

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文審査結果報告書

論文題目

**Improvement in Reliability of Crystalline
Silicon Solar Cell Interconnection by Using
Nickel Micro-Plating Bonding (NMPB)
Technology**

申請者

Xinguang YU

情報生産システム工学専攻
先進材料研究

2023年2月

再生可能エネルギーが普及し、脱炭素社会を実現するためには、発電コストの低減が喫緊の課題である。太陽電池は、再生可能エネルギーの中でも機械的駆動部がなく、メンテナンス費用が比較的少なく、騒音も少ないことから有望視されてきたが、発電コストの低減が未だに十分でない。太陽電池の発電コストは ①太陽光発電効率 ②太陽光発電設備の使用可能期間(寿命)に大きく左右される。現在もっとも普及している結晶シリコン太陽電池の光変換効率を向上させる研究が盛んにおこなわれてきたが、今後は変換効率の大幅な向上は期待できない。一方、出力特性は、長期間使用することにより、初期性能が劣化する。20年以上経過した設備の故障の調査例をみても、セル自体の効率の低下などの問題はほとんどなく、太陽電池の特性劣化と使用寿命を支配する主な要因は、太陽電池セルの集電電極を接続するインターコネクター部の抵抗増加や破損といわれている。すなわち太陽電池の劣化は、①はんだ接合されたインターコネクション接合部の水蒸気による腐食、②日々の温度サイクル中の熱疲労による破損、③風による微小振動によって疲労破壊することなどが報告されている。従来の結晶シリコン太陽電池のインターコネクションは、主に鉛錫共晶はんだや鉛フリーはんだなどの低融点材料で接合されており、耐疲労性が十分ではない。さらにはんだ部の腐食反応による抵抗増加が劣化の主要因の一つとして明らかになっており、特に沿岸部での太陽電池モジュールの使用寿命に大きく影響する。

本研究はインターコネクターのはんだ接合をニッケルマイクロメッキ接合(NMPB: Ni Micro-Plating Bonding)に置き換えて、飛躍的なインターコネクターの信頼性の向上を図ることを目的としている。NMPBはパワーモジュール向けに開発された新しい接合技術で、格段にすぐれた耐熱疲労性が実証されている。ここではこのNMPBを結晶シリコン太陽電池のインターコネクター接続に初めて適用している。従来のはんだ接合は200℃以上の加熱溶融により銅リボンあるいはワイヤをセル電極に接合するが、NMPBは低温(55℃)プロセスであり、接合時の温度履歴による金属とシリコン間の熱膨張係数(CTE)のミスマッチによって引き起こされる歪みと応力に対する課題が軽減される。また使用時の屋外環境温度の変化による熱サイクルにより生じる接合部の疲労においても優れた特性が期待できる。さらに、NMPBの接続材料であるニッケルは、優れた耐食性を備えている。

この論文では、まずNMPBを、太陽電池インターコネクション接合に応用するための電気めっき条件とめっき膜厚の最適化について述べている。次に、NMPBによる太陽電池インターコネクションの信頼性の向上とその評価について、3つのステップに大別して実施している。第1に共振式疲労試験機を用いて、熱サイクルによる変形や風による微小振動を模擬し、NMPBの長期信頼性を評価している。第2にNMPBで接合された小型結晶シリコン太陽電池セルの温度サイクル(TC)試験と高温高湿(DH)試験における信頼性を評価している。最後に、NMPBによってインターコネクターが接合されたセルをモジュール化し、TC試験での信頼

性評価をおこなっている。太陽電池パネルを製造する企業の協力を得て、量産モジュールと同様の組み立て工程を利用し、従来モジュールと比較評価している。TC 試験での信頼性評価から、開発技術を適用した新たな太陽電池モジュールは、従来技術と比較して、使用中の効率劣化と使用寿命について、格段に優れているという結論を得ている。

本論文は7つの章から構成されており、各章の要約を以下に示す。

第1章は、本研究の背景ならびに目的について述べている。背景においては、まず再生可能エネルギーの中の太陽電池モジュールの市場シェアとエネルギー変換効率などについて述べている。続いて、本研究の主要技術である接合方法 NMPB の詳細について説明している。SiC パワー半導体モジュールの高耐熱実装技術として開発された NMPB 技術の特長を紹介し、本研究への適用検討の意義を述べている。次に研究方針に関わる評価手法について述べている。従来ほとんど定量的な評価がおこなわれてこなかった、風力等による微小振動の高サイクルの疲労に対する新たな試験方法を導入している。すなわち共振型疲労試験方法とその特長、着眼点について述べている。さらに、国際電気標準会議 (IEC) 61215 に基づいた、結晶シリコン太陽電池モジュールの信頼性評価方法である TC および DH 試験の実施について述べている。

