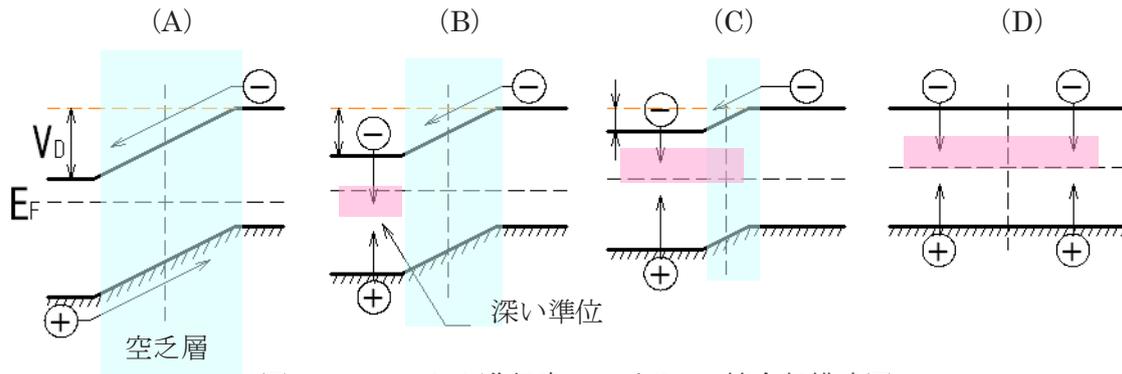


図 II-5-15. PID 進行度における pn 接合部模式図

表 II-5-2. PID の進行の程度における各特性値の挙動

記号	各特性値の状態		理由
(A)	I <sub>sc</sub>	維持	初期状態。
	V <sub>oc</sub>	維持	初期状態。
	R <sub>sh</sub>	維持	初期状態。
(B)	I <sub>sc</sub>	ほぼ維持	深い準位が存在する領域よりも深い領域で発生した電子・正孔は I <sub>sc</sub> に寄与できる。
	V <sub>oc</sub>	ほぼ維持	n 層の E <sub>F</sub> が大きな変化を受けない。
	R <sub>sh</sub>	大幅に減少	暗状態で順方向バイアスを印加すると、注入された電子と正孔は必ず深い準位が存在する領域を通過しなければならない。
(C)	I <sub>sc</sub>	少し減少	深い準位が存在する領域が空乏層を含む領域にまで拡大している。空乏層幅も減少。
	V <sub>oc</sub>	大幅に減少	n 層の E <sub>F</sub> が E <sub>g</sub> の中央付近にまで移動している。
	R <sub>sh</sub>	大幅に減少	深い準位が大量に存在するため、電子・正孔の非輻射性再結合が大幅に促進される。V <sub>oc</sub> 減少にも寄与。
(D)	I <sub>sc</sub>	大幅に減少	深い準位が存在する領域が空乏層を含む領域にまで拡大している。空乏層幅も減少。
	V <sub>oc</sub>	大幅に減少	n 層の E <sub>F</sub> が E <sub>g</sub> の中央付近にまで移動している。
	R <sub>sh</sub>	大幅に減少	深い準位が大量に存在するため、電子・正孔の非輻射性再結合が大幅に促進される。V <sub>oc</sub> 減少にも寄与。

PL スペクトル形状を維持すること、PL 発光寿命が変化しないことから、Na は図 II-5-13 のように拡散していくと考えられる。図 II-5-15 において、pn 接合部ではまず n 層に深い準位が発生し、これにより電子と正孔が非輻射性の再結合を起こすので R<sub>sh</sub> が減少する。深い準位が空乏層まで拡大すると I<sub>sc</sub> が減少する。また、n 層の E<sub>F</sub> が E<sub>g</sub> の中央付近まで移動するので V<sub>oc</sub> も減少する。これらをまとめると表 II-5-2 のようになる。このことから I-V カーブが図 II-5-14 のように推移することが説明できる。

## II-5-6. フラットセルを用いた PID 破壊分析

### II-5-6-1. 分析試料作製

通常のセルではテクスチャの凹凸の影響で正確な分析ができないため、テクスチャを極力なくしたフラットなウェハを用いて成膜を表 II-5-1 に示す F の条件で行い、フラットセルを作製した。これをモジュール化し、AIST 法にて試験を実施し、分析用の試料を作製した。作製した試料と分析内容を表 II-5-3 に示す。

表 II-5-3. 作製試料と分析内容

No.	試料名	分析内容
1	小～中劣化後回復品	SIMS、TOF-SIMS、SCM、EDX
2	小～中劣化品	SIMS (EL 暗部、EL 暗部付近、EL 明部)
3	大劣化品	SIMS、TOF-SIMS、SCM、EDX
4	未試験品	SIMS、TOF-SIMS、SCM、EDX

図 II-5-16 に各試料の初期、試験途中、分析前の EL 画像を示す。EL 画像の下の数字は試験時間を表す。初期から見られる EL 暗部はセル作製条件によるものである。フラットセルは、通常のテクスチャを有するセルと比較して、概して劣化しにくい傾向にあった。

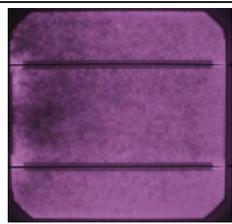
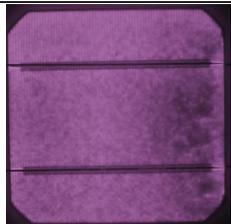
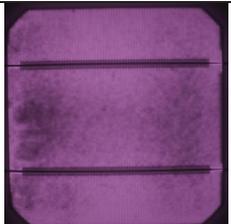
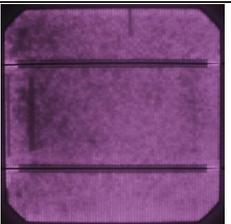
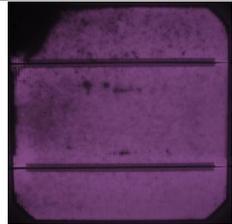
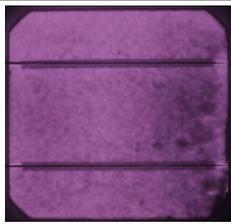
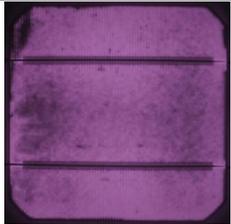
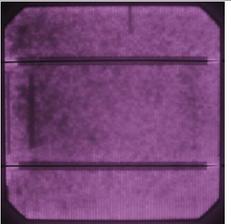
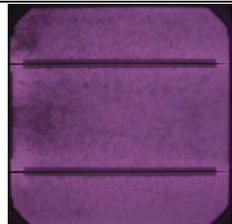
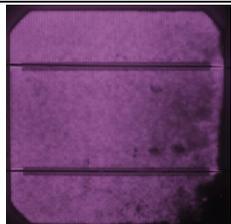
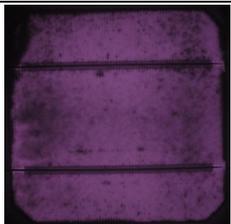
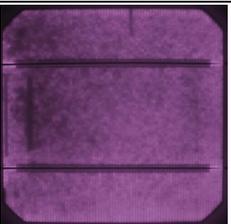
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
初期				
途中経過				
	24 h	9 h	13 h	0 h
分析前				
	回復試験 39 h	24 h	55 h	0 h

図 II-5-16. 各試料の初期、試験途中、分析前の EL 画像

図 II-5-17 に各試料の初期（順バイアス）、分析前（順バイアス、逆バイアス）の熱画像を示す。分析前の順バイアス、逆バイアス印加時に EL 暗部の発熱が見られ、これはその部分がシャントしている可能性を示唆する。また逆バイアスは劣化が大きいほど少しの電圧で多くの電流が流れた。No. 1～3 の分析については PID 試験により発生した EL 暗部でかつ逆バイアス印加時に発熱した箇所について実施した。

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
順バイアス 初期				
順バイアス 分析前				
逆バイアス 分析前				
	2.84 V / 0.10 A	0.81 V / 0.70 A	0.53 V / 1.10 A	10.0 V / 0.00 A

図 II-5-17. 各試料の初期（順バイアス）、分析前（順バイアス、逆バイアス）の熱画像

図 II-5-18 に各試料の初期、分析前の I-V カーブと Pmax 変化率を示す。No.1 については FF 増加により、初期よりも Pmax が 8.1% 増加している。これは図 II-5-16 の EL 画像からもわかるように初期からあった暗部が減少したことによるものである。

#### II-5-6-2. 二次イオン質量分析 (SIMS) の結果

No. 1、No. 3 の逆バイアス印加時の発熱部、No. 2 の EL 暗部（発熱部）、EL 明部（暗部付近）、EL 明部（エッジ付近）、No. 4 の EL 明部（エッジ付近）において、SIMS 分析を実施した。図 II-5-19 に No. 2 の分析箇所を示す。点線は PID 試験時にアルミ板を貼った箇所を示す。

図 II-5-20 に各測定点の SIMS 分析結果を示す。グラフの横軸はセル表面からの深さ、縦軸左側は濃度 (Na、K、Pb)、右側は二次イオン強度 (Si、N) を示す。

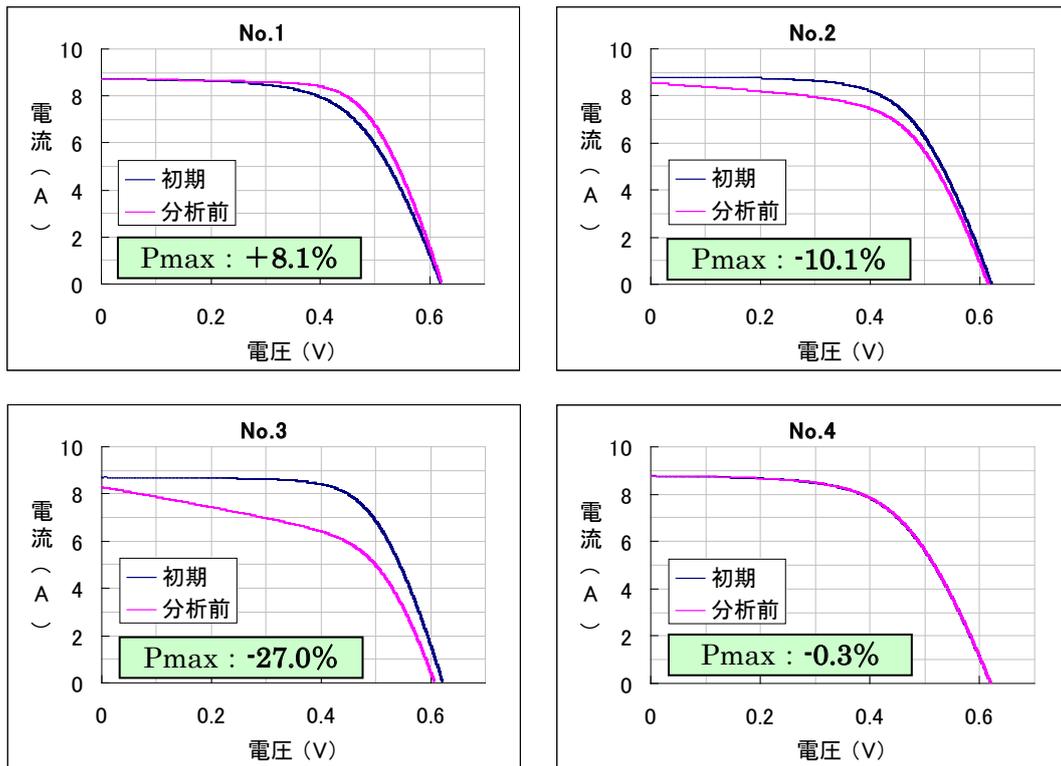


図 II-5-18. 各試料の初期、分析前の I-V カーブと Pmax 変化率

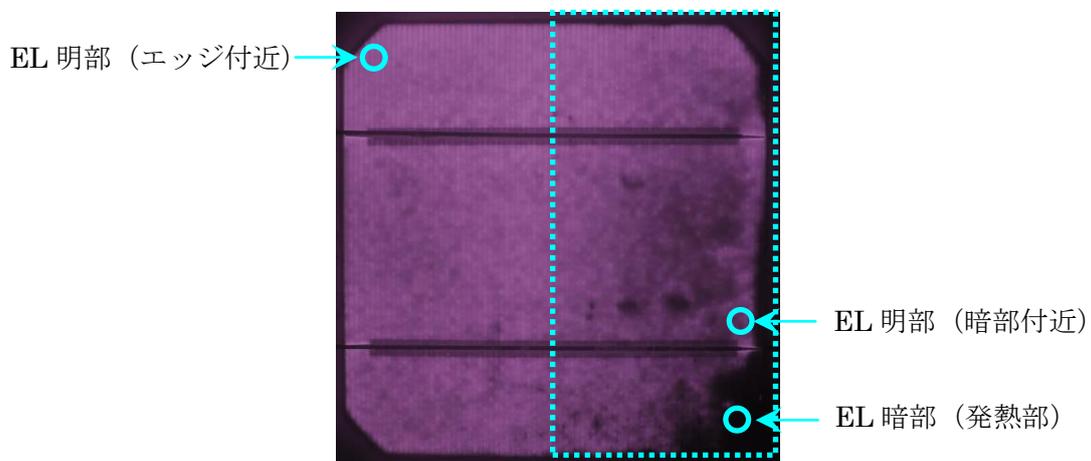


図 II-5-19. No.2 の SIMS 分析箇所

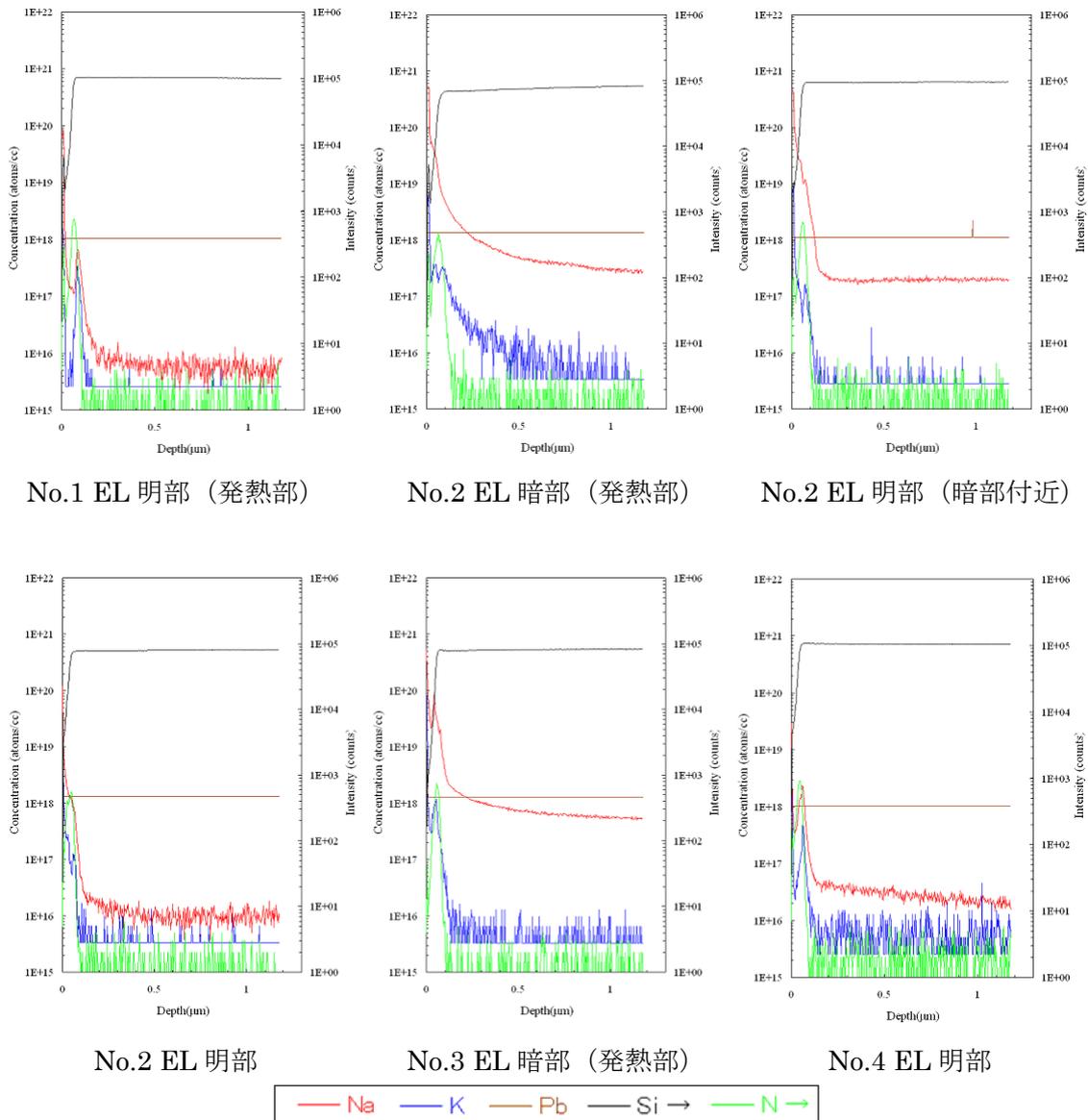


図 II-5-20. 各測定点の SIMS 分析結果

図 II-5-20 から、No. 2 EL 暗部 (発熱部)、No. 2 EL 明部 (暗部付近)、No. 3 EL 暗部 (発熱部) において高い  $\text{Na}^+$ 濃度が検出された。また、深さ  $1 \mu\text{m}$  以上でも  $\text{Na}^+$ が検出されているため、pn 接合界面を超えて  $\text{Na}^+$ が拡散していると考えられる。No. 2 EL 暗部 (発熱部) のみ Kが反射防止膜より深い箇所で観測されるが、これは表面の汚れ、封止材の剥離ムラ等も原因として考えられる。

図 II-5-21 に  $\text{Na}^+$ 濃度の試料間比較を示す。各試料において、数百  $\mu\text{m}$  ~ 数  $\text{mm}$  程度場所をずらし、3 点ずつ測定した。

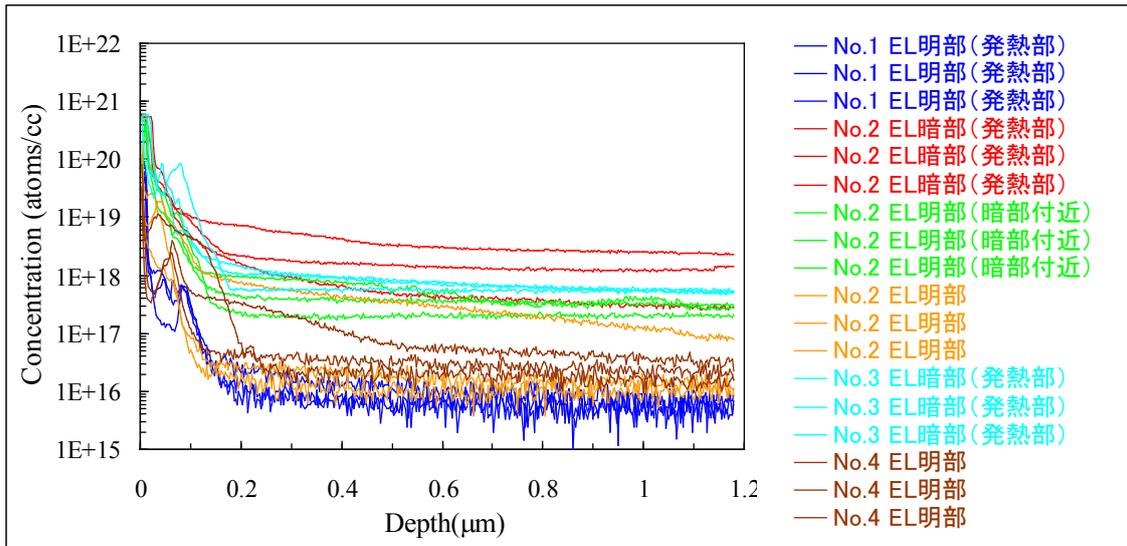


図 II-5-21. Na<sup>+</sup>濃度の試料間比較

図 II-5-21 において、Na<sup>+</sup>濃度は測定箇所により若干のバラつきが見られたが概ね同じ傾向である。No. 2 や No.4 の EL 明部の中に深い位置まで Na<sup>+</sup>が観測される箇所があるが、これは表面の汚れ、封止材の剥離ムラ等が原因として考えられる。

### II-5-6-3. 飛行時間型二次イオン質量分析 (TOF-SIMS) の結果

No. 1、No. 3 の逆バイアス印加時の発熱部、No. 4 の EL 明部 (エッジ付近) において、TOF-SIMS 分析を実施した。図 II-5-22 に各試料の測定箇所を示す。図 II-5-23 に No. 1 の正 2 次イオン像を、図 II-5-24 に No. 3 の正 2 次イオン像を、図 II-5-25 に No. 4 の正 2 次イオン像を、図 II-5-26 に主な正 2 次イオンのピーク強度の比較 (規格化値) を示す。図 II-5-22 ~ 図 II-5-24 の正 2 次イオン像各成分ともに面内にムラが見られる。これは微小なテクスチャの影響であるが、このムラによる影響は小さい。

