

## 第7章

### まとめと展望

## 第7章 まとめと将来展望

### 7.1. まとめ

第Ⅰ期コンソーシアムでの運営方針を概ね踏襲するとともに、研究開発を通じて得られた知見を有効に活用する形で、平成23年4月1日から第Ⅱ期コンソーシアムを開始した。第Ⅰ期コンソーシアム終了間際に起きた東日本大震災により、コンソーシアムの活動拠点の一つである産業技術総合研究所つくばセンターは大きな被害を受け、また参加企業にも少なからず震災の影響があったことも踏まえ、第Ⅰ期の終了時期を半年間延長した。そのため、平成23年4月1日～9月30日までの間は、第Ⅰ期と第Ⅱ期のコンソーシアムが並走する形となり、参加機関各位には様々な御面倒をおかけしたことを、誌面を借りてお詫びする。

第Ⅱ期コンソーシアムの大きな特徴の一つは、A会員、協力機関、技術諮問委員選出といった点で太陽電池モジュールメーカーの多大な御協力を頂いた点にある。毎月のA会員研究会に御出席頂いた太陽電池モジュールメーカーの委員からの豊富な知見に裏付けられた適切なアドバイスが、研究を大きく進捗させたことは疑う余地もない。B会員の研究においても、太陽電池モジュールメーカー選出の技術諮問委員からは数多くのアドバイスを頂いた。このような活動を通じて、真の意味で材料・部材メーカーと太陽電池モジュールメーカーの緊密な連携が図れたと自負しており、御理解を頂いた太陽電池モジュールメーカー各位に感謝する。

A会員の研究では、長期曝露モジュールの詳細な解析により、劣化モードを化学的劣化と物理的・機械的劣化に区分することができた。既に製造から20年程度を経ているモジュールもあり、構造や使用されている部材が現状のものとは異なる場合もあるが、ここで得られた知見は、現在製造されているモジュールの信頼性や解析手法を語る上でも重要と考える。モジュールの様々な劣化因子についても調査したが、特筆すべきは、結晶系モジュールにおいては、水蒸気バリア性の低いバックシートほど、高温高湿試験に対する劣化が小さかったとのことである。このことは、モジュールの劣化が単に水蒸気の浸入によって起きるわけではなく、直接的には封止材の加水分解によって発生する酸の影響によるとの事を示唆するものであり、バックシートや封止材の材料設計に大きなインパクトを与えるデータと考える。信頼性試験に関しては、屋外曝露で生じる劣化と信頼性試験で生じる劣化の差異に注目するとともに、屋外環境に一層近い試験条件の探索ならびに試験時間を短縮可能な高加速試験方法の開発に努めた。モジュール内の酢酸残留量が、屋外曝露と信頼性試験を結び付ける指標と成り得る可能性が示唆されたことも、本コンソーシアムの大きな成果と考える。さらには、ここ数年急激に注目されるようになった電圧誘起劣化(PID)についても、その機構解明を中心に研究に取り組むことにした。

B会員の研究においては、B会員が開発したバックシート、封止材、配線材のいずれにおいても、標準部材を用いた場合よりも信頼性に優れるとのデータが得られており、産総研が運営するモジュール試作・評価ラインが、参加機関内で開発した部材の有効性検証の場として効果的に活用されていることが示された。

C会員には年4回開催される技術交流会において、モジュールの信頼性に関して幅広い知見を習得頂けたと考える。太陽光発電技術研究組合と産業技術総合研究所が共同で受託しているNEDO「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発／発電量評価技術等の開

発・信頼性及び寿命評価技術の開発」の中で実施している「新規信頼性試験方法の開発」に従事するメンバー、アジア基準認証推進事業のメンバー、太陽電池モジュール国際基準認証信頼性フォーラム (QA Forum) のタスクグループのメンバーとの四事業合同研究会も技術交流会の一環として年 1 回開催しており、モジュールの信頼性を含む国際的状況も含め、理解を深める良い機会となった。

## 7.2. 太陽電池モジュールの信頼性研究に関する将来展望

平成 21 年 10 月の「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」の開始から 4 年半を経て、太陽光発電を取り巻く状況も大きく変化した。固定価格買取制度の施行も相俟って、太陽電池の初期効率のみならず、信頼性・寿命・生涯発電量等にも大きな関心が持たれるようになった。4 年半のコンソーシアムでの研究を通じて、太陽電池モジュールの信頼性に関して様々な知見が得られたが、まだまだ解明できていないことも多い。ここでは、信頼性の研究に対して、筆者が重要と考える 4 つの項目を挙げる。

