

Task13: PV システムの発電性能・運用および信頼性

Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems

棚橋紀悟*

1. はじめに

IEA PVPS Task 13 は、太陽電池 (PV) モジュールなどのシステム構成部材の信頼性評価だけでなく、PV システム全体の包括的な信頼性評価や、PV モジュールおよび PV システムの発電性能評価などについての技術的知見を収集・分析し、それらから結論付けられる技術トレンド情報をタイムリーにステークホルダに提供することを、その第一の役割としている。ここでいうステークホルダとは、IEA PVPS 活動を直接サポートしている各国政府機関など (いわゆるポリシーメカ) だけでなく、規模の大小を問わないエンドユーザを含む PV 産業バリューチェーン構成者と広義に解釈するべきである。したがって、Task 13 は、PV システムや構成部材の品質を向上させるために、PV 市場関係者を支援することを目的として活動しているとも定義できる。

世界各地に PV システムが大規模に導入され、再生可能エネルギー供給の一翼として普及している現況については、本誌の読者はすでによくご存知であろう。また、PV システムが設置される気候環境により、その発電性能が大きく変わるだけでなく、PV システムおよび構成部材の信頼性に環境ストレスが影響を及ぼすことも詳述する必要はないであろう。加えて、より多くの発電量を得るための様々な新技術 (高効率セル利用モジュールや両面発電モジュールなど) が適用されている実態に触れている読者の方々も多いと思われる。このような (新旧技術という意味での) 時間的多様性や (気候環境などの) 空間的多様性を持つ PV システムおよび構成部材の信頼性評価・発電性能評価は、個別研究者レベルは言うに及ばず、国内規模の共同研究などでも十分に効果的

な検討が遂行できるとは言えない。このような状況に鑑み、IEA PVPS では、国際連携により当該研究の進展を促進するために、Task 2 (Performance, Reliability and Analysis of Photovoltaic Systems) において PV システム信頼性・発電性能に関するデータ収集・分析などを開始した。その後、Task 13 として新たな国際共同研究の枠組みを構築し、(Table 1 に示すように) 第 1 期 (2010 年～2014 年)・第 2 期 (2014 年～2017 年) および直近の第 3 期 (2018 年～2021 年) と、その活動を継続・発展させてきている。本稿では、これまで Task 13 が発表してきた成果報告書の概要を紹介することとしたいが、紙幅の関係から全 23 レポートの概要紹介は困難であるため、第 3 期活動状況と合わせて、当期の主要レポートを紹介することとしたい。また、来年 (2022 年) から第 4 期活動が開始される予定もあり、今後の展望として、この第 4 期活動計画にも触れたい。

2. 第 3 期活動概要

2018 年に開始した IEA PVPS Task 13 第 3 期活動では、18 か国・54 名のエキスパートの尽力だけでなく、多くのゲスト・オブザーバの協力により、最終年までに (発行予定を含む) 12 レポートが刊行される。第 3 期活動概要を紹介するにあたり、国際連携研究としての IEA PVPS Task 13 運営方法を具体的に紹介したい。この第 3 期活動では、以下の 4 つのサブタスクフォース (ST) を作り、ST リーダのもとで、エキスパート・オブザーバなどが各自の得意とする技術分野などの知見を集積する方法を執った (ST4 を除く)。

* 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター
Renewable Energy Research Center, National Institute of
Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

- (ST-1) 新規モジュールコンセプト・システムデザイン
- (ST-2) PVシステムの発電性能評価
- (ST-3) モニタリングおよび運用とメンテナンス(O&M)
- (ST-4) 成果広報活動

各STで差異はあるものの、2か月程度の間隔でST内の小グループごとにWeb会議を行うことで、成果物としての各レポートのスコアや構成などを検討することから始めた。その後、エキスパート・オブザーバなどが独自に進めている研究に関する成果情報の共有や学会などで収集した情報の交換などを通して、上記した時間的・空間的多様性課題を共同で検討する方向へ進めていった（これらの共同検討過程で、多くの共著論文が出版できたことは特筆される必要があるだろう）。STなどにおいてWeb会議で検討した成果については、春季と秋季に毎年開催されるTask 13全体会議で報告され、全メンバーで進捗状況を共有するとともに、不足する知見を補完する方法などを議論した（Fig. 1）。なお、上記のST-Web会議は容易・高頻度で実施でき、即時的な意思疎通の向上には大変有効であるが、広範に意見を収集・議論し、共通の納得点に到達する（いわゆるMake senseする）にはF2Fでの摺り合わせが欠かせないという認識は、COVID-19拡大によりVirtualでの全体会議が主となっている現状から、改めて実感している。

