

## 第6章

### 標準モジュールの作製と信頼性試験

## 第6章 標準モジュールの作製と信頼性試験

本章では、コンソーシアムで作製した標準モジュールの信頼性試験で得られたデータを統計的にまとめた結果について述べる。また、信頼性試験後に劣化したモジュールの分析結果についても述べる。

### 6.1 モジュールの作製と評価

コンソーシアムで作製したモジュールは、結晶シリコン系が単セル、4セル、フルサイズの3種類であり、フルサイズは42枚のセルを直列接続したものである。薄膜シリコン系は、18 cm 角、フルサイズの2種類である。モジュール作製に用いた部材のうち、産総研が提供する標準部材については、表 3.1 に示したとおりである。コンソーシアムに参加する B 会員は、各社から持ち込んだ部材と標準部材を組み合わせるモジュールを作製し、初期特性を評価後に各社で信頼性試験を実施し、試験後の特性を評価するという流れで研究を進めた。研究の進め方を図 6.1.1 に示す。

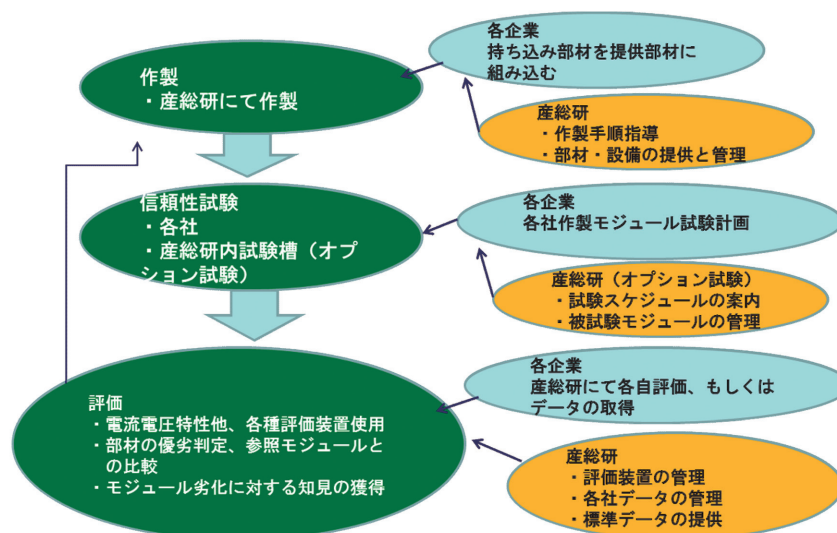


図 6.1.1 コンソーシアムでのモジュール作製、試験、評価の流れ

平成 23 年 4 月から平成 24 年 9 月までの B 会員のモジュール作製実績を図 6.1.2 に示す。B 会員のモジュール作製台数は、結晶ミニサイズと薄膜ミニサイズの合計が 468 台、結晶フルサイズと薄膜フルサイズの合計が 37 台である。同期間の A 会員のモジュール作製台数は、結晶ミニサイズと薄膜ミニサイズの合計が 481 台、結晶フルサイズと薄膜フルサイズの合計が 11 台であり、第 II 期前期で約 1000 台のモジュールを作製したことになる。

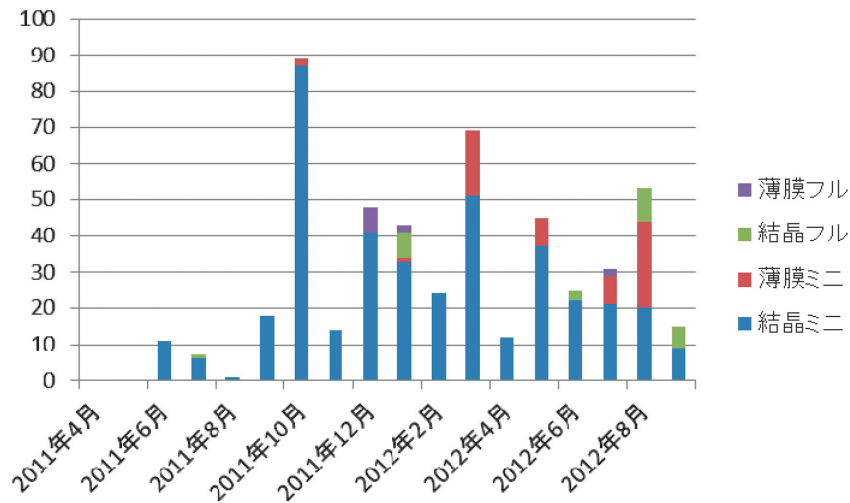


図 6.1.2 平成 23 年 4 月から平成 24 年 9 月までの B 会員モジュール作製実績

作製したモジュールに対して、ソーラーシミュレータにより電流－電圧特性を評価した他、湿潤漏れ電流試験、エレクトロルミネセンス評価、電流密度分布評価等を実施した。

ソーラーシミュレータの照度を確認するために、コネクタ接続部分および変換ケーブルの管理のための通常端子のモジュールを 1 枚 (図 6.1.3)、端子箱から繋がるケーブル先端の端子を予めバナナ端子に付け替えたモジュールを 1 枚 (図 6.1.4) 準備し、測定日毎にコンソーシアム用のこれら 2 枚のチェックモジュールを測定し、相対比較のための情報として参加企業に提供した。図 6.1.5 にはソーラーシミュレータで測定したチェックモジュールの特性変化を示す。概ね変化がなく、ソーラーシミュレータにより安定な測定が可能なが分かる。



図 6.1.3 通常端子のチェックモジュール



図 6.1.4 バナナ端子のチェックモジュール

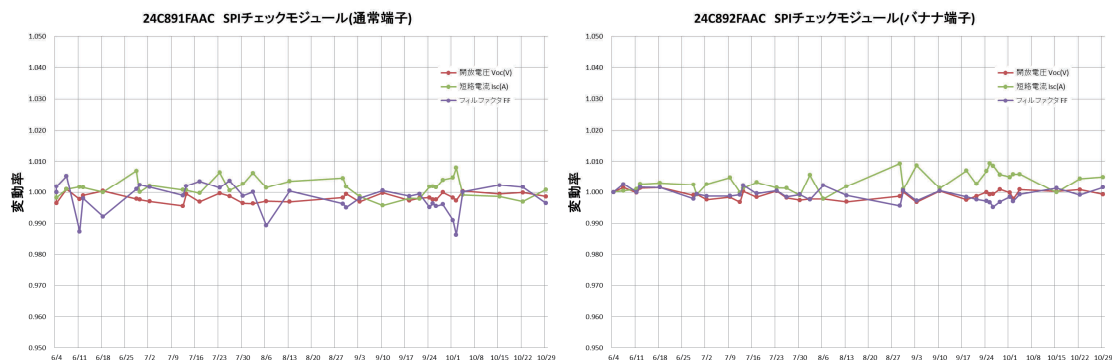


図 6.1.5 ソーラーシミュレータにより評価したチェックモジュールの特性変動

(産業技術総合研究所：山本 千津子)

## 6.2 モジュールの信頼性評価

本コンソーシアムで実施したモジュールの信頼性試験方法の概要を以下に述べる。

- ・ 高温高湿 (DH) 試験

IEC61215 10.13 Damp-heat test に準じた 85 °C85%試験を 1000 時間実施し、必要に応じて時間を延長した。

- ・ 結露凍結 (HF) 試験

IEC61215 10.12 に準じた-40 °C~85 °Cの試験を 10 サイクル実施した。

- ・ 温度サイクル (TC) 試験

IEC61215 10.11 に準じた-40 °C~85 °Cのサイクル試験を 50 回および 200 回実施し、必要に応じて回数を延長した。IEC 規格では 200 回試験において STC ピーク出力を通電するが、本コンソーシアムでは通電試験はオプションとした。

- ・ 通電サイクル試験

IEC61215 10.11 に準じた-40 °C~85 °Cのサイクル試験を 200 回実施した。25 °Cを超えるとときだけ、STC ピーク出力電流に±2%以内で設定した電流を流した。

- ・ 紫外光照射試験

キセノンランプを用い、照度 3UV (180 W/m<sup>2</sup>)、温度 85 °C、湿度 65%、試験時間は 200 時間単位とした。

- ・ 複合加速試験

連続光照射試験の場合は、照度 3UV (180 W/m<sup>2</sup>)、槽内温度 27 °C (モジュール裏面温度 60~80 °C)、試験時間は 200 時間単位とした。サイクル劣化試験の場合は、【{照度 (180 W/m<sup>2</sup>)、槽内温度 27 °C (モジュール裏面温度 60~80 °C)}、1 時間 + {dark、槽内温度-22 °C (モジュール裏面温度-20 °C)、1 時間}】 × 100 サイクル、全 200 時間とした。

(産業技術総合研究所：山本 千津子)

### 6.3 ミニサイズ標準モジュールの作製内容および試験結果

産総研では標準部材だけで構成した標準モジュールを作製し、参加機関のモジュール作製に先行して試験データを取得し、参加機関に提供することに努めた。図 6.3.1 には産総研が作製したミニサイズ標準モジュールの試験状況を示す。

第 I 期コンソーシアムにおいて、薄膜モジュールでは端子箱へのタブ線取り出し部分の穴から浸入する水分に起因して、端子箱周辺部に暗輝度部が広がることが確認されたため、図 6.3.2 で示すようにタブ線取り出し方法の検討も行った。

DH		n数	DH1000	DH2000	DH3000	DH4000	DH5000
c-Si	Normal	3					
		3					
		3					
	SC EVA	3					

TC		n数	TC50HF10	TC200	TC400	TC600	TC800	TC1000	TC1200
c-Si	Normal	3							
		3							
		3							
	シリカ蒸着	3							
	PAP	3							
	PAP	3							