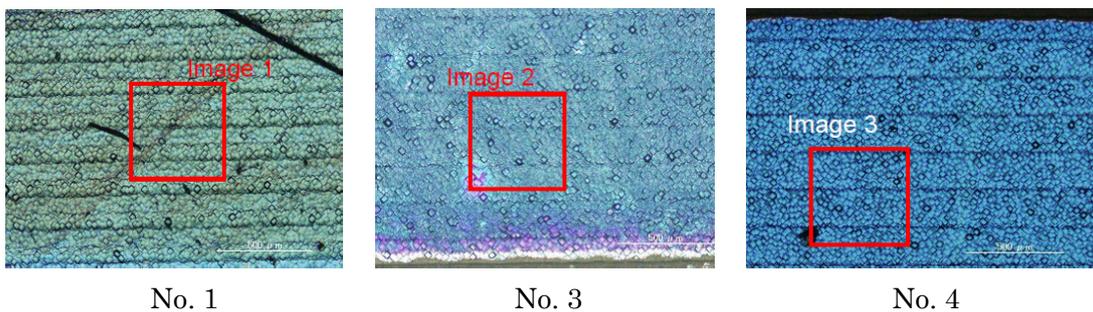


図 II-5-22. 各試料の測定箇所

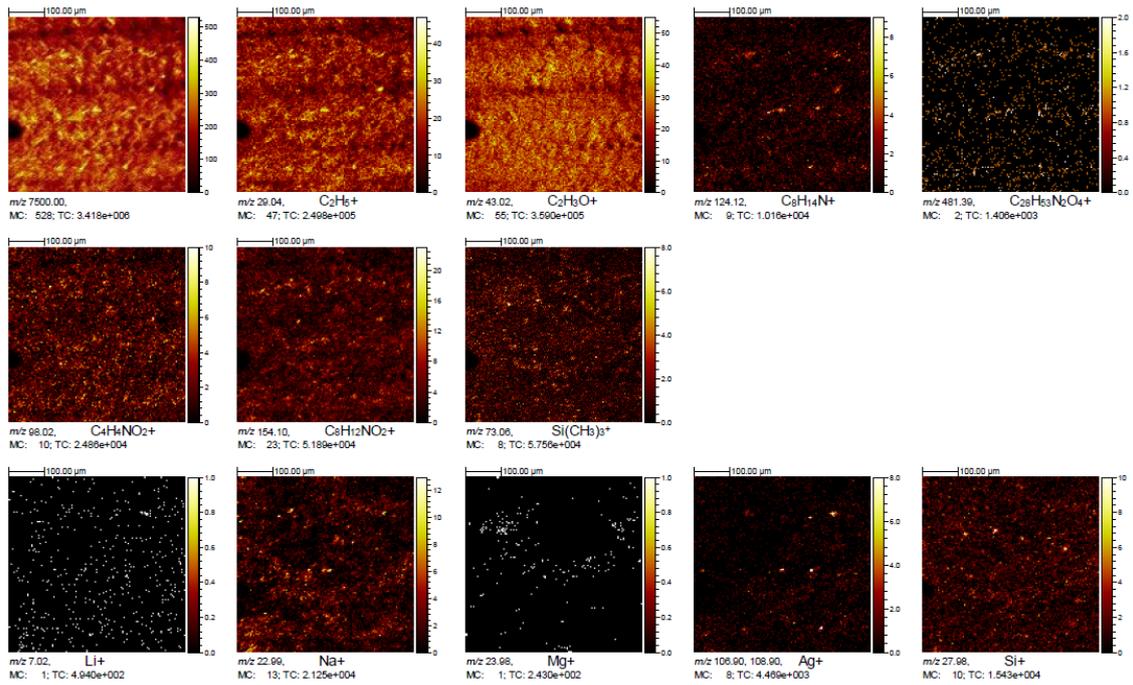


図 II-5-23. No. 1 の正 2 次イオン像 (PID 試験後、逆バイアス回復品)

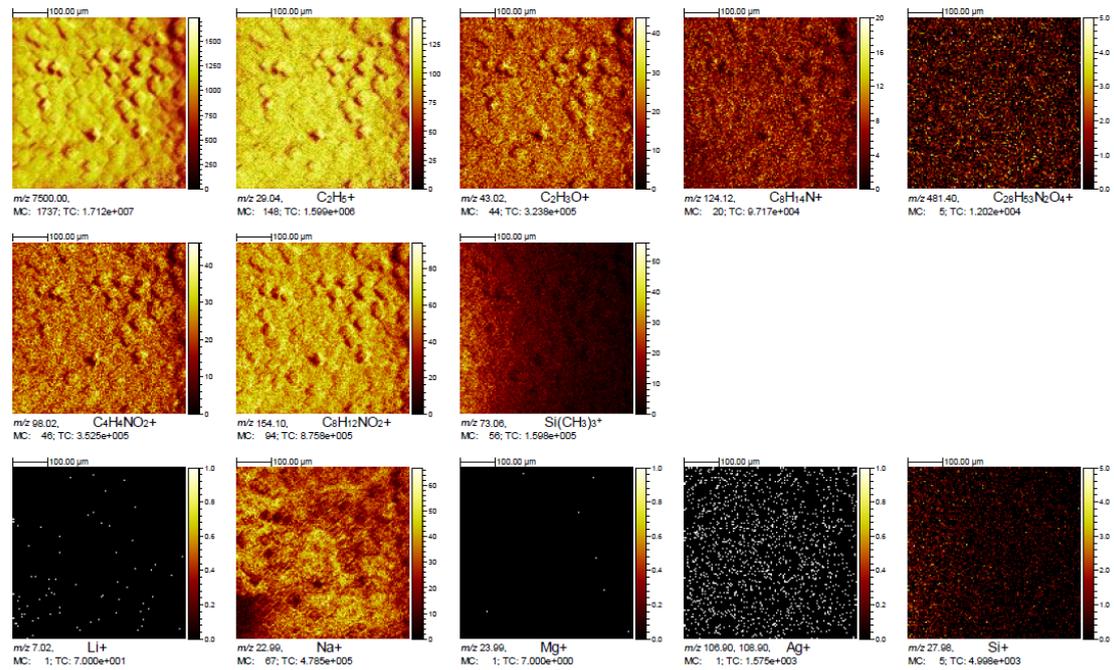


図 II-5-24. No. 3 の正 2 次イオン像 (PID 試験品)

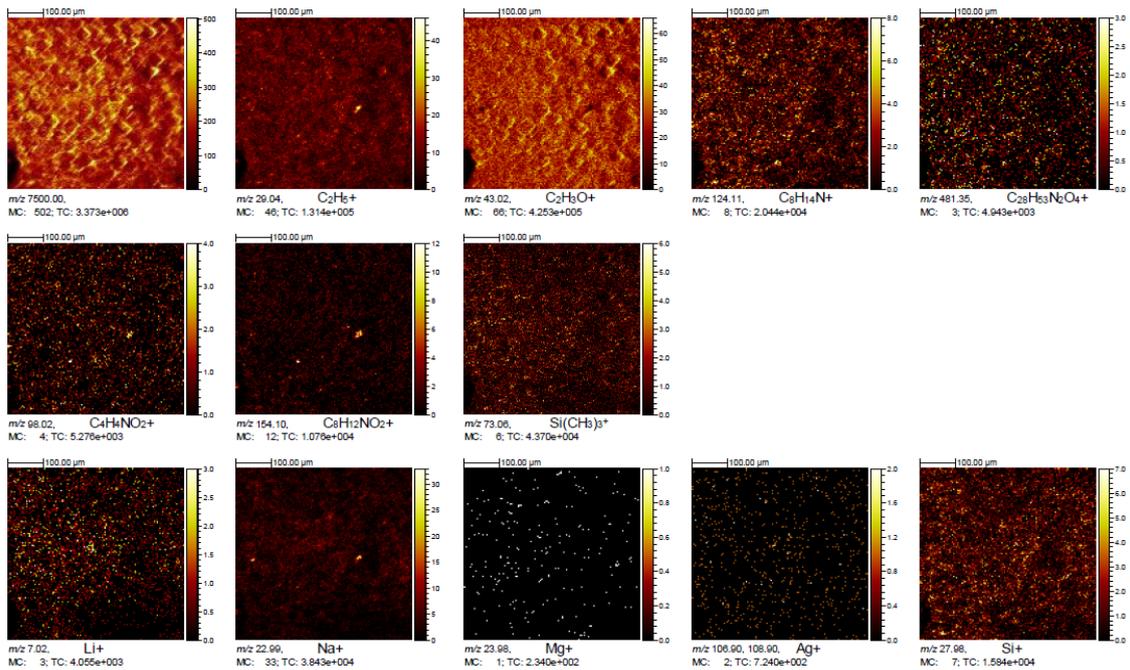


図 II-5-25. No. 4 の正 2 次イオン像 (PID 未試験品)

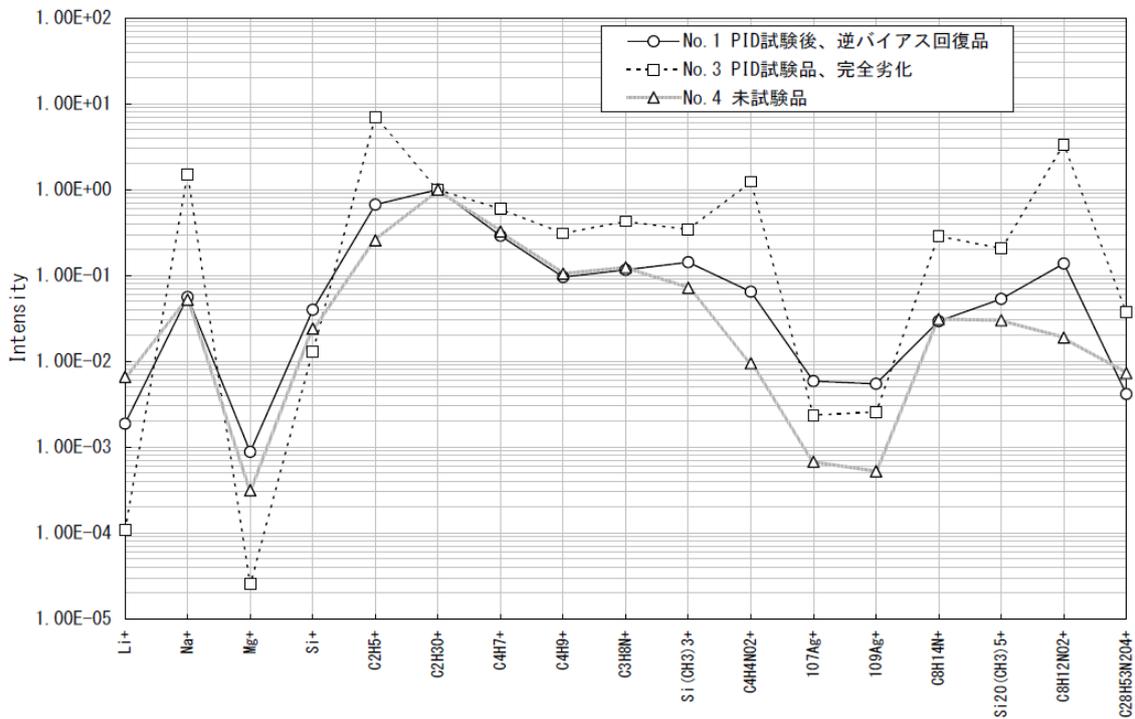


図 II-5-26. 主な正 2 次イオンのピーク強度の比較 (規格化値)

検出された主な成分として、金属ではLi<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>+</sup>、Ag<sup>+</sup>があり、有機物ではEVA (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>)、光安定剤 (HALS) (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>N<sup>+</sup>、C<sub>8</sub>H<sub>14</sub>N<sup>+</sup>、C<sub>28</sub>H<sub>53</sub>N<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>+</sup>など)、ポリジメチルシロキサン (Si(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>+</sup>、Si<sub>2</sub>O(CH<sub>3</sub>)<sub>5</sub><sup>+</sup>など)、炭化水素 (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub><sup>+</sup>) などがある。

Na<sup>+</sup>はPID試験品であるNo. 3において強く検出され、PID試験後回復品、未試験品は同程度であった。このことから回復試験を実施するとセル表面のNa<sup>+</sup>は封止材中へ拡散していくと考えられる。

また、HALS も Na<sup>+</sup>と同様の傾向を示している。HALS はアミン系の物質で、プラスの電荷を持った形で存在しやすいため、PID 試験や回復試験の最中は Na<sup>+</sup>と同じ挙動をする可能性がある。

#### II-5-6-4. 走査型キャパシタンス顕微鏡 (SCM) による分析結果

No. 1、No. 3 の逆バイアス印加時の発熱部、No. 4 の EL 明部 (エッジ付近) において、SCM 分析を実施した。図 II-5-27 に各試料の深さ方向の dC/dV 信号プロファイルを示す。dC/dV 信号はキャリア極性 (濃度) と図 II-5-28 のような関係がある。

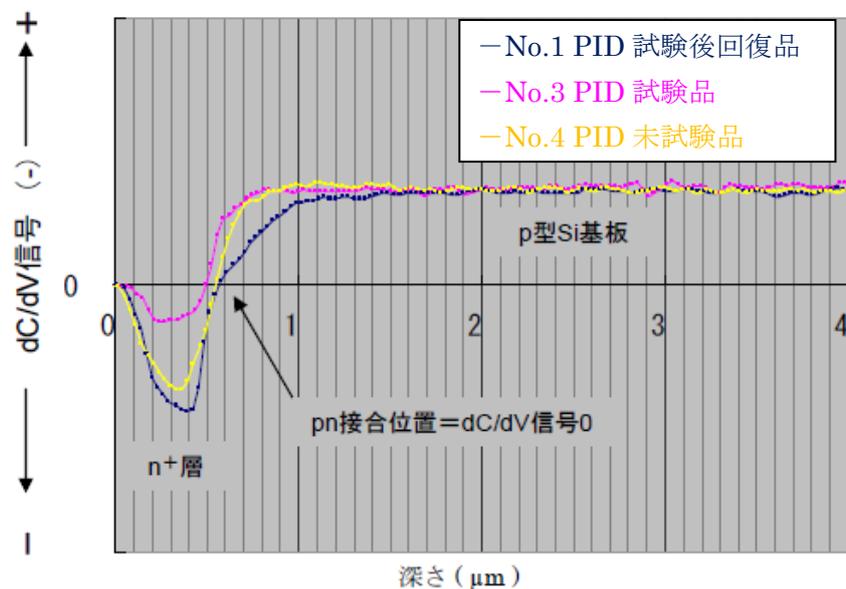


図 II-5-27. 各試料の深さ方向の dC/dV 信号プロファイル

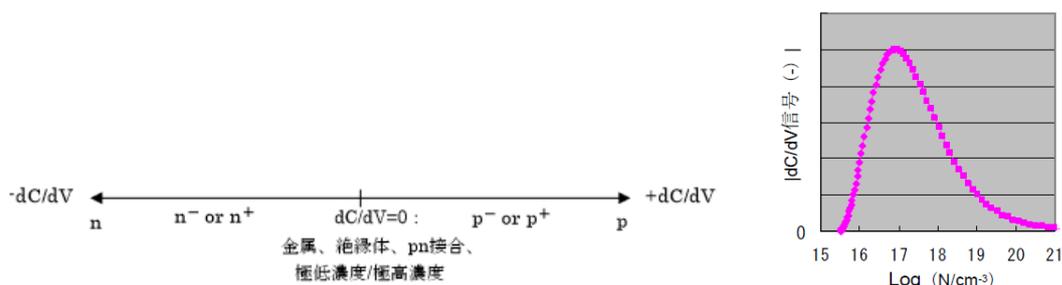


図 II-5-28. dC/dV 信号とキャリア極性 (濃度) の関係

No. 4 (未試験品) を基準とすると、No. 1 (PID 試験後回復品) は n<sup>+</sup>層の信号強度が僅かに高い。No. 3 (PID 試験品) は n<sup>+</sup>層の信号強度が低く、接合深さが浅くなっていることがわかる。

図 II-5-29 に各試料の pn 接合部の dC/dV 像 (キャリア分布) を示す。

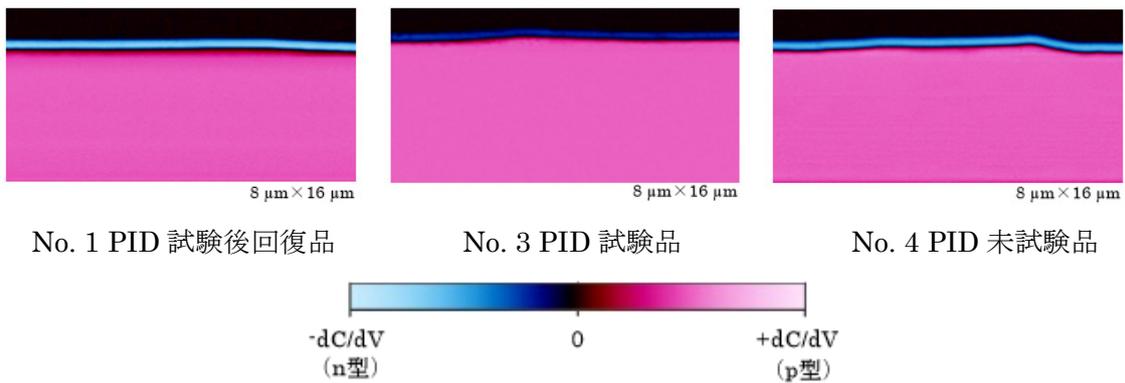


図 II-5-29. 各試料の pn 接合部の dC/dV 像 (キャリア分布)

No. 3 (PID 試験品) は n<sup>+</sup>層全体のキャリア濃度が低下している。これは多数キャリアである電子が拡散した Na<sup>+</sup>と再結合するためであると考えられる。回復試験後は n<sup>+</sup>層が正常に戻っている。これは逆電圧によりセルがプラスとなることで Na<sup>+</sup>と斥力が働き、Na<sup>+</sup>がセル表面から離脱することで n<sup>+</sup>層の電子との再結合が解消されるためであると考えられる。

#### II-5-6-5. エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) の結果

No. 1、No. 3 の逆バイアス印加時の発熱部、No. 4 の EL 明部 (エッジ付近) において、TEM-EDX 測定を実施した。図 II-5-30 に No. 1 の EDX 元素強度マップを、図 II-5-31 に No. 3 の EDX 元素強度マップを、図 II-5-32 に No. 4 の EDX 元素強度マップを示す。また、図 II-5-33 に No. 1 の EDX 定量ライン分析結果を、図 II-5-34 に No. 3 の EDX 定量ライン分析結果を、図 II-5-35 に No. 4 の EDX 定量ライン分析結果を示す。分析のために、各試料の表面に Pt コート (導電処理) を施し、その上に C 系の保護膜を堆積している。