2.1. 第3期レポート（信頼性・評価関連）概要

上記ST-1では、Table 1に示すT13-13/14/15/16という4レポートを刊行した。T13-15：Performance of New Photovoltaic System Designsでは、PV以外の電力要素を持つシステム（たとえば家庭用小規模PVシステムに蓄電池が導入された場合）における統合システムとしての性能指標を、蓄電池導入の進むドイツの事例などから検討し、新たな性能指標の提案などを行っている。このような多要素システムとしては、家庭用小規模システムだけでなく、大規模PV+蓄電システムや水上・営農向け大型PVシステムなども、本レポートでは検討対象としている。多様なシステムにおける各々の性能指標を本稿で端的にまとめることは困難であるため、詳細はぜひ元レポートをご参照いただきたい。

本分野での他の3レポートは、IEA-PVPS Task 13で従来から検討を続けてきているPVモジュール

信頼性や寿命予測方法について、最新知見をまとめている。T13-13：Designing New Materials for Photovoltaicsでは、屋外曝露サンプルと屋内加速試験サンプルのForensic解析を通して明らかになった（各種環境ストレスに関する）劣化メカニズムを概説している。特に、近年観察されるポリアミド共押出しバックシートの亀裂劣化についての包括的解析結果の提示は、部材関連企業だけでなくEPC・O&Mの各工程に関与するエンジニアの方々にも（現象と原因把握の面で）大変参考になるものと思われる。また、PVモジュール部材の最新技術動向（封止材の変化など）を的確に理解するには、本レポートが最適であると考えられる。一方、ほぼ同時に刊行されたT13-14：Bifacial Photovoltaic Modules and Systemsでは、近年設置が急拡大している両面受光型モジュールを用いたPVシステムについて、両面受光発電に関する基礎技術に関する最新の知見を丁寧にまとめたうえで、世界各地で実施されている当該モジュールを利用したPVシステムの発電性能評価結果を設置環境などと対比させて網羅的に分析している。特に注目いただきたい点は、多くの発電量シミュレーションソフトウェアでの推測結果と実際の発電状況の差異を、発電量推定モデルやシミュレーションパラメータなどに遡って検討した結果である。今後ますます拡大する両面受光型PVモジュール・システムの設置・利用にあたっては、本レポートで提供される両面受光型システムに関する発電量モデル化の基盤知見を是非参考にしていきたい。

筆者の個人的志向／嗜好をお許しいただければ、上記3件にも増して注目して欲しいレポートが、T13-16：Service Life Estimation for Photovoltaic Modulesである。本レポートでは、屋外設置されたPVモジュールの稼働寿命（Service Life）を屋内加速試験結果などからモデル化し、屋外での発電量劣化トレンドを推定する方法について、最新の知見をまとめている。2010年代初頭の検討により、屋外設置された結晶シリコン系PVモジュールは約0.5%の年劣化率で、その発電出力が低下することが統計的に示された。多くの観測結果をもとに推定されたこの「年劣化率≒0.5%」は、当該モジュールを利用したPVシステムの劣化を判定する基礎知見としてだけでなく、発電事業における長期間の発電量推定においても利用されてきた。その後、様々な気候条件などにおける劣化率の差異や、劣化率の時系列的変化（非直線的劣化）の実態が明らかになるに

