

第6章

共同研究「中古モジュールの詳細調査」

第 6 章 共同研究「中古モジュールの詳細調査」

まえがき

第 5 章に記載した「共同研究テーマ調査」の中間報告を経て、平成 22 年 8 月 5 日開催の臨時運営委員会ならびに同年 8 月 11 日開催の第 10 回運営委員会幹事会にて、コンソーシアム共同研究活動として「長曝後モジュール（中古モジュール）の詳細調査」に取り組むことが承認された。

本共同研究の概要を第 10 回運営委員会幹事会資料 2 別紙 2 より抜粋・要約すると以下の通りである。

- ・目的・狙い：AIST 保管中の 90 年台の技術で作られたモジュールを非破壊・破壊検査まで含めて詳細に調査し、モジュールの不具合解析手法の開発、劣化メカニズムの解明。
- ・目標：200 枚以上の中古モジュールの経年変化の状態を調査する。特徴的なモジュール 20 枚程度について詳細調査を行う。
- ・研究期間：平成 22 年 9 月～平成 23 年 3 月
- ・研究予算：300 万円
- ・研究体制：産総研太陽光発電研究センター土井主任研究員をリーダーとし、コンソーシアム参加企業から有志を募集する。

これを受け、平成 22 年 9 月 13 日に第 1 回会合をつくば中央第 2 事業所内でもち、作業工程と内容の議論、3 月までの具体的な計画を議論した。この結果、大まかな工程ととりまとめ担当（かっこ内）を次のように決めた；**Step1: Identification**（日立化成工業：田中氏）、**Step2: 非破壊検査**（レーザーテック・平川氏、エスペック・青木氏）、**Step3: 破壊検査**（東レ・荒井氏）。また、本テーマのきっかけとなる前述の共同研究テーマ No.2 を主導した岐阜大学の阪本技術諮問委員が本活動の中核的にリードすることとなった。このとき決定された工程表を表 6.1 に記す。

本活動の期間中に東日本大震災に遭遇したため活動期間は延長され、産総研の環境が復旧後、速やかに活動は再開された。工程表に盛り込まれた内容は 6 ヶ月の期間でこなすには多すぎるように思われたが、参加研究員の多大なる熱意により、当初予定通りの成果が収められたと考える。本活動の 12 回の会合の概略を表 6.2 に記し、活動の記録としたい。

表 6.1 工程表

			Sep-10	Oct-10	Nov-10	Dec-10	Jan-11	Feb-11	Mar-11
モジュール Identification	① 調査対象モジュールの選別	①-1 AIST保管中古モジュールの現物確認	→						
		①-2 同上に関わる資料確認	→						
		①-3 選別基準設定	→						
		①-4 その他対象モジュール有無調査	→						
		①-5 調査対象モジュール選定(200枚程度)、IDマーク	→						
② 外観観察と記録	②-1 対象モジュール清掃		→	→					
	②-2 外観観察(撮影)と記録		→	→	→				
	②-3 マクロのマッピング(Mdl内位置記録、症状記録)								
非破壊検査	③ ソーラシミュレータ、EL、サーモ、MP150等による発電性能測定	③-1 発電性能測定法設定		→					
		③-2 測定装置手配、測定予約		→					
		③-3 発電性能測定、記録(SPIRE)			→	→	→	→	→
		③-3 発電性能測定、記録(MP150)			→	→	→	→	→
		③-3 発電性能測定、記録(Thermo)			→	→	→	→	→
④ 不具合箇所のミクロなマッピング(代表例)				→					
				→					
				→					
破壊検査	⑤ モジュール不良・不具合部分のサンプル切り出しと詳細調査	⑤-1 サンプル切り出し技法の開発		→	→	→	→	→	→
		⑤-2 調査対象モジュール(20枚程度)の選定			→	→	→	→	→
		⑤-3 詳細調査内容の検討			→	→	→	→	→
		⑤-4 不良サンプル切り出し			→	→	→	→	→
		⑤-5 サンプル詳細調査(各社持ち帰り、外部依頼分析)							
⑥ モジュール不良メカニズム検討	⑥							→	
⑦ 長曝後モジュールの加速試験評価	⑦					→	→	→	
まとめ	⑧ PVTECメンバーモジュールメーカーとの議論	⑧						→	
	⑨ FMEAチャートによる調査結果のまとめ	⑨							→

★3月月次会報告

表 6.2 活動の記録

	日付, 場所	Step1	Step2	Step3	Step4	内容
1回	2011/9/13, つくば	○				キックオフ。AIST倉庫にて現状モジュールの確認。ラベル貼り。【写真A】
2回	2011/9/27, つくば, 実験室	○				モジュール外観チェック、予備実験
3回	2011/10/12, つくば, 実験室	○				外観不良ランクわけ、外観写真撮影。【写真B】
4回	2011/10/29, つくば, 輪講室	○	○			外観チェック、結果報告、外観17枚、I-V13枚を非破壊試験をすると方向性を決定
	11/10,11,12, つくば実験室		○			30枚の非破壊検査、EL、熱画像、I-V測定
5回	2011/12/9, つくば第7輪講室	○	○	○		非破壊試験中間まとめ、破壊試験打合せ、コンソ意見交換会
	12/13~24, 横浜		○			30枚の電流密度分布の測定
6回	2011/1/7, つくば, 第15輪講室		○	○		非破壊検査結果のレビュー、破壊分析に関する各班起案内容の紹介と議論。【写真C】
7回	2011/1/13, つくば, 輪講室, 共用講堂	○	○	○		AM: 外注分析の段取り打合せ、コンソ内破壊分析案打合せ、PM: 第13回月次会で中間発表
	1/24.25, つくば実験室			○		セル単体の特性測定
8回	2011/2/17, つくば, 第5会議室			○	○	外注分析の進捗報告、FMEA概略説明
9回	2011/3/25, 九州センター	○	○	○	○	成果報告書作成段取り打合せ、各社持ち帰り分析希望調整、外注分析報告
	2011/4/13, 新横浜		○			STEP2内部打合せ
10回	2011/4/26, 東レ本社	○	○	○	○	各STEPの進捗報告と内容の確認、破壊試験報告
11回	2011/6/21, 新横浜	○	○	○	○	破壊分析の報告、成果報告書内容の確認
12回	2011/8/5, びわこ	○	○	○	○	PVTEC21、発表打合せ

6. 1 調査対象モジュールの選定

6. 1. 1 背景・目的

本共同研究の実施にあたり、実曝した446枚のモジュールが産総研から与えられた。この中には様々な型式の太陽電池モジュールが含まれていたが、半年間という短い調査期間で効率良く研究を遂行するため、効果的に調査対象を絞り込む必要があった。そこでシリアル番号が明らかな158枚を外観評価対象として選定し、外観検査を行った。さらにその中から、外観不良に注目した17枚とI-Vの経年変化に注目した13枚の合計30枚を非破壊分析対象として選定した。本章では、外観評価、残されていた記録（曝露期間に取得されたI-Vデータ解析など）を整理した結果について報告する。

6. 1. 1. 1 長期曝露モジュールの概要

産業技術総合研究所つくばセンター（茨城県つくば市）の2-6棟の1Fには数百枚に及ぶ曝露済み太陽電池モジュールが保管されている。約20年前に製作された古いモジュールである。これらはNEDOのニューサンシャイン計画の中で用いられたものであり、静岡県浜松市および兵庫県神戸市で10年程度、屋外曝露されたモジュールであると考えられている。曝露試験終了後にそれらモジュールの一部が産総研つくばセンターに引き取られ、さらに約10年間倉庫に保管されていた。

浜松市で曝露されていたモジュールは（財）日本品質保証機構（JQA）がソーラーテクノセンター（静岡県浜松市）において「太陽電池システム評価技術の開発」[1]のために1990年から2001年にかけて評価を行ったものの一部と推測される。この「太陽電池システム評価技術の開発」では太陽電池の評価技術開発を目的にソーラーシミュレーターの装置開発や国内5箇所での長期曝露試験、新規加速劣化試験方法について報告されている。浜松の曝露モジュールは産総研が2001年に100枚を譲り受けたとされているが、どのように選定されたかは明確な記録が残されていない。しかし、これらのモジュールには劣化解析に重要なI-V測定結果等の太陽電池特性の経年変化データが綴られたドッチファイル（以降JQAファイルと呼ぶ）が残されていた。

一方、神戸市で曝露されていたモジュールは関西電力（株）が六甲新エネルギー実証試験センターで（財）電力中央研究所が実施した「太陽電池システム実証技術の開発（高密度システム連携試験）」の報告書[2]付6で紹介されている。この研究目的は、地域によって配電システムに高密度に連携される太陽光発電システムが電力品質、配電線の運用に与える影響について対策技術を確立することであった。同センターでは2000年までの15年にわたり12000枚のモジュールを用いたシステム実証試験が行われていた。産総研にはこれらの曝露モジュールの一部と考えられるものが保管されているが、どのような経緯で持ち込まれたかの明確な情報が残っていない。図6.1に曝露試験場についてパンフレットから抜粋した写真を示す[3, 4]。

我々はまず倉庫に保管されていたモジュールの中から、本研究会での評価が許可された

446枚を調査モジュールとしてID（CNS2010-001～446）を付けた。そして、すべての調査モジュールの背面に張られた銘番を確認して、型式やシリアルNoが判別出来るものを158枚選定した。その中には、浜松から譲り受け、JQAファイルに記載がある100枚のうち47枚が含まれていた。

- [1] H12年度 NEDO委託業務成果報告書 010019353
「太陽光発電システム実用化技術開発」、「太陽光発電システム評価技術の研究開発」
「太陽電池評価システムの研究開発」

※研究開発の期間は1991年からであるが、対象としたモジュールには1990年から設置した物も含まれていた。

- [2] H12年度 NEDO委託業務成果報告書 010019373
「太陽光発電システムの実証研究（高密度連携技術の研究）」
- [3] ソーラーテクノセンターのご案内 パンフレット（JQA発行 1999年）
- [4] 新しい発電システムの研究～六甲新エネルギー実験センター～ パンフレット（関西電力発行1998年）



図 6.1 浜松市ソーラーテクノセンター（左）、神戸市六甲新エネルギー実験センター（右）

6. 1. 1. 2 非破壊評価モジュールの選定概要

評価モジュールは可能な限り幅広く劣化調査を実施するように選定された。コンソーシアムI期の中では成果に偏重せず、II期以降の活動も視野に入れた現状把握・課題抽出も含めた活動とする方針を定めたからである。そして対象とするモジュールも、外観から判断するものと、発電効率の経時変化から判断するものの両方とした。外観に異常があるものは、セルまたはモジュール部材の劣化が可視化されている状態であるため、当然ながら調査対象になる。一方で外観異常がなくとも発電効率が劣化している場合、配線異常などの要因が考えられるため原因を究明する必要がある。調査対象として絞り込む枚数や割り振りは、実施する非破壊試験・破壊分析のスケジュールや、メンバーの意向を協議して外観由来を17枚、経時変化由来を13枚の総計30枚とした。

6. 1. 2 長期曝露モジュールの外観検査

外観検査の対象として取り上げた158枚のモジュールについて、外観異常の分類とそれらの損傷規模を評価した。本節では、これらの分類結果を報告すると共に、次のステップである非破壊評価を行うモジュールの選定を行った結果について述べる。まず今回の158枚のモジュールの種類とメーカー及び製造モデルを表6.3に示す。6メーカー、12型式の太陽電池モジュールが調査対象となった。

表 6.3 太陽電池モジュールの製造メーカーと型式および種類

メーカー	型式	種類	外観写真	定格値 P _{max} (W)	モジュール 台数
A	a 1	単結晶		48.5	24
	a 2	単結晶		47.2	49
	a 3	単結晶		54	11
	a 4	単結晶		66	3
B	b 1	単結晶		42	15
C	c 1	単結晶		45	2
	c 2	単結晶		59.2	2
	c 3	多結晶		52	2
D	d 1	多結晶		51	40
E	e 1	単結晶		-	3
	e 2	単結晶		-	1
F	f 1	a-Si 薄膜		21.2	6

6. 1. 2. 1 外観検査の方法

太陽電池モジュールは太陽電池セル、タブ線や端子箱などの配線部材、強化ガラスやEVAやバックシートといった複数の部材から構成されるので外観異常は部材のみならずその界面にも様々に現れる。表6.4に評価対象部材とその劣化判定内容について示す。

表 6.4 外観評価対象部材と劣化判定内容

ガラス	EVA	セル	配線	バックシート	端子箱
「割れ」	「黄変」 「白濁/デラミ」	「割れ」 「焦げ」	「断線」 「焦げ」	「変色」「焦げ」 「変形」「亀裂」	「固定具合」

※上記以外の異常箇所は「その他項目」とした。

EVAの”黄変”についてはモジュール端や端子箱付近の白い部分との比較で判定した。バックシートの浪打のようなシワや配線による膨らみは製造時からあるものと捉え、異常ではないと判定した。

各部位の損傷規模の評価方法としては、セル1枚の面積を基準にしてその異常面積比率によって下記のようにレベル分けした。

レベル1：面積比率1%以下（グラフ表記は緑色）

レベル2：面積比率1～50%未満（グラフ表記は黄色）

レベル3：面積比率50%以上（グラフ表記は赤色）

なお、複数のセルに同じ異常が見られた場合、その最大面積を有する異常で判定した。また、総合判定は確認された異常の中で最大損傷レベルのものとし、異常が無いものは、

レベル0：異常無し（グラフ表記は青色）

とした。

6. 1. 2. 2 外観検査の結果

全158枚のモジュールにおける各外観異常の件数の総和を表6.5に示す。最も多い外観不良はEVAの剥がれ（デラミ）と黄変であった。セル面積の50%以上を占めるデラミも5台のモジュールに見られた。総合判定としてはレベル1が57枚、レベル2が47枚、レベル3が5枚、レベル0は49枚であった。

表 6.5 モジュール158枚の外観評価結果

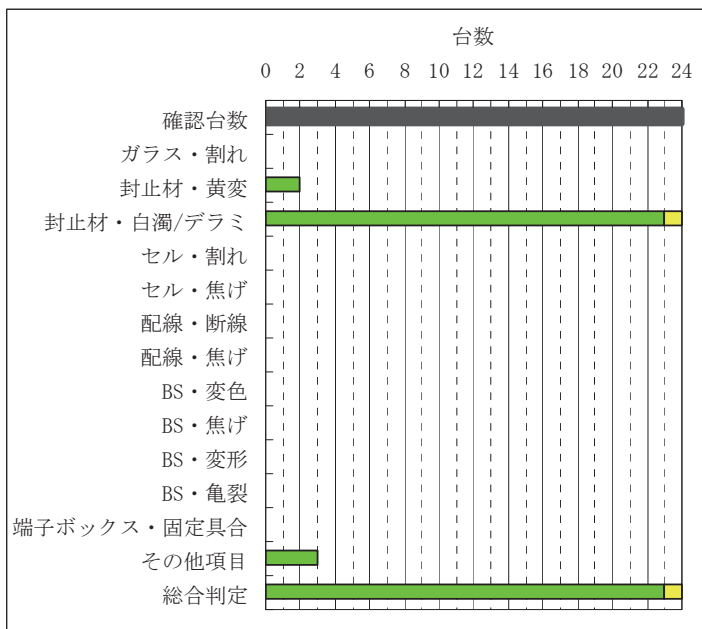
レベル	ガラス		EVA		セル			配線		
	割れ	その他	黄変	白濁/ デラミ	割れ	焦げ	その他	断線	焦げ	その他
1	0	1	41	75	0	0	35	0	0	14
2	0	0	44	7	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
レベル	バックシート				端子BOX		総合判定			
	変色	焦げ	変形	亀裂	その他	固定具合				
1	0	1	11	0	1	0	57			
2	0	0	0	0	0	0	47			
3	0	0	0	0	0	0	5			

次に型番毎に外観評価の結果をグラフにまとめた。モジュールの外観全体の写真（表・

裏) と代表的な外観異常部の拡大写真を併せて示している。最初に想定していなかった判定内容のうち「その他の項目」には「ガラスの傷」、「セルの傷」、「セル端部の白色」、「配線の着色」、「バックシートのはがれ」があった。同メーカーで同型式のモジュールでは外観劣化の傾向がとても良く類似していた。

①：メーカー・型式：A-a 1 {調査台数24台}

<調査結果>



<良品全体図 (表面/裏面)>



【その他】配線：変色 2台 (レベル1)
 ガラス：キズ 1台 (レベル1)

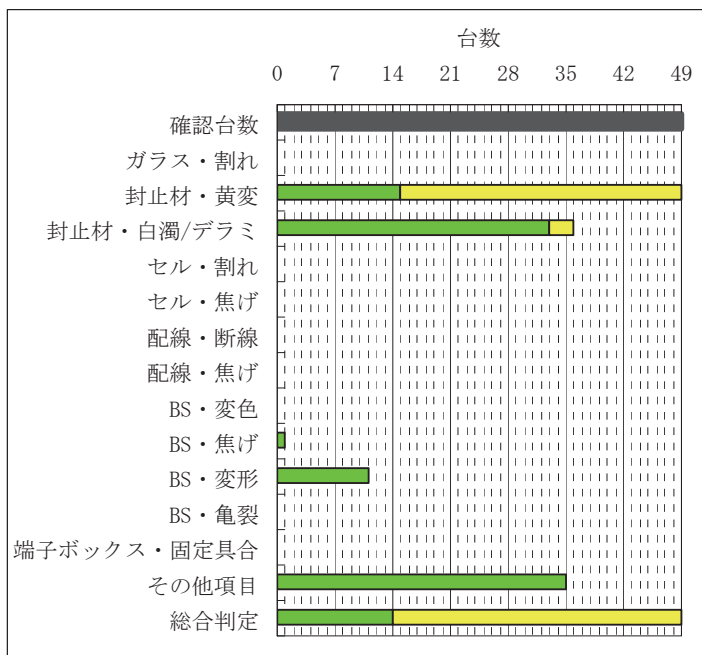
異常箇所 (全体図/拡大図)

<p>封止材・白濁/デラミ (レベル2) {CNS277}</p>	<p>封止材・白濁/デラミ (レベル1) {CNS229}</p>
<p>配線・その他 (レベル1) {CNS229}</p>	

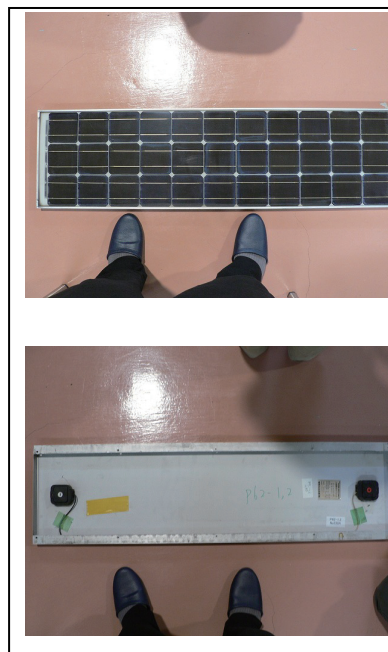
図 6.2 A-a 2 モジュールの外観検査結果及び外観不良

②：メーカー・型式：A-a 2 {調査台数49台}

<調査結果>



<良品全体図(表面/裏面)>



【その他】セル：端部白色 35台 (レベル1)

キズ 1台 (レベル1)

配線：変色 12台 (レベル1)

異常箇所 (全体図/拡大図)

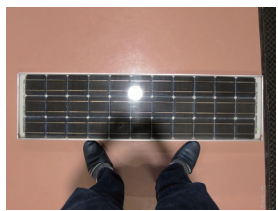
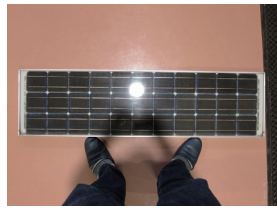
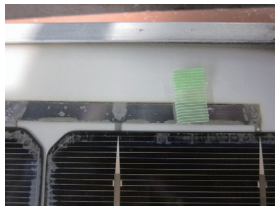
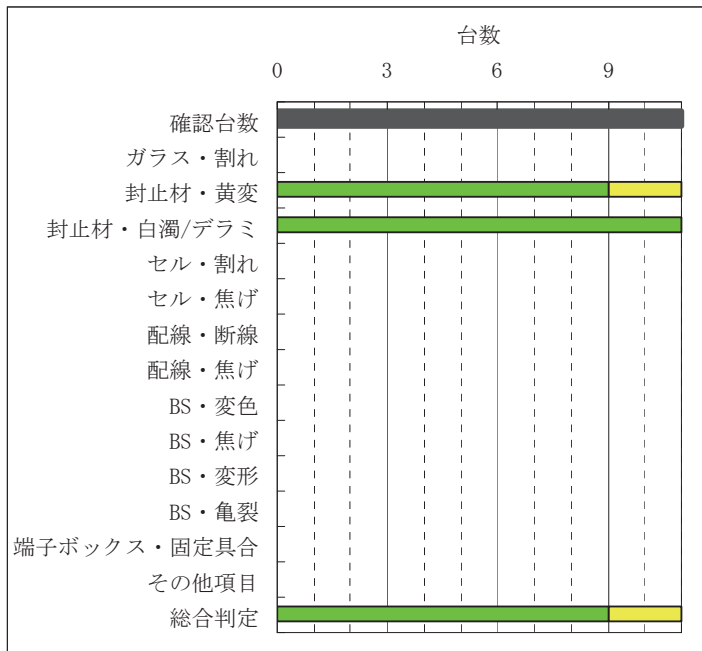
封止材・白濁/デラミ (レベル2) {CNS239}	封止材・白濁/デラミ (レベル2) {CNS258}
	
配線・その他 (レベル1) {CNS258}	
	

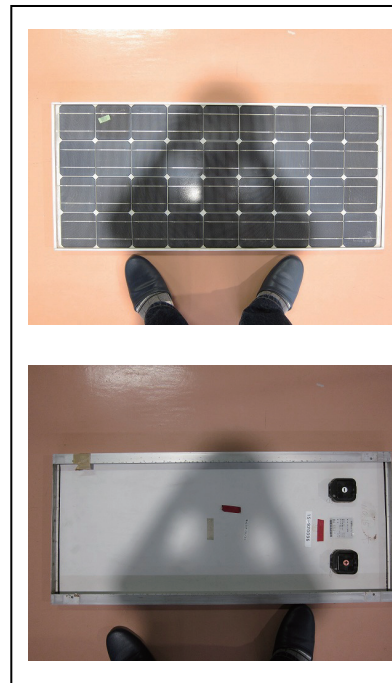
図 6.3 A-a 2 モジュールの外観検査結果及び外観不良

③：メーカー・型式：A-a 3 {調査台数11台}

<調査結果>



<良品全体図(表面/裏面)>



異常箇所(全体図/拡大図)


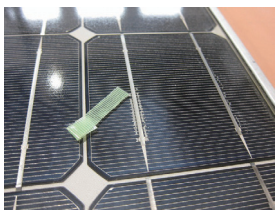
封止材・白濁/デラミ (レベル2) {CNS485}		
		

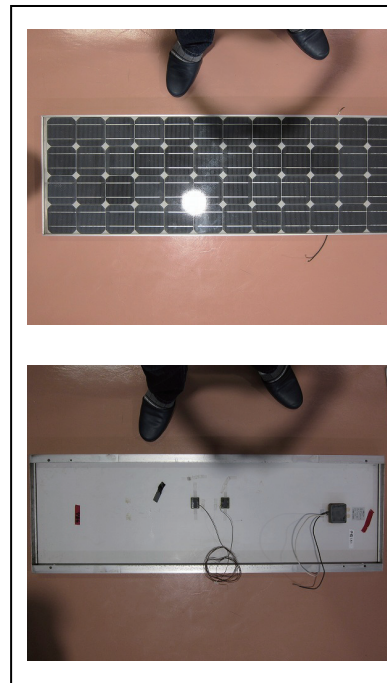
図 6.4 A-a 3モジュールの外観検査結果及び外観不良

④：メーカー・型式：A-a 4 {調査台数3台}

<調査結果>

	台数			
	0	1	2	3
確認台数	3			
ガラス・割れ	0			
封止材・黄変	1			
封止材・白濁/デラミ	0			
セル・割れ	0			
セル・焦げ	0			
配線・断線	0			
配線・焦げ	0			
BS・変色	0			
BS・焦げ	0			
BS・変形	0			
BS・亀裂	0			
端子ボックス・固定具合	0			
その他項目	0			
総合判定	1		2	

<良品全体図(表面/裏面)>



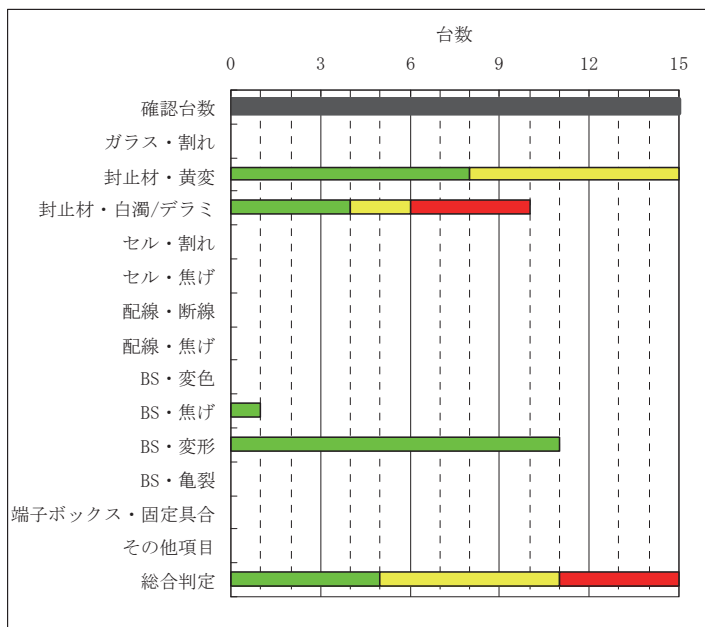
異常箇所(全体図/拡大図)

封止材・黄変 (レベル2) {CNS135}			
			

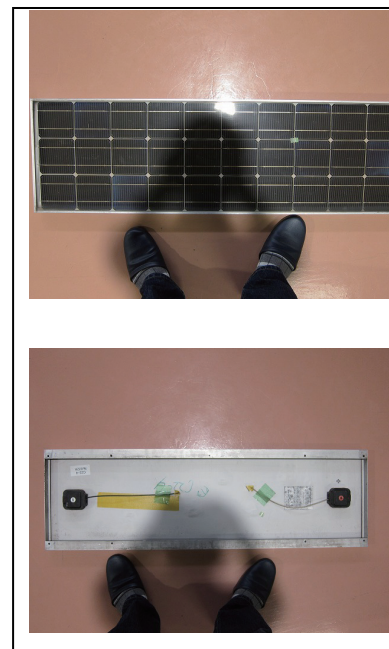
図 6.5 A-a 4 モジュールの外観検査結果及び外観不良

⑤：メーカー・型式：B-b 1 {調査台数15台}

<調査結果>



<良品全体図 (表面/裏面)>



異常箇所 (全体図/拡大図)

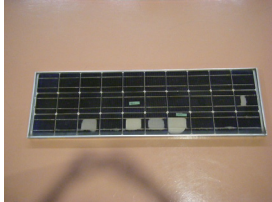

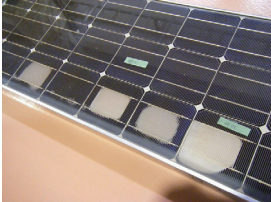

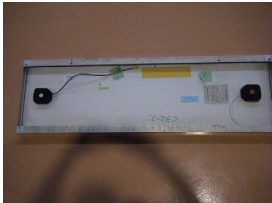

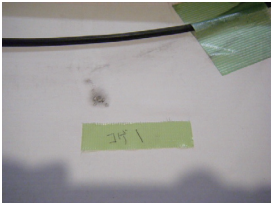
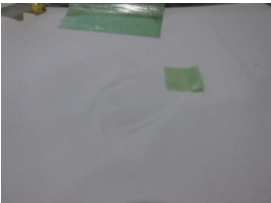
封止材・白濁/デラミ (レベル3) その1 {CNS 2 4 2}	封止材・白濁/デラミ (レベル3) その2 {CNS 1 4 5}
	
	
BS・焦げ (レベル1) {CNS 2 4 4}	BS・変形 (レベル1) {CNS 2 4 7}
	
	

図 6.6 B-b 1 モジュールの外観検査結果及び外観不良

⑥：メーカー・型式：C-c 1 {調査台数2台}

<調査結果>

	台数		
	0	1	2
確認台数			
ガラス・割れ			
封止材・黄変			
封止材・白濁/デラミ			
セル・割れ			
セル・焦げ			
配線・断線			
配線・焦げ			
BS・変色			
BS・焦げ			
BS・変形			
BS・亀裂			
端子ボックス・固定具合			
その他項目			
総合判定			

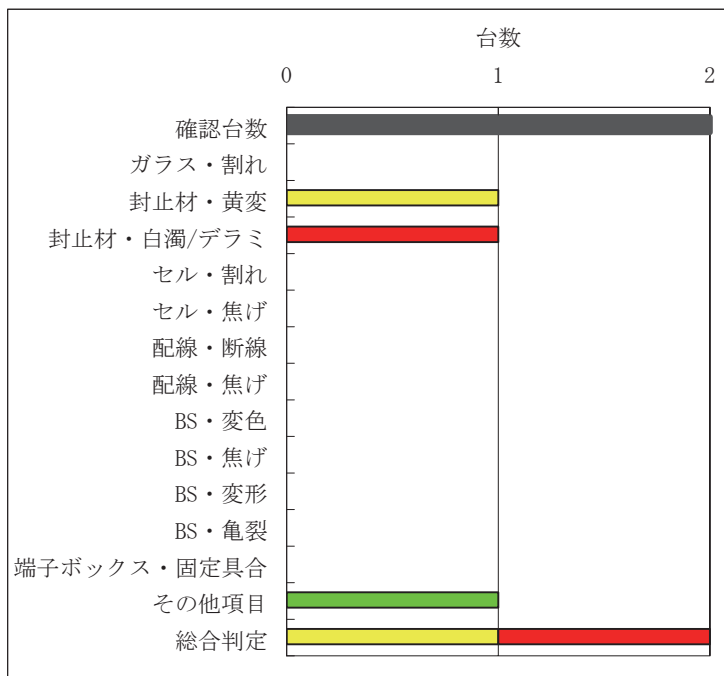
<良品全体図 (表面/裏面)>



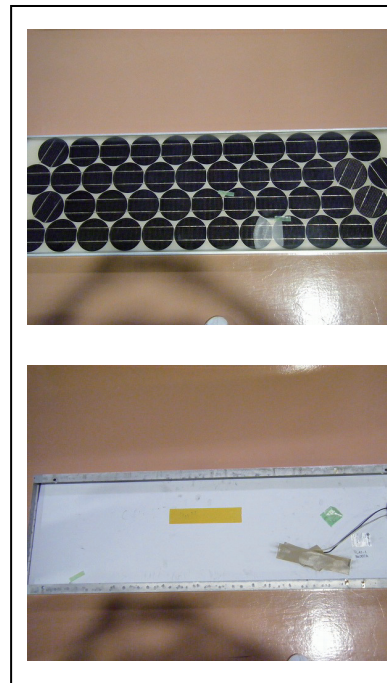
図 6.7 C-c 1 モジュールの外観検査結果

⑦：メーカー・型式：C-c 2 {調査台数 2 台}

<調査結果>



<良品全体図 (表面/裏面)>



【その他】

バックシート：剥がれ 1台 (レベル1)

異常箇所 (全体図/拡大図)

封止材・ラミネート不良 (レベル3) { CNS 1 4 1 }		BS・剥がれ (レベル1) { CNS 1 4 1 }	

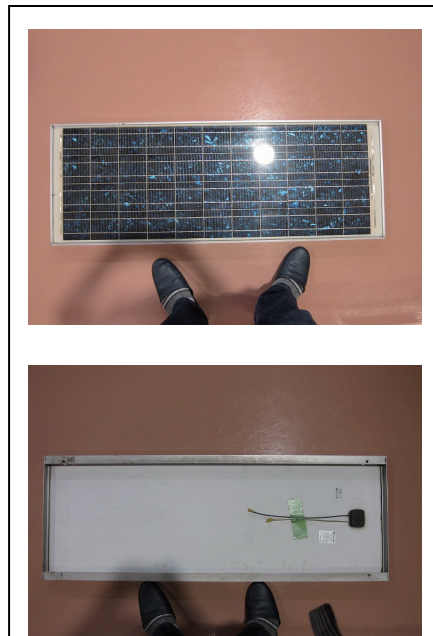
図 6.8 C-c 2 モジュールの外観検査結果及び外観不良

⑧：メーカー・型式：C-c 3 {調査台数2台}

<調査結果>

	台数		
	0	1	2
確認台数			2
ガラス・割れ			
封止材・黄変			2
封止材・白濁/デラミ		1	
セル・割れ			
セル・焦げ			
配線・断線			
配線・焦げ			
BS・変色			
BS・焦げ			
BS・変形			
BS・亀裂			
端子ボックス・固定具合			
その他項目			
総合判定			2

<良品全体図（表面／裏面）>

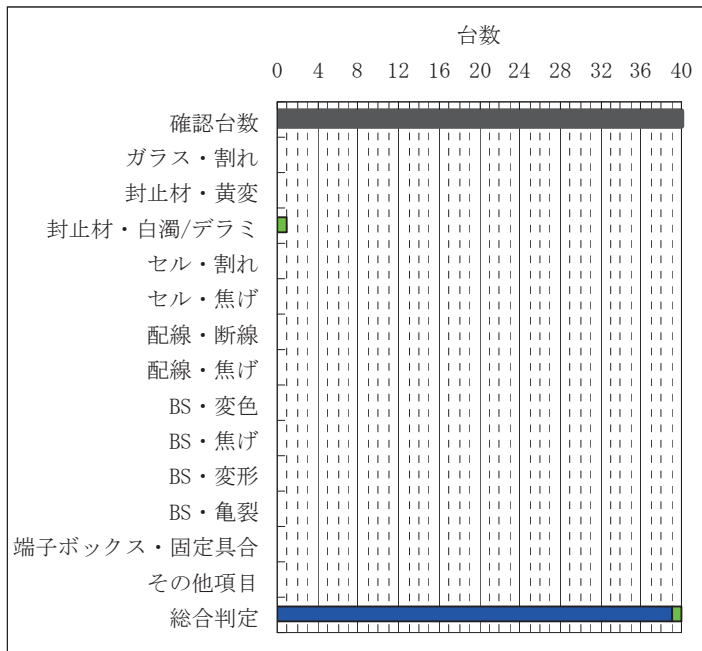


注) 封止材・白濁/デラミは、写真が無いため、記載せず。

図 6.9 C-c 3 モジュールの外観検査結果

⑨：メーカー・型式：D-d 1 {調査台数40台}

<調査結果>



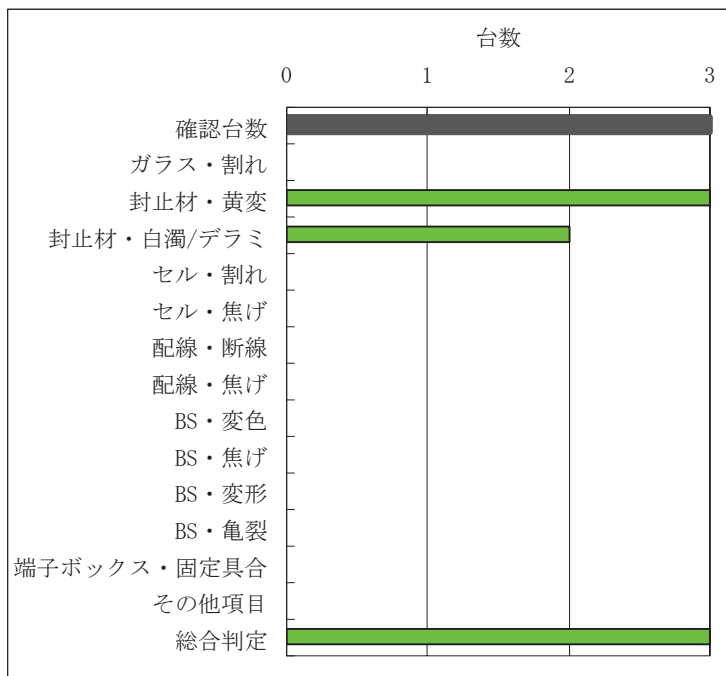
<良品全体図（表面／裏面）>



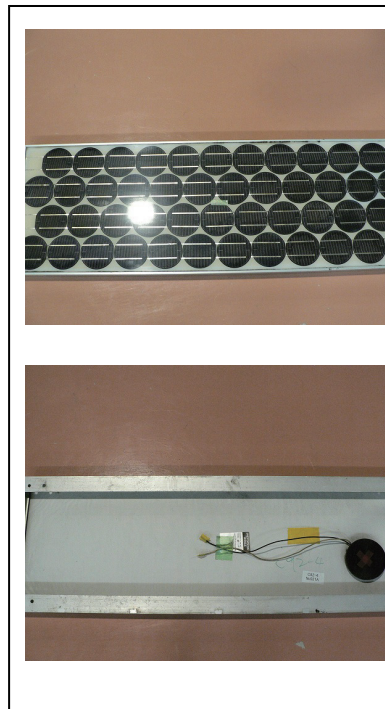
図 6.10 D-d 1 モジュールの外観検査結果

⑩：メーカー・型式：E-e1 {調査台数3台}

<調査結果>



<良品全体図(表面/裏面)>



異常箇所(全体図/拡大図)

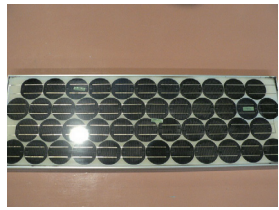
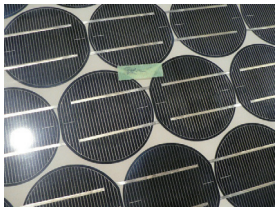
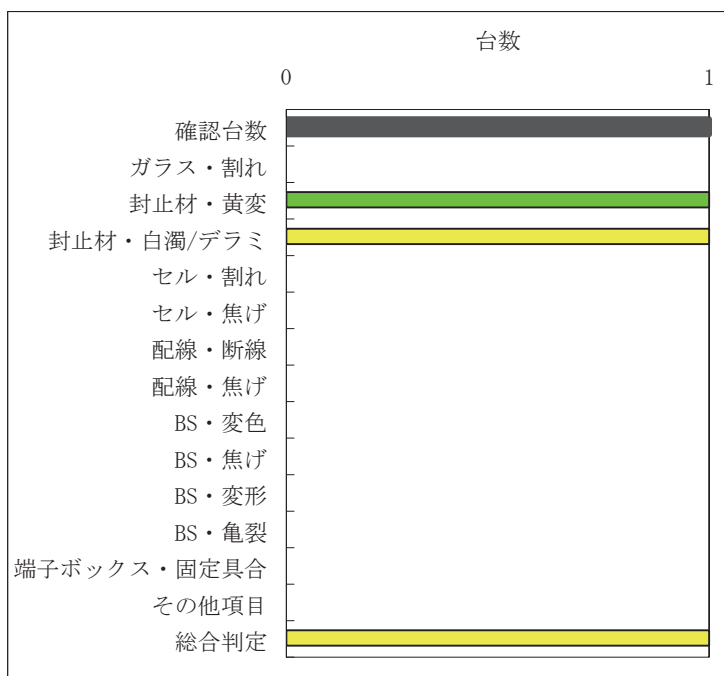
封止材・白濁/デラミ (レベル1) {CNS140}			
			

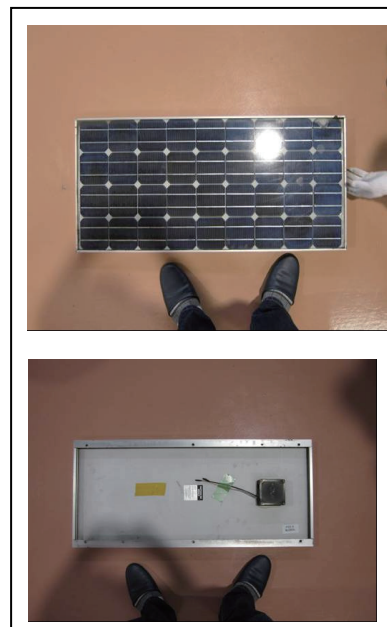
図 6.11 E-e1 モジュールの外観検査結果及び外観不良

⑪：メーカー・型式：E-e2 {調査台数1台}

<調査結果>



<良品全体図(表面/裏面)>

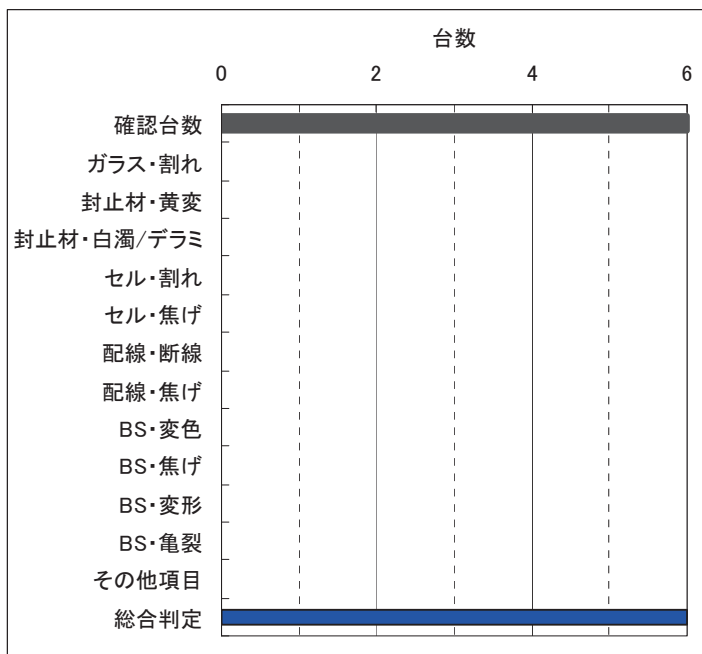


<p>封止材・白濁/デラミ (レベル2) {CNS143}</p>	

図 6.12 E-e2の外観検査結果及び外観不良

⑫：メーカー・型式：F-f 1 {調査台数6台}

<調査結果>



<良品全体図 (表面/裏面)>

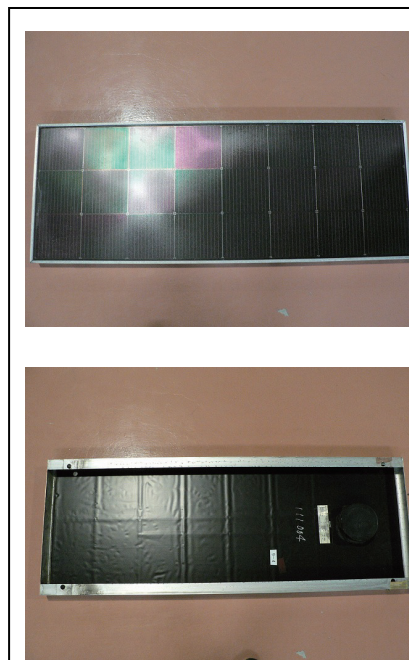


図 6.13 F-f 1 モジュールの調査結果

6. 1. 2. 3 外観不良から選定した非破壊評価モジュール

外観検査した158枚のモジュールの中から次のSTEPである非破壊評価するモジュールを選定した。レベル3のものは全て選出し，レベル2もしくは1でも特徴的・注目すべきものを選出した。表6.6に外観から選定したモジュールを示す。合計17枚のモジュールを選定した。

表 6.6 外観検査から選ばれた非破壊検査用のモジュール

コンソID	メーカー	型式	部材／検査項目						総合判定
			封止材		セル	配線	バックシート		
			黄変	白濁 /デラミ	変色	変色	焦げ	変形	
CNS-227	A	a1	1	1	0	1	0	0	1
CNS-216		a2	2	2	1	0	0	0	2
CNS-239			2	1	2	0	0	0	2
CNS-241			2	1	0	1	0	0	2
CNS-257			1	2	0	1	0	0	2
CNS-264			2	1	0	0	0	0	2
CNS-144	B	b1	2	0	0	0	0	1	2
CNS-145			2	3	0	0	0	1	3
CNS-242			2	3	0	0	0	0	3
CNS-243			1	3	0	0	0	1	3
CNS-244			2	1	1	0	1	0	2
CNS-245			1	3	0	0	0	1	3
CNS-246			1	0	0	0	0	1	1
CNS-253			2	2	0	0	0	1	2
CNS-141	C	c2	2	3	0	0	0	0	3
CNS-146	D	d1	0	0	0	0	0	0	0
CNS-151			0	0	0	0	0	0	0

6. 1. 3 I - V特性の経年変化

本節では、浜松市でJQAが行った曝露試験で残されたI - V特性の経時変化が記載されているJQAファイルを整理して劣化状況を把握すると共に、次のステップである非破壊検査を実施するモジュールを選定した結果について述べる。

6. 1. 3. 1 過去記録（JQAファイル）について

JQAが残したJQAファイルは、劣化要因を追求する本調査において極めて重要な資料である。ファイルには浜松で曝露試験されたモジュールの中から100枚の情報があり、「全体を総括した」部分と「各モジュールのI-Vカーブ」に分けて綴じられていた。I-Vカーブは年度毎に綴じられており、データの開始は1991年であった。全体を総括した部分には、100枚分のモジュールの型式とシリアル番号、I-Vデータや曝露試験でモジュールが設置された位置等が記録されていた。我々が調査対象とした158枚のうち47枚のシリアル番号がこのJQAファイルに記載されていた。