図 6.3.1 ミニサイズ結晶標準モジュールの試験状況

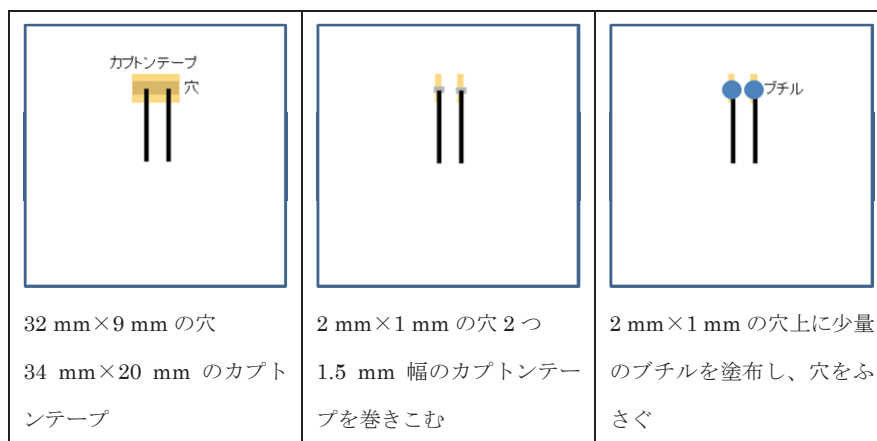


図 6.3.2 薄膜モジュールのタブ線取り出し方法

標準モジュールの DH 試験後に観察された変化を以下にまとめる。

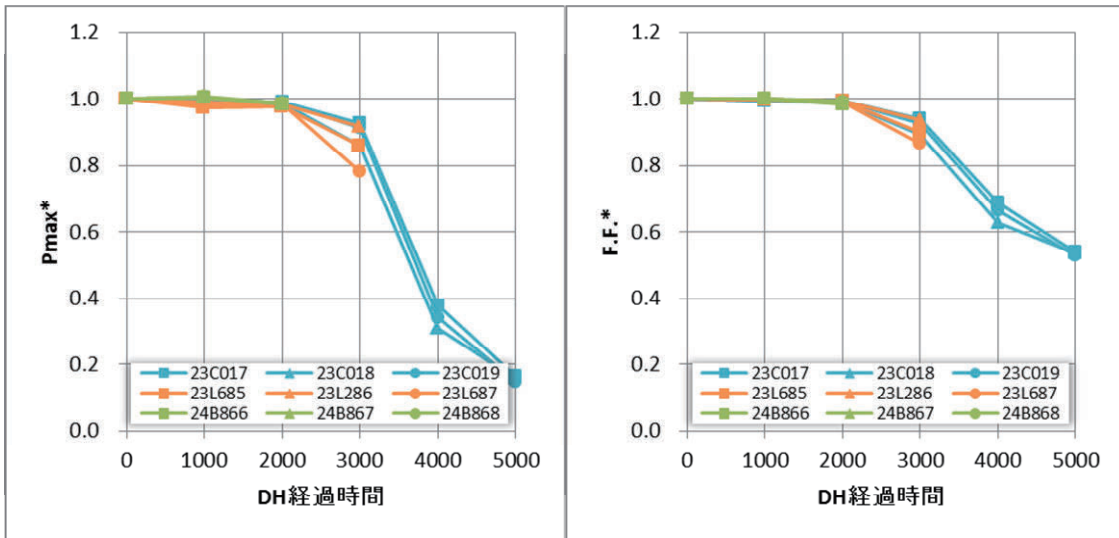
- 1) 結晶系モジュールにおいて、DH3000 時間後には図 6.3.3 に示すように、タブ線にさびのような変色や凹凸が観測された。さらに EVA の黄変も見られた。
- 2) 結晶系 4 セルモジュールにおいて、DH3000 時間後、図 6.3.4 に示すように EL 画像のセル周辺部に暗輝度部が見られるようになった。その後、急激に暗輝度部が大きく拡大した。
- 3) 結晶系 4 セルモジュールの曲線因子の低下率は、図 6.3.5 に示すように、DH3000 時間以降急激に低下する。
- 4) アルミバックシートの薄膜モジュールにおいて、図 6.3.6 に示すように、DH2000 時間後の EL 観察により端子箱周辺部に暗輝度部が見られた。タブ線取り出しのための穴を小さくすると、暗輝度部の拡大および太陽電池特性の低下を遅らせることができることが確認された。



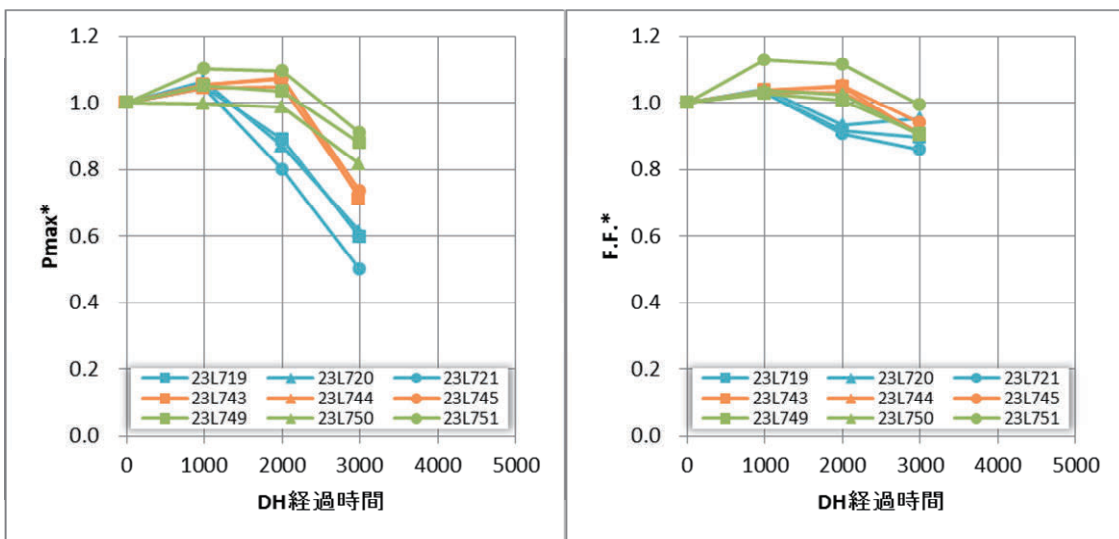
図 6.3.3 DH3000 時間後のタブ線の外観

	initial	DH1000	DH2000	DH3000	DH4000	DH5000
23C017						

図 6.3.4 DH 試験前後の結晶 4 セルモジュールの EL 画像



(水色、オレンジ：FC EVA/TPT、黄緑：SC EVA/TPT)



(水色：BS 32 mm×9 mm の穴、オレンジ：BS 2 mm×1 mm の穴 2 つにブチルで穴埋め、  
黄緑：BS に穴をあけず端部からタブ線取り出し)

図 6.3.5 結晶系（上）および薄膜系（下）モジュールにおける DH 試験による特性変化

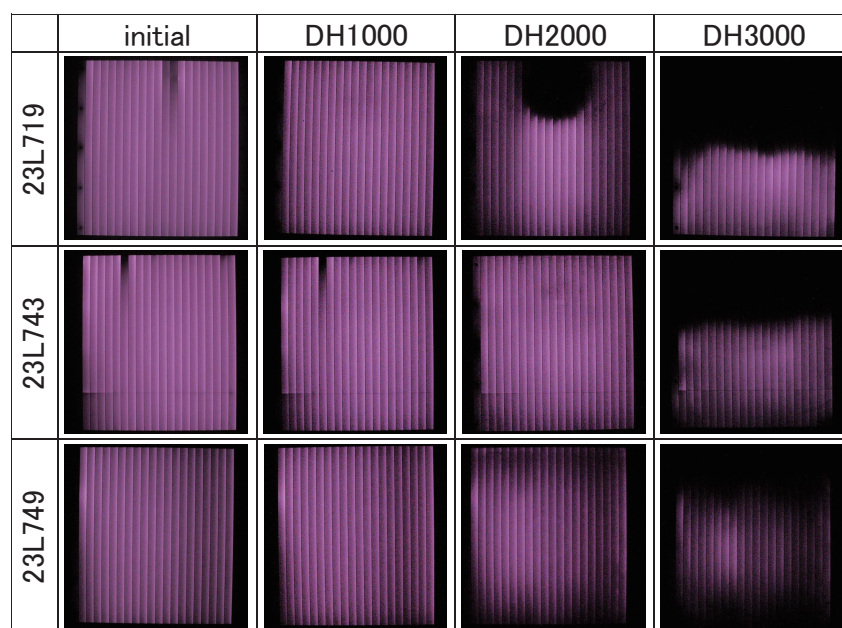


図 6.3.6 DH 試験後の 18 cm 角薄膜モジュールの EL 画像

標準モジュールの TC 試験後に観察された変化を以下にまとめる。

- 1) 結晶系モジュールの TC/HF 試験では、図 6.3.7 中に丸印で囲んで示すように、試験前には見られなかったフィンガー電極に沿った暗輝度部が試験後に見られるようになった。結晶系標準モジュールのバスバー電極とフィンガー電極の接続部にダメージが生じ、フィンガー電極からのキャリアの収集が低減した可能性が考えられる。
- 2) 曲線因子は使用部材には依存せず、試験が進むにつれて徐々に低下することが確認された。稀に図 6.3.8 のようにバスバー上のタブ線接着部の不具合もしくは横タブ線のはんだ接合部の不具合により電流に偏りが生じると、曲線因子が急激に低下することが確認された。
- 3) 結晶系モジュールの TC/HF 試験では、図 6.3.9 に示すように経過サイクル数の増加とともに曲線因子の低下が見られた。TC1000 以降のバラつきは図 6.3.10 に示すようにタブ線接着部の不具合により一部のモジュールで直列抵抗が増加したためと見られる。
- 4) 薄膜モジュールの TC/HF 試験では、アニール効果により特性が向上することが確認された。
- 5) 薄膜モジュールの TC/HF 試験後の EL 観察では、現時点では大きな変化は見られない。今後も試験を継続する予定である。