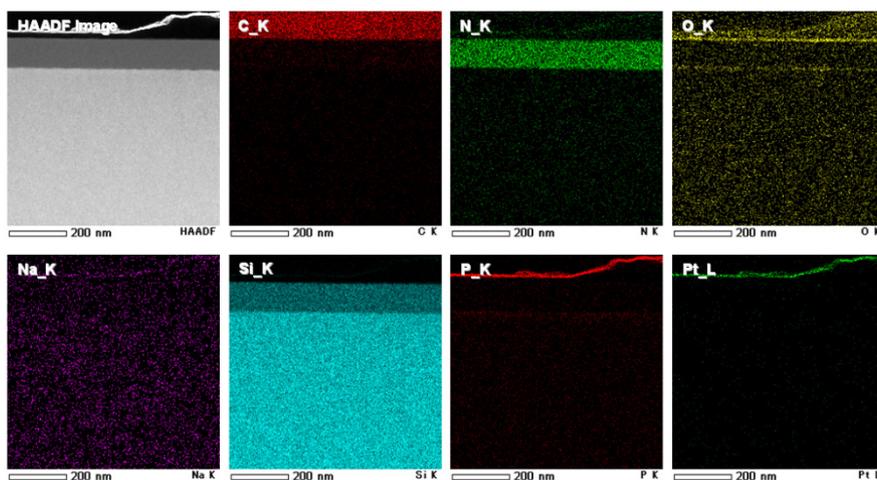


図 II-5-30. No. 1 (PID 試験後回復品) の EDX 元素強度マップ

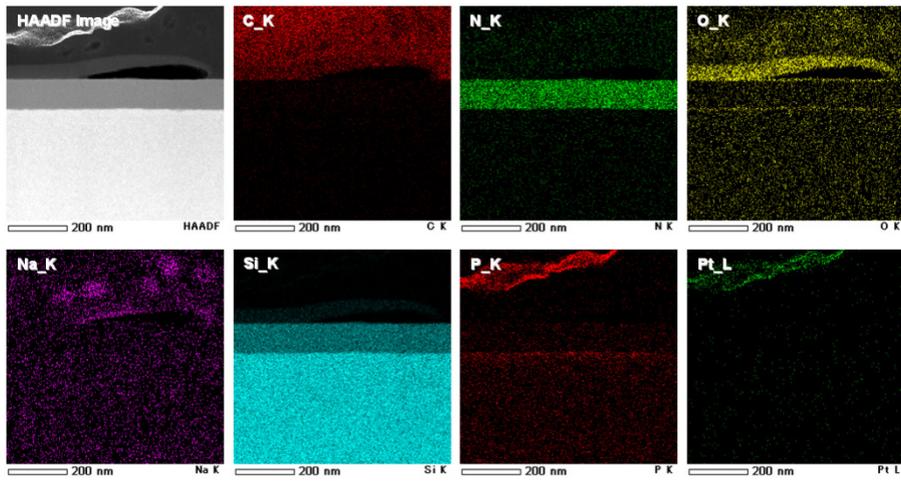


図 II-5-31. No. 3 (PID 試験品) の EDX 元素強度マップ

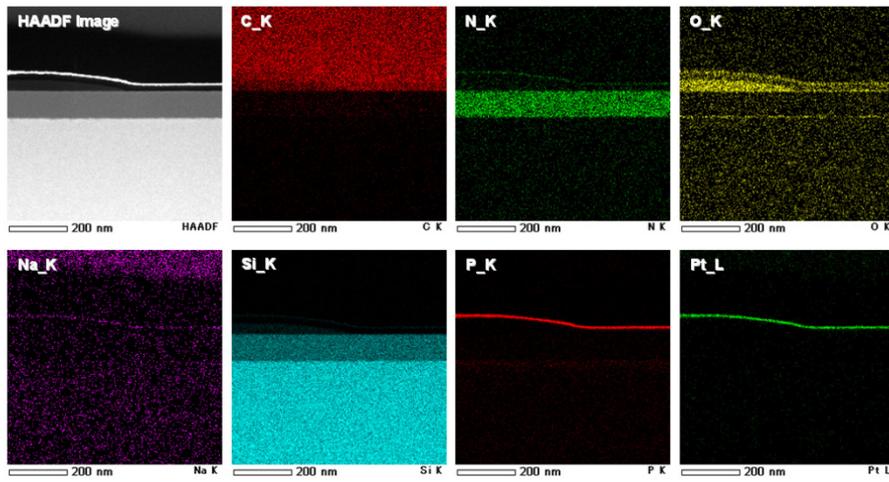


図 II-5-32. No. 4 (PID 未試験品) の EDX 元素強度マップ

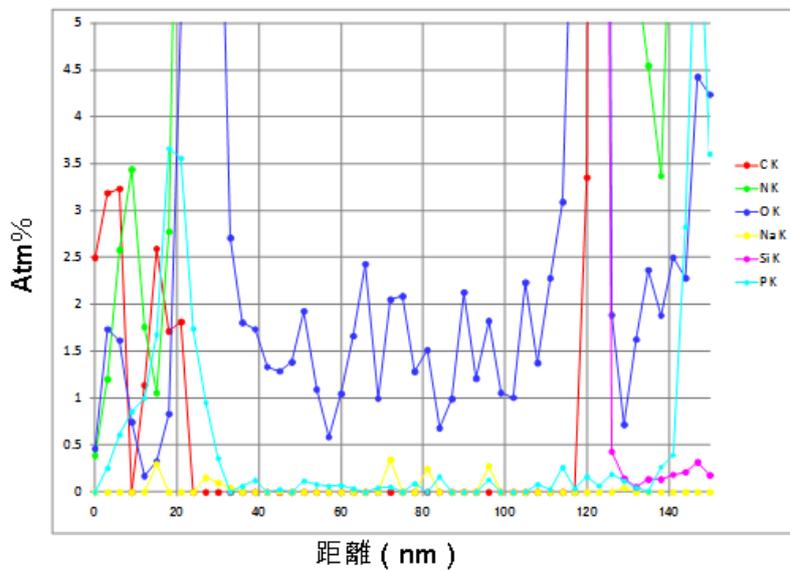
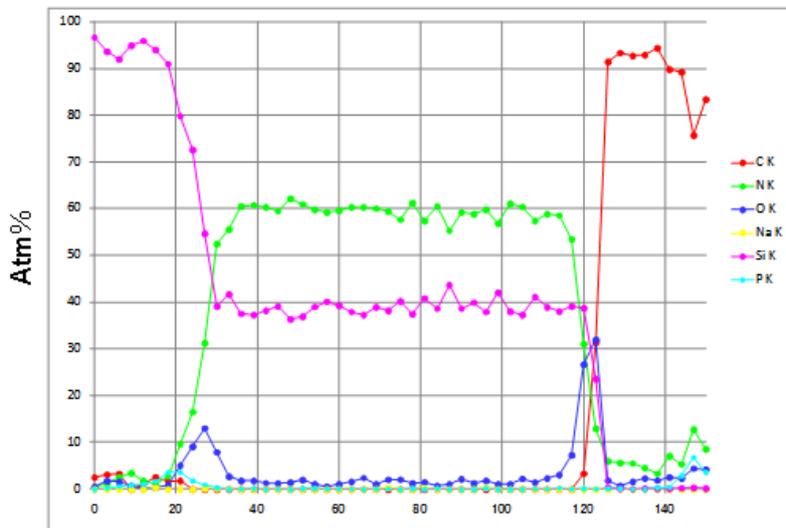
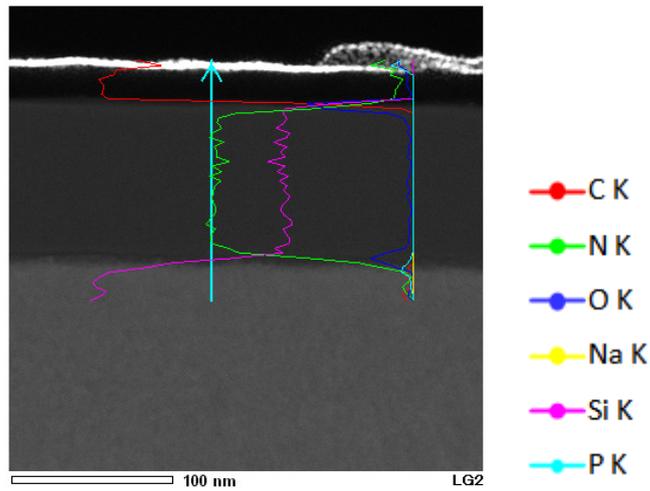


図 II-5-33. No. 1 (PID 試験後回復品) の EDX 定量ライン分析結果

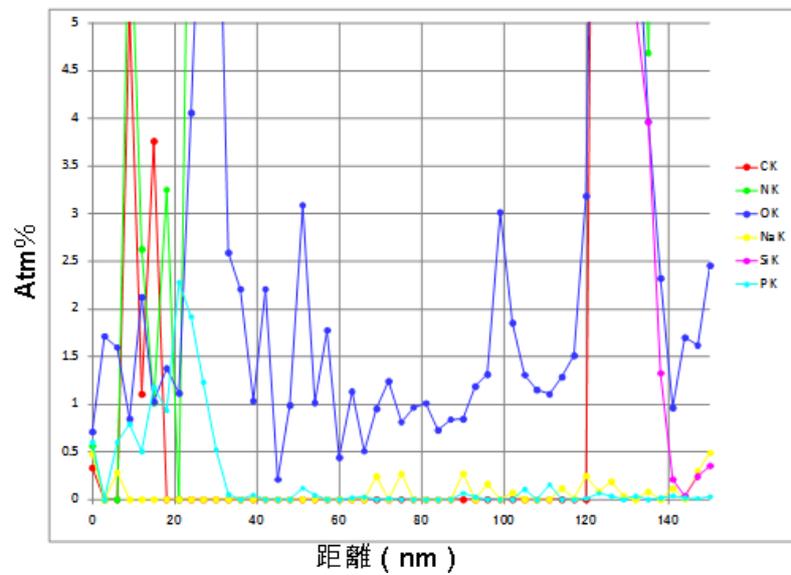
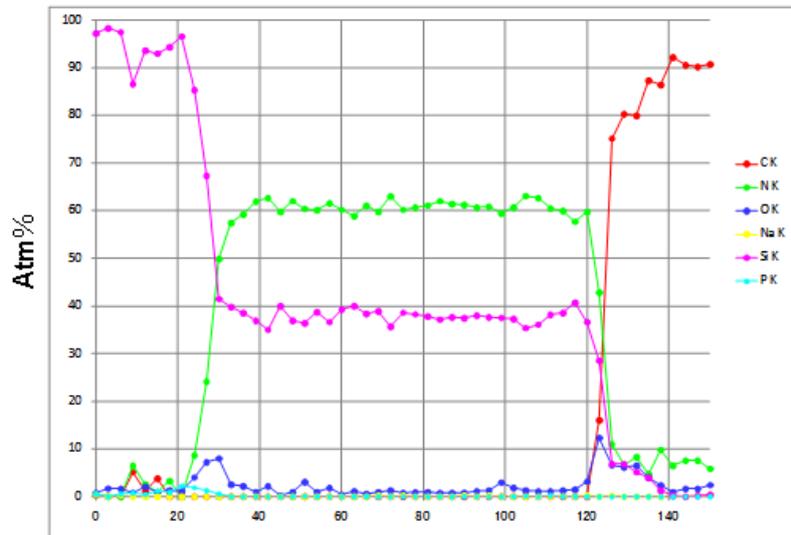
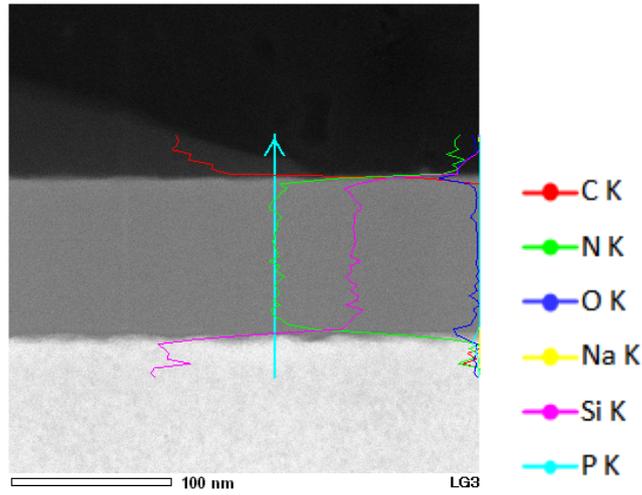


図 II-5-34. No. 3 (PID 試験品) の EDX 定量ライン分析結果

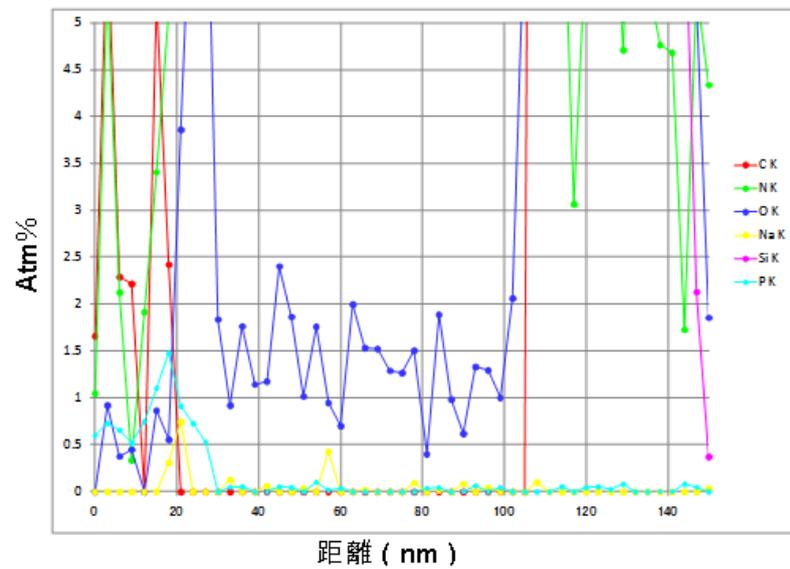
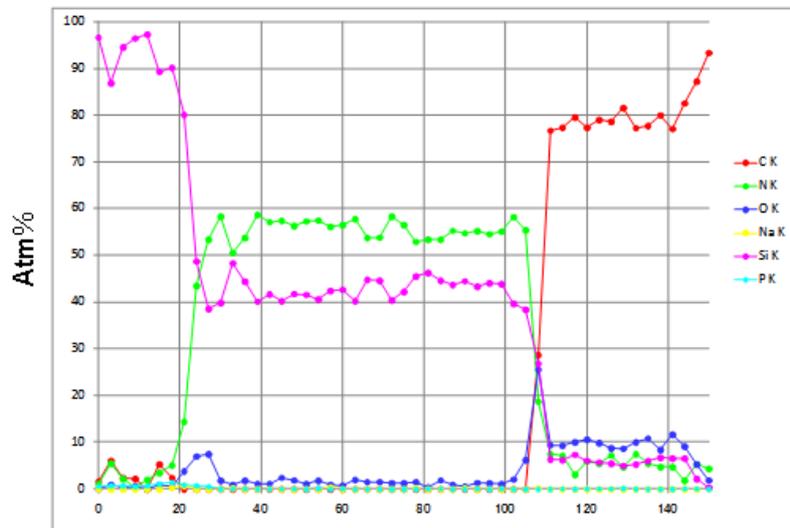
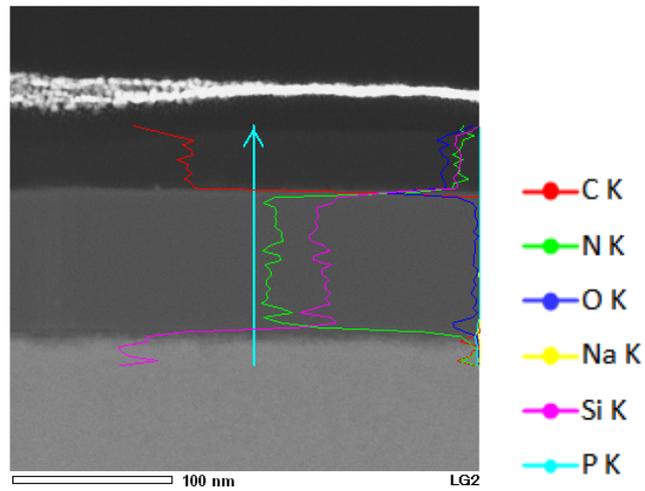


図 II-5-35. No. 4 (PID 未試験品) の EDX 定量ライン分析結果

各試料において、反射防止膜上に C を主成分とした物質が認められるが、これは EVA の剥離ムラである可能性がある。

また、反射防止膜表面、反射防止膜/Si 基板界面において O 濃度が高いことがわかる。この結果だけでは Si-O 結合が存在するとは限らないが、酸化膜が形成されている可能性はある。

SIMS 分析では No. 3 や No. 4 では反射防止膜内や Si 基板内部でも高い Na 濃度が検出されたが、EDX ではほとんど見られなかった。これは検出下限が低いためであり、SIMS は ppm オーダーで検出できるのに対し、EDX は 0.1~1 原子%程度しか検出できない。EDX 元素強度マップから、Na の分布が Si 基板内部にも広がっているように見えるが、これは FIB 加工で用いた Ga 成分や測定時のノイズ成分等のバックグラウンドの影響が考えられる。

#### II-5-6-6. 考察

フラットセルの SIMS 分析から、PID が進行した箇所は 1  $\mu\text{m}$  以上の深さまで Na<sup>+</sup>が拡散していることが確認できた。これはガラスから拡散した Na<sup>+</sup>は反射防止膜内を通過し、pn 接合界面を超えて拡散していることを示す。また、PID 試験後に回復試験を実施することで、深くまで拡散した Na<sup>+</sup>が観察されなかったことから、逆電圧によりセルがプラスになることで斥力が働き、Na<sup>+</sup>は封止材中へ拡散されると考えられる。

SCM 分析から、PID が進行した箇所は n<sup>+</sup>層のキャリア濃度が低下していることが確認できたが、PID 試験後に回復試験を実施することで、キャリア濃度が未試験品と同等まで回復した。これは n<sup>+</sup>層の多数キャリアである電子が拡散された Na<sup>+</sup>と再結合し、n<sup>-</sup>となるが、逆電圧により Na<sup>+</sup>が封止材中へ拡散することで、再び電子が多数キャリアとなり n<sup>+</sup>へ戻ると考えられる。

これらの結果と PID 劣化による I-V カーブの挙動から以下のようなメカニズムが考えられる。PID 劣化の初期に、まず反射防止膜上に Na<sup>+</sup>が堆積しチャージアップする。これが太陽電池セル中の電子を引き寄せ発電効率を低下させる。PID 劣化が進むと、図 II-5-15 の (B) に示すように、Na<sup>+</sup>は n<sup>+</sup>層まで達し、深い準位として電子、正孔の再結合中心となる。さらに PID 劣化が進むと、図 II-5-15 の (C) や (D) に示すように、深い準位が空乏層まで達し、内蔵電位 V<sub>D</sub>が減少し、空乏層幅も減少することで発電効率が大きく低下すると考えられる。

フラットセルを用いた PID 試験では、条件が最も厳しい AIST 法を長時間実施しても太陽電池セルの一部の EL が暗くなるのみで全体的な劣化は見られなかった。これは表面形状による影響であると考えられる。テクスチャ有りのセルでは反射防止膜上の Na<sup>+</sup>の堆積にムラができ、チャージアップも部分的なものとなるが、フラットセルでは均一にチャージアップする。また、II-5-3 項で述べたように、単結晶と多結晶の PID 耐性の差は反射防止膜の導電率では説明できないところがあったが、これもテクスチャ形状の違いが要因である可能性がある。これらテクスチャ形状の違いによる影響についてはより詳細な調査が必要である。EDX の結果から Si 基板と反射防止膜の界面に O が検出されたことから界面に SiO<sub>2</sub> 膜が形成されている可能性がある。SiO<sub>2</sub> 膜は Si との界面での結晶欠陥が少なく固定電荷を持ちにくいいため、チャージアップを抑制することにより PID 対策となる可能性があるが、その効果だけでここまで劣化しないというのは考え難い。

## サブテーマ 2 のまとめ

フラットセルの SIMS 分析から、PID 劣化が進むと pn 接合界面を超えて Na<sup>+</sup>が拡散している結果を得た。SCM 分析から、PID が進行した箇所では、n<sup>+</sup>層の電子が Na<sup>+</sup>と再結合することにより、キャリア濃度が低下していることを示唆する結果を得た。キャリア濃度に関しては、逆電圧を印加することで未試験品と同等まで回復するという結果も得た。

TOF-SIMS 分析からは、HALS も Na<sup>+</sup>と同じような働きをする可能性が示された。

(長州産業株式会社：上野 清志、株式会社島津製作所：三科 健)

## サブテーマ 3 太陽電池モジュール劣化における温湿度影響の検討

結晶系 Si 太陽電池モジュール(以下 PV モジュールとする)の寿命を評価する技術は確立されておらず、長期信頼性に関する評価手法が求められている。IEC61215 に規定されている環境試験は認証試験であり、スクリーニング試験としての意味合いが強い。そのため、長期信頼性を確保するためには試験時間を延長した試験が行われており、試験時間が長いことが課題である。中間成果報告 [1] では、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太陽電池モジュールの発電性能の低下を加速することや、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を示した。また、直列抵抗 (Rs) 及び並列抵抗 (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) を導入することで相関解析を行った。その結果、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 の増大と Rsh の低下が加算的に FF 低下を引き起こし、これが P<sub>max</sub> 低下の主要因になっている可能性や、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。本研究では、高温高湿試験の延長試験と高温高湿試験に対する加速試験の検討を行った。また、劣化解析を行い、高温高湿試験の劣化メカニズムの検討を行った。

## II-6. 試験方法

### ①試験用 PV モジュール

今回試験に用いた PV モジュール(1セルモジュール:18 cm×18cm)の外観を図 II-6-1 に、部材構成を表 II-6-1 に示す。部材はすべて本コンソーシアムで標準的に用いられているものを用いて作製した。多結晶 Si の単セルを用いガラス、封止材は共通のものを使用した。水分浸入による劣化プロセスを 1.バックシート(以下 BS)の水分透過(封止材に水分到達) 2.封止材の水分透過(セルに水分到達までの封止材中水分透過/拡散速度) 3.セル腐食進行(セル水分到達後の腐食進行速度/腐食モード)の 3 つのプロセスに分類し、劣化の進行に違いがあるかの検討を行うため、裏面の構成を変更した試料の作製を行った。劣化プロセス 1.の検討を行うために、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) である、Tedlar / PET / Tedlar (TPT) で構成された BS で作製した。裏面からの水分浸入を防ぐ目的で PET/Al/PET(Al) で構成された BS で作製したモジュールを Al-BS とする。劣化プロセス 2.の検討を行うために、裏面から BS を除いた構成で作製したモジュールを BS Less とする。劣化プロセス 3.の検討を行うためにセルの裏面に用いる EVA と BS を

除いた構成で作製したモジュールを BS-EVA Less とする。なおこれらのモジュールの周囲はフレームの設置を行っていない。

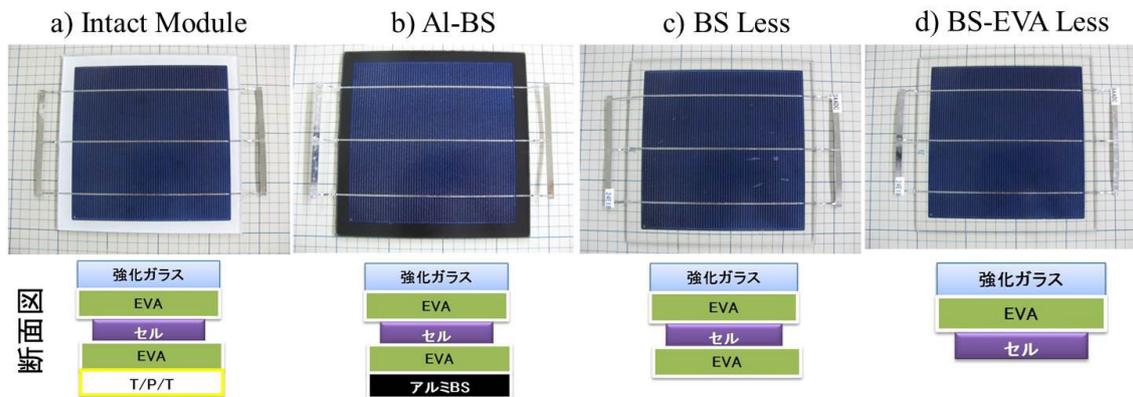


図 II-6-1. モジュール外観図 a) Intact Module, b) Al-BS, c) BS-Less, d) BS-EVA Less

表 II-6-1. 構成部材

Material	Specification	Supplier
Cell	Multicrystalline Si cell (156 mm×156 mm)	Q Cells
Glass	Semi-tempered glass	AGC
Encapsulant	EVA (Fast Cure)	SANVIC
Interconnector	A-SPS (Leaded, Ag)	Hitachi Cable
Back sheet	TPT/PAP	Nondisclosure

## ② 環境試験

高温高湿試験(以下 DH)は高温高湿試験装置(エスペック製: PL-2KP)を用いた。また、100℃を超える試験については不飽和型 HAST 装置(エスペック製: EHS-221)を用いた。図 II-6-2 に両装置の外観を示す。

表 II-6-2 に今回実施した環境試験の条件を示す。IEC61215 で実施されている DH は温度 85℃湿度 85% 1000 時間が基準である。今回の試験では更に試験時間を 4000 時間まで延長した。高度加速寿命試験(Highly-Accelerated Temperature and Humidity Stress Test: HAST)では 105℃/100%, 110℃/85%, 120℃/100%の試験を実施した。ここで試験条件及び環境試験器の槽内の空気分圧と水蒸気分圧の関係を表 II-6-3 に示す。DH85℃/85%では空気分圧と水蒸気分圧の比が約 1:1 である。一方 HAST では槽内がほぼ水蒸気のみで DH の槽内環境とは異なる。そこで、HAST の槽内に空気を残す Air-HAST 試験を実施した。Air-HAST の試験条件は 110℃/85% で槽内の空気分圧は 0.128 MPa abs.(理論値)であり、空気分圧と水蒸気分圧の比が約 1:1 となる。槽内に空気を残すことで、酸素の存在による酸化・腐食に関する劣化が加速出来るかの検討も行った。なお、Air-HAST のみ、試験時間毎に別サンプルで試験をしている。

表 II-6-2. 環境試験条件

Test condition	Temperature/ humidity	Test time
Damp heat test	85 °C / 85%	4000 h
HAST	105 °C / 100%	1000 h
	110 °C / 85%	800 h
	120 °C / 100%	400 h
Air-HAST	110 °C / 85%	800 h

表 II-6-3. 環境試験条件と環境試験器の槽内の空気分圧と水蒸気分圧の関係

	Temperature (°C)	Humidity (%)	Water vapor partial pressure (MPa abs.)	Total pressure (MPa abs.)	Partial pressure of air (MPa abs.)
R.T.	25	60	0.0016	0.1013	0.0997
DH	85	85	0.0495	0.1010	0.0518
HAST	105	100	0.1208	0.1208	0
	110	85	0.1216	0.1216	0
	120	100	0.1985	0.1985	0
Air-HAST*	110	85	0.1216	0.2498	0.1282