この中で我々が期待したような、曝露開始から終了までの経時変化がきちんと追跡できるようなデータは多くなかった。47枚の中で、1年毎のI-V経時変化のデータがあるものは19枚であった。21枚は開始時期と終了時期(99年or 01年)のデータしかなかった。さらに5枚は01年測定データしかなく、残りの2枚は全くデータがなかった。また、ファイルには記載ミスもあり、A社やD社では存在しない型番(他の型番と間違えた)があった。

一方、I-Vカーブも部分的にしか記録がなく、表 6.7 に示すように、1991年は5件で、1995年まで徐々に増加するが、2000年に39枚分の記録しか残っていなかった。2001年のファイルのみ100枚となっているが、前述した全体総括部分に記載されていた100枚と全てが一致しているわけではなかった。

表 6.7 JQA ファイル残されたI-V カーブの年毎の枚数

1991	1992	1993	1994	1995-2000	2001
5件	6件	13件	14件	39件	100件

このように JQA ファイルのデータは必ずしも理想的に取得されたものではなかったが、これらを整理し、曝露されたモジュールの出力減衰などを次項にまとめた。

6. 1. 3. 2 調査モジュールの I - V経年変化のまとめ

外観検査した158枚の中でJQAファイルに記載が残っていた40枚のモジュールに対する曝露期間と出力減衰(定格値比較)を表 6.8 に示す。定格出力はJIS規格による実モジュールの出力に対して±10%を許容されていることに注意する。また、A-a3、C-c2、D-d1、F-f1のモジュールに対する出力とFFの経年変化を図 6.14~17 に示した。

表 6.8 経年データが残されていた40枚のモジュールの曝露期間と出力減衰

コンソID	メーカー	型式	曝露開始年	曝露終了年 (最終測定)	期間 (年)	定格出力 P _{max} (W)	最終出力 P _{max} (W)	出力減衰 (%) 定格値比較
CNS2010-484	A	a3	1992	2001	9	54	49.92	-7.6
CNS2010-485			1992	2001	9	54	43.93	-18.6
CNS2010-487			1992	2001	9	54	49.57	-8.2
CNS2010-488			1992	2001	9	54	50.20	-7.0
CNS2010-486			1992	2000	8	54	48.19	-10.8
CNS2010-489			1992	2001	9	54	48.83	-9.6
CNS2010-450			1992	2001	9	54	50.10	-7.2
CNS2010-451			1992	2001	9	54	49.64	-8.1
CNS2010-452			1992	2001	9	54	50.58	-6.3
CNS2010-454			1992	2001	9	54	49.56	-8.2
CNS2010-481			B	b1	1990	2001	11	42
CNS2010-482 (未曝露品)	C	c2	-	(2001)	11	45	40.50	-10.0
CNS2010-483			1990	2001	11	45	39.40	-12.4
CNS2010-479	D	d1	1990	2001	11	51	43.86	-14.0
CNS2010-478			1991	2001	10	51	46.77	-8.3
CNS2010-156			1992	2001	9	51	45.13	-11.5
CNS2010-162			1992	2001	9	51	43.04	-15.6
CNS2010-163			1992	2001	9	51	43.01	-15.7
CNS2010-157			1992	2001	9	51	45.51	-10.8
CNS2010-480 (未曝露品)			-	(2001)	9	51	47.92	-6.0
CNS2010-151			1991	1999	8	51	44.75	-12.3
CNS2010-169			1991	1999	8	51	45.40	-11.0
CNS2010-170			1991	1999	8	51	45.16	-11.5
CNS2010-171			1991	1999	8	51	44.78	-12.2
CNS2010-173			1991	1999	8	51	44.63	-12.5
CNS2010-175			1991	1999	8	51	44.84	-12.1
CNS2010-176			1991	1999	8	51	45.68	-10.4
CNS2010-177			1991	1999	8	51	45.03	-11.7
CNS2010-178			1991	1999	8	51	46.16	-9.5
CNS2010-181			1991	1999	8	51	45.54	-10.7
CNS2010-167 (未曝露品)			-	(1999)	7	51	46.22	-9.4
CNS2010-148			1991	1999	8	51	45.76	-10.3
CNS2010-166			1991	1999	8	51	45.40	-11.0
CNS2010-165	1992	2001	9	51	45.10	-11.6		
CNS2010-474	F	f1	1990	2001	11	21.2	14.30	-32.5
CNS2010-475			1990	2001	11	21.2	11.65	-45.0
CNS2010-476 (未曝露品)			-	(2001)	11	21.2	22.38	5.6
CNS2010-447			1992	1999	7	21.2	16.69	-21.3
CNS2010-448			1992	1999	7	21.2	15.04	-29.1
CNS2010-449			1992	1999	7	21.2	13.56	-36.0

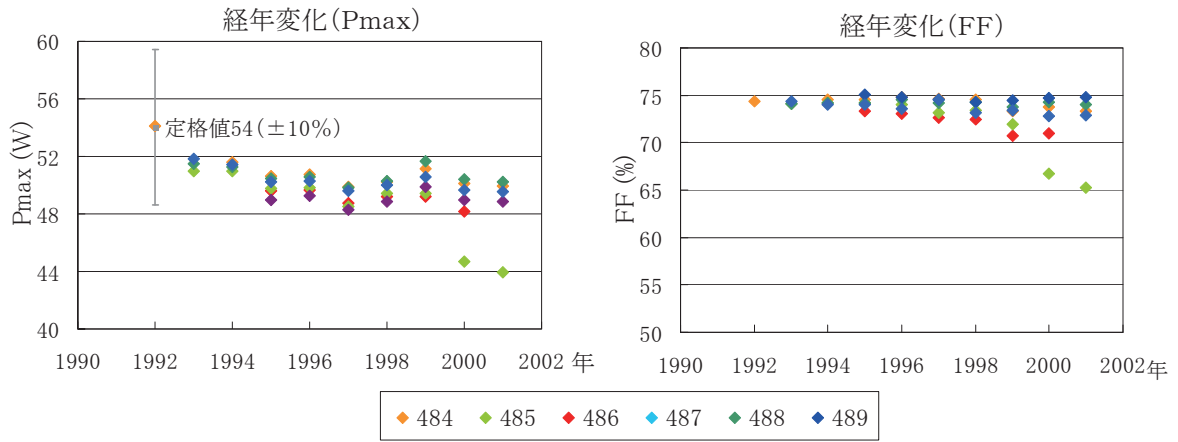


図 6.14 A-a3モジュールの経年I-Vデータ

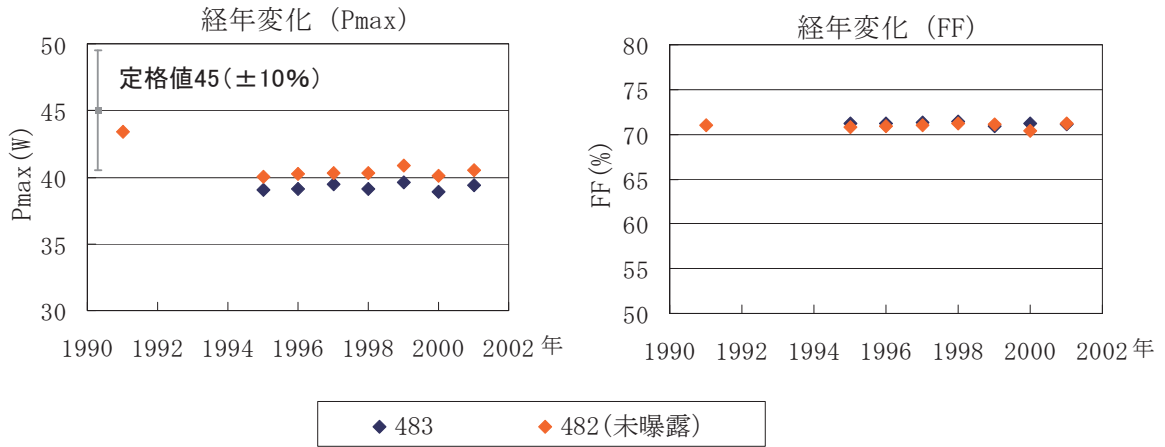


図 6.15 C-c2モジュールの経年I-Vデータ

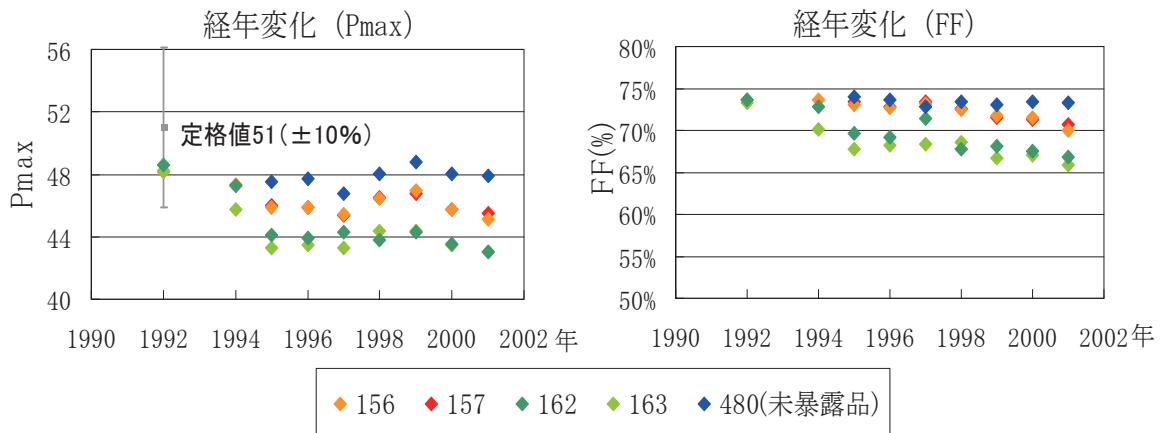


図 6.16 D-d1モジュールの経年I-Vデータ

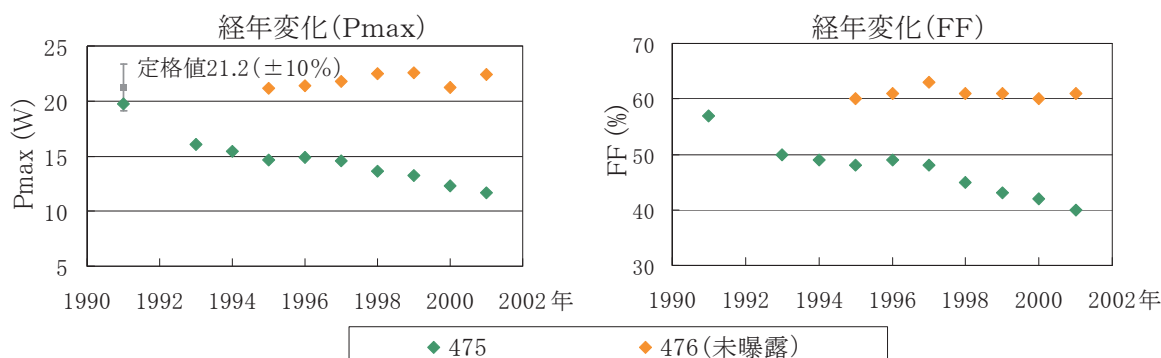


図 6.17 F-f1モジュールの経年I-Vデータ

図 6.14～6.17 より、F-f1のアモルファス型のモジュールを除くと、全ての結晶系モジュールでは最初の2～3年で出力が減少した後は、数年に渡ってほとんど出力減衰していない傾向が見られた。未曝露品では初期からのデータが少ないが、D-d1、F-f1品では他のモジュールのデータと比べても初期から特性劣化がないと予想できる。C-c2品については初期から5年経過までに出力減衰しているがその後の出力減衰はなく、FFは初期から変化していない。A-a3モジュールのID485では曝露10年目に特徴的なPmax, FFの低下が確認されている。このID485は外観がチェックで黄変レベル2がついている物であった。C-c2品では95年以降、未曝露モジュールも曝露モジュールも出力減衰がない。D-d1品ではID156、157の出力減衰が小さくID162、163では比較的大きく出力減衰していた。F-f1品の出力低下は著しく大きく、定格値比較で45%である。FFもそれに伴って40%近くまで下がっている。

この表にプロットされたモジュールは ID485を除き外観不良レベル0であったため、外観影響ではない劣化の可能性が示唆される。

6.1.3.3 I-Vの経年変化から選定したモジュール

以上のデータから表 6.9 に示すモジュールを評価モジュールとして決定した。比較ができる未曝露品がある型式を中心に選定し、メーカー（型式）、タイプが多様になるように留意して進めた。同じ型式であれば最も性能が低下している物を選定した。A-a3品のみ未曝露品の記録が残っていなかったため、未曝露品の代わりに最も性能が低下していなかったID488を選定した。表 6.9 中の選定理由が空白になっている物は劣化品のn数増しの位置づけで選定した。

前述したように、これらモジュールは実曝から回収された後に、約10年間、産総研の倉庫で保管されていた。本研究で産総研ソーラーシミュレーターを用いて測定した現在の発電出力も併せて記載した。なお、ソーラーシミュレーター測定の詳細は次章で記載する。全てのモジュールにおいて最終のPmaxと2010年時点でもPmaxに差がなかった。

すなわち、選定した評価モジュールにおいては曝露後に約10年間産総研で保管されている期間での性能低下は無かったと判断できる。

表 6.9 経時変化から選定したモジュール一覧と現在の発電出力

コンソID	メーカー	型式	Pmax	選定理由	Pmax	Pmax
			減衰(%) (定格値比)		曝露最終	2010年
CNS-488	A	a3	-7.0	最も減衰していない	50.20	48.98
CNS-485			-18.6	最も減衰している	43.93	45.04
CNS-451			-8.1		49.64	48.18
CNS-450			-7.2		50.10	47.87
CNS-483	C	c1	-10.0	未曝露品	39.40	38.88
CNS-482			-12.4	最も減衰している	40.50	39.49
CNS-480	D	d1	-6.0	未曝露品	47.92	47.93
CNS-167			-9.4	未曝露品	46.22	45.52
CNS-162			-15.6		43.04	43.22
CNS-163			-15.7	最も減衰している	43.01	42.92
CNS-476	F	f1	5.6	未曝露品	22.38	21.41
CNS-475			-45.0	最も減衰している	11.65	10.62
CNS-449			-36.0		13.56	12.88

6. 1. 4 まとめ

158枚の曝露モジュールの外観検査と過去データの整理を行い、以下のことが明らかになった。

- 全てのモジュールで最も多い外観異常はEVAの黄変と剥離（デラミ）であった。
- 型式の同じモジュールでは、同様な外観不良が現れていた。
- 全く外観異常がなくても出力電力が大きく低下しているモジュールがみられた。
- 結晶系は最初の3～4年で劣化が大きくその後の劣化はほとんどない傾向である。これに対し、薄膜系は徐々に劣化していくという特徴が見られた。

6. 2 非破壊検査

6. 2. 1. 背景・目的

一般に、太陽電池モジュールの経年変化については、外観変化もしくは出力性能保持の観点でのみ評価されることが多く、システム、モジュール単位の外観調査や出力測定（I-V測定）に留まっており、

課題 1) 外観変化（劣化）の出力性能への影響調査、

課題 2) 外観変化の伴わない出力低下（劣化）の原因究明、

などが十分に行われていない。これらの課題達成は本研究の大きな目的の1つとして挙げられているが、そのためには劣化・不具合箇所の特定と正常部位との状態比較が不可欠である。

そこで本章では、前章で抽出した30枚のモジュール（表6.6と表6.9に掲載）に対して、出力測定（I-V測定）と共に、数種の異なる非破壊センシング技術を用いてモジュール面内の2次元状態マッピングを行い、それらの結果を横断的・統合的に考察することによって劣化・不具合箇所の特定及び状態把握を試みた結果について述べる。

また、同メーカー同型式の複数モジュールを調査したことにより、この過程を通して以下の点での結果をまとめ、考察を行うこととする。

- ・ メーカー（型式）毎の劣化モード比較
- ・ 同型式別モジュール同士の劣化モード比較
- ・ 屋外曝露モジュールと未曝露モジュールの比較

本章で行った出力測定及び状態マッピングについては次節で詳述するが、以下の通りである。これらのマッピング技術を横断的に解析した場合の劣化箇所推定手法についても、要素技術開発として行うこととする。

- ・ I-V測定：擬似太陽光によるモジュールの発電能力測定
（モジュール単体の発電性能を測定する）
- ・ EL法：モジュールに電氣的負荷をかけ、その際のセルからの微弱発光をマッピング
（セルの状態をマッピングする）
- ・ 熱画像測定：モジュールに順方向の電氣的負荷をかけ、その際の発熱量をマッピング
（順熱画像）と、モジュールを短絡して太陽光にさらした発熱量のマッピング（Isc熱画像）
（モジュール内、セル内の発熱状態、抵抗状態をマッピングする）
- ・ 電流密度分布測定（MAP法）：擬似太陽光でスキャンをして、CTを用いたモジュール面内の発電電流密度（変換効率）の分布マッピング（モジュール内、セル内の発電性能をマッピングする）

なお、6.3節では本章の結果を基にさらに特定部位の破壊検査を行うこととしており、本非破壊検査はそれを前提として行ったものである。

6. 2. 2 方法

6. 2. 2. 1 I-V測定方法

調査対象モジュールの現在（2010年）の発電性能を把握するために、日清紡メカトロニクス(株)製ソーラーシミュレータ（SPI-SUNSIMULATOR 1116N）を用いて I-V 特性を測定した。調査対象モジュールの多くは、ケーブルに経年による著しい劣化が見られたため、すべてのモジュールについて端子ボックス内のタブ線から接続し測定した。



図 6.18 : ソーラーシミュレータ外観

6. 2. 2. 2 EL測定方法

調査対象モジュールのセル異常を検出するために、EL 画像測定を行った。

EL 画像測定の原理は次のようなものである。太陽電池セルは半導体デバイスの一種であり、光が当たっていない暗状態で順バイアス方向に電力を印加すると、フェルミレベルの一致した平衡状態から p 層と n 層にそれぞれ過剰なホールと電子が生成される。過剰な電子は、平衡状態に戻ろうとして空乏層を通過してホールと再結合する。この再結合は直接遷移であり、シリコンのバンドギャップ 1.2eV に相当するエネルギーとして約 1150nm の近赤外光を放射する。この近赤外光を赤外線カメラで撮影（マッピング）したものが EL 画像である¹⁾。EL 画像では主に、目視では観察できないセルの割れ・クラックと、セル画像の明暗から出力低下部分を特定することができる。

実際の測定は、(株)アイテス製 EL 画像測定装置（PVX100）を用いた。接続は I-V 測定と同様に、端子ボックス内のタブ線から接続した。印加電流は短絡電流 (I_{sc}) の約 0.9 倍とし、解像度 4286*2847 で EL 画像を撮影した。

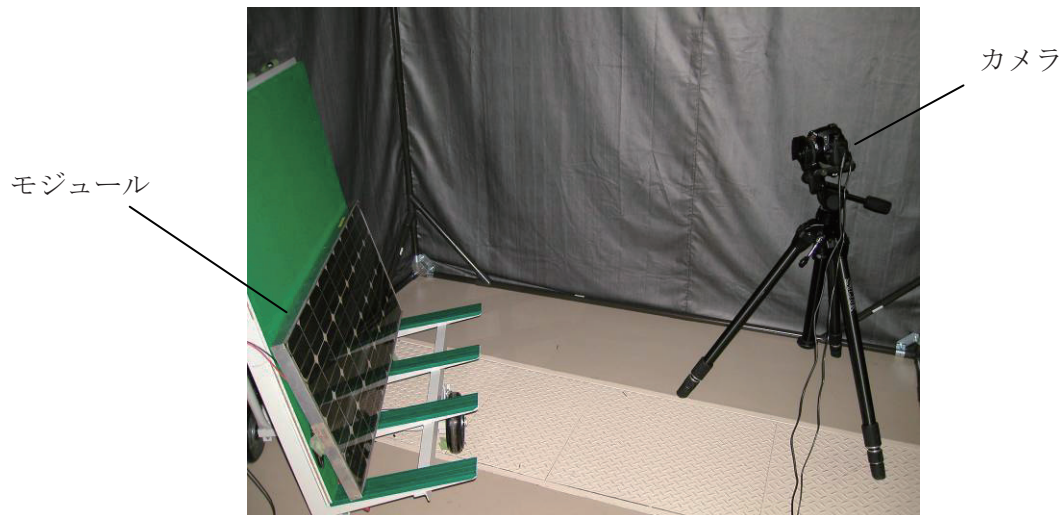


図 6.19 : EL 画像測定の様子

6. 2. 2. 3 順熱画像撮影方法 (Dark thermal image)

太陽電池モジュールに電力を印加すると不良箇所や劣化起点の抵抗が上昇し、ホットスポットとよばれる部分的発熱が生じることがある。特に、ストリングスのはんだ不良がホットスポットの原因として知られている。また、電流の不均衡がある場合同一セル内での温度むらやセル間に温度差が表れる。さらには、端子ボックスに不具合がある場合端子ボックス自体が発熱することがある。このようなことから、熱画像撮影は、モジュールの正極に+電位を印加（順方向電圧）しモジュールの発熱温度をマッピングすることで異常箇所と原因を推測することができる。

そこで、日本電気(株)製赤外線サーモカメラ (Thermoshot F30) を用いて調査対象モジュールの熱画像を撮影した。モジュールは、I-V 測定と同様に端子ボックス内のタブ線から電源に接続し、撮影者の写り込みを避けるためにサーモカメラに対して約 10 度傾けた状態にセットした。次に、各モジュールの定格値における Isc 相当の印加電流を約 10 分間維持した後、モジュールの受光面を撮影した。続いて、モジュールを裏返して裏面を撮影した。基本的な温度設定は 25℃～42℃としたが、温度差がでているもののその差が明確でないモジュールについては温度範囲を狭めて測定した。



図 6.20 : 順熱画像撮影

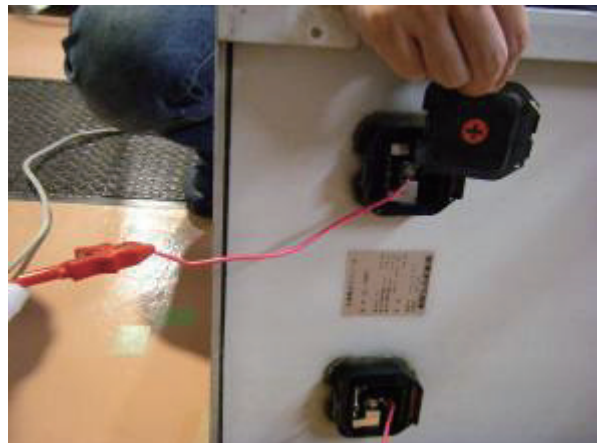


図 6.21 : 接続の様子



図 6.22 : 受光面撮影

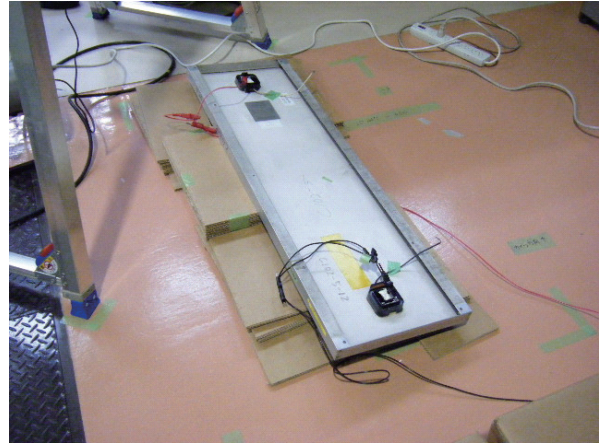


図 6.23 : 裏面撮影

6.2.2.4 Isc 熱画像撮影方法 (Illuminated thermal image)

前項の順方向に電圧をかけた状態との比較のため、Isc 熱画像は出力を短絡し光を照射してセルを発電させた状態でも撮影を試みた。しかしながら、Pmax 時の動作電圧とは異なる短絡状態のため、多少本来のモジュール使用状態とは異なる。

モジュールは端子ボックスの端子間を短絡し、良く晴れた日中にモジュールを水平にして、約 10 分間受光させた後、太陽に正対して日本アビオニクス(株)製赤外線サーモカメラ (Advanced Thermo TVS-500EX) を用いてサーモ画像を撮影した。

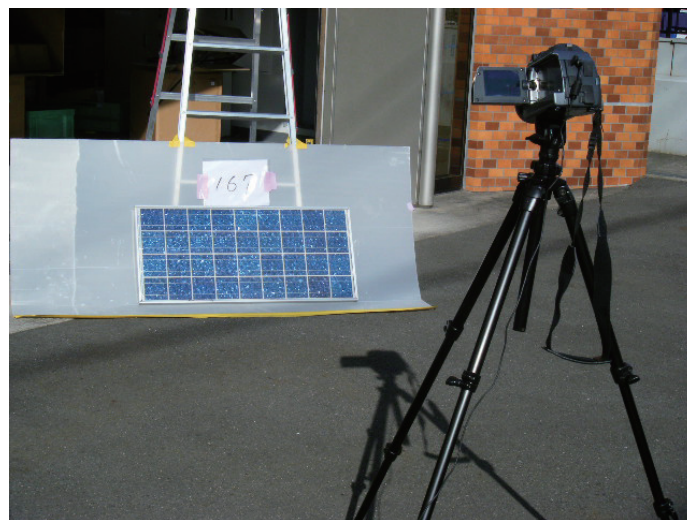


図 6.24 : Isc 熱画像撮影

6. 2. 2. 5 電流密度分布測定 (MAP 法)

レーザーテック(株)製変換効率分布測定機 (MP150) を用いて調査対象モジュールの電流密度分布を測定し、出力異常の検出と出力分布を調査した。変換効率分布測定機は、光学系を通過した白色ライン光がモジュール上を走査し、一方でモジュールを設置したステージは水平方向に回転して、発生する電流を測定する。得られた電流のスキャン分布はコンピュータドトモグラフィ (CT) 技術によって画像として再構築され、電流密度分布がマッピングされる¹⁾。

変換効率分布測定機はモジュールに直接光を当てて測定するため、実際のモジュール使用環境に近い状態、すなわちセル上の EVA やガラスの影響も併せた出力分布図となる。このため、電力を印加してセル自体の発光を検知している EL 画像と比較することで異常部分の切り分けも期待できる。

この白色光と CT 技術を応用した電流密度分布の測定は、新しい技術のため一般的な解析手法とはなっていない。今回の非破壊検査では、その他の解析手法と組み合わせ、その実用性を検証した。

なお測定時の接続は I-V 測定と同様に端子ボックス内のタブ線から接続した。光源はキセノンランプ及び AM1.5 フィルタを用い、1SUN として照射した。分解能は Scar1024、Theta256 とした。

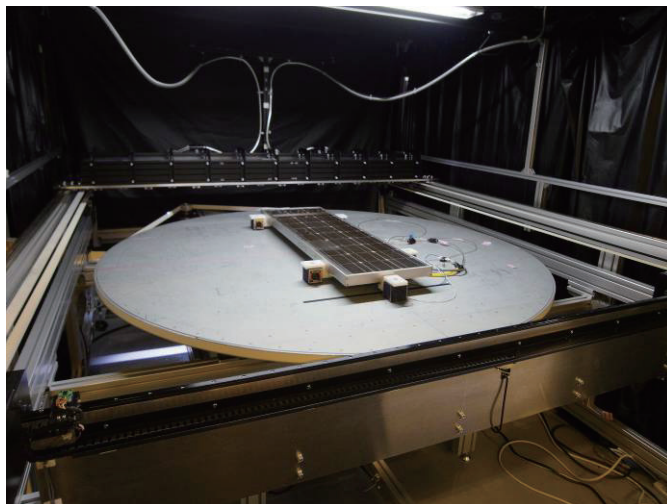


図 6.25 : 電流密度分布測定

<参考文献>

- 1) “電子材料”，工業調査会，Vol. 49，No3（2010）.

6. 2. 3 結果

6. 2. 3. 1 I-V測定結果

30枚の中古モジュールのI-V特性を測定し、「外観調査結果で明らかな外観不良の見られるもの：17枚」、「JQA資料に経時出力データのあるものから特徴的なもの：13枚」のI-V特性を、それぞれ表6. 10、表6. 11にまとめた。

紙面の都合上、全モジュールのI-Vデータを記載することは適切ではない。そのため、I-V特性劣化の全体像を把握することを目的とし、モジュールの初期特性として記載されていた定格値（ P_{max} ）を基に、 P_{max} 保持率（ $= P_{max}（2010年測定時） / P_{max}（定格値） \times 100$ ）を算出し、ヒストグラムとして示した（図6. 26）。FFについては初期値が不明なものが多かったため、2010年測定時の値のみヒストグラムとして示した（図6. 27）。今回測定した30枚の選定基準が「外観調査結果で明らかな外観不良の見られるもの：17枚」「JQA資料に経時出力データのあるものから特徴的なもの：13枚」であるため、ヒストグラムがそのまま「実曝されている全ての」太陽電池の劣化度合いを示している訳ではないことに留意する必要がある。

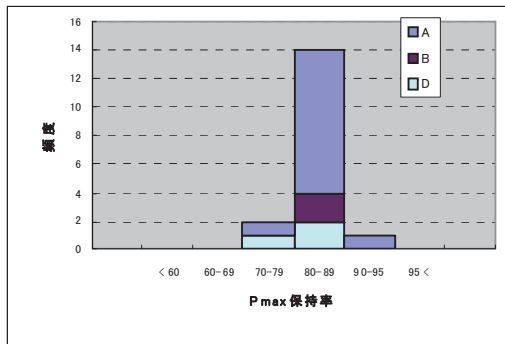
外観抽出品のI-Vカーブの形状については一般的な劣化（直列抵抗の上昇や並列抵抗の低下など）が示唆されるものの他に、5 V付近で急激な電流値の低下がみられるもの（ステップ状I-Vカーブ）が複数確認された（図6. 28）。

表6.10 外観抽出品のI-V特性まとめ

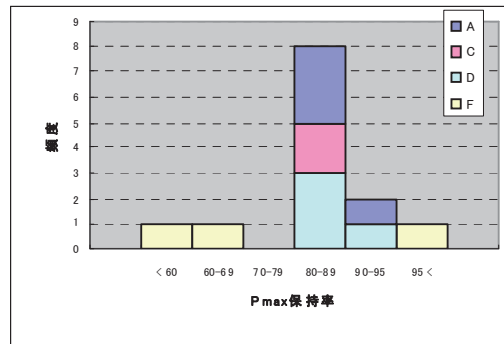
コンソ#	メーカー	型式	タイプ	I-V 特性 (2010年測定)				定格値 (W)
				Isc (A)	Voc (V)	FF (%)	Pmax (W)	
CNS-227	A	a1	単結晶	3.1	19.6	70.6	42.2	48.5
CNS-216		a2	単結晶	3.1	19.6	68.0	41.3	47.2
CNS-239				3.1	19.5	67.4	40.7	47.2
CNS-241				3.1	19.5	67.9	40.9	47.2
CNS-257				3.1	19.6	66.6	40.2	47.2
CNS-264				3.1	19.6	69.0	41.2	47.2
CNS-144	B	b1	単結晶	3.0	17.8	67.2	36.3	42.0
CNS-145				3.0	17.7	66.2	34.8	42.0
CNS-242				3.0	17.8	60.8	32.5	42.0
CNS-243				2.9	17.8	66.7	34.9	42.0
CNS-244				3.0	17.8	70.2	37.7	42.0
CNS-245				3.0	17.7	65.8	34.4	42.0
CNS-246				3.0	17.7	72.1	37.5	42.0
CNS-253				2.8	17.8	70.6	35.6	42.0
CNS-141	C	c2	単結晶	2.4	27.5	69.2	45.7	59.2
CNS-146	D	d1	多結晶	3.0	21.2	65.7	41.9	51.0
CNS-151				3.0	21.2	67.2	42.4	51.0

表6.11 経時データ抽出品のI-V特性のまとめ

コンソ#	メーカー	型式	タイプ	I-V 特性 (2010年測定)				定格値 (W)
				Isc (A)	Voc (V)	FF (%)	Pmax (W)	
CNS-488	A	a3	単結晶	3.1	21.6	73.7	49.0	54.0
CNS-485				3.1	21.5	67.9	45.0	54.0
CNS-451				3.1	21.6	72.5	48.2	54.0
CNS-450				3.1	21.6	72.3	47.9	54.0
CNS-483	C	c1	単結晶	2.5	21.7	71.0	38.9	45.0
CNS-482				2.6	21.8	70.3	39.5	45.0
CNS-480	D	d1	多結晶	3.1	21.2	72.4	47.9	51.0
CNS-167				3.0	21.2	72.1	45.5	51.0
CNS-162				3.1	21.2	66.9	43.2	51.0
CNS-163				3.1	21.2	65.2	42.9	51.0
CNS-476	F	f1	アモルファス	1.6	22.0	60.3	21.4	21.2
CNS-475				1.3	20.8	40.1	10.6	21.2
CNS-449				1.2	20.9	52.1	12.9	21.2

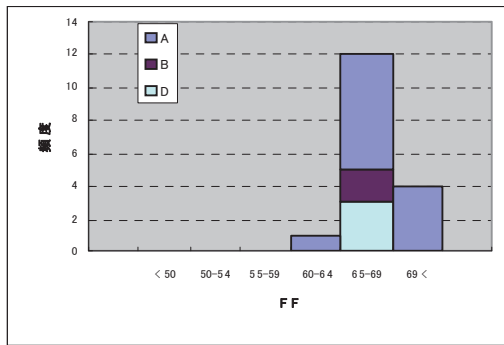


(外観抽出品)

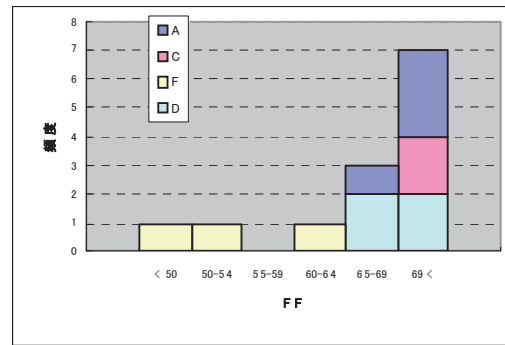


(経時データ抽出品)

図6.26 Pmax保持率のヒストグラム

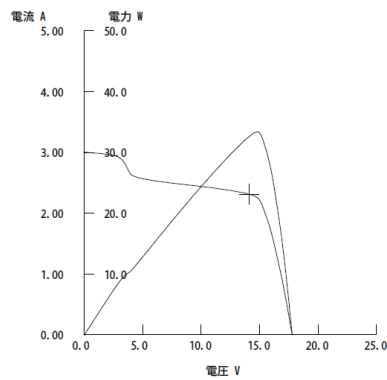


(外観抽出品)



(経時データ抽出品)

図6.27 FFのヒストグラム



CNS2010-242

図6.28 ステップ状I-Vカーブ

6. 2. 3. 2 EL 測定結果

30枚の中古モジュールのEL測定を行い、Matrix (表6.12) を用いてモジュールをそれぞれの特徴ごとに分類した。

表6.12 外観抽出品のELまとめ

コンソ#	セルの種類	外観・EL 画像の特徴					
		同位置・形状	不定形の	セル左右	セルごと消	クラック	バックシート
		の暗部	暗部	明暗	失	フィンガー切断	剥離・コゲ等
CNS2010-141	単結晶	0	0	0	0	2	2
CNS2010-144	単結晶	0	2	0	0	0	0
CNS2010-145	単結晶	0	2	0	0	0	0
CNS2010-146	多結晶	0	0	2	0	0	0
CNS2010-151	多結晶	0	0	2	0	0	0
CNS2010-162	多結晶	0	0	2	0	0	0
CNS2010-163	多結晶	0	0	2	0	0	0
CNS2010-167	多結晶	0	0	0	0	2	0
CNS2010-216	単結晶	0	2	0	0	0	0
CNS2010-227	単結晶	2	0	0	0	0	0
CNS2010-239	単結晶	0	2	0	0	0	0
CNS2010-241	単結晶	0	2	0	0	1	0
CNS2010-242	単結晶	2	0	0	0	0	0
CNS2010-243	単結晶	2	0	0	0	0	0
CNS2010-244	単結晶	0	2	0	0	0	2
CNS2010-245	単結晶	2	0	0	0	1	0
CNS2010-246	単結晶	2	0	0	0	0	0
CNS2010-253	単結晶	0	1	0	0	0	0
CNS2010-257	単結晶	0	2	0	0	0	0
CNS2010-264	単結晶	0	1	0	0	0	0
CNS2010-449	a-Si 薄膜	0	0	0	2	0	0
CNS2010-450	単結晶	0	1	0	0	0	2
CNS2010-451	単結晶	1	0	0	0	0	0
CNS2010-475	a-Si 薄膜	0	0	0	2	0	0
CNS2010-476	a-Si 薄膜	0	0	0	0	0	0
CNS2010-480	多結晶	0	0	0	0	2	0
CNS2010-482	単結晶(丸)	2	0	0	0	0	0
CNS2010-483	単結晶(丸)	2	0	0	0	0	0
CNS2010-485	単結晶	1	2	0	0	0	0
CNS2010-488	単結晶	1	0	0	0	0	0

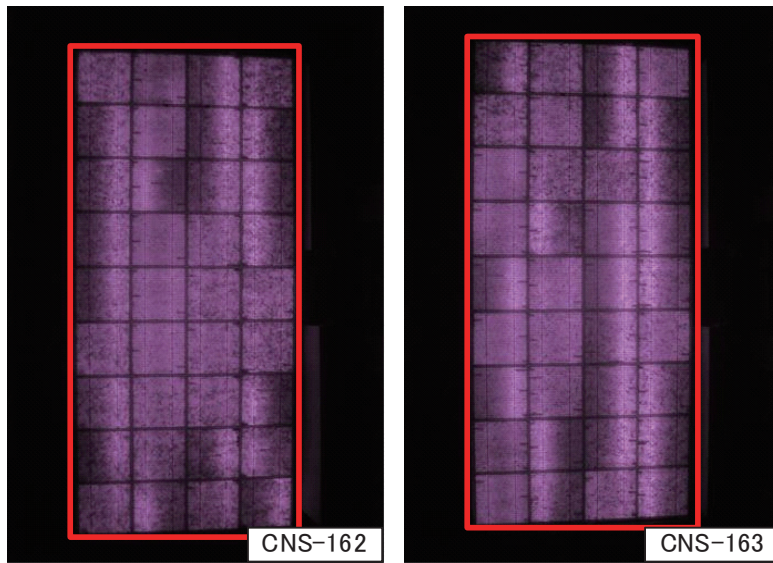


図6.29 D-d1モジュールのEL画像
*赤枠はモジュールの範囲を示す。以下同様。

図6.29にD-d1モジュールのEL画像を示す。全体的に明暗がストリングスの左右で分かれている傾向がみられた。CNS-2010-162,163以外では146、151でも確認された。特にCNS-2010-163ではストリングス2列間に渡って明部・暗部同士が隣り合っているように見えた。

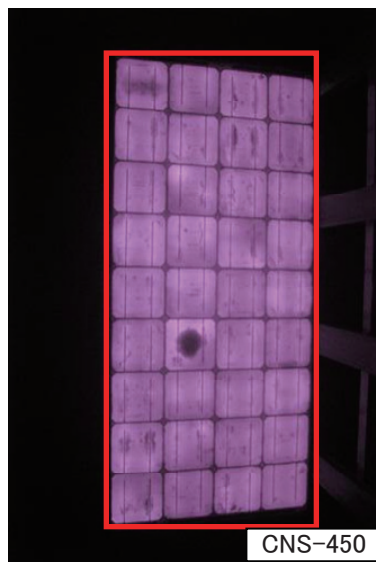


図6.30 B-b1モジュールのEL画像

図6.30にCNS-2010-145（B-b1モジュール）のEL画像を示す。熱電対の位置ではっきりとした暗部が確認された。

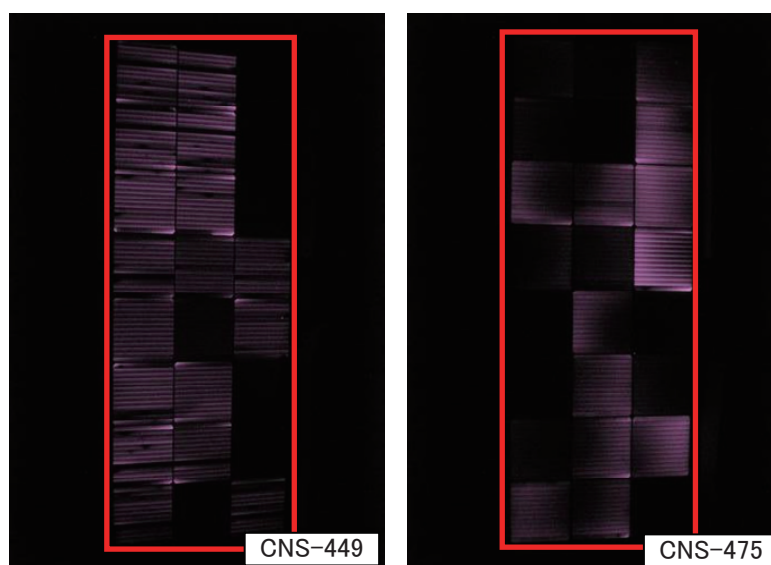


図6.31 F-f1モジュールのEL画像

図6.31にF-f1モジュールのEL画像を示す。CNS-2010-449、475にて一部のセルがすべて暗部となっていた。

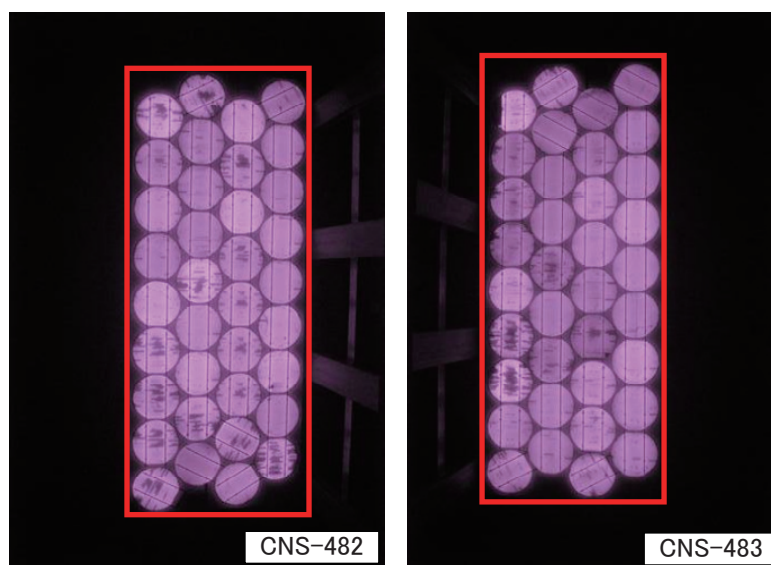


図6.32 C-c1モジュールのEL画像

図6.32にC-c1モジュールのEL画像を示す。複数枚セルの同一箇所同一形状の暗部を確認、特に同ストリングス内の隣同士でよく確認された。

6. 2. 3. 3 Thermo 測定結果

30枚の中古モジュールの順熱画像撮影 (Dark thermal image) を行い、Matrix (表6.13) を用いてモジュールをそれぞれの特徴毎に分類した。

表6.13 外観抽出品の順熱画像まとめ

コンソ#	セルの種類	外観・順熱画像の特徴						
		画像でない	EL 暗部	EL 暗部	デラミ部	膨れ部	集中発熱	EL・MPと相
		ストリング有	低温	発熱	低温	低温		
CNS2010-141	多結晶	0	2	0	0	0	0	0
CNS2010-144	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-145	単結晶	0	0	0	2	0	0	0
CNS2010-146	多結晶	0	2	0	0	0	0	0
CNS2010-151	多結晶	0	2	0	0	0	0	0
CNS2010-162	多結晶	0	2	0	0	0	0	0
CNS2010-163	多結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-167	多結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-216	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-227	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-239	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-241	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-242	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-243	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-244	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-245	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-246	単結晶	0	0	0	0	2	0	0
CNS2010-253	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-257	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-264	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-449	a-Si 薄膜	0	2	0	0	0	0	2
CNS2010-450	単結晶	2	0	0	0	0	0	2
CNS2010-451	単結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-475	a-Si 薄膜	0	2	0	0	0	0	2
CNS2010-476	a-Si 薄膜	0	0	0	0	0	0	2
CNS2010-480	多結晶	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-482	単結晶(丸)	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-483	単結晶(丸)	0	0	0	0	0	0	0
CNS2010-485	単結晶	0	0	2	0	0	2	0
CNS2010-488	単結晶	0	0	0	0	0	0	0