Table 1 Technical Reports Published from IEA PVPS Task 13 *

Report ID	Year	Title	Remarks
T13-01	2014	Review of Failures of Photovoltaic Modules	Period 1
T13-02	2014	Characterisation of Performance of Thin-film Photovoltaic Technologies	Period 1
T13-03	2014	Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems	Period 1
T13-05	2014	Analysis of Long-Term Performance of PV Systems	Period 1
T13-06	2017	PV Performance Modeling Methods and Practices	Period 2
T13-07	2017	Improving Efficiency of PV Systems Using Statistical Performance Monitoring	Period 2
T13-08	2017	Technical Assumptions Used in PV Financial Models: Review of Current Practices and Recommendations	Period 2
T13-09	2017	Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field	Period 2
T13-10	2018	Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications	Period 2
T13-11	2018	Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice	Period 2
T13-12	2018	Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments	Period 2
T13-13	2021	Designing New Materials for Photovoltaics: Opportunities for Lowering Cost and Increasing Performance through Advanced Material Innovations	Period 3 ST-1
T13-14	2021	Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications	Period 3 ST-1
T13-15	2021	Performance of New Photovoltaic System Designs	Period 3 ST-1
T13-16**	2021	Service Life Estimation for Photovoltaic Modules	Period 3 ST-1
T13-18	2020	Uncertainties in Yield Assessments and PV LCOE	Period 3 ST-2
T13-19**	2021	The Use of Advanced Algorithms in PV Failure Monitoring (TBC)	Period 3 ST-2
T13-20	2020	Climatic Rating of Photovoltaic Modules: Different Technologies for Various Operating Conditions	Period 3 ST-2
T13-21**	2021	Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants	Period 3 ST-2
T13-22	2021	Assessment of Performance Loss Rate of PV Power Systems	Period 3 ST-2
T13-23**	2021	Quantification of Technical Risks during Operation & Maintenance	Period 3 ST-3
T13-24	2021	Qualification of Photovoltaic (PV) Power Plants using Mobile Test Equipment	Period 3 ST-3
T13-25**	2021	Guidelines for Operation & Maintenance Procedures in Different Climates/Countries	Period 3 ST-3

* All reports can be downloaded from IEA PVPS Task 13 Website (<https://iea-pvps.org/research-tasks/performance-operation-and-reliability-of-photovoltaic-systems/#reports>).

** These reports will be published soon.



Fig. 1. Group photos in the IEA PVPS Task 13 meeting (Left: 2019 Spring Meeting at Utrecht, Right: 2019 Fall Meeting at Santiago /Antofagasta, Chile).

ともない、当該モジュールの劣化態様を数式としてモデル化し、さらには屋内加速試験との対応を明確化する検討が進展してきている。そこで、現時点で明らかになっている知見を、劣化に関係する技術用語の定義などの基盤的知見を盛り込みながら、包括的に解説したのが本レポートである。

中核となる第4章「モデリングアプローチ」は、(1) これまでに提案されてきたモデル化アプローチの課題と可能性、(2) PV モジュールを構成する部材・部品の劣化モデル、および(3) 有効な劣化モデルの提案と妥当性検証をいう3部により構成されている。(1)においては、これまで主に使用されてきた経験的／実証的モデリング (Empirical Modelling) の課題について、以下の点を指摘している。

- ・屋外設置されたPVシステムで収集した発電量などのデータには必然的に多くの(あるいは大きい)ノイズが含まれている場合が多く、これを多項式などでモデル化した場合には、過剰あるいは過少回帰を示すモデルが得られてしまうととも、モデル中に多くの(意味が明確でない)パラメータが包含される。
- ・このようなモデル化では、データの持つバイアスが強調される場合があるととも、データのばらつきによりモデル特性が支配される。また、バイアスとばらつきは相互に影響しあう可能性が高いため、モデル化の適合度判定を的確に行うことが困難になる。
- ・上記課題を克服する手法として、劣化メカニズムを考慮した推定モデル (Inferential Model) を構築するために、意味のある少数のパラメータからなる Parsimonious Model (儉約モデル) が求められる。

なお、(2) 劣化メカニズムを考慮したモデル構築には、PVモジュールを構成する部品・部材の劣化態様を、多くのストレス要因を加味して的確にモデル化しなければならない。本レポートでは、PVモジュール耐候性や出力保持に大きく関与するバックシート部材・封止材の化学的変化や結晶シリコンセルクラックに代表される物理的劣化について、それらの部材・部品劣化モデルを概説している。本レポートの主題となる(3)稼働寿命推定 (Service Life Prediction) については、前項までの検討を踏まえ、2019年以降に提案された出力変化推定モデルについての構築手法と妥当性検証結果を「4.3 Photovoltaic Performance Models」で概説している。部材・部品の劣化メカニズムをもとに構築された

