

使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分
に関する調査結果

平成26年3月

環 境 省
経 済 産 業 省

目次

1. 検討の目的.....	1
2. 検討内容	1
3. 太陽光発電設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討	2
3.1 使用済太陽光発電設備の撤去から処分までのフローに関する調査.....	2
3.1.1 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフロー.....	3
3.1.2 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのコスト.....	20
3.1.3 太陽光発電設備の撤去・運搬・処理に関する留意事項.....	20
3.2 太陽光発電設備の素材構成調査・含有量試験・溶出試験	23
3.2.1 試験対象製品	23
3.2.2 試料調製方法	25
3.2.3 調査・試験方法	33
3.2.4 調査結果	35
3.3 使用済太陽光発電設備のリサイクルに関する海外動向調査	40
3.3.1 欧州 WEEE 指令制定の背景と太陽光発電設備に関する議論・動向.....	40
3.3.2 PV CYCLE の最新動向.....	49
3.3.3 First Solar 社の取り組み	53
4. 太陽熱利用システムのリユース・リサイクル・適正処分に関する検討	57
4.1 使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのフローに関する調査.....	58
4.1.1 使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのフロー	58
4.1.2 使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのコスト	64
4.1.3 使用済太陽熱利用システムの撤去、運搬、リサイクル・処理に関する留意事項....	64
4.2 太陽熱利用システムの素材構成調査・含有量試験・溶出試験	67
4.2.1 調査対象機器	67
4.2.2 試料調製方法	67
4.2.3 調査・試験方法	69
4.2.4 調査結果	69
5. 風力発電設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討	73
5.1 風力発電設備のリユースに関する基礎情報	73
5.1.1 風力発電設備のリユース形態と市場ニーズ.....	73
5.1.2 部品・部材のリユースの概況	74
5.1.3 海外のリユース動向	77
5.1.4 国内のリユース動向	80
5.1.5 リユースを想定した解体手順・留意事項	81
5.1.6 解体時の留意事項.....	86
5.1.7 我が国の風力発電設備のリユースに係る課題	87
5.2 風力発電設備の主要構成素材	89
5.2.1 風力発電設備の主要な構成素材	89
5.2.2 ナセルの主要な構成素材	90

5.3 風力発電設備（主にナセル）のリサイクル・適正処分に関する基礎情報整理	93
5.3.1 風力発電設備のリサイクル・処理フロー	93
5.3.2 リサイクルを検討する際の留意点	95
5.3.3 適正処分を行う上で留意する項目	99
5.4 風力発電設備のリサイクル・適正処分、リユースに係るコスト	100
5.4.1 リサイクル・適正処分に係るコスト	100
5.4.2 リユースを想定した解体コスト	103
6. 本年度調査結果のまとめと今後の検討課題	104
6.1 太陽光発電設備	104
6.2 太陽熱利用システム	104
6.3 風力発電設備	105

1. 検討の目的

再生可能エネルギーの導入拡大は、温室効果ガスの排出削減、エネルギーセキュリティ、新規産業・雇用創出、震災復興等の観点から注目されており、平成 24 年 7 月から開始した再生可能エネルギーの全量買取制度により、今後大幅な導入拡大が見込まれている。

太陽光発電や風力発電については、導入初期段階（国庫補助等の支援制度が開始された 1990 年代中頃）の発電設備が使用済みとなって排出され始めているが、現時点では処理システムは確立されていない。しかしながら、その排出量は過去の普及カーブに沿って加速度的に増加することが見込まれるところ。したがって、再生可能エネルギーの大量導入を支えるためには、使用済再生可能エネルギー設備の適正な処理方法等について検討を進める必要がある。

このため、有識者や関係事業者等に対してヒアリング等を行い、使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分の実態を整理した。

2. 検討内容

	太陽光発電設備	太陽熱利用システム	風力発電設備
製品特性	・素材構成、含有量、溶出量(太陽電池モジュール 27 機種、パワーコンディショナ 5 機種について試験を実施) →3.2 参照	・素材構成、含有量、溶出量（メーカーへのアンケート調査で 7 社について把握。太陽熱利用システム 3 機種について実機種の情報を収集） →4.2 参照	・風車の一般的な素材構成（公表資料にて全体像を把握） ・100kW 風車ナセルの素材構成（実機の解体試験により把握） →5.2 参照
製品流通特性	・撤去・運搬・処理に関するフロー（メーカー、建物解体業者、廃棄物処理業者、ハウスメーカー、消費者、施工業者へのアンケート・ヒアリング調査） →3.1 参照	・撤去・運搬・処理に関するフロー（メーカー、建物解体業者、ハウスメーカー、施工業者へのアンケート・ヒアリング調査） →4.1 参照	・風車の撤去・運搬・リユース・リサイクル方法（公表資料、事業者ヒアリングにて全体像を把握） →5.1、5.3 参照
社会システム	・海外関連制度・リサイクルスキームの動向（WEEE、RoHS 等について目的・背景等の情報収集） →3.3 参照		
技術	・リサイクル技術の開発動向（廃棄物処理業者等へのヒアリングによる把握） →3.1 参照		・100kW 風車ナセルの解体手順、適正処分方法（実機の解体試験により把握） →5.1、5.3 参照
経済性	・撤去・運搬・処理に関するコスト（アンケート調査を通じて概略を把握） →3.1 参照		・100kW 風車ナセルの解体コスト（実機の解体試験等により把握） →5.4 参照

3. 太陽光発電設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討

太陽光発電設備の概略は以下のとおりであり、太陽電池モジュールと太陽電池モジュールを支えるアレイ（架台）、発電した電気を直流から交流に変換するパワーコンディショナ等により構成される。

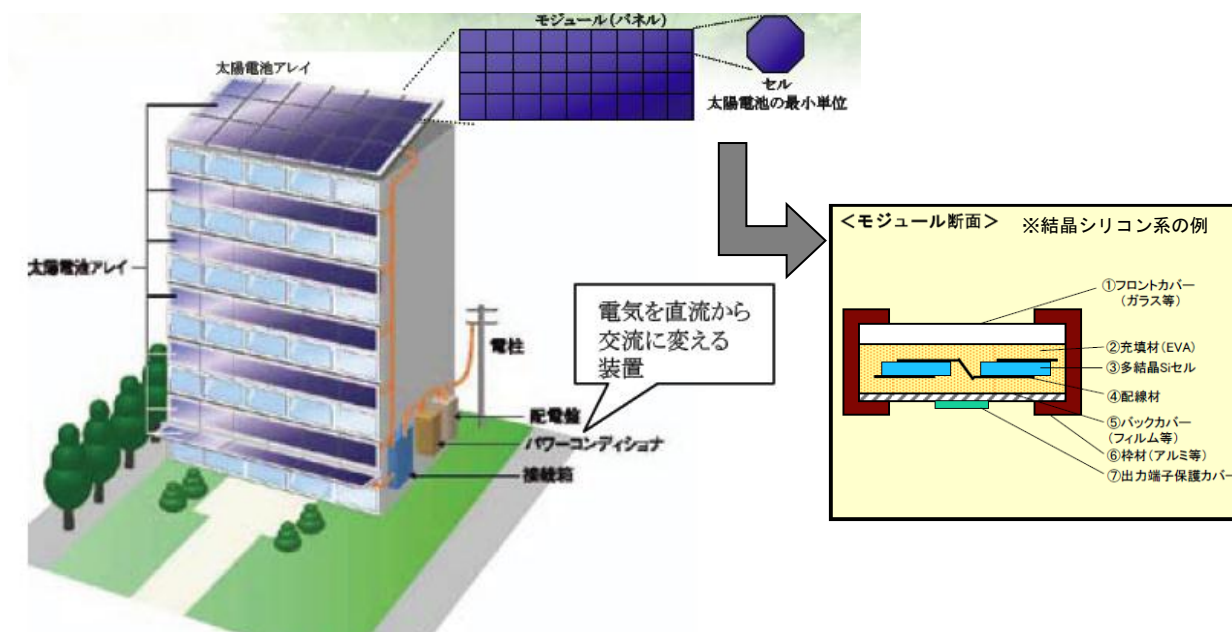


図 3-1 太陽光発電設備の概略

出所) シャープ(株)「太陽光発電システムのリサイクル・リユース処理技術等の研究開発 ①結晶シリコン太陽電池モジュール発表資料（NEDO）」、NEDO「太陽光発電フィールドテスト事業 設置事例集 III」より作成