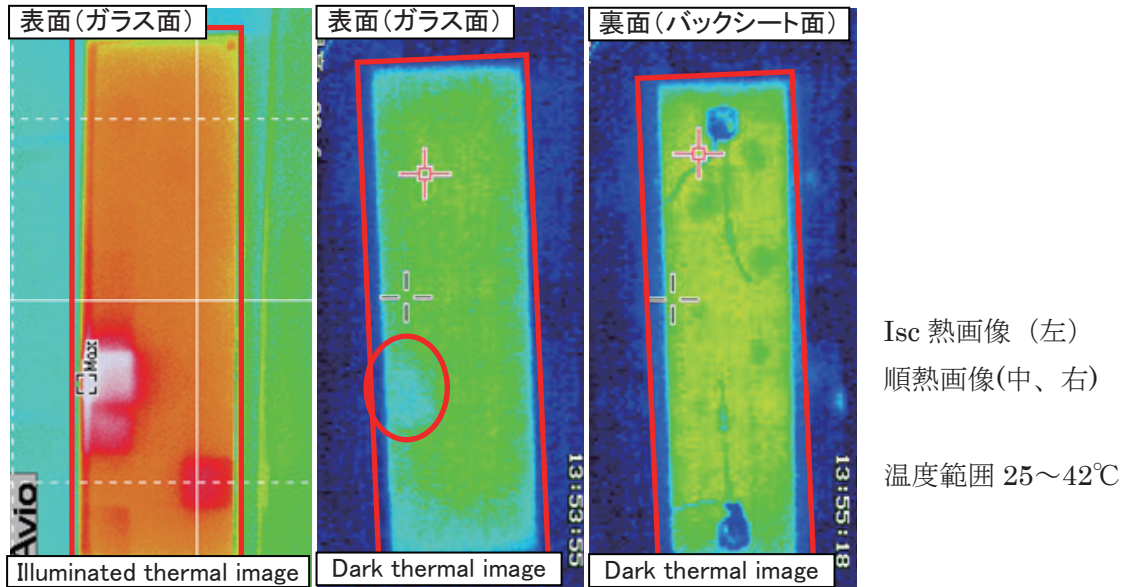


図6.33 B-b1モジュールのThermo画像
* 表面と裏面は左右対称。以下同様。

図6.33にCNS-145 (B-b1モジュール) のThermo画像を示す。ガラス・封止材間で発生した
デラミ部 (○印) の温度が順熱画像では低く、Isc熱画像では高くなっていることを確認
した。

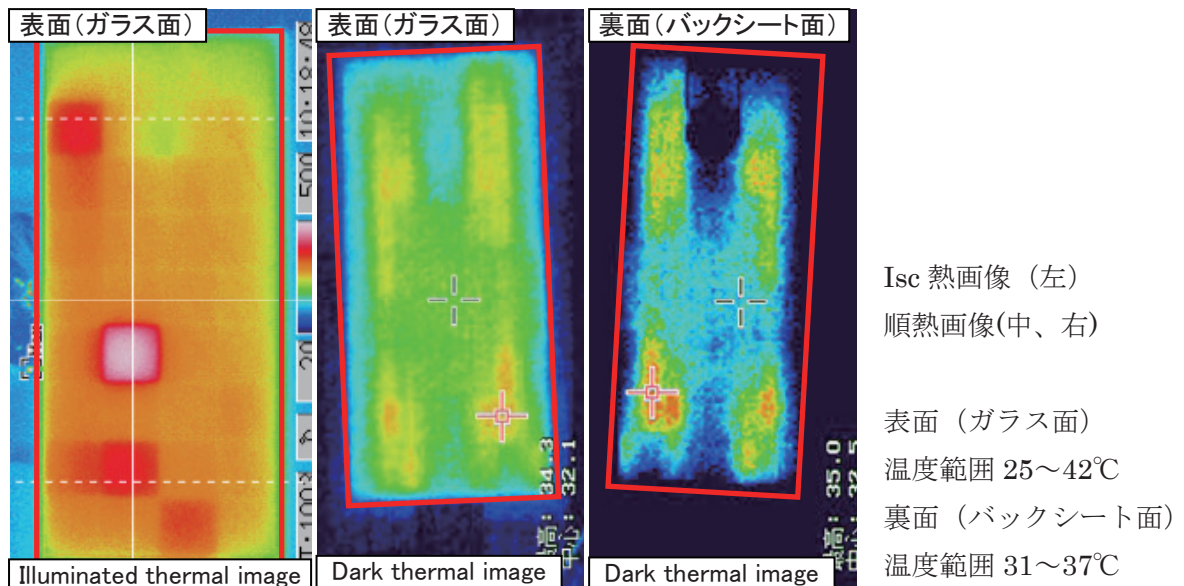


図6.34 D-d1モジュールのThermo画像

図6.34にCNS-2010-162 (D-d1モジュール) のThermo画像を示す。順熱画像では温度の高
低が列で分かれており、CNS-162以外にCNS-146、151で確認された。

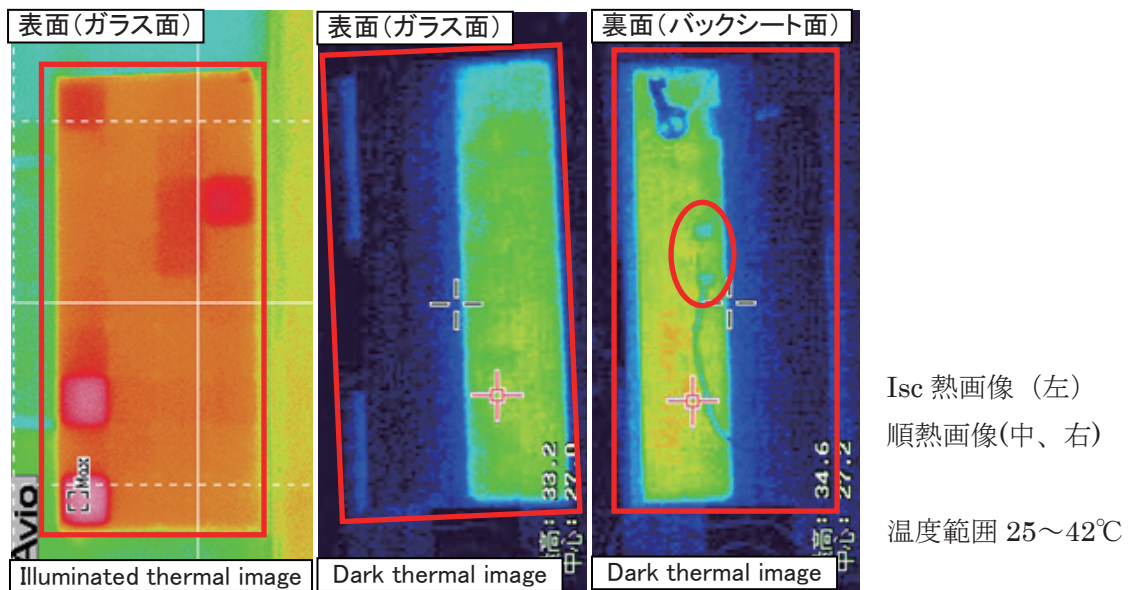


図6.35 A-a3モジュールのThermo画像

図6.35にCNS-2010-450 (A-a3モジュール) のThermo画像を示す。裏面に熱電対が付いている (○ 印) モジュールであり、順熱画像から熱電対が付いていない側のストリングス2列がすべて発熱していないことを確認した。

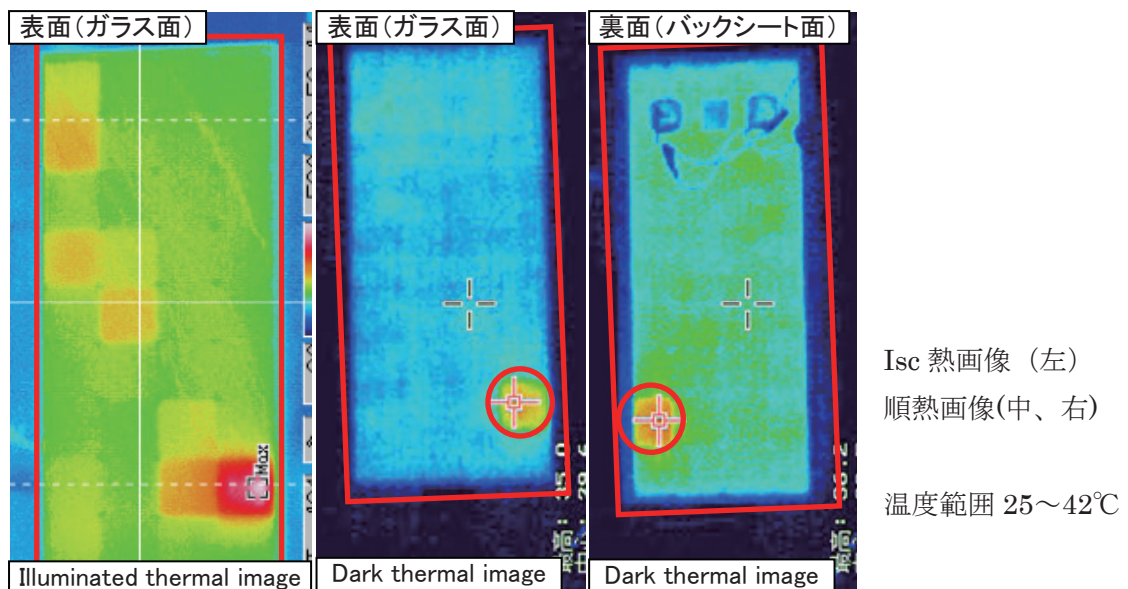


図6.36 A-a3モジュールのThermo画像

図6.36にA-a3モジュールのThermo画像を示す。セル1枚が集中的に発熱していることを確認した。

6. 2. 3. 4 電流密度分布測定結果

30枚の中古モジュールの電流密度分布測定をMAP法で行い、Matrix(表6.14)を用いてモジュールをそれぞれの特徴ごとに分類した。

なおMAP法は、今回新たに取り入れたマッピング技術のため、その原理及び、測定事例は別添資料(太陽電池変換効率測定(MAPシリーズでのモジュール測定))を参考にされた。

表6.14 対象モジュールと測定結果

コンソ#	セルの種類	その他	電流密度分布測定						
			白濁 (セル充填剤) による効率低下	白濁 (ガラス充填剤) による効率低下	Rshの ばらつき	特異な 影がある	セルの左右で 効率が 異なる	クラック フィンガー 切断	ELとMPで 像が異なる 部分がある
CNS2010-141	単結晶		0	0	3	0	0	2	0
CNS2010-144	単結晶		0	0	1	1	0	0	0
CNS2010-145	単結晶		0	3	0	2	0	0	0
CNS2010-146	多結晶		0	0	2	0	2	0	2
CNS2010-151	多結晶		0	0	1	0	2	0	2
CNS2010-162	多結晶		0	0	1	1	2	0	0
CNS2010-163	多結晶		0	0	2	2	2	0	0
CNS2010-167	多結晶	未曝露	0	0	2	1	0	2	0
CNS2010-216	単結晶		0	0	2	2	0	0	0
CNS2010-227	単結晶		0	0	3	2	0	0	0
CNS2010-239	単結晶		0	0	3	2	0	0	0
CNS2010-241	単結晶		0	0	3	2	0	0	2
CNS2010-242	単結晶		3	0	0	2	0	0	0
CNS2010-243	単結晶		3	0	0	2	0	0	0
CNS2010-244	単結晶		0	0	0	2	0	0	0
CNS2010-245	単結晶		3	0	0	2	0	0	0
CNS2010-246	単結晶		0	0	1	2	0	0	0
CNS2010-253	単結晶		3	0	1	1	0	0	0
CNS2010-257	単結晶		0	0	2	2	0	0	2
CNS2010-264	単結晶		0	0	3	1	0	0	0
CNS2010-449	a-Si薄膜		0	0	3	0	0	0	0
CNS2010-450	単結晶		0	0	2	2	0	0	0
CNS2010-451	単結晶		0	0	1	2	0	0	0
CNS2010-475	a-Si薄膜		0	0	2	0	0	0	0
CNS2010-476	a-Si薄膜	未曝露	0	0	2	0	0	0	0
CNS2010-480	多結晶	未曝露	0	0	2	0	0	0	0
CNS2010-482	単結晶(丸)		0	0	2	2	0	0	0
CNS2010-483	単結晶(丸)		0	0	2	2	0	2	0
CNS2010-485	単結晶		0	0	1	2	0	0	0
CNS2010-488	単結晶		0	0	2	2	0	0	0

3 ◎: 顕著
 2 ○: はっきり、またはたくさん見られる。
 1 △: うっすら、または少ない。
 0 確認できない

6. 2. 3. 5 B-b1 モジュールの白濁の解析

外観劣化でセルサイズにおよぶ白濁のある B-b1 モジュールの Mapping 画像を示す。MAP 法で白濁による電流密度の低下が観測できた。

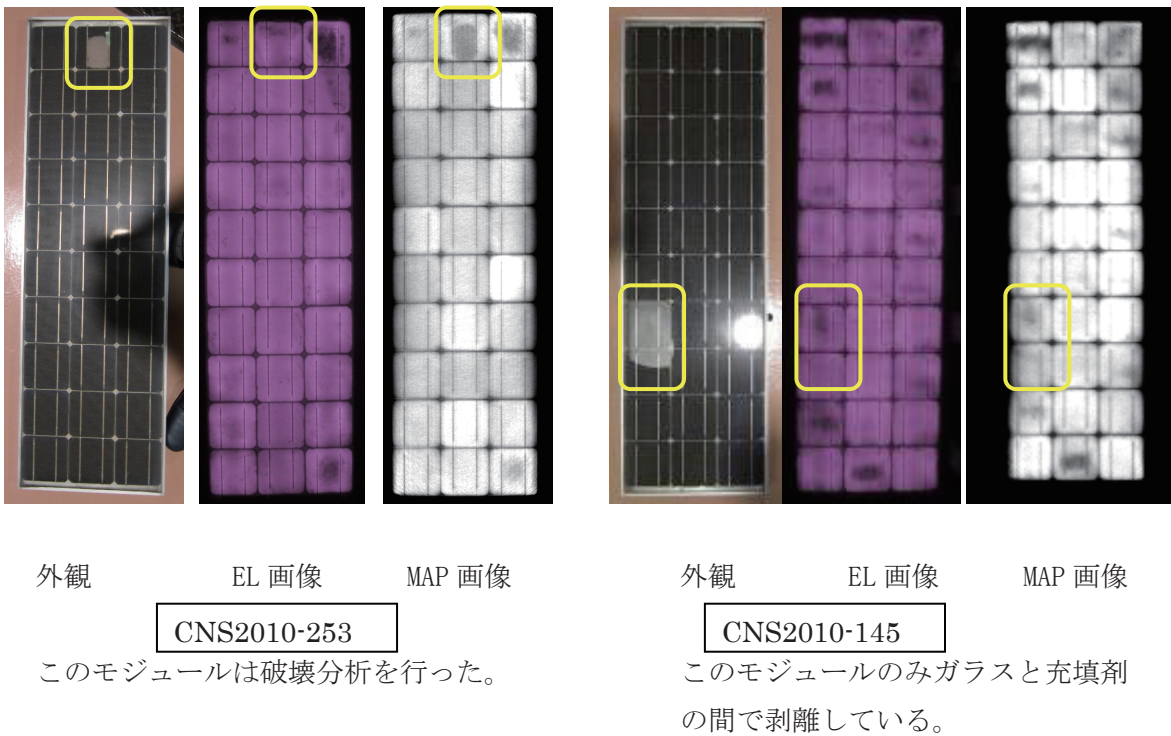
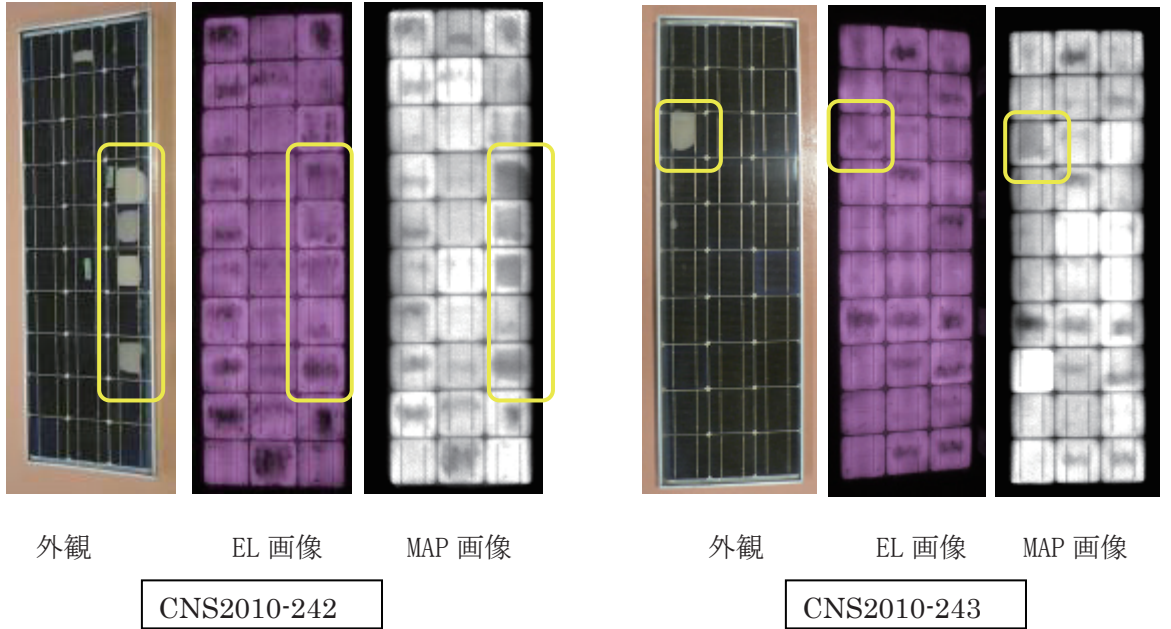
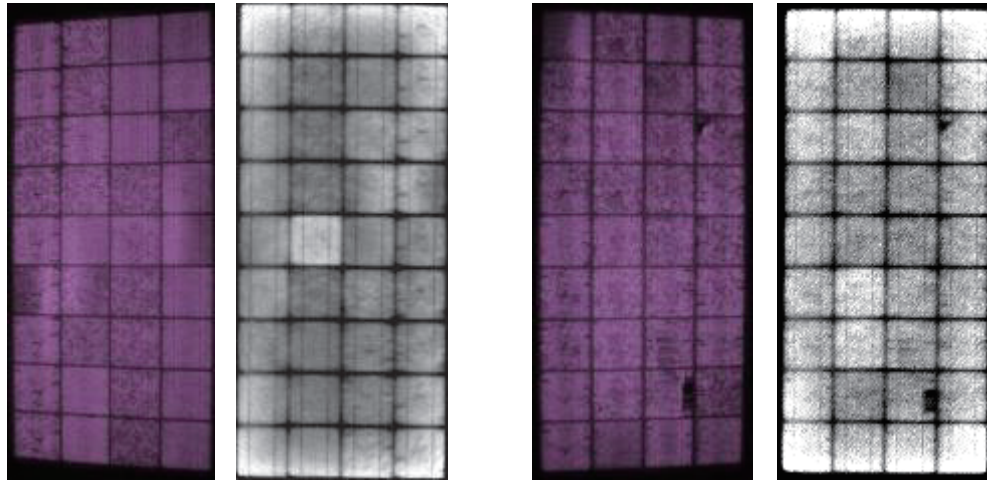


図 6.37 白濁のあるモジュール

6. 2. 3. 6 D-d1 モジュールの未曝露と曝露の Mapping 画像

出力の劣化で注目したモジュールで、未曝露と曝露でモジュールの mapping 像が、明らかに異なっている。



EL 画像

MAP 画像

CNS2010-480

未曝露品 (Pmax の低下が最も少ない)

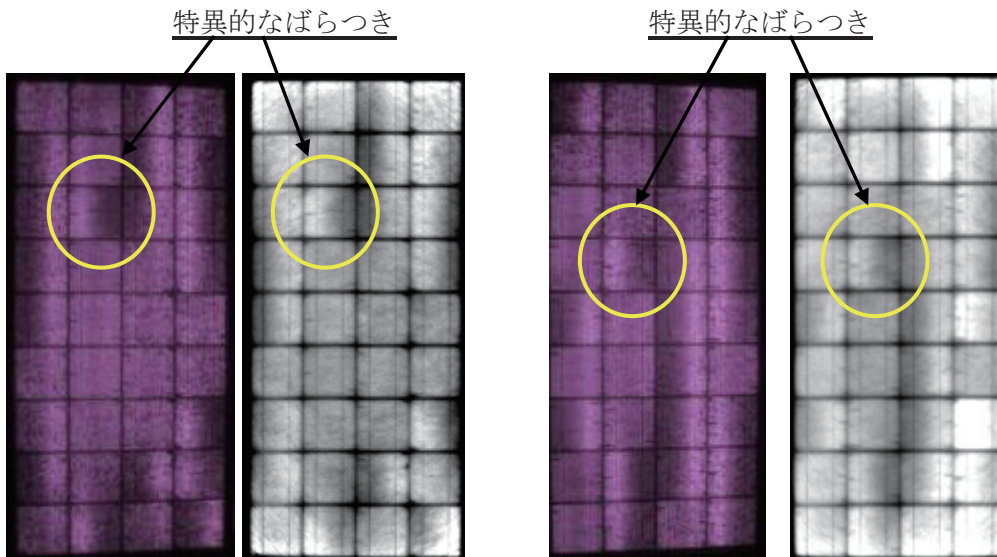
セル内のばらつきが少ない

EL 画像

MAP 画像

CNS2010-167

未曝露品



特異的なばらつき

特異的なばらつき

EL 画像

MAP 画像

CNS2010-162

曝露品

セル内に特異的なばらつきがある

EL 画像

MAP 画像

CNS2010-163

曝露品 (Pmax の低下が最も大きい)

このモジュールの破壊分析を行った

図 6.38 D-d1 モジュールの曝露品と未曝露品

6. 2. 3. 7 A-a3 モジュールの Mapping 結果と Pmax の変化

CNS2010-485 の D 部は EL、MAP 法で暗くなっていたセルが、順熱画像、Isc 熱画像ともに、発熱を認めている。詳細は図 6.36 参照。この現象が、Pmax の変化を招いたと考えられる。

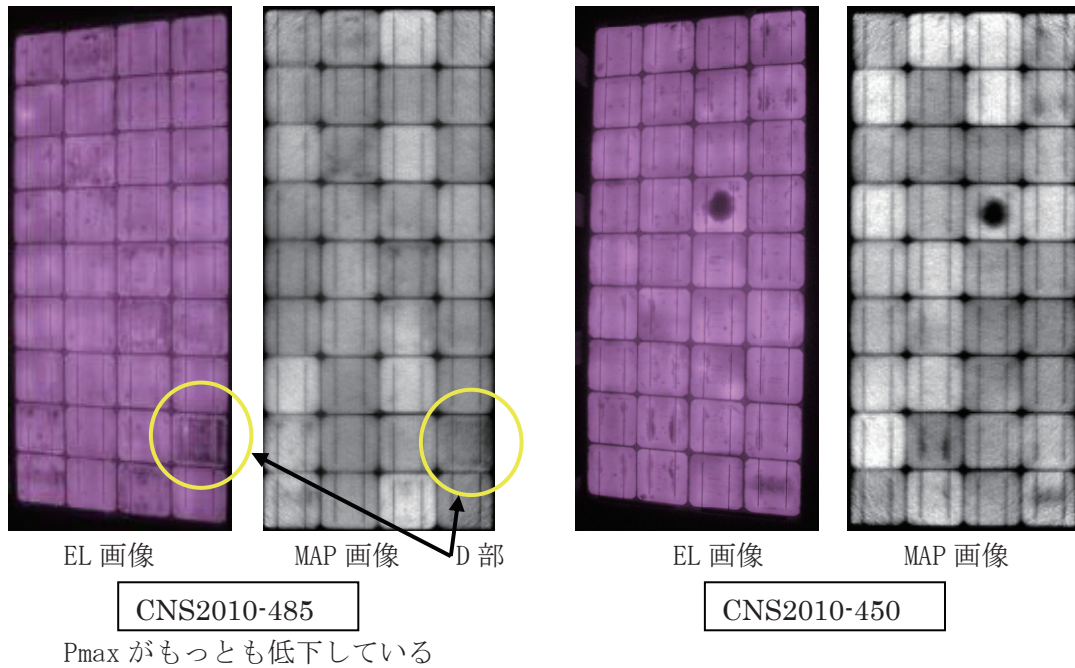
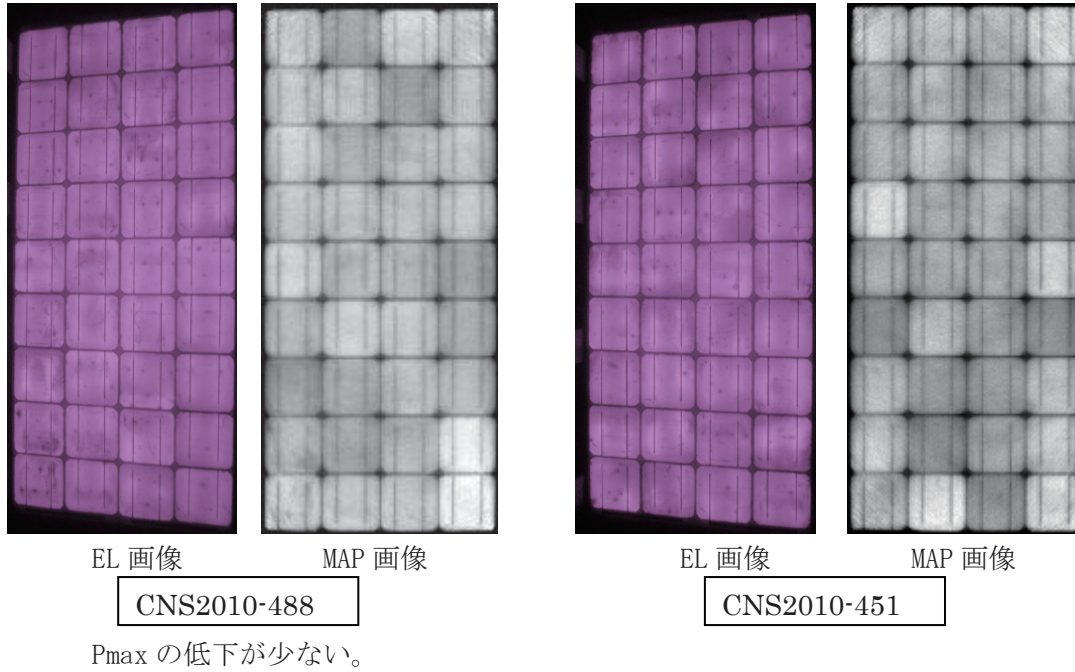


図 6.39 A-a3 モジュールの Mapping 結果と Pmax

6. 2. 3. 8 C-c1 モジュールの Mapping 画像と Pmax の変化

出力の劣化で注目したモジュールで、黒い影と Pmax の関係は多少うかがえるが、Rsh のばらつきと Pmax との相関は見られない

(注記)

MAP 法ではモジュール状態でのセルの Rsh の低下を Mapping 画像のセルの明るさの増加として表示することが特徴であるが、新しい技術のため一般的な解析手法とはなっていない。そのため Rsh 測定の確認も含め、今回の非破壊検査では、その他の解析手法と組み合わせ、その実用性を検証した。

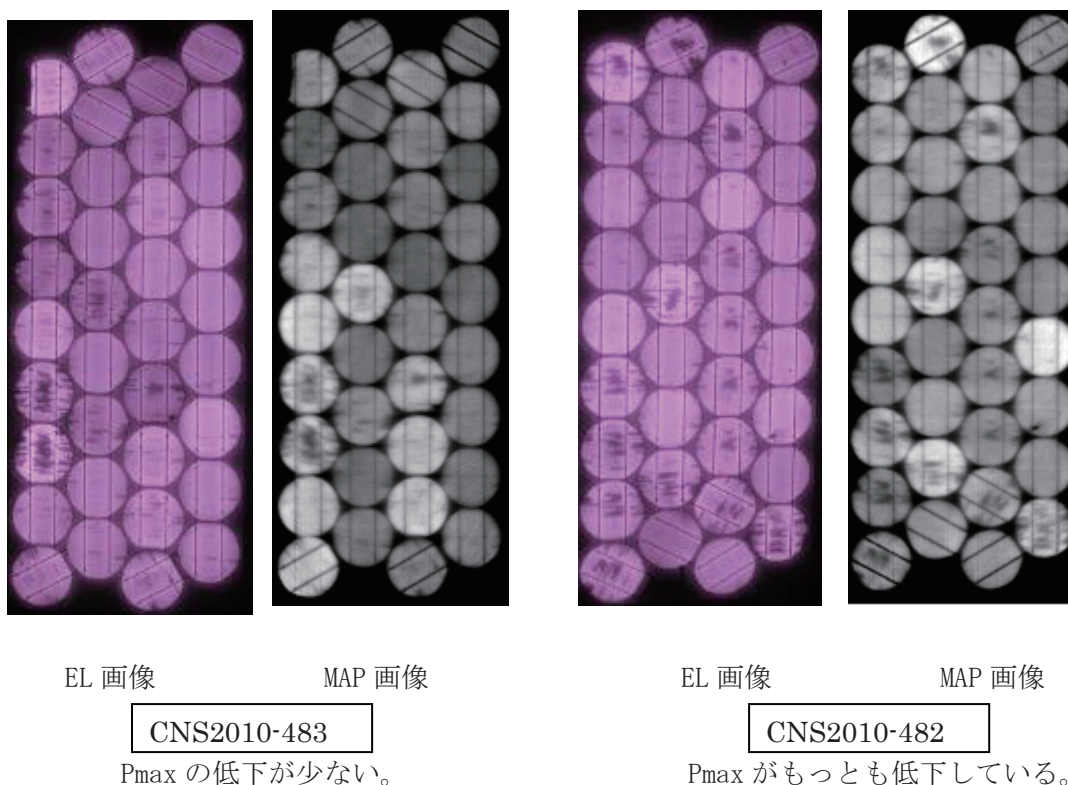


図 6.40 C-c1 モジュールの Mapping 画像と Pmax の変化

6. 2. 4. 考察

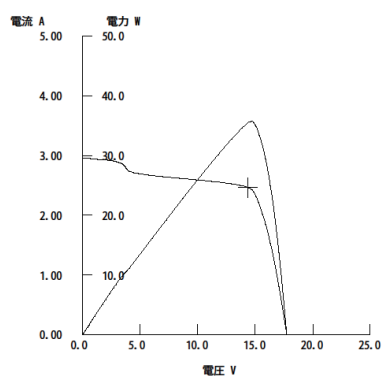
6. 2. 4. 1 Pmax 及び FF のヒストグラムについて

図 6.36、図 6.27 に記載したヒストグラムは、あくまでも I-V 特性劣化の全体像を把握することを目的としたものであり、ヒストグラムがそのまま「実曝されている全ての」太陽電池の劣化度合いを示している訳ではないことに留意する必要がある。

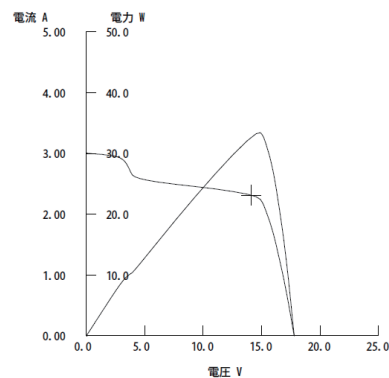
6. 2. 4. 2 I-V 特性のステップとセルの白濁について (外観変化を伴う劣化)

B-b1 モジュールの CNS2010-145、CNS2010-242、CNS2010-243、CNS2010-245、CNS2010-253 については 5 V 付近で急激な電流値の低下 (ステップ状 I-V カーブ) がみられた。これらは全て外観異常としてセル全体におよぶ白濁が観察されたモジュールと対応している。(外観は図 6.37 参照)

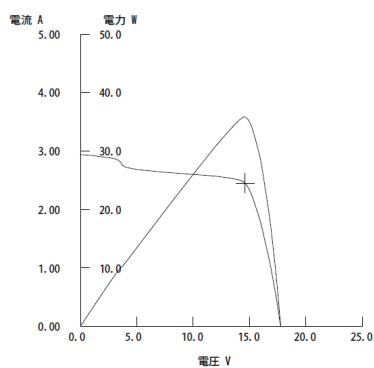
白濁の面積が大きいほど電流値の低下も大きい傾向がみられた。どのモジュールも 5 V 付近で急激な電流値の低下がみられているが、これはこの電圧でバイパスダイオードが動作し始めるためであると考えられる。



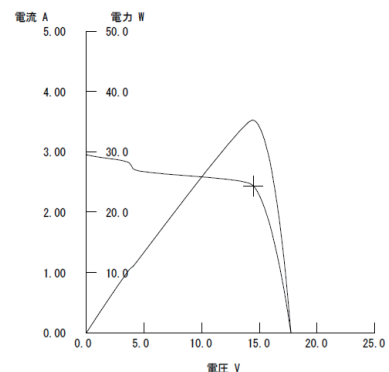
CNS2010-145



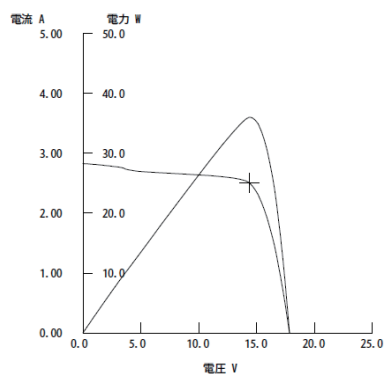
CNS2010-242



CNS2010-243



CNS2010-245



CNS2010-253

図6.41 ステップ状I-Vカーブ

この白濁の部分のセルの電流密度を測定した。MAP法で、モジュール全体を測定し、セル内の白濁のある部分と無い部分の電流密度の差を測定すると、白濁による効率の低下が計測できた。

またELと組み合わせると、PN接合部の劣化と、白濁を区別して測定可能である。

一例として、CNS2010-245では、ELで確認できるpn接合部の劣化の偏在があるため、PN接合部の劣化と、白濁による劣化を切り分けることができた。(図6.43)

測定の結果、白濁により変換効率は30%程度低下している。

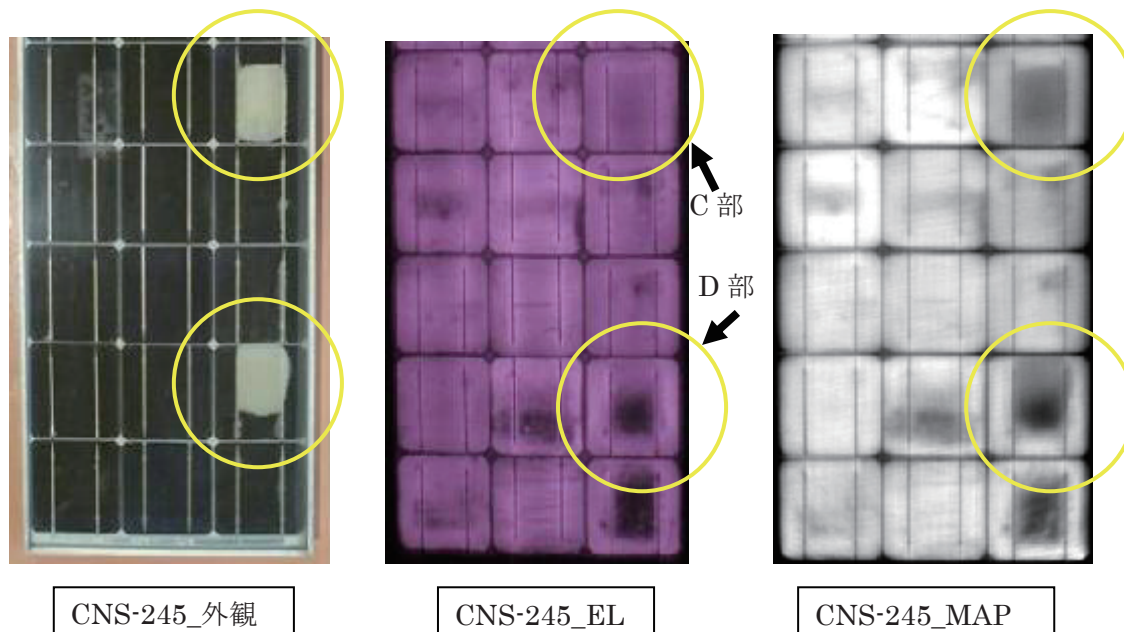


図6.42 白濁による Mapping 画像

CNS2010-245の右上の白濁(C部)は、ELより判明するpn接合部の劣化が下側のセル(D部)に比べて少ないため、MAP画像の電流密度の低下はほとんど白濁に依存している。EL画像では、接合部からの発光が白濁部を透過してしまうが、MAP法では入射光が白濁により減衰して、動作状態での電流密度を測定すること

が出来る。

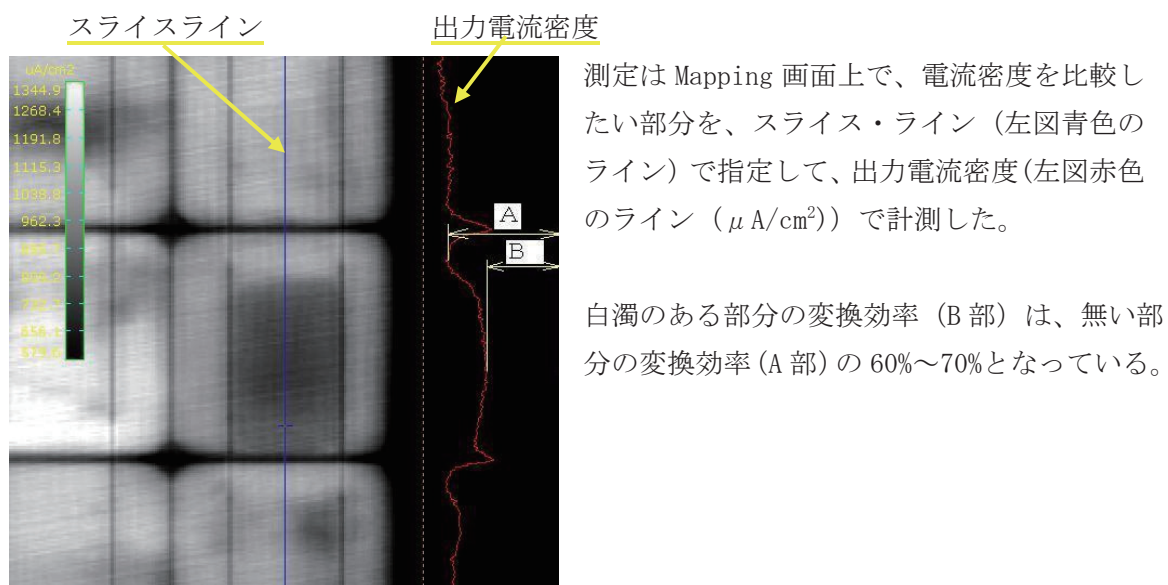


図 6.43 白濁による変換効率の低下 (C 部)

- ・上記の様な白濁は、すべて同一型式のモジュールのみで発生しており、他社製及び、同社製の他の型式のモジュールでは発生していない。
- ・次工程の破壊試験で同じモードの白濁のある (CNS2010-253) を破壊分析しており、白濁部の詳細はそちらも参考にされたい。

・I-V 特性にステップがあり、大きな白濁のあるモジュール 5 枚 (同一メーカーの同一型式) を短絡して熱画像を測定すると白濁部で発熱を認められた。(白濁位置を下図□で示す。)

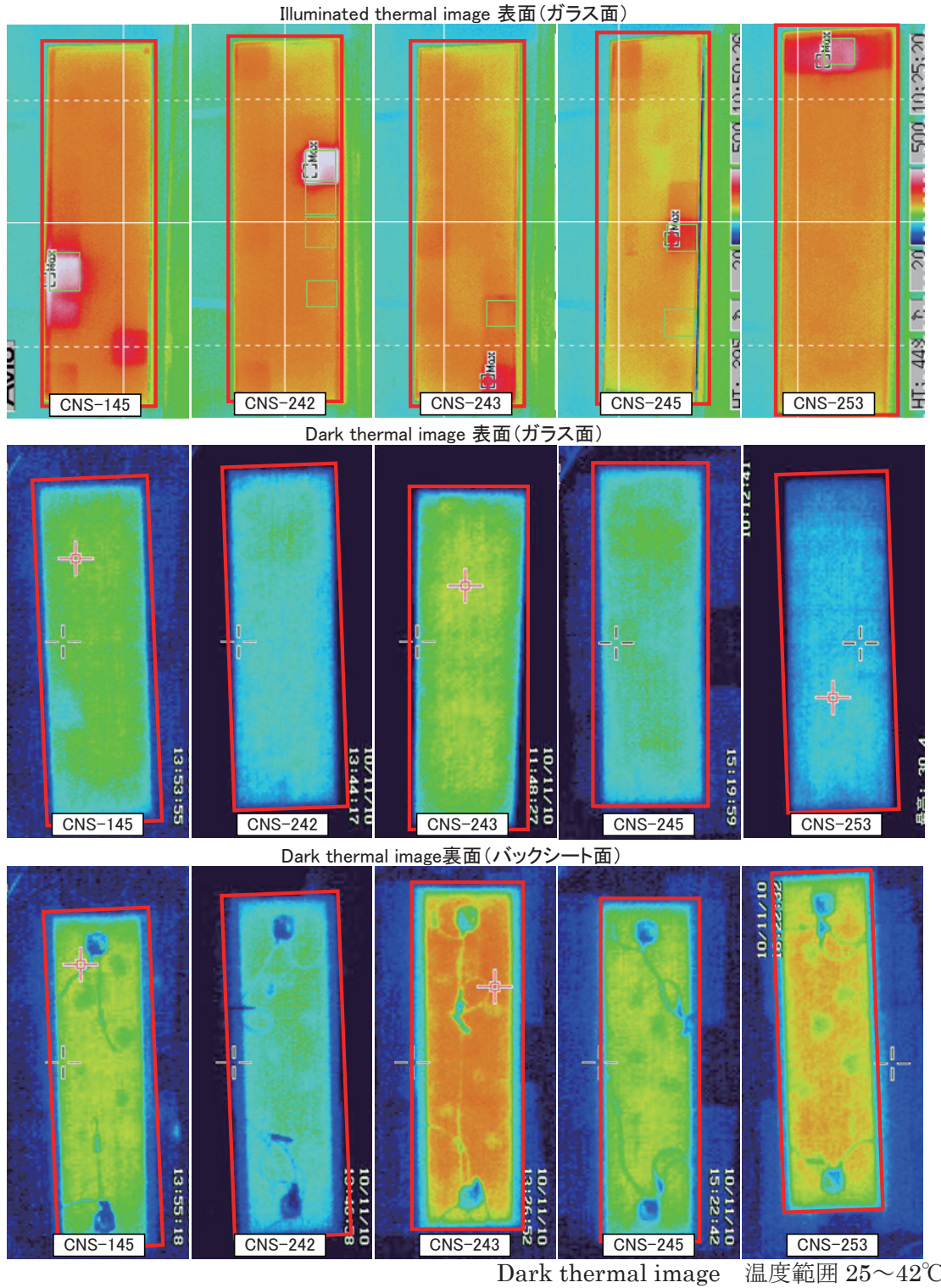


図 6.44 ステップ・白濁が確認されたモジュールの Thermo 画像

同様な白濁でも、(CNS2010-145) のようにガラスと充填剤の間での剥離による白濁では、効率の低下は少なく、変換効率は 90%程度を維持している。

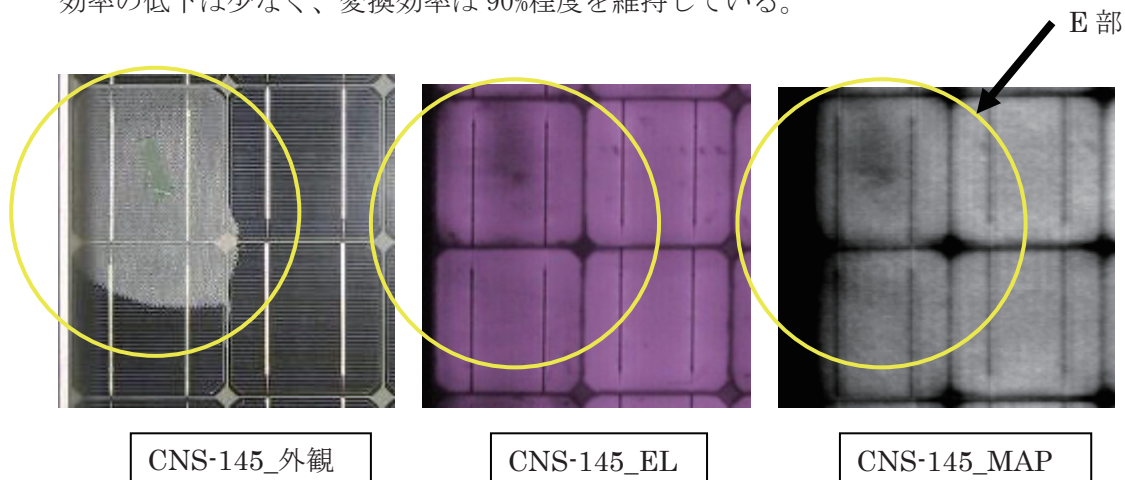


図 6.45 白濁による Mapping 画像

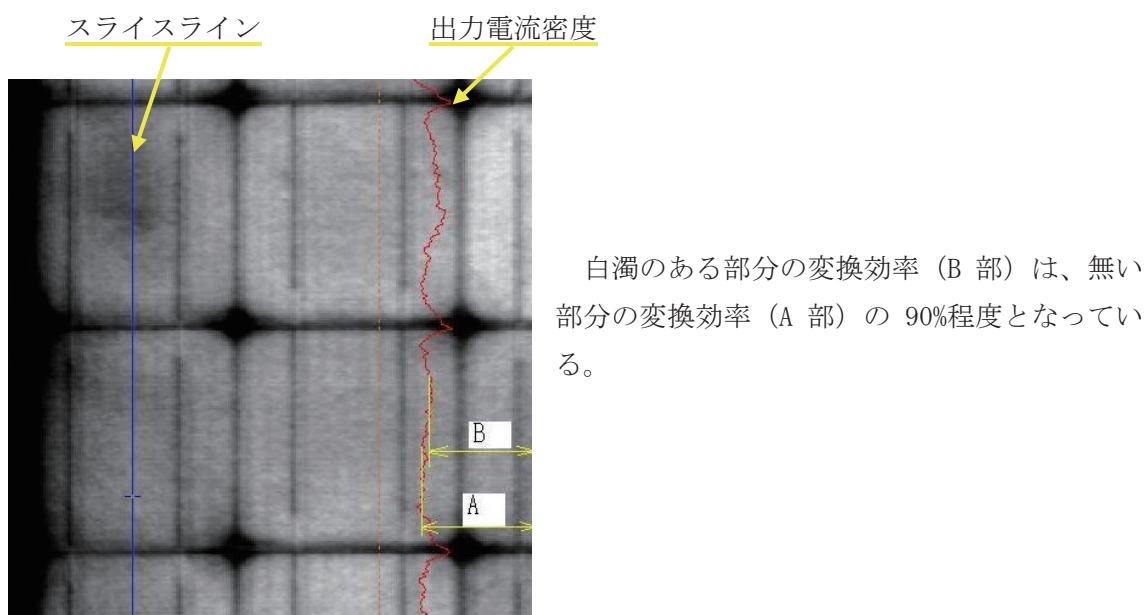


図 6.46 白濁による変換効率低下(E 部)