図 II-6-2. 恒温恒湿試験装置



不飽和型 HAST 装置

試験前及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)、外観検査及び Electroluminescence (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、全ての環境試験は PV セルの両電極を結束せずに、開放状態で実施した。

## II-7. 結果

### ① DH

DH 85 °C/85% 初期から 4000 時間までを比較した EL 像を図 II-7-1 に、各サンプルの初期値で無次元化した  $P_{max}$  を図 II-7-2 に示す。各試料とも試験時間が経過する毎に  $P_{max}$  は減少しており、3000 時間までは、 $P_{max}$  の低下が Intact Module で 10%、Al-BS で 8%、BS-Less で 7%とほぼ同じような低下率で推移していた。Intact Module や Al-BS では 3500 時間以降で急激に低下し、4000 時間では初期値と比べて Intact Module では  $P_{max}$  が 57%低下、Al-BS では  $P_{max}$  が 15~20%低下していた。一部のモジュールでは  $P_{max}$  が 50%以上低下しているものがみられたが、これは、インターコネクタ部が測定前に破断してしまい出力が低下しているように見えていたと考えられる。一方 BS-Less では試験時間が 4000 時間でも  $P_{max}$  低下が 7%と 3000 時間とほぼ同じで、緩やかに低下していた。EL 像では 3000 時間までは Intact Module のセル端部に小さな暗部の発生が見られるが、殆ど変化が見られなかった。3500 時間から、Intact Module では EL の暗部がセル端部から内部へと進行しており、4000 時間では中央付近まで EL 暗部が拡大していた。Al-BS で 3500 時間からセル端部に暗部が発生しているが、4000 時間でも EL 暗部はセル端部から進行していなかった。BS Less や BS-EVA Less ではインターコネクタに沿った部分に一部暗部が発生したが、殆ど変化が見られなかった。

	Intact Module 23F156AAAC	Al-BS 23G192AACC	BS Less 23F161AAHC	BS-EVA Less 23H328AAHC
Initial				
1000h				
2000h				
3000h				
3500h				
4000h				

図 II-7-1. DH 試験前後の EL 像

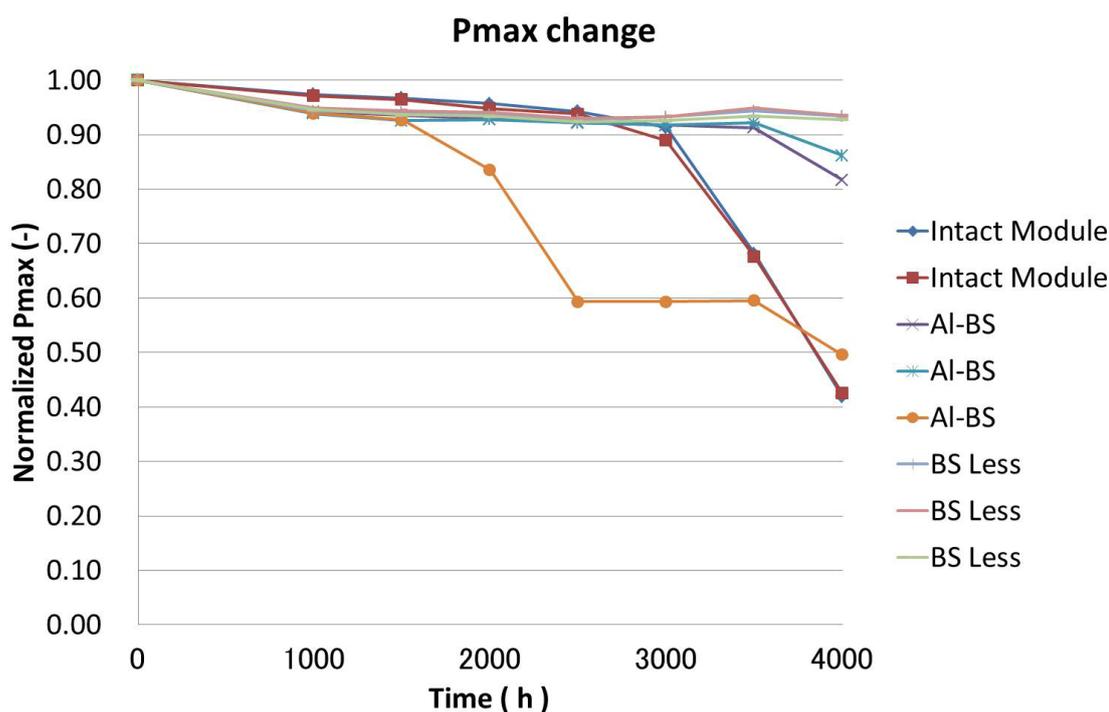


図 II-7-2. Pmax の DH 試験時間依存性

## ② HAST

HAST 105 °C/100%, 1000 時間の EL 像を図 II-7-3 に、120 °C/100% 初期と 200 時間、400 時間を比較した EL 像を図 II-7-4 に、各サンプルの初期値で無次元化した  $P_{max}$  を図 II-7-5 に示す。105 °C/100% , 1000 時間では Intact Module のみを試験しており 500 時間で  $P_{max}$  が 10%低下してから 1000 時間までは緩やかな変化をしていた。EL 像はフィンガー電極の間に暗輝度部が見られた。120 °C/100%, 400 時間で Intact Module が 16%、AI-BS が 37%、BS-Less が 2%、BS-EVA-Less が 17%、それぞれ初期値に比べて  $P_{max}$  が低下していた。EL 像は Intact Module と AI-BS では端部から暗輝度部が広がっており、BS-Less ではセル中央部から暗輝度部が広がっていた。

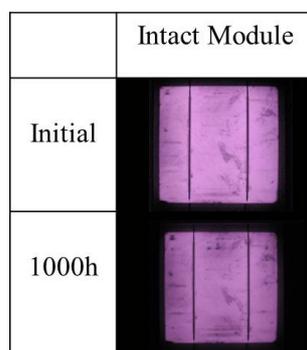


図 II-7-3. HAST 試験 105 °C、100%前後の EL 像

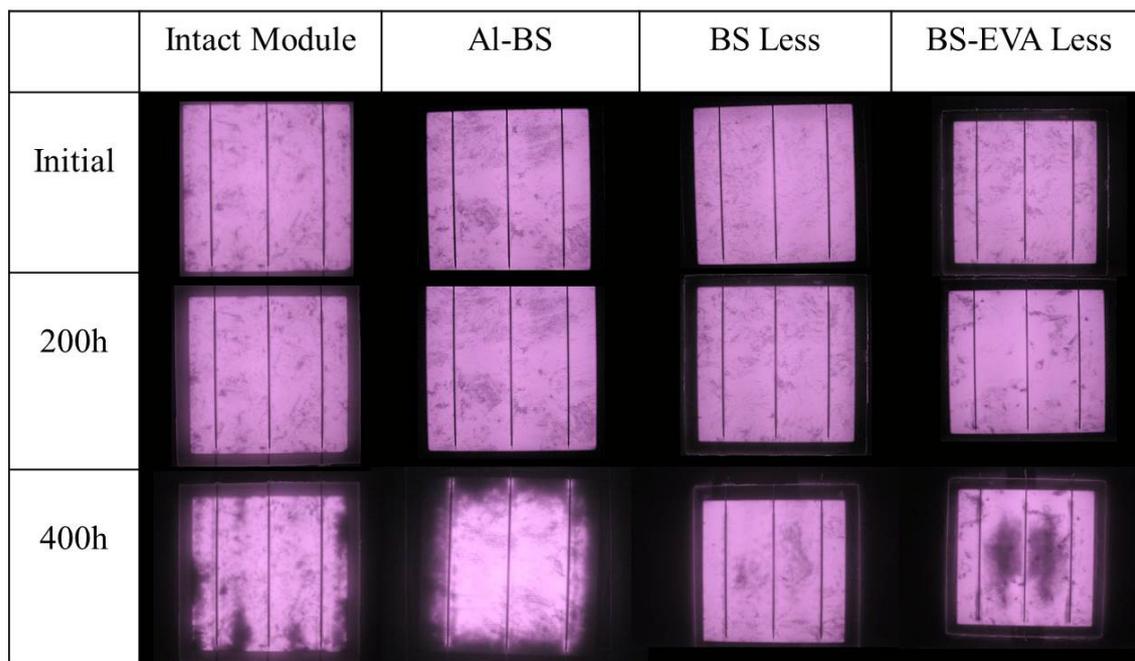


図 II-7-4. HAST 試験 120 °C/100%前後の EL 像

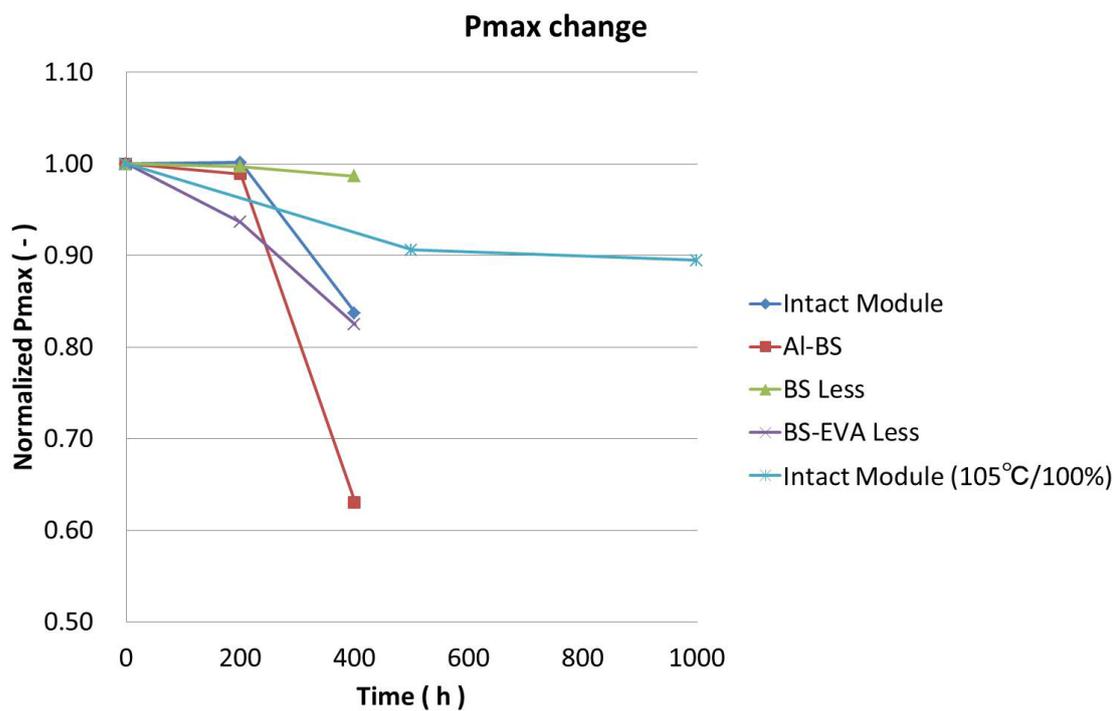


図 II-7-5. P<sub>max</sub> の HAST 試験時間依存性

### ③ Air-HAST

Air-HAST110 °C/85% 初期から各試験時間を比較した EL 像を図 II-7-6 に、各サンプルの初期値で無次元化した  $P_{max}$  を図 II-7-7 に示す。400 時間では Intact Module が 4%、Al-BS が 2%、BS-Less が 2%、BS-EVA-Less が 3%、 $P_{max}$  が低下していた。EL 像は初期と比較して殆ど変化が無かった。600 時間では Intact Module が 7%、Al-BS が 11%、BS Less が 3%、BS-EVA Less が 5%、 $P_{max}$  が低下していた。ただし、Intact Module の 1 枚は  $P_{max}$  が 45%低下していた。EL 像では Intact Module と Al-BS でセル端部から暗輝度部が広がっていた。BS-Less では殆ど変化が見られなかった。BS-EVA-Less ではセル内部に暗輝度部が見られた。 $P_{max}$  が 45%低下している Intact Module では端部からセル内部にまで暗輝度部が広がっていた。800 時間では Intact Module が 70%、Al-BS が 52%、BS Less が 4%、BS-EVA-Less が 12%  $P_{max}$  が低下していた。EL 像では Intact Module と Al-BS で暗輝度部がセル中央部に向かって広がっていた。BS Less では殆ど変化が見られなかった。BS-EVA Less ではインターコネクタに沿って暗輝度部が発生していた。

	Intact Module	Al-BS	BS Less	BS-EVA Less
Initial				
100h				
200h				
400h				
600h				
800h				

図 II-7-6. Air-HAST 試験前後の EL 像

Air-HAST 試験のみ、試験時間ごとに試料を分けているため、Initial と 800 時間のみ同じ試料の EL 像。他の試験時間は初期画像を省略した。

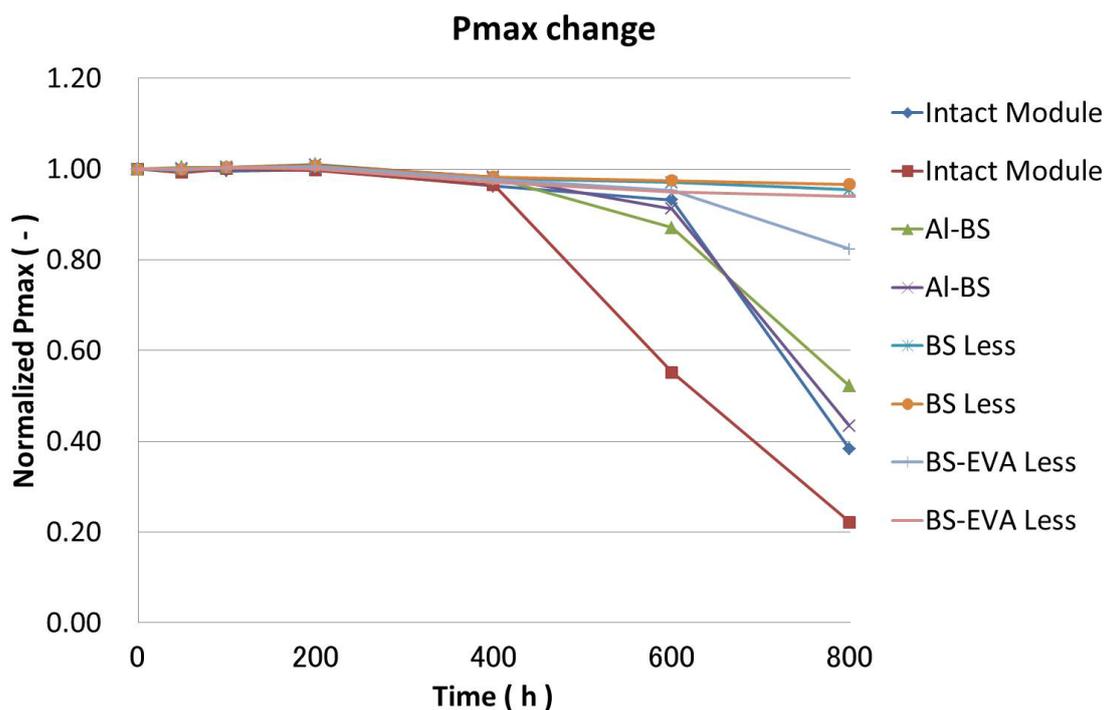


図 II-7-7. Pmax の Air-HAST 試験時間依存性

#### ④ 外観比較

DH4000 時間、HAST 120 °C/100%、110 °C/85% 800 時間、Air-HAST 800 時間を施したモジュールの外観写真を図 II-7-8 に示す。DH4000 時間と Air-HAST 800 時間では、インターコネクタや EVA が変色しており、配線上には、腐食のような跡が見られた。一方、HAST 800 時間では、配線や EVA で殆ど変色が見られなかった。Air-HAST と HAST800 時間の Al-BS では BS が 2 層目まで剥離が見られた。Air-HAST 800 時間の BS-Less ではインターコネクタと EVA が変色していたが、HAST800 時間では変色は見られなかった。HAST 120 °C/100% 200 時間後の Intact Module と 400 時間後の Al-BS の外観写真からは次のことがわかる。Intact Module の BS は 3 層構造であるが、外側の層は殆どが剥がれ落ちていた。Al-BS は端部にヒビと剥がれが発生しており、一部 Al 部分が露呈していた。400 時間までの試験では Intact Module では BS が剥がれ落ちた試料を、Al-BS も Al が露呈したまま継続して試験を実施した。そのため、400 時間では Al-BS の裏面の外側の層も剥がれ落ち、殆どの Al が露出していた。このため裏面からの水分浸入を防ぐ効果が薄れ、 $P_{max}$  が大きく落ち込む結果になったと思われる。

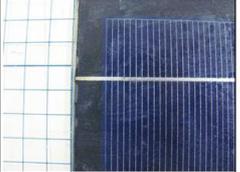
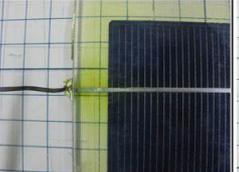
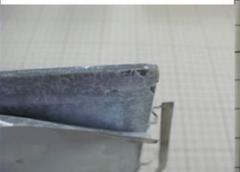
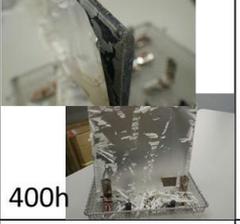
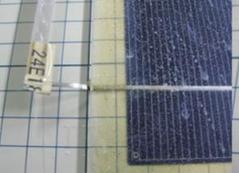
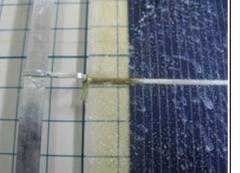
	Intact Module	Al-BS	BS Less	BS-EVA Less
DH 4000h				
HAST 110°C85% 800h				
HAST 120°C100%	  200h	 400h	-	-
Air-HAST 110°C85% 800h				

図 II-7-8. 各試験後の外観比較

⑤ Dark I-V による劣化要因の推定

Air-HAST 800 時間における Intact Module の Dark I-V の測定を行った結果を図 II-7-9 に示す。これにより、シャント抵抗は低下しておらず、直列抵抗の成分の増加を確認することが出来た。すなわち、Air-HAST におけるモジュール劣化の要因は直列抵抗成分の増加であることが推定できた。

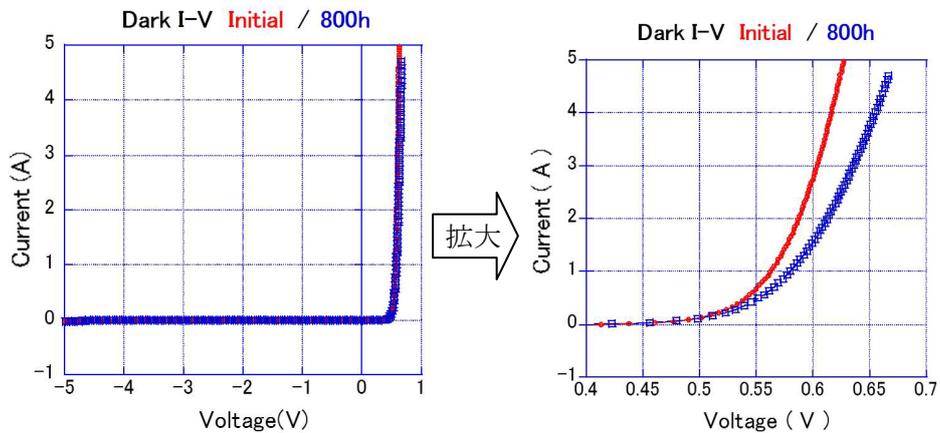


図 II-7-9. Dark I-V 特性

#### ⑥ イオンクロマト法による酢酸定量化

各試験を実施したモジュールの中央付近と端部のガラス面と BS 面の封止材を 3 cm<sup>2</sup>に切り取り、耐圧セルに純水と一緒に入れ、100 °Cで 12 時間高温に保つ。その後、室温まで冷却して抽出溶液中に析出した酢酸イオンをイオンクロマト法にて定量を行った。

各試験の  $P_{\max}$  保持率と酢酸イオンの残留量を図 II-7-10 に示す。初期の酢酸イオン残留量はセル中央のガラス側で 59  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 78  $\mu\text{g/g}$  と BS 側での残留量がわずかに多かった。セル端部のガラス側で 63  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 67  $\mu\text{g/g}$  とほぼ同等であった。Air-HAST 試験時間が 400 時間では、セル中央のガラス側で 140  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 540  $\mu\text{g/g}$  と BS 側での残留量が 3 倍になっていた。セル端部のガラス側では 540  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 450  $\mu\text{g/g}$  とガラス側での残留量が少し多かった。600 時間では、セル中央のガラス側で 260  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 640  $\mu\text{g/g}$  と BS 側での残留量が 2.5 倍で推移していた。セル端部のガラス側で 1100  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 580  $\mu\text{g/g}$  とガラス側でほぼ倍の残留量であった。800 時間では、セル中央のガラス側で 1500  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 1900  $\mu\text{g/g}$  と BS 側での残留量が多かった。セル端部のガラス側で 3200  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 1300  $\mu\text{g/g}$  とガラス側で約 3 倍の残留量であった。HAST 800 時間ではセル中央のガラス側で 1200  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 690  $\mu\text{g/g}$  とガラス側で残留量が 2 倍多かった。セル端部のガラス側で 2300  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 600  $\mu\text{g/g}$  とガラス側で約 4 倍の残留量であった。DH4000 時間ではセル中央のガラス側で 1600  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 1000  $\mu\text{g/g}$  とガラス側での残留量が多かった。セル端部のガラス側で 2600  $\mu\text{g/g}$ 、BS 側で 1000  $\mu\text{g/g}$  とガラス側で 2.6 倍であった。 $P_{\max}$  保持率をしてみると、Air-HAST 試験では、試験時間が経過するに伴い、 $P_{\max}$  保持率の低下が見られた。特に試験時間 600 時間では  $P_{\max}$  保持率が 55%と急激に低下しており、800 時間では 38%まで低下していた。HAST 試験では 800 時間では  $P_{\max}$  保持率が 50%であった。DH では 4000 時間で、 $P_{\max}$  保持率が 43%であった。これらのことより、 $P_{\max}$  保持率と酢酸イオンの残留量には逆相関の関係があることがわかった。また、セル端部の酢酸イオンの残留量を見てみると、ガラス側と BS 側では、初期を除いてガラス側での残留量が多いことが分かった。BS 側はセル中央部と端部では殆ど同じ値であることも分かった。HAST や DH では、ガラス側での酢酸イオン残留量が多いのに対し、Air-HAST では BS 側での量が多いことが分かった。Air-HAST800 時間と DH4000 時間のガラス側ではほぼ同等の酢酸イオンが残留していた。