太陽電池モジュールについては、研究開発段階のものを含めて多くの種類があるが、実用化されているものとしては「結晶系（単結晶、多結晶）」「薄膜系（シリコン系、化合物系）」に大別することができる。

3.1 使用済太陽光発電設備の撤去から処分までのフローに関する調査

現在の使用済太陽光発電設備のフローに係る事業者としては、太陽光発電設備メーカー、建物解体業者、ハウスメーカー、廃棄物処理業者・スクラップ業者等が考えられる。関係者別に現時点で効果的・効率的と考えられる調査方法を選択し、表 3-1 の通り調査を実施した。

現状においては、使用済太陽光発電設備の排出量は、非常に少ないと考えられるため、撤去から処分までのフローは、限られた暫定的なものである可能性がある。排出量や市場の変化によってフローが変わりうる点に留意が必要である。

表 3-1 調査概要

関係者	調査内容
太陽光発電設備メーカー	一般社団法人 太陽光発電協会（JPEA）に協力を依頼し、太陽光発電設備メーカーを対象としたアンケート調査を実施（有効回答数 6 社）。
建物解体業者	公益社団法人 全国解体工事業団体連合会に協力を依頼し、解体工事施工技士保有企業を対象とした郵送によるアンケート調査を実施（3,000 社に発送、有効回答数 851 社、回収率 28.4%）。
ハウスメーカー	一般社団法人 住宅生産団体連合会に協力を依頼し、大手ハウスメーカーを対象としたアンケート調査を実施（有効回答数 11 社）。
廃棄物処理業者・スクラップ業者	・建物解体業者、太陽光発電設備メーカー、ハウスメーカーへの調査結果に基づき、太陽光発電設備の処理を実施している事業者を特定してヒアリング調査を実施（5 社程度）。 ・全国産業廃棄物連合会ホームページの「処理業者情報公開システム」に登録されている事業者のうち、「金属くず」「ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず」「がれき類」を取り扱う事業者（ただし、収集運搬のみを行う事業者は除く）に対してアンケート調査を実施（951 件発送、有効回答数 400 件、回収率 42%）。
非鉄製錬業者	
太陽光発電設備ユーザー	以下に示す太陽光発電設備ユーザーに対してアンケート調査を実施。 ・太陽光発電普及拡大センター（J-PEC）による補助制度を利用して導入し、財産処分（撤去）申請を J-PEC に対して提出したユーザー（14 件発送、有効回答数 6 件、回収率 42.9%） ・J-PEC による補助制度を利用して導入したユーザー（1,966 件発送、有効回答数 1,082 件、回収率 55%）
施工業者	住宅用太陽光発電システムの施工業者等（J-PEC 事業における補助金申請代行者）を対象としたアンケート調査を実施（1,976 件発送、有効回答数 986 件、回収率 49.9%）。

3.1.1 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフロー

現時点で把握された調査結果を踏まえ作成した、使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフローを図 3-2 に示す。現状の使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフローには、以下の 3 つのルートが考えられる。これらのルートは、アンケート調査やヒアリング調査から推定した流れであり、この他にもフローが存在する可能性がある点や市場や排出量等の変化によりフローが変わりうる点等に留意が必要である。

- (1)太陽光発電設備メーカールート
- (2)建物解体業者ルート
- (3)施工業者ルート

このうち、現状では、(1)太陽光発電設備メーカーから排出されるルートが最も発生量が多いと推察される。太陽光発電設備メーカーでは、ある程度の量になるまで保管し、中間処理業者・金属スクラップ業者に引き渡している。引渡しは、太陽電池モジュール中の銀の含有量や銀の相場によって有償にも逆有償にもなる。

- (2)建物解体業者から建物解体等に伴い排出されるルートでの排出は、現状かなり少ない

と推察される。多くは、建物解体前に撤去され、モジュールのまま、産業廃棄物の中間処理業者等に逆有償で引き渡されていると見られる。

(3)取り外した施工業者等から排出されるルートでの排出も、現状かなり少ないと推察される。施工業者等が排出するのは、施工不良、製品不良等の理由によりモジュールを取り外す場合で、取り外したモジュールは施工業者等がメーカーに引き渡し、産業廃棄物処理業者等に逆有償で引き渡していると思われる。

現状では、(1)太陽光発電設備メーカーから排出されるルートについては、太陽光発電設備メーカーの手元で一定量がまとまるまで保管することで、効率的な運搬・処理が可能となっていると推察される。一方、(2)建物解体業者や(3)施工業者が排出するルートでは、太陽光発電設備メーカーが排出するルートと比較すると量が少なく、業者単独で一定量をまとめて確保することが難しい。このため、太陽電池モジュールだけを取り出し、それに最適化された処理が行われるわけではなく、その他の排出物と同様に従来の産業廃棄物処理の流れの中で処分が行われているが、現時点で問題点等は顕在化していない。

なお、フローには明記していないが、国内にて中古品としてリユースされる太陽電池モジュールや中古利用目的で海外輸出される太陽電池モジュールの存在が指摘されている。

国内でのリユースについては、長野県を拠点とするネクストエナジー・アンド・リソースやエコテック等、民間企業数社が実施している。従来は研究・実験用、自治体、テーマパークの立て替え等からの排出・引取が中心であったが、近年は住宅用の引き合いも増えてきている。ただし、新品への補助金制度の整備や新品の太陽電池モジュールの価格低下が進んでいることから、中古の太陽電池モジュール事業のコスト採算性は厳しい状況にある。一方、海外輸出については、現時点では実態を把握することができておらず、今後の検討課題と考えられる。また、将来的には国内外における二次利用（カスケード型のリユース）市場創出の可能性についての指摘もあることから、多様な流通ルートについて考慮しておく必要がある。