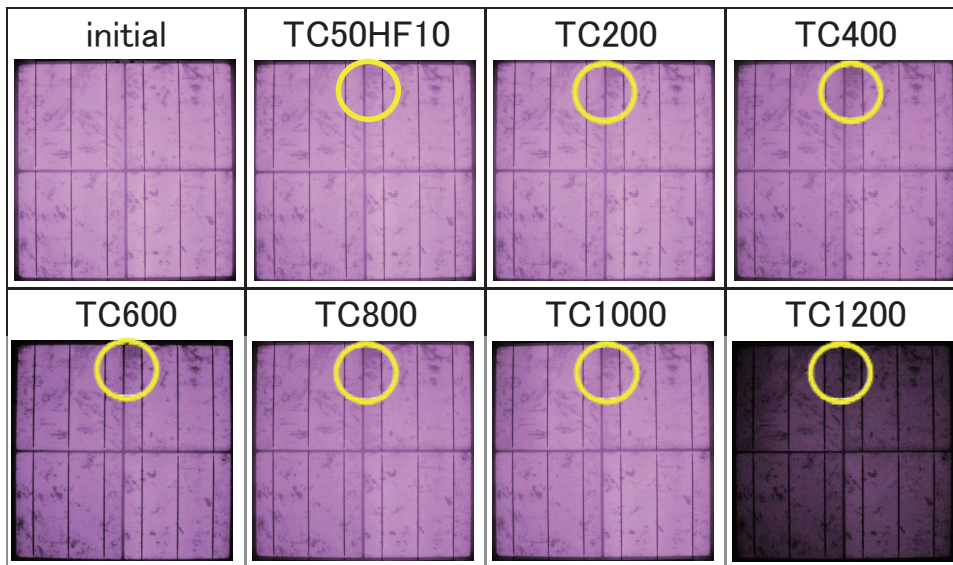


図 6.3.7 結晶モジュールの TC/HF 試験後の EL 画像

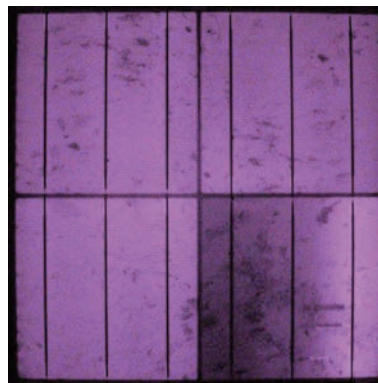
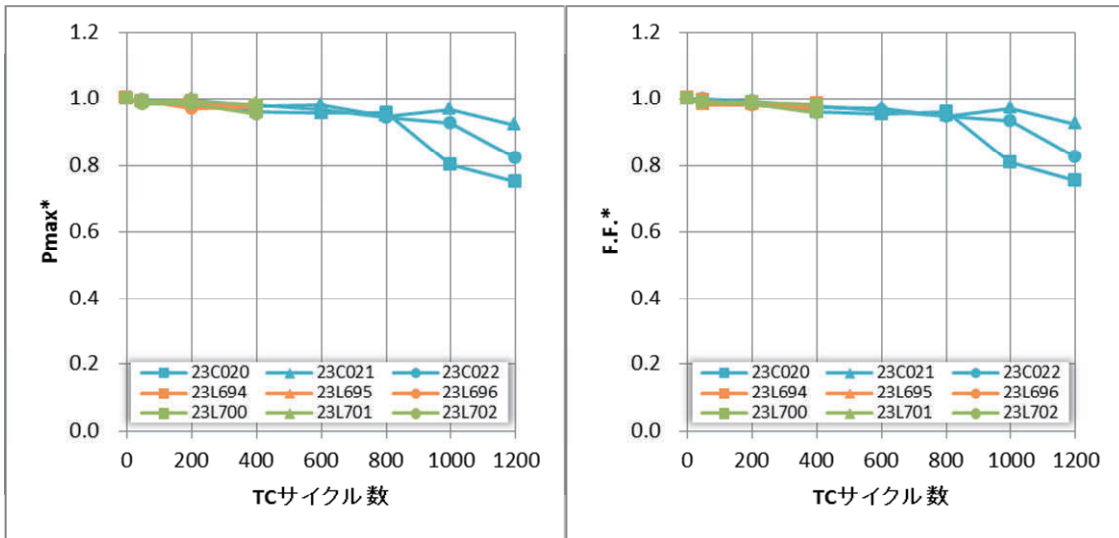
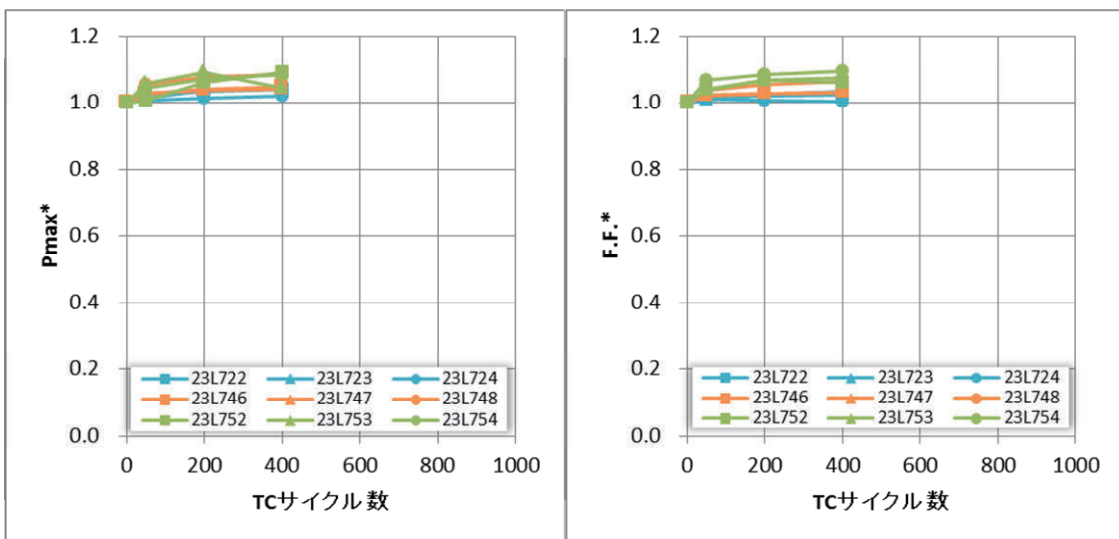


図 6.3.8 TC400 試験後に観測された暗輝度部



(水色、オレンジ：FC EVA/TPT、黄緑：SC EVA/TPT)



(水色：BS 32 mm×9 mm の穴、オレンジ：BS 2 mm×1 mm の穴 2 つにブチルで穴埋め、  
黄緑：BS に穴をあけず端部からタブ線取り出し)

図 6.3.9 結晶系（上）および薄膜系（下）モジュールにおける TC 試験による特性変化

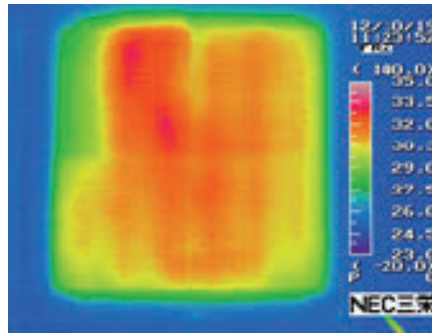
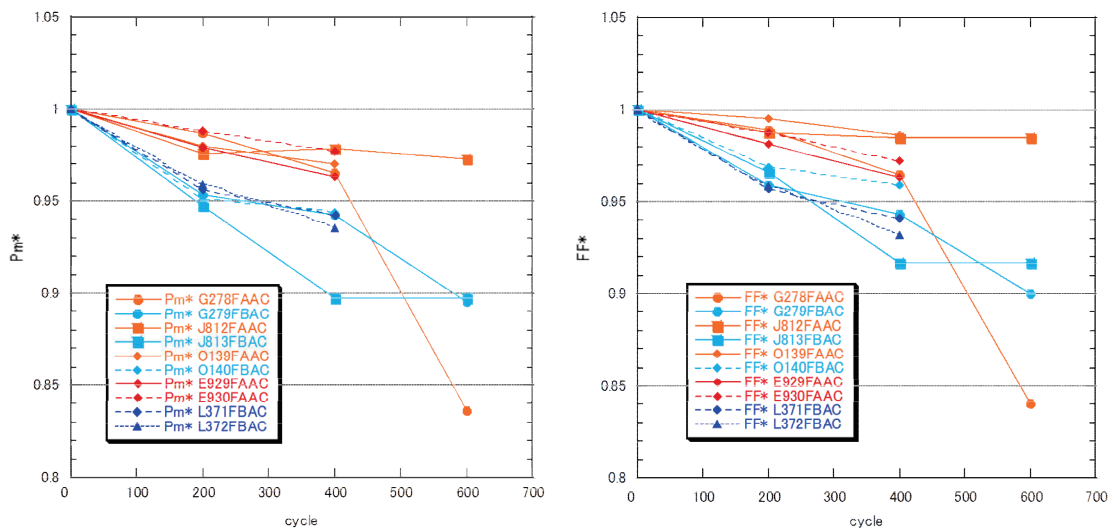


図 6.3.10 TC1200 後のサーモ画像

結晶系モジュールに対する通電サイクル試験の結果を図 6.3.11 に示す。通電有無により差異が生じることを予想したが、通電の有無ではほとんど差異が生じず、むしろ EVA が Fast Cure タイプであるか Standard Cure タイプであるかによる差異の方が大きかった。EL 観測を行ったところ、フィンガー線に沿った暗輝度部が確認され、バスバー線とフィンガー線の接続部での断線等が示唆された。Fast Cure タイプの EVA を用いたモジュールの通電有りの試験では、試験時間 600 時間で特性が大きく劣化しているものがあり、再現性の確認も含めて今後も試験を継続する。



(オレンジ：通電あり FC/TPT、水色：通電あり SC/TPT、赤：通電なし FC/TPT、青：通電なし SC/TPT)

図 6.3.11 結晶系モジュールに対する通電サイクル試験の結果

結晶系モジュールに対する紫外光照射試験の結果を図 6.3.12 に示す。600 時間経過後は最大出力に低下が見られた。これは EVA が黄変し電流が低下したためである。

結晶系モジュールに対する複合加速試験の結果を図 6.3.13 に示す。経過時間の増加とともに最大出力値に低下が見られ、照射+低温サイクル試験を行ったモジュールの方が、低下が一層大きいように見える。また図 6.3.14 中に丸印で示すように、照射+低温サイクル試験 800 時間後の EL 観察では、タブ線の不具合やバスバー電極とフィンガー電極の接続部のダメージによる暗輝度部が生じた。これらの理由により直列抵抗が増加し曲線因子の低下につながったと考えられる。