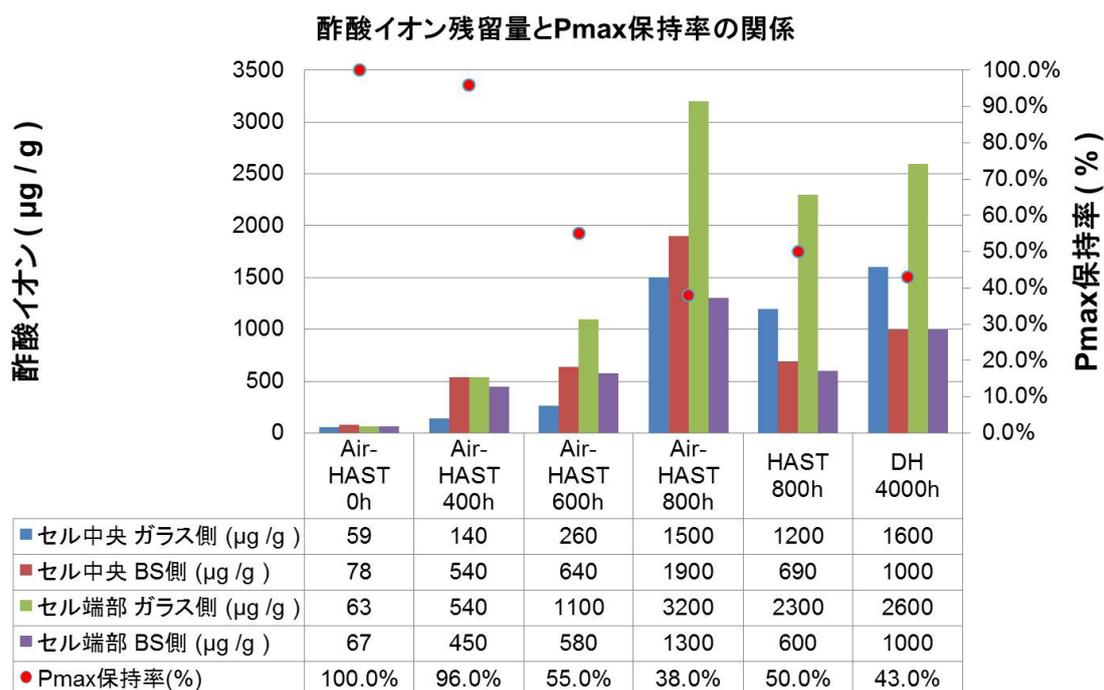


図 II-7-10. 酢酸イオン残留量と P<sub>max</sub> 保持率の関係

#### ⑦ 高解像度 SEM によるフィンガー電極断面観察

各試験を実施したモジュールの EL 暗部と明部を切り出し、高解像度 SEM によるフィンガー電極の断面観察を行い、試料間の比較を行った。分析には、図 II-7-11 に示す DH85 °C 85% 4000 時間、Air-HAST 400 時間、800 時間、HAST 800 時間の 4 試料を用いた。試料はダイヤモンドホイールにて 20 mm×20~30 mm に切断した後、ワイヤーソーにて樹脂埋め可能なサイズにまで切断した。その後、エポキシ樹脂にて埋め込み、研磨によりフィンガー電極長手方向に断面出しを行い、アルコール系で仕上げ研磨をした後、イオンミリングを施した。断面観察の際には試料に Pt-Pd 蒸着を行い、FE-SEM 装置(日本電子社製: JSN7100F)にて SEM 観察及び EDX 分析を実施した。断面観察像を図 II-7-12 に示す。DH4000 時間の EL 明部付近のフィンガー電極断面像の界面付近に着目して観察すると、界面の Si と Ag は全体的に接着しているが、一部で剥離している部分が観察された。また、フィンガー電極が無くなっている部分も観察された。一方、EL 暗部付近では界面の Si と Ag は全体的に剥離しており、接着している部分は一部であった。HAST 800 時間の EL 明部付近のフィンガー電極では界面の Si と Ag が剥離している箇所と接着している箇所が点在していた。また、フィンガー電極の一部が消失している箇所がいくつか確認できた。EL 暗部付近のフィンガー電極では界面の Si と Ag は全体的に剥離しており、接着している部分が殆ど観察されなかった。Air-HAST 400 時間では EL に明暗の差が殆ど無かったので、セル中央付近と端部のフィンガー電極の断面だしを行った。中央付近のフィンガー電極の界面では、界面の Si と Ag は全体的に接着しており、一部剥離はあるものの、その距離は DH や HAST などと比べると狭い。端部付近のフィンガー電極の界面も同様で全体的に接着しており、剥離も中央付近よりは少し多い程度であった。

Air-HAST800 時間の EL 明部付近のフィンガー電極では界面が全体的に接着していたが、

剥離している箇所も見受けられた。剥離の距離は 400 時間よりも大きい。EL 暗部付近のフィンガー電極では界面が全体的に剥離していた。これらの結果より、EL 暗部では明部に比べてフィンガー電極の界面の Si と Ag が剥離している割合が大きい傾向があることが分かった。また、フィンガー電極の一部が消失していることや剥離の度合いから、接着界面の接着力が低下していることが示唆される。分析位置 A, B におけるフィンガー電極の EDX による分析を行った位置を図 II-7-13、図 II-7-14 に、結果を表 II-7-1、表 II-7-2 に示す。明暗部による差や接着部と剥離部での Na や Pb の偏析による濃度の上昇は観察されなかった。

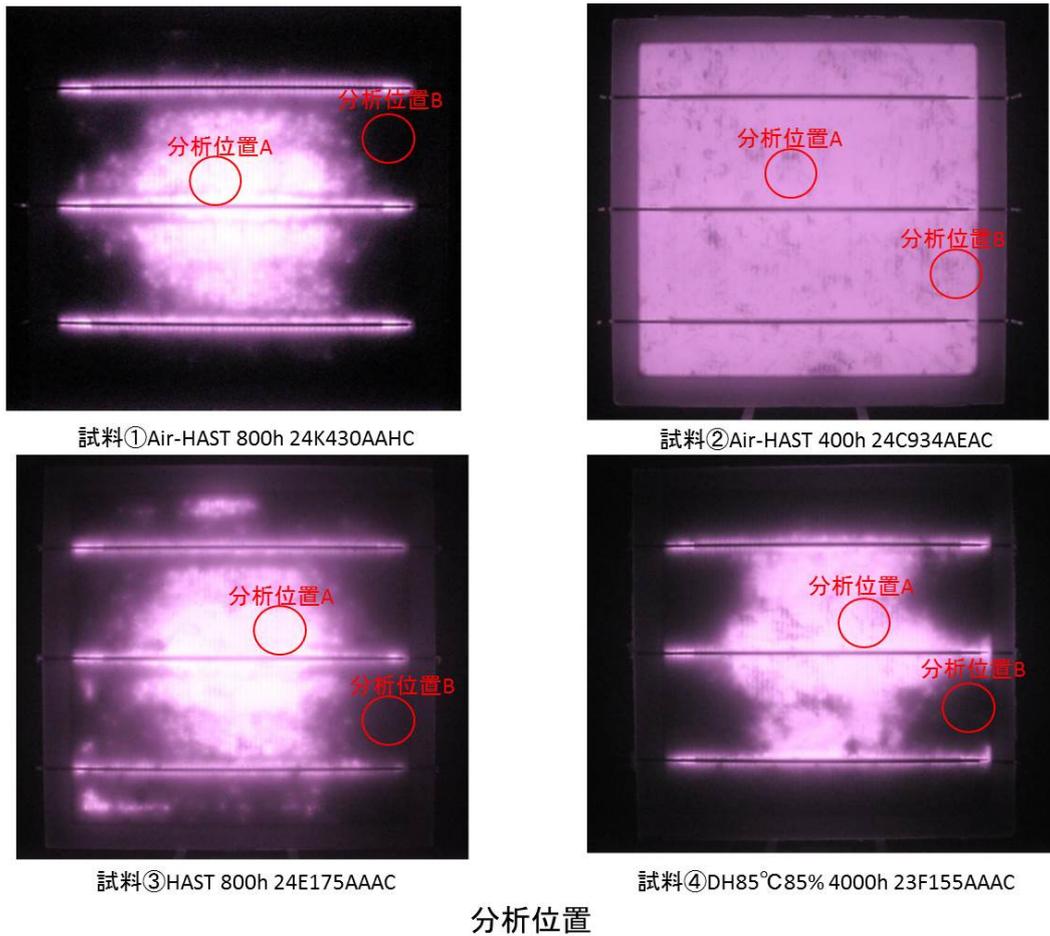
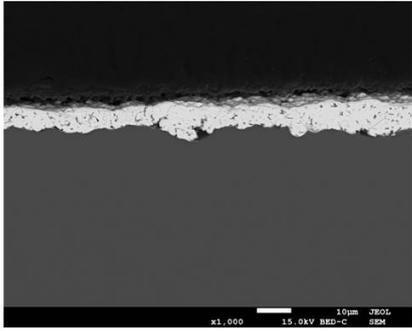
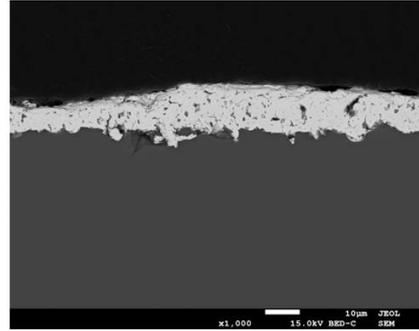


図 II-7-11. 断面観察箇所

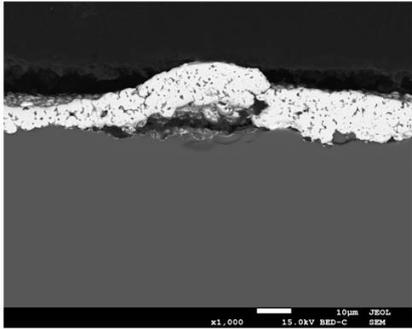
反射電子像 1000倍



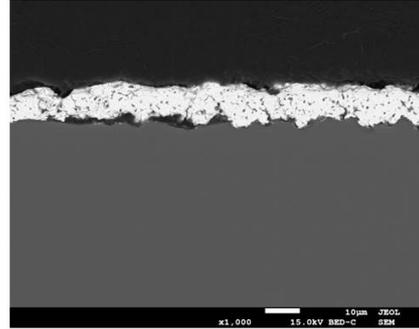
Air-HAST400h 24C934AEAC 分析位置A 剥離部



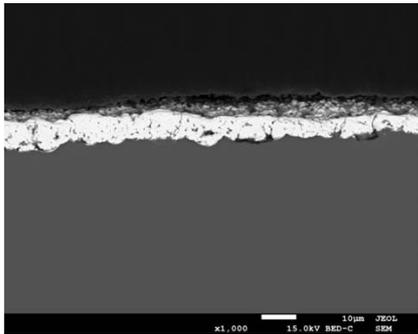
Air-HAST400h 24C934AEAC 分析位置B 剥離部



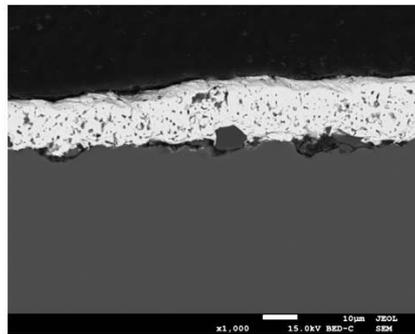
Air-HAST 800h 24K430AAHC 分析位置A 剥離部



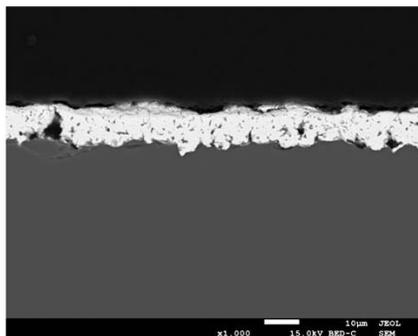
Air-HAST 800h 24K430AAHC 分析位置B 剥離部



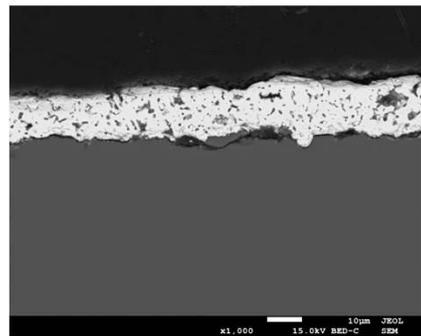
HAST800h 24E175AAAC 分析位置A 剥離部



HAST800h 24E175AAAC 分析位置B 剥離部



DH85°C85%4000h 23F155AAAC 分析位置A 剥離部



DH85°C85%4000h 23F155AAAC 分析位置B 剥離部

図 II-7-12. 各試験の断面での剥離部

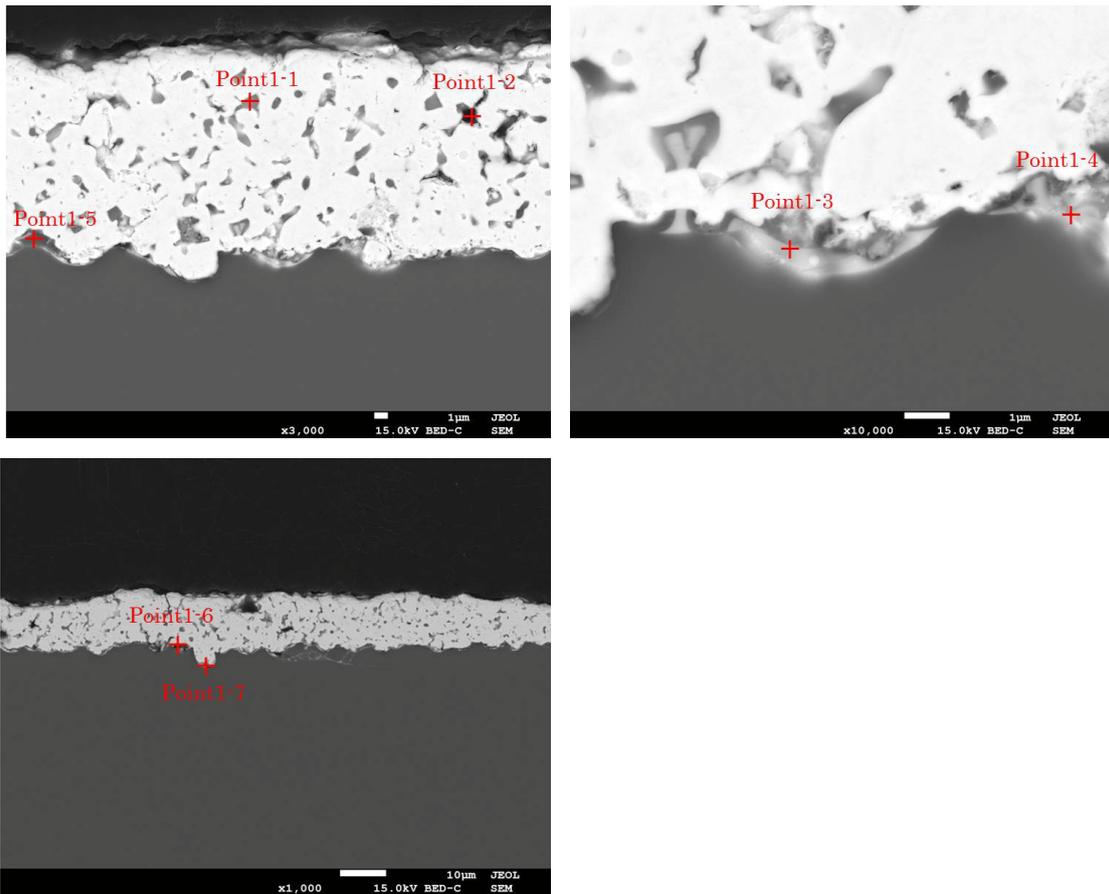


図 II-7-13. 試料①:Air-HAST 800 h (24K430AAHC)分析位置 A EDX 分析半定量位置

表 II-7-1. 試料①:Air-HAST 800 h (24K430AAHC)分析位置 A EDX 分析半定量結果  
表示：重量%

	Point1-1	Point1-2	Point1-3	Point1-4	Point1-5	Point1-6	Point1-7
C-K	2	17	10	80	7	11	25
N-K	-	-	2	-	-	-	-
O-K	17	3	3	1 未満	4	4	2
Na-K	1	-	1 未満	-	-	1 未満	-
Al-K	1	-	-	-	-	-	-
Si-K	4	1 未満	43	6	58	13	31
Ag-L	61	78	34	12	26	64	29
Pb-M	14	2	7	2	6	9	12

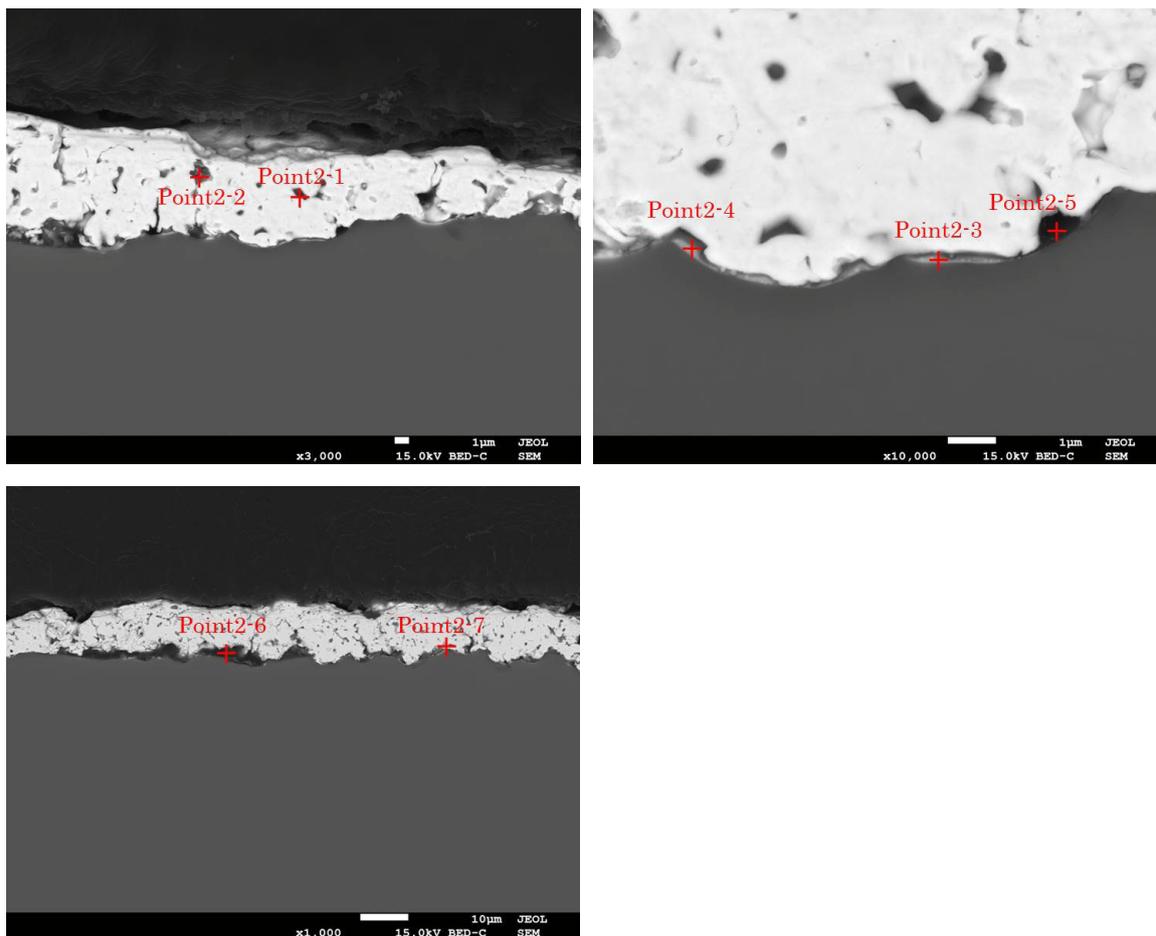


図 II-7-14. 試料①:Air-HAST 800 h (24K430AAHC)分析位置 B EDX 分析半定量位置

表 II-7-2. 試料①:Air-HAST 800 h (24K430AAHC)分析位置 B EDX 分析半定量結果

表示：重量%

	Point2-1	Point2-2	Point2-3	Point2-4	Point2-5	Point2-6	Point2-7
C-K	7	5	11	9	37	55	15
N-K	-	-	-	4	-	-	-
O-K	3	20	19	21	2	12	5
Na-K	1 未満	1	1 未満	1 未満	-	-	1 未満
Al-K	1 未満	1	-	-	-	-	-
Si-K	2	8	30	27	35	7	64
Ag-L	85	60	32	27	24	25	7
Pb-M	2	5	8	11	2	2	9