個々のモデルを融合してPVモジュール出力変動を推定しようという取組みであり、各種ストレス要因による劣化速度式を組み合わせた複合劣化速度式が屋外設置された太陽電池モジュールの劣化と対応可能か否かを検討した結果が紹介されている。具体的には、各種ストレス要因(温度・湿度・紫外線強度およびそれらの変動幅など)について屋内加速試験で得られた劣化速度パラメータを融合することで、屋外設置された太陽電池モジュールの劣化動態(kinetics)について、非線形劣化状態を含めて高精度で推定できることが示された。これは、これまで困難と考えられてきた「屋内加速試験結果から屋外設置された太陽電池モジュールの出力劣化推定すること」に解決の道を拓くだけでなく、世界各地におけるストレス要因の種類と強度の差異による太陽電池モジュール劣化態様(年劣化率とその変化)を地図上に可視化できること、すなわち設置地域での長期にわたる年劣化率変化(非線形劣化状況を含む)が推定できることを示している。加えて、PV事業での主指標とされるシステム出力係数(Performance Ratio: PR)とも妥当性を持って対応していることが確認されており、PV事業者などが設置やメンテナンスを検討するに際して、有益な情報を提供できるものと考えられる。

2.2. 第3期レポート(発電性能評価関連)概要

ST-2: PVシステムの発電性能評価では、T13-18/19/20/21/22の5レポートが2021年中には刊行される予定である。これらレポートでは、環境要因(温度・湿度などだけでなく、土埃などの微粒子堆積を含む)がPVシステム発電量にどのような影響を及ぼすか、これらの影響を正確に評価できるかなどについての課題に関する最新知見を紹介している。5レポートのうち、最も基盤的設問である「発電量評価はどの程度正確か?」に回答を与えようとする取組みがT13-18: Uncertainties in Yield Assessments and PV LCOEで解説されている。正確な発電量評価に最も大きく影響する(各々の設置場所における)日射量については、長期間データの活用や衛星データの並行的利用など時間的・空間的に基盤データを複合化することで(20年ベースで)不確かさを約45%まで減少させた実例が紹介されている。また、これまでTask13で解析してきた発電量評価の各段階における不確かさ評価実績から、より正確な発電量評価を行うための注意事項(Best Practice)を、それぞれの評価段階で提示している。ここでは、発電量評価期間を20年という長期ベ-

スとしたことで、PV事業者や保守点検エンジニアなどだけでなく、ファイナンスに関係するステークホルダーへも的確な知見を提供できうるもの考えられる。設置された周囲環境のPVシステム発電量への影響を具体的に／個別的に検討した結果が、T13-20：Climatic Rating of Photovoltaic ModulesおよびT13-21：Soiling Losses - Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plantsで示されている。T13-20においては、特定の気象条件とPVモジュール型式での年間発電量に相当するClimate Specific Energy Rating (CSER)を、現行の国際規格を超えて正確に推定する方法についての検討状況がまとめられている。また、T13-21においては、乾燥地域を含む世界的なPVシステム普及にともない注目されているSoiling影響について、発電量評価の観点から国際的な取組み状況がまとめられている。ここでは、Soilingによる発電量低下のモデル化だけでなく、Soiling評価センサの開発・利用状況や、表面コーティングなどによる耐Soiling性向上などもまとめられている。興味深いことに、Soilingによる発電ロス (Soiling-loss) という概念に、積雪による発電ロス (Snow-loss) を含めて考えることも可能との立場から、このT13-21では北欧・北米などで実施しているSnow-loss評価の最新知見も紹介されている。

PVシステムの発電量を長期にわたり安定的に確保するためには、的確な運用とメンテナンスが必要である。T13-22：Assessment of Performance Loss Rate of PV Power Systemsでは、このメンテナンスなどに重要な指標となる性能低下速度を正確に推定する方法を概説している。これは、足元の性能低下を正確に知り、メンテナンスなどに直接フィードバックする目的で実施される性能低下速度の推定を対象としてはいるが、先々のPVシステム性能低下の予測とも密接に関連していることは言うまでもない。

2.3. 第3期レポート (O&M関連) 概要

第2期までには主要テーマとしては挙げられていなかった保守点検・メンテナンス (O&M) 手法に関して、(1) O&Mにともなう技術リスクの定量化、(2) 屋外評価機器によるPVプラントの評価手法、および(3) 異なる気象条件におけるO&Mガイドラインの策定を、第3期からの新規テーマとして検討を行ってきた。その結果としてまとめたレポートT13-24：Qualification of Photovoltaic (PV) Power Plants using Mobile Test Equipmentでは、以下の

評価・測定手法について、それぞれの評価手法の原理や特徴、検出可能な劣化現象と評価事例、推奨される使用方法と注意事項、測定不確かさ・安全性・可搬性、市販装置の概要とコストなどがまとめられている。