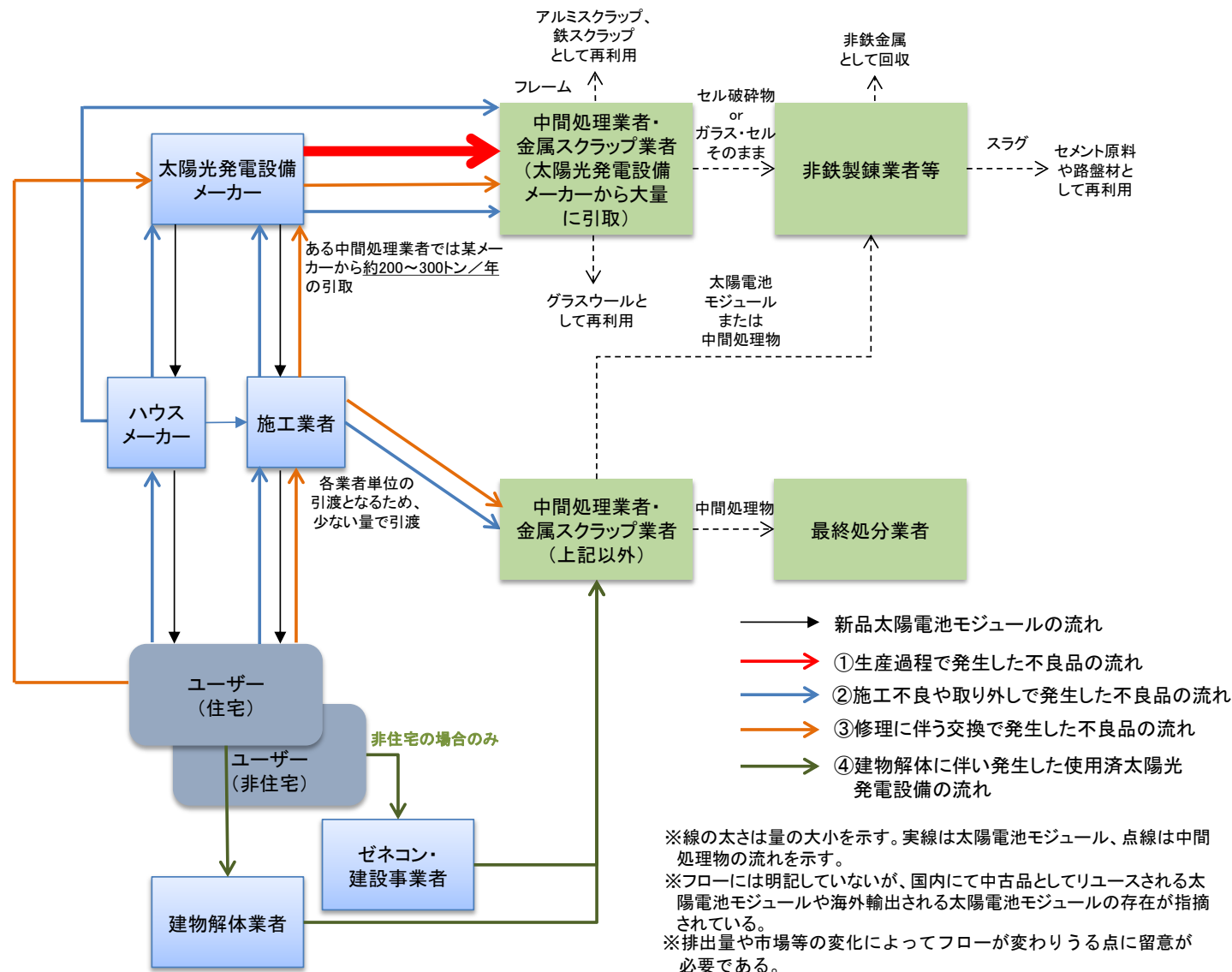


図 3-2 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフロー

(1) 太陽光発電設備メーカールート

1) 概要

- 生産過程で発生した不良品、施工不良で発生した不良品（使用済品）、製品不良で発生した不良品（使用済品）が太陽光発電設備メーカーに引き取られている。内訳は、生産過程で発生した不良品が多く、使用済品は少ないようであった。
- 太陽光発電設備メーカーでは、ある程度の量になるまで保管され、中間処理業者・金属スクラップ業者に引き渡している。太陽光発電設備メーカーの不良品の取扱実績の推定は現時点で収集できている情報からは困難であるが、中間処理業者・金属スクラップ業者に対するヒアリング調査によれば、ある太陽光発電メーカーから年間 200～300 t 程度の引取実績のある中間処理業者・金属スクラップ業者も存在していた。
- 引渡は、有償または逆有償であり、太陽電池モジュールの銀の含有量や銀の相場によって、変動する。ある業者によれば、現在の銀の相場であれば、単結晶モジュールは有償取引が可能であり、薄膜モジュールは逆有償取引となるとのことであった。
- 中間処理業者・金属スクラップ業者では、フレームを手解体にて取り外し、フレームは有償引渡されている。また、残ったガラス・セルは、破碎される場合とそのままの場合が存在し、その後、非鉄製錬業者等引き渡されている。なお、ガラス・セルの破碎時に、ガラスとセルを選別する業者も存在し、ガラスはグラスウールとして再利用され、セルは非鉄製錬業者等引き渡されていた。中間処理業者・金属スクラップ業者での処理方法は引渡先である非鉄製錬業者等の引取条件次第かと推定される。
- 非鉄製錬業者等では、銅製錬炉に投入され、銀等は回収され、スラグについてもセメント業者や路盤材メーカーに引き渡される。

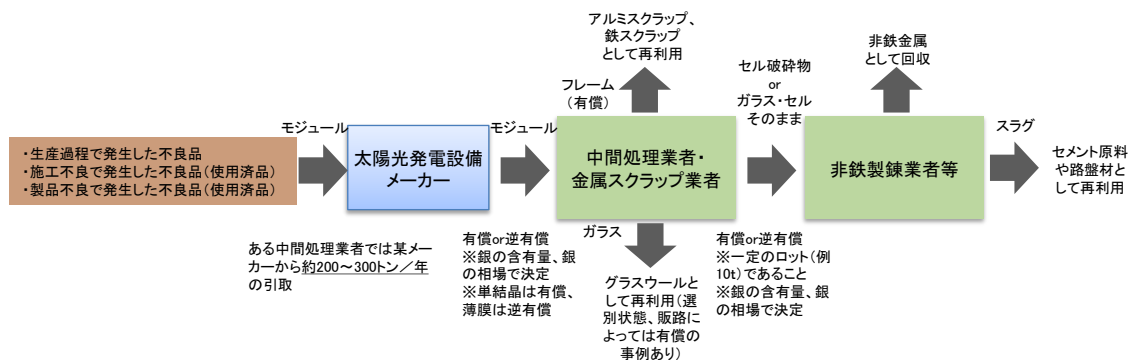


図 3-3 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフロー
(太陽光発電設備メーカールート)

2) 太陽光発電設備メーカーにおける使用済太陽光発電設備の取扱実態

以下、太陽光発電設備メーカーに対して、アンケート調査及びヒアリング調査を実施して把握した、太陽光発電設備メーカーにおける使用済太陽光発電設備の取扱実態を整理した。

a. 基本情報

- いずれの太陽光発電設備メーカーも太陽光発電設備の製造・販売・施工・修理の全体もしくは一部を担っている。また、多くの太陽光発電設備メーカーが、販売・施工・修理等を担う子会社を保有している。
- なお、回答のあった太陽光発電設備メーカーでは、自社製品の施工・修理に関する研修を実施しており、研修を受講した個人へのID付与が行われている（半数の太陽光発電設備メーカーからは回答が得られなかった）。

b. 自社の生産過程で発生した不良品等の取扱い

- 生産過程で発生する不良品等としては、製品形態や途中加工状態等の様々な種類があり、具体的には、ウェハー、シート材、モジュール、廃液類等が挙げられた。その理由としては、工程中の破損や特性不良や外観不良が挙げられた。
- 自社生産過程で発生した不良品等の引渡先としては、産業廃棄物処理業者やスクラップ業者等が挙げられた。引渡にあたっては、梱包や記録等の作業の他に、運搬の前にモジュールを解体する場合（プラスチック品、配線材の分別等）と何もしないでそのまま引き渡す場合があった。
- 引渡品によって、発生するコストについて、有償・逆有償が異なるようであった。また、引渡先の業者によっても有償・逆有償は異なるようであった。これは、収集運搬距離や得意な廃棄物種類等が影響していると考えられる。太陽電池モジュールを解体せずにそのまま引き渡す場合も、現状では、売却できているようであった。なお、ギリギリ売却できている場合と安定して売却できている場合が存在。その理由としては、各社の製造工場ごとに引渡先となる業者が異なること等が挙げられていた。

c. 製品出荷以降に、自社子会社またはその他の施工業者、建物解体業者、ハウスメーカー等から引取った使用済みの機器・部品等の取扱い

- 施工過程における交換（機器不良、施工不良）に対する太陽光発電設備メーカーの対応状況（施工業者への依頼・指示等）としては、ある太陽光発電設備メーカーでは、施工業者責任の場合は施工業者により廃棄処分となり、それ以外については、太陽光発電設備メーカーが回収を行い、廃棄または有償売却を実施ということであ

った。また、ハウスメーカーについても同様の対応ということであった。別の太陽光発電設備メーカーでは、自らの引取実績はなく、施主（ユーザー）は、施工業者に引渡、施工業者が産業廃棄物として処分するということであった。なお、引き取った後の取扱状況（引渡先、作業、コスト）については、自社の生産過程で発生した不良品等の取扱いと同様との回答であった。

- 修理（修理に伴う交換を含む）に対する太陽光発電設備メーカーの対応状況（施工業者等への依頼・指示、保証期間外の場合の取扱い等）としては、太陽光発電設備メーカー系列のサービス会社にて交換後、太陽光発電設備メーカーにて回収を行い、廃棄または有償売却を実施ということであった。なお、引き取った後の取扱状況（引渡先、作業、コスト）については、自社の生産過程で発生した不良品等の取扱いと同様との回答であった。
- 取外し（建物解体を伴わない取外し、買い替え等）に対する太陽光発電設備メーカーの対応状況（施工業者、建物解体業者等への依頼・指示等）としては、全ての太陽光発電設備メーカーが実績なし、もしくは、回答ができないということであり、情報を収集することができなかった。なお、生産工程や市場返却品を含めた廃棄物量は、公表されている海外での実績と同等レベル（約 0.3%）との回答があった。

d. 使用済み太陽光発電設備の取外し方法等

- 上述の通り、取り外しに関する情報を収集することができなかったため、具体的な方法（取外し手順、取外しの際に使用する機器（重機等）、取外し作業に要する人数・時間、費用（ユーザーからもらっている作業費用）、留意点等）についても情報を得られなかった。

(2) 建物解体業者ルート

1) 概要

- 建物解体に伴い発生した使用済み品は、建物解体業者に引き取られている。建物解体業者に対するアンケート調査によれば、過去 3 年間で、建物解体業者のうち約 5% が太陽電池モジュールの取扱があると回答し、その件数は 1 業者あたり 1 件～20 件程度であった。
- 建物解体業者は、建物の解体を行う業者と、自ら産業廃棄物処理まで行う業者に分かれる。建物の解体を行う業者の場合、そのまま中間処理業者・金属スクラップ業者に引き渡され、多くは逆有償であった。
- 自ら産業廃棄物処理まで行う建物解体業者や中間処理業者・金属スクラップ業者では、フレームを手解体にて取り外し、フレームは有償引渡されている。また、残っ