1 つ目は、加速試験をどこまで延長して実施すれば、モジュールの長期信頼性を担保できるかということである。結晶シリコン系太陽電池では、高温高湿試験を認証試験に用いられている 1,000 時間から 3,000 時間前後まで延長することにより、性能低下の振る舞いに差異が見られるとのデータは数多く得られている。第 5 章には、高温高湿試験 15,000 時間を経ても、まったく劣化を呈さない薄膜シリコンモジュールのデータも掲載している。しかし、太陽電池モジュールに対して、そこまで長時間の高温高湿試験を課すことが必要かとの疑問がある。認証試験は初期故障の検出に有効とされているので、あまり根拠のないことであるが、1,000 時間の高温高湿試験で 10 年の寿命が担保されると仮定し、さらに、試験時間と寿命が比例すると仮定すれば、15,000 時間の高温高湿試験は寿命 150 年に相当する。人間が使用するものである以上、100 年を超える寿命を持たせることに大きな意義を感じない。一方で、高温高湿試験に対してばかり耐性の高いモジュールを作製したところで、屋外での曝露時には、高温高湿以外にも様々な要因がモジュールに負荷をかける。設置環境にもよるが、温度変化、紫外光照射、電流、電圧、風圧、降雹、降雪、塩害、酸性雨等、様々な要因が挙げられる。さらには、これらの要因が複合的に関連しあって、モジュールを劣化させると考えられる。したがって、高温高湿試験に耐性の高いモジュールが作製できたとしても、必ずしも屋外曝露時の長寿命が担保されたとは言えないのである。やはり、信頼性試験を施したモジュールと屋外曝露を経たモジュールの比較検討により、信頼性試験の加速係数を算出することが喫緊の課題であろう。第 II 期コンソーシアムにおいて、モジュール内酢酸残留量という指標を見出し、高温高湿試験 4,000 時間が屋外曝露 30 年程度とのある程度の加速係数を算出したことは大きな成果の一つと言える。しかしながら、分析により得られたのは、あくまでも残留酢酸量であり、発生した酢酸の一部は、バックシート等を経て、モジュール外に排出されていると考えられる。排出された酢酸がどの程度の時間、モジュール内に留まっていたかによって、モジュールの劣化に与える影響も異なると思われるので、排出速度の検証も必要になる。また、屋外曝露時には、紫外光照射による酢酸生成も生じていると思われるのに対して、高温高湿試験では加水分解による酢酸生成のみが生じるため、本来、両者は一対一に対応すべきではない。また、酢酸により生成するのは主には化学的劣化であるが、物理的・機械的劣化の指標としては何が

有効であるかということについても早期に見出さなければならない。もっとも、化学的劣化により電極とセルの接着力が低下して、物理的劣化を引き起こしやすくなっていることも想像できるので、両者を完全に切り離して考えることができるか否かも現時点では明確でない。しかしながら、完璧を求めても解に至るのは容易ではなく、太陽電池モジュールの信頼性に関して早期の解が求められている以上、完璧ではなくとも、一刻も早い指標作りは重要であると考え。物理的・機械的劣化に関してはモジュール内に発生するストレスが関与しており、商品サイズのモジュールで試験を実施することが重要であるが、温度、湿度、光照射等に起因する化学的劣化に関しては、モジュール端からの水蒸気浸入距離さえ考慮すれば、モジュールサイズに依存しないと考えられるため、ミニサイズのモジュールでの実験を迅速に進めてデータを蓄積することも重要であろう。信頼性試験に関しては、屋外曝露での劣化と整合する劣化を発現させることの重要性とともに、温湿度条件強化、昇降温速度強化等による高加速化とその妥当性の検証が重要であることを付記する。

2つ目は劣化メカニズムを考える際に、見かけの現象に捉われて、本質を見逃さないようにすることである。高温高湿試験では、バックシートから浸入した水蒸気による劣化は、ELの発光から明らかなように、セルの端部から進行すると考えられるが、屋外曝露モジュールの一部では、セル中央部からELの発光が消失しているものが見受けられる。このことを根拠に、高温高湿試験は屋外曝露での劣化を反映していないとの主張が見受けられるが、セルの中央部から劣化が進行する本質的な理由は存在しない。セル電極の印刷・焼成条件等が不十分な場合に、セル中央部の電極がセル端部より脆弱な場合に、セル端部の電極は耐えられる程度の酢酸によっても、中央部の電極が腐食していると考えると理解しやすい。その証拠に、モジュール内のいずれのセルにおいてもEL非発光部のパターンが似ることが多い。また、このようなセル中央部からの劣化は、高温高湿試験でも観測されるため、高温高湿試験が屋外曝露での劣化を再現しないと主張はあたらない。一方で、端部からの劣化が観測されるほどの3,000時間程度以上の高温高湿試験を実施することは、屋外曝露でそのようなモジュールがあまり多くは見つからないことを考えれば、過剰な試験とも言えるかも知れないし、図らずも、「高温高湿試験 3,000時間が屋外曝露 25年程度」との主張を裏付けているとも言えるのかも知れない。

