特　集

IEA PVPS TCP における我が国の太陽光発電技術に関する国際協力

Task12：太陽光発電の持続可能性

PV Sustainability Activities

河本桂一 *

1．Task12 活動の目的と参加国

1.1　目　的

地球規模のエネルギーの安定供給と環境負荷の低減に向け，太陽光発電の持続的な成長は不可欠であり，そのためには，太陽光発電の環境持続性と安全性を実現・維持していくための知識の創出と共有が必要である．消費者や政策立案者に向けて，太陽光発電がもたらす環境や健康，安全に対する影響や便益，社会経済的な側面に関する確度の高い情報を発信していかなければならない．また，これらの情報は太陽光発電を製造，供給する産業界にとっても，持続可能なサプライチェーンの構築につながる．

このような背景のもと，Task12 は以下の目的を掲げて活動を展開している．

・太陽光発電の環境特性の定量化
　➢ エネルギー消費，資源消費および環境負荷排出のライフサイクルの観点による評価
・将来，大量に発生する使用済み太陽光発電システムを適正に処理するためのオプションの提示
　➢ リサイクルをはじめとする Circular Economy 実現のためのパスの描写
・環境，健康，安全およびその他の持続可能性につながる事象の明確化
　➢ 考慮すべきリスクの抽出と評価手法の検討

1.2　参加国

Task12 は米国を議長国，オーストラリアを副議長国とし，14 ヶ国，1 機関の参加により活動を実施している．Task12 に参加している国，および参加メンバーの所属機関を表 1 に示す．

表 1　Task12 参加国と参加機関

国	機　関
オーストラリア	University of New South Wales（副議長：Jose Bilbao 氏）
オーストリア	University of Applied Science, Fachhochschule Technikum Wien
ベルギー	PV Cycle Association、VITO
中国	Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences、Zhejiang Jinko Solar Co. Ltd.
フランス	CEA-LITEN、EDF、MINES ParisTech
ドイツ	LBP Stuttgart University、ZSW
イタリア	Ricerca sul Sistema Energetico
日本	みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱（本稿著者）、NEDO
韓国	Korea Institute of Energy Research
オランダ	SmartGreenScans、TNO
スペイン	CIEMAT、ESCi
スウェーデン	Swedish Energy Agency
スイス	Treeze Ltd.
米国	NREL（議長：Garvin Heath 氏）、First Solar
（業界団体）	SolarPower Europe

* みずほリサーチ＆テクノロジーズ㈱グローバルイノベーション＆エネルギー部

2. Subtask の概略と主な成果物

Task12 活動は三つの Subtask により構成されている．これらは前述の三つの目的にそれぞれ対応している．

・Subtask 1：End of Life Management
・Subtask 2：Life Cycle Assessment（LCA）
・Subtask 3：Other Sustainability Topics

以下に，各 Subtask の概略とこれまでに作成された主要な成果物を示す．

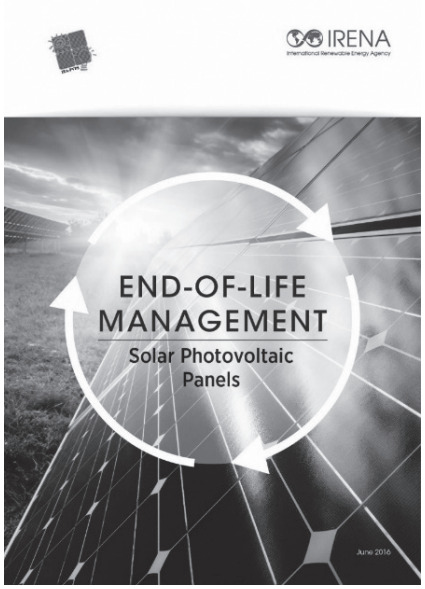

図 1　End-of-Life Management：Solar Photovoltaic Panels[1)]

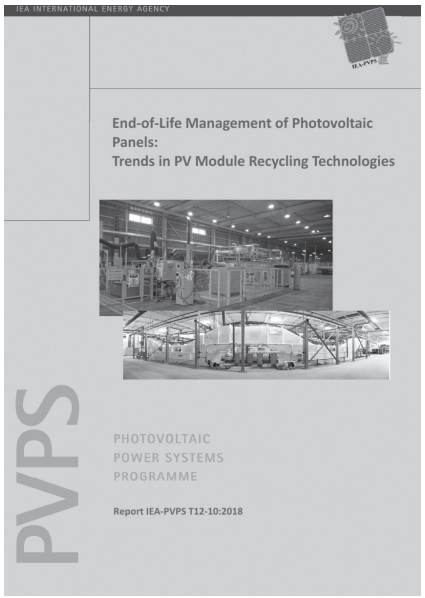

図 2　End-of-Life Management of Photovoltaic Panels：Trends in PV Module Recycling Technologies[2)]