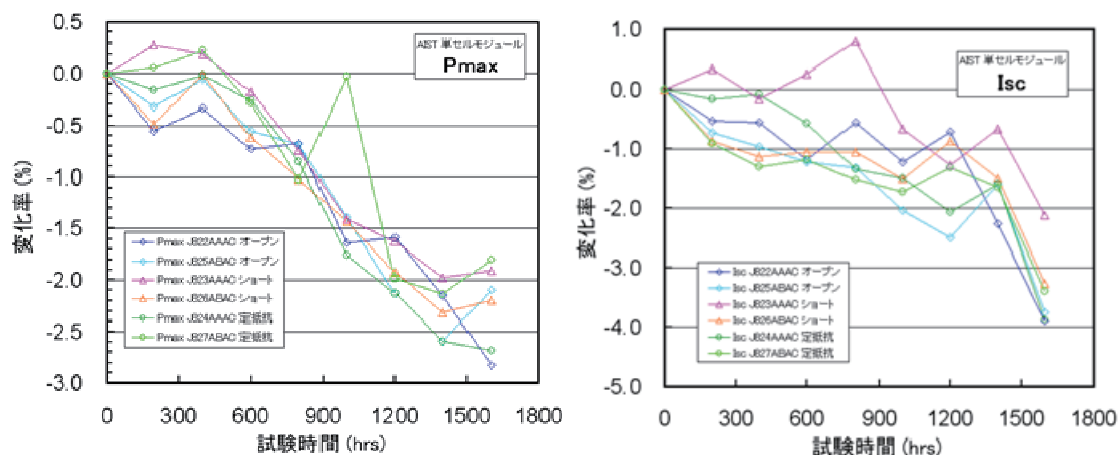


図 6.3.12 結晶系モジュールに対する紫外光照射試験の結果

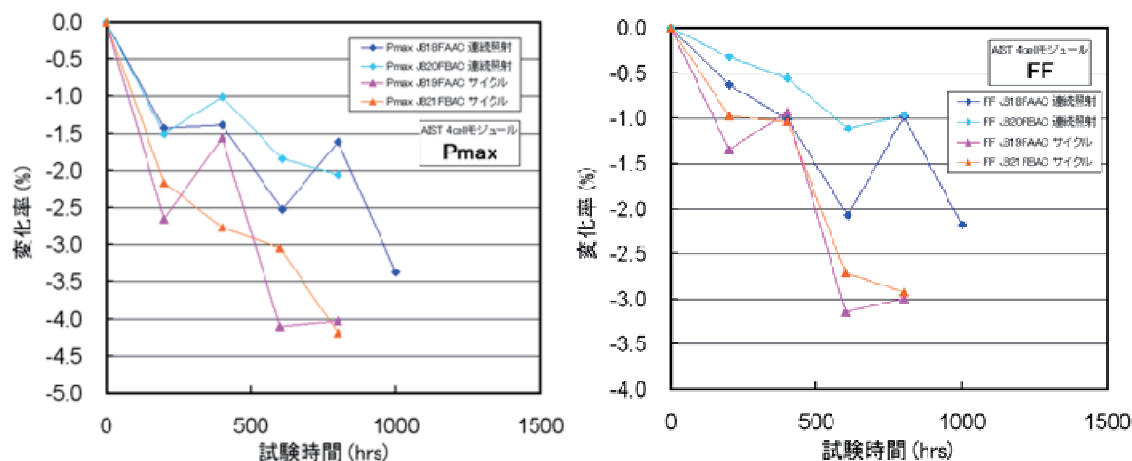
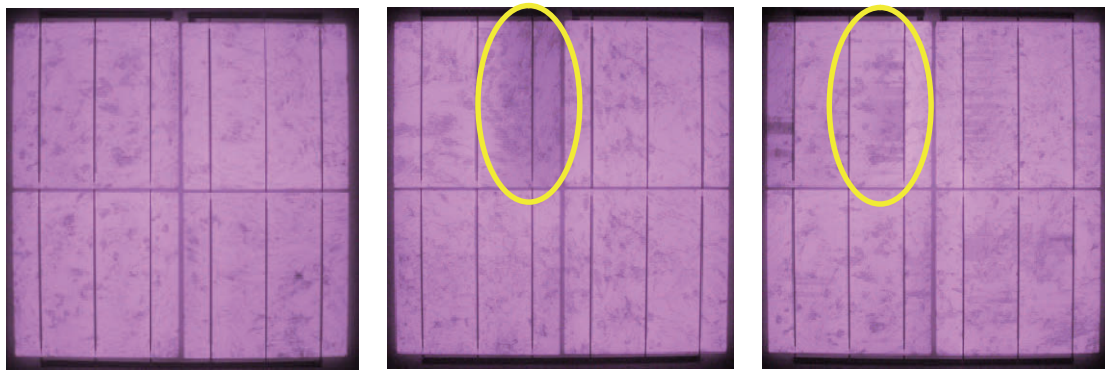


図 6.3.13 結晶系モジュールに対する複合加速試験の結果



J818FAAC 3UV 1000H

J819FAAC Cycle 800H

J821FAAC Cycle 800H

図 6.3.14 サイクル試験 800 時間後の結晶系モジュールの EL 画像

(産業技術総合研究所：山本 千津子、根本 茂幸、井上 昌尚)

#### 6.4 フルサイズ標準モジュールの作製内容および試験結果

ミニサイズモジュール同様、フルサイズモジュールに対しても、DH 試験ならびに TC/HF 試験を実施した。結晶系フルサイズモジュールにおける、DH 試験時間に対する最大出力の変化率を図 6.4.1 に、FF の変化率を図 6.4.2 に示す。また、代表例として、23D045PAAC の I-V 特性の DH 試験時間に対する変化を図 6.4.3 に示す。DH 試験による出力低下は、直列抵抗の増大にともなう FF の低下に起因することがわかる。図 6.4.4 には、代表例として 23D047PAAC モジュールの EL 画像の DH 試験時間依存性を示す。ミニサイズモジュールの場合に比べて試験時間が短い、DH2500~3000 時間からセル周辺部に暗輝度部が現れ、試験時間とともに広がっていく様子は、ミニサイズモジュールと同様である。