たガラス・セルは、多くの場合、破碎され、埋立処分される（一部、ガラスのリサイクルを行う業者も存在）。ガラス・セル等が処分される理由としては、太陽光発電設備メーカールートとは異なり、一定のロットにならないためと推測される。

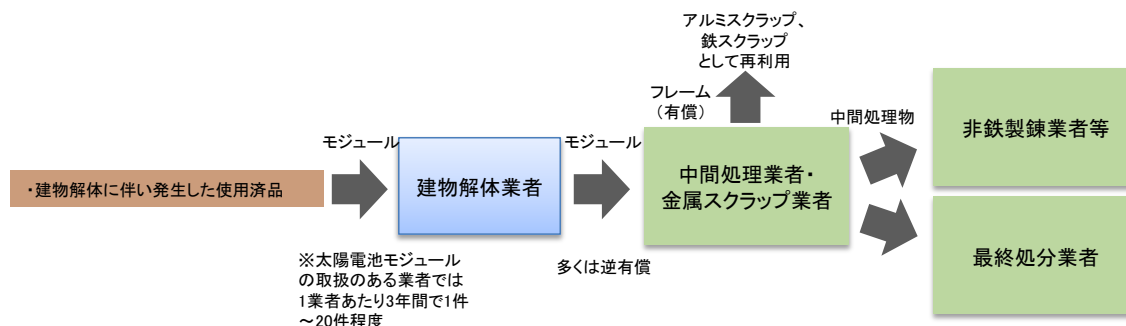


図 3-4 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフロー（建物解体業者ルート）

2) 建物解体業者における使用済太陽光発電設備の取扱実態

以下、建物解体業者に対して、アンケート調査及びヒアリング調査を実施して把握した、建物解体業者における使用済太陽光発電設備の取扱実態を整理した。

a. 住宅の屋根からの使用済太陽光発電設備の取外し実績

- 過去に住宅の屋根から使用済太陽光発電設備を取外した実績のある建物解体業者は、全体の 5%であった。また、取り外した実績があると回答した建物解体業者が、過去 3 年以内に住宅の屋根から使用済太陽光発電設備を取外した件数の平均は 4.1 件であった。
- この調査結果を踏まえ、ア) 解体工事施工技士数に基づく拡大推計と、イ) 建物解体業者数に基づく拡大推計の 2 通りで、全国における 1 年間の建物解体業者による太陽光発電設備の取外し件数を推計した。

ア) 解体工事施工技士数に基づく拡大推計

- 今回の調査対象とした建物解体業者 3,000 社のうち回答を得られた 851 社において、過去 3 年以内に、住宅の屋根から使用済太陽光発電設備を取外した件数の合計は 160 件であったことから、この 851 社における 1 年間の取外し件数を 53（＝160÷3）件とする。
- 建物解体業者による太陽光発電設備の取外し件数が、建物解体業者が保有する解体工事施工技士の数に相関すると仮定すると、今回の調査で回答を得られた建物解体業者 851 社には、2,588 人の解体工事施工技師登録者が属しており、解体工事施工技士登録者名簿には平成 25 年 11 月時点で計 16,779 人の登録者が明示されていること

を踏まえて解体工事施工技士登録者数を元に拡大推計を行うと、全国の建物解体業者による1年間の太陽光発電設備の取外し件数は下記の通り推計される。

$$53 \times 16,779 / 2,588 \div 346 \text{ 件}$$

- 上記より年間 346 件程度の太陽光発電設備が、建物解体業者によって取り外されていると推測される。
- ただし、回答を得られた建物解体業者の規模が比較的大きいと考えられることも念頭に置く必要があり、且つ、以下の点に留意する必要がある。
 - 建物解体業者による太陽光発電設備の取外し件数と、建物解体業者が保有する解体工事施工技士数の相関関係
 - 太陽光発電設備の取外しを実施する全国の建物解体業者における解体工事施工技士の資格保有状況

イ) 建物解体業者数に基づく拡大推計

- 今回の調査対象とした建物解体業者 3,000 社のうち回答を得られた 851 社において、過去3年以内に、住宅の屋根から使用済太陽光発電設備を取外した件数の合計は 160 件であったことから、この 851 社における1年間の取外し件数を 53 件 ($=160 \div 3$) とする。
- 全国における建物解体業者の事業者数は 13,000 社程度と推計されている¹ことを踏まえ、建物解体業者数を元に拡大推計を行うと、全国の建物解体業者による1年間の太陽光発電設備の取外し件数は下記の通り推計される。

$$53 \times 13,000 / 851 \div 810 \text{ 件}$$

- 上記より年間 810 件程度の太陽光発電設備が、建物解体業者によって取り外されていると推測される。ただし、今回アンケート調査対象とした 3,000 社を抽出するにあたっては、解体工事施工技士登録者数の多い事業者 ($\Rightarrow$ 比較的大規模の大きい事業者) を優先的に抽出していることから、過大推計となっている可能性がある点に留意が必要。

b. 過去に使用済太陽光発電設備の取外しを行うこととなった経緯

- 使用済太陽光発電設備を取外した背景としては、「機器の所有者からの依頼」が全体の7割程度と最も多く、次いで「ハウスメーカーからの依頼」が3割弱程度と多かった。

¹ タウンページより推計：全国解体工事業団体連合会 出野専務理事の講演資料より。

c. 使用済太陽光発電設備の取外方法

- 使用済太陽光発電設備の取外しの際、太陽電池モジュールに関連する機器・部品等（太陽電池モジュールや本体固定用ワイヤー・ボルト類、架台）はいずれも、多くの建物解体業者が取外している。
- 一方で、「パワーコンディショナ」や「発電モニター」「接続箱」といった関連機器の取外しを行う建物解体業者はいずれも3割前後と少なく、太陽電池モジュールの入れ替えによる太陽電池モジュールの取外し等が一定程度あるものと考えられる。
- 使用済太陽光発電設備の取外しの際に使用する機器（使用すると想定される機器）としては、「移動式クレーン」の回答が約6割と多かった。「クレーン付きトラック」や「その他」の回答は30%弱と少なく、「その他」の内容として、「バックホー」「高所作業車」「手下ろし」といった記述が見られた。

d. 使用済太陽光発電設備の取外しに要する工数

- 使用済太陽光発電設備の取外しの作業に要する人数は、平均は3.0人であった。
- 作業に要する平均は5.8時間であった。
- 作業に要する人数と時間を掛けあわせ、述べ人数・取り外し時間の平均を算出すると10.5人・時間であった。

e. 使用済太陽光発電設備の取外作業のために発注者から受領した料金（発注者が支払った費用）

- 使用済太陽光発電設備の取外し作業のために発注者から受領した料金の平均は約9万円であった。

f. 使用済太陽光発電設備の取外の際に留意する点

- 使用済太陽光発電設備の取外しの際に留意する点として、「安全管理（転落防止、感電防止等）」と回答した建物解体業者は約8割程度と多かった。一方で、「有害物質の管理」と回答した建物解体業者は少なかった。「その他」としては、主に「屋根の損傷」が挙げられた。

g. 取り外した使用済太陽光発電設備の取扱方法

- 取り外した使用済太陽光発電設備の機器や部品の取扱い方法について、実施したことのある方法としては、「現場または保管場所等で分解して素材ごとに分別し、引渡した」との回答が、「取り外したままの状態での引渡し」という回答を上回った。

- 現場または保管場所等で分解して素材ごとに分別し、引渡した場合の引渡し先としては、「中間処理業者」「金属スクラップ業者」との回答が多く、中間処理業者は費用支払、金属スクラップ業者は売却しているという回答が多く見られた。建物解体業者においては、素材毎に分別してから引き渡すことで、有償売却可能な部分ができ、全体の処分費用低減に繋がっている実態が窺える。
- 取り外したままの状態で行渡した場合の引渡し先としては、「中間処理業者」との回答が最も多く、その際の費用のやりとりの大部分は「費用支払」であった。

h. その他

ア) 他の解体時発生物との混合の状況

- 建物解体業者に対するヒアリング調査によれば、住宅解体で発生する他の設備と同様に扱えているとの結果が得られており、太陽光発電設備のみを特別に扱っている建物解体業者は現状では少ないものと推察される。