Isc 熱画像では、発熱を確認出来たが、図 6.47 に示す様に順熱画像では白濁部は、温度が低くなっていた。

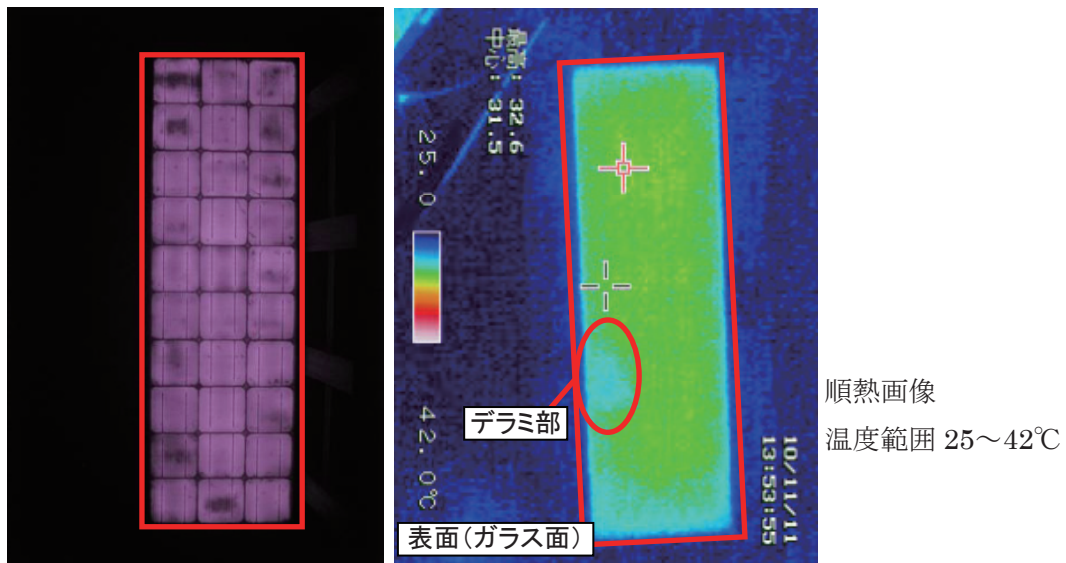


図6.47 CNS2010-145のEL・順熱画像

*左EL、右順熱画像、赤枠はモジュールの範囲を示す。以下同様。

図6.47はCNS2010-145のEL・順熱画像であり、ガラス・封止材間で発生したデラミ部の温度が低いことを確認したが、EL画像との関係はあまりないように思われた。

封止材・セル間の剥離とは異なり、入射光がガラスを通過してすぐに屈折し、セルに到達する光が減衰、電流量が減って温度が低くなったものと思われる。

6. 2. 4. 3 水垢による電流密度の低下（外観変化を伴う劣化）の確認

モジュールの端部には水が溜まっていたために、水垢がこびりついている部分が有るが、その部分の電流密度の低下を MAP 法で確認した。（CNS2010-227 等）

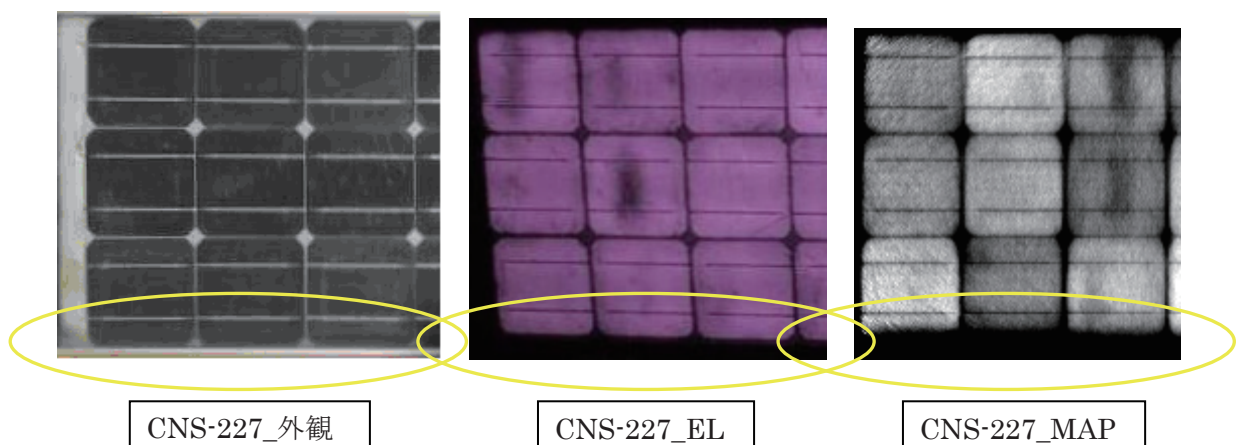


図 6.48 水垢による効率低下

6. 2. 4. 4 セル内での電流密度不均一（外観変化を伴わない劣化）の確認

D-d1 モジュールには特徴的な傾向が見られた。

- ・EL 法、MAP 法で Mapping した結果、2本のインターコネクタの間から左右に電流密度が異なるセルが見られた。（6枚中4枚、現象の未発生は下記未曝露品のみ）
- ・未曝露品 CNS2010-480、CNS2010-167 では、この現象がほとんど発生していない（図 6.38 参照）。
- ・今回計測した、他のメーカーのモジュールでは、この現象は発生していない。
- ・次工程の破壊試験で同じ現象の CNS2010-151、CNS2010-163 に対して各セルの I-V 測定と、CNS2010-163 に対してインターコネクタ部の破壊分析をしており、そちらも参考にされたい。

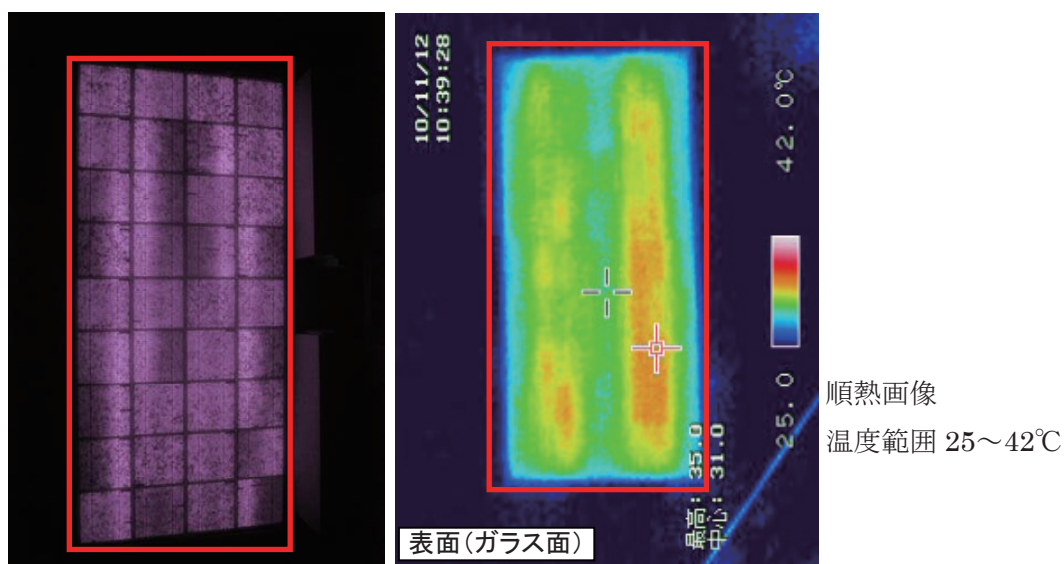


図6.49 CNS2010-163のEL・順熱画像

図 6.49 は CNS2010-163 の EL・順熱画像であり、EL の明暗と温度の高低が左右に分かれていることで一致している。CNS2010-146、151、162 も同様であり、特に CNS2010-163 ではストリングス2列間に渡ってEL明部がつながっているように見えた。

これはストリングスマシンの不備によりタブ線の接着が列単位で不十分になり、屋外曝露のストレス等の影響でタブ線に剥離が生じ、電極の左右で電流差が生じたためと思われる。

ストリングスを封止材上に積層するとき、図6.50のイメージのように通常、隣り合うストリングスは反転させて配置する。そのため明部と明部、暗部と暗部が合わさる形となり、CNS-163で観測されるマッピング画像のようになったと考えられる。

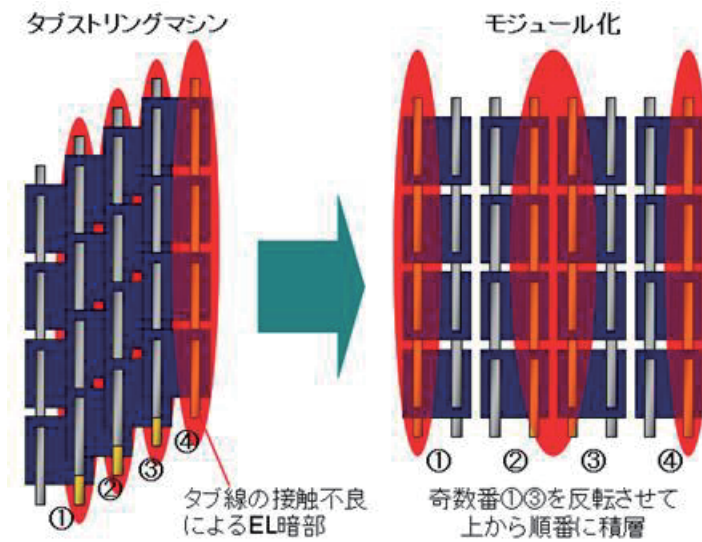


図 6.50 CNS-2010-163 の製造イメージ

6. 2. 4. 5 曝露と未曝露の違い (外観変化を伴わない劣化)

今回の測定対象で未曝露品が入手出来たものは D-d1 モジュールと F-f1 モジュールである。

D-d1 モジュールの特徴は、前記のセル内の 2 本のインターコネクタの間から左右に効率が異なる現象が、曝露することによって増加していることである。

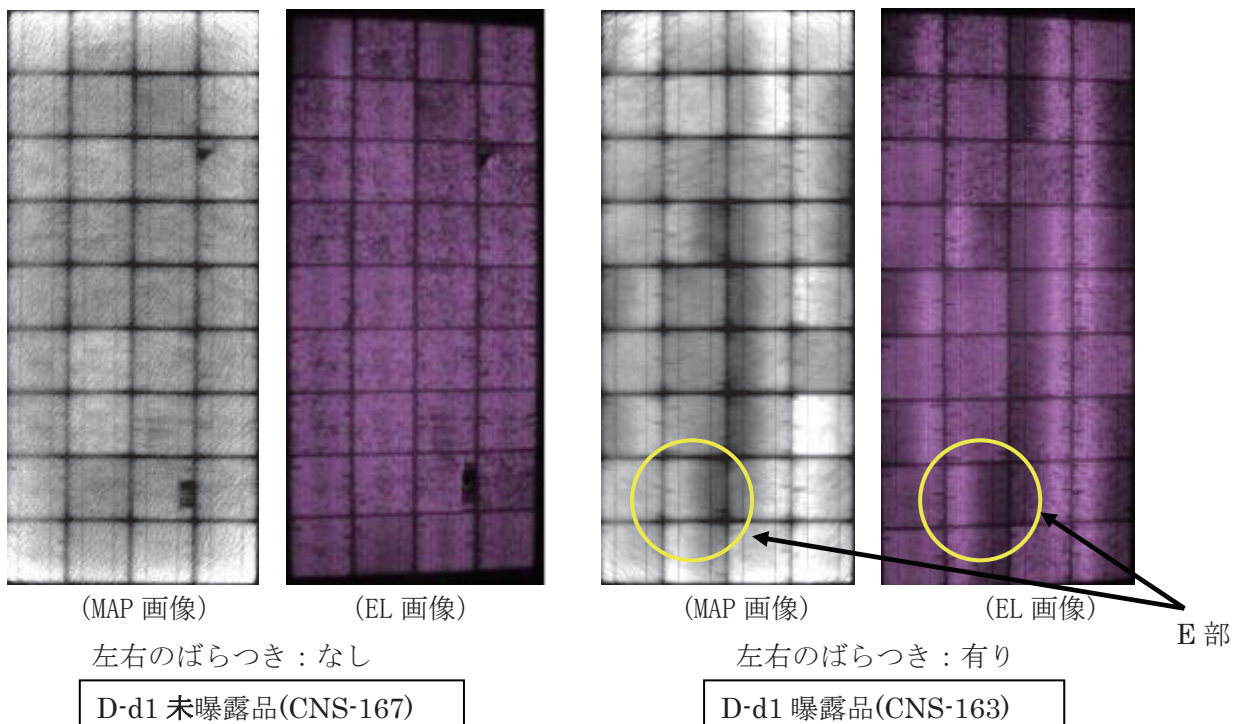
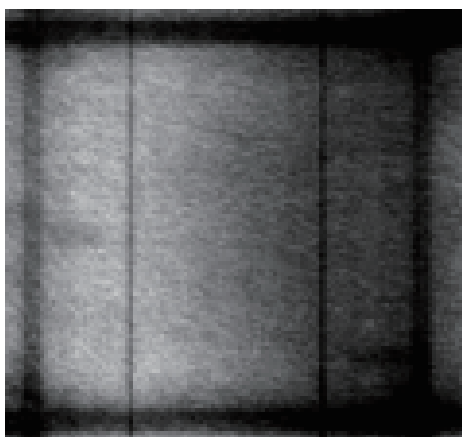
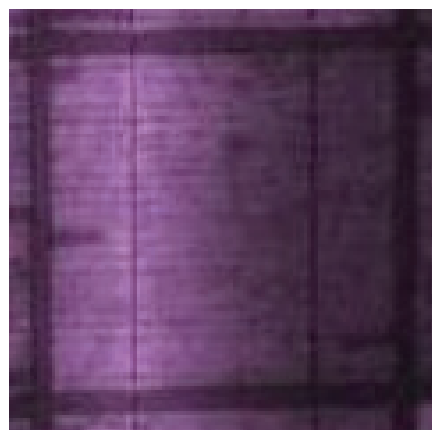


図 6.51 未曝露と曝露での差



(MAP 画像)



(EL 画像)

図 6.52 E 部拡大図

I-V 特性を比較しても、表 6.15 に示す様に、明らかに劣化が進んでいる。

表 6.15 D-d1 モジュールの曝露後の変化

曝露状態	型式	P _{max} の変化量
未曝露	CNS2010-480	-6.0%
未曝露	CNS2010-167	-9.4%
曝露	CNS2010-162	-15.6%
曝露	CNS2010-163	-15.7%

F-f1 モジュール（薄膜モジュール）では未曝露と曝露で Rsh（並列抵抗）変化が顕著である。

（注記）

MAP 法では薄膜モジュールのセルの Rsh の低下（シャント）を明るさの増加として表示する特徴があるが、今回の非破壊検査では、その他の解析手法と組み合わせ、その実用性を検証した。一般的に薄膜モジュールにおいて EL 法ではシャント部分が暗く表示される。

薄膜の未曝露品（CNS2010-476）は、曝露品と比べ、Rsh の低下不良は明らかに少ない。これは、このタイプの薄膜においての Rsh が曝露で低下する傾向のあることを示している。次工程の破壊試験で、詳細検討されており、そちらも参照にされたい。

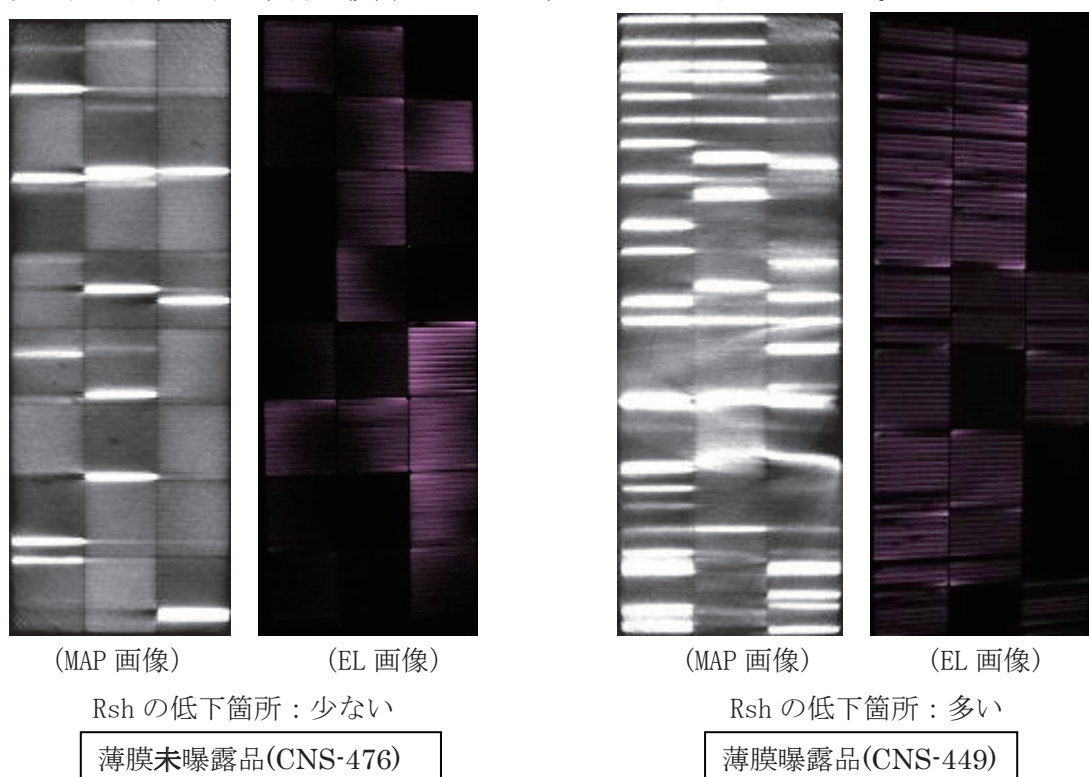


図 6.53 曝露による Rsh の変化

同様に I-V 特性を比較しても、表 6.16 に示すように、明らかに劣化している。

表 6.16 薄膜モジュールの曝露後の変化

曝露状態	型式	Pmax の変化量
未曝露	CNS2010-476	+5.6%
曝露	CNS2010-475	-45.0%
曝露	CNS2010-449	-36.0%

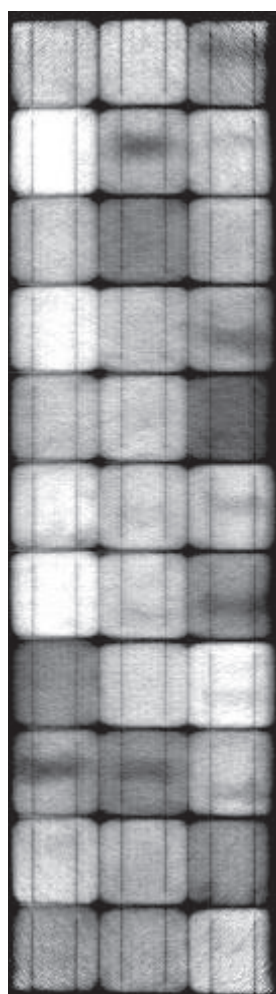
またこの結果は図6.26に示すPmax保持率のヒストグラムにも現れている。しかしサンプル数が合計3枚と少ないため、傾向の把握のみ可能である。

6. 2. 4. 6 パネル型式ごとの劣化モードの比較（外観変化を伴わない劣化）

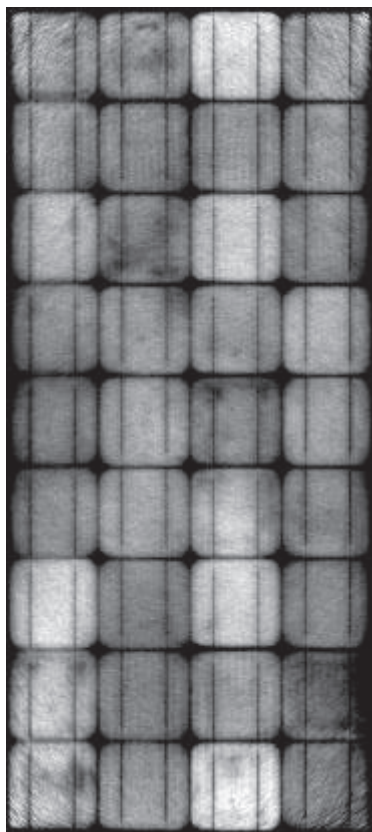
同一メーカー内の型式の違いによる、MAP 法による Rsh のばらつき具合を比較する。

①A-a1 モジュール 今回の測定の中で、すべてのパネル（6 枚）で Rsh のばらつきが有り、そのばらつき量は最も大きい。（図 6.54 左図参照）

②A-a3 モジュール 4 枚あり、すべてに Rsh ばらつきを認め、上記の次にばらつきは大きい。図 6.54 右図及び図 6.39 参照



GL133(CNS-227)



GL136N(CNS-485)

図 6.54 型式ごとの Rsh のばらつき

次に、メーカーおよび型式の違いによる、Rsh のばらつき具合を比較する。

④D-d1 モジュール 2 枚の未曝露品と 4 枚の曝露品の Rsh の違いは、特徴的である。

モジュールの外周部で、未曝露、曝露にかかわらず、Rsh が低下する傾向を示している。これは製造後 20 年近い時間による影響の可能性もある（図 6.55 左図・中図及び図 6.51 参照）。

⑤C-c1 モジュール 2 枚しかないが、すべて Rsh のばらつきがあり、ばらつき量も大きい（図 6.55 右図参照）。

⑥C-c2 モジュール 1 枚しかないが、Rsh のばらつきがある。

⑦F-f1 モジュール 2 枚（未曝露品 1 枚を除く）ある。薄膜のため、結晶系との比較は難しいが、各パネルとも Rsh 低下は認められる（図 6.53 参照）。

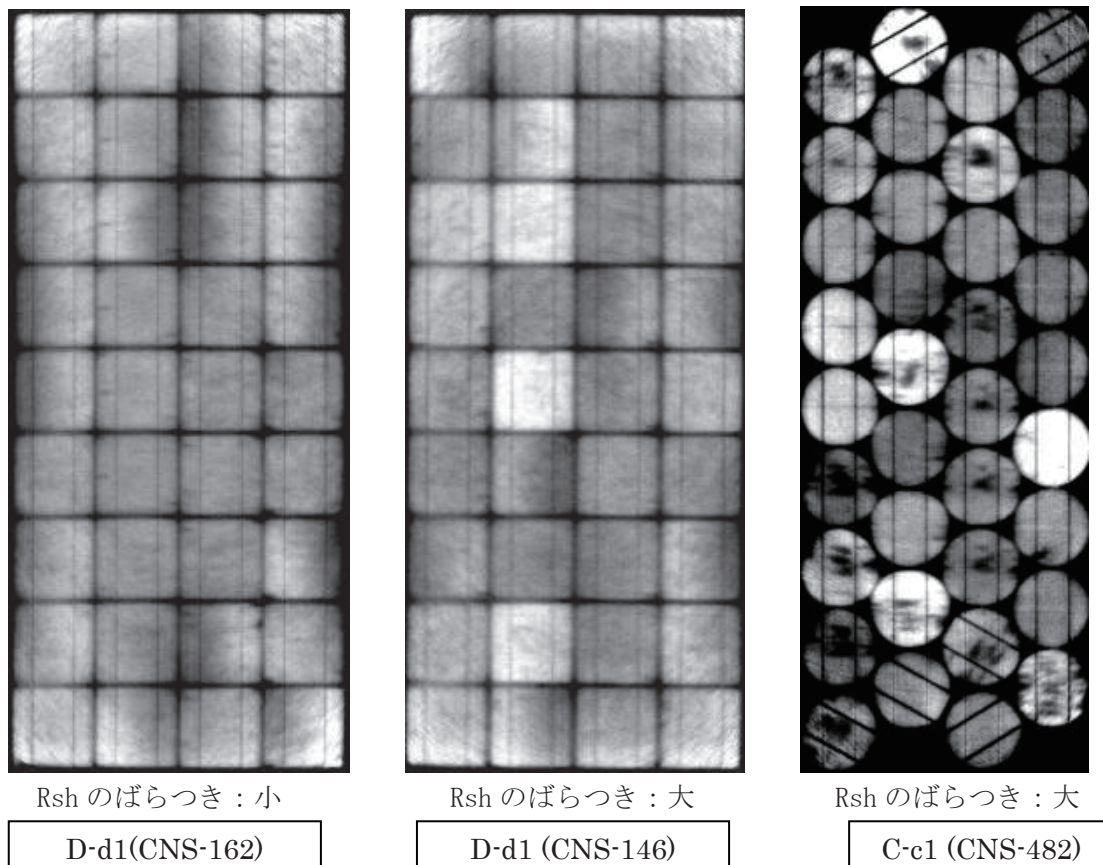


図 6.55 モジュール型式別のばらつき

・今回の測定結果より、型式ごとに内部劣化のばらつきの有無を見極めることと、及びその内容を確認するために、型式ごと最低 5 枚程度のモジュールが必要と考えられる。

・Rsh のばらつきが、初期的なものか、曝露によって増加しているかは、今後の検討課題である。

6. 2. 4. 7 セル内部の効率低下部分 (EL での黒い影) (外観変化を伴わない劣化)

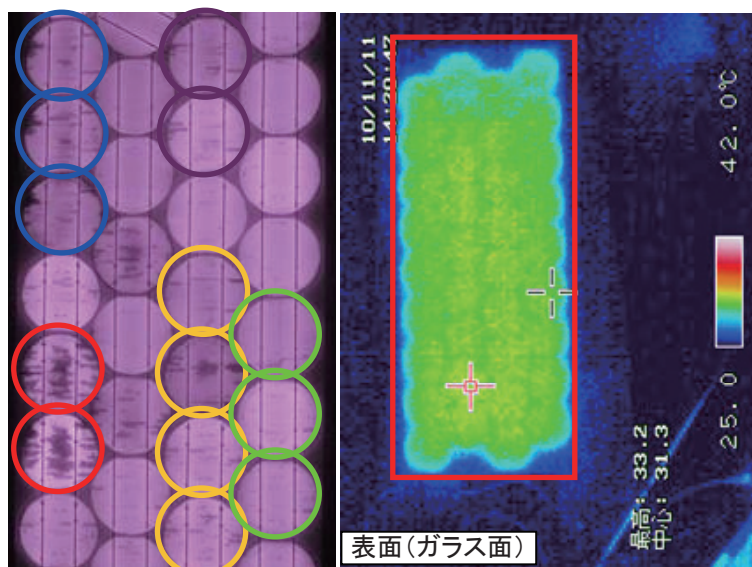


図6.56 CNS2010-483のEL・順熱画像

図6.56はCNS2010-483 (C-c1モジュール) のEL・順熱画像である。複数枚セルの同一箇所
に同一形状のEL暗部を確認、特に同ストリングス内の隣同士でよく確認されたが、順熱画
像では特に変化はみられなかった。

原因の一つとして、インゴットをスライスする段階で図6.57のイメージのように内部に
存在している結晶欠陥ごとスライスし、金太郎飴のように同一形状の欠陥を持ったセルが
できたものと考えられる。初期欠陥であり、屋外曝露によってはっきりと出てきた可能性
がある。

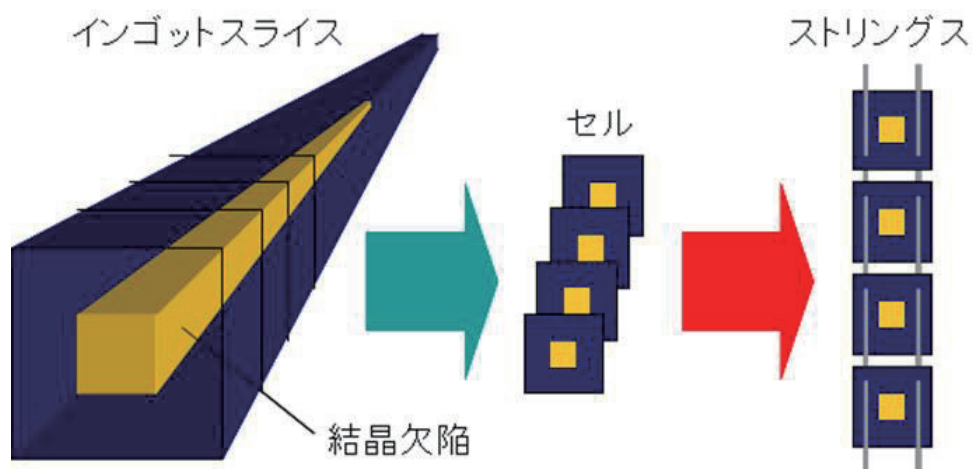
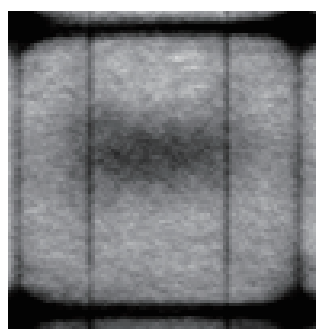


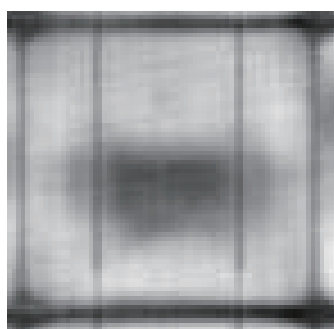
図6.57 欠陥のイメージ

また、EL 法、MAP 法で見ることの出来る、セル内部の効率低下部分（黒い影）はメーカー型式ごとに形状、発生頻度が異なっている。そのためセルの製造工程に依存している場合も考えられる。

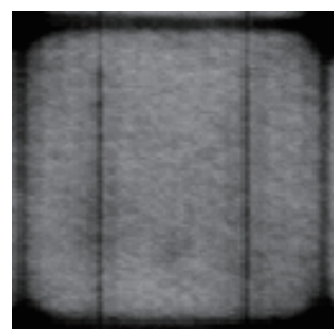
- ① A-a1 モジュール 6 枚 セルの中央部分に特異的な影が見られる。すべての同一型式のモジュールで見られ、影の形状が似ている物も多い。
- ② B-b1 モジュール 8 枚 上記同様な影がほとんどのモジュールで見られる。
- ③ A-a3 モジュール 4 枚 セル内部にかなりの頻度で特異的な3点の影が見られる。熱処理等の工程に依存した可能性も考えられる。
- ④ D-d1 モジュール 6 枚 すべての影は見あたらない。
- ⑤ C-c1 モジュール 2 枚 セルによっては、影を認められる。特性の劣化が多い方が、影のあるセルが多い。
- ⑥ C-c2 モジュール 1 枚 影は見られなかった（対象モジュールは1枚のみ）。



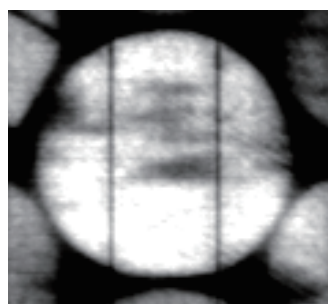
A-a1 (CNS-227)



B-b1 (CNS-245)



A-a3 (CNS-485)



C-c1 (CNS-482)

図 6.58 特異的な影

・ CNS2010-257 (A-a2 モジュール) については、外観、I-V、熱画像には異常は見られなかったが、EL 法、MAP 法では出力の低下している部分が観察され、故障への過渡期であると考えられる。今後、加速試験を行うことにより、外観、I-V、熱画像についても異常が発現する可能性がある。

・ この影が、先天的なものか、曝露や保管で発生するかは、今後の検討にゆだねたい。

6. 2. 4. 8 外部要因によるセル内部の効率低下部分（外観変化を伴わない劣化）

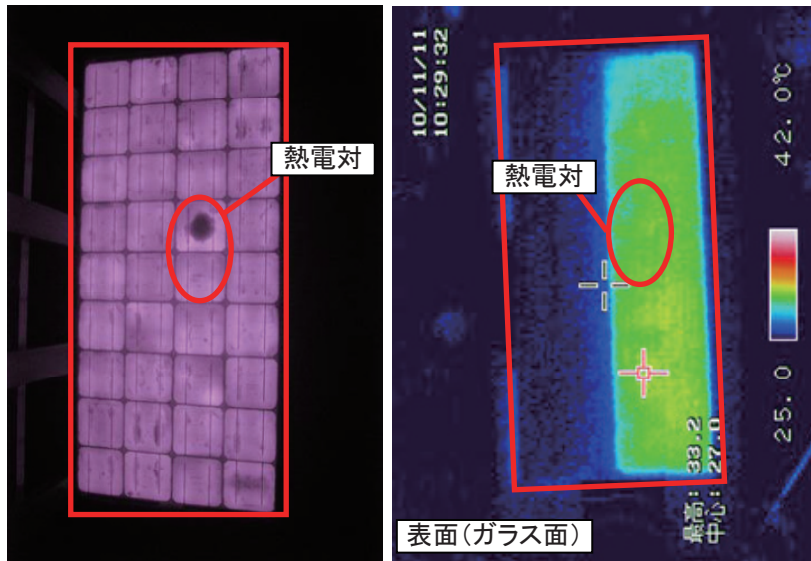


図6.59 CNS2010-450のEL・順熱画像

図6.59はCNS2010-145（A-a3モジュール）のEL・順熱画像である。ELで熱電対の位置ではっきりとした暗部を確認された。

破壊試験によりこの現象は熱電対の取付部の腐食による影響であることが確認された。

6. 2. 4. 9 発熱を伴う効率低下部分（外観変化を伴わない劣化）

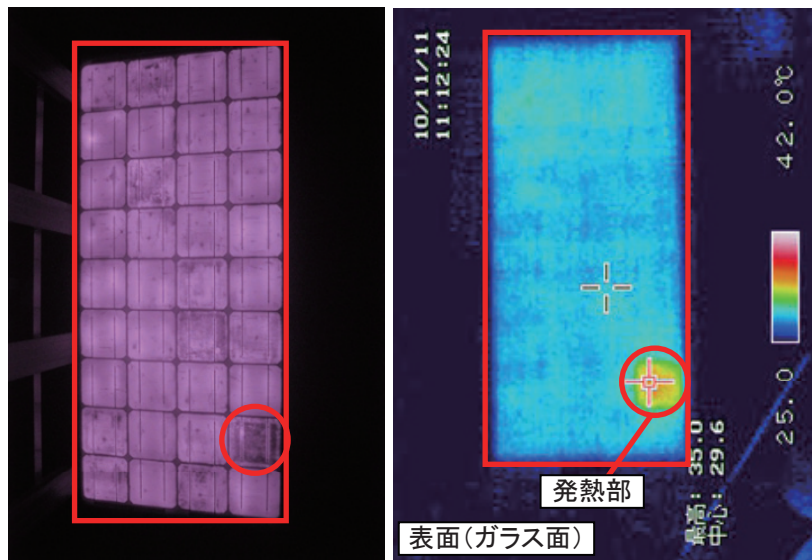


図6.60 CNS2010-485のEL・順熱画像

図6.60はCNS2010-485（A-a3モジュール）の順熱画像であり、セル1枚が集中的に発熱

していることを確認した。EL においては暗部であり、Rs（直列抵抗）が増して発熱したものである（6.2.4.13 参照）。

6.2.4.10 熱画像の測定方法による差

CNS2010-253（B-b1 モジュール）ほかは、屋外にて Isc 熱画像を撮影した。本来のモジュール使用状態とは多少異なるものの、白濁部にホットスポットが観察された。（2.2.3.2 参照）

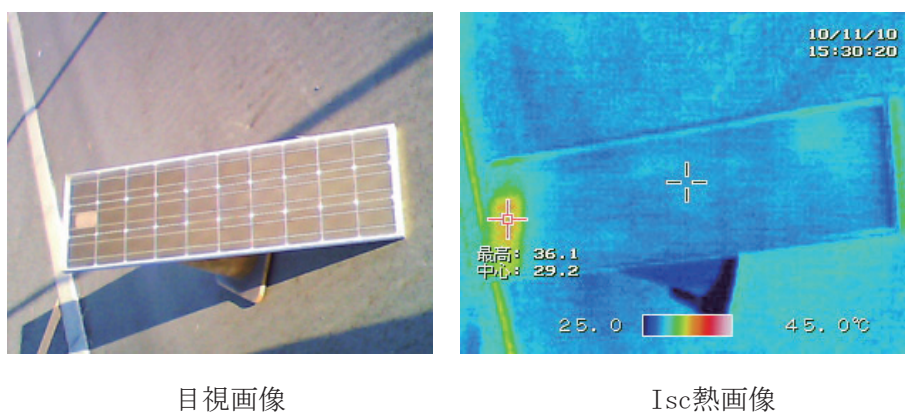


図6.61 CNS2010-253のIsc熱画像

この手法による測定と、順熱画像による方法の有効性についても、今後の調査を必要としている。

6.2.4.11 ELとMAPの画像の異なる部分について

白濁、ガラスの水垢などの要因以外で、ELとMAPでMapping画像が異なるモジュール（CNS2010-151、D-d1 モジュール）がある。

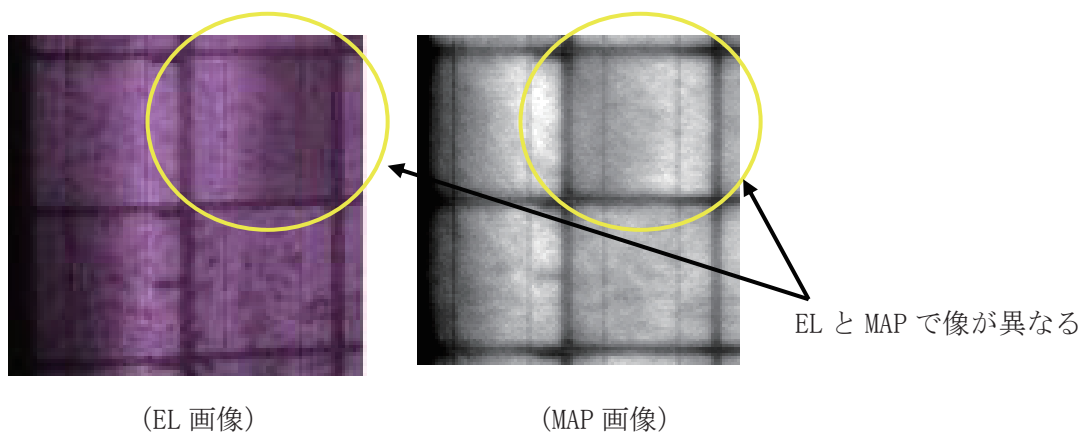


図 6.62 ELとMAPで画像が異なる部分

EL法で暗くなっても、電流密度の低下を招かないこともあるため、今後の調査課題である。

今回各種手法を用い縦断的な検討を行う予定であったが、まだ十分とはいえない。

現状で確認できた項目を以下に述べる。

6. 2. 4. 1 2 外観変化と出力性能の関連

外観の不良に着目して選定した 17 枚のモジュールと出力との関係についてまとめる（表 6.6 参照）。

- ・セル内の広い部分を覆う白濁が発生していたモジュールは、I-V 特性にステップ状の変曲点を発生していた。
- ・上記モジュールは Isc 熱画像で、白濁しているセルに発熱があった。
- ・しかし順熱画像では発熱を認めず、一部温度の低下を認めた（6.2.4.2 及び 6.2.3.5 参照）。
- ・水垢等によっても電流密度の低下を実測・確認した（6.2.4.3 参照）。
- ・モジュールの焦げで選定した CNS2010-244 は Mapping の結果、同位置の EL 法、MAP 法で影を見ることが出来たが、順熱画像、Isc 熱画像での発熱は見られなかった。
- ・今回の調査対象モジュールでは、セルの変色、インターコネクタ近傍のデラミ、配線の変色、バックシートのふくらみ等では、明確な出力性能の低下と発熱は確認出来なかった。
- ・封止材が黄変したモジュールにおける Pmax の低下はわずかであった。

6. 2. 4. 1 3 I-V 特性と Mapping 結果の関連

I-V 特性の Pmax の変化率に着目して選定した 13 枚のモジュールについてまとめる（表 6.9 参照）。

- ・C-c1 モジュール 2 枚 セル内の黒い影と特性に多少相関がうかがえる。しかし枚数が 2 枚しかないため、断定は難しい（6.2.3.8 参照）。
- ・D-d1 モジュール 4 枚 未曝露と曝露で、2 本のインターコネクタの間から左右に効率が異なる現象の発生頻度に大きな差があった（6.2.4.1 及び 6.2.4.5 参照）。
- ・上記モジュールは順熱画像でも発熱の位置と Mapping の結果が一致していた（図 6.49 参照）。
- ・曝露/未曝露にかかわらず外辺部の Rsh が低下気味であった。
- ・F-f1 モジュール 3 枚 未曝露と曝露で Rsh の低下部位の多さに明らかな関係があった。特に EL 法に比べ、MAP 法では顕著に現象の確認ができた（図 6.53 参照）。
- ・順熱画像を見ても未曝露品のほうが温度変化のばらつきが少ない。

・A-a3 モジュール CNS2010-485 は、Isc 熱画像、順熱画像の発熱セルと EL 法、MAP 法で暗くなる部分が一致していた。このような発熱は今回の測定中このモジュールのみである。可能性として、このセルの部分の R_s (直列抵抗) が増加していると考えられたので、破壊試験で、セル個別の I-V データを取得した結果、 R_s の増加が確認できた。

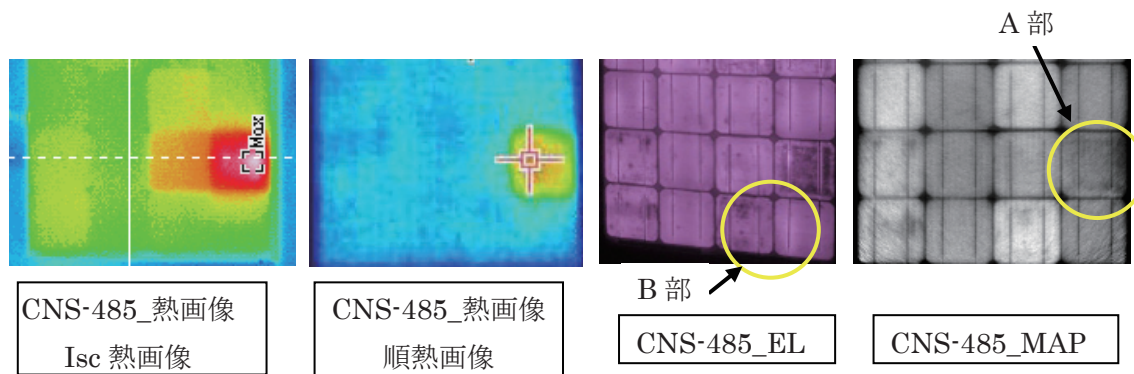


図 6.63 発熱と効率低下の一致

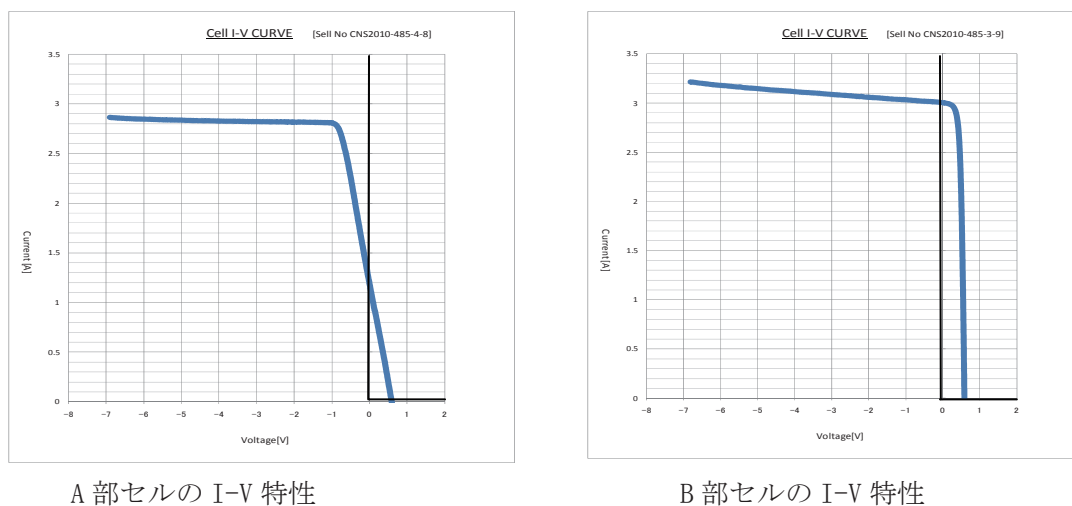


図 6.64 R_s の増加 (第 1、第 2 象限)

6. 2. 4. 1 4 手法についての考察

本章では、前章で外観劣化及び特性劣化に基づいて抽出したモジュールに対して、非破壊検査による評価方法で劣化解析を試みた結果について述べた。個々のモジュールは出力低下や劣化状態にばらつきがあるなかで同一型式では劣化の特徴が類似しており、同メーカー同型式の複数モジュールを調査対象としたことが、非破壊検査でモジュールの特性を見極めるために有効であった。また、一部の型式については未曝露品を調査対象に加えたことにより、各手法で未曝露品と曝露品を比較することによって屋外曝露の影響を推測することができた。しかしながら、劣化状態や出力低下は個々のモジュールで異なるため、経時劣化を詳細に把握するためには各手法の初期データの取得保管があることが望ましい。

特にI-V特性においては、太陽電池特性の重要なパラメータ (Isc, Voc, Pmax, FF, Rs, Rsh 等) を含むため初期特性のデータ取得保管があることが重要となる。前章で外観劣化レベルから抽出されたモジュールは初期I-V特性が残されているものがなかったため、モジュール裏面に表示されている公称値 (定格値) を初期値として2010年測定値と比較した。公称値 (定格値) については、2010年現在の日本工業規格 (JIS) の規定においては、太陽電池の出力特性はPmaxとIscが公称値90%以上、Vocが公称値の±10%となっており²⁾、調査対象モジュールにおいても実際の初期値は、公称値 (定格値) からある程度のずれが見込まれることに注意する必要がある。

非破壊検査手法として用いたI-V測定及びマッピング技術 (熱画像撮影、EL測定、電流密度分布測定) については、それぞれの手法による評価結果の違いを確認できた。

I-V測定では、曝露モジュールの太陽電池特性を把握することができた。

熱画像測定では、モジュール面内の温度マッピングからデラミ (白濁) の影響や抵抗増加を推測できた。

EL 画像測定と電流密度分布測定では、目視では確認できないセルレベルの劣化と出力差を可視化した。比較的新しいマッピング技術である電流密度分布測定は擬似太陽光によるモジュール面内発電効率のマッピングであり、EL 法による発光マッピングと比較したことで両手法の妥当性が確認できた。

さらに、これらのマッピング技術を横断的に解析することは、劣化部材の特定に有効であった。EL 法と MAP 法の明暗分布と熱画像の温度勾配からは、インターコネクタの接続不良によるRs増加を推測することができ、EL 法と MAP 法の比較から、出力減少の要因をセル自身 (pn 接合部)、セル以外の部材 (EVA, ガラス) 及び部材以外 (水垢) に切り分けることができた。

ここで、MAP法については、セルのRsh低下が明部として表されるため、EL画像と比較して特性差を見極める必要がある。MAP法におけるRshの影響についての詳細は添付資料(太陽電池変換効率分布測定 (MAP法) にまとめる。また、一部のモジュールで観察された、MAP法とEL画像でセル内部の明暗が逆になる現象については、今後セル個別の特性把握などから解明を進める必要がある。

非破壊検査において、I-V測定とマッピング技術は、太陽電池モジュールの劣化解析に有効な方法であった。しかし、等身大程のサイズの太陽電池モジュールを多数調査することは予想以上に時間と労力を要した。将来的には本調査で用いた非破壊評価を一括でかつ高解像度で評価できるような評価装置があれば解析効率は格段に上がるだろう。これについては、マッピング装置メーカーの今後の開発に期待したい。

以上より、本章で用いた各種検査手法の重ね合わせによる症例診断の成果を下表の通りにまとめる。ELやMAP、熱画像などを多角的に用いることで、モジュール全体の発電量への影響としては低いが、信頼性には問題となる局所的な不良を検出し、その原因を推定する

ことができる。本研究では特に、直列抵抗の増加、並列抵抗のバラつきを発見することができた。封止材またはセル表面の白濁についても、発電能力への影響を定量評価することができた。一方、電極のさびや封止材の黄変など、外観上の変化が明らかなものでも本章で用いた非破壊検査への感度がないもしくは微小のため、影響評価できないものもあった。これは今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 2) 日本工業規格JIS-C8918 JIS-C8939.