第2章は一般的な太陽電池ならびに太陽電池モジュールの構造および構成材料の記述とともに、太陽電池の分類、結晶シリコン太陽電池、およびはんだ接続の信頼性について述べている。また、太陽電池における光変換のメカニズムについて述べ、現状普及している太陽電池のはんだ接続インターコネクションの課題について過去の研究に基づいて整理している。

第3章では、本研究で使用した実験方法と装置について述べている。

最初に本研究の主要技術である NMPB におけるめっき条件、めっき液組成等について詳述している。続いて共振式疲労試験方法について述べている。従来の NMPB の研究において、NMPB の接合信頼性については様々な研究がなされてきた。本論文では、さらに熱応力や振動による高サイクルの金属疲労の観点からの長期信頼性についての考察を加えている。

第4章では、NMPB の高サイクル疲労 ($\sim 10^7$) に関わる長期信頼性の評価結果を記述している。共振型疲労試験機を用いることで、疲労評価時間の短縮を可能とし、NMPB の長期信頼性を評価している。その結果、NMPB の疲労限度は、はんだ接合と比較して室温では 2.2 倍、高温では 4.3 倍と高いことを初めて明らかにしている。またそれぞれの疲労クラックの進展について結晶学的な解析をおこない、優れた特性の根拠について論じている。

第5章では、NMPB を用いて銅ワイヤを接合することによってインターコネクターを形成した結晶シリコン太陽電池の信頼性に関する評価について述べている。太陽電池では一般的にセル表面は EVA (エチレン酢酸ビニル共重合樹脂) フィルムによる封止が行われているが、ここでは加速試験のため、EVA 封止前の

NMPB 太陽電池セルを用いて評価を行っている。1000 サイクルまでの温度サイクル (TC) 試験 (-40/150°C) と 1000 時間までの高温高湿 (DH) 試験 (85°C、85% 湿度) において、NMPB によりインターコネクターを形成した太陽電池セルでは、初期出力特性は TC 試験 1000 サイクル後において、約 1.9% 出力低下、DH 試験 1000 時間後には 3.8% の出力低下を確認している。一方はんだ接合太陽電池セルではそれぞれ約 64.7% と 23.0% の低下となり、はんだ接合に比べて、NMPB 太陽電池セルは極めて優れた長期信頼性を有することを実証している。はんだ接合部の TC 試験による劣化は接合部界面における金属の拡散による金属間化合物の形成とボイド生成と関連づけられること、NMPB においては、界面の金属の相互拡散が抑制されていることを述べている。

第 6 章では、実際にパネルとして実用されているものと同様の太陽電池セルを用いて、EVA フィルムにより封止を行った太陽電池 モジュールを作成し信頼性評価を行った結果について述べている。最初にインターコネクターの NMPB とはんだ接合によるインターコネクター接合部の初期強度について比較評価し、最適化された NMPB 条件では引張り剥離強度、シユア強度とも優れていることを確認している。次に NMPB とはんだ接合によりインターコネクターを形成したモジュールについてそれぞれ TC 試験を実施している。TC 試験は、EVA の耐熱性を考慮した実用化太陽電池パネルの評価条件 (-40/130°C) を採用している。いずれのサイクル数においても、NMPB 太陽電池 モジュールの最大出力 (Pmax) の保持が、はんだ接合モジュールよりもはるかに高いことを示している。例示すると 800 サイクル後の出力低下は NMPB では 6.7%、はんだ接合で 19.5% となることを示している。

最後に、第 7 章では、第 4 章から第 6 章までの結論が述べられている。NMPB を結晶シリコン太陽電池インターコネクションに応用することにより、太陽電池モジュールの寿命が 25 年以上 40 年程度に延びることが期待でき、発電効率の保持と設備の償却コストを大幅に低減することが可能であると結論している。

以上本論文は、従来より課題が指摘されながらも、有用な改善が見られなかった、太陽電池インターコネクターの劣化抑制に関して、革新的な接続方法を提案している。長期信頼性に関わる高サイクル疲労、熱サイクル疲労、腐食反応による劣化について、現状技術との比較評価を行い、提案技術が格段に優れた信頼性を有することを実証している。この成果は今後量産技術開発を経て、市場に広く普及することが期待され、その先導的な役割をなしているものと認められる。

よって本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。

2023 年 1 月 30 日

主査 早稲田大学 教授 工学博士 (アーヘン工科大学) 巽 宏平
早稲田大学 教授 工学博士 (ノースウエスタン大学) 犬石昌秀
早稲田大学 教授 博士 (工学) (早稲田大学) 三宅丈雄