イ) 建設リサイクル法対象外の 80 m²以下の建物の解体・分別の実施状況

- 建設リサイクル法においては、80m²以上の住宅を解体する場合、分別解体を行い、木材、コンクリート等の建設資材を再資源化する必要があるが、太陽電池モジュールについては同法で定める建設資材（土木建築に関する工事に使用する資材）に該当しないことから、他の住宅設備と同様に取り扱われることとなる。
 - そのため、建設資材以外の廃棄物については、建設リサイクル法において、特段の義務は設けられていないが、建設リサイクル法の基本方針において、分別解体過程において有害物質等の発生抑制、大気中への拡散又は飛散を防止するよう努めることが求められている。たとえば、エアコンディショナーや冷蔵庫に冷媒として使用されているフロン類の大気中の拡散を防止する必要性や、PCB を含有する電気機器等を建築物等の内部に残置せず、建築物等の解体に先立ち撤去し、廃棄物処理法に従って適切に措置することが求められている。
- 建物解体業者に対するヒアリング調査によれば、80m²以下未満の建物については以下の通り割合は非常に少ないものと推察される。
 - 建設リサイクル法は、80 m²を境界とした場合、建物解体工事における廃棄物発生量ベースのカバー率が約 94%となるとの推計に基づいて制定された。
 - 戸建住宅の平均延床面積は 131.4 m²（平成 24 年、プレハブ建築協会）であり、80 m²以下未満の戸建住宅は非常に少ないと推察。
 - 現時点では、住宅メーカーが建てた太陽光発電設備が設置された住宅の解体件数は比較的少ない。建替のために解体する既存住宅の中には 80 m²以下未満の物

件もあると思うわれるが、太陽光発電設備が載っているものは非常に少ないと推察。

- 「ミンチ解体（事前分別なしに分別しないで重機等で一気に解体すること）」の状況については以下のヒアリング結果が得られており、昨今では、分別されることが多いものと推察。
 - 太陽光発電設備や屋根瓦、内・外装材のガラス、石膏ボード、クロス等が設置されたままミンチ解体をすると、廃棄物が安定型処分場へ埋め立てることができなくなり、管理型処分場への引渡しコストが嵩んでしまう。建物解体業者の負担が大きくなるため、現在は、ミンチ解体は建物解体業者にとっても好ましくない状況。
 - 住宅メーカーが建替等で既存住宅を解体する際には、太陽光発電設備や屋根瓦、内・外装材のガラス、石膏ボード、クロス等を全て取り外し、躯体だけになった段階で、重機で解体する。この段階での解体作業を「ミンチ解体」と呼んで指摘されている可能性もあるのではないかと推察。躯体は重機で解体するしかない。

ウ) 屋根と一体型のモジュールの取外し方法

- 最近では太陽光発電設備の発電容量を増やす観点から、屋根材と一体となった太陽電池モジュールの導入が始まったところ。
- 今後、屋根材と一体型となった太陽光発電設備の販売が主流となる可能性も考えられる。そうになると、メンテナンスや解体等についてもハウスメーカーの専属の施工業者が実施する割合が高くなると推測される。
- 三角屋根の住宅については、ビルトイン型（屋根材の代わりに太陽電池モジュールを埋め込むタイプ）、瓦一体型の導入もある。あるハウスメーカーでは、ビルトイン型のものが太陽光発電設備の取扱全体の2～3割程度。
- 屋根材一体型のモジュールは、ハウスメーカーが一般的な太陽電池モジュールを太陽光発電設備メーカーから調達し、自社で屋根材と一体化させたものを供給している。屋根材と一体となると、架台に付けるものに比べて、リサイクルは容易でなくなると思われる。

エ) 太陽光発電設備が一般廃棄物としての残存物品であるかどうかの判断

- 建物解体業者に対するヒアリング調査によれば、今後、行政の解釈を求めたいが、現時点においては、太陽光発電設備は残存物品（建物に固定されておらず、所有者責任で廃棄が求められるもの）ではなく、産業廃棄物となる建築設備とみなされるものと考えているとのことであった。

オ) 解体時の作業場所が広い場合・狭い場合の対応

- 建物解体業者に対するヒアリング調査によれば、解体時の作業場所が広い場合・狭い場合の対応は以下の通りであった。
 - 建物が密集していない敷地だったため、重機を使用して解体分別した。
 - 道路状況によって使用する重機が異なる。重機で近づける場合にはユニック車を用い、近づけない場合にはクレーンで吊り上げる（間の建物を跨ぐ形となることもある）。

カ) 太陽電池モジュールの事前取り外しをせずに建物解体が実施される可能性

- 建物解体業者に対するヒアリング調査によれば、太陽電池モジュールの事前取り外しをせずに建物解体が実施される可能性は以下の通りであった。
 - 現時点では太陽電池モジュールを外さない事例はない。
 - 現時点では取り外し実績は1件のみ（屋根の葺き替えのためのモジュールの取り外し）であり、取り外して、屋根葺き替えを実施した。

(3) 施工業者ルート

1) 概要

- 施工不良で発生した不良品（使用済み品）や製品不良で発生した不良品のうち、施工業者が取り外しを行ったものについては、太陽光発電設備メーカーに引き渡されるルートと、施工業者自らが産業廃棄物として処分するルートが存在する。太陽光発電設備メーカーに引き渡された場合は、(1)のルートとなる。
- 施工業者の取扱実績の推定は現時点で収集できている情報からは困難であるが、アンケート調査によれば、施工業者の約12%が太陽光発電設備の撤去経験があり、その撤去件数の多くは年間1～3件であった。
- 中間処理業者・金属スクラップ業者に引き渡された場合は、フレームを手解体にて取り外し、フレームは有償引渡されている。また、残ったガラス・セルは、多くの場合、破碎され、埋立処分される（一部、ガラスのリサイクルを行う業者も存在）。ガラス・セル等が処分される理由としては、(1)とは異なり、一定のロットにならないため推測される。

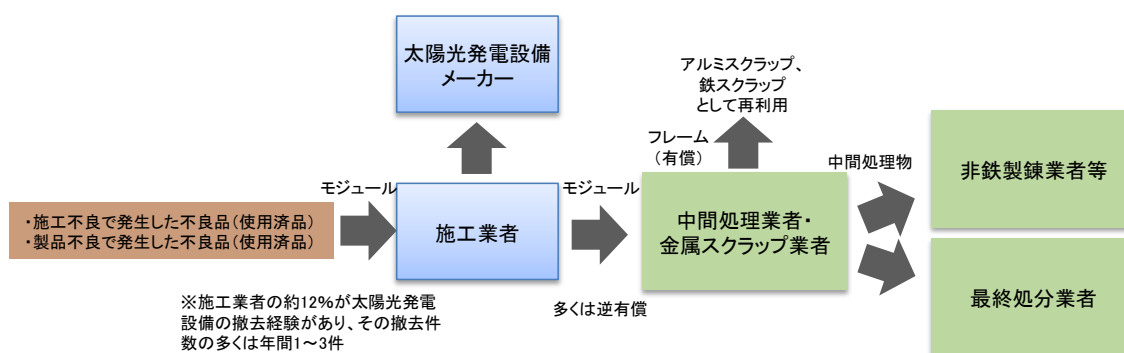


図 3-5 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのフロー（施工業者ルート）

2) 施工業者における使用済太陽光発電設備の取扱実態

以下、施工業者に対して、アンケート調査を実施して把握した、施工業者における使用済太陽光発電設備の取扱実態を整理した。

- 住宅用太陽光発電システムの施工業者等（J-PEC 事業における補助金申請代行者等）のうち、申請件数の上位 2,000 社を調査対象とした。
- 施工件数は年々増加しており、2012 年度の 1 社あたりの平均施工件数は 372 件である。
- 機器の交換については約半数の事業者実績がある。修理の際に不要となった機器（太陽電池モジュール、パワーコンディショナ）は、メーカーまたは再資源化処理業者・廃棄物処理業者に、特に手を加えずに引き渡すケースが多い。
- 20%の事業者が、主に一般ユーザーから撤去に関する問い合わせを受けている。そのうち 58%の事業者は、自社で撤去を実施したと回答した。撤去件数は年間 1～3 件の事業者がほとんどである。
- 取り外したシステムは、77%の事業者が自社で運搬していると回答した。
- 取り外したシステム（太陽電池モジュール、パワーコンディショナ）は、メーカーまたは再資源化処理業者・廃棄物処理業者に、特に手を加えずに引き渡すケースが多い。