表6.17 各手法の不良検出可能性と、その重ね合わせ

各手法\症例	セルのクラック	シャント (少数キャリアの減少)	バイパスダイオードのショート	直列抵抗の増加	並列抵抗のバラつき	封止材, セル表面の白濁	電極のさび	封止材の黄変
EL 法	◎	◎	○	○	×	×	×	×
	高解像度で検出可能	暗部として検出可能	暗部として検出可能	暗部として検出可能	検出不可	検出不可	検出不可	検出不可
MAP 法	△	○	○	◎	◎	△	×	×
	分解能を上げれば検出可能	明部として検出可能	暗部として検出可能	暗部として検出可能	明暗差として検出可能	光線量低下, 出力低下を伴えば可能	検出不可	検出不可
順熱画像	△	○	◎	○	×	△	×	×
	出力低下に伴う発熱が見られれば検出可能	発熱部として検出可能	端子ボックスの発熱として検出可能	発熱部として検出可能	検出不可	白濁による発熱を検出可能	検出不可	検出不可
発電量変化	△	△	○	△	△	△	×	×
	大規模な出力低下であれば検出可能	大規模な出力低下であれば検出可能	大規模な出力低下として検出可能	大規模な出力低下であれば検出可能	大規模な出力低下であれば検出可能	大規模な出力低下であれば検出可能	検出不可	検出不可
外観	×	×	×	×	×	◎	◎	◎
	目視では確認不可	目視では確認不可	目視では確認不可	目視では確認不可	目視では確認不可	目視で確認可能	目視で確認可能	目視で確認可能

◎	…特徴的に検出可能
○	…検出可能
△	…場合によって検出可能
×	…検出不可

注記) MAP法は本研究で新規に取り入れた評価手法である。

本章では非破壊検査で特定した劣化箇所について述べた。次章では不具合箇所と正常箇所の状態の違いを詳細に把握することを目的に破壊分析を行った結果について述べる。また、非破壊検査で不具合が表れたセルが、それに隣接するセルや正常なセルへ及ぼす影響を把握するために、セルの個別評価を行った結果についても述べる。

6. 2. 5 まとめ

・今回の測定の結果、メーカーごと、メーカー内の型式ごとで、大きな違いが有ることを確認できた。

- ・D-d1モジュールのみインターコネクタの左右で特性が異なるセルがある。
- ・B-b1モジュールにのみ大きな白濁が発生している。
- ・2種類のA社のモジュールはRshのばらつきが大きいものと中程度のものがある。

中でも型式ごとの特徴を得ることは、全体の特徴を知る上で重要である。

特に長期曝露品の様にその特性値のばらつきが大きいことが予想される場合、測定枚数を増やして全体の特性を把握することで、有意義なデータが得られる。

・非破壊検査手法として用いたI-V測定及びマッピング技術（熱画像撮影、EL測定、電流密度分布測定）については、それぞれの手法による評価結果の違いを確認した。

・複数の非破壊検査方法を横断的に解析することは、劣化部材の特定に有効であった。

・非破壊検査で、モジュール内の詳しい Mapping を行い、次工程の破壊試験につなげることは、的確な情報を得るために重要である。

6. 3 破壊分析

6. 3. 1 背景・目的

6. 3. 1. 1. 外注破壊分析

前項までに記載の方法で行った非破壊評価、分析を通じて得られた情報に基づき、不具合箇所と正常箇所の状態差について、より詳細な評価、比較を行うことを目的とし、下記のモジュールについて破壊分析を進めることとした。

分析対象の選定に際してはメンバー間で協議・議論を行ったが、時間、予算等の理由から i) 白濁外観不良、ii) EL 画像のセル面内アンバランス、の不具合状態に重点を置いて分析対象モジュール（表 6.18）を選定した。

表 6.18 外注破壊分析の分析対象モジュール

ID No	タイプ	メーカー・型番	非破壊検査で見出された特徴
CNS-253	結晶 Si	B-b1	<ul style="list-style-type: none">セル面積の 50%以上を占める白濁の外観不良Pmax ($\Delta=6W$)、Isc ($\Delta=0.5A$) の低下白濁箇所は太陽光受光時に発熱状態を示す。
CNS-163	結晶 Si	D-d1	<ul style="list-style-type: none">顕著な外観不良は見られないが、Pmax ($\Delta=5W$)、FF ($\Delta=8\%$) の低下有り。EL 画像において、左右に輝度（明暗）の差が観察されるセルが複数枚確認された。

また（株）東レリサーチセンターのご厚意、探究心から次の分析を追加で実施することができた。

1つは白濁外観不良モジュール（ID253）に対する分析を進めた結果から提唱された1つのメカニズム推定（仮説）を軽微な白濁現象を示していたモジュール（ID250）の分析を通じて検証し、白濁外観不良が大面積化する過程を推定することとした。

また、ID253 や ID250 が属する型式 B-b1 のモジュールに特徴的に見られたバックシート部の膨れについても、発生ガス分析などを通じて、メカニズム推定に取り組んだ。

さらには、顕著な出力低下及びEL画像において暗輝度部、MAP法において明輝度部を示した薄膜シリコン型モジュール（型式 F-f1、ID449）についてセル部の劣化分析などを行った。

6. 3. 1. 2. コンソーシアム内破壊評価

上記で選定したモジュールについては、不具合箇所とそれに隣接する箇所や正常箇所のセルの特性を個別に評価することで、不具合箇所の状態と影響を把握することを目的として、コンソーシアム内でモジュール裏面の封止材を破壊してセルから直接配線を延長して取り出し、個別のセルの特性を測定する破壊評価を行うこととした。

コンソーシアム内破壊評価の対象モジュールとして、上記の外注破壊分析対象モジュールそのものでセル個別測定を行うことは技術的にも、時間的にも難しいとの判断から、外注破壊分析対象モジュールと同様の不良、異常が見られる同型モジュール (CNS242、CNS151) を用いることとした。CNS151 については、非破壊評価の EL 画像と MAP 画像で左右の明暗が入れ替わっているセルも見られることから、この要因の特定にも興味を持たれた。

さらに上記 2 モジュールとは別に、CNS450 はモジュール裏面に熱電対と思われる工作物が付加されており、その部分の EL 画像、電流密度分布測定画像 (MAP 画像) に丸いシミ状の暗部が観察された他、MAP 画像で明るく表示されるセルや、Isc 熱画像でホットスポットになっているセルなど特徴を有することから、合せてコンソーシアム内破壊評価の対象モジュールとした。

6. 3. 2 方法

6. 3. 2. 1 外注破壊分析

外注破壊分析の内容は共同研究メンバー内で推定した不具合発生原因に対して、その妥当性を検証する目的で当初下表 6.19 に示す内容を起案した。なお、分析実施者については、太陽電池モジュールに関する分析の実績、特殊サンプリング技術の保有状況及び起案した分析プランの実施可否を勘案し、コベルコ科研 (株) 及び (株) 東レリサーチセンターに委託することとした。

表 6.19 モジュール破壊分析のメニュー

モジュール ID		CNS-253	CNS-163
分析実施者		東レリサーチセンター	コベルコ科研
不具合発生原因の推定		セル/EVA 間の剥離	セル裏面電極/インターコネクタ間の接合不良
前処理	特殊サンプリング	○	○
観察	光学顕微鏡観察	—	○
	表面 (剥離面) SEM 観察	○	—
	断面 SEM 観察	○	○
元素分析	表面 (剥離面) 元素分析 (EDX)	—	—
	表面 (剥離面) 元素分析 (EPMA)	○	—
	断面元素分析 (EDX)	—	○
	断面元素分析 (EPMA)	○	—
EVA 封止材分析	金属拡散状態分析 (LA-ICP-MS)	○	—
	FT-IR (樹脂組成分析)	○	—
総合解析		○	○

また、白濁外観不良の発生メカニズム推定としては、次の手法を用いた分析にも追加で取り組んだ。

【白濁外観不良モジュール (ID253) に対する追加破壊分析メニュー】

1) セルの構造解析

- ①SIMS ②SCM ③イオンクロマトグラフ ④TEM-EDX
- ⑤ラマン分光法

2) ガラスの劣化状態分析

- ① ナノインデンテーション ② 元素分析 (EPMA)

3) EVA封止材の劣化状態分析

- ①酸化分解-減圧化学発光法 ②ESR ③ラマン分光法 ④固体NMR

また、薄膜シリコン型モジュール (ID449) に対しては、その出力低下要因を探るべく、次の手法を用いて破壊分析を実施した。

1) モジュール構造分析

- ①モジュールの解体、外観観察

2) アモルファスシリコンセルの劣化分析

- ①SIMS ②ESR ③FT-IR ④ラマン ⑤XRD

3) 部材分析 (シール材、バックシート)、部材劣化分析 (EVA)

- ①FT-IR

6. 3. 2. 2 コンソーシアム内破壊評価

(A) セル個別測定用延長配線取り出し

セル個別の延長配線取り出しのイメージを図 6.65 に示す。バックシートに穴を開け、セルとセルの間のタブ線にリード線をはんだ付けして配線を取り出すものである。

以下にその手順を示す。

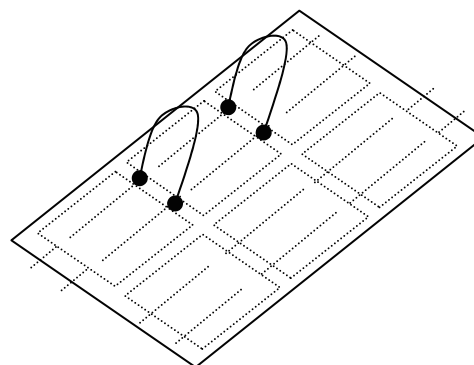


図 6.65 配線取り出しのイメージ

(1) セル個別測定対象セルの選定

セル個別測定の対象としたセルは、非破壊評価・分析で異常が見られるセルと、それに隣接するセルを中心に、比較のため異常が見られないセルも含めて共同研究テーマメンバーで協議して決定した。

各モジュールの外観写真と、個別測定対象セルの位置及びその番号を図 6.66(a)~(c)に示す。

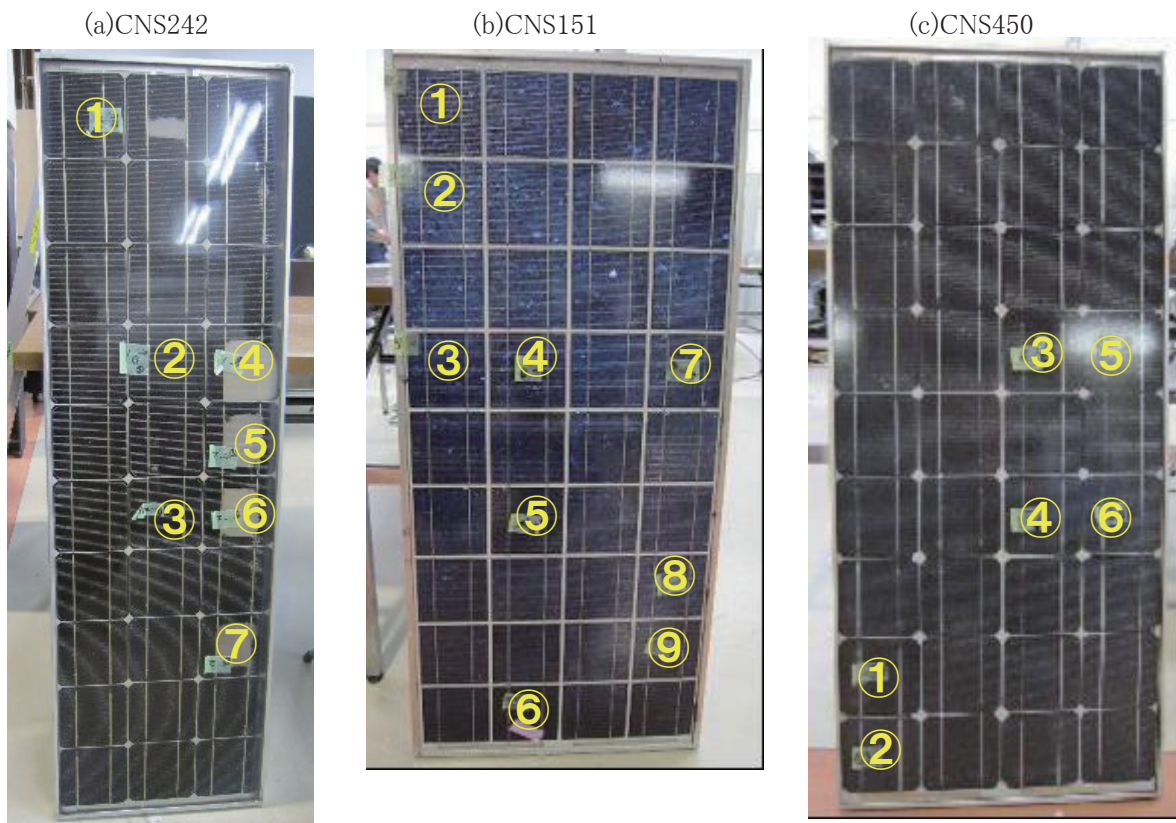


図 6.66 個別測定対象セル

(2) 延長配線取り出し位置の決定、マーキング

・バックシート側の延長配線取り出し位置を決定し、マーキングした。延長配線取り出し位置は対象セルと隣接セルの接続部のタブ線位置とした。

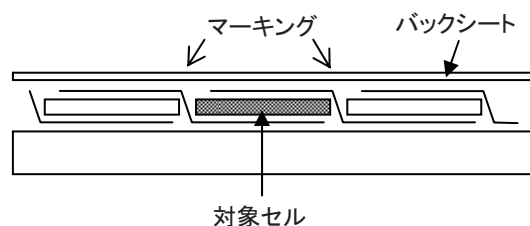


図 6.67 配線取り出し位置マーキング箇所

モジュール内部の配線位置は外部からは直接視認できないので、マーキング箇所決定の方法は下記の3種類からバックシートの構成などに応じて選択した。

- (a)モジュール表面からフラッシュライトを当てて、モジュール裏面に見えるセル間のタブ線の影部分にマーク。(光透過率の高いバックシートには有効)
- (b)モジュール裏面のバックシート上にあるタブ線やセルの凹凸から対照セルの接続部位を選択しマーク。
- (c)対象とする接続部位をモジュール表面から確認し、位置を実測してマーク。

(3) 延長配線取り出し部の封止材除去

マーキングした延長配線取り出し位置の封止部材（バックシート、EVA）を下記の手順で除去して、タブ線を露出させる。

(a) マーク周辺のバックシートにカッターナイフまたは、ホットカッターを用いて1cm角程度の切れ目を入れ、表層、バリアー層、絶縁層などのバックシート主要部材を除去する。

(b) ホットカッターや半田ゴテを用いて、内部のタブ線が露出するまで残ったバックシート部材や EVA 封止材を除去する。

(c) タブ線表面に固着した EVA や皮膜をルーター（電動切削工具）で削って除去し、タブ線の新しい表面を出す。



図 6.68



図 6.69

(4) 延長配線取り出し用リード線接続

(a) リード線を 10cm 程度に切り、端部と中央部の被覆を取る。露出した芯線は燃って、融かした半田を含浸させておく。

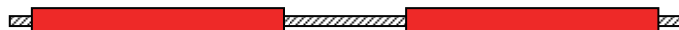


図 6.70 リード線加工状態

(b) 3 で露出させたタブ線表面に半田を盛っておく。

(c) リード線の両端をセル左右のタブ線にそれぞれ半田付けする。



図 6.71

(e)対象箇所全て接続して完成 (図 6.72)。



図 6.72 セル個別延長配線を延長取り出したモジュール

(B) セル個別の I-V 特性測定

セル個別の I-V 特性は、日清紡メカトロニクス(株)製ソーラーシミュレータ (SPI-SUNSIMULATOR 1116N) を用いて測定した。セルの大きさの穴を開けた黒板紙と黒いプラダンを併用して、測定対象のセル以外の部分を遮光し、セルから取り出した延長配線をコンソーシアムのソーラーシミュレータに接続して、コンソーシアムの標準測定条件で測定した。

(C) セル個別の EL 画像検査

セル個別の EL 画像検査は、(株)アイテス製 EL 画像測定装置 (PVX100) を用いた。セルから取り出した延長配線を EL 電源装置に接続し、測定対象セルが撮影範囲に入るように位置を調整して、リミット電流/リミット電圧を 1.5A/2V に設定した他はコンソーシアムの標準条件で撮影した。

また、セル個別配線延長取り出し後のモジュール全体の EL 画像検査も併せておこなった。さらに、一部のモジュールについては、個別にセルに逆バイアスをかけた場合の EL 画像検査も行った。

6. 3. 3 結果

6. 3. 3. 1. 外注破壊分析

(A) 『ID253』モジュールの白濁外観不良に関する分析

(株) 東レリサーチセンターから受領した分析結果報告の要点を分析手法別に次頁に示す。なお、異常部とは白濁外観不良が観察された箇所を指す。今回、分析対象とした箇所及び非破壊検査画像を図 6.73 に示す。

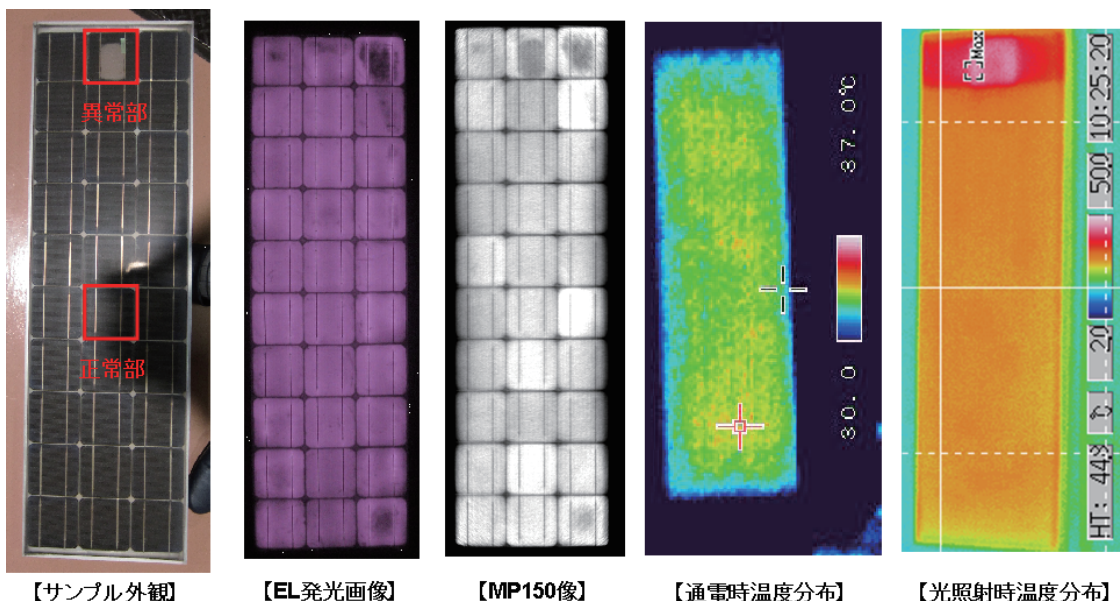


図 6.73 セル個別延長配線を延長取り出ししたモジュール (ID253)

表 6.20 白濁外観モジュール (ID253) に対する破壊分析の結果概要

1) 白濁要因解析

目的	手法	測定結果
白濁要因解析	断面SEM	異常部では、表面側EVAと反射防止膜(TiO ₂)の界面で界面剥離が生じており、この界面剥離はEVA/電極(表側)まで及び。一方、正常部では剥離は認められない。
	断面EPMA	正常部、異常部共に表面側EVA/反射防止膜界面にNaの偏析が認められる。特に異常部ではその傾向が強い。その他にもPやPbの偏析が大きいと考えられる。
	平面SEM	表面側EVAと反射防止膜(TiO ₂)の界面で界面剥離が生じている。セル側剥離面表面上にはテクスチャ形状の他に楕円状の凹凸が重畳して観測された。正常部を強制的に剥離すると異常部と同様の界面で比較的平易に剥離が生じた。ただし、剥離面の表面形状が異なり、テクスチャ構造は鋭利に形成されており、楕円状の凹凸は観測されなかった。また、EVAが部分的に密着していた場所で僅かな残渣が認められた。
	平面EPMA	異常部では、セル側にNaが多く存在している様子が認められた。一方、EVA側ではNaとPとOの分布が一致して認められ、Na、P、Oからなる化合物が存在しているものと考えられる。
	FT-IR	異常部では、表面側EVAとセルの間で剥離していることをサンプリング時に確認した。異常部剥離面のEVAは正常部のEVA組成と比較して、エステルや炭化水素基が減少し、水酸基や酢酸塩、カルボン酸と考えられる成分が増加していた。EVAのアセートが加水分解やラジカルを原因とする分解により酢酸塩やカルボン酸を生じたと推測される。異常部剥離面では硫酸塩や珪酸塩と帰属可能な成分が確認された。バックシート側セル面のEVAの異常部は正常部と比較してエステルや炭化水素基、アミンと考えられる成分が減少し、カルボン酸およびカルボン酸塩が増加していた。光の影響の少ないバックシート側でもEVAのアセートの分解が異常部では正常部より進行していることから、EVAの劣化は光だけでなく熱によっても生じていることが示唆された。バックシート側セル面のEVAの異常部ではイソシアネートと帰属可能な吸収帯成分が検出されていた。
	LA-ICP-MS	異常部では、正常部に比べてNa濃度が2倍程度高くなっており、いずれの場所でもガラス面側の方がセル面側よりも濃度が高い傾向が認められた。

2) セル構造解析

目的	手法	測定結果
セルの構造解析	EPMA, SIMS	Naがいずれの面においても存在する。剥離部の方が表面付着量、内部拡散量共に多い傾向がある。Pもいずれの面においても存在。場所間で顕著な差は認められないが、表面Pの付着量は剥離部の方が少ない可能性がある。
	SCM	両表面側はn化している(Pの拡散層あり)。剥離部では、表面側n型キャリア濃度及び表面側p型キャリア濃度が減少傾向にある。
	イオンクロマトグラフ分析法	いずれの場所でも酢酸、辛酸が検出された。剥離部の方が正常部に比べて酢酸、辛酸量は多い。辛酸の相対量を比較すると、剥離部表面が顕著に少ない。
	TEM-EDX	剥離部反射防止膜上には、nmレベルの薄膜(Na, P, O, Cからなる、Na ₃ PO ₄ ? Na(P _x O _y R _y)?)が存在。さらに(Cu)、S、Oからなると推定される粒子状物が存在。剥離部では、反射防止膜層(TiO ₂ , SiO ₂)の膜厚が薄い。電極近傍のTiO ₂ 中では金属微粒子の拡散あり。
	ラマン	TiO ₂ はアナターゼ型である。剥離部でTiO ₂ のラマン線の線幅が狭く、高波数側で観測される。
	ラマン	剥離部でSiのラマン線の線幅が広く、高波数側で観測される。

3) EVA封止材層の劣化解析

目的	手法	測定結果
EVA劣化解析	酸化分解～減圧化学発光法	剥離部、正常部の表裏EVA中のN量はいずれも大体同じ量。HALSしか入っていない。
	ESR	剥離部で炭素ラジカルが生成している。NOラジカルは少ない。ただし、ラジカル発生剤を用いると、正常部、剥離部共にNOラジカルの顕著な増大が認められ、全窒素量の半分程度のNOラジカルが検出された。
	ラマン	剥離部で蛍光強度が高いことから、よりEVAが劣化し、共役構造が形成されていることが予想される。
	固体NMR	5種の成分が3成分形成されている。Na ₃ PO ₄ もしくはNa(P _x O _y R _y)?が存在すると思われる。

4) ガラスの劣化解析

目的	手法	測定結果
ガラスの劣化解析	ナノインデンテーション	剥離部のEVA界面側で機械的強度(弾性率、硬度)低下
	EPMA	剥離部EVA界面側で0.3%程度、Naが内面側で減少。

当初計画から分析を予定していた分析項目について、その結果を示す。また、推定メカニズムを検証することを目的として追加分析を実施した結果についてもデータを一部掲載する。

①断面 SEM 観察：

異常部では、表面側 EVA とセル表面の反射防止膜（酸化チタン）の界面で、界面剥離を生じていることが確認され（図 6.74-A）、その剥離は EVA/電極（表側）まで及んでいた。一方、正常部において、剥離状態は確認されなかった（図 6.74-B）。この結果から、白濁の外観不良は表面側 EVA とセル表面との間で生じた界面剥離のために空隙が生じ、EVA 側の界面での散乱が増加したことによる不具合と推定される。

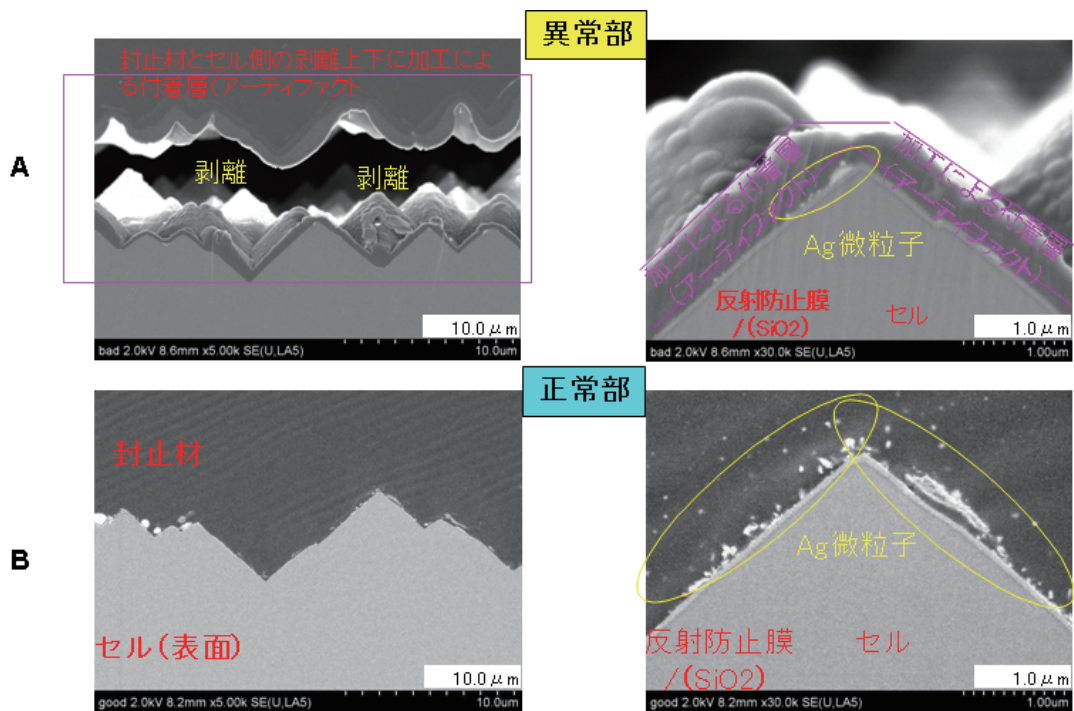


図 6.74 断面 SEM 観察像 (A : 異常部、B : 正常部)

②剥離面の表面 SEM 観察 :

異常部では、セル側剥離面上にテクスチャ形状の他に楕円状の凹凸が重畳して観察された (図 6.75-A)。一方、正常部を強制的に剥離したところ、比較的平易に剥離が生じたが、剥離面の表面形状は異常部とは異なり、テクスチャ構造は鋭利、楕円状の凹凸は観察されなかった (図 6.75-B)。

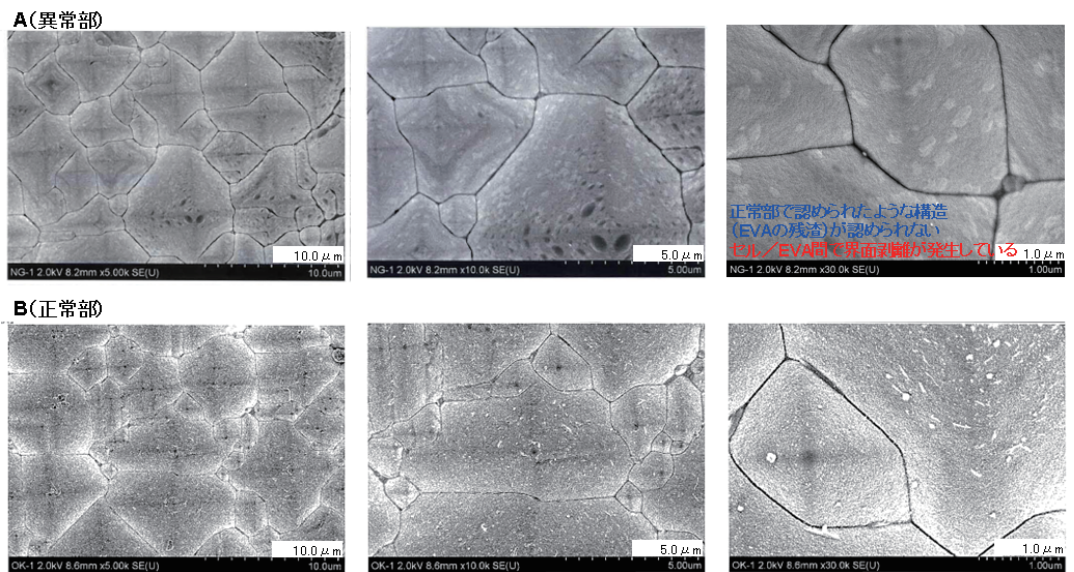
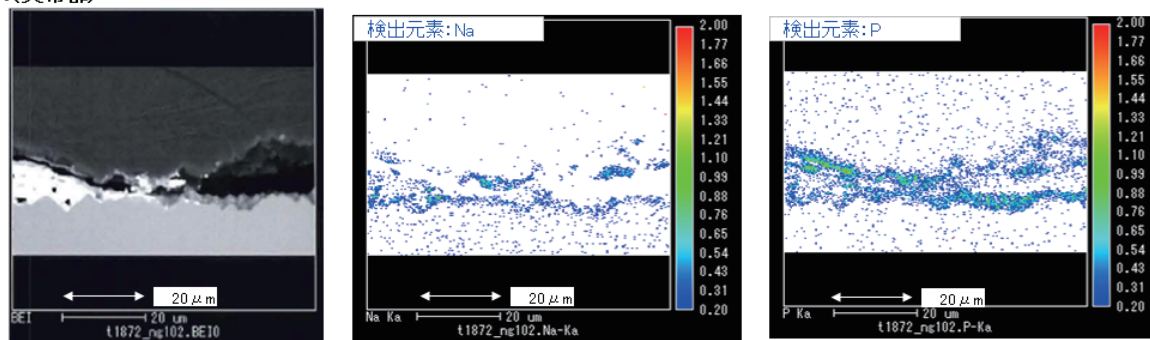


図 6.75 剥離面の表面 SEM 観察像 (A : 異常部、B : 正常部)

③断面組成分析（EPMA）：

正常部、異常部いずれの表面側 EVA／反射防止膜界面にも Na の偏析が見られたが、その傾向は異常部において特に顕著であった。また、Na の他にも P や Pb の偏析が大きいことが示唆された（図 6.76－A、B）。

A(異常部)



B(正常部)

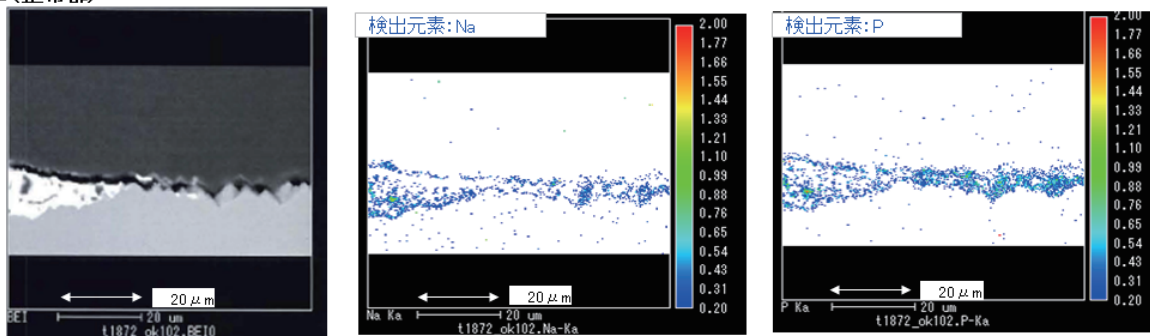


図 6.76 剥離面の断面元素分析（A：異常部、B：正常部）

④剥離面の表面組成分析（EPMA）：

異常部では、剥離箇所のセル側に Na が多く存在していることが確認された（図 6.77－A、B）。

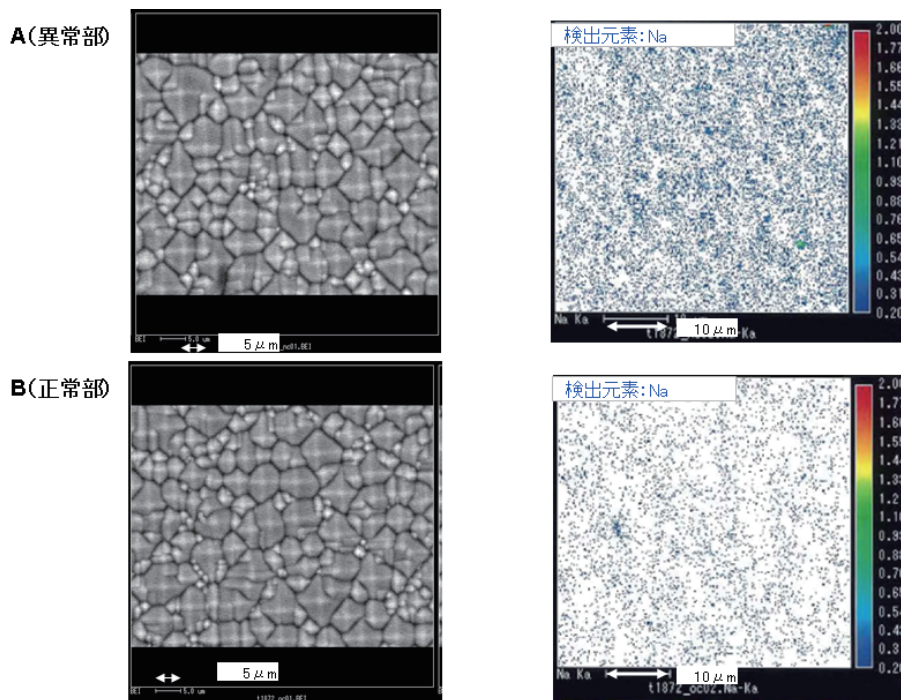


図 6.77 剥離面の表面元素分析 (A：異常部、B：正常部)

⑤EVA 中への金属拡散状態分析 (LA-ICP-MS)：

正常部及び異常部の表面 EVA 封止材について、層内の金属元素拡散状態を LA-ICP-MS 法で分析した結果、異常部では正常部と比較して Na 濃度が約 2 倍程度高いことが確認された (図 6.78-A)。また EVA 封止材の厚み方向で分散状態に差が見られるか検証した結果、いずれの箇所においても、セル側と比較してガラス側に高い濃度で Na が存在することが確認された (図 6.78-B)。

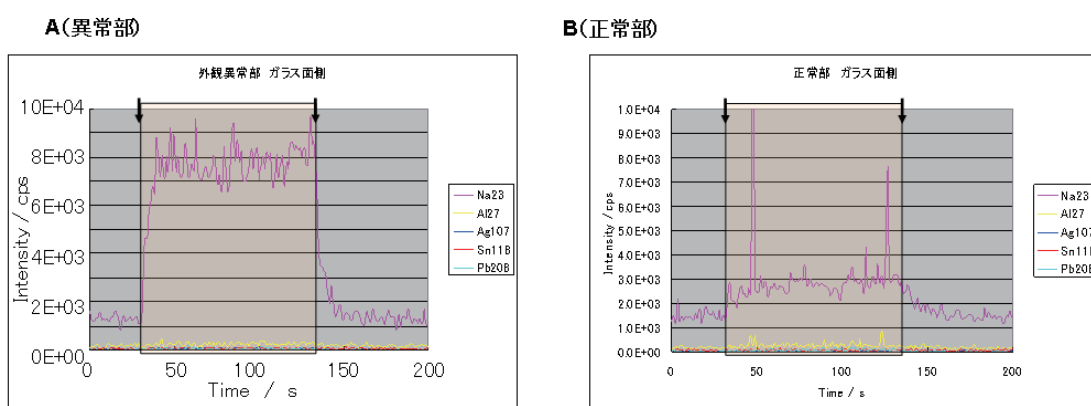


図 6.78 EVA 封止材層中への金属拡散状態分析 (A：異常部、B：正常部)

⑥EVA 構造変化の検証 (FT-IR) :

表面側 EVA 封止材の異常部剥離面は正常部と比較して、下記の変化が見られた。アセテート基の加水分解や酸化によって酢酸塩やカルボン酸を生じたと推定される。異常部では硫酸塩、珪酸塩と帰属可能なシグナルも観測された (図 6.79-A)。

異常部 < 正常部 : エステル、炭化水素基

異常部 > 正常部 : 水酸基、酢酸塩、カルボン酸

裏面側 EVA 封止材の異常部は、正常部と比較してエステル、炭化水素基、アミンと考えられる成分が減少し、カルボン酸及びカルボン酸塩が増加していた (図 6.79-B)。裏面側 EVA 層への光の影響は小さいと考えられることから、EVA の劣化は光だけでなく、熱によっても生じていることが予想される。なお、裏面側 EVA 異常部からはイソシアネートと帰属可能なシグナルも観察されていた。

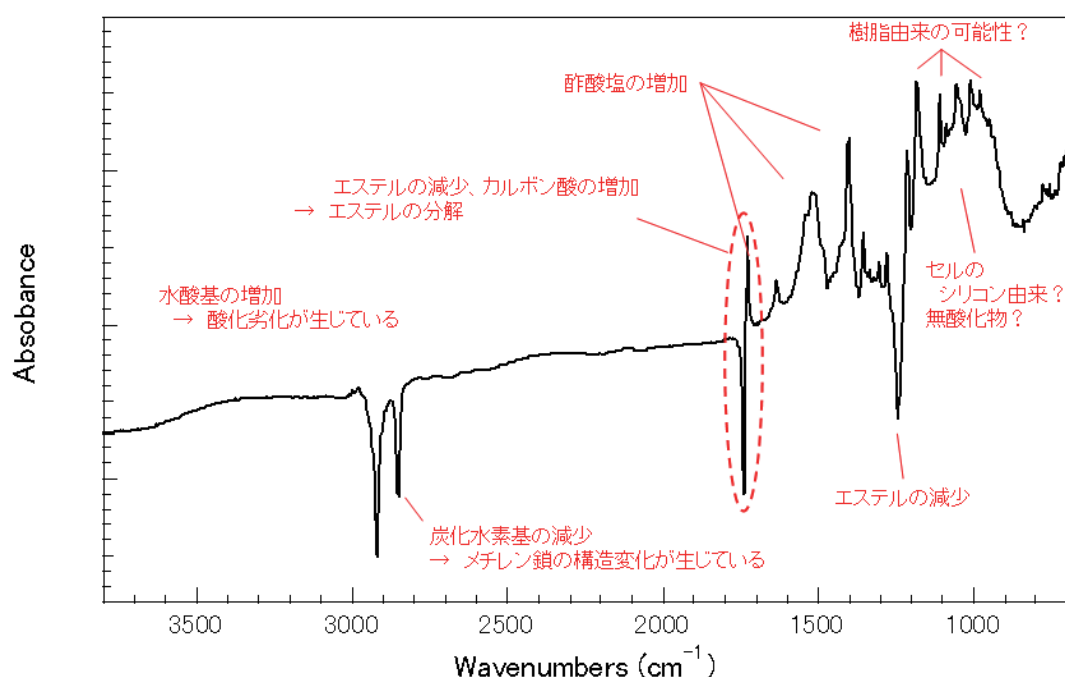


図 6.79 EVA 封止材部 (受光面側) の IR 差スペクトル (正常部-異常部)