2.1　Subtask 1：End of Life Management

製品の使用後処理はライフサイクルの一部であり，サプライチェーンの一部である．太陽光発電の適正な使用後処理については世界各国で様々な議論や取り組みがなされており，太陽光発電システム構成機器のリサイクルが義務化されている場合もある．

Task12 では，太陽電池モジュールのリサイクルをはじめとする使用後適正処理について議論を行っている．IRENA とともに作成，2016 年に発表したレポート「End-of-Life Management：Solar Photovoltaic Panels」[1)] は使用済み太陽電池モジュールの発生見通し，主要国における取組の現状などを提示し，世界的に注目された．このレポートを契機とし，太陽電池モジュールリサイクル技術の開発動向の取り纏め「End-of-Life Management of Photovoltaic Panels：Trends in PV Module Recycling Technologies」（2018 年）[2)]（本項著者が主著者），その成果を発展させた学術誌（Nature Energy）への投稿「Research and development

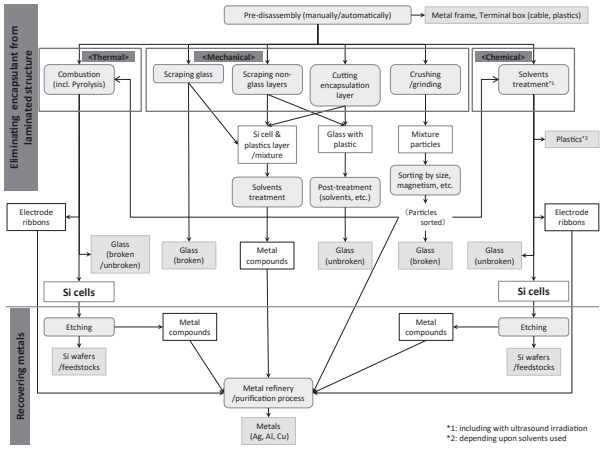

図 3　結晶 Si モジュールのリサイクル処理フロー[2)]

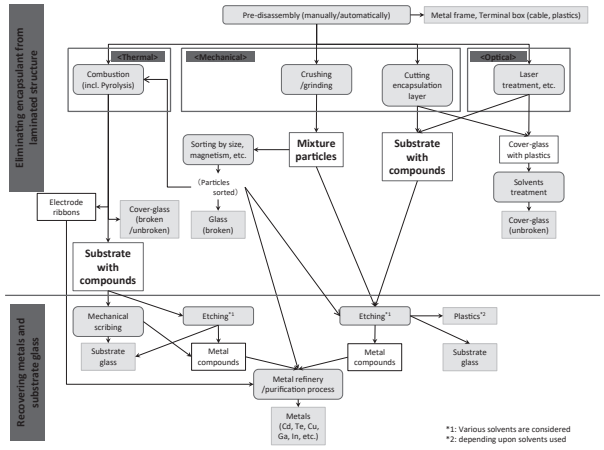

図 4　薄膜化合物モジュールのリサイクル処理フロー[2)]

priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy」（2020 年）[3] など，太陽電池モジュールリサイクルに関する情報発信を継続的かつ定期的に行っている．

また，Subtask1 と Subtask2 に跨る領域の活動として，太陽電池モジュールリサイクルが既に義務化されている欧州を対象とし，現状の太陽電池モジュールリサイクル技術に関するライフサイクルインベントリ分析（2017 年）[4]，環境影響評価分析（2018 年）[5] を行ってきている．

2.2 Subtask 2：Life Cycle Assessment (LCA)

LCA（Life Cycle Assessment：ライフサイクルアセスメント）は，製品やサービスのライフサイクルを通じた資源・エネルギーのフローや環境への負荷を定量的に評価する手法である．LCA のフレームワークは ISO 14040 などにより提供されているが，実際の評価の実施に際しては，個々の製品やサービスの特有の事象や条件は，製品やサービスの特徴に応じて設定する必要がある．

太陽光発電の LCA は，Task12 の活動初期より議論の中心で，代表的な成果物として以下の二つがある．

- Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity（LCA ガイドライン）
- Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems（LCI レポート）