- ・屋外 I-V 測定
- ・屋外 EL 測定
- ・ドローン IR/EL 測定
- ・屋外インピーダンススペクトル測定
- ・屋外化学分析 (樹脂材料向け) など
- ・屋外ダーク I-V 測定
- ・屋外 PL 測定
- ・屋外 UV-F 測定

それぞれの評価・測定手法について、豊富な評価例を掲載していることが特徴としてあげられ、O&Mエンジニアだけでなく、PV事業者などユーザーサイドにおいてもO&Mにおける評価・測定の原理・現状と限界を深く理解することに役立つものと考えられる。

T13-25：Guidelines for Operation and Maintenance in Different Climatesでは、世界各地で適用されているO&Mガイドラインを網羅的に収集・分析し、O&MにおいてキーとなるO&M品質指標を検討するとともに、メンテナンスの実務に役立つ手法を整理した。たとえば、O&M品質は、PR保証・Plant Availability保証やレスポンス時間などを主要指標とすることが提案されており、これらと既報のO&M契約ひな形をあわせて契約フレームを検討する方向も示している。なお、本レポートの後半では、多くのページを割いて、特徴的気候条件 (下記) におけるO&M手法を推奨ガイドラインとして具体的に記述している。

- ・標準 O&M 手法 (ヨーロッパ温暖気候など)
- ・高温乾燥気候 (砂漠など)
- ・高高度に位置する乾燥地域 (アンデスなど)
- ・高温湿潤気候 (東南アジアなど)
- ・浸水地域
- ・台風／ハリケーン／サイクロン地域
- ・積雪地域

ここでは、Task 13 エキスパートやオブザーバが活動する世界各地で収集した (気象条件に起因する) PVシステム不具合インシデントを材料に、欧州・米国・日本などで刊行されているO&Mガイドラインを参考にして、対応するO&M手法をまとめている。また、各国で実際に適用されている推奨事項も情報として付加しており、各地域で刊行されているO&Mガイドラインと付加情報を有機的に統合した内容になっているものと考えられる。このため、幅広くO&Mガイドラインを眺め渡し世界各地の実情

を理解するとともに、PV事業者やO&Mエンジニアが実際に使われている／使える対策情報を入手するにも、本レポートは有用であると思われる。

3. 第4期活動へ向けて

第3期の終了を前に、今後の活動方向がIEA PVPS Task 13全体会議（2020年秋季・2021年春季）などで議論された。PVシステムの発電量評価や信頼性評価については、その重要性は脱炭素シフトへ向けた再生可能エネルギー拡大にともない益々増大するとの共通認識をエキスパート間で確認することができた。これらの認識をもとに、第3期にならい、第4期においても（下に記した）4つのサブタスクフォースをTask 13内につくり、各STテーマについて積極的に国際連携研究活動を促進する方針が検討されている。

- (ST-1) 新規部材・部品や製品技術の信頼性研究
- ・新規構造セル／モジュールの劣化モード探索
 - ・PVモジュール修復技術とリユース技術
 - ・新規加速試験技術（環境ストレス組合せ）
 - ・PV＋蓄電システムの信頼性
- (ST-2) 多様なPVアプリケーションでの発電性能／耐久性
- ・水上PVシステム
 - ・営農PVシステム
 - ・両面受光モジュール利用トラッキングシステム
 - ・Digital Twinning／Digital Integration
 - ・MLPE利用システム
- (ST-3) 技術-経済的な主要性能指標提示
- ・過激気候条件と性能指標へのインパクト
 - ・特徴的気候での主要性能指標最適化方法
 - ・PVプロジェクトの経済的指標決定による影響
 - ・経済的指標と信頼性指標の統合的マッピング
- (ST-4) 成果広報活動

これらテーマについては、本年を準備期間（情報収集期間）として、来年（2022年）より実際の活動が開始される予定である。これらの活動内容について、より詳細な情報を知りたいというご要望や、これらの活動テーマについてのコメントをお持ちの場合は、ぜひ筆者にお知らせいただきたい。