⑦セル表面、内部の不純物状態評価 (SIMS 及び TEM-EDX : 追加分析)

SIMS によるセル表面側、裏面側からの各種不純物深さ分布評価を行った (図 6.80)。正常部、剥離部共に、セル表面・裏面への Na 偏析が認められ、内部まで浸入している可能性が示唆される。また、TEM-EDX の結果から、セル剥離面の反射防止膜上には数 nm レベルで薄い Na、P、O、(C) から構成される膜が形成されており、本層の影響により剥離が進行した可能性が考えられる。

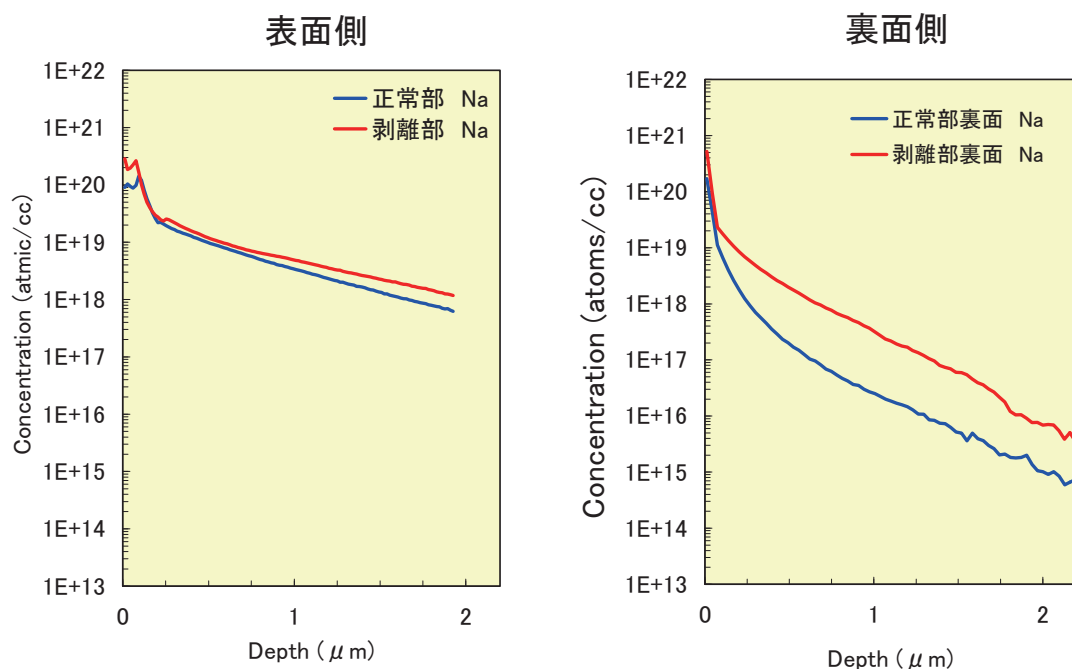


図 6.80 セル表面・裏面に対するSIMSテプスプロファイル

⑧セルのキャリア分布評価 (SCM)

セルのキャリア分布評価を行うと、表面側のn層のキャリア濃度が場所間で異なり、剥離部で低い可能性が示された (図 6.81)。また、裏面では、いずれの場所でもn化しており、剥離部では特にp層のキャリア濃度低下、並びにn層のキャリア濃度増大が認められた。セル中に拡散したNaが再結合中心やホールトラップとして寄与し、キャリア濃度の変化に寄与した可能性があると考えられる。Naのセル内拡散増大が、剥離部でのセル特性低下、ならびに発熱発生要因の一因となっている可能性があると考えられる。

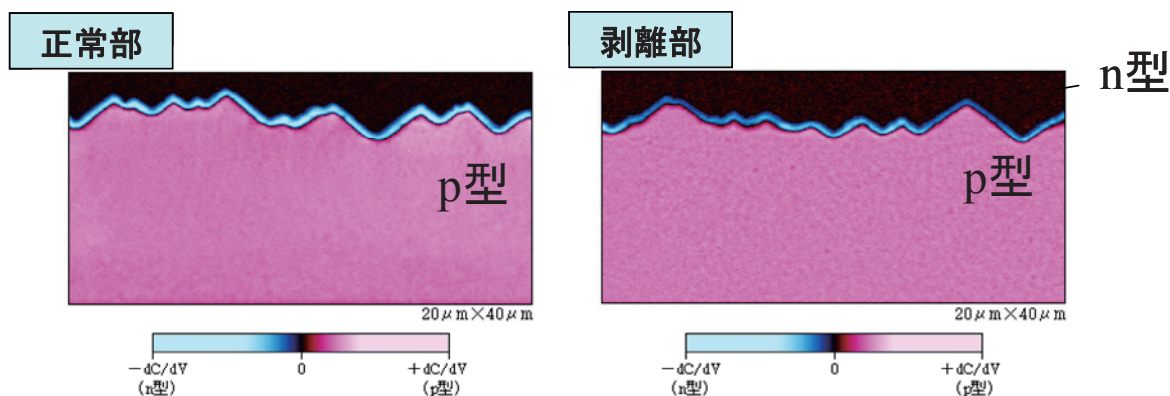


図 6.81 セル表面側のキャリア分布評価 (SCM)

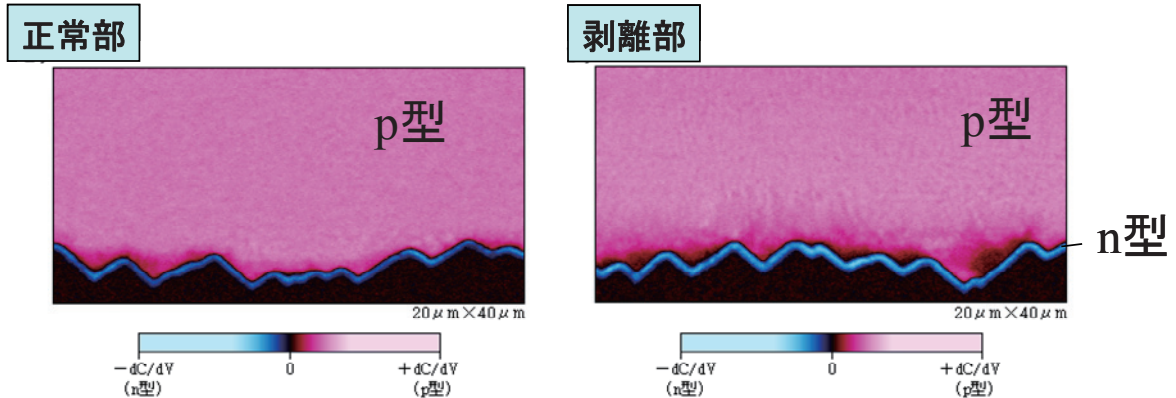


図 6.82 セル裏面側のキャリア分布評価 (SCM)

⑨EVA 中の有機酸濃度評価 (イオンクロマトグラフ法)

剥離部裏面側 EVA においては、他の場所と比較して高い濃度の酢酸が検出され、剥離部裏面側における酢酸量に対するギ酸の相対量は他の場所と比較すると顕著に低く検出された。

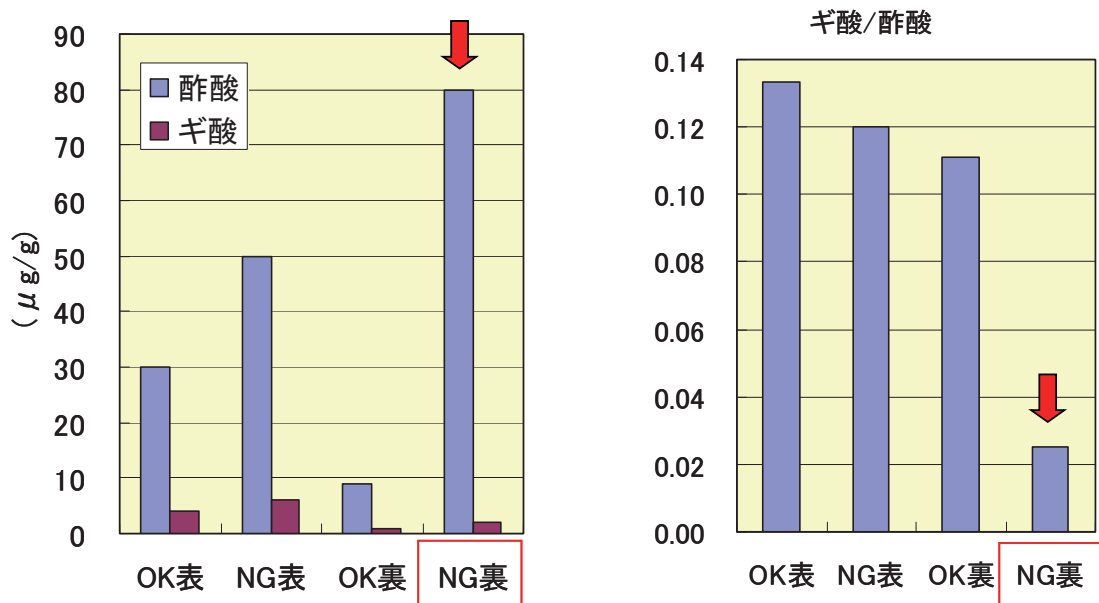


図 6.83 イオンクロマトグラフ法による有機酸発生濃度の比較

(B) 『ID250』モジュールの白濁外観不良、バックシート膨れに関する分析 (追加分析)

大面積の白濁外観不良が観察された ID253 に関する破壊分析結果を踏まえて、白濁外観不良の初期状態と見ることができ軽微な白濁外観不良が ID250 モジュールには観察された。そこで、白濁発生メカニズム推定の一貫として破壊分析を行った。また、ID253、ID250 が属するモジュールの型式において特徴的に観察されたバックシート部の膨れについても

分析を行ったので、それらの結果を概要のみ記す。

まず、ID250 の外観観察結果及び非破壊分析結果を示す。

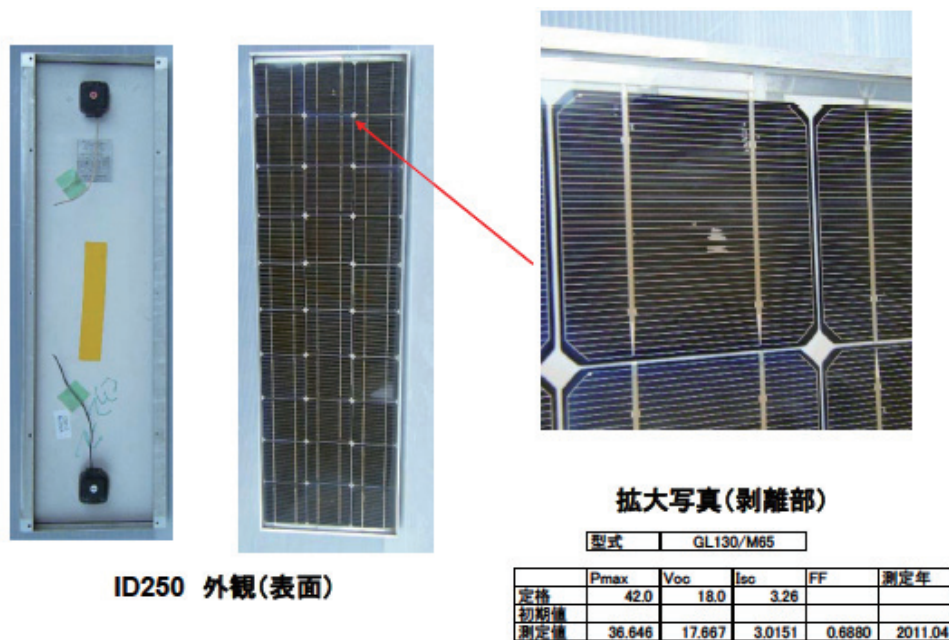


図 6.84 モジュール ID250 の外観観察結果及び I-V 特性

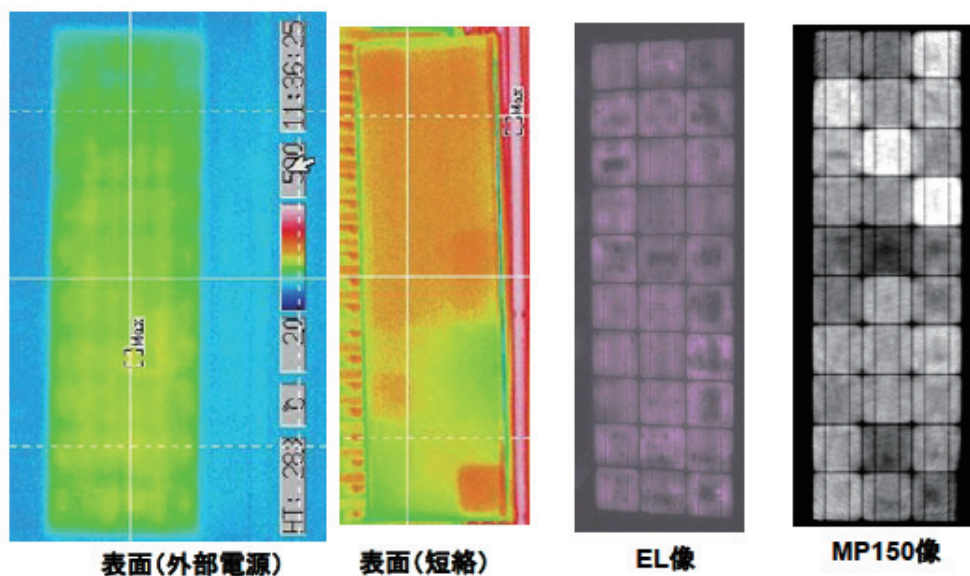


図 6.85 分析対象箇所と非破壊検査画像 (ID250)

本モジュールは ID253 と全く同じ位置のセル（中央列ストリング、最上段）に小面積の白濁を生じていたが、断面 SEM 観察の結果から EVA/セル表面反射防止膜間で剥離していることが確認された。つまり剥離界面は ID253 と同一界面であった。また、EPMA の結果、剥離部では Na、P の偏析が確認され、LA-ICP-MS では Na の拡散が見られるものの、その量は ID253 と比較して少ないことがわかった、これらの結果から、ID250 に見られる小面積の白濁は、ID253 のような大面積の白濁外観不良に至る途中段階と推定できた。

表 6.21 白濁外観モジュール (ID250) 白濁部の分析結果概要

1) 白濁要因分析

目的	手法	測定結果
発熱要因解析	断面SEM	白濁部はID253と同様、EVA/反射防止膜界面で剥離。 電極や表面での剥離は認められない。
	EPMA	剥離部では、Na、Pの偏析大。Pbがフィンガー電極上部に拡散。 表面での剥離部と正常部の差は小さい。
	LA-ICP-MS	Na拡散量はID253よりも少ない。 正常部の方がさらに少ない。
	イオンクロマトグラフ 法	いずれの場所でも酢酸、辛酸が検出された。剥離部の方が正常部に比べて酢酸、辛酸量は多い。辛酸の相対量を比較すると、剥離部表面が最も少ないが、ID253と比較すると多い傾向にある。

2) EVA封止材層の劣化解析

目的	手法	測定結果
EVA劣化解析	FT-IR	剥離部のほうが酸化劣化、酢酸塩の形成量が多い。 ID253と比較して、正常部の状態には大きな違いは無いが、剥離部では劣化が少ない。
	イメージングIR	剥離部で酢酸が減少している。特に両界面でその傾向が強い。

次にバックシート膨れ部に関する分析結果について記す。本共同研究メンバーによる外観チェック時にこのバックシートの膨れはセル位置固定用テープの貼付箇所に現れていることが確認された。

このバックシート膨れ部内のガスをシリンジで抽出し、GC-MS 分析を行った結果、EVA 由来と思われる化合物が検出された。また、ラマン分析の結果、メタン、一酸化炭素が検出された。

さらに、バックシート膨れ部と正常箇所についてEVAの劣化分析をFT-IR法で行った結果、正常部と比較してカルボン酸塩と思われるものの生成量が多く、より酸化劣化が進んでいることが示唆された。

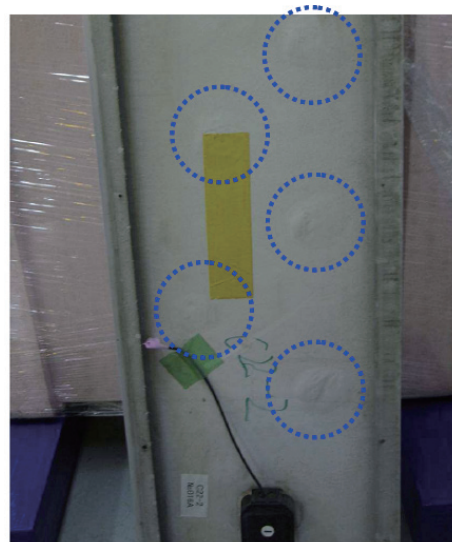


図 6.86 バックシート部の膨れ

表 6.22 バックシート部に膨れを有するモジュール (ID250) の分析結果概要

目的	手法	測定結果
断面形態観察	断面SEM	剥離はバックシートのテドラー/Al界面で生じている。
膨れ部発生ガス分析	GC/MS	EVAの分解物に相当する成分が検出。
	ラマン分光分析	CH ₄ 、COが検出。CO ₂ は検出されない(検出下限以下) 膨れ部では正常部と比較して、EVAの酸化劣化(カルボン酸塩の増加)が進行している。
EVA・セル固定材構造変化	FT-IR	セル固定剤は、接着層(アクリレート)/PET/接着層(アクリレート)/テドラーから構成。 PET、テドラーに酸化劣化は認められない。

(C) 薄膜シリコン型モジュール『ID449』モジュールに関する分析

本モジュールは10年間の屋外曝露試験に伴い、その出力が約30%低下したモジュールであり、その非破壊検査結果は下図 6.87 に示す通りであった。

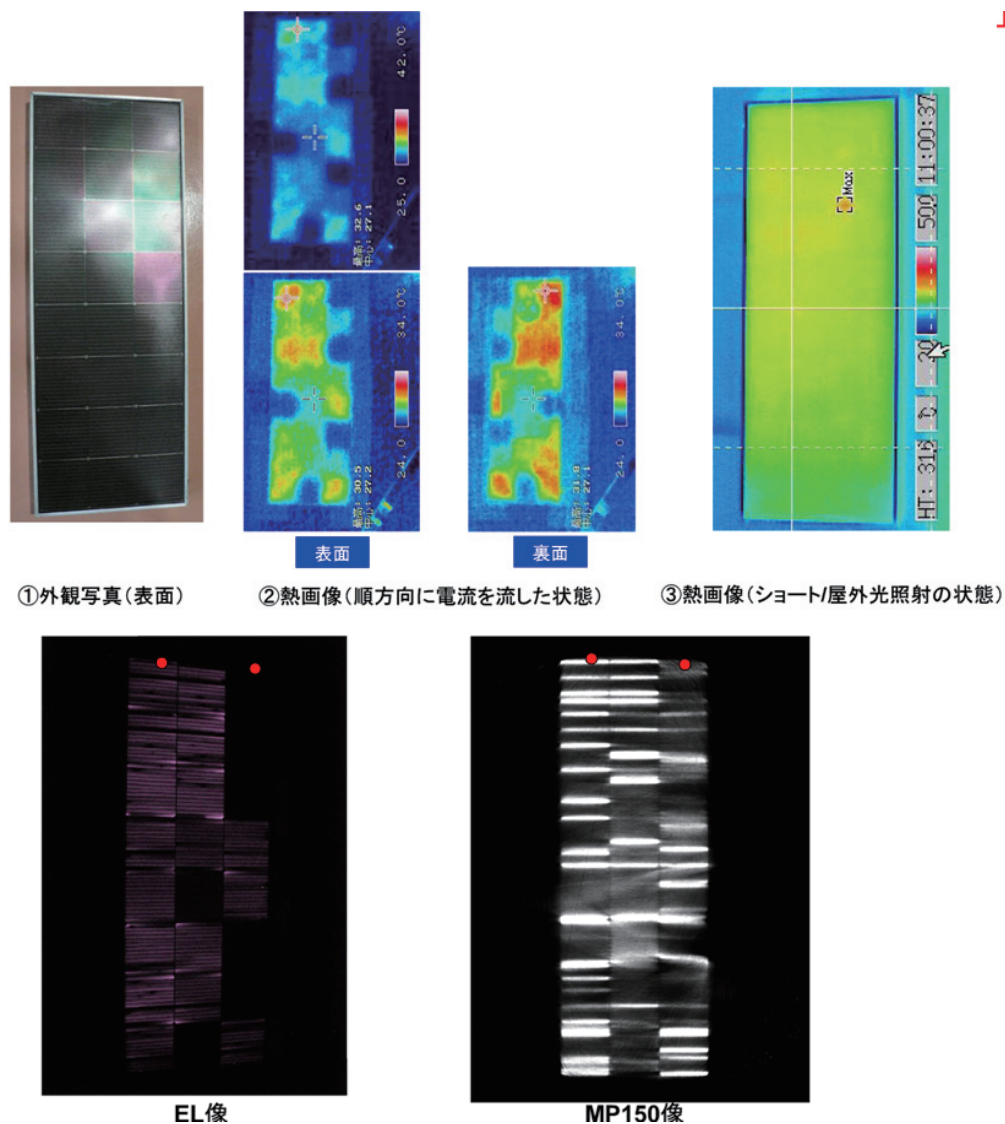


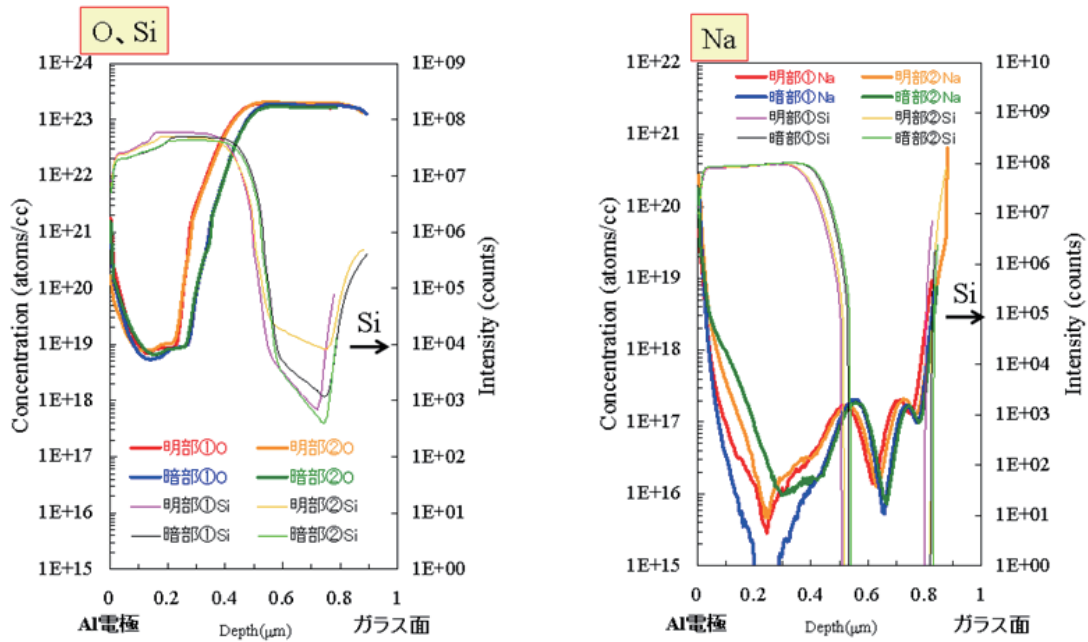
図 6.87 分析対象箇所と非破壊検査画像 (ID449)

本モジュールに対して各種分析手法を用いてEL画像暗輝度部と明部との比較を行った結果の概要は表 6.23 に、分析データの一例を図 6.88～90 に示す。

EL画像暗部と明部を比較すると、アモルファスシリコン層の膜厚やP、Bの量に差異があることが確認された。製膜時のムラなどが推定され、セル毎の膜応力やキャリア濃度にも差異を生じている可能性が考えられる。また、EL暗部では、透明導電膜として形成された酸化スズとアモルファスシリコン層の界面付近にNaが偏析していることも確認された。さらにESR分析によるとEL暗部ではダングリングボンド量が明部と比較して多いことも示唆された。それぞれの結果から、経年劣化に伴う透明導電膜の抵抗上昇や、再結合中心の増大などが考えられる。

表 6.23 アモルファスシリコン型モジュール (ID449) の分析結果概要

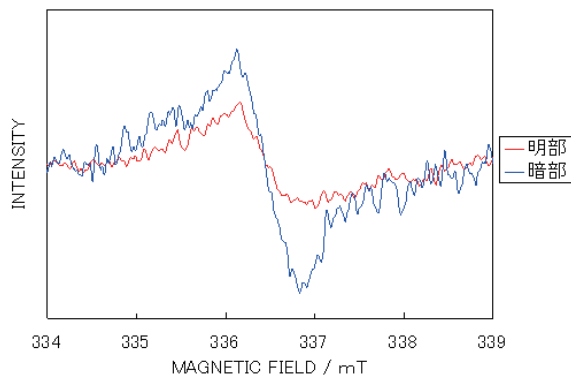
目的	手法	測定結果
モジュール解体状況確認	外観検査	シール材(外層、内層とも)劣化が認められた。 部分的に、側面が露出(外気と触れている)している場所も存在している。 配線より、横3セルが並列となる構造を有している。
セルの劣化評価	断面SEM・EPMA	後日実施
	SIMS	Si膜厚がEL暗部と明部で異なる。 ガラス側からのNa拡散と偏析が認められる。特にEL暗部ではTCO/a-Si界面に多く、a-Siへの拡散が少ない。 EL暗部では、B濃度が高い。
	ESR	EL暗部でダングリングボンド量が多い。
	FT-IR	場所間でSi-H結合に顕著な差はない
	ラマン	EL暗部で高波数シフトしていることから、a-Siに生じている圧縮応力が大きい可能性がある。
EVA構造変化	XRD	透明導電膜SnO ₂ の結晶性に顕著な差はない。
EVA構造変化	FT-IR	EL明部で外層EVAの酸化劣化が進行している。シリカもしくはケイ酸塩の増加傾向が認められる。
バックシート構成部材	FT-IR	PS + フィラー/PET/PET (内側)。 EL明部で内側PETが僅かに酸化劣化傾向にある。
シール材の部材	FT-IR	外層:アクリレート系樹脂(外層)、 内層:アクリレート系樹脂/PS-ポリイソプレン共重合体/アクリレート樹脂(粘着層)
バックシート水蒸気透過性	水蒸気透過測定	いずれも0.1 g/Day・m ² 以下。



暗部: Si膜厚が厚い。

暗部、SnO₂/a-Si界面にNa偏析?
直列抵抗の増大?

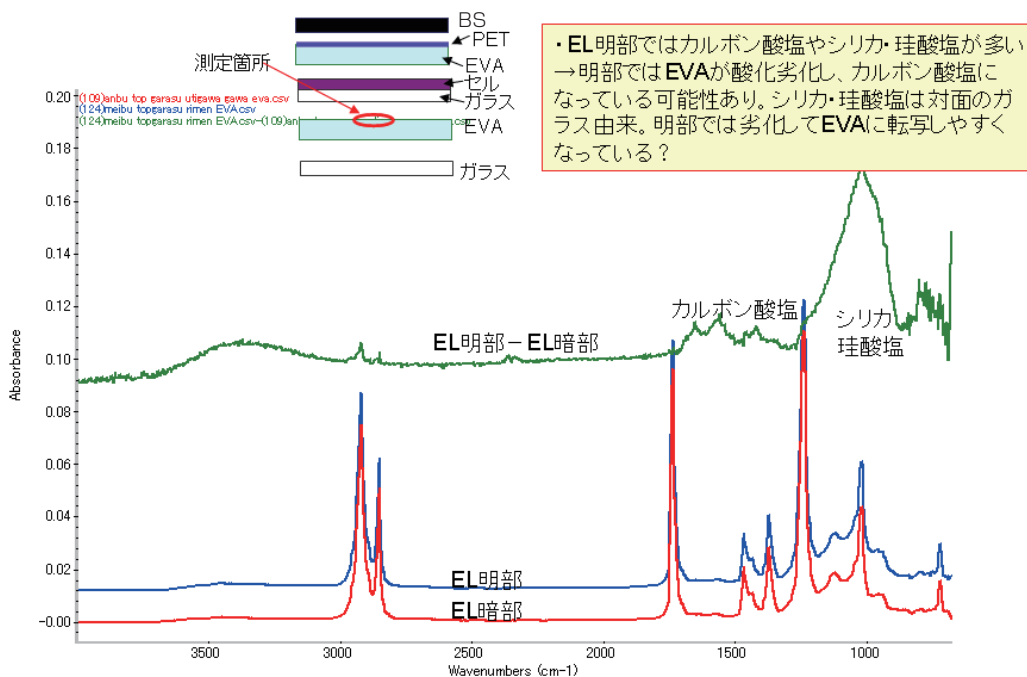
図 6.88 SIMS デプスプロファイル (S i、O、N a)



試料	g値	スピン密度 (spins/g)
明部	2.0046	2.1E+16
暗部	2.0047	4.9E+16

暗部でダングリングボンドが多い

図 6.89 ESR 法によるダングリングボンド量の定量分析



明部で酸化劣化進行。発電時の発熱大？

図 6.90 EVA 封止材層の劣化分析 (EL 暗部・明部の比較評価)

(D) 『ID163』モジュールの EL 画像アンバランスに関する分析

コベルコ科研（株）から受領した分析結果報告の要点を分析手法別に下記する。なお、異常部とは EL 画像においてセルの左右に明暗輝度の顕著な差異が観察された箇所を指す。今回、分析対象とした箇所及び非破壊検査画像を図 6.91 に示す。

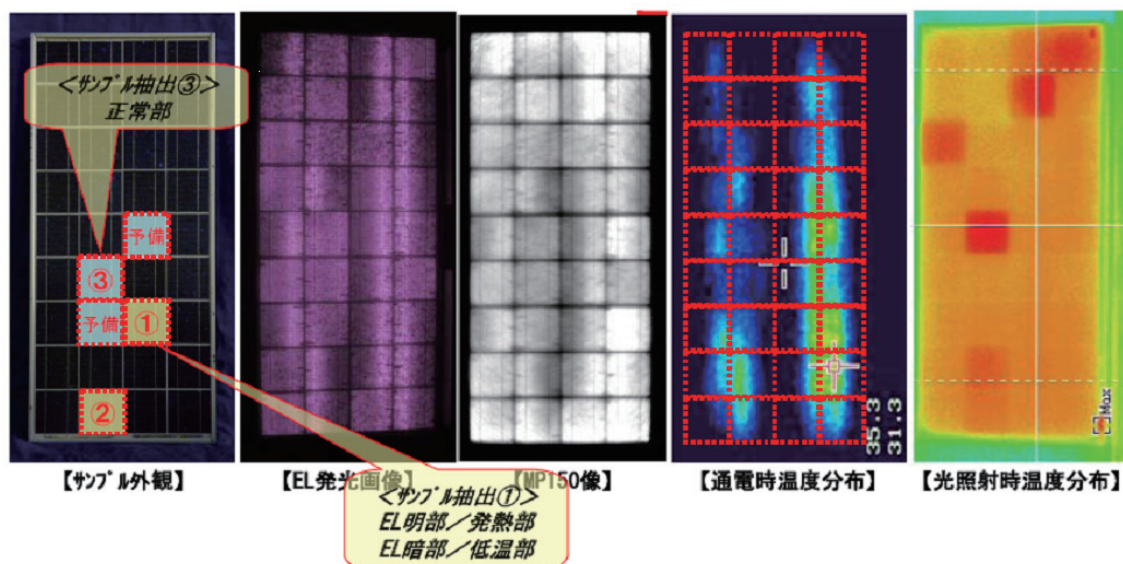


図 6.91 分析対象箇所と非破壊検査画像（ID163）

①光学顕微鏡観察

まず始めに、本モジュールにおけるセル裏面／インターコネクタ間の接合方法、状態を把握する目的で、モジュールからのセル抽出及び光学顕微鏡観察（表面、断面）を行った。モジュール裏面から、バックシート及び裏面封止材の除去を行い、その後セルの切り出しを行っているが、セル裏面と EVA 封止材との密着力は比較的弱く、容易に除去することができた（図 6.92-A）。光学顕微鏡観察（表面、断面）において、下記の 3 点が確認された。

(i) セル裏面電極はフィッシュボーン状のパターンで形成されている。この裏面電極は封止材除去時に、一部封止材側に剥がされている（図 6.92-B）。

(ii) セル裏面側のセル／インターコネクタ接合箇所において、隙間に EVA 樹脂がかなり入り込んでいる（図 6.92-C）。

(iii) セルの表面、裏面に使用されているインターコネクタのサイズ（特に幅）は大きく異なり、裏面に関してはセル側電極幅に対して、インターコネクタ幅が 2 倍程度あることが確認された（図 6.92-D）。

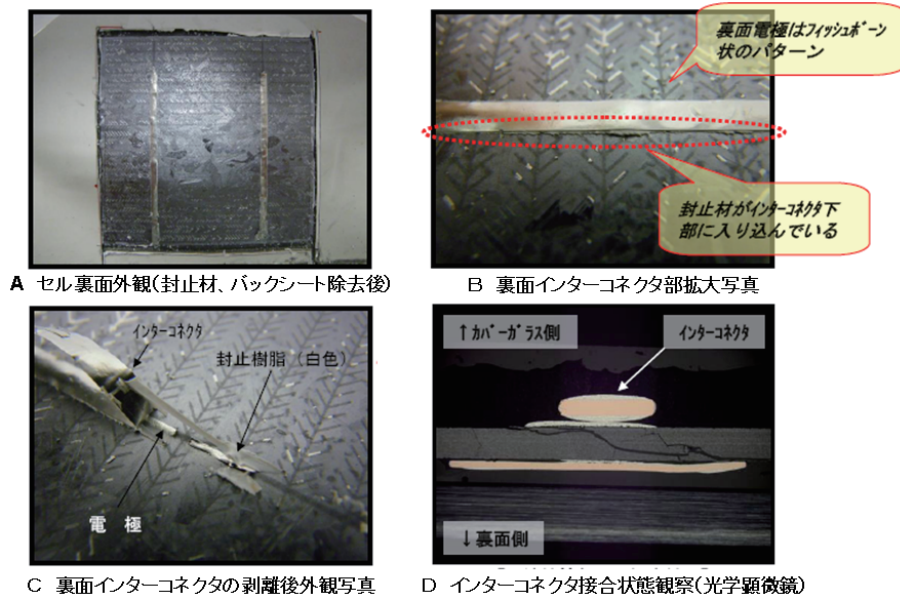


図 6.92 セル裏面側のインタコネクタ接合状態確認結果

②断面SEM観察及び元素分析 (EDX)

前項の光学顕微鏡観察を通じたセル/インターコネクタ接合状態に関する情報を踏まえ、正常部と異常部に関する接合状態の差に関する評価を行った。具体的には、断面SEM観察によって、正常部と比較して、異常部ではセル裏面電極とインターコネクタとの接着不良箇所、接着面積不足があるのでは、という視点での評価である。

以下に断面SEM及び元素分析を通じて得られた知見を記す。

(i) ハンダ接続箇所はいずれのサンプルにおいても電極膜/ウエハ間の剥離が確認された。断面解析用サンプルの抽出時、電極膜の剥離等を防ぐため、封止樹脂、バックシートを残した状態でサンプル抽出を行ってはいるものの、電極の剥離についてはサンプル抽出時の影響か、あるいは元々剥離していたかについては不明である。これまでハンダ接合部を断面解析したサンプルのすべてが電極/ウエハ間で剥離していることから、ハンダ接合部の電極/ウエハ間は他の場所に比べ、密着力が弱いことが推測される。

(ii) 3箇所(EL明発光/発熱有、EL暗発光/発熱無、EL画像正常部)の断面SEM観察結果を比較すると、サンプル間の差異は見られなかった。

(iii) ウエハ/電極界面におけるセル最表層には、電極成分であるAgではなく、SiO_xと推定される層が点在していた。セル/インターコネクタ接続状態

(iv) 各サンプルのはんだフィレット部にはいずれもクラックが観察された。

このように、EL画像において1枚のセル内左右に輝度の差を生じた原因として、セル/インターコネクタ間の接合不良を疑ったが、断面SEM観察からは、そのような状態差を確認することができなかった。

「EL明発光/発熱有」箇所の断面SEM観察及び元素分析(EDX)

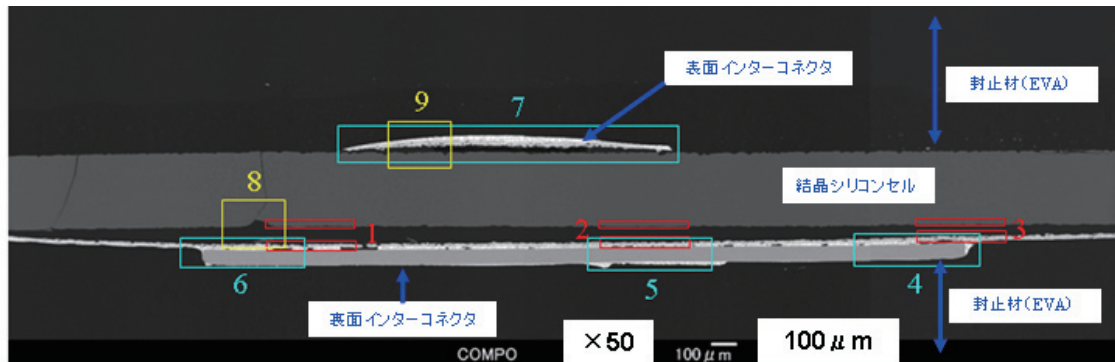


図6.93 - A インターコネクタ-接合部の断面SEM観察像

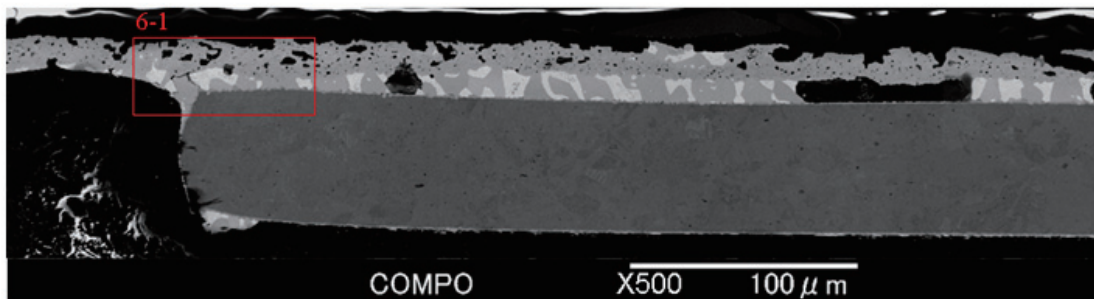


図6.93 - B 「青枠囲み6」部分の拡大SEM観察像

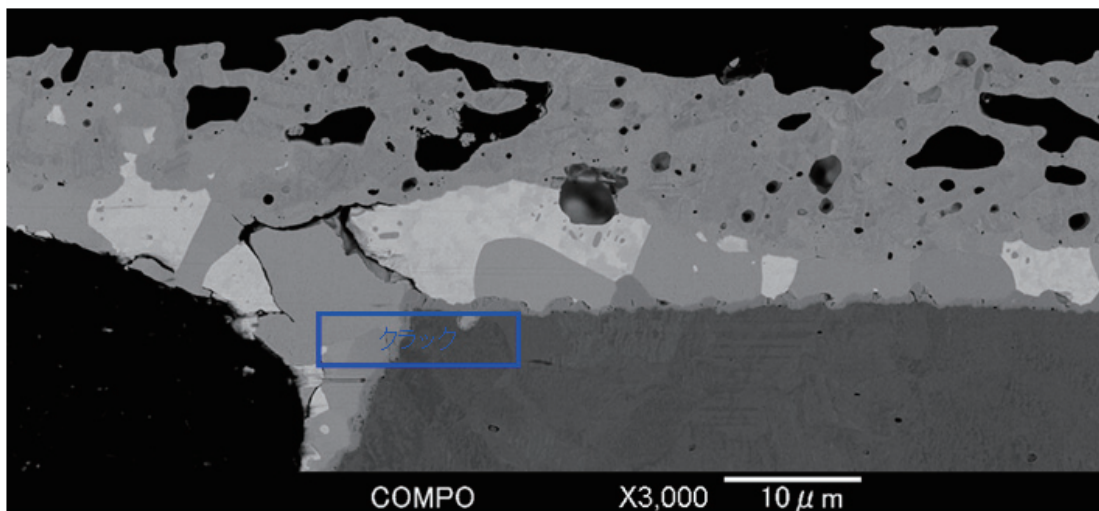


図6.93 - C 「赤枠囲み6-1」部分の拡大SEM観察像

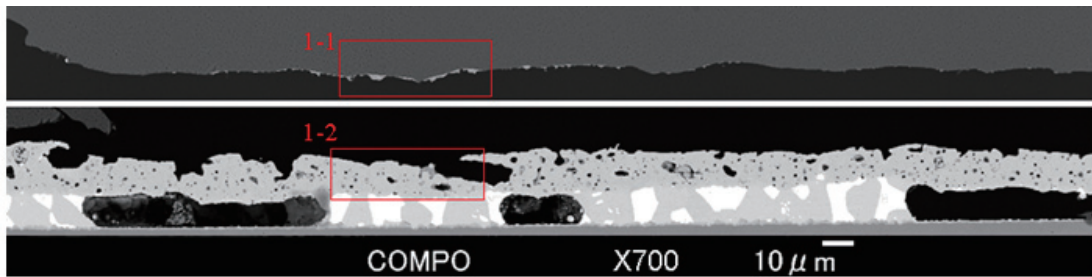


図6.93 - D 「赤枠囲み1」部分の拡大SEM観察像

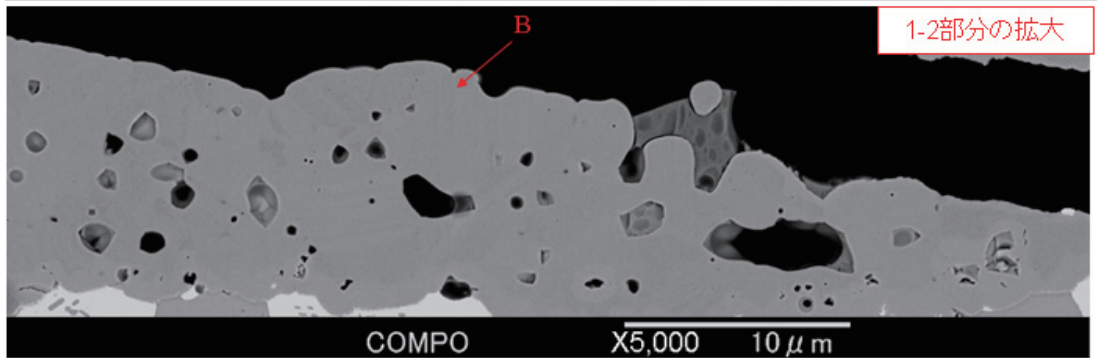
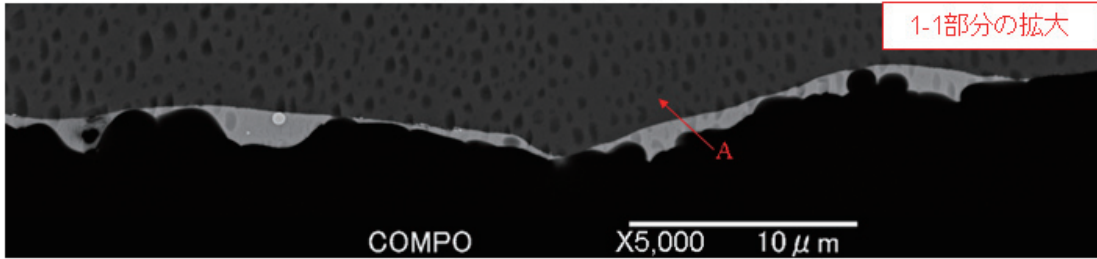


図6.93 - E 「赤枠囲み1-1、1-2」部分の拡大SEM観察像

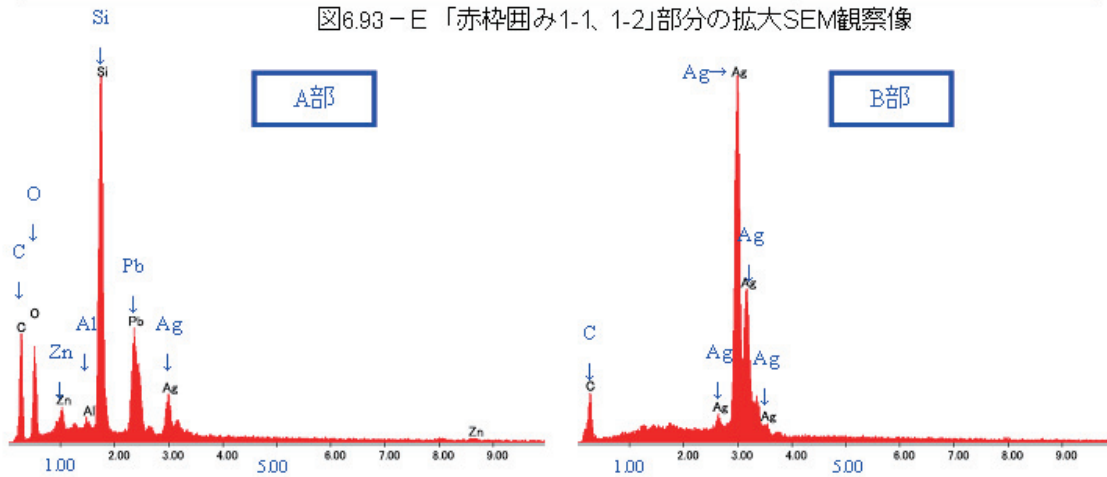


図6.93 - F 断面EDX定性分析結果(上図中のA部、B部について)