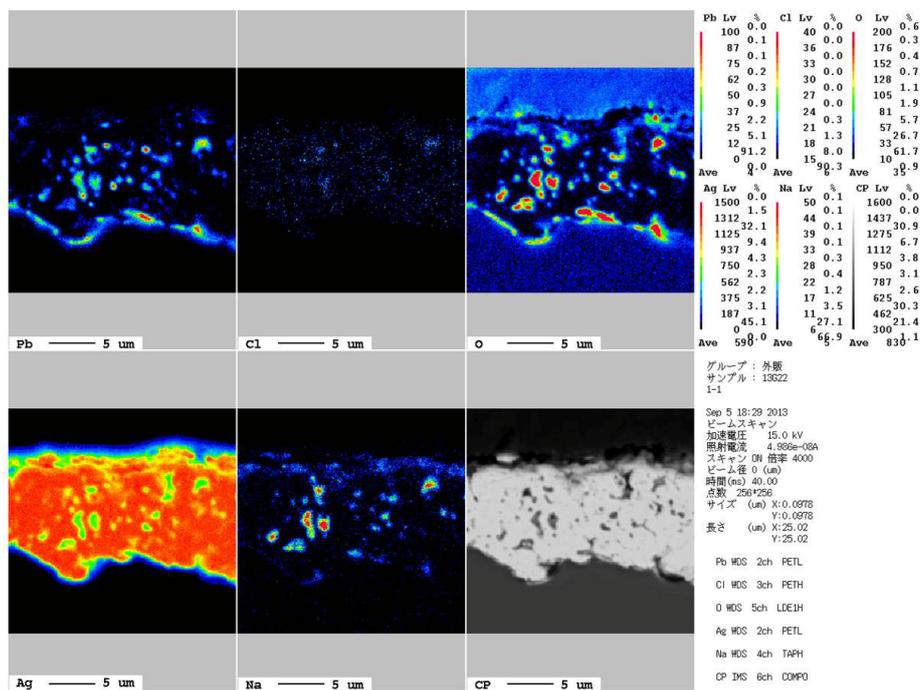
⑧ EPMAによる元素分析

上記で断面だしをしたフィンガー電極の試料を用いて EPMA 装置(日本電子製：JXA-8200)による元素分析を行い、試料間の比較を行った。測定条件を表 II-7-3 に、結果を図 II-7-15 に示す。

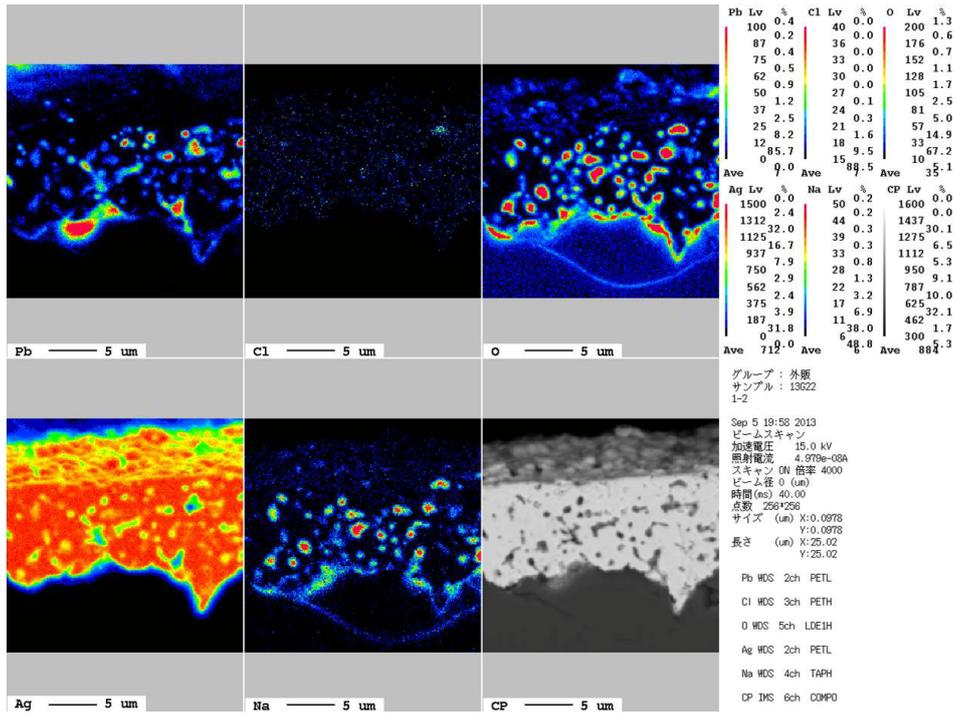
DH4000 時間における元素分析の結果では EL 明部に比べ EL 暗部における Si と Ag の界面の剥離している部分や Ag 電極内部の隙間に Na や O、Pb が若干多く存在しているように見える。HAST 800 時間や Air-HAST 400 時間、800 時間でも同様の傾向で、各試験や場所による顕著な差は見られなかった。

表 II-7-3. EPMA 分析測定条件

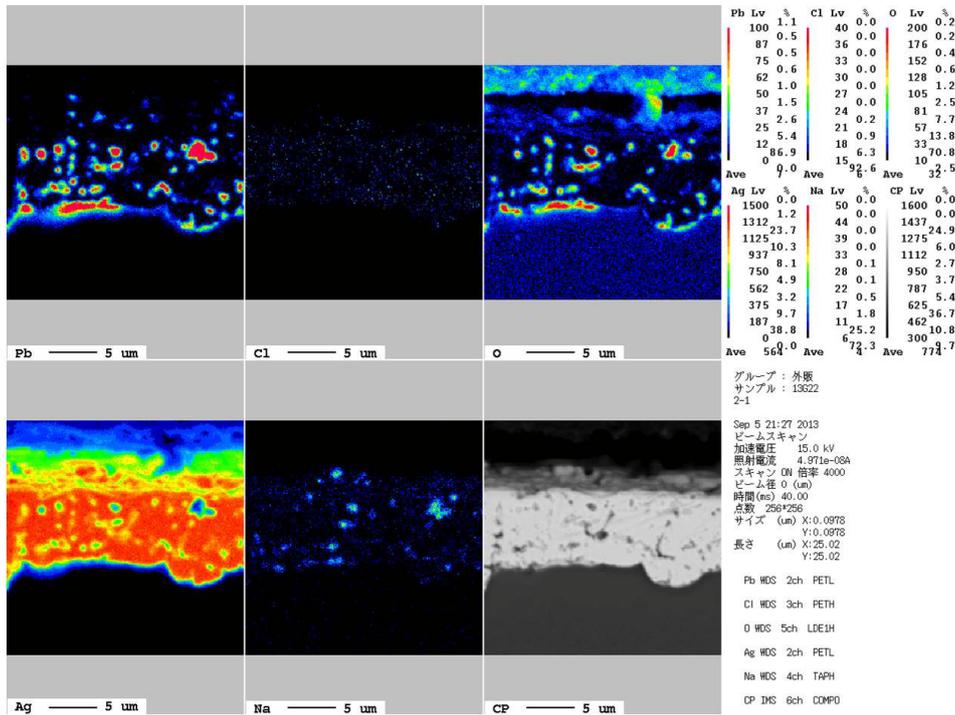
項目	内容・条件
加速電圧	15 kV
ビーム電流	50 nA
分析領域	25 μm × 25 μm
積算時間	40 ms
分析元素	Ag, Na, Pb, O, Cl



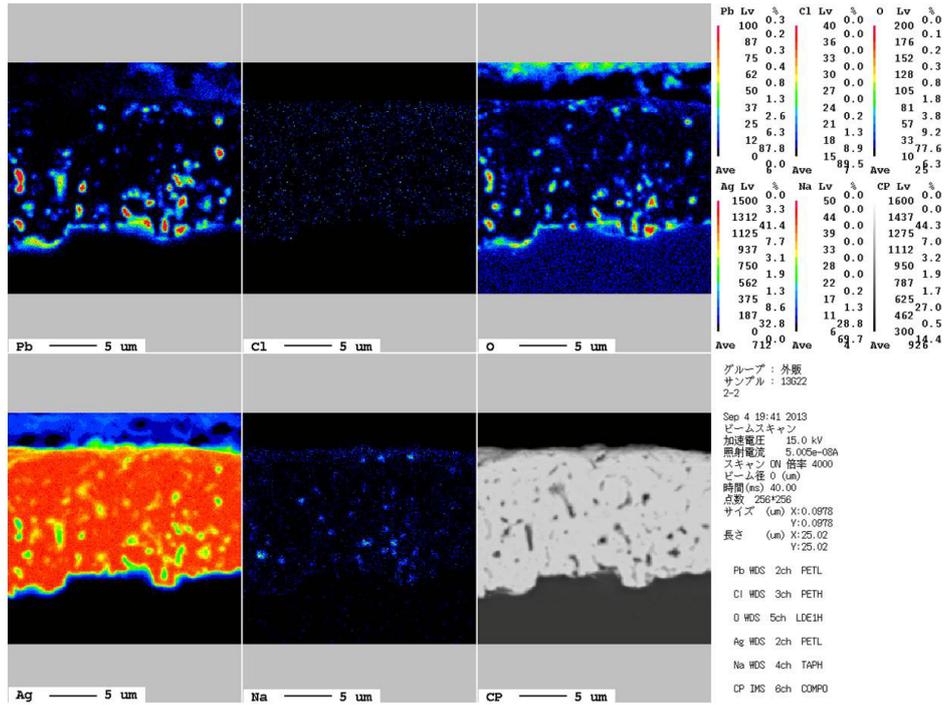
試料: Air-HAST 800h 24K430AAHC 分析位置A EPMAマッピング結果



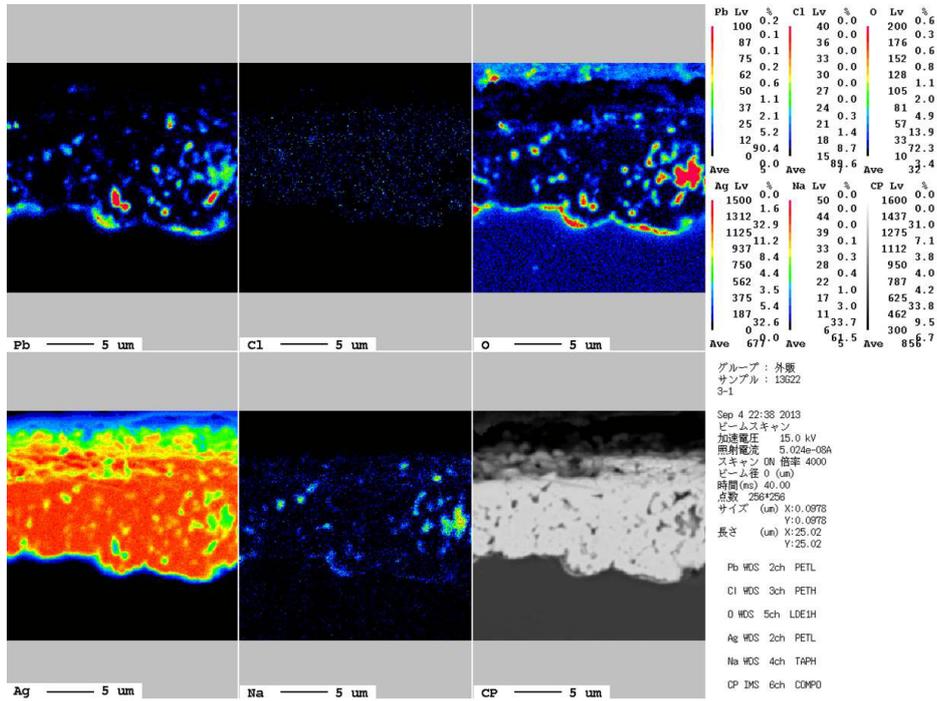
試料: Air-HAST 800h 24K430AAHC 分析位置B EPMAマッピング結果



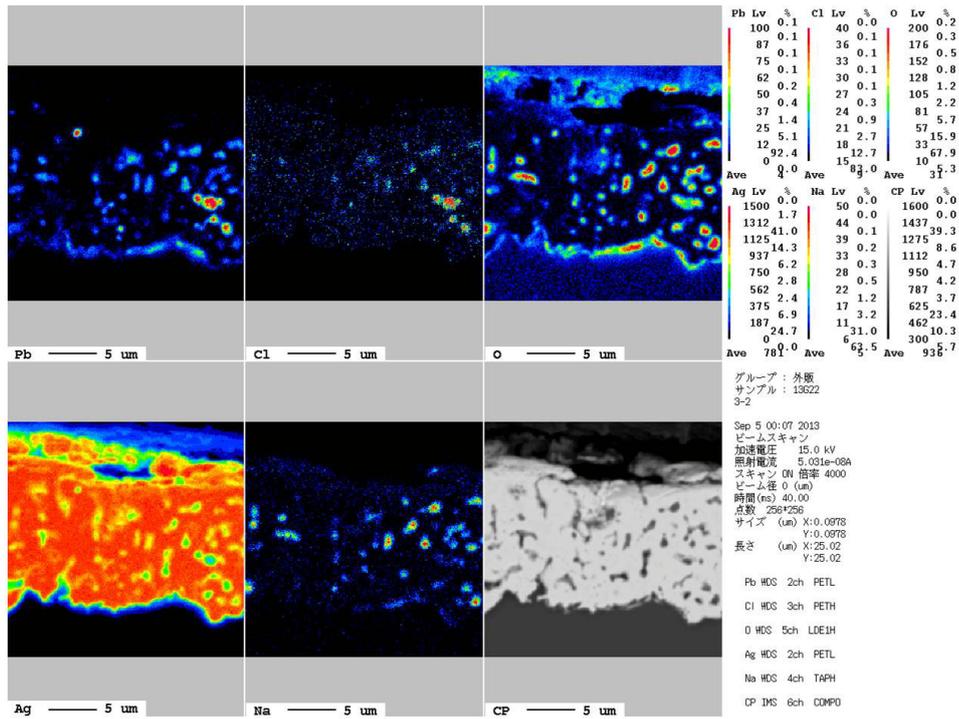
試料: Air-HAST 400h 24C934AEAC 分析位置A EPMAマッピング結果



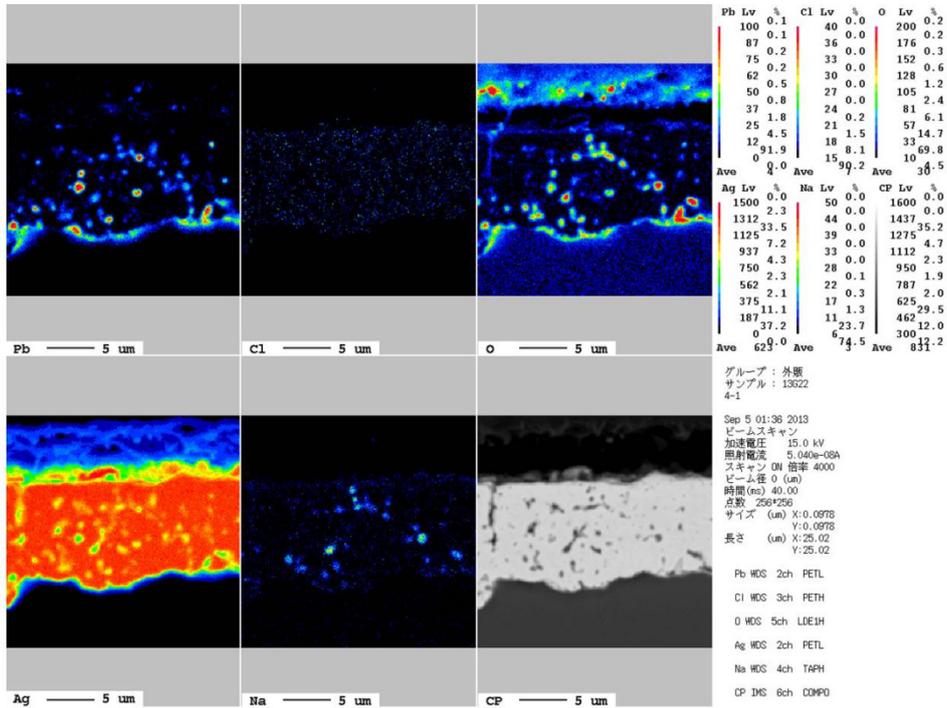
試料: Air-HAST 400h 24C934AEAC 分析位置B EPMAマッピング結果



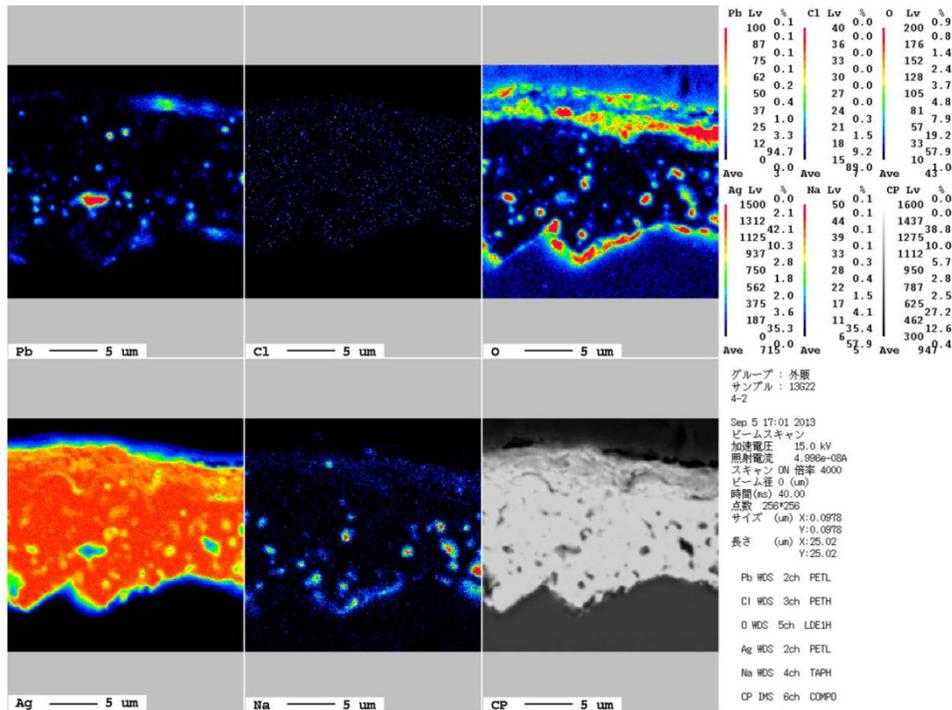
試料: HAST 800h 24E175AAAC 分析位置A EPMAマッピング結果



試料: HAST 800h 24E175AAAC 分析位置B EPMAマッピング結果



試料: DH85°C85% 4000h 23F155AAAC 分析位置A EPMAマッピング結果



試料: DH85°C85% 4000h 23F155AAAC 分析位置B EPMAマッピング結果

図 II-7-15. 各試験後の EPMA 観察結果比較

## II-8. 考察

### ① 環境試験の比較

DH4000 時間で Intact Module > Al-BS > BS-Less の順に  $P_{max}$  が初期値と比べて低下していた。HAST では 120 °C/100% 400 時間で Al-BS > BS-EVA-Less > Intact Module > BS-Less の順に  $P_{max}$  が初期値と比べて低下していた。Air-HAST 800 時間では Intact Module > Al-BS > BS-EVA-Less > BS-Less の順に  $P_{max}$  が初期値と比べて低下していた。図 II-7-8 に 800 時間後の外観写真を示したが、Intact Module では EVA が変色しており、電極が茶変していた。電極の変色は DH では 3000 時間程度から見られる現象であり、Air-HAST 800 時間での変色の程度が DH4000 時間とほぼ同じことから DH を 5 倍程度加速出来た可能性が出てきた。Al-BS では裏面のシートが剥がれかかっていた。このため、Al-BS の役割である水分浸入を防ぐ役目が低下し、 $P_{max}$  の減少率が大きくなったと考えられる。Intact Module の劣化に関しては BS 側から浸入した水分により酢酸が発生することに起因するとの報告があり、モジュール内に酢酸が滞留しやすいほど、劣化が進むと考えられている。劣化の状態は DH2000 時間までは殆ど変化がないが、DH3000 時間で EL 像の端部から暗輝度部が広がり始め、3500 時間でさらに劣化が進行し DH4000 時間では暗輝度部がセル中央に向けて進行している様子が見られた。BS-Less や BS-EVA-Less のモジュールでの劣化が小さかったのは封止材内部で発生した酢酸が抜け出るために劣化がそれほど進行していないと考えられる。これらのことから水分浸入による劣化プロセスで仮定した 1.BS の水分透過(封止材に水分) 2.封止材の水分透過(セルに水分到達までの封止材水分透過/拡散速度) 3.セル腐食進行(セル水分到達後の腐食進行速度/腐食モード)の 3 つのプロセスについての劣化の進行についてはセル内部に水分が留まる状態でないと劣化が進行し難いことが推定される。

## ② イオンクロマト法による酢酸定量化による比較

Air-HAST においては、試験時間が進むにつれて、酢酸イオンの残留量は増加し、 $P_{\max}$  保持率は低下する関係性がみられた。酢酸イオンの残留量とガラス面、BS 面での関係では HAST や DH ではセル中央、セル端部ともにガラス側での酢酸イオンの残留が BS 側で多かった。また、BS 側では、セル中央とセル端部での酢酸イオンの残留量はほぼ同じであった。これは発生した酢酸イオンが BS 側から抜け出ており、BS 平面で平衡している可能性があることを示している。また、ガラス側ではセル端部がセル中央よりも酢酸イオン残留量が多かった。これはセル端部から浸入した水分により酢酸が発生すると言われており、また、浸入した水分が徐々にセル中央に進むため、水分の濃度差が酢酸の残留量の差として表れている可能性があると考えられる。Air-HAST 試験では、セル中央ではガラス側よりも BS 側の方が酢酸イオンの残留量が多かった。セル端部では、BS 側よりもガラス側での酢酸イオンの残留量が多かった。ガラス側でみると、セル中央よりもセル端部の方が、酢酸イオンは多く残留していた。BS 側では、セル中央がセル端部よりも酢酸イオンの残留量が多かった。外部圧力の違いによる透過率の違いを推定すると、DH や HAST では圧力差  $dP$  は正になり、酢酸が BS を通して外に透過できる。一方、Air-HAST では圧力差  $dP$  は負となり酢酸が外部に透過し難い状態にあることが推定できる。

## ③ 断面観察及び元素分析による比較

各試験とも EL 明部と暗部ではフィンガー電極の剥離に差が見られた。元素分析では界面の剥離部分や電極内の隙間に Na や O、Pb が観察できたが、試験や場所による差は見られなかった。これらのことより、Dark I-V で示された直列抵抗成分の増加は界面における特定元素の酸化による抵抗の増加ではなく、界面の接着強度の低下による接着面積の低下や剥離による抵抗の増加を示唆すると考えられる。フィンガー電極は Ag ペーストをガラスフリットとして焼成する方法を用いて作製されている。このガラスフリットは酸性水溶液に溶ける可能性が示唆されており、環境試験下におけるモジュール内への水分浸入による EVA からの酢酸発生により、ガラスフリットが溶解し、界面における電極の導電性の低下や、接着強度が脆くなっているため接着抵抗の増加や剥離を引き起こしていると考えられる。

Pb が偏析して  $PbO_2$  として高抵抗化しているとの主張もあるが、もともと Ag のガラスフリット中に Pb を入れ、耐食性が良く、電子伝導性の良い  $PbO_2$  として利用しており、界面に  $PbO_2$  は多く存在すると考えられる[2]。酢酸鉛は可溶性であるため、酢酸にさらされることにより腐食され  $Pb^{++}$  と不安定な状態になる。酢酸塩と大気中の炭酸ガスを含む水溶液中では保護性の  $PbO$  が侵されて、 $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_3$  となり耐食性が失われる。うすい酢酸の場合は溶存酸素によって腐食が進行する。同様に、酸素を溶存しているギ酸にも激しく侵される。このため、導電性の良い  $PbO$  が減り、また、ガラスフリットの接着強度が低下することで、抵抗成分の増大の要因となると考えられる。

### サブテーマ 3 のまとめ

水分浸入による劣化プロセスの検討を行うために、構成の異なる試料を作製し、DH85 °C 85%の延長試験を実施した。また、DH の加速方法の検討として HAST 試験、Air-HAST 試験を実施した。その結果、Intact Module において DH4000 時間と Air-HAST110 °C85% 800 時間では試験後の電気特性や EL、外観比較において、相関性があることが確認できた。一方、HAST 試験 120 °C100%では、400 時間で BS が剥離するなど、故障モードが異なり、ストレスが過剰である可能性を示した。また、HAST 110 °C85% 800 時間では、試験後の電気特性、EL は DH4000 時間と相関性があるものの、外観比較において着色に差が出た。

Dark I-V により、DH や Air-HAST では直列抵抗の増加が劣化要因であることが推定された。

イオンクロマト法による酢酸定量化では Pmax の低下と酢酸イオン残留量に関係性を見出した。高解像度 SEM 及び EPMA による断面観察、元素分析では DH、HAST、Air-HAST とともに Si、Ag 界面で剥離が発生していることが確認できたが特定の元素が寄与していることまでは分からなかった。これらのことより、Air-HAST 試験は DH 試験を 5 倍程度加速できる可能性が示唆された。

### 参考文献

1. 産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター：第Ⅱ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 中間成果報告書、2012.
2. 金属防蝕技術便覧、日刊工業新聞社、1972, pp. 330-331.