3つ目は複合加速試験に関することである。本報告書第4章コアテーマ3の成果に示した動的機械的負荷/温度サイクル交互試験、塩水噴霧処理後のPID試験、紫外光照射後の高温高湿/温度サイクル交互試験、第6章に示した高温高湿/温度サイクル交互試験等では、いずれの場合も単独試験よりも劣化が早まっており、試験時間短縮の観点から、複合試験の有効性を示すことができたと言える。しかし、単に劣化を早めたからといっても、科学的根拠に基づかなければ、屋外曝露での事象を再現できているとは言えないであろう。負荷条件の組合せには科学的根拠が重要であり、そういった観点では、塩水噴霧処理後のPID試験の結果は、沿岸部でPIDが起きやすいことを表している有望な試験であるとも言える。

4つ目はPIDに関することである。最近では、シリコンリッチ反射防止膜の採用等により、PID対策品と称するセルが出回っており、既にPIDは解決したとも考えられがちである。しかし、結晶シリコン系においても、p型とn型でPID試験に対する両者の挙動は大きく異なり、メカニズムは異なるものの薄膜シリコン系やCIGS系でもPIDは観測される。残されている代表的なPIDの研究課題としては、以下のようなことが挙げられる。

- 1) PID のメカニズム解明と対策：ガラスからの Na 拡散は無アルカリガラスや化学強化ガラスの使用で防げるか。化学強化ガラス中の K は拡散係数が遅いだけで、より厳しい条件では PID を引き起こすのではないか。つまり、Na に限らず、正イオンが PID の原因となっているのではないか。アイオノマー、ポリオレフィン等の体積抵抗率の高い封止材で PID は抑制できるが、抵抗が高く漏れ電流を低減できることと、Na の拡散を抑止できることにどのような関係があるのか。反射防止膜を Si リッチにして抵抗率を下げることでチャージアップを防ぎ、PID を抑制できると言われているが、ヘテロ接合太陽電池のように、セル表面が透明導電膜で覆われている場合には、そもそも PID は起きないのか。PID の回復には、完全回復、部分回復、自然回復、逆電圧印加による回復等があるが、それぞれの現象はどのようなメカニズムに基づくのか。筆者としては、Na が反射防止膜内まで拡散した場合には、回復しない現象をもたらすのではないかと考えている。
- 2) 試験法と試験条件の確立：屋外で発生した PID 現象との比較検討に基づき、チャンバー法、水張り法、アルミ貼り法の優劣の見極め、温度、湿度、印加電圧、試験時間等の最適化を図り、屋外で発生する PID 現象を再現可能な試験法を確立することは喫緊の課題である。一方で、部材のスクリーニング試験として、短時間で PID を起こす試験法の開発も重要である。

高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアムは、平成 26 年 3 月で終了するが、モジュールの信頼性の研究が一層重要になることは言うまでもない。本コンソーシアムは主として産総研と民間企業で研究を進めてきた。一方で、太陽電池モジュールの劣化には様々な要因が相互に関連していることも明らかになりつつあり、様々な分野の専門家の基礎的知見が劣化メカニズムの解明と信頼性の高いモジュールの実現には欠かせない。大学の研究者のこの分野への参画は多くはないが、今後は大学との連携も進め、一つの学問分野を切り拓いていくことも重要であると考えます。

末筆になるが、コンソーシアム運営に絶大な御協力を頂いている各参加機関の運営委員各位および派遣研究員各位、各種研究会での確かな御指導を頂いている技術諮問委員各位に厚くお礼申し上げます。本コンソーシアムの設立・運営に関して多大なる御高配を頂いた矢部 彰 理事（環境・エネルギー分野 研究統括）、瀬戸 政宏 理事（イノベーション推進本部長）、伊藤 順司 元理事に心よりお礼申し上げます。仁木 栄 太陽光発電工学研究センター長（コンソーシアム長、運営委員長）、近藤 道雄 前・太陽光発電工学研究センター長（前・コンソーシアム長、前・運営委員長）、松原 浩司 副研究センター長（運営委員）、柴田 肇 研究チーム長、土井 卓也 主任研究員、原 浩二郎 主任研究員、櫻井 啓一郎 主任研究員、研究現場を支えて頂いた太陽電池モジュール信頼性評価連携研究体スタッフ各位、各種会合開催や成果報告書の取り纏めに御尽力頂いた同連携研究体アシスタント各位、共同研究契約書の整備および契約締結ならびにコンソーシアム運営規程の整備に御尽力頂いたイノベーション推進本部知的財産部の飯竹 秀行 知的財産企画室長代理、井上 佳久 主査（当時）、イノベーション推進本部産学官連携推進部の蛭原 和雄 主査（当時）、戸塚 弘雄 主査（当時）、井川 奈々子 主査に心より感謝する。

（独立行政法人産業技術総合研究所：増田 淳）