(4) その他フローに関係するプレイヤー

太陽光発電設備メーカー、建物解体業者、施工業者以外のその他フローに関係するプレイヤーにおける使用済太陽光発電設備の取扱実態を以下に整理した。

1) ハウスメーカー

以下、ハウスメーカーに対して、アンケート調査及びヒアリング調査を実施して把握した、ハウスメーカーにおける使用済太陽光発電設備の取扱実態を整理した。

a. 太陽光発電設備の販売・取付けについて

- 太陽光発電設備の販売に際して、ほとんどのハウスメーカーでは、設備のメーカー、種類、発電方式、規模等を自社で選定し、消費者に提案している。
- ハウスメーカーが太陽光発電設備を販売する際の取付け主体については、ハウスメーカー各社が契約している業者により取付けを行うケースがほとんどであり、自らが取付けを行うケースは見られなかった。
- ハウスメーカーが販売している太陽光発電設備の保証については、太陽光発電設備メーカーが消費者に対して直接保証しているケースと、太陽光発電設備メーカーがハウスメーカーに保証した上でハウスメーカーが消費者に対して保証しているケースの双方が見られた。
 - なお、ハウスメーカー個社へのヒアリング調査では、保証に関して、太陽光発電設備メーカー、ハウスメーカー間と、ハウスメーカー、ユーザー間で契約がなされており、修理等に関するユーザーからの問合せは、まずハウスメーカーが受けるといった例が見られた。なお、問合せ内容が施工に関することであれば、ハウスメーカーから下請（施工）業者に連絡し、機器に関することであれば、機器のメーカーに連絡するとのことであった。
- ハウスメーカーにおける太陽光発電設備の販売実績（平成 24 年度）は、アンケート調査の回答のあった 11 社の平均値で 4,972 社。
 - なお、ハウスメーカー個社へのヒアリング調査では、近年の新築住宅販売件数のうち、約 84%の住宅に太陽光発電設備が設置されているという事例も見られた。

b. 消費者から太陽光発電設備の修理に関する問合せがあった場合の対応

- ハウスメーカーが消費者から太陽光発電設備の修理に関する問合せを受けた場合の対応について尋ねた結果は以下のとおりである。
 - 「ハウスメーカーが契約している取付業者が修理を行う」という場合が最も多く、次いで、「ハウスメーカーが太陽光発電設備メーカーに連絡し、太陽光発電設備メーカーが修理を行う」というケースが多いという結果となった。その他としては、修理の内容によって修理する主体が異なっており、機器不良であれば太陽光発電設備メーカーが、施工不良であれば取付業者（もしくは自社）が修理を行うという回答が多く見られた。

c. 消費者から太陽光発電設備の取外しに関する問合せがあった場合の対応

- ハウスメーカーが消費者から太陽光発電設備の取外し（住宅の解体を伴わない取外し。製品の入替え等）に関する問合せを受けた場合の対応について尋ねた結果は以下のとおりである。
 - 「ハウスメーカーが取付に関する契約をしている業者が取り外しを行う」という場合が最も多い結果となった。その他としては、特段の取り決めはないとする回答が見られた。

d. 消費者から太陽光発電設備が設置された住宅の解体に関する問合せがあった場合の対応

- ハウスメーカーが消費者から太陽光発電設備が設置された住宅の解体に関する問合せを受けた場合の対応について尋ねた結果、「ハウスメーカーが契約している建物解体業者が住宅の解体を行う」という場合が最も多い結果となった。その他としては、特段の取り決めはないとする回答が見られた。
 - なお、ハウスメーカー個社へのヒアリング調査では、住宅を解体する場合には、下請けの建物解体業者が行っており、通常の住宅の解体ではまず屋根瓦を下ろすが、太陽光発電設備が取付けられている住宅の場合には、その前に手作業で太陽光発電設備を下ろすという事例が確認された。

e. ハウスメーカーが廃棄等を行っている使用済太陽光発電設備の機器・部品や不良品等の取扱い

- ハウスメーカーが太陽光発電設備の機器・部品等を引渡す際に行った作業について尋ねた結果、何もしないという回答が最も多く見られた。
- ハウスメーカーにおける使用済太陽光発電設備の機器・部品等の引渡先について尋ねた結果、該当する事例が少ない状況ではあるが、設備メーカーへの引渡（無償）、中間処理業者への引渡（逆有償、無償）、最終処分業者への引渡（逆有償、無償）といった回答が見られた。
- ハウスメーカーにおける使用済太陽光発電設備の機器や部品の引渡先のうち、引渡し重量が最も大きい引渡先について尋ねた結果、設備メーカー、中間処理業者、最終処分業者といった回答が多く見られた。なお、その他としては、事例・実績がないため不明とする回答が多く見られた。
- なお、ハウスメーカー個社へのヒアリング調査では、ハウスメーカーが引き取った太陽光発電設備について、取り外したもの（建物解体時以外）は保管された後、指定の廃棄物処理業者に引渡され、中間処理や埋立処分がされるものが、建物解体時に取り外したものは、現場からはそのままの形で搬出されて総合中間処理業者や金

属スクラップ業者に引渡され、金属以外については埋立処分がされるケースが多いとのことであった。

2) 中間処理業者・金属スクラップ業者

中間処理業者・金属スクラップ業者に対して、ヒアリング調査・アンケート調査を実施し、使用済太陽光発電設備の取扱実態を整理した。

ヒアリング調査によれば、入荷された太陽電池モジュールは、まず、フレームを全て外す作業が行われる。その後、配線類等を手分解にて取り外す。フレーム、モジュール、配線類に分別された後のモジュールの取扱については、業者によって違いが見られた。ある業者では、モジュールをそのまま非鉄製錬業者に売却しており、別の業者では、セルを破砕機に投入して、ガラスとセルを分離していた。分離したガラスはグラスウール向けに売却、セルは非鉄製錬業者に売却とのことであった。

また、アンケート調査結果の概要を整理すると以下の通りである。

- 回答者のうち、産業廃棄物の収集運搬業と中間処理の両方の許可を持つ事業者が 70%、収集運搬業、中間処理、最終処分のすべての許可を持つ事業者が 13%、中間処理の許可のみの事業者が 12%であった。
- 収集運搬については、6%（19 件）の事業者に太陽光発電システムの収集運搬実績があり、排出事業者としてはゼネコン・建設事業者、建物解体業者がやや多かった。架台の収集運搬実績が最も多く（17 件の回答中 10 件）、太陽電池モジュールに関しては 17 件中 7 件の回答者が、収集運搬実績があると回答した。
- 中間処理については、5%（18 件）の事業者に太陽光発電システムの中間処理実績があり、うち 13 件は収集運搬の実績もある事業者である。太陽電池モジュールおよび架台に関しては半数の事業者が扱った実績があった。排出事業者としてはゼネコン・建設事業者、建物解体業者がやや多かった。処理したシステムのうち、ガラスに関しては再資源化処理業者またはガラス再生業者に引き渡されるケースと最終処分（埋立）されるケースがある。また、金属に関しては、再資源化処理業者等に有価物として引き渡されるケースがほとんどであった。
 - 一方、現段階で太陽光発電システムの中間処理の実績がない事業者の 89%は、問い合わせを受けた場合に断る、他社を紹介する、または、中間処理を行うことができるかどうかかわからないと回答した。その理由としては処理の経験や必要な設備がないとの回答がそれぞれ 47%、50%であったほか、構成物質がわからないとの回答も 43%であった。問い合わせに対して自社または系列企業で対応すると回答した事業者は 16%であった。
- 最終処分については、太陽光発電システムの最終処分の実績があると回答した事業者は 1 件（収集運搬の実績なし、中間処理の実績あり）であり、モジュール由来のガラスの最終処分（埋立）を実施している。
 - 一方、現段階で太陽光発電システムの最終処分の実績がない事業者の 79%は、問い合わせを受けた場合に断る、他社を紹介する、または、最終処分を行うことができるかどうかかわからないと回答した。その理由としては処理の経験がな

い（26%）あるいは必要な設備がない（21%）との回答のほか、構成物質がわからないとの回答は 50%であった。問い合わせに対して自社または系列企業で対応すると回答した事業者は 16%であった。

3) 非鉄製錬業者

非鉄製錬業者に対して、ヒアリング調査を実施し、使用済太陽光発電設備の取扱実態を整理した。業者によって違いが見られ、使用済太陽電池モジュールの処理実績のない業者と、前処理（焼却、破碎後）後、銅製錬炉に投入している業者が見られた。ただし、使用済太陽電池モジュールの処理実績のある業者も、引取り量は少なく、引取りのロットは 10 トン以上が望ましいとのことであった。