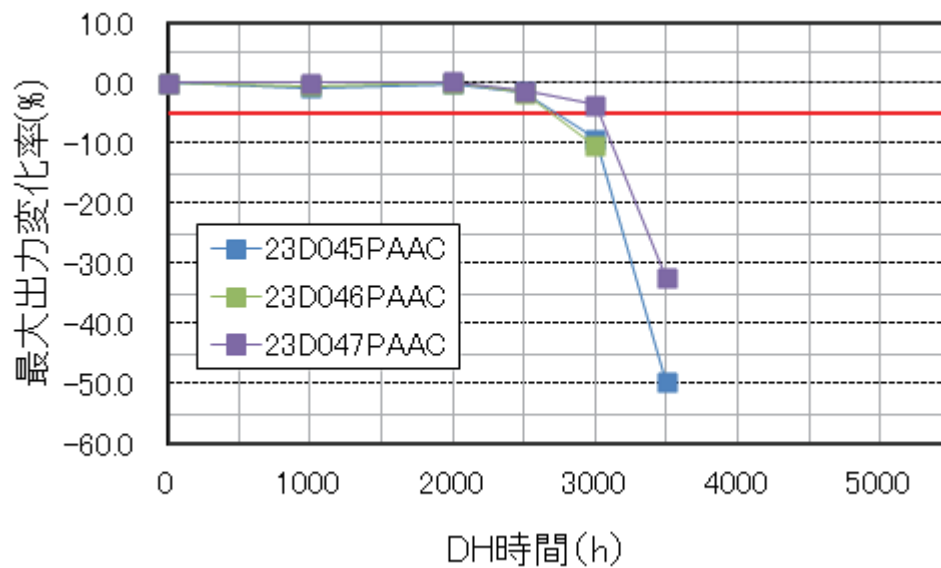


図 6.4.1 結晶系フルサイズモジュールにおける DH 試験時間に対する最大出力の変化率

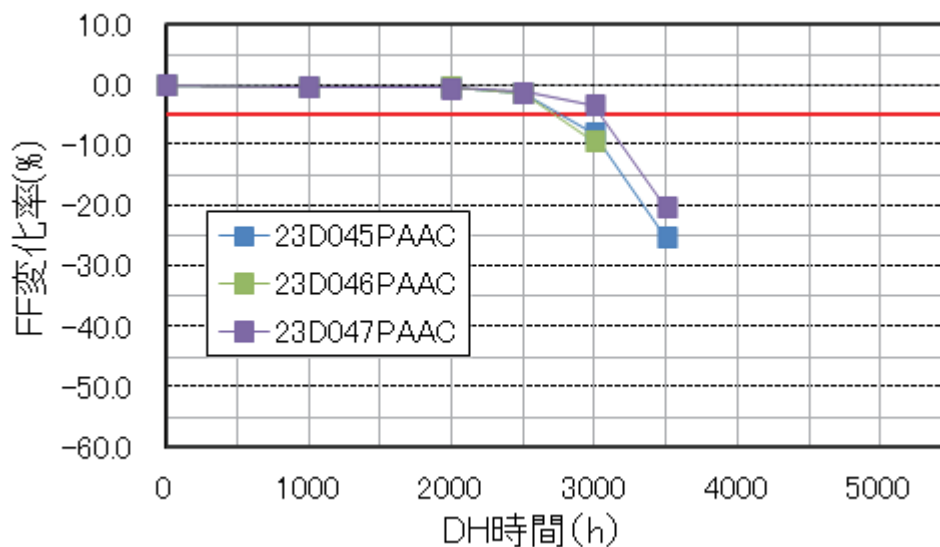


図 6.4.2 結晶系フルサイズモジュールにおける DH 試験時間に対する FF の変化率

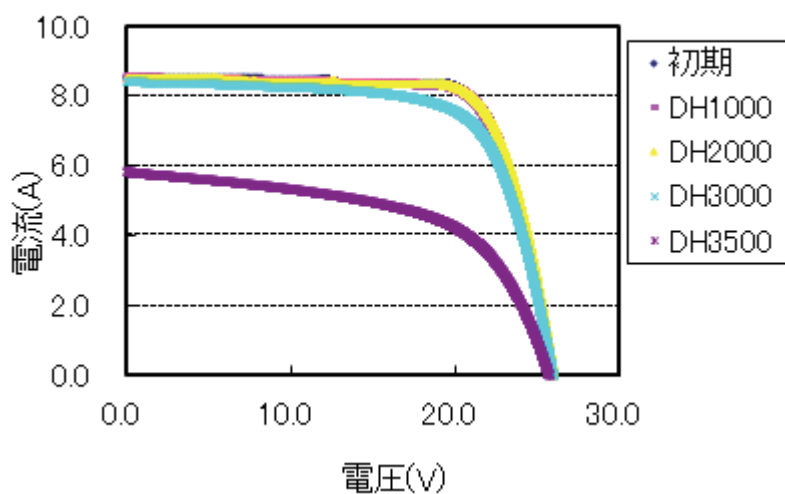


図 6.4.3 23D045PAAC モジュールの I-V 特性の DH 試験時間依存性

次に、結晶系フルサイズモジュールにおける、TC/HF 試験サイクル数に対する最大出力の変化率を図 6.4.5 に、FF の変化率を図 6.4.6 に示す。また、代表例として、23D025PAAC の I-V 特性の TC/HF 試験サイクル数に対する変化を図 6.4.7 に示す。試験サイクル回数が少ないこともあり、現時点で顕著な劣化は観測されていない。図 6.4.8 には、代表例として 23D024PAAC モジュールの EL 画像の TC/HF 試験サイクル数依存性を示す。I-V 特性同様、試験サイクル回数が少ないこともあり、現時点では顕著な暗輝度部の発生は確認されない。

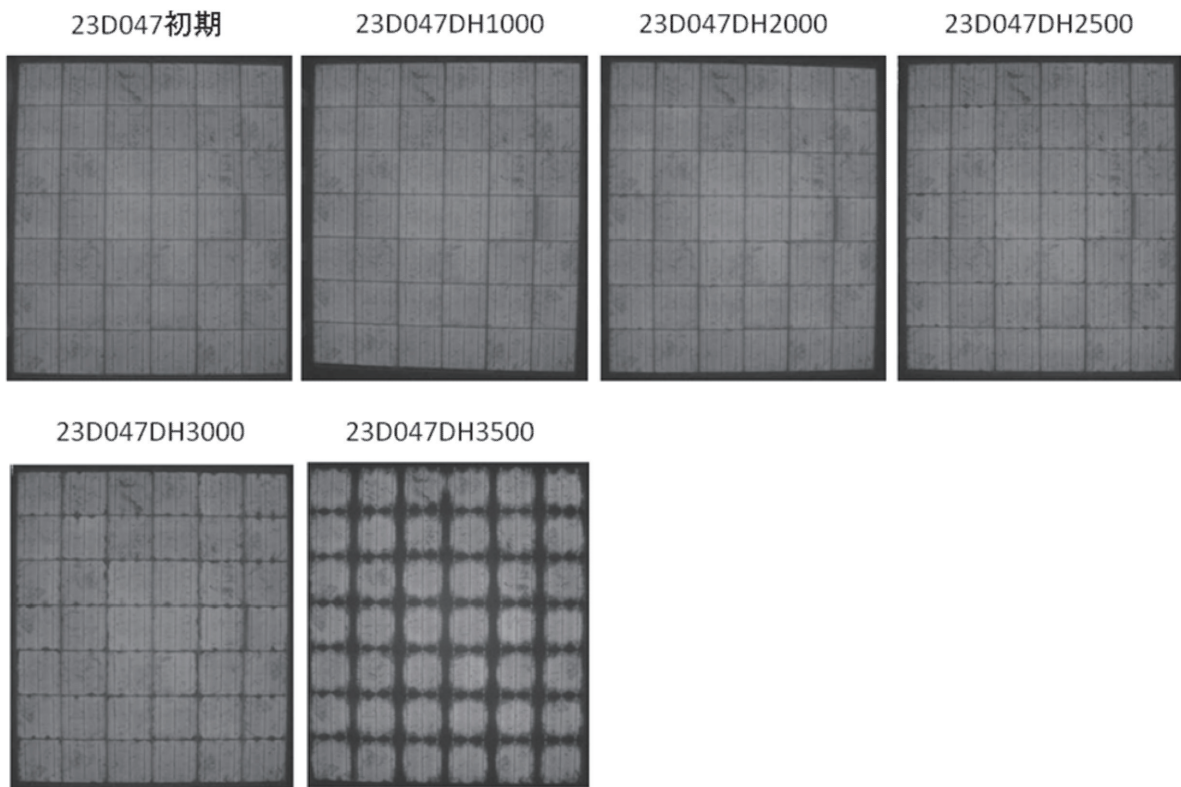


図 6.4.4 23D047PAAC モジュールの EL 画像の DH 試験時間依存性

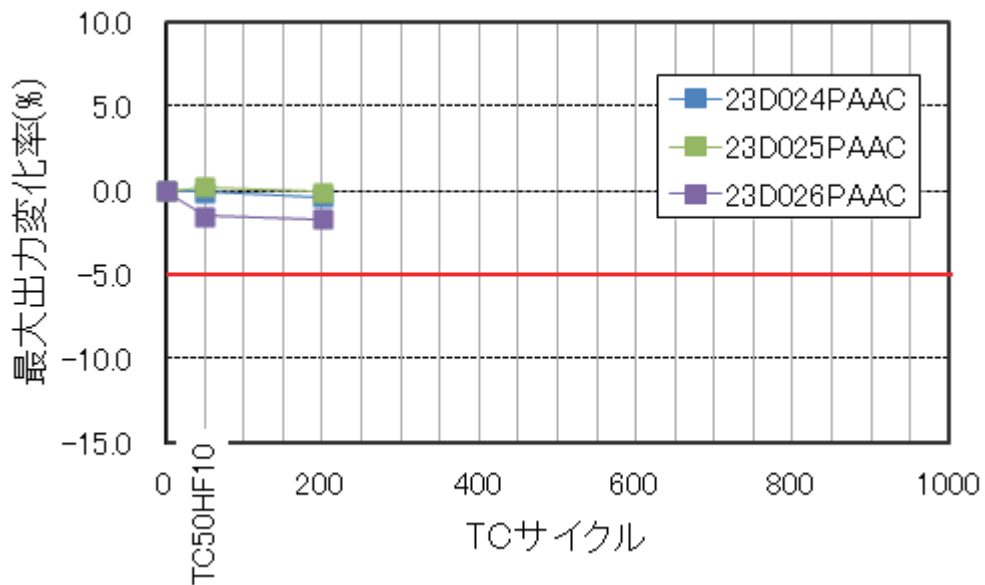


図 6.4.5 結晶系フルサイズモジュールにおける TC/HF 試験サイクル数に対する最大出力の変化率

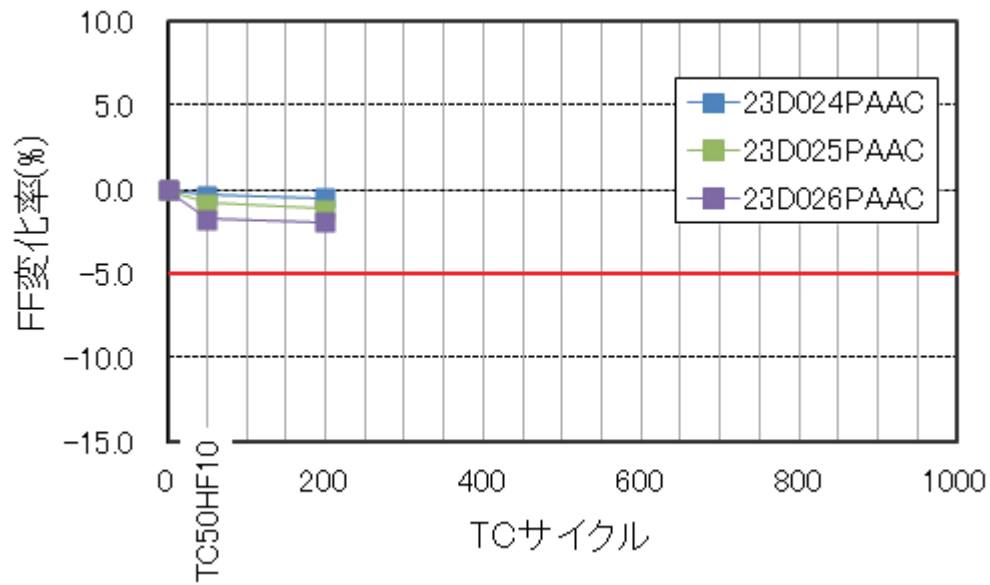


図 6.4.6 結晶系フルサイズモジュールにおける TC/HF 試験サイクル数に対する FF の変化率

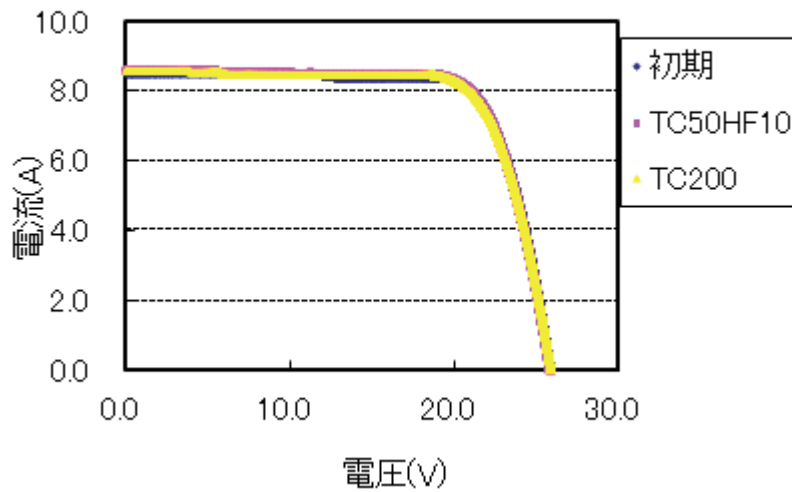


図 6.4.7 23D025PAAC モジュールの I-V 特性の TC/HF 試験サイクル数依存性





図 6.4.8 23D024PAAC モジュールの EL 画像の TC/HF 試験サイクル数依存性

薄膜系フルサイズモジュールにおける、DH 試験時間に対する最大出力の変化率を図 6.4.9 に、FF の変化率を図 6.4.10 に示す。また、代表例として、23J573RACC の I-V 特性および EL 画像の DH 試験時間に対する変化を、それぞれ図 6.4.11 および図 6.4.12 に示す。DH 試験の初期には出力が向上しているが、これは薄膜シリコン特有のアニール効果によるものである。DH3000 時間を過ぎると徐々に FF 低下に起因して、最大出力も低下する。また、出力特性に影響するほどではないが、DH2300 時間を過ぎると端子箱部から暗輝度部が広がり始める。この現象は、端子箱部からの水分の浸入に起因すると考えられ、端子箱内でのタブ線の取り出しに必要な開口部の封止の重要性が改めて示唆された。