LCA ガイドラインは，太陽光発電の LCA の実施に際しての基本的な考え方を取り纏めたものである．第 1 版は 2009 年に発行，その後，2011 年に第 2 版，2015 年に第 3 版が発行され，現在の最新版は 2020 年に発行された第 4 版である．発行以来，評価項目や評価範囲，前提条件の考え方などについて，LCA を取り巻く議論や情勢，太陽光発電技術の進歩にあわせて更新している．ガイドライン第 4 版[6] は，表 2 に示す 6 つの項目（Subchapter）より構成され，各事項について，考え方や例示などを記載している．第 3 版からの主な更新箇所は，太陽光発電特有の条件の考え方（Life expectancy など）やライフサイクルインベントリの考え方（Modelling water use など）の更新，BIPV の評価の考え方の追加である．

LCI レポートは，太陽光発電の LCA に必要となるライフサイクルインベントリデータを収録したレポートである．このレポートは，2011 年に第 1 版が発行され，2015 年に第 2 版，2020 年に現在の最新版である第 3 版が発行された．発行以来，太陽光発電技術の進歩にあわせ，対象とする技術やインベントリデータを更新している．レポート第 3 版[7] では，表 3 に示す技術について，インベントリデータが収録されている．

なお，これらのデータは，様々な文献や企業へのインタビューなどにより整備されたもので，特定の製品や企業を代表するものではなく，実際には，製

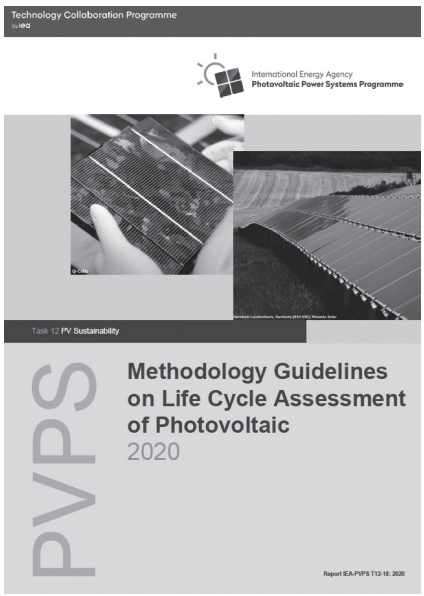

図 5　Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity（LCA ガイドライン）[6]

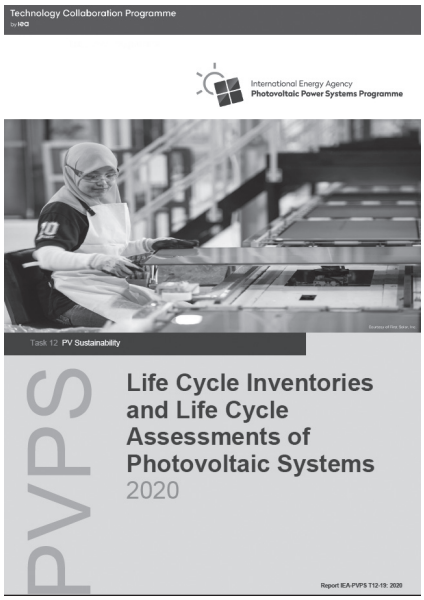

図 6　Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems（LCI レポート）[7]

表2　IEA PVPS Task12：LCA ガイドラインの構成[6)]

Photovoltaics-specific aspects（太陽光発電特有の条件の考え方）	Life expectancy
	Irradiation
	Performance ratio
	Degradation
	Curtailing and DC:AC ratio
	Back-up Systems
Life cycle inventory modelling aspects（ライフサイクルインベントリの考え方）	System models
	Functional unit and reference flow
	System boundaries
	Modelling water use
	Modelling allocation and recycling
	Databases
Building-integrated PV systems（BIPV の評価の考え方）	Goal and scope
	General recommendations
	BIPV electricity
Life cycle impact assessment (LCIA)（環境影響評価の考え方）	
Interpretation（評価結果の解釈）	Introduction
	Energy Payback Time (EPBT) and Non-Renewable Energy Payback Time (NREPBT)
	Environmental impact mitigation potentials (IMP)
Reporting and communication（評価結果の取り纏め、公表）	

表3　IEA PVPS Tasl12：LCI レポートにインベントリデータが収録されている太陽光発電技術[7)]

モジュール製造	結晶シリコン
	CdTe
	CIGS
	ペロブスカイト／シリコン（理論値）
モジュールリサイクル	結晶シリコン
	CdTe
BOS	屋根設置架台
	地上設置架台
	インバータ＋配線ケーブル（屋根設置）
	インバータ＋変圧器（地上設置）
	リチウムイオン蓄電池
	設置工事