4) 太陽光発電設備ユーザー

太陽光発電設備ユーザーに対するアンケート調査結果の概要を整理すると以下の通りである。

＜太陽光発電普及拡大センター（J-PEC）による補助制度を利用して導入し、財産処分（撤去）申請を J-PEC に対して提出したユーザー＞

- 現段階では、引越しまたは建物の解体に伴う撤去が多く、システム購入店舗またはハウスメーカーに撤去を依頼し、実施している事例が多い。
- システムの撤去時に困ったこととしては、3 名が「問い合わせ先が最初はわからなかった」と回答したほか、「撤去してくれる業者が見つからなかった」、「費用が高かった」との回答が 1 名ずつであった。

＜J-PEC による補助制度を利用して導入したユーザー＞

- 機器の交換を行った事例は、太陽電池モジュールで 2 件、パワーコンディショナで 11 件である。交換した機器の引き取り先としては、メーカーまたは施工業者が多かった。なお、回答者の所有する太陽電池モジュール枚数、パワーコンディショナ台数は調査していないため、交換した太陽電池モジュールやパワーコンディショナの、総数に占める割合については不明である。
- 現ユーザーで撤去を検討している事例はごくわずかである。
- 発電しなくなった場合のシステムの撤去については、「すぐに撤去する」と答えた回答者は 6%であり、費用を考慮して検討すると答えた回答者が 43%と多かった。12%の回答者は引越し・建て替えによる解体までそのままにしておくとの回答した。
- 撤去に関する問い合わせ先としては、システム購入店舗やハウスメーカーが多く挙げられた。

3.1.2 使用済太陽光発電設備等の撤去から処分までのコスト

(1) 建物解体における使用済太陽光発電設備等の取り外しコストの推定

1) 作業人数・作業時間を用いた推計

建物解体業者へのアンケート調査結果によれば、使用済太陽光発電設備の取り外しに要する述べ人数・取り外し時間の平均は、10.5 人・時間であった。平成 24 年度賃金構造基本統計調査によれば、廃棄物処理業者（企業規模計 10 人以上）のきまって支給する現金給与額は 290.5 千円/月、所定内労働時間数は 175 時間/月であり、時給に換算すると 1,660 円/時間となる。以上より、単純に上記を乗じると、以下の通り推計される。

$$10.5 \text{ 人・時間} \times 1,660 \text{ 円/時間} = 17,430 \text{ 円}$$

2) 建物解体業者が発注者から受領した料金（発注者が支払った費用）を用いた推計

建物解体業者に対するアンケート調査結果によれば、使用済太陽光発電設備の取外し作業のために発注者から受領した料金としては、12 万円未満の回答が、全体の 6 割弱と多く、3 万円～6 万円未満の回答が全体の約 32%と最も多かった。また、回答としては、「5 万円」「10 万円」の回答がともに 6 件（約 19%）と最も多かった。

無回答及び外れ値（200 万円）を除くと、全体の平均は 8.9 万円と推計される。

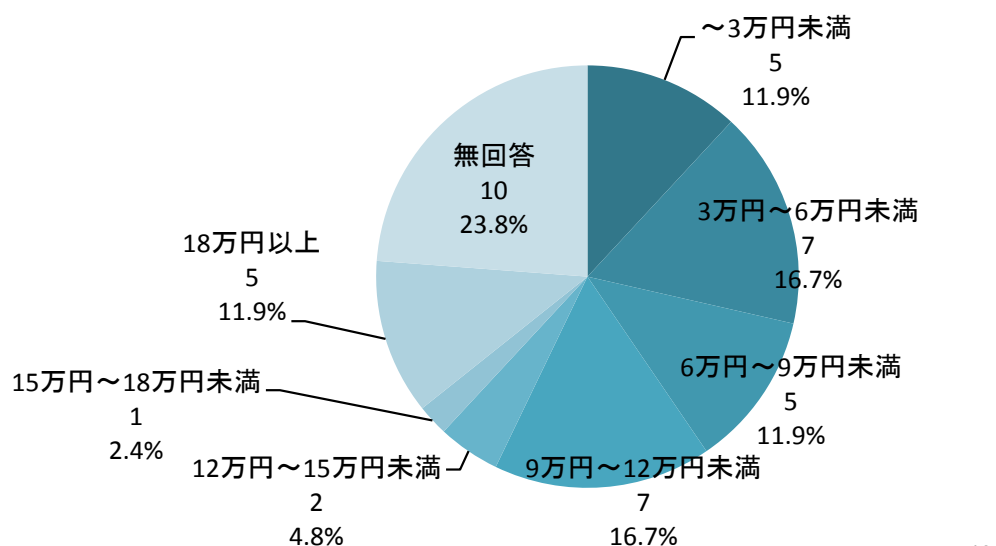


図 3-6 使用済太陽光発電設備の取外し作業のために発注者から受領した料金

3.1.3 太陽光発電設備の撤去・運搬・処理に関する留意事項

実施したアンケート調査、ヒアリング調査を基に太陽光発電設備の撤去・運搬・処理に関する留意事項等を整理した。

表 3-2 太陽光発電設備の撤去・運搬・処理に関する留意事項等

段階	作業工程	Ⅰ：安全の確保		Ⅱ：廃棄物の適正な処理の確保		Ⅲ：資源の有効利用の確保	
		想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策
撤去	太陽光発電設備の確認（太陽電池モジュールの種類・サイズ・重量、パワーコンディショナの容量、架台の形状等の確認）	—	—	確認が不十分であったために有害物質が拡散	太陽電池モジュールの種類等の確認	—	—
	撤去作業現場の確認（設置場所、作業スペースの確認）	作業場所の広さが不十分であったための事故	十分な広さの作業場所の確保	—	—	—	—
	電力会社の系統からの切り離し	感電	適切な作業手順の確認・遵守	—	—	—	—
	足場・スライダの設置、安全対策等	墜落・転落	適切な足場、養生シート、親綱・安全帯保護帽等の設置・使用	—	—	—	—
	太陽電池モジュール及び架台の取り外し	感電	適切な作業手順の確認・遵守	—	—	—	—
		破損等によるけが	保護帽、グローブ、保護メガネ、作業着等の着用	—	—	破砕、混合等により資源価値の低下	破損を防止する作業手順の順守 解体現場でのガラスの破砕作業を実施しない
			解体現場でのガラスの破砕作業を実施しない	廃棄物及び有害物の発生	解体現場でのガラスの破砕作業を実施しない		
	パワーコンディシ	感電	適切な作	—	—	—	—

段階	作業工程	Ⅰ：安全の確保		Ⅱ：廃棄物の適正な処理の確保		Ⅲ：資源の有効利用の確保	
		想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策
	ヨナ、接続箱等の取り外し		業手順の確認・遵守				
運搬	分別・梱包	破損等によるけが	保護帽、グローブ、作業着等の着用 破損を防止する作業手順の順守	雨水の侵入による有害物質の漏出	雨水防止対策	破損等により資源価値の低下	破損を防止する作業手順の順守
		感電					
	廃棄物処理法に則った運搬・積替・保管の実施				屋根付トラックによる輸送	—	—
処理 (手解体、破碎する場合)	フレーム外し	破損等によるけが	保護帽、グローブ、保護メガネ、作業着等の着用	粉塵の発生	集塵機の設置	不適切な解体による資源価値の低下	解体作業マニュアルの準備
		感電	適切な作業手順の確認・遵守	廃水の発生	廃水処理装置の設置		
	破碎	作業時のけが 粉じんの吸入	保護帽、グローブ、保護メガネ、呼吸用保護具、作業着等の着用	粉塵の発生	集塵機の設置	不適切な解体による資源価値の低下	破碎作業マニュアルの準備

※処理方法は様々な方法が存在するが、ここでは手作業で解体する場合を想定した。

3.2 太陽光発電設備の素材構成調査・含有量試験・溶出試験

太陽光発電設備については、把握しているだけでも、国内外で数十社数百種類以上の製品があり、その種類も多岐にわたることから、太陽光発電設備のリサイクルや適正処分に
関する製品特性を把握するため、次の試験を実施した。