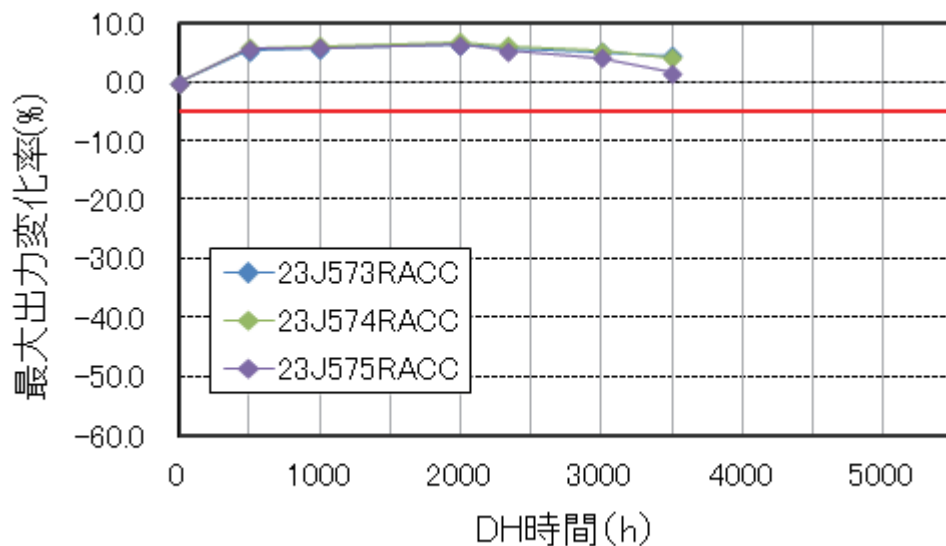


図 6.4.9 薄膜系フルサイズモジュールにおける DH 試験時間に対する最大出力の変化率

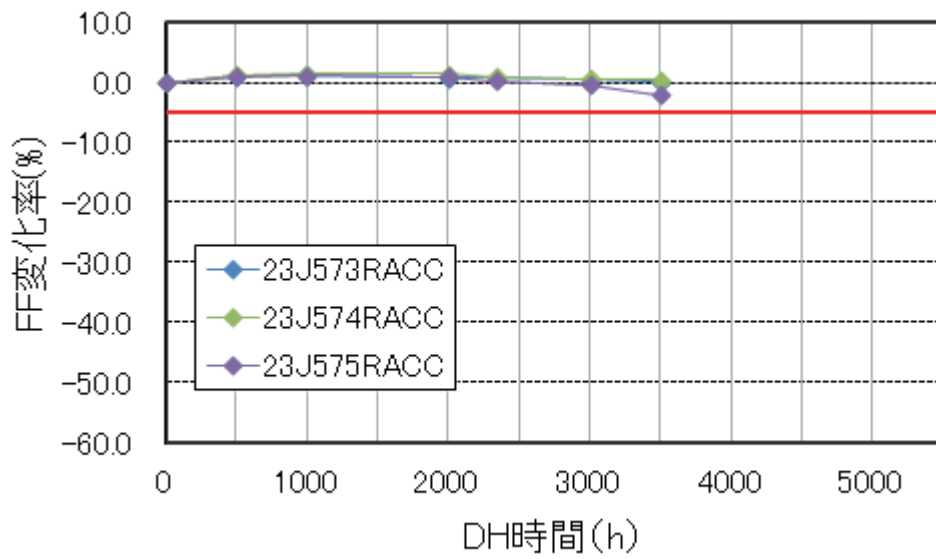


図 6.4.10 薄膜系フルサイズモジュールにおける DH 試験時間に対する FF の変化率

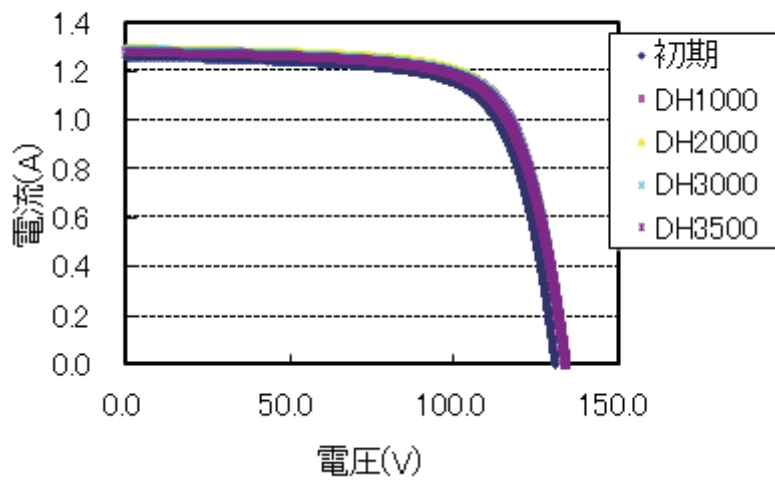


図 6.4.11 23J573RACC モジュールの I-V 特性の DH 試験時間依存性

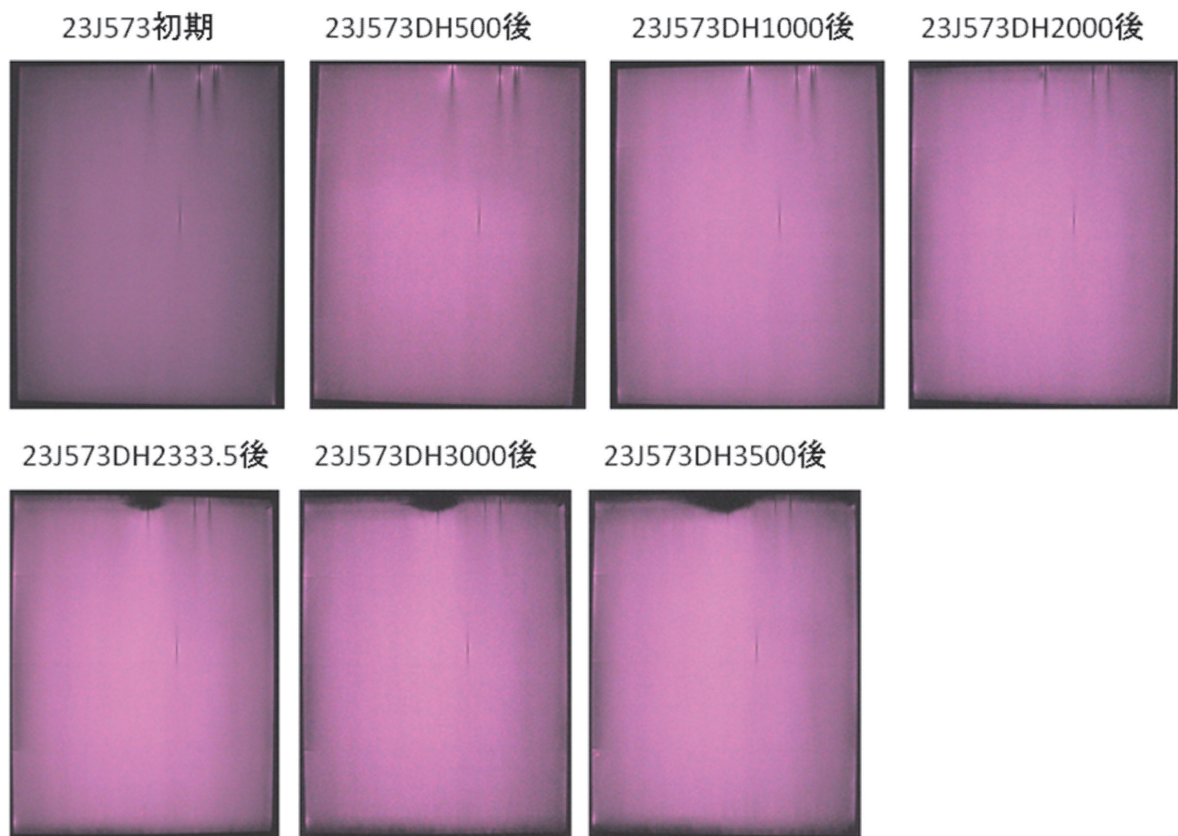


図 6.4.12 23J573RACC モジュールの EL 画像の DH 試験時間依存性

次に、薄膜系フルサイズモジュールにおける、TC/HF 試験サイクル数に対する最大出力の変化率を図 6.4.13 に、FF の変化率を図 6.4.14 に示す。TC/HF 試験の初期には出力が向上しているが、これは薄膜シリコン特有のアニール効果によるものである。また、代表例として、23L739RAAC の I-V 特性および EL 画像の TC/HF 試験サイクル数に対する変化を、それぞれ図 6.4.15 および図 6.4.16 に示す。現時点で顕著な劣化は観測されていないが、薄膜系では個別のセル列は直列集積構造で接続されており、最終的な端子箱での接続にのみタブ線を使用しているため、TC/HF 試験に対しては本質的に劣化を示しにくいものと考えられる。