品仕様や製造プロセス，製造拠点により変化することに留意が必要である．

これらの Flagship レポートの他，太陽光発電の Water Footprint 分析（2017 年）[8)]，太陽光発電・蓄電池システムの LCA（2020 年）[9)] を取り纏めている．また，太陽光発電の LCA に関する専門家として，欧州で作成された「Product Environmental Footprint Category Rules for Photovoltaic Modules used in Photovoltaic Power Systems for Electricity Generation」（Version 1.0, published 9.11.2018, validity：31.12.2020），米国で作成された「ANSI standard： NSF 457 - Sustainability Leadership Standard for PV Modules and Inverters」（2019）の監修なども行ってきている．

2.3　Subtask 3：Other Sustainability Topics

太陽光発電の使用後処理や LCA 以外の側面から，太陽光発電の持続可能性につながるアプローチを議論，検討している Subtask である．

これまでの主要な成果として，太陽光発電による健康リスクに関する検討がある．太陽光発電は元来，強固な構造を有し，電気的な安全性も確保して設置されているが，懸念されるリスクとして，例えば，

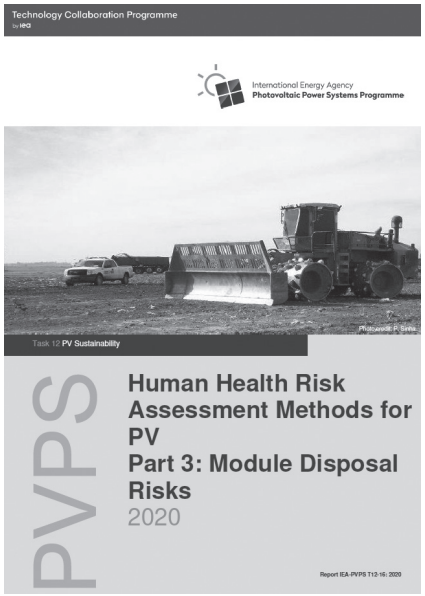

図7　Human Health Risk Assessment Methods for PV：Part 3 Module Disposal Risks[12)]

表４　太陽光発電の健康リスクに関する検討結果[10－12]

想定リスク事象	火　災	破　損	廃　棄
評価対象	結晶 Si（Pb）、CdTe（Cd）、CIS（Se）	結晶 Si（Pb）、CdTe（Cd）（※：CIS（Se）は溶出試験データが得られず、対象外）	結晶 Si（Pb）、CdTe（Cd）、CIS（Se）
評価結果	太陽電池モジュールが設置された建物の火災により生じる有害物質の飛散、吸入によるリスクは閾値と比較して十分に小さく、消火水や雨水とともに地面に沈積した後の土壌への吸着、地中への拡散によるリスクも閾値と比較して十分に小さい。	破損した太陽電池モジュールから、雨水によって有害物質が溶出してしまうことにより生じ得る、土壌への沈積、大気への拡散、地下水への混入による健康へのリスクは、閾値と比較して十分に小さい。	廃棄された太陽電池モジュールから、有害物質（Pb（結晶 Si）、Cd（CdTe）、Se（CIS））が溶出してしまうことにより生じ得る、土壌への沈積、大気への拡散、地下水への混入による健康へのリスクは、閾値と比較して十分に小さい。
参考：レポート	Human Health Risk Assessment Methods for PV: Part 1 Fire Risks[10]	Human Health Risk Assessment Methods for PV: Part 2 Breakage Risks[11]	Human Health Risk Assessment Methods for PV: Part 3 Module Disposal Risks[12]

太陽光発電が設置された建物等における火災，落下物・飛来物などによる太陽電池モジュールの破損，使用後の適正処理（有害物質の除去）を施さないままの埋立処理によって，有害物質の飛散や溶出などによる健康へのリスクが挙げられる．これらのリスクに対し，既存の評価モデル（米国 EPA によるモデル等）を用いたシミュレーションによって，有害物質の大気への飛散量，土壌への沈積量，地中への拡散量を推定し，それらによるリスクの評価を行ったものである．

表４に評価結果（結論）を示す．いずれのリスク事象においても，有害物質の飛散や溶出は生じ得るものの，その量は，健康への影響を憂慮すべき閾値と比較して十分に小さいという結果が示されている．

３．今後の活動予定

Subtask1 では現在，主要国における太陽電池モジュールリサイクルの現状や，結晶 Si 太陽電池セルからの金属回収技術の調査を行うとともに，リサイクルに配慮した設計指針（“Design for recycling” ガイドライン）の作成，モジュールリユースに関する環境性および経済性の評価を行っており，これらの成果は 2021 年中の公表が予定されている．また，最新の太陽電池モジュールリサイクル技術を対象とした LCA を行うことも計画されている．