(エスペック株式会社：鈴木 聡)

## サブテーマ 4 UV 耐光性試験および UV 照射後 DH/TC 交互試験

QA フォーラム TG5 にて、欧州・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-9. 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-9-1、表 II-9-1 に示す。本装置の光源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 3 UV の光照射 ( $1\text{UV} = 60\text{ W/m}^2 @300\text{-}400\text{ nm}$ ) 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・空冷ユニットの使用により、光照射のない状態で $-40\sim 90^{\circ}\text{C}$ 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）

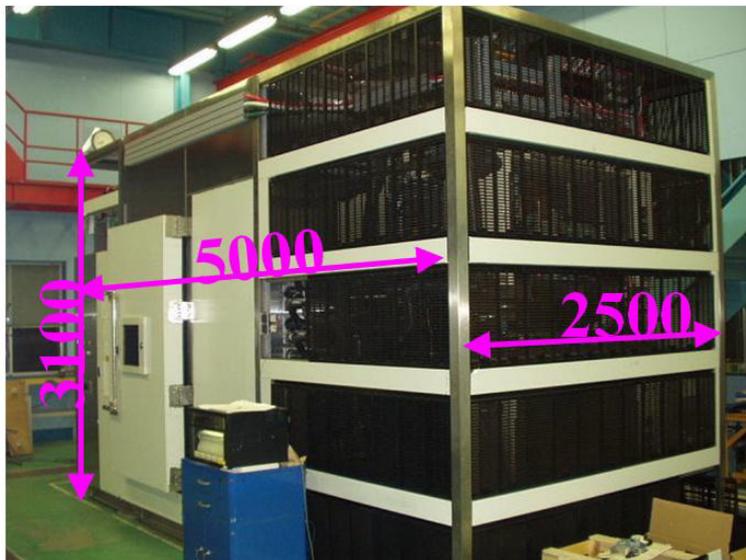


図 II-9-1. 複合加速試験装置全景

表 II-9-1. 複合加速試験装置仕様

項目	仕様・性能
試験温度範囲(光照射無し)	-40~+90℃
試験温度範囲(光照射3sun以下)	+50~+90℃
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-10. 試験条件確定のための予備試験

II-9節で述べたように、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)をシーケンスに行うことで光-温度-湿度の効果を見ることも検討されたが、まずは確実な結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-10-1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-10-2に端子箱と熱電対の位置が分かる写真を示す。

表II-10-1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℃、65~45℃、85~45℃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℃および65℃の場合は槽内が安定しなかった。本装置はセンサを備えていないため、black panel temperature (BPT)は測定していない。

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を1.5UV(90W/m<sup>2</sup>)、設定空気温度を65℃(表II-10-1中の水色の行)として実施することとした。

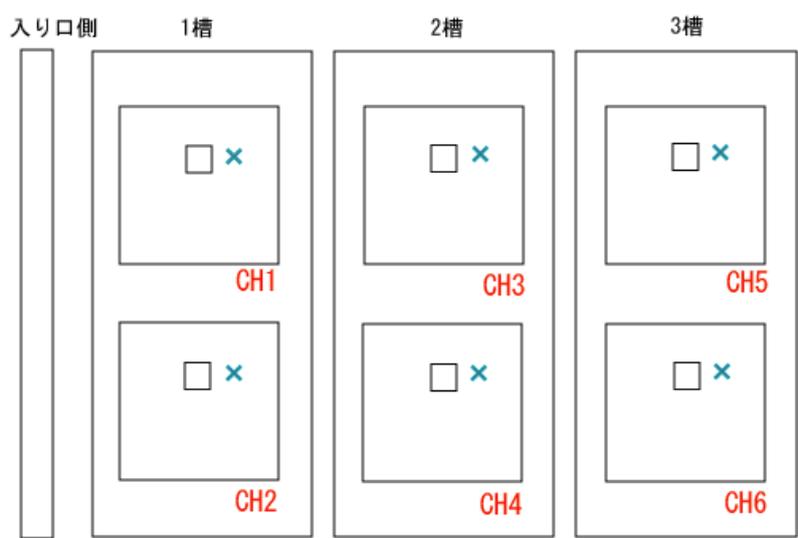


図 II-10-1. 試料配置と熱電対貼付箇所

裏面から見た時を模式的に示す。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箱の右（図中×印）に貼付。ここは表から見たとき、左上セルの中央の裏面に相当。



図 II-10-2. 端子箱と熱電対の位置

表 II-10-1. 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-11. 試験計画と試験スケジュール

### II-11-1. UV 耐光性試験

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（非開示）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。ここで保管期限切れとは、常温常湿の実験室に 3 ヶ月間放置したものを指す。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 月の 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-11-1 にサンプル ID と光照射条件をまとめた。なお、試験中の端子条件は全て開放である。

表 II-11-1. 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	→	→

試験 1 RUN = 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。

第 1RUN (330 時間) : 2012/7/27~2012/8/10 @つくば → 完了

第 2RUN (330 時間) : 2012/8/29~2012/9/12 @つくば → 完了

第 3RUN (330 時間) : 2012/11/5~2012/11/19 @鳥栖 → 完了

第 4RUN (330 時間) : 2013/1/21~2013/2/3 @鳥栖 → 324 時間で終了

なお、装置トラブルにより、第 4RUN 実施中、残り 6 時間のところで試験を終了することとした (平成 24 年度試験)。

## II-11-2. UV 照射後 DH/TC 交互試験および追加 UV 試験

平成 25 年度は、TG5 との打合せにより、上記 UV 照射試験済みモジュール 6 台の内、2 台 (封止材 A, B から各 1 台) は、引き続き UV 照射試験を継続し、材料劣化を見ることとした。さらに別の 2 台 (封止材 A, B から各 1 台) は、他のストレスを与えて、デラミネーションが起きないか調べることとした。ストレスとしては、DH と TC を交互に実施することとなった。表 II-11-2 にサンプル ID と試験内容をまとめたものを示す。

表 II-11-2. サンプル ID と試験内容

ID	封止材	UV1314h (RUN1~4)	H25 試験	主旨	H25 進捗
120410-01	A	Control module	←	←	←
120410-02(CH1)	A	ガラス面 x 3 + BS面 x 1	DH500→ TC100交互	他のストレス →剥離を期待	DH×2, TC×2済, 2回目のTC終了 (2013/12/15)
120410-03(CH4)	A	ガラス面 x 3 + BS面 x 1	保留		
120410-04(CH5)	A	BS面 x 1 + ガラ ス面 x 3	追加UV (ガラス面)	材料劣化を見る	2回目の500h終了 (2014/1/14)
120710-01(CH2)	B	ガラス面 x 3 + BS面 x 1	DH500→ TC100交互	他のストレス →剥離を期待	DH×2, TC×2済, 2回目のTC終了 (2013/12/15)
120710-02(CH3)	B	ガラス面 x 3 + BS面 x 1	保留		
120710-03(CH6)	B	BS面 x 1 + ガラ ス面 x 3	追加UV (ガラス面)	材料劣化を見る	2回目の500h終了 (2014/1/14)

各試験の具体的なスケジュールは以下のとおりである。

☆UV 累計 1314 時間 + DH500h/TC100c 交互試験

追加 DH1 回目 (+DH500) : 6/27~7/18 → 完了

追加 TC1 回目 (+TC100) : 8/5~8/24 → 完了

追加 DH2 回目 (+DH500) : 10/23~11/13 → 完了

追加 TC2 回目 (+TC100) : 11/26~12/15 → 完了

☆UV 累計 1314 時間 + 追加 UV500h 試験 (複合加速試験装置)

追加 UV1 回目 (+UV500) : 10/4~10/28 → 完了

追加 UV2 回目 (+UV500) : 11/26~1/14 → 完了

※途中、装置の故障などがあったため、500h の試験に 22 日以上要している。

## II-12. 結果と考察

### II-12-1. UV 耐光性試験

試験サンプル数と 1RUN の試験時間が異なるため、ここでは、平成 24 年度の UV 照射試験の結果を示す。平成 25 年度実施の追加 UV 照射試験については、II-12-2 項で示す。

表 II-11-1 に示したとおり、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 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-12-1 および図 II-12-2 にはそれぞれ、ガラス面から 990 h 照射後、BS 面から 324 h 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 カーブの変化を示す。UV 照射により  $I_{sc}$  が初期から 1~2%低下している。図 II-12-3 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 1314 h でも変化は見られなかった。図 II-12-4 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-12-5 には、色調の変化 (Yellow Index=YI、ASTM D1925) をガラス面側から見た測定点①と BS 面側から見た測定点⑥について示した。ガラス面側からの測定では、若干の変動はあるが明確な増加傾向は見られなかった。一方、BS 面側から見た測定では、UV 990 h~UV 1314 h での YI 値は減少しており、BS 面側から光照射していることおよび、II-12-2 項に示す図 II-12-10 右図の初期から UV 330 h までの変化と併せて考えると、光照射下では、黄変の発生・進行が抑制される、または生じていた黄変が解消する効果が働いていると類推される。

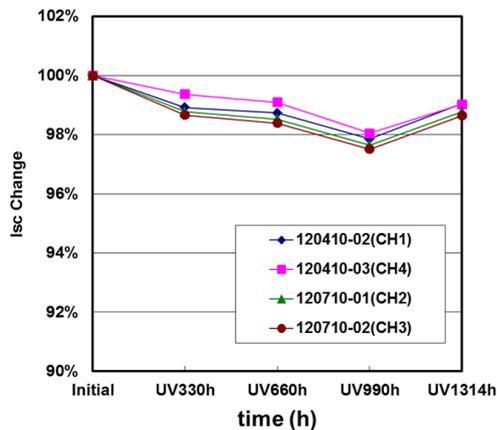


図 II-12-1.  $I_{sc}$  vs. 照射時間 (ガラス面から照射 990 h + BS 面から照射 324 h)

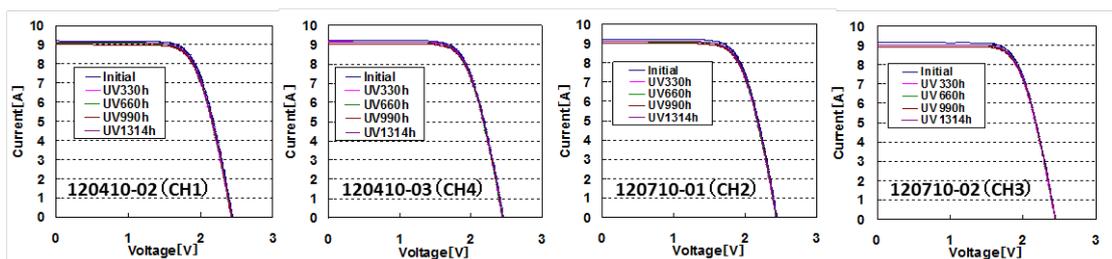


図 II-12-2. I-V カーブの変化 (ガラス面から照射 990 h + BS 面から照射 324 h)

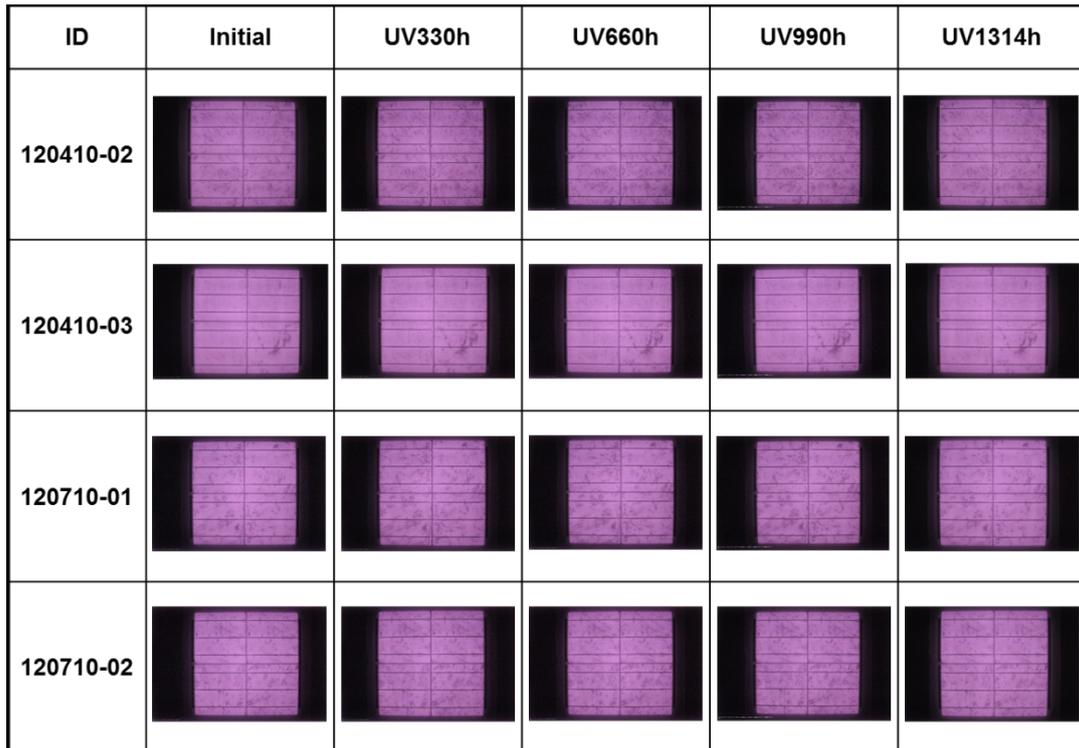


図 II-12-3. EL 画像の変化 (ガラス面から照射 990 h + BS 面から照射 324 h)

120410-02 (CH1)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	0	○	>99.9	○	4.54	○
UV990h	0	○	>99.9	○	5.13	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.23	○

120410-03 (CH4)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	0	○	>99.9	○	4.54	○
UV990h	0	○	>99.9	○	5.45	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.32	○

120710-01 (CH2)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	1	○	10	○	1.52	○
UV990h	0	○	>99.9	○	5.66	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.95	○

120710-02 (CH3)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	1	○	10.7	○	1.25	○
UV990h	0	○	>99.9	○	5.36	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.23	○

図 II-12-4. 耐電圧試験の結果 (ガラス面から照射 990 h + BS 面から照射 324 h)

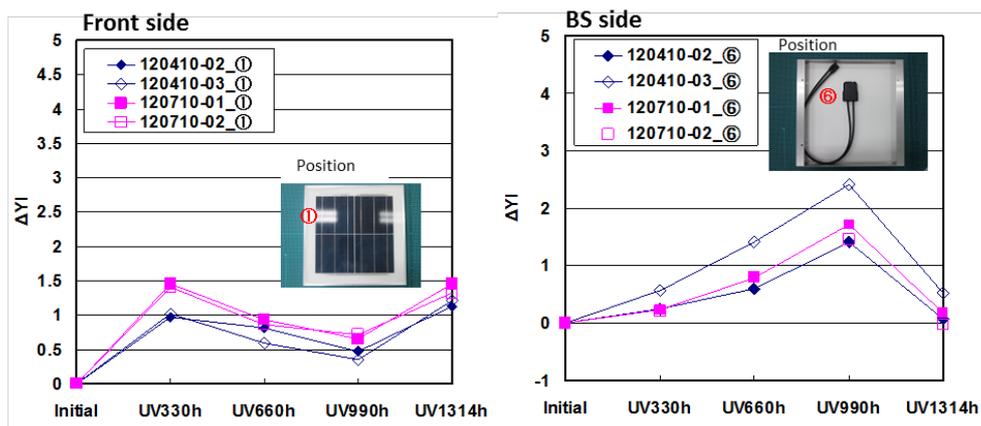


図 II-12-5. 色調の変化（ガラス面から照射 990 h + BS 面から照射 324 h）

図 II-12-6 および図 II-12-7 にはそれぞれ、BS 面から 330 h 照射後、ガラス面から 984 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 カーブの変化を示す。1314 h 後の測定では、 $I_{sc}$  が約 2% 低下した。図 II-12-8 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。図 II-12-9 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-12-10 には、色調の変化（Yellow Index=YI、ASTM D1925）をガラス面側から見た測定点①と BS 面側から見た測定点⑥について示した。図 II-12-10 左図から、ガラス面から UV 照射を開始した UV 330 h～UV 660 h における色調の増分は 1.0～1.4 程度であることがわかる。一方、図 II-12-5 に示すように、初期から UV 330 h までの色調の増分は 1.0～1.4 程度であることから、ガラス面から UV 照射を始めた同じ 330 h に対しての色調の変化は同程度であることが確認できる。

一方、図 II-12-10 右図に示すように、UV 330 h まで、BS 側は UV 照射されているにもかかわらず黄変は進んでいない。これは、上述の図 II-12-5 右図における UV 990 h～UV 1314 h での YI 値の減少と併せて考えると、光照射による暗所黄変の解消・抑制効果が働いていると類推される。光照射下では、黄変の発生・進行が抑制される、または生じていた黄変が解消する効果が働いていると類推される。

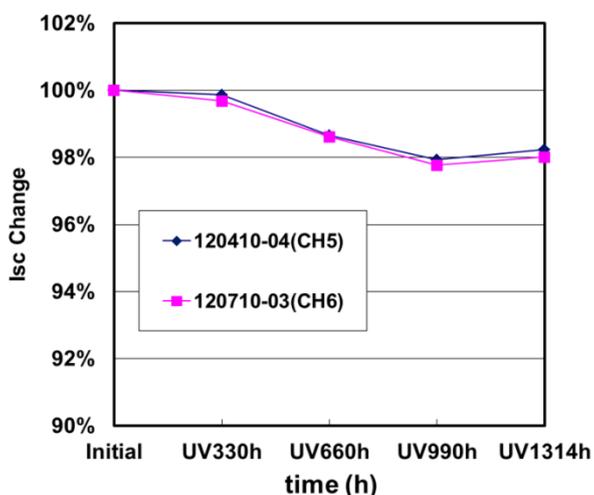


図 II-12-6.  $I_{sc}$  vs. 照射時間（BS 面から照射 330 h + ガラス面から照射 984 h）

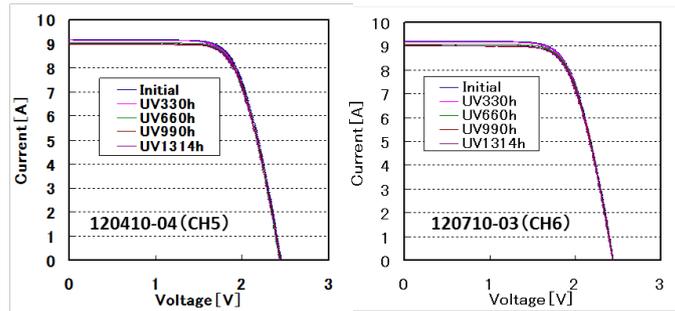


図 II-12-7. I-V カーブの変化 (BS 面から照射 330 h + ガラス面から照射 984 h)

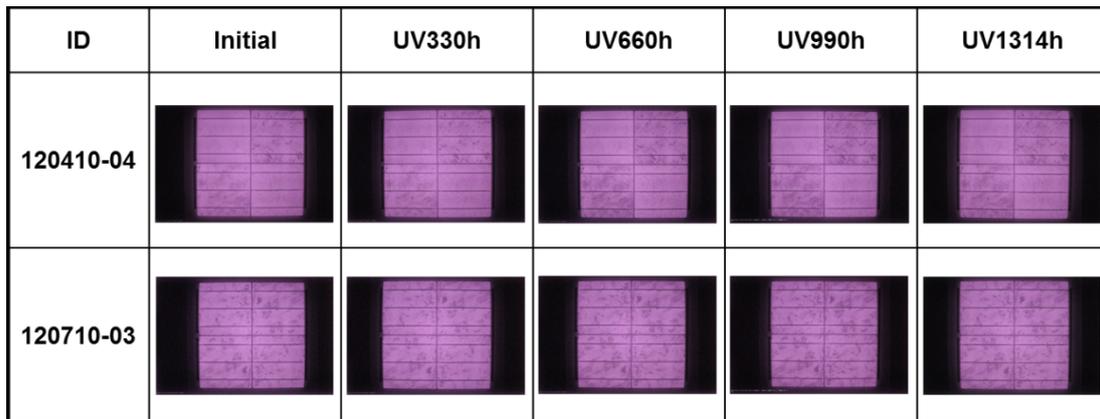


図 II-12-8. EL 画像の変化 (BS 面から照射 330 h + ガラス面から照射 984 h)