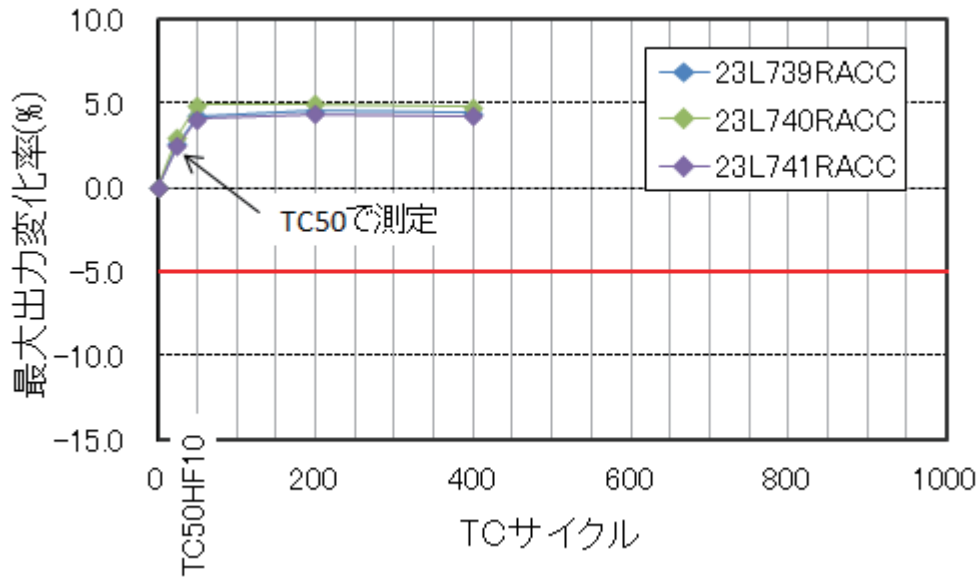


図 6.4.13 薄膜系フルサイズモジュールにおける TC/HF 試験サイクル数に対する最大出力の変化率

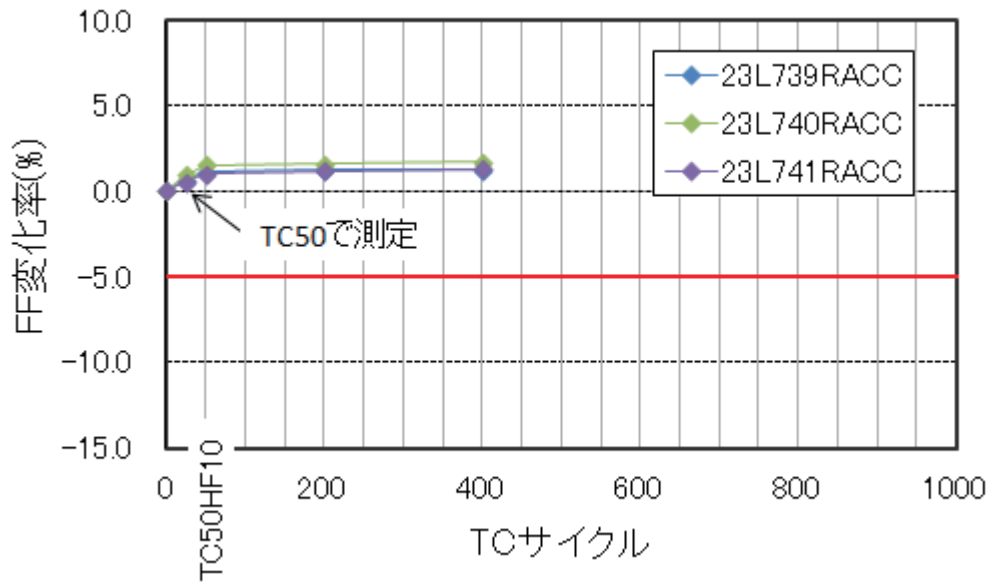


図 6.4.14 薄膜系フルサイズモジュールにおける TC/HF 試験サイクル数に対する FF の変化率

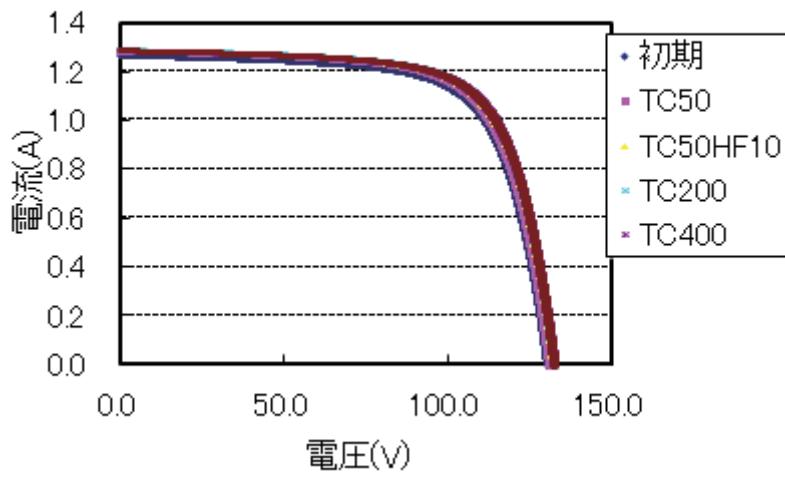


図 6.4.15 23L739RAAC モジュールの I-V 特性の TC/HF 試験サイクル数依存性

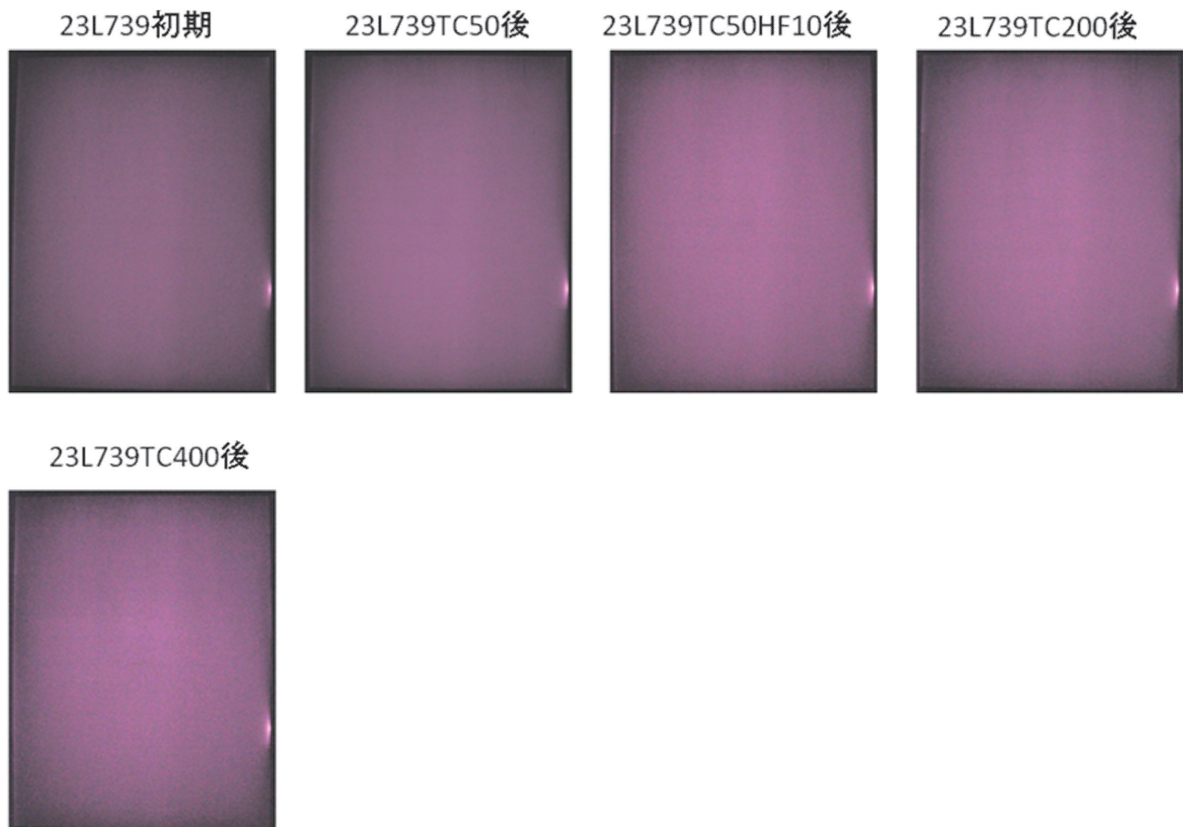


図 6.4.16 23L739RAAC モジュールの EL 画像の TC/HF 試験サイクル数依存性

(産業技術総合研究所：内山 直美)

## 6.5 信頼性試験後に劣化したモジュールの分析結果

DH 試験により、EL 発光に暗輝度部が生じたモジュールに対して、その原因を解明するため、DH 試験前と DH 試験 4000 時間後の 4 セルモジュールに対して破壊分析を行った。まず、電極部の劣化によりキャリアの収集が妨げられるのではないかと考え、受光面側のフィンガー電極部を走査型電子顕微鏡 (SEM) と電子線プローブ微小分析 (EPMA) により解析した。さらに、pn 接合自体の劣化の有無についても確認するため、走査型キャパシタンス顕微鏡により、断面のキャリア分布を観察した。SCM は探針下のキャリアを変調電圧により空乏化させ、局所的な MOS 構造の容量変化を検出する手法である。

図 6.5.1 および図 6.5.2 に、それぞれ DH 試験前および DH 試験 4000 時間後のフィンガー電極部の断面 SEM 像と EPMA による元素分析マッピングの結果を示す。