4. おわりに

本稿では、第3期に刊行したレポートを中心に、IEA PVPS Task 13活動の概要を紹介した。各レポートの概要については、かなりの内容省略を行っている点をご容赦いただきたい。もし本稿のレポート紹介でご興味をお持ちいただけるようであれば、ぜひIEA PVPS Task 13ホームページにて英文レポート（各100ページ前後）を参照することを推奨申し上げたい。なぜならば、第3期に刊行にしたこれらレポートは、前期までのレポートと同様に、PV信頼性評価・発電性能評価分野での教科書的文献と位置づけられる可能性が高いと推測されるためである。つまり、Task 13がこれまで刊行したレポートが論文などに数多くに引用され続けているという実態とともに（Fig. 2）、本分野の共通認識をして抜がっているPVモジュールの劣化モードトレンド（Fig. 3）が象徴的に示すように、これらレポートに

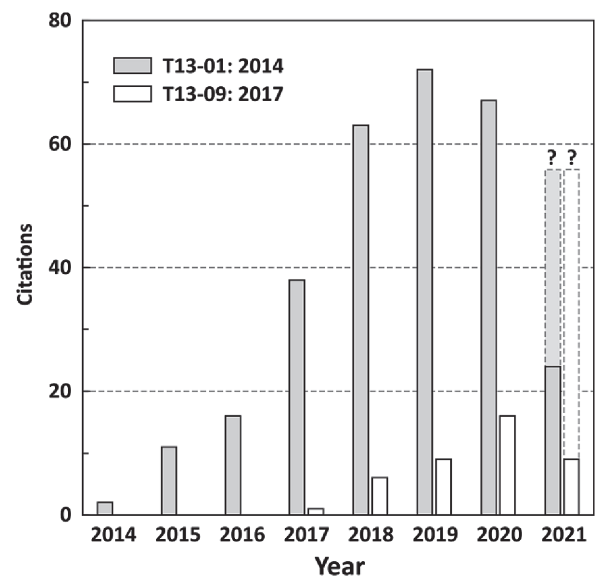


Fig. 2. Citation trends for two representative Task 13 Reports (Data Source: Google Scholar).

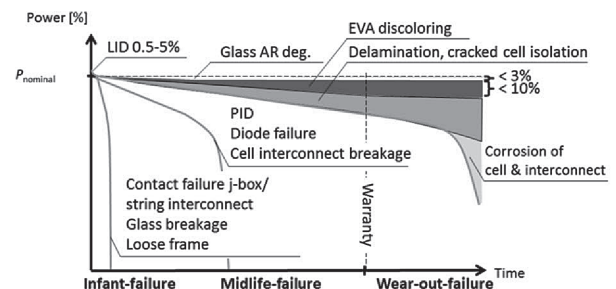


Fig. 3. Most famous figure on the degradation profile of wafer-based crystalline photovoltaic modules (Source: T13-01: Review of Failures of Photovoltaic Modules).

記載されている知見は、研究者のみならず本分野に関わるエンジニア・事業者および先駆的ユーザが保持しておくべき共通基盤知識となる可能性が高いためである。余談ではあるが、これらレポートは、各国の30歳代を中心とした若いエキスパート・オブザーバ（女性を多く含む）が喧々諤々の議論を行いながら完成させた点を強調しておきたい（高齢？の筆者にとっても、ワクワクする議論と真剣なエネルギーを実感できた大変素晴らしい体験であった）。掲載されている写真などを閲覧するだけでもアイデアが得られるようにした彼らの努力の痕跡をたどっていただければ、望外の幸甚である。

最後になったが、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の皆さま、ならびに産総研の同僚諸氏のご支援に深謝申上げたい。なお、COVID-19拡大までは、Task 13 全体会議は、エキスパートが所属する組織などが持ち回りでホストする方式で開催されており、ホスト組織や近隣 PV 研究設備などをテクニカルツアーとして

実施するスケジュール構成であったため、新旧取り混ぜて多種多様な PV システムを見学する機会を得た。このような形態での Task 13 全体会議は、エキスパート間だけでなく、ホスト組織メンバやオブザーバとの密接なコミュニケーションを育み、新しい国際連携研究が開始されることもあった。このような形態での Task 13 全体会議が再開できることを祈念したい。

参考文献

本来であれば、本セクションに IEA PVPS Task 13 レポート書誌を収載すべきではあるが、Table 1 の再掲となるため省略させていただく。各レポートの著者名などは、IEA PVPS Task 13 ホームページ (<https://iea-pvps.org/research-tasks/performance-operation-and-reliability-of-photovoltaic-systems/#reports>) をご参照いただきたい。