「EL 暗発光／発熱無し」箇所の断面 SEM 観察及び元素分析 (EDX)

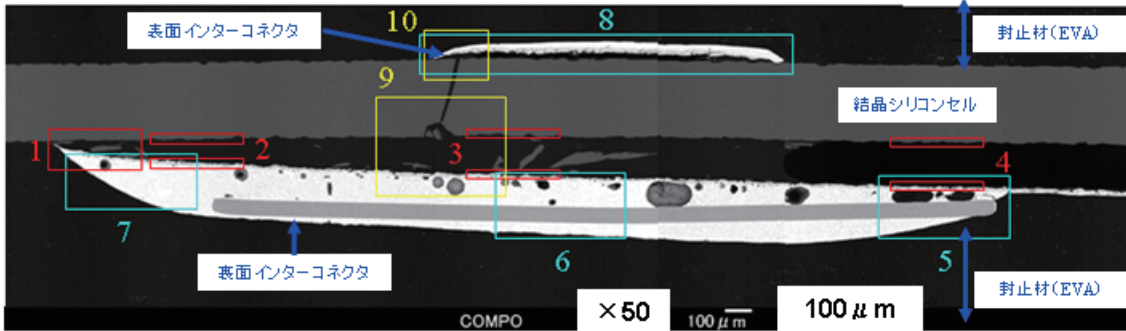


図6.94-A インターコネクタ-接合部の断面SEM観察像

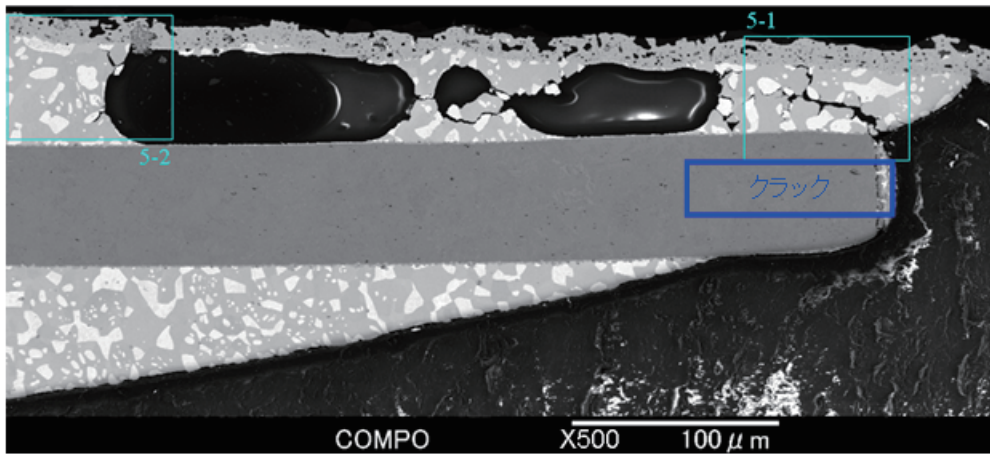


図6.94-B 「青枠囲み5」部分の拡大SEM観察像

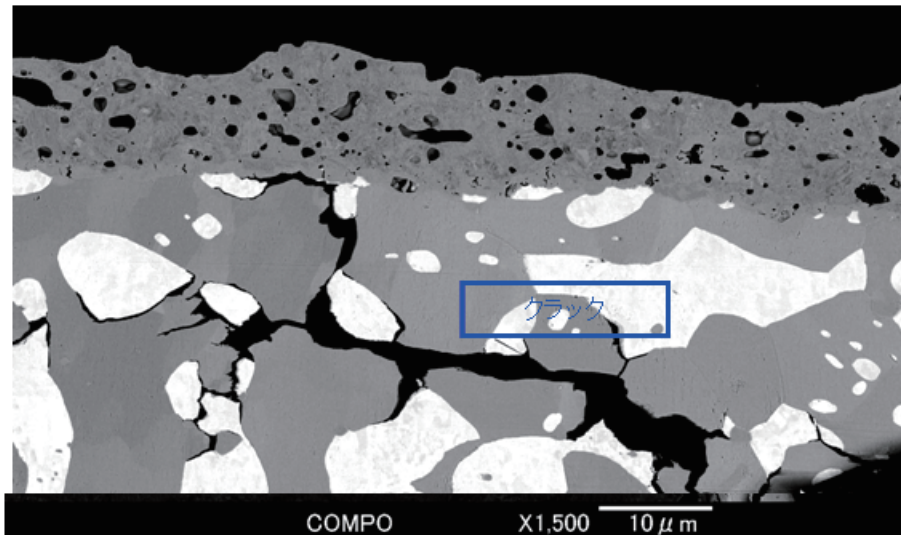


図6.94-C 「赤枠囲み5-1」部分の拡大SEM観察像

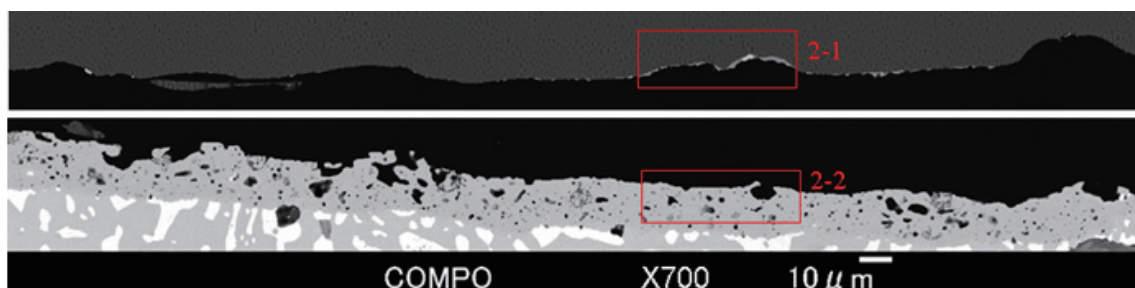


図6.94-D 「赤枠囲み2」部分の拡大SEM観察像

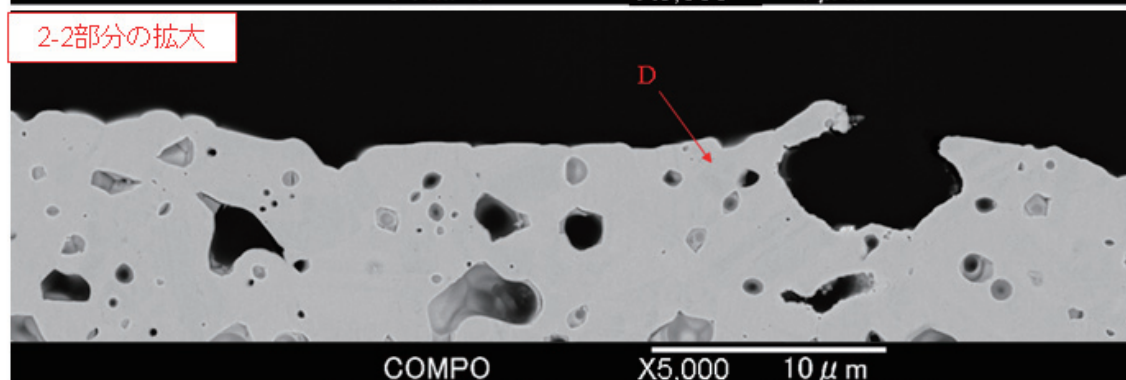
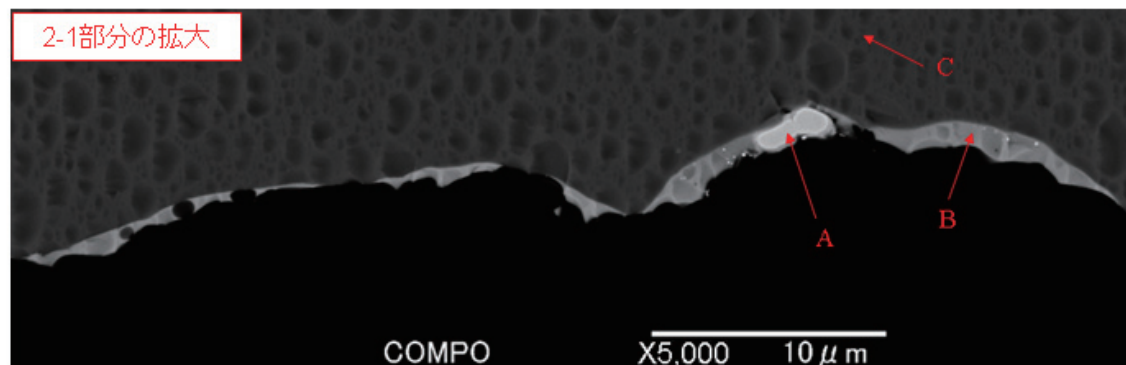


図6.94-E 「赤枠囲み2-1、2-2」部分の拡大SEM観察像

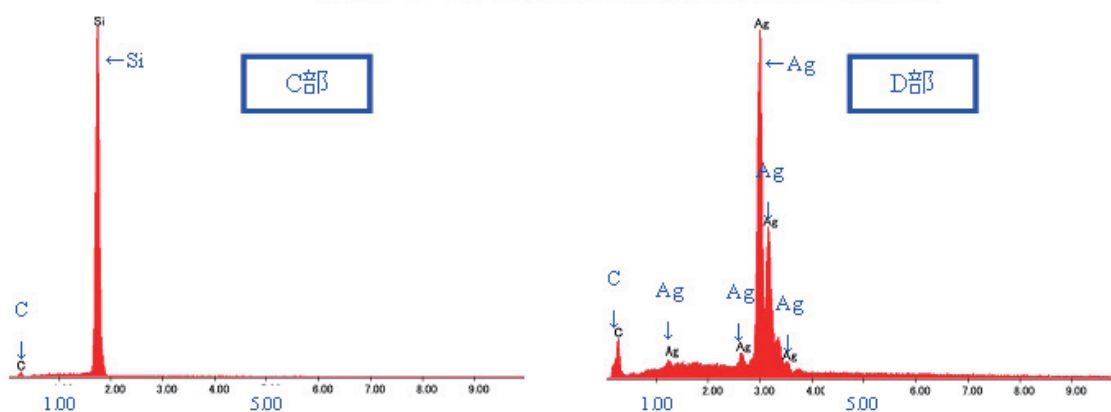


図6.94-F 断面EDX定性分析結果(上図中のA部、B部について)

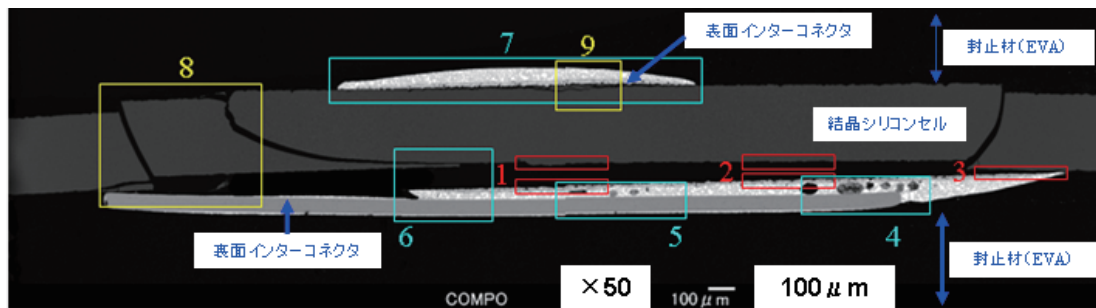


図6.95 - A インターコネクタ-接合部の断面SEM観察像

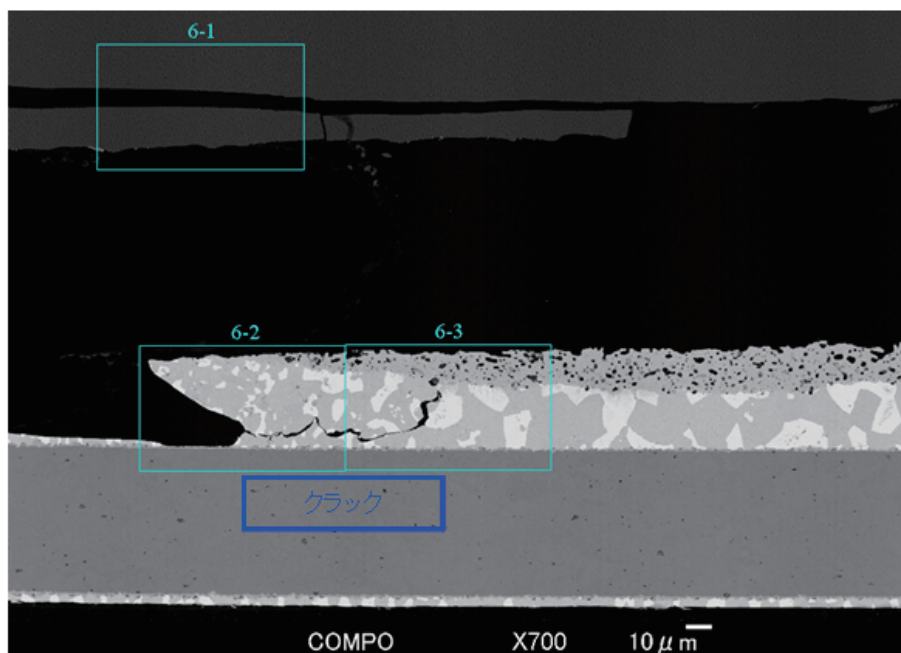


図6.95 - B 「青枠囲み6」部分の拡大SEM観察像

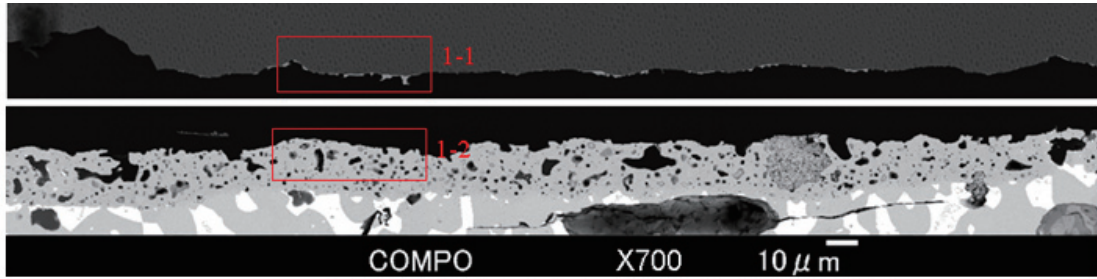


図6.95 - C 「赤枠囲み1」部分の拡大SEM観察像

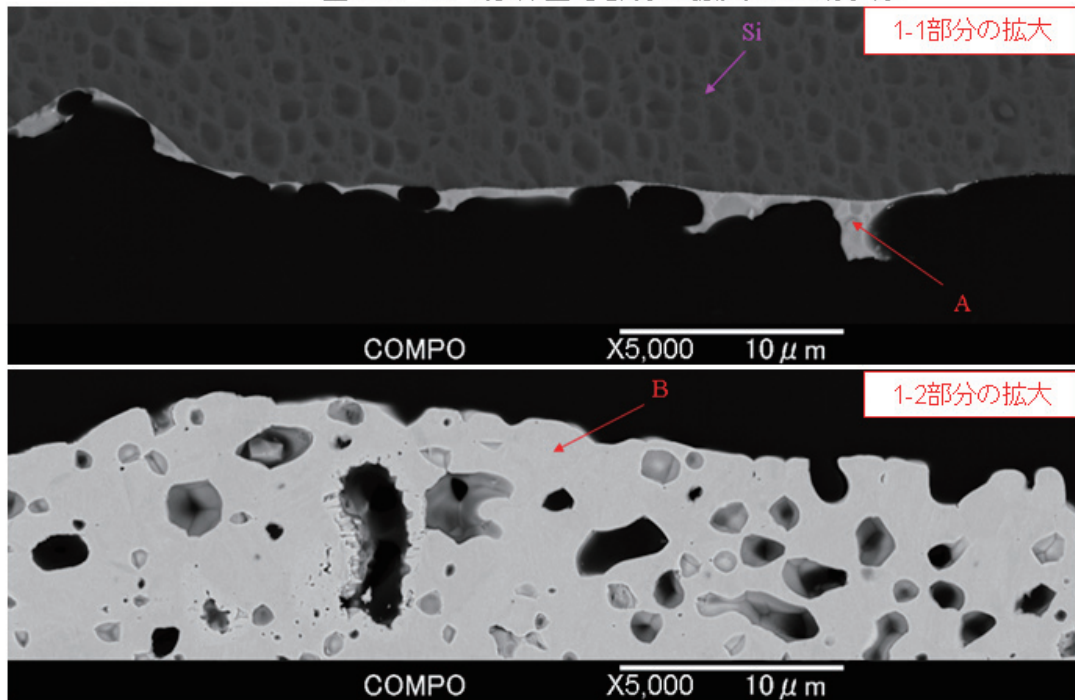


図6.95 - D 「赤枠囲み1-1、1-2」部分の拡大SEM観察像

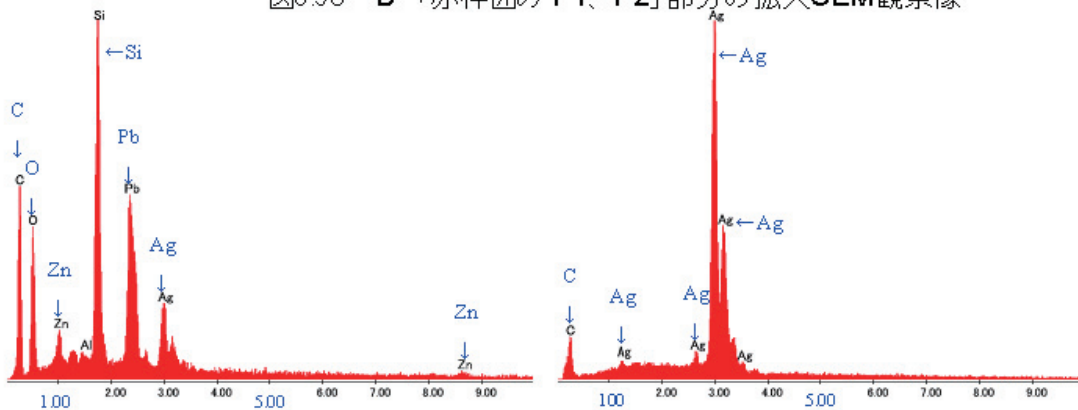


図6.95 - E 断面EDX定性分析結果(上図中のA部、B部について)

③真空インク含浸評価

セル裏面電極とセル裏側表面との密着力が乏しいという特殊事情も重なり、断面 SEM 観察では、セル／インターコネクタ間の接着状態について、正常部と異常部との間に差異を見出せなかったため、現存する接合箇所インクを含浸させ、浸透した面積の差から接合状態の差を観察できないか、という新しい評価手法を試みた。

【真空インク含浸評価の主な条件】

真空度：200 mbar

インク：硬化性特殊インク

含浸時間：5分

手順：サンプル調整→接合箇所へのインク含浸→強制剥離→剥離面観察

評価結果の詳細は次ページの図 6.91 に示すが、その概要は下記の通りである。

(i) インク含浸後にインターコネクタを強制剥離すると、いずれの試料もはんだ接合部直下の電極／セル界面で剥離を生じた。したがって、はんだ接合部と比較して、電極／セル界面の密着力の方が弱いと推察される。

(ii) インクの浸入状況は下記の順序であり、「EL 明発光／発熱有」及び「正常部」サンプルにおいて、インク浸入が確認された。

インク浸入度 (多い)「正常部」>「EL 明発光／発熱有」>「EL 暗発光／発熱無」

(iii) 「EL 暗発光／発熱無」サンプルについてはインクの浸入が見られなかったが、その理由は電極を覆う EVA 封止材が、接合界面付近の隙間に入り込み、インクの浸入を抑制しているためと推定。

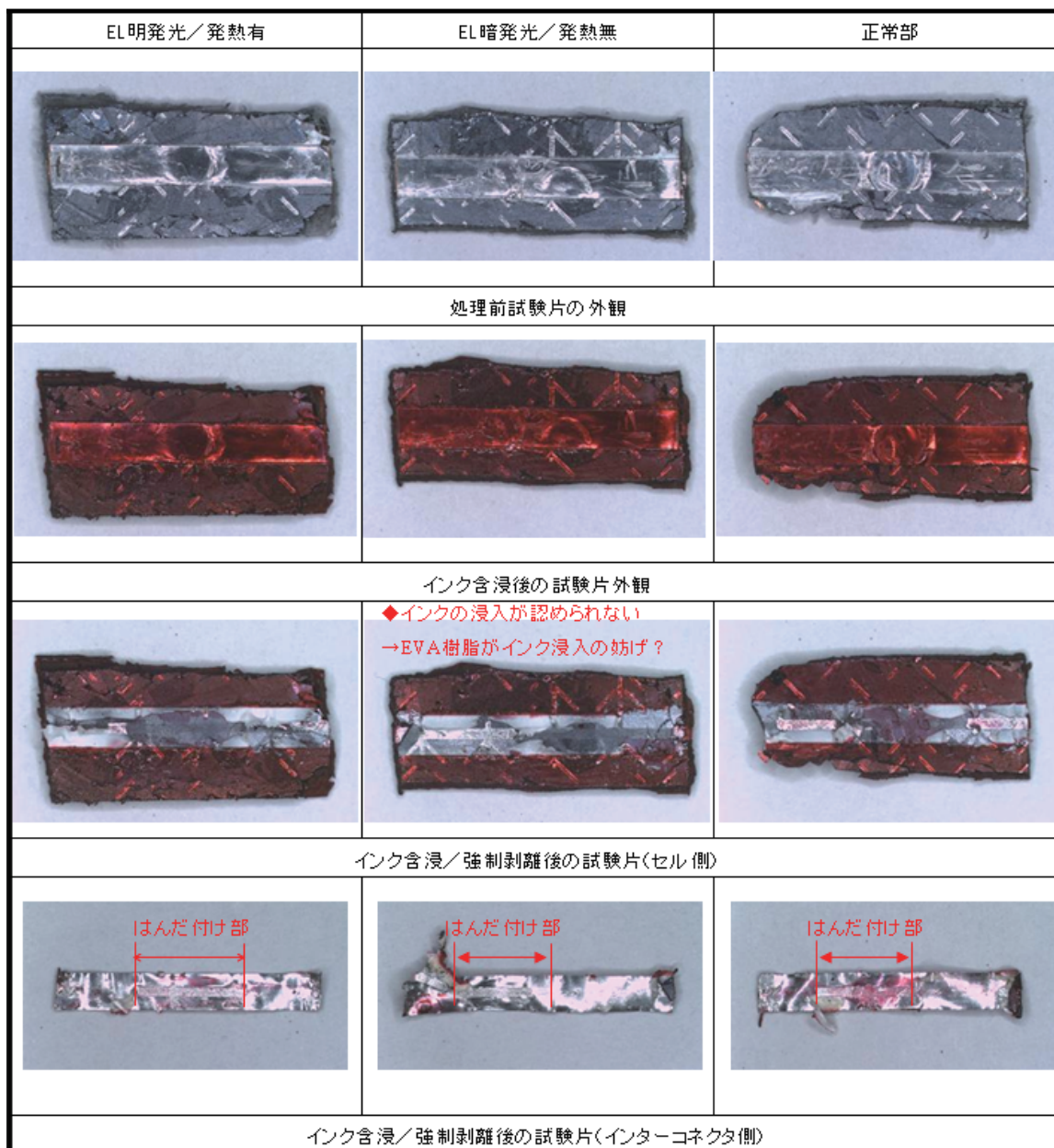


図 6.96 インク含浸評価の結果 (概観写真)

6.3.3.2 セル個別の I-V 特性測定と EL 画像検査

セル個別に行った I-V 特性測定と EL 画像検査の結果をモジュール毎にまとめる。

(1) CNS151(型式：D-d1)

本モジュールの個別評価対象セルで図 6.97 の外観画像中のセル②～⑥、⑧、⑨のセル毎の個別 I-V 特性測定を行い、外観特徴が②～⑥、⑧、⑨のいずれかと類似している①、⑦については測定を行わなかった。また、セル②、④～⑥、⑧、⑨の個別の EL 画像測定を行った。

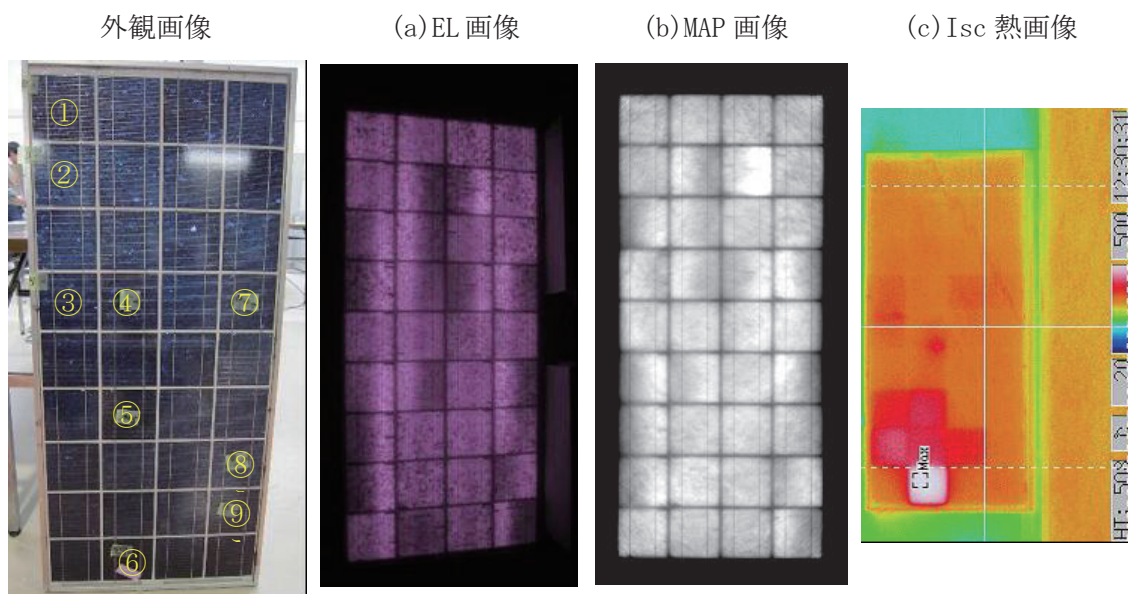


図 6.97 個別延長配線取り出し前の画像観察結果

個別測定した I-V 特性の結果を表 6.24 にまとめた。

表 6.24 セル個別の I-V 特性測定

セル No.	外観・画像特徴	FF	Pmax (W)	効率 (%)	Voc (V)	Isc (A)	Rs (Ω)	Rsh (Ω)
②	異常無	0.709	1.180	10.91	0.584	2.856	0.033	30.7
③	EL、MAP で明暗逆転	0.682	1.124	10.39	0.581	2.838	0.039	43.0
④	EL 左右で明暗	0.704	1.176	10.91	0.585	2.866	0.037	18.0
⑤	EL、MAP で明暗逆転	0.707	1.190	11.01	0.584	2.879	0.033	15.7
⑥	発熱	0.706	1.127	10.42	0.582	2.742	0.035	26.7
⑧	EL 左右で明暗	0.694	1.142	10.56	0.582	2.826	0.035	33.7
⑨	EL 左右で明暗	0.697	1.172	10.84	0.582	2.893	0.035	15.0

※各データは 5 回測定の平均、ただし Rsh は、最大、最小を除いた平均。

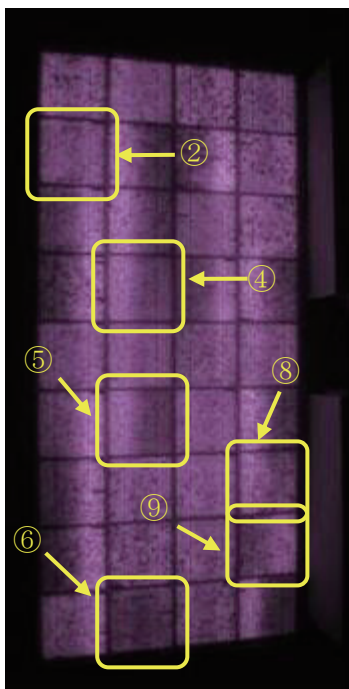
CNS151 モジュールのセル個別の I-V 特性測定の結果から下記の特徴が認められた。

- Isc 熱画像で発熱が見られたセル⑥の特性は、異常が見られないセル②に比べて Isc が 0.1A ほど低くなっていた。
- EL、MAP で 1 枚の中に左右で明暗が分かれたセルには、EL 画像、MAP 画像とも同じ側に明暗が見られたセル④⑧⑨と、EL 画像、MAP 画像で明暗の位置が逆転していたセル③⑤があるが、異常が見られないセル②と比べても I-V 特性に特定の特徴は見られなかった。

セル個別に測定して得た EL 画像を、セル個別延長配線取り出し前の EL 画像と共に図 6.98 に示す。

セル④、⑤、⑧、⑨はセル個別延長配線取り出し前の EL 画像で 1 枚のセルの中に左右で明暗が分かっていたが、セル個別で測定した EL 画像では、左右の明暗差は無く、均一な発光状態となっていた。このことから、これらのセル自体には左右の明暗差を生じるような異常はないことがわかった。これらのセルで左右の明暗差が見られた原因は、前後のセルと接続されるタブ線の接続状態に異常があり、左右の抵抗にアンバランスが生じたことによるものと考えられる。セル個別延長配線取り出し後に左右の明暗差が無くなったのは、左右のタブ線同士が短絡されたことで、左右の抵抗のアンバランスが解消されたためと考えられる。

個別配線取り出し前の EL 画像



セルの個別測定で得た EL 画像

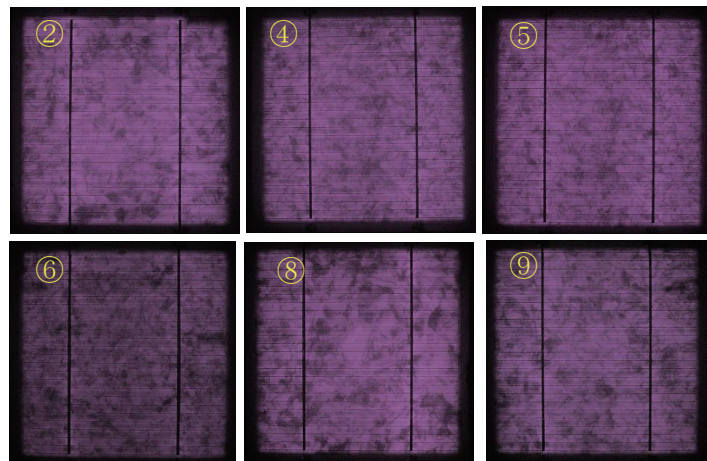


図 6.98 CNS151 モジュール 個別 EL 画像

上述の通り、CNS151 モジュールの通常の EL 画像検査で左右に明暗差が見られ、今回セル個別の測定対象としたセルでは、セル自体には異常がないことが分かった。EL 画像の明暗差は、配線接続状態の影響を受けて生じていると考えられる。

セル間の配線接続状態の影響を確認するため、CNS151 モジュールのセル個別の EL 画像検査を実施後、セル個別の延長取り出し線はそのまま、モジュール全体の EL 画像検査を再度行った。その結果、セル個別延長取り出し線加工の前後で明暗位置が変わるセルと、変わらないセルがあった。

例えば、図 6.99 のセル個別延長配線取り出し加工前の A 位置のストリングに着目すると、セル個別延長配線取り出し加工後は図 6.99 の B 位置のストリングのようになっており、セル④、⑤の左右の明暗が解消し、図中セル④の上側の 2 枚のセルの左右の明暗差には変化が無いことが分かった。セル個別延長配線取り出し前後のこのストリングの明暗の変化を図 6.99 の模式図に示した。

セル個別延長配線取り出し前のセル⑤の EL 画像で右側が暗くなっている理由が、セル⑤のガラス面側の右側のインターコネクタの接続不良であると仮定した場合には、セル個別延長配線取り出し後のセル⑤の左右の明暗差は解消しないはずであり、セル⑤の左右の明暗差は、セル⑤のガラス面から伸びたインターコネクタが接続されているセル⑤の図中上側にあるセル（セル⑤とセル④の間のセル）の裏面に接続されたインターコネクタの接続不良が原因で生じているものと推定することができる。セル⑤とセル④の間のセルは、セル個別延長配線取り出し前の通常の EL 画像検査や MAP 画像の観察では特に異常は見られなかったセルであり、このような評価によって初めて異常があると推定できたものである。

同様の考察により、セル④の左右明暗差の原因もセル④自身の配線接続不良ではなく、セル④の図中上側のセル裏面のインターコネクタの接続不良と推定できる。

このように、セル個別延長配線取り出し前後の EL 画像の変化から、通常の EL 画像観察だけでは分からない不良個所の推定が可能な場合があることが分かった。

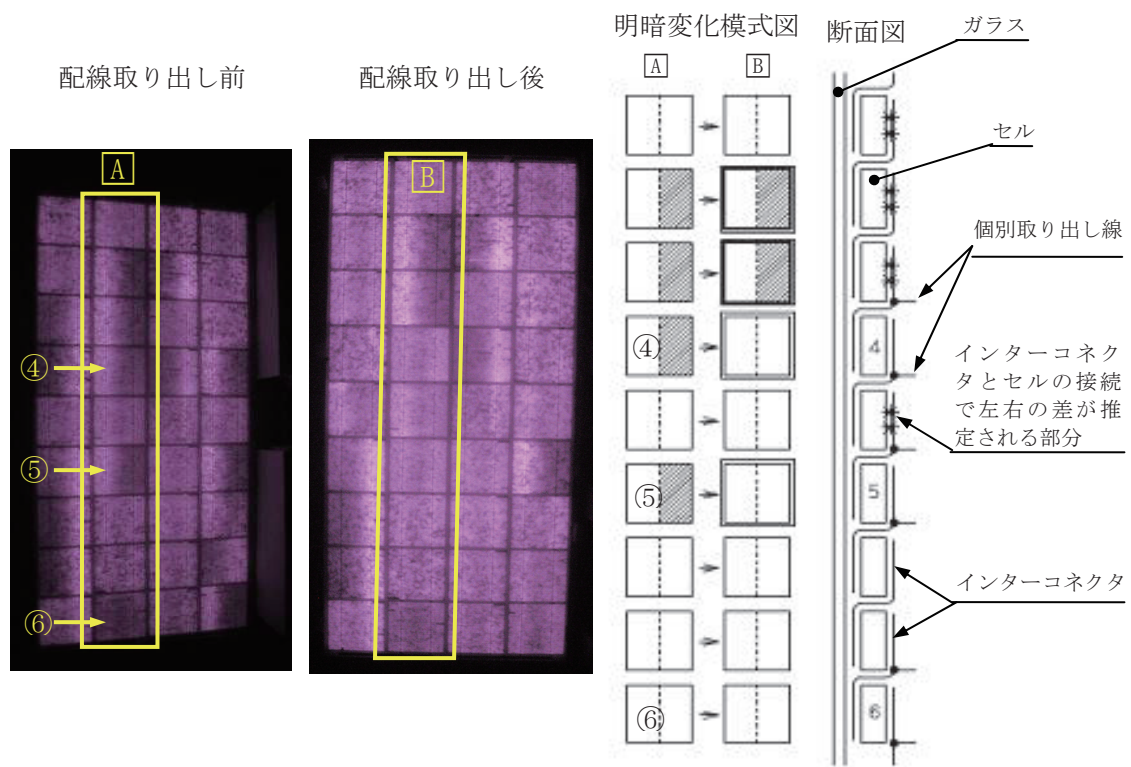


図 6.99 セル個別延長配線取り出し前後の EL 画像変化

(2) CNS242 (型式: B-b1)

本モジュールの個別評価対象セルで図 6.100 の外観画像中のセル①～⑤の個別の I-V 測定と EL 画像測定を行い、外観特徴が①～⑤のいずれかと類似している⑥、⑦については測定を行わなかった。また、逆バイアスでの EL 画像測定も行った。

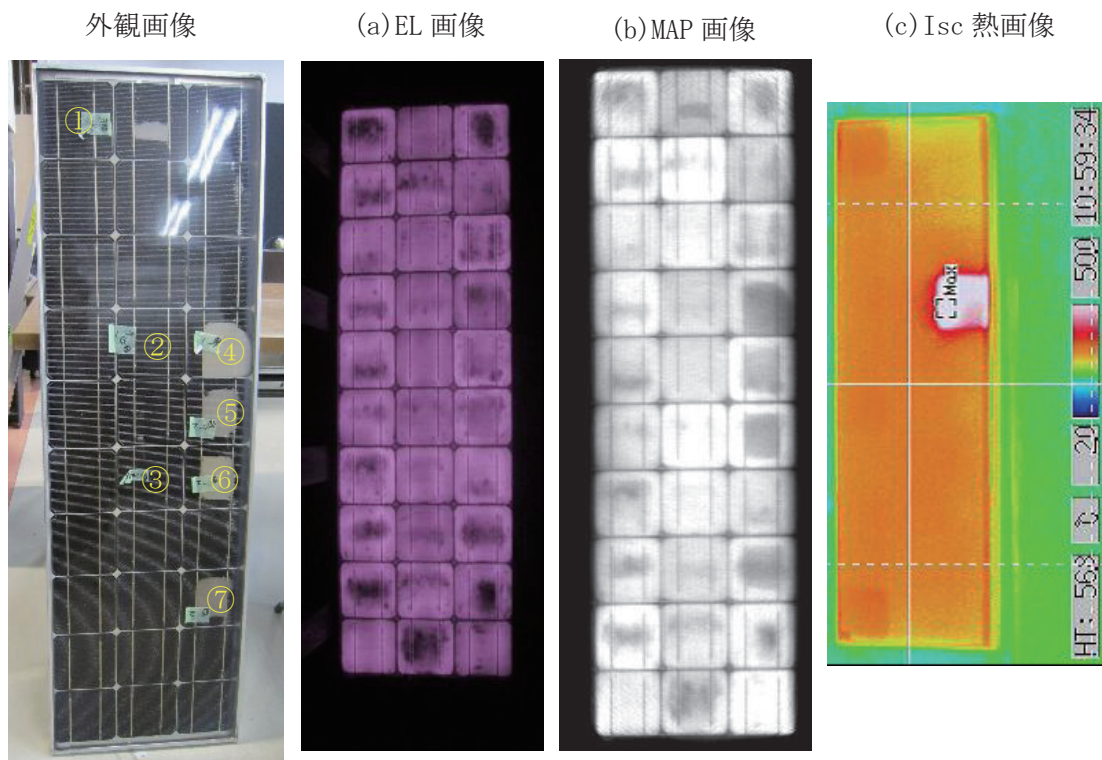


図 6.100 セル個別延長配線取り出し前の画像観察結果

個別測定した I-V 特性の結果を表 6.25 にまとめた。

表 6.25 セル個別の I-V 特性測定

セル No.	外観・画像特徴	FF	Pmax (W)	効率 (%)	Voc (V)	Isc (A)	Rs (Ω)	Rsh (Ω)
①	EL、MAP にて暗部有	0.632	1.020	10.40	0.585	2.754	0.044	16.4
②	劣化無し	0.700	1.130	11.50	0.588	2.746	0.036	19.7
③	EL 劣化無し, MAP で明	0.689	1.144	11.68	0.582	2.853	0.038	12.7
④	白濁、発熱	0.703	0.905	9.24	0.579	2.226	0.043	20.5
⑤	白濁、④の隣	0.680	0.995	10.15	0.582	2.516	0.042	15.6

※各データは 5 回測定の平均、ただし Rsh は、最大、最小を除いた平均。

CNS242 モジュールのセル個別の I-V 特性測定の結果から下記の特徴が認められた。

- EL、MAP 画像で暗部があるセル①は暗部が無いセル②③に比べて R_s の増加、FF の低下を伴う 1%以上の効率低下が見られた。
- EL、MAP 画像で暗部があり、かつ白濁があるセル⑤は、EL、MAP 画像で暗部があっても白濁がないセル①に比べると効率で 0.2%、 I_{sc} で 0.2A 低い特性であった。
- EL、MAP 画像で暗部があり、さらに外観で白濁、 I_{sc} 熱画像で発熱が見られたセル④ではセル⑤に比べてさらに効率、 I_{sc} が小さく、 V_{oc} も小さくなっていた。

セル個別に測定して得た EL 画像を、セル個別延長配線取り出し前の EL 画像と共に図 6.101 に示す。

各セルの EL 画像の暗部の形状などは、セル個別延長配線取り出しの前と個別測定とで特に変化が見られなかった。このことから、本モジュールの EL 画像における暗部発現に対してインターコネクターの接続状態の影響は小さく、セルごとの劣化や異常などで暗部となったものと考えられる。

個別配線取り出し前の EL 画像

セルの個別測定で得た EL 画像

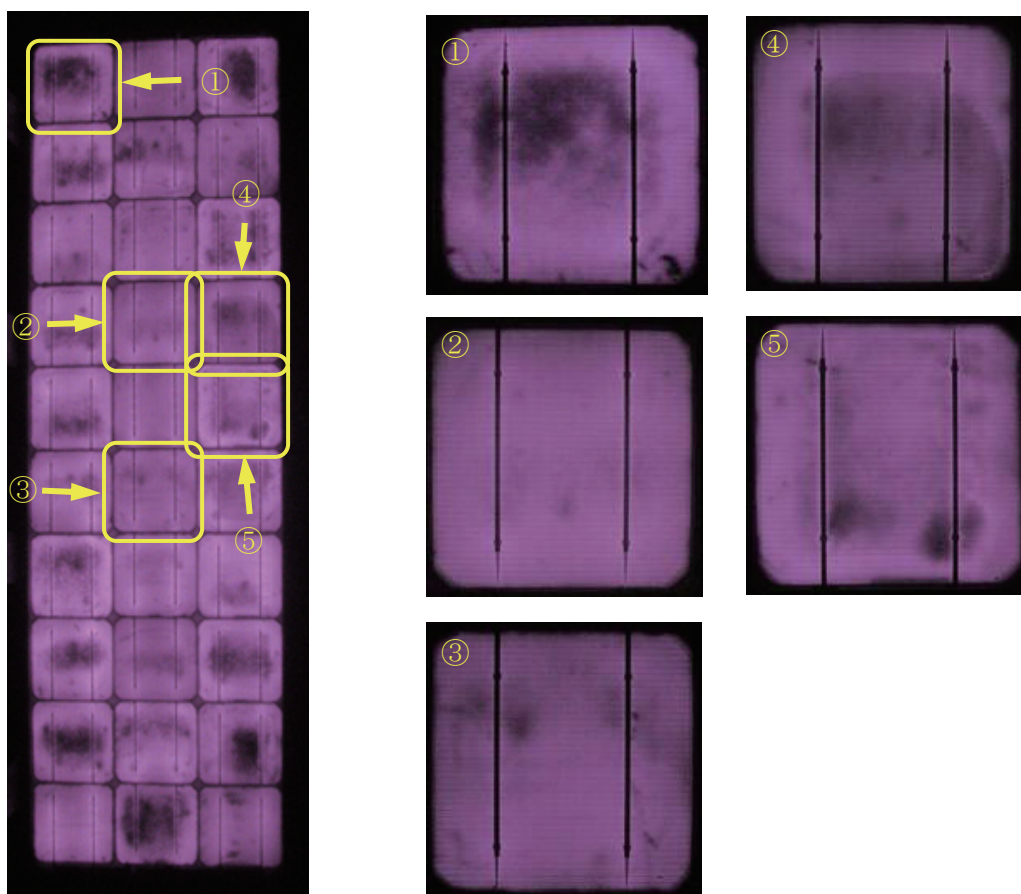


図 6.101 CNS242 モジュール セル個別 EL 画像

CNS242 モジュールではセル個別延長配線取り出しを行ったセルで逆バイアスでの EL 画像撮影も行った。面内に暗部が見られたセルや白濁が見られたセルを含め、逆バイアスで撮影したいずれのセルでもドットレベルの微小な輝点は見られるものの、セルの外側に見える輝点や、複数の画像に共通して同じ場所に見える輝点が多く、ランダムノイズや固定ノイズの可能性が考えられ、明確に逆バイアスによる発光と判断できる輝点ではなかった。代表的な例を図 6.102 に示す。