Subtask2 では，太陽光発電の環境性に関する Factsheet の作成，ライフサイクルにおける鉱物資源消費量の分析などを実施しており，2021 年中の成果公表が予定されている．Task12 の Flagship である LCA ガイドライン，LCI レポートについても，太陽光発電技術の進展を反映し，適宜，更新されていく予定である．

Subtask3 では，太陽光発電の持続可能性に関連する基準やスタンダードの整備状況や，事業入札等における持続可能性に対する要件などを把握するための活動を開始することが予定されている．

太陽光発電は今では，CO_2 排出削減のみならず，様々な環境負荷の低減に貢献するエネルギー生産・供給技術として位置づけられるようになっている．世界的な急速な普及拡大が進む中，太陽光発電の持続可能性は重要な論点であり，Task12 に寄せられる期待も大きい．

欧米では，太陽光発電の環境影響評価，持続性への貢献の考え方などが整備されてきており，Task12 成果物への関心は高く，そのような取り組みに対して，Task12 としての助言や監修も行っている．

日本としても，これまでに蓄積されている知見や，実施されている研究開発の成果などを効果的に活用し，太陽光発電の持続性を高めるための取り組みを展開していくとともに，Task12 活動への貢献，ならびに Task12 活動・成果物を通じた世界への情報や成果の発信に積極的に取り組んでいく必要がある．

参考文献

１）IRENA and IEA-PVPS, End-of-Life Management：Solar Photovoltaic Panels, Report IEA-PVPS T12-06：2016. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_

Panels_2016.pdf
2）K. Komoto, J.-S. Lee, J. Zhang, D. Ravikumar, P. Sinha, A. Wade and G. Heath, End-of-Life Management of Photovoltaic Panels：Trends in PV Module Recycling Technologies, Report IEA-PVPS T12-10：2018. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf
3）G. Heath, T. J. Silverman, M. Kempe, M. Deceglie, D. Ravikumar, T. Remo, H. Cui, P. Sinha, C. Libby, S. Shaw, K. Komoto, K. Wambach, E. Butler, T. Barnes and A. Wade, "Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy", Nature Energy 5：502-510. https://www.nature.com/articles/s41560-020-0645-2
4）K. Wambach, G. Heath and C. Libby, Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe, Report IEA PVPS T12-12：2017. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/LCI_of_Current_European_PV_Recycling_WambachHeath_2017_by_Task_12.pdf
5）P. Stolz, R. Frischknecht, K. Wambach, P. Sinha and G. Heath, Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling, Report IEA PVPS T12-13：2018. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Life_Cycle_Assesment_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_by_Task_12.pdf
6）R. Frischknecht, P. Stolz, G. Heath, M. Raugei, P. Sinha and M. de Wild-Scholten, Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic, Report IEA-PVPS T12-18：2020. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_Task12_LCA_Guidelines.pdf
7）R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten and P. Sinha, Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, Report IEA-PVPS T12-19：2020. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf
8）P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, K. Komoto, J. Macknick, P. Sinha and A. Wade. 2017. Water Footprint of European Rooftop Photovoltaic Electricity based on Regionalised Life Cycle Inventories, Report IEA-PVPS T12-11：2017. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Water_Footprint_of_European_Rooftop_Photovoltaic_Electricity_based_in_Re-giornalised_Life_Cycle_Inventories_by_Task_12.pdf.
9）L. Krebs, R. Frischknecht, P. Stolz and P. Sinha, Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems, Report IEA-PVPS T12-17：2020. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_PVPS_Task12_LCA_PVandStorage.pdf
10）P. Sinha, G. Heath, A. Wade and K. Komoto, Human Health Risk Assessment Methods for PV, Part 1：Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14：2018. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/HHRA_Methods_for_PV_Part1_by_Task_12.pdf
11）P. Sinha, G. Heath, A. Wade and K. Komoto, Human Health Risk Assessment Methods for PV | Part 2：Breakage Risks, Report IEA-PVPS T12-15：2019. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Task_12-Human_Health_Risk_Assessment_Methods_for_PV_part_2.pdf
12）P. Sinha, G. Heath, A. Wade and K. Komoto, Human Health Risk Assessment Methods for PV | Part 3：Module Disposal Risks, Report IEA-PVPS T12-16：2020. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/05/PVPS-Task-12_HHRA-PV-Disposal-1.pdf

著者略歴

河本桂一（コウモト　ケイイチ）
1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了（応用化学専攻）
長年にわたり，太陽光発電のライフサイクル評価，経済社会効果分析，事業性評価などを手掛ける．現在，IEA PVPS Task12の日本代表専門家として参加するとともに，IEA PVPS Task17のOperating Agentを担当．