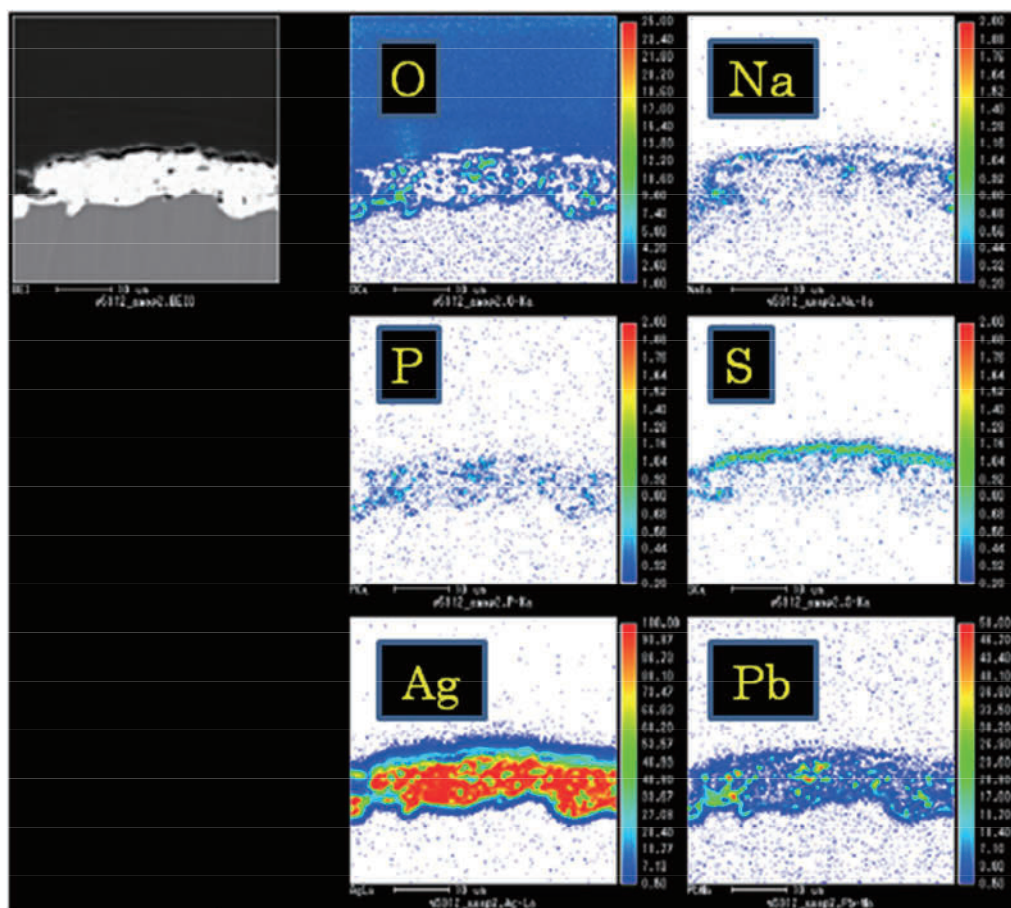


図 6.5.1 DH 試験前のフィンガー電極部の断面 SEM 像 (左上) と EPMA による元素分析マッピングの結果 (図中のバーはいずれも 10  $\mu$ m を示す)

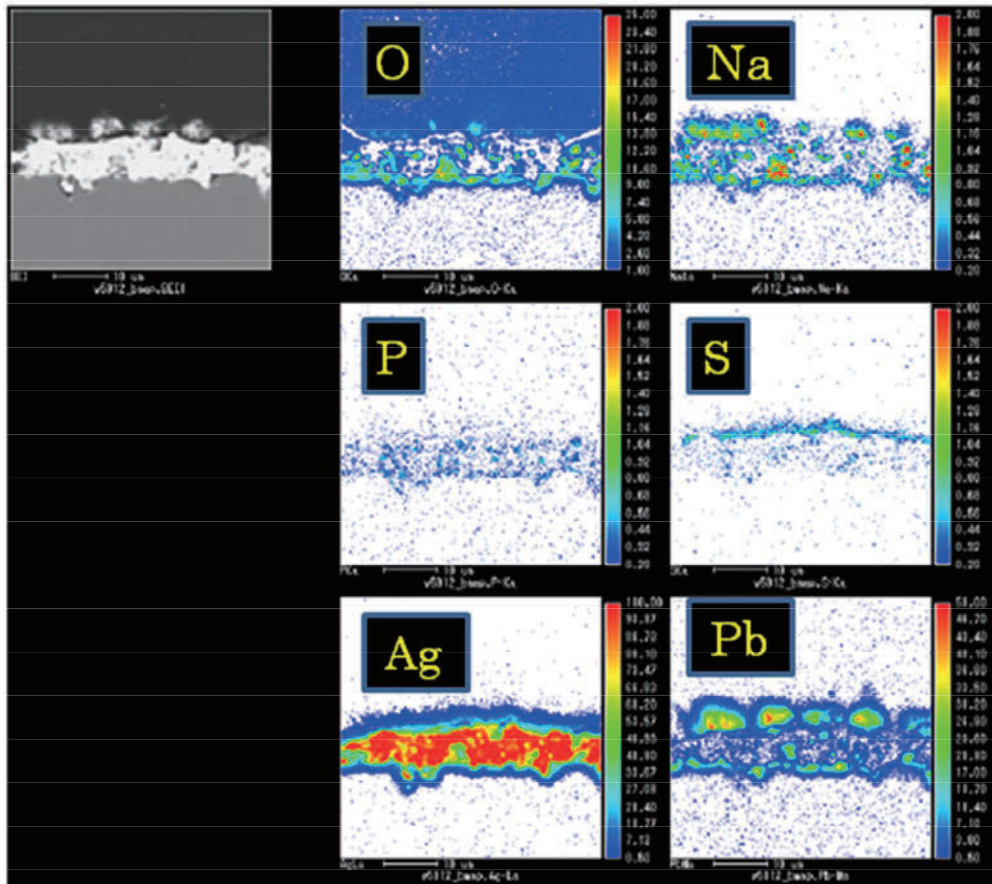


図 6.5.2 DH 試験 4000 時間後のフィンガー電極部の断面 SEM 像（左上）と EPMA による元素分析マッピングの結果（図中のバーはいずれも 10  $\mu\text{m}$  を示す）

DH4000 試験により電極厚みが減少するとともに、電極上への粒子の生成、電極上ならびに電極/Si 界面への Pb の偏析、Na 濃度の増加が観測される。Pb はタブ線の半田に、Na はカバーガラスに起因するものと考えられるが、第 4 章のコアテーマ 2 の報告で詳述したように、これらの電極の変性は、水分浸入により加水分解した EVA から生成した酢酸の影響であると推測される。

図 6.5.3(a)および(b)には、それぞれ DH 試験前および DH 試験 4000 時間後における pn 接合部の SCM から求めたキャリア濃度分布を示す。図 6.5.3(b)中に矢印で示すように、4000 時間の DH 試験を経ることにより、n 層のキャリア濃度の場所依存性が大きいことや、空乏層の幅にばらつきが生じることがわかる。図 6.5.3(a)、(b)中の破線で示した箇所の  $dC/dV$  信号の深さ方向分布を図 6.5.4 に示す。図 6.5.4 より、4000 時間の DH 試験を経ることにより、pn 接合部が 50 nm 程度深い位置に観測される。しかし、これらの結果から、DH4000 時間を経ても、pn 接合部に致命的な損傷は生じていないと考えられ、DH 試験による EL 発光の暗輝度部の広がり、主として収集電極の損傷によるものと考えられる。

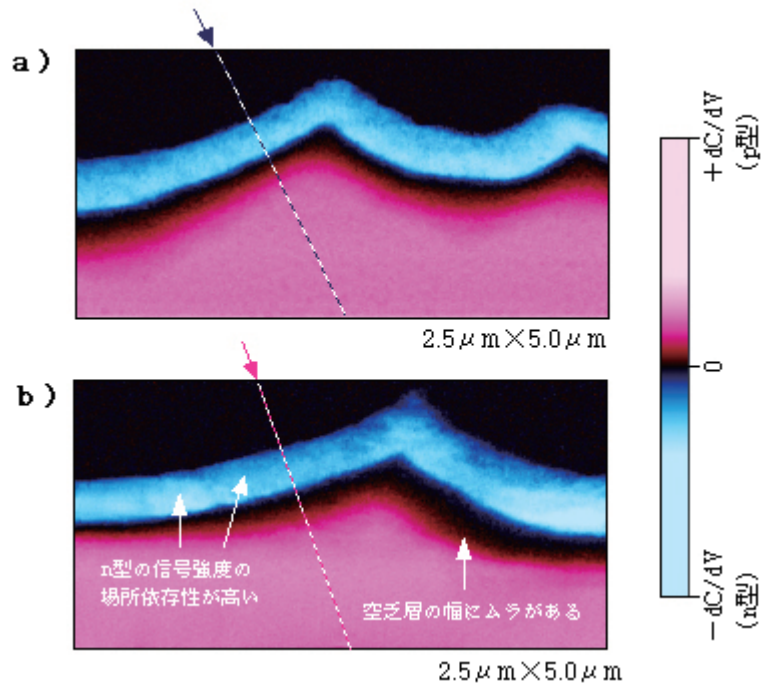


図 6.5.3 DH 試験前(a)および DH 試験 4000 時間後(b)における pn 接合部の SCM から求めたキャリア濃度分布

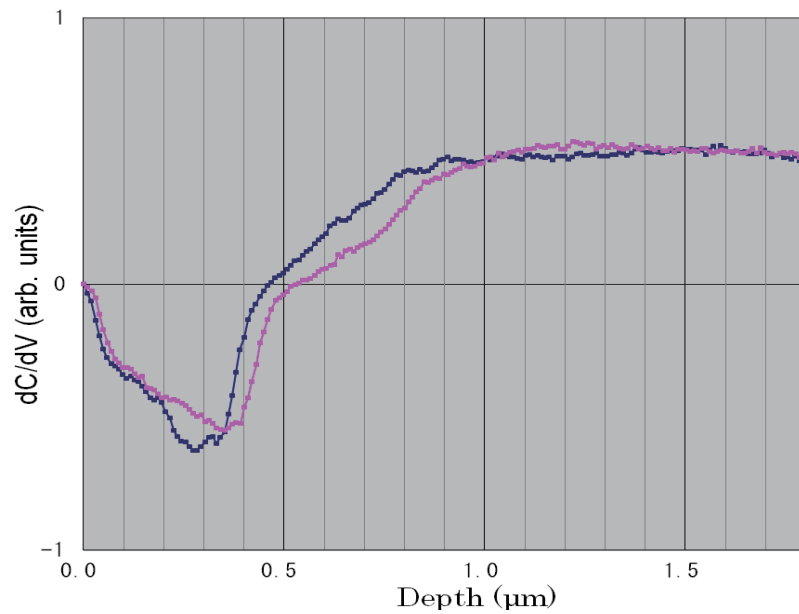


図 6.5.4 図 6.5.3 中に破線で示した箇所の dC/dV 信号の深さ方向分布  
青：DH 試験前、赤：DH 試験 4000 時間後

(産業技術総合研究所：増田 淳)