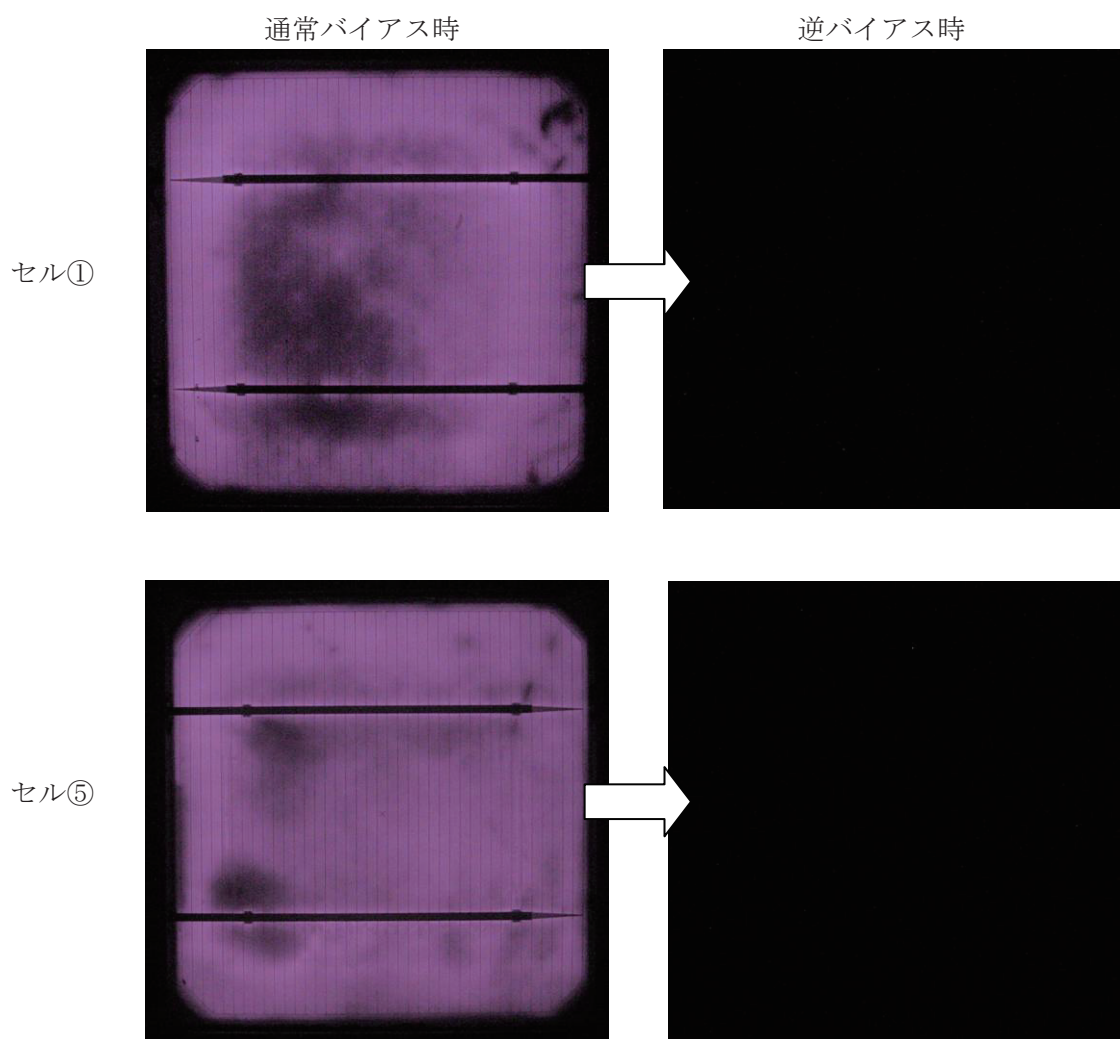


図 6.102 CNS242 モジュール セル個別 EL 画像 逆バイアス印加

(3) CNS450(型式：A-a3)

本モジュールの個別評価対象セルで図 6.103 の外観画像中のセル①～⑤の I-V 測定を行い、外観特徴が⑤と類似している⑥については測定を行わなかった。個別の EL 画像撮影は、①～⑥のセルについて行った。

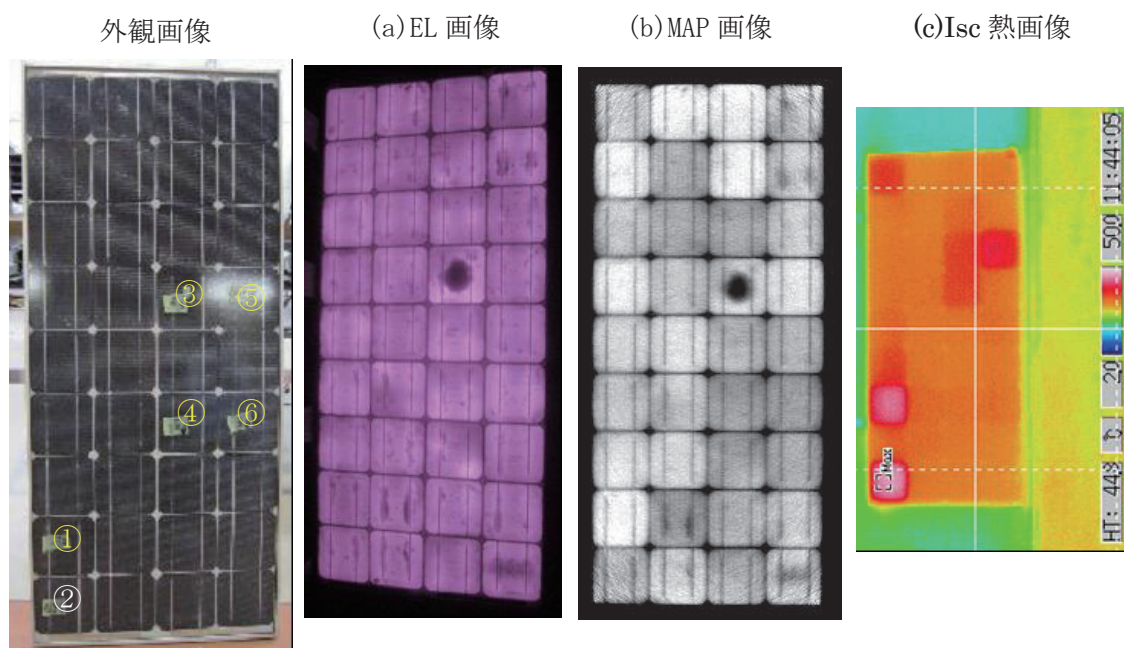


図 6.103 セル個別延長配線取り出し前の画像観察結果

個別測定した I-V 特性の結果を表 6.26 にまとめた。

表 6.26 セル個別の I-V 特性測定

セル No	外観・画像特徴	FF	Pmax (W)	効率 (%)	Voc (V)	Isc (A)	Rs (Ω)	Rsh (Ω)
①	発熱セルに隣接、MAP で明	0.691	1.230	12.55	0.591	3.010	0.033	21.7
②	発熱セル	0.682	1.206	12.31	0.596	2.972	0.039	13.9
③	EL で暗部、裏面に熱電対	0.602	0.952	9.88	0.590	2.725	0.042	2.2
④	裏面に熱電対	0.699	1.217	12.42	0.594	2.931	0.033	31.3
⑤	外観異常なし、MAP でやや明	0.705	1.128	11.51	0.593	2.698	0.033	16.6

※各データは 5 回測定の前平均、ただし Rsh は、最大、最小を除いた平均。

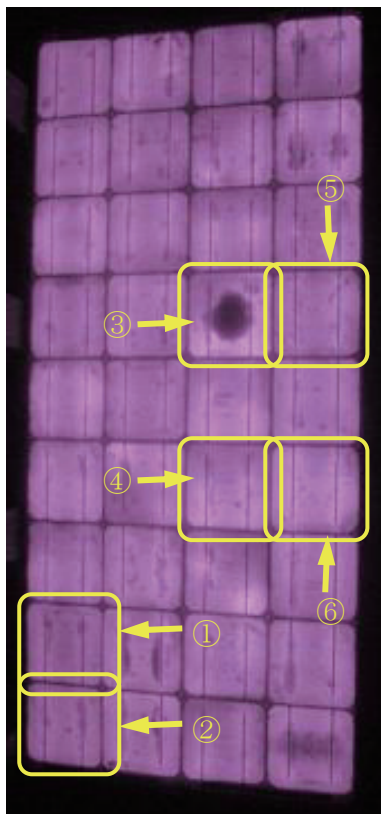
CNS450 モジュールのセル個別 I-V 特性測定の結果から下記の特徴が認められた。

- ・裏面に熱電対があり、EL、MAP 画像で暗部の見られたセル③は、同じく裏面に熱電対があっても EL、MAP 画像に異常が見られなかったセル④と比較して R_s が高く R_{sh} が低くなっており、FF、効率の低下が見られた。
- ・MAP 画像で明るく表示されたセルのうち、セル①の特性は他のセルと比べて際立った特徴は見られなかったが、セル⑤は R_{sh} がやや小さいほか I_{sc} が小さく、効率の低下が認められた。 I_{sc} 熱画像で発熱が見られたセル②では CNS151 モジュールや CNS242 モジュールの発熱セルと異なり I_{sc} が特に小さいということはなく、 R_s がやや高い値を示した。

セル個別の EL 画像撮影の結果を図 6.104 に示す。

セル個別の EL 画像は、セル個別延長配線取り出し前の EL 画像と比べて暗部の形状、位置などに特に変化は見られなかった。このことから、本モジュールで見られた EL 画像の暗部発現には、インターコネクターの接続状態は影響していないと考えられる。

個別配線取り出し前の EL 画像



セルの個別測定で得た EL 画像

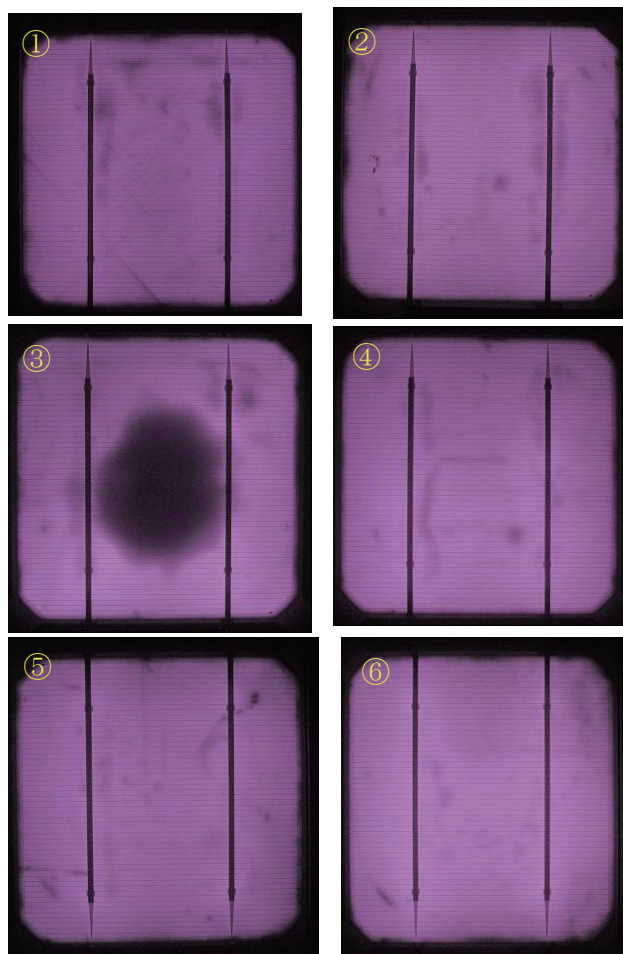


図 6.104 CNS450 モジュール セル個別 EL 画像

CNS450 モジュールでもセル個別延長配線取り出しを行ったセルで逆バイアスでの EL 画像検査を行った (図 6.105、図 6.106)。セル①、⑥ではセルのエッジに沿って発光が観察された他、セル⑤ではエッジだけでなく、セル面内でも僅かに発光が観察された。熱画像で高温となっていたセル②ではセル面内に発光が観察された。セル裏面に熱電対と思われる加工があり、EL 画像、MAP 画像でセル中央に暗部が見られたセル③では、セル端部、セル面内とも目立った発光は観察されなかった。セル③で見られる暗部と、他のセルで逆バイアス時に見られた発光部は異なる種類の異常部と考えられる。

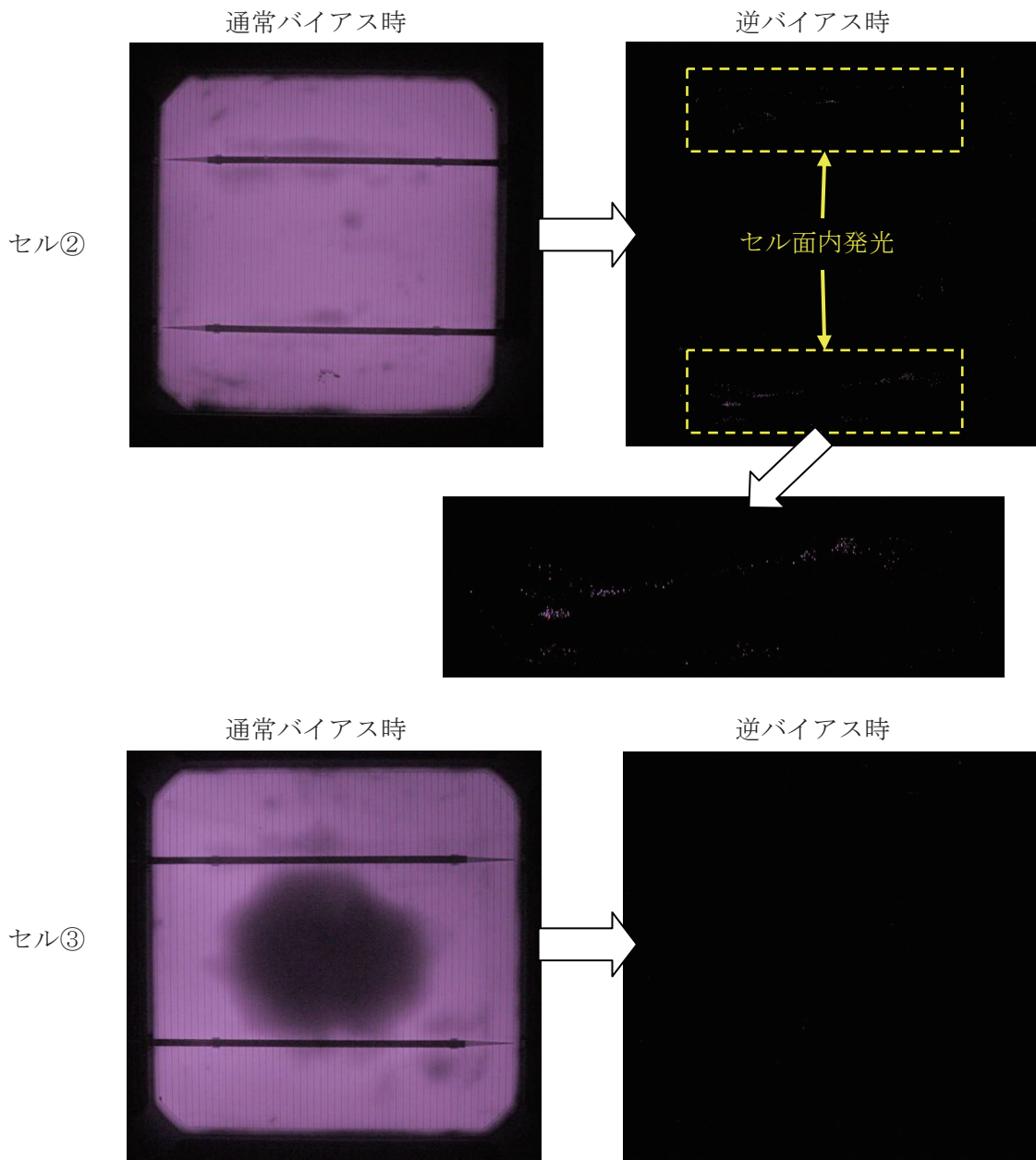


図 6.105 CNS450 モジュール 個別 EL 画像 逆バイアス印加(1)

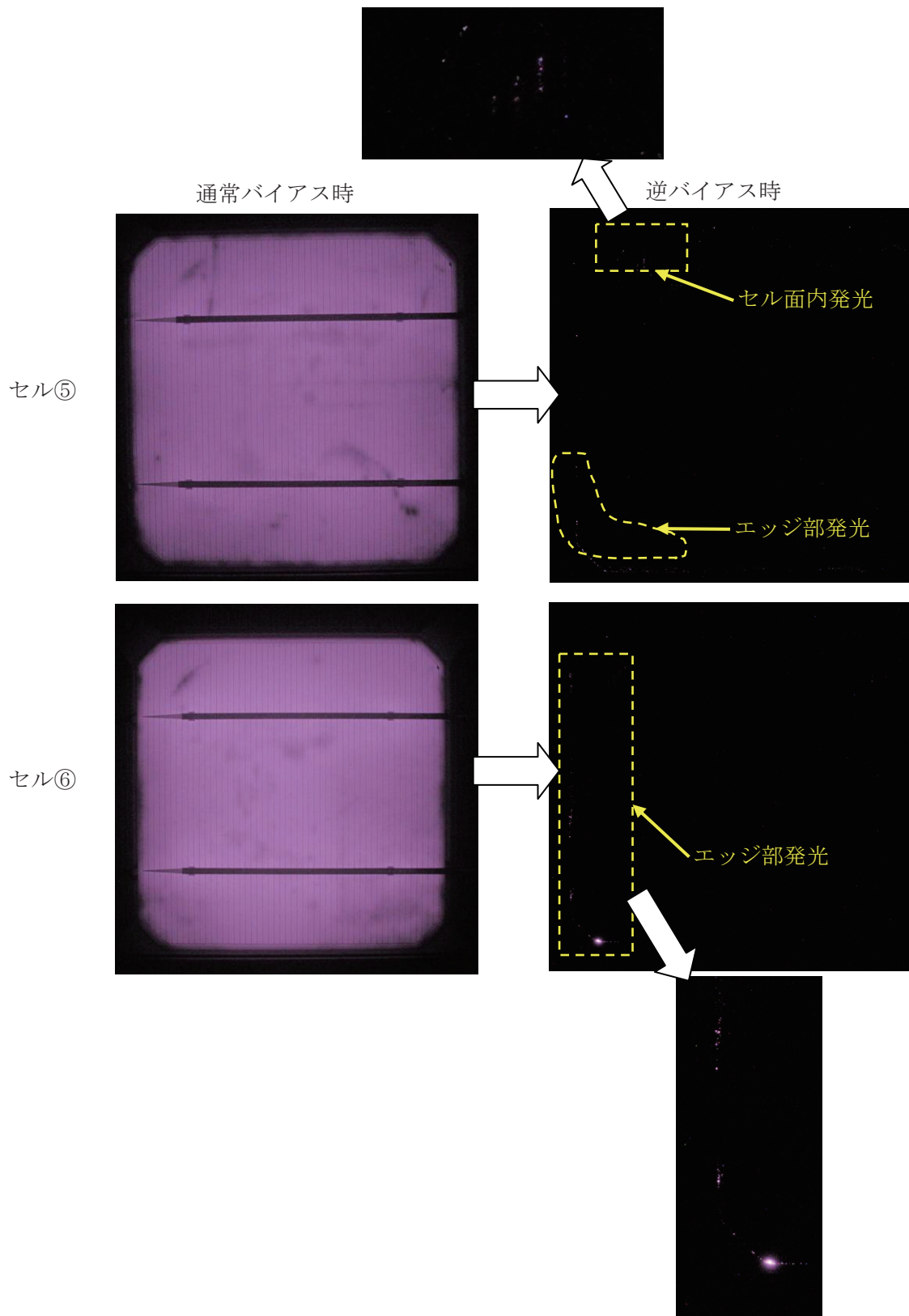


図 6.106 CNS450 モジュール 個別 EL 画像 逆バイアス印加(2)

6. 3. 4 考察

6. 3. 4. 1 外注破壊分析

白濁外観不良に関する分析結果から、白濁発生メカニズムを下記の通り推定することができる。ただし、あくまで分析結果（状況証拠）から推定したメカニズムにしかすぎず、軽微な剥離を生じているモジュールなどを用いた推定メカニズムを検証する実験、分析が必要と考えられるため、実行に向けた準備を進めていきたい。

<白濁外観不良の推定発生メカニズム>

- ①セル表面の反射防止膜はアナターゼ型酸化チタン（ TiO_2 ）であり、長期屋外曝露により反射防止膜表面側に積層された EVA の酸化劣化を促進。
- ②上記の酸化劣化、外部から浸入した水との反応により EVA から酢酸が脱離。
- ③生じた酢酸がガラス中のナトリウムと反応し、酢酸ナトリウムを生じ、EVA 中へのナトリウム拡散を引き起こした。
- ④Na はさらに EVA/反射防止膜の界面近傍まで分散し、リン酸ナトリウムの形成などを引き起こした。
- ⑤EVA 自体の酸化劣化や、酢酸ナトリウム、リン酸ナトリウム、硫酸塩、珪酸塩などの塩の存在から EVA/反射防止膜界面の密着力が低下し、剥離、白濁外観不良を引き起こした。

次に、EL 検査において1枚のセルの中に左右の輝度アンバランスが複数箇所観察された D-d1 モジュールのセル/インターコネクタ接合状態分析について考察する。

このモジュールの特徴としては、(i) 少なくとも屋外曝露下で経年劣化した状態においてセル裏面電極とセル表面との密着力が非常に弱いこと、(ii) インターコネクタの接合は、セル一辺の長さに対して3箇所みのポイント接着であること、(iii) セル裏面電極幅に対してインターコネクタ幅が大幅に広幅であることなどが挙げられる。

特徴 (i) が難しくしたのは、断面観察用試験片の調整であり、その工程の応力によって、セル/インターコネクタ間の剥離などを生じた懸念がある。

特徴 (ii) 及び (iii) によって、未接着部分のインターコネクタ直下や、接合箇所においてもセル/インターコネクタ間の隙間には、真空ラミネート工程において EVA 樹脂が浸入したものと推定。その結果、インク含浸評価において、インクが素材間界面、接合箇所の不良部分に含浸しなかった要因と推察する。

インク含浸法の原理・手法は、接合状態評価の方法として有用な手法となり得ると考える。種々の構成、部材組み合わせがあるモジュールに対して、万能かつ簡便な評価手法になるよう、改良検討を継続することが望ましいと考える。

6. 3. 4. 2 コンソーシアム内破壊評価

コンソーシアム内で、セル毎の個別 I-V 測定、EL 画像検査の結果をまとめると、下記のようなになる。

1) CNS151 モジュールの非破壊検査の EL 画像、MAP 画像でセル内の左右で明暗差を生じるセ

ルに、個別に配線を取り出して1枚ずつのEL画像測定を行うと、今回選んだセルについては左右の明暗差が見られなくなり、不具合を直接観測することはできなかった。セル個別延長配線取り出し加工で左右のタブ線をつないだことで、左右が同電位となったために明暗差がなくなったものと考えられ、セルの不具合ではなく、接続の不具合であると考えられる。また、個別のセルに配線をつないだ状態で、モジュール全体のEL画像測定を行うと、セルによって左右の明暗差に変化がないもの、左右の明暗差がなくなり均一な明るさになるもの、明暗差がセルの左右で反転するものなど、セル個別延長配線取り出し前とは異なる変化を示した。セル個別延長配線取り出し加工前後の明暗の変化から、通常のEL画像検査では分からない接続不良箇所の推測ができる場合があることが分かった。

- 2) CNS151 モジュールの非破壊検査のEL画像とMAP画像で左右の明暗が入れ替わったセルは、セル個別延長配線取出しにより左右の明暗差がなくなり、今回評価した範囲ではその原因の特定に至らなかった。隣接するセルの個別特性評価と合わせた検討が必要と考えられる。
- 3) CNS242 モジュールで多く見られたセルの中心付近を中心に黒いシミ状の暗部があるセルでは、 R_s の増加、FF の低下を伴う効率低下が生じており、裏面電極の劣化異常の影響が考えられる。
- 4) CNS242 モジュールで白濁があるセル⑤は I_{sc} の低下による効率の低下が認められた。白濁はEVA/反射防止膜界面の剥離によるものと考えられ、剥離界面での光の反射により光吸収効率が低下したものと考えられる。
- 5) CNS242 モジュールで、白濁に加えて I_{sc} 熱画像で高い発熱が見られたセル④は、同じく白濁があるセル⑤に比べてさらに I_{sc} が小さく、効率の低下が顕著であった。白濁による効率低下で当セルが抵抗となったために生じたホットスポットであると考えられる。
- 6) CNS242 モジュールのMAP画像で明るく表示されたセル③の個別I-V測定では、モジュール内の他のセルに比べて R_{sh} が小さい結果が得られ、第I章のMAP画像の考察を支持する結果であった。一方、CNS450 モジュールのMAP画像で明るく表示されたセルでは、個別のセル特性に特定の傾向がみられなかったが、本研究の中では比較となる同モジュール内の正常セルの個別測定を行っておらず、今後さらに詳細な評価が必要である。
- 7) CNS450 モジュールの中央に黒い大きな黒いシミ状の暗部があるセルは R_{sh} が 2.2Ω と小さく、セル裏面の熱電対の取り付けと思われる加工の影響でセル中央部が何らかの劣化していることが考えられる。熱電対の取り付けと思われる加工部分の構造は添付の参考資料でも報告されているが、セル裏面に貼り付けられた金属板があり、バックシート（と封止材）に設けられた開口部から金属板を露出させ、熱電対と思われる部材をはんだの様な材料で取り付けした上で、ポッティングされたボックスで封止した構造であった。このシミ状の暗部があるセルでは、上記の金属板に激しい腐食劣化が見られ、これがセルの特性劣化に影響しているものと考えられる。同モジュールには同様の加工が施された部分がもう一箇所あり、そちらも当初の状態は同様であったと考えられるが、その後の加工部分の劣化が少なかったため、EL画像やMAP画像、I-V特性への影響が小さかったと考えられる。

6. 3. 5 まとめ

6. 3. 5. 1 外注破壊分析

外部分析機関に依頼して行った破壊分析の結果、下記の知見を得た。

- ① 白濁外観不良を生じたモジュール (ID 2 5 3) は、セル表面 (受光面側) と E V A 封止材との界面で剥離していた。
- ② モジュール ID 2 5 3 について、その異常部と正常部の状態差を定性的に分析した。その結果、N a 及び酢酸塩系化合物などの偏析、N a の拡散 (E V A 中、セル内部)、E V A 封止材層中の酸発生濃度などの点で差異が認められ、水分浸入に端を発する不良発生メカニズムの推定に至った。
- ③ E L 分析において、セルの左右で輝度の差が複数箇所観察されたモジュール (ID 1 6 3) について、セル/配線材間の接合不良を疑ったが、サンプリングの難易度が高く、接合状態の観察・比較は難しかった。
- ④ モジュール ID 1 6 3 に対して、新たな分析方法としてインク含浸法を検討した。本モジュールは E V A 封止材が接合界面に入り込んでいるという事情により、目的とする結果が得られなかったが、その原理・手法は、接合状態評価の方法として有用な手法となりうる可能性がある。

6. 3. 5. 2 コンソーシアム内破壊評価

コンソーシアム内で行った破壊評価の結果、下記の知見を得た。

- ① E L 画像、MAP 画像の観察でセルの左右に明暗差が見られたモジュール (CNS151) では、セルの個別配線の取り出しによる個別セルの測定では左右の明暗差がなくなり、明暗差が配線接続状態の影響であることが分かった。個別配線取り出し前後の画像の変化の解析から、明暗差が見られるセルと配線接続の異常があるセルが異なる場合があることが分かった。
- ② CNS242 モジュールの E L 画像で多く見られたシミ状の暗部があるセルは直列抵抗 R_s の増加に伴う効率低下があり、シミ状暗部の裏面電極の劣化が考えられた。
- ③ CNS242 モジュールの白濁があるセルでは、光吸収効率の低下によるものと考えられる効率低下が見られた。
- ④ CNS450 モジュールの E L 画像で中央部に暗部が見られたセルは、裏面に取り付けられた熱電対の加工時の影響と思われるシャント抵抗 R_{sh} の低下が見られた。

セル個別に配線を取り出して特性を評価する手法は、モジュールの特性劣化の要因解明に有効である。

6. 4 FMEA の検討

6. 4. 1 目的

6.3 節までの調査では、劣化現象とその原因についてミクロな視点で詳細な情報をまとめた。6.4 節では本コンソーシアムの最終目的に従うマクロな視点で劣化現象が社会や事業に与える影響について評価することとした。そこで故障現象を俯瞰し重点整理するために、FMEA (Failure Mode Effects Analysis 故障モード影響解析) による検討を行なった。FMEA は市場故障の未然防止技法として、信頼性工学・製品設計などで幅広く行なわれている。その方法は未知の故障や潜在的な問題を開発段階で予測するため、経験に基づく定性評価である。そのため様々な立場の専門家またはグループなどによる共同作業になる。本報告では、こうしたアプローチではなく今回の調査結果を定量化し FMEA による評価を試みた。

6. 4. 2 方法

FMEA では取り上げた故障モードに対して、大きく以下の 3 点について評価する。

- ・ 重大性 (S) Severity
- ・ 発生頻度 (O) Occurrence
- ・ 検知もれ度 (D) Detection

それぞれ 5 段階評価を行い、それらの積 ($S \times O \times D$) により危険優先数 (risk priority number (RPN)) として表す。

表 6.27 に今回適用した評価基準を示す。重大性の評価は最大出力 (Pmax) の変化率を基準にした。なお本調査では初期値が記録されていないものもあるため、出力仕様値を基準にした。そのため仕様値と実測値差の実情を考慮し、90%以下の出力低下から故障と見なした。なお重大性の定義には出力以外に外観など商品性に影響を与える事項も挙げられたが、最もクリティカルかつ定量性の観点から本調査では出力劣化に絞りまとめた。発生頻度の評価は調査した同型式総数における発生確率とした。また検知もれ度の評価は、長期信頼性を目的とすることから出荷前検査における検知可能性を基準とした。なお劣化モードが重複発生したケースが多々あったが、それらは総合判断により主要因となった劣化モードを推測した上で評価した。

なお本調査で得られた故障モードは特定のモジュール材料、製造方法に起因しており、型式が異なると発生する劣化モードと RPN は大きく異なった。そのため調査したすべてのモジュールの劣化モードを一元的に評価するのではなく、まずそれぞれの型式ごとに FMEA 表を作成した。さらに型式ごとの FMEA から RPN の高い劣化モードについて集約したものを総合評価としてまとめた。表 6.28-34 に FMEA 評価結果を示す。

表 6.27 FMEA 評価基準

重大性 (S) Severity			
ランク	影響度	詳細	出力(定格比)
5	壊滅的	前兆なく、壊滅的状況が発生	80%以下
4	致命的	顧客が大きな不満を持つ。	80~85%
3	重大	顧客が不快感を持つ。	85~90%
2	軽度	一部に軽微問題発生	90~95%
1	非常に低い	問題ない。影響は非常に軽微	95%以上

発生頻度 (O) Occurrence			
ランク	故障発生頻度(可能性)		発生確率
5	極度に高い	不具合の発生は不可避	50%以上
4		類似業務で繰返し発生	50%以下
3	中程度	類似業務でたまに少量発生	20%以下
2		同一業務で単発的に発生	10%以下
1	極度に低い	不具合はまず起こらない	1%以下

検知もれ度 (D) Detection (予防検出)			
ランク	不具合の検出力		
5	検出不可	不具合の発生は不可避	
4	検出できる仕組みがある	検出力 50%程度	
3	高い確率で検出する	80% 程度	
2	非常に高い確率で検出する	90% 程度	
1	ほぼ検出する	99% 以上	

6. 4. 3 FMEA表によるまとめ

表6.28 型式別 FMEA表 (B社 型式: b1)

FMEA 解析		B社 型式:b1						単結晶	
不具合の種類	劣化モード	劣化の影響	重大性 S	発生確率 原因	発生頻度 O	管理又は 漏出防止	検知も れ度 D	危険優 先度 R	アクション・ 対策重要項目
		ID, 定格比出力, FF							
① 外観異常 (封止材)	白濁/デラミネーション ハ、#3	CNS2010-145 83% 66 CNS2010-242 77% 61 CNS2010-243 83% 67 CNS2010-245 82% 66	5 4/15枚=27%	4 初期検査で検出不 可能	5 100				
② 外観異常 (封止材)	白濁/デラミネーション ハ、#2	CNS2010-253 85% 71	3 2/15枚=13%	3 初期検査で検出不 可能	5 45				
③ 外観異常 (封止材)	白濁/デラミネーション ハ、#1	CNS2010-244 90% 70	2 4/15枚=27%	4 初期検査で検出不 可能	5 40				
④ 外観異常	黄変 ハ、#2	CNS2010-244 90% 70	2 6/15枚=40%	4 初期検査で検出不 可能	5 40				
⑤ 外観異常	黄変 ハ、#1	CNS2010-246 89% 72	2 8/15枚=53%	5 初期検査で検出不 可能	5 50				
⑥ 外観異常 (ハックシート)	ハックシート変形 ハ、#1	CNS2010-246 89% 72	2 11/15枚=73%	5 初期検査で検出不 可能	5 50				
⑧ 外観異常 (ハックシート)	焦げ	CNS2010-244 90% 70	2 1/15枚=7%	2 初期検査で検出不 可能	5 20				
⑨ 外観異常なし (出力低下)	セル起因劣化	CNS2010-144 86% 67 CNS2010-244 90% 70 CNS2010-253 85% 71 CNS2010-246 89% 72	3 8/8枚=100% EL暗輝度	5 初期検査で検出可 能性あり	4 60				

表6.29 型式別 FMEA 表 (A社 型式 : a 2)

FMEA 解析		A社 型式:a2					単結晶		
不具合の種類	劣化モード	劣化の影響	重大性 S	発生確率 原因	発生頻度 O	管理又は 漏出防止	検知も れ度 D	危険優先度 R	アクション・ 対策重要項目
		ID, 定格出力, FF							
① 外觀異常 (封止材)	白濁/テラミネーション レベル #2	CNS2010-216 88% 68 CNS2010-257 85% 67 ↓ 全数出力90%未満のため主 要因はセル起因の可能性高 いと推測 (重大性は参考)	33/49枚=6%	2	初期検査で検出不 可能	5	30		
② 外觀異常 (封止材)	白濁/テラミネーション レベル #1	CNS2010-264 87% 69 CNS2010-241 87% 68 CNS2010-239 86% 67	333/49枚=67%	5	初期検査で検出不 可能	5	75		
③ 外觀異常	黄変 レベル #2	CNS2010-264 87% 69 CNS2010-241 87% 68 CNS2010-239 86% 67	333/49枚=67%	5	初期検査で検出不 可能	5	75		
④ 外觀異常	黄変 レベル #1	CNS2010-257 85% 67	315/49枚=31%	4	初期検査で検出不 可能	5	60		
⑤ 外觀異常 (セル)	セル端部の白色 化	CNS2010-216 88% 68 CNS2010-257 85% 67 CNS2010-264 87% 69 CNS2010-241 87% 68 CNS2010-239 86% 67	334/49枚=69%	5	初期検査で検出不 可能	5	75		
⑥ 外觀異常 (配線)	配線変色	CNS2010-241 87% 68 CNS2010-257 85% 67	312/49枚=25%	4	初期検査で検出不 可能	5	60		
⑦ 外觀異常なし (出力低下)	セル起因劣化	CNS2010-216 88% 68 CNS2010-257 85% 67 CNS2010-264 87% 69 CNS2010-241 87% 68 CNS2010-239 86% 67	315/5枚=100% EL暗輝度	5	初期検査で検出可 能性あり	4	60		

表6.30 型式別 FMEA 表 (A社 型式 : a3)

FMEA 解析		A社 型式:a3					単結晶		
不具合の種類	劣化モード	劣化の影響	重大性 S	発生確率 原因	発生頻度 O	管理又は 漏出防止	検出 もれ度 D	危険優先度 R	アクション・ 対策重要項目
		ID, 定格比出力, FF							
① 外観異常 (封止材)	白濁/テラネーション パノル	CNS2010-450 89% 72 CNS2010-451 89% 73 CNS2010-488 91% 74 CNS2010-485 83% 68	2	11/11枚=100%	5	初期検査で検出不 可能	5	50	
② 外観異常	黄変 パノル	CNS2010-485 83% 68 ↓ 主要因は③と推測	1	2/11枚=18%	3	初期検査で検出不 可能	5	15	
③ 外観異常なし (出力低下)	Rs抵抗増加 (Isc通電時高発熱セ ル発生)	CNS2010-485 83% 68	4	4/11枚=9%	2	初期検査で検出不 可能	5	40	
④ 外観異常なし (出力低下)	セル起因劣化	CNS2010-450 89% 72 CNS2010-451 89% 73 CNS2010-488 91% 74 CNS2010-485 83% 68	2	4/4枚=100% EL暗輝度	5	初期検査で検出可 能性あり	4	40	

表6.31 型式別FMEA表 (D社 型式:d1)

FMEA 解析		D社 型式:d1					多結晶		
不具合の種類	劣化モード	劣化の影響	重大性 S	発生確率 原因	発生頻度 O	管理又は 漏出防止	検知も れ度 D	危険優 先度 R	アクション・ 対策重要項目
① 出力低下 外観異常なし	Rs抵抗増加 (セル内左右の 輝度アンバランス)	ID, 定格比出力, FF CNS2010-146 82% 66 CNS2010-151 83% 67 CNS2010-162 85% 67 CNS2010-163 84% 65	4	4/4枚=100% 裏面電極剝離の可能性	5	初期検査で検出可 能性あり	4	80	

表6.32 型式別FMEA表 (F社 型式:f1)

FMEA 解析		F社 型式:f1					a-Si薄膜		
不具合の種類	劣化モード	劣化の影響	重大性 S	発生確率 原因	発生頻度 O	管理又は 漏出防止	検知も れ度 D	危険優 先度 R	アクション・ 対策重要項目
① 外観異常なし (出力低下)	薄膜ジョット抵抗低 下	ID, 定格比出力, FF CNS2010-449 61% 52 CNS2010-475 50% 40	5	2/2枚=100% FF, Voc, Isc低下	5	初期検査により検 出可能性あり (初期ジョット低下多 数あり)	4	100	

表6.33 型式別 FMEA 表 (C社 型式 : c1)

FMEA 解析		C社 型式:c1				単結晶			
不具合の種類	劣化モード	劣化の影響	重大性 S	発生確率原因	発生頻度 O	管理又は漏出防止	検知もれ度 D	危険優先度 R	アクション・対策重要項目
① 外観異常なし (出力低下)	セル起因劣化	ID, 定格比出力, FF CNS2010-482 88% 70 CNS2010-483 86% 71	3/2/2枚=100% EL暗輝度	5	初期検査により検出可能性あり	4	60		

表6.34 総合 FMEA 表 (代表的な劣化モード)

FMEA 解析		代表的な劣化モードと評価結果						
不具合の種類	劣化モード	劣化の影響	重大性 S	発生確率原因	発生頻度 O	管理又は漏出防止	検知もれ度 D	危険優先度 R
① 外観異常 (封止材)	白濁/クラック/ネオンハ* #3	ID, 定格比出力, FF CNS2010-145 83% 66 CNS2010-242 77% 61 CNS2010-243 83% 67 CNS2010-245 82% 66	5/4/15枚=27% 封止材-セル間の界面剥離	4	初期検査で検出不可	5	100	
② 外観異常なし (出力低下)	Rs抵抗増加 (セル内左右の輝度アンバランス)	CNS2010-146 82% 66 CNS2010-151 83% 67 CNS2010-162 85% 67 CNS2010-163 84% 65	4/4/4枚=100% 裏面電極剥離の可能性	5	初期検査で検出可能性あり	4	80	RPN :80以上 (満点125×0.63) は重要項目として恒久対策導入必要
③ 外観異常なし (出力低下)	薄膜コート抵抗低下	CNS2010-449 61% 52 CNS2010-475 50% 40	5/2/2枚=100% PF, Voc, Isc低下	5	初期検査により検出可能性あり (初期ロット低下多数あり)	4	100	

6. 4. 4 考察および加速試験方法の選択

表 6.28～33 により発生した劣化モードに特徴があり、RPN の高い劣化モードを選出した結果、表 6.34 に示す白濁/セラミゼーション、Rs 抵抗増加（セル内左右の輝度アンバランス）、薄膜モジュールのシャント抵抗低下が顕著な劣化モードとして挙げられた。特に結晶 Si モジュールでは白濁と Rs 抵抗増加が重大な影響を及ぼす故障現象である結果となった。故障解析による発生メカニズムの推定より、白濁の環境要因には熱による酸化や拡散、また水分浸透による封止材の分離が挙げられる。また Rs 抵抗及び白濁の発生には、多数の剥離発生が考えられたため、熱応力が重要な加速因子と思われる。これらに影響する環境因子との関係を表 6.35 にまとめた。

表 6.35 より、考える故障メカニズムを総計した場合と今回の調査で見られた故障メカニズムのみを総計した場合で、適切な環境試験条件はいずれも温度サイクル、高温高湿、結露凍結が高い影響を与えると推測される。なお HAST は材料の高温域での特性変化に考慮する必要がある。今後は市場故障と加速試験の関係を実証検証することが望まれる。

表 6.35 加速試験方法の選択¹⁾

故障部位		封止材					電極接合界面					電極間			スコア (重要条件のみ)		
		材料強度劣化	加水分解	吸湿	吸湿膨張	物理的剥離	紫外線劣化	熱疲労	熱拡散	クリープ	吸湿(膨潤)	相転移破壊	酸化	電気分解		マイグレーション	
故障メカニズム		スコア															
環境・計測条件		スコア															
環境試験	高温	85℃					△		◎	○			△			16	12
	低温	-40℃					△					○				5	2
	温度サイクル	-40℃ / 85℃	△				◎		◎	△	◎		○	△		32	22
	高温高湿	85℃ / 85%	○	◎	○	○	△		○		△		○	○	○	40	24
	結露凍結	-40℃ ~ 85℃ / 85%		△	△	◎	◎		○	△		○		△	△	32	22
	HAST	105℃ / 100%	◎	◎	◎	◎	○		◎		△		◎	○	◎	60	36
	光照射		○	△				◎								10	2
計測	直流抵抗							◎	○	◎	△					22	16
	絶縁抵抗		○						○				△	○	◎	21	12
	接着強度	○	○		◎	◎		◎	◎	◎	△	○	○			56	36
スコア		15	36	18	18	42	5	36	52	18	7	9	14	10	14		

◎…5(影響大)、○…3(影響中)、△…1(影響小) ■ 重要→評価2倍

参考文献

- 1) 「平成 21 年度成果報告書標準化フローアップ[®] 事業導電性接着剤に関する標準化事業」独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2010.3.

あとがき

本章の冒頭では、Step1～Step3 までしか触れていなかったが、実はまとめの部分にある FMEA は本活動期間中にまとめることは困難が予想されたため、当初の工程表ではあえて Step として挙げず、まとめの工程に含めていたが、Step2 も担当したエスベック青木氏の頑張りにより、Step4 という形で報告できたのは当初予定以上の成果と考える。

各 Step 毎の成果を以下に記す。なお、すでに他者の選定を受けている母集団であるため、あるいは 90 年台のテクノロジーで作られたモジュールであるため、ここで示す結果が太陽電池モジュール全般に対する普遍的な傾向ととらえられることがないように注意されたい。

Step1 : 158 枚の曝露モジュールの外観検査と経年データの整理を行った結果、①最も多い外観異常は EVA の黄変と剥離（デラミ）、②同型式のモジュールでは、同様な外観異常が現れる傾向、③外観異常がなくても発電出力が大きく低下しているモジュールの存在が明らかとなった。最後に、次 Step（非破壊検査）用のモジュールとして 30 枚（外観不良から 17 枚、電気的特性劣化から 13 枚）を選定した。

Step2 : 複数の検査手法を横断的に利用し、各検査手法と検出可能な不具合症例との得手不得手の一覧表をまとめた。複数の検査手法による解析は、劣化現象の推定及び劣化部位の特定に有効であった。メーカーや型式毎に大きな違いが有ることを確認した。この工程によるモジュール内の詳細な情報を得ることは、次工程である破壊検査のために重要である。

Step3 : EL 画像におけるセル面内輝度のばらつきの原因を調べるため、外注による破壊分析を行った。破壊箇所の切り出し時に海面剥離を生じさせる可能性があること、これに対してインク含浸法を試してみたが、異常部／正常部の説明には至らなかった。白濁不良については、剥離界面はセル-EVA 間であること、剥離部では Na, P の濃度が高く、一部偏析も認められた。本活動のメンバーによる破壊検査の結果、EL 画像によるセル内左右の明暗差はセル間のインターコネクタの状態に起因する場合がある。セル自体の異常によりセル面内に暗部が現れる場合も確認した。

Step4 : 本調査対象のモジュールにおける RPN（Risk Priority Number）の高い劣化モードは、白濁／デラミネーション、Rs 抵抗増加、シャント抵抗低下（薄膜モジュール）であった。

本活動により、モジュールの不具合解析の一通りの基本ルーチンを確立できたと考える。今後は、加速試験の開発に対する優先順位を提示できるように、適切な母集団を対象として調査し、統計的に普遍性のある RPN 評価を行うことが必要である。

※ 本章に関する付録をDVDに収録