120410-04 (CH5)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	0	○	>99.9	○	5.00	○
UV330h	0	○	15	○	0.566	○
UV660h	0	○	>99.9	○	0.927	○
UV990h	0	○	>99.9	○	5.50	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.59	○

120710-03 (CH6)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	0	○	17.7	○	1.28	○
UV330h	0	○	85.7	○	0.879	○
UV660h	0	○	85.7	○	1.17	○
UV990h	0	○	>99.9	○	5.50	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	8.11	○

図 II-12-9. 耐電圧試験の結果 (BS 面から照射 330 h + ガラス面から照射 984 h)

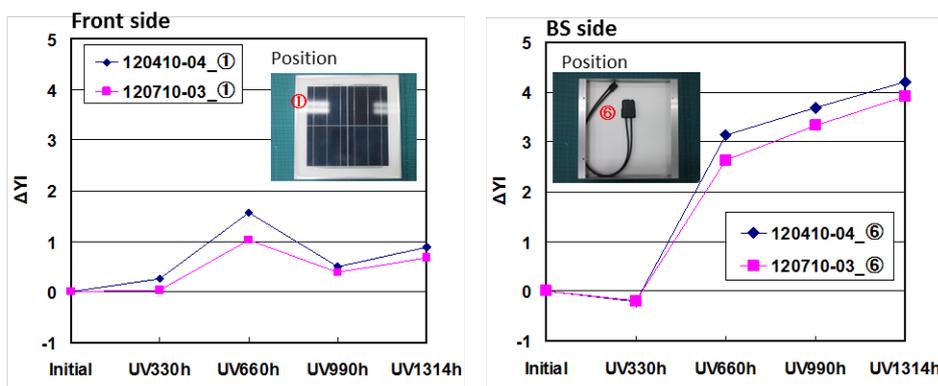


図 II-12-10. 色調の変化 (BS 面から照射 330 h + ガラス面から照射 984 h)

## II-12-2. UV 照射後 DH/TC 交互試験および追加 UV 試験

図 II-12-11 および図 II-12-12 にはそれぞれ、UV 1314 h 照射 (ガラス面から照射 990 h + BS 面から照射 324 h) した 2 サンプル (120410-02、120710-01) に追加の DH/TC 交互試験を行った際の  $P_{max}$  および FF の経時変化と、これらの I-V カーブの変化を示す。なお、初期値は II-12-1 項に示す UV 耐光性試験の初期値であり、UV 1314 h までの経時変化も含めて記してある。図中の”After 4 month”は、平成 24 年度の試験 (II-12-1 項記載) 終了後、平成 25 年度の試験 (II-12-2 項記載) に入る前に、室内保管中の変化の有無を確認するために行ったものである。また、追加 DH/TC 交互試験における略号の意味は以下のとおりである。

追加 DH/TC 試験は UV 1314 h 以降の追加試験種と回数を記す：DHxTCy

例：DH2TC1 は UV 1314 h に DH 500, TC 100, DH 500 を実施したことを意味する。

追加の DH 500 h では  $P_{max}$  の大きな低下は起こらなかったが、その後 TC 100 c → 2 回目の DH 500 h → 2 回目の TC 100 c と進むに従い、最終的に、 $P_{max}$  は初期値に対して 22~24% の低下、FF は初期値に対して約 20% の低下となった。

図 II-12-13 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。 $P_{max}$ 、FF ともに大きく低下し始めた 2 回目の DH 500 h 後から EL 暗部がバスバー電極間に見え始め、2 回目の TC 100 c 後では暗部が拡大していることが分かる。I-V カーブの形状変化と EL 像から、本試験による劣化モードは、直列抵抗増加モードと考えられる。なお、期待していた剥離モードは現れていない。図 II-12-14 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-12-15 には、色調の変化 (Yellow Index = YI, ASTM D1925) をガラス面側から見た測定点①と BS 面側から見た測定点⑥について示した。どちらの測定点においても TC 試験では変化は少なく、DH 試験後に大きく増大しており、YI 値の増大には湿度が必要であることが示唆される。

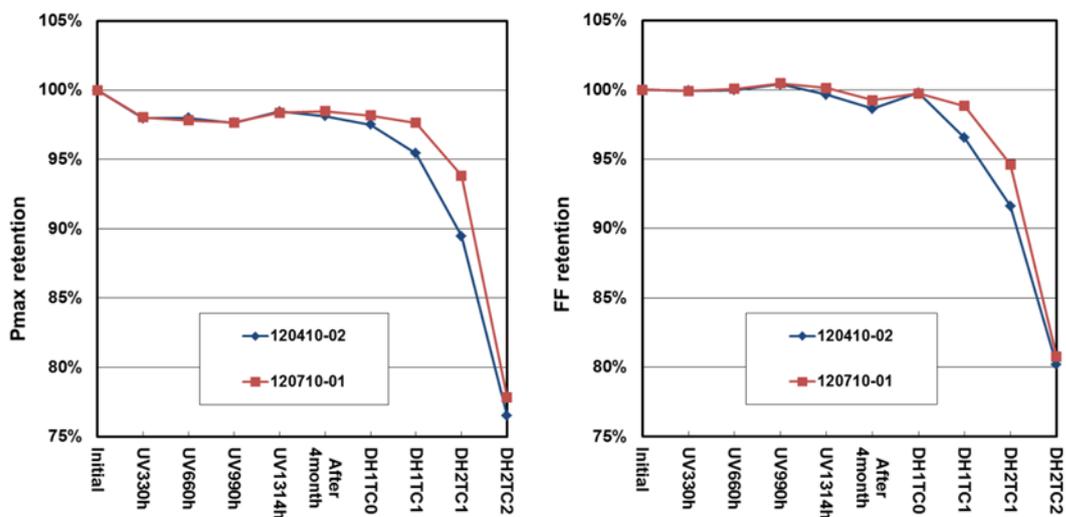


図 II-12-11.  $P_{max}$  および FF の経時変化 (UV 1314 h 照射後、DH/TC 交互試験)

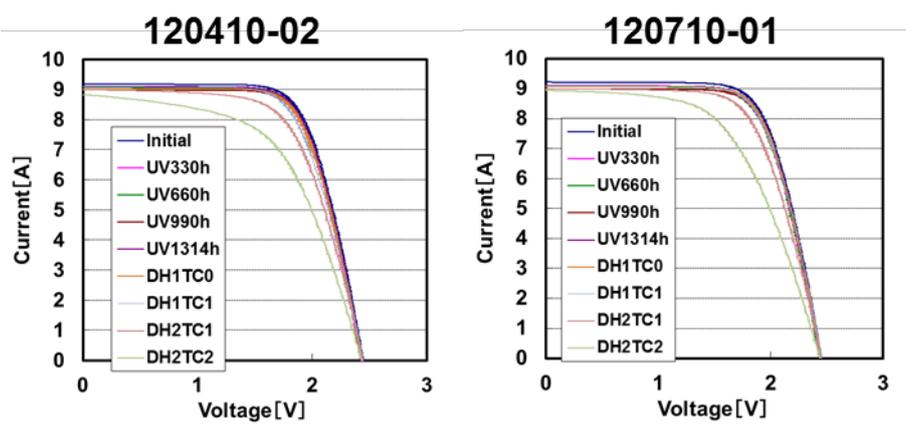


図 II-12-12. I-V カーブの変化 (UV 1314 h 照射後、DH/TC 交互試験)

ID	Initial	UV990h	UV1314h	DH1TC0	DH1TC1	DH2TC1	DH2TC2
120410-02							
120710-01							

図 II-12-13. EL 画像の変化 (UV 1314 h 照射後、DH/TC 交互試験)

120410-02(CH1)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	0	○	>99.9	○	4.54	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.23	○
DH1TC1	0	○	>99.9	○	1.07	○
DH2TC1	0	○	>99.9	○	2.97	○
DH2TC2	0	○	>99.9	○	7.23	○

120710-01(CH2)

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	1	○	10	○	1.52	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.95	○
DH1TC1	0	○	>99.9	○	1.08	○
DH2TC1	0	○	>99.9	○	3.23	○
DH2TC2	0	○	>99.9	○	7.32	○

図 II-12-14. 耐電圧試験の結果 (UV 1314 h 照射後、DH/TC 交互試験)

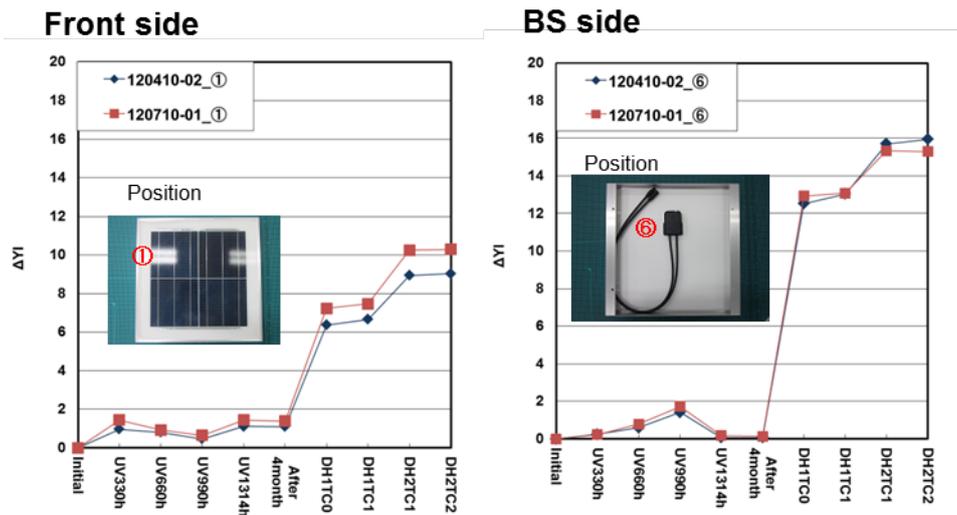


図 II-12-15. 色調の変化 (UV 1314 h 照射後、DH/TC 交互試験)

図 II-12-16 および図 II-12-17 にはそれぞれ、UV 1314 h 照射 (BS 面から照射 330 h + ガラス面から照射 984 h) した 2 サンプル (120410-04、120710-03) に追加の UV 照射試験を行った際の  $P_{max}$  および  $I_{sc}$  の経時変化と、これらの I-V カーブの変化を示す。なお、初期値は II-12-1 項の UV 耐光性試験の初期値であり、UV 1314 h までの経時変化も含めて記してある。図中”After 4 month”は、平成 24 年度の試験 (II-12-1 項記載) 終了後、平成 25 年度の試験 (II-12-2 項記載) に入る前に、室内保管中の変化の有無を確認するために行ったものである。

追加の UV 照射試験でも  $P_{max}$  の大きな低下は起こらず、最終的に、UV 2314 h の照射で  $P_{max}$  が初期値に対して約 4%の低下、 $I_{sc}$  は初期値に対して約 3%の低下であった。

図 II-12-18 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。図 II-12-19 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-12-20 には、色調の変化 (Yellow Index=YI、ASTM D1925) をガラス面側から見た測定点①と BS 面側から見た測定点⑥⑦について示した。測定点⑦については、断面図に示すように BS-ガラス間のセルの有無によって、変色の程度が異なっていることが判明したため、UV 990 h 時点より測定を行った。なお、測定点⑦の YI の初期値は測定点⑥の YI の初期値と同じと仮定して、測定点⑦の各時間における  $\Delta YI$  値を算出している。UV 1314 h 以降での  $\Delta YI$  の傾きを見ると測定点⑦と①ではほぼ同じであることが分かる。また、セルがある部分の測定点⑥では⑦に比べて  $\Delta YI$  値の傾きが大きいことも分かる。測定点の雰囲気環境(空気 or EVA)や測定点までの測色光の経路の違いなど考慮すべきこともあるため、これらの結果が示すことについては、今後の検討が必要と考える。

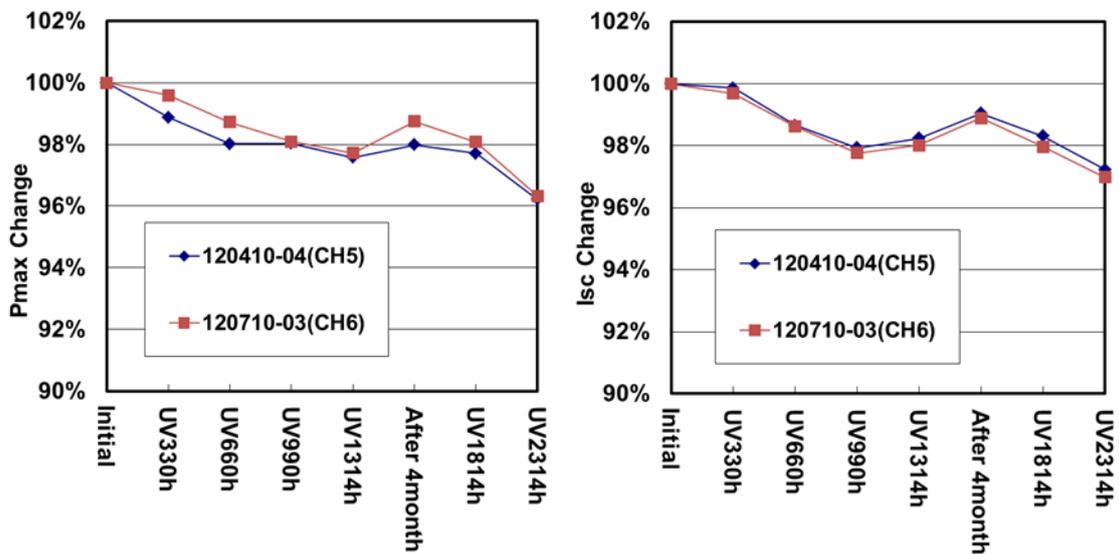


図 II-12-16.  $P_{max}$  および  $I_{sc}$  の経時変化 (UV 1314 h 照射後、追加 UV 照射試験)

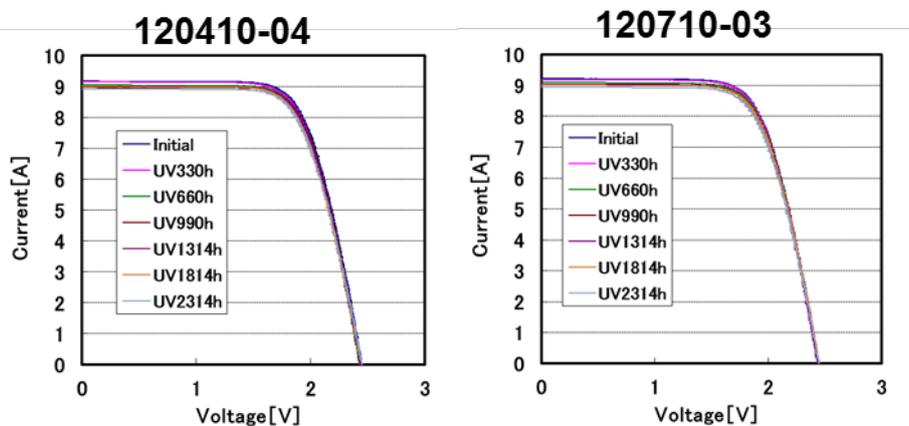


図 II-12-17. I-V カーブの変化 (UV 1314 h 照射後、追加 UV 照射試験)

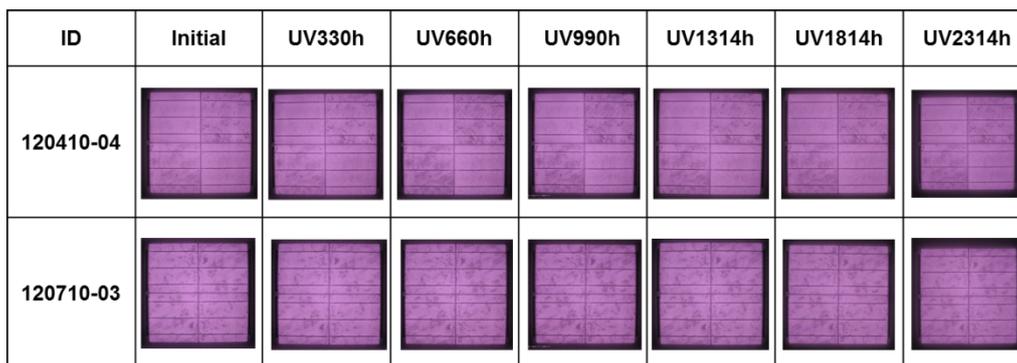


図 II-12-18. EL 画像の変化 (UV 1314 h 照射後、追加 UV 照射試験)

**120410-04 (CH5)**

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	0	○	>99.9	○	5.00	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	7.59	○
UV1814h	0	○	>99.9	○	2.36	○
UV2314h	0	○	>99.9	○	8.00	○

**120710-03 (CH6)**

	Leakage current [ $\mu$ A]	Pass	Insulation resistance [G $\Omega$ ]	Pass	Wet leakage [G $\Omega$ ]	Pass
Initial	0	○	>99.9	○	1.28	○
UV1314h	0	○	>99.9	○	8.11	○
UV1814h	0	○	>99.9	○	2.64	○
UV2314h	0	○	>99.9	○	8.95	○

図 II-12-19. 耐電圧試験の結果 (UV 1314 h 照射後、追加 UV 照射試験)

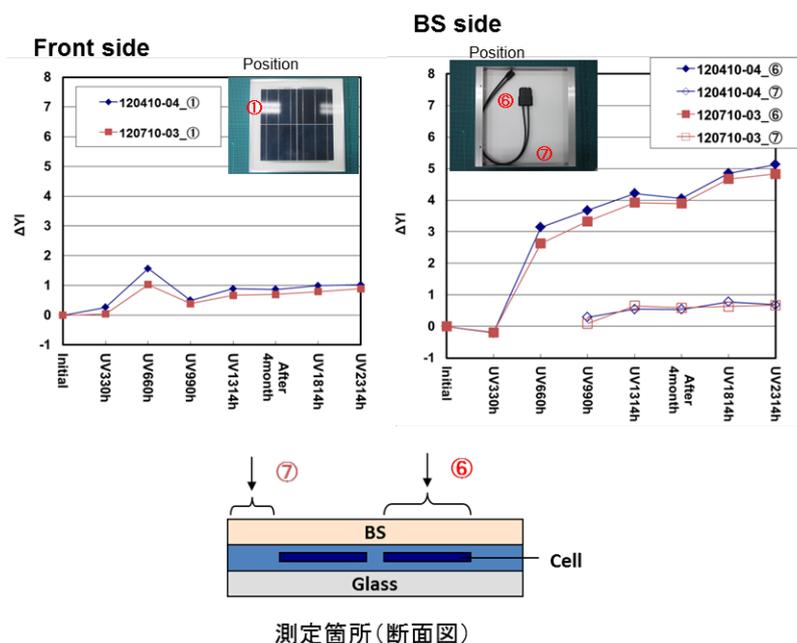


図 II-12-20. 色調の変化 (UV 1314 h 照射後、追加 UV 照射試験)

#### サブテーマ 4 のまとめ

(A) UV 照射 1314 h では、以下の結果が得られた。

- (1) 全水準で  $I_{sc}$  が 1~2%低下。FF、 $V_{oc}$  はほとんど変化なし。
- (2) 全水準で EL 画像の変化はなし。
- (3) 外観不良、絶縁不良もなし。
- (4) ガラス側から見たセル外周部 (EVA+BS 内面) および BS 外面で軽微な黄変。  
BS 側に UV 照射後、ガラス側から光照射を施した水準において YI 値の増加が大きい。
- (5) BS 外面においては、セル背面部で YI 値の増加が顕著。
- (6) 封止材の違い (保管期限内の EVA と保管期限切れの EVA) による差異は見られなかった。

(B) UV 照射 1314 h 後、追加の DH/TC 交互試験を行ったところ、以下の結果が得られた。

- (1)  $P_{max}$  は初期から 22~24%低下。
- (2) バスバー電極間に暗部の発生と拡大。
- (3) 絶縁不良はなし。外観では配線上の腐食、配線近傍の黄変等、長期の DH 試験と同様の変化が見られた。
- (4) YI 値は TC 試験では変化しないが、DH 試験後に大きく増加した。
- (5) 封止材の違い (保管期限内の EVA と保管期限切れの EVA) による差異は見られなかった。

(C) UV 照射 1314 h 後、さらに追加の UV 照射を 1000 h 行い、合計 2314 h の照射を行ったところ、以下の結果が得られた。

- (1)  $P_{max}$  は初期から約 4%低下。
- (2) EL 画像の変化はなし。
- (3) 外観不良、絶縁不良もなし。
- (4) YI 値は微増。
- (5) 封止材の違い (保管期限内の EVA と保管期限切れの EVA) による差異は見られなかった。

(独立行政法人産業技術総合研究所：土井 卓也)

### III. まとめ

コアテーマ 3 では、PID 現象に注目するとともに、高温高湿負荷の試験条件の強化、紫外光照射と高温高湿試験、温度サイクル試験の組合せ試験等について検討した。各種分析により、Na の拡散と PID 現象の関係を明確化した。また、塩水噴霧試験を事前に行うことにより、PID 現象が促進することが示された。85℃、85%の高温高湿試験に対して、Air-HAST 試験は 5 倍程度の加速係数を持つことも明らかにした。紫外光照射を事前に行うことにより、高々1000 時間の高温高湿試験で、3000 時間程度の高温高湿試験を単独で実施した場合と同様の結果を得た。コアテーマ 2 のサブテーマ 4 に示す温度サイクル試験と動的機械的負荷試験の組合せにおいてもそうであるが、2 種類以上の負荷を交互に繰り返す試験により、それぞれの試験を単独で実施した場合の劣化の程度を大きく上回る劣化が観測されることがある。屋外曝露においては、太陽電池モジュールに対して、複数種類の劣化要因が同時に発生するのが一般的である。屋内加速試験において、何種類もの負荷を同時

に与えることは難しいが、太陽電池モジュールに対する負荷として、複数の劣化要因を比較的短い時間で交互に与える試験が、実際の屋外曝露条件にも近く、劣化の促進にも有効ではないかと考える。これらの知見をもとに、太陽電池モジュールの寿命・信頼性を正しく判定できる試験法の開発を進めることが求められる。

(独立行政法人産業技術総合研究所：増田 淳)