- 解体性調査：
 - ✓ リサイクルする際の解体容易性の参考とするため、太陽電池モジュールを解体する際のフレームやカバーガラス等の取り外しやすさを確認。
- 素材構成調査：
 - ✓ 有用資源や有害性の懸念がある物質の使用状況を把握する観点から、部材毎の重量測定を実施するとともに、蛍光 X 線分析装置（ハンドヘルド XRF）により含有可能性のある物質のスクリーニングを実施。
- 含有量試験：
 - ✓ 有用資源や有害性の懸念がある物質の含有状況を把握する観点から、素材構成調査で含有可能性があると判断された物質の定量化のため、含有量試験を実施。
- 溶出試験：
 - ✓ 太陽光発電設備が埋立処分された際の環境影響を把握する観点から、有害性の懸念がある物質の溶出試験を実施。

3.2.1 試験対象製品

既往研究のレビュー及び専門家意見を踏まえ、以下の方針にて試験対象とする製品を選定した。

- 急速に導入が進んでいる最近の太陽光発電設備のデータが不足していることを鑑み、現在市場に流通している太陽光発電設備（特に太陽電池モジュール）を優先的に対象とする。
- また、同一メーカーにおける経年的な傾向の変化を確認する観点から、時系列に製品選定を行う。
- 太陽電池モジュールについては横並びでの比較を可能とするため、種類別に試験対象を選定する。なお、パワーコンディショナや架台、モニター等については、代表的な機種を対象に調査を行うこととする（限定された機種を対象とした調査であるため、メーカー間の個体差等の確認は今後の検討課題とする）。
- 製品の選び方は、太陽電池モジュールの種類やメーカー毎の出荷量を考慮して選定する。なお、近年、海外メーカーのシェアが伸びていることを踏まえ、海外メーカーの製品についても可能な範囲で一定数の試験を行う。
- 「製品選定」、「試料調製」、「定量分析」ともに一定の誤差を含むことが想定されるため、一つの製品に対して複数のサンプル数（N=3 程度）を確保することとする。なお、製品間の個体差についても考慮が必要と考えられるが、太陽光発電設備メーカーによれば、同一型番の製品であれば製造時の品質管理が行われているため、大きな誤差は生じないとのことであった。このため、ここでは、製品間の誤差は考慮せず、一つの製品から試料調製を行う際の誤差のみを考慮することとする。

具体的な製品案は以下の通りである。なお、太陽光発電設備メーカーによれば、機種により対象物質含有の程度が大きく異なるもの（具体的には、シリコン系太陽電池モジュールについては鉛レスハンダを使用した機種等）があり、その含有量は大きく差異が生じる可能性があるとのことであった。

表 3-3 試験対象製品

<太陽電池モジュール>

種類	国内/海外の別	メーカー	製造年
結晶系	単結晶シリコン	A社	1993
			2005
			2012以降
		B社	1998
			2009
			2012以降
		C社	2013
	海外	D社	2008
		E社	2013
		F社	2013予定
	多結晶シリコン	G社	2002
			2005
			2012以降
		H社	2001
			2005
			2013
	海外	I社	2012
		J社	2013
		K社	2013
		L社	2013
		M社	2012以降
薄膜系	シリコン系	国内	N社
			2008
	CIS系	国内	O社
			2011
	CdTe	海外	Q社

※ 各機種の分析サンプル数はN=3 とした。

<その他>

種類	メーカー	製造年
パワーコンディショナ	基板	R社
	基板	S社
モニター	基板	T社
	液晶	
送信ユニット	基板	U社

※各機種分析サンプル数は、N=1 とした。

3.2.2 試料調製方法

(1) 素材構成調査・含有量試験における試料調製の考え方

素材構成調査・含有量試験は、有用資源や有害性の懸念がある物質の含有状況について把握することを目的に実施する。なお、複合素材の含有量試験の実施例としては、環境省等が実施した小型家電の基板等を対象としたものが挙げられるため、これらの試験の知見も参考としながら試料調製方法を決定した。

- 試験対象として試料調製する検体はモジュール全体とし、それをフレーム、フロントカバー、セル、端子ボックスに手分解後、フレーム以外については、破碎・縮分・混合して太陽電池モジュールの構成比で再混合し、分析を行った。単一素材で構成されると考えられるフレームについては、蛍光 X 線分析装置（ハンドヘルド XRF）を用いた簡易分析と重量測定のみを行うこととした。
- 太陽電池モジュールは、様々な部品や材料を組み合わせたものであり、破碎処理の際には、破碎処理の事前に手分解できるものは分離し、個別に破碎するなど均質混合破碎物の採取に十分に配慮した。
- 丁寧に手分解を行うことで、単一部品ごとに分別を行う（例えば、フレームにガラスの一部が付いたままとなるようなことは避ける）こととし、手分解前の重量と手分解後の重量を確認し、マスバランスをとった。
- 分析結果は、試料毎に単位量当たりの元素の含有量として得られるため、太陽電池モジュールの構成比で割戻し、太陽電池モジュール当たりの元素の含有量を得ることとした。

(2) 溶出試験における試料調製の考え方

溶出試験は、太陽光発電設備が埋立処分された際の環境影響を把握することを目的に実施する。全量を破碎して溶出試験を行う方法も考えられるが、本試験では、想定される廃棄物処理の実態（容易に分別等が可能な場合は、最終処分量を減らす処理が行われる等）を踏まえ、フレームのみを事前に取り外し、残りの部分を対象に溶出試験を行うこととした。

本試験の溶出試験用試料については、産業廃棄物の埋立処分を行う上で有害な産業廃棄物を指定するために用いる試験法である「昭和 48 年環境庁告示第 13 号試験」で定められた試料調製方法を踏まえ、粉碎後の粒径が 0.5mm 以上 5mm 以下となるよう調製方法を決定した。

ただし、試料をカッティングミルによって粉碎を行っているため、試料には 0.5mm 以下の粒子が含まれる可能性がある。このため、試験時用の試料調製方法については、更なる検討を行う必要があると考えられる。

(3) 試料調製方法の詳細

具体的な試料調製の方法は以下に示すとおりである。また、試料調製工程及び調製に用

いる機器を次図に示す。

- まず、手解体によって他の部位と分けた部品サンプルを 50mm 程度に裁断又は破砕する。
- 次に、カッティングミルにより 5mm 以下に粗粉砕する。粗粉砕した試料をよく混合し、インクリメント縮分法（JIS K 0060 準拠）により縮分後、溶出試験用試料を採取する。
- 更に、粗粉砕された残りの試料を液体窒素により予備凍結し、超遠心粉砕機により 0.5mm 以下まで微粉砕する。微粉砕した試料を含有量試験用試料とする。

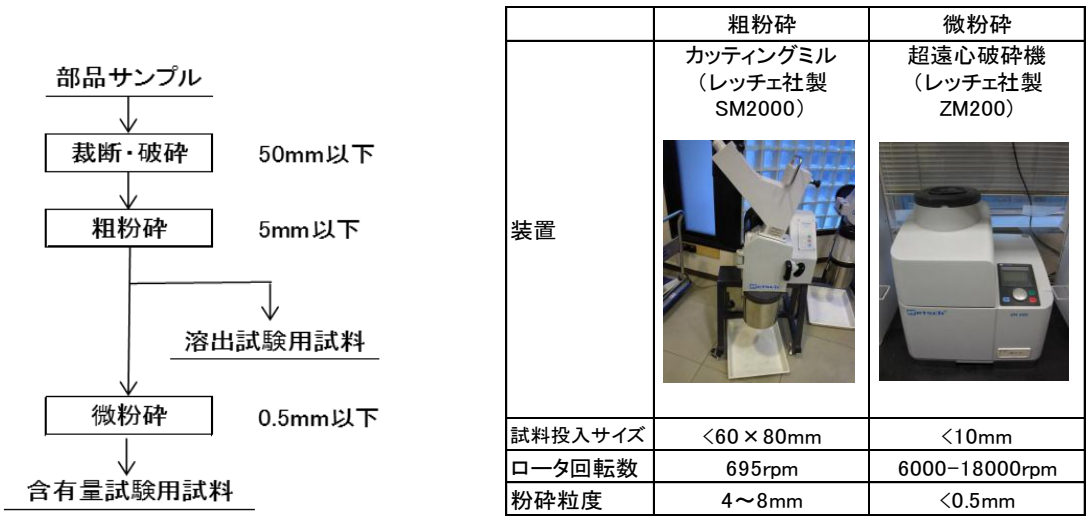


図 3-7 含有量試験・溶出試験の試料調製工程及び調製に用いる機器

結晶系モジュール、薄膜系（シリコン系）モジュール、化合物系モジュールの別に、素材構成調査、含有量試験、溶出試験の試料調製方法を次ページ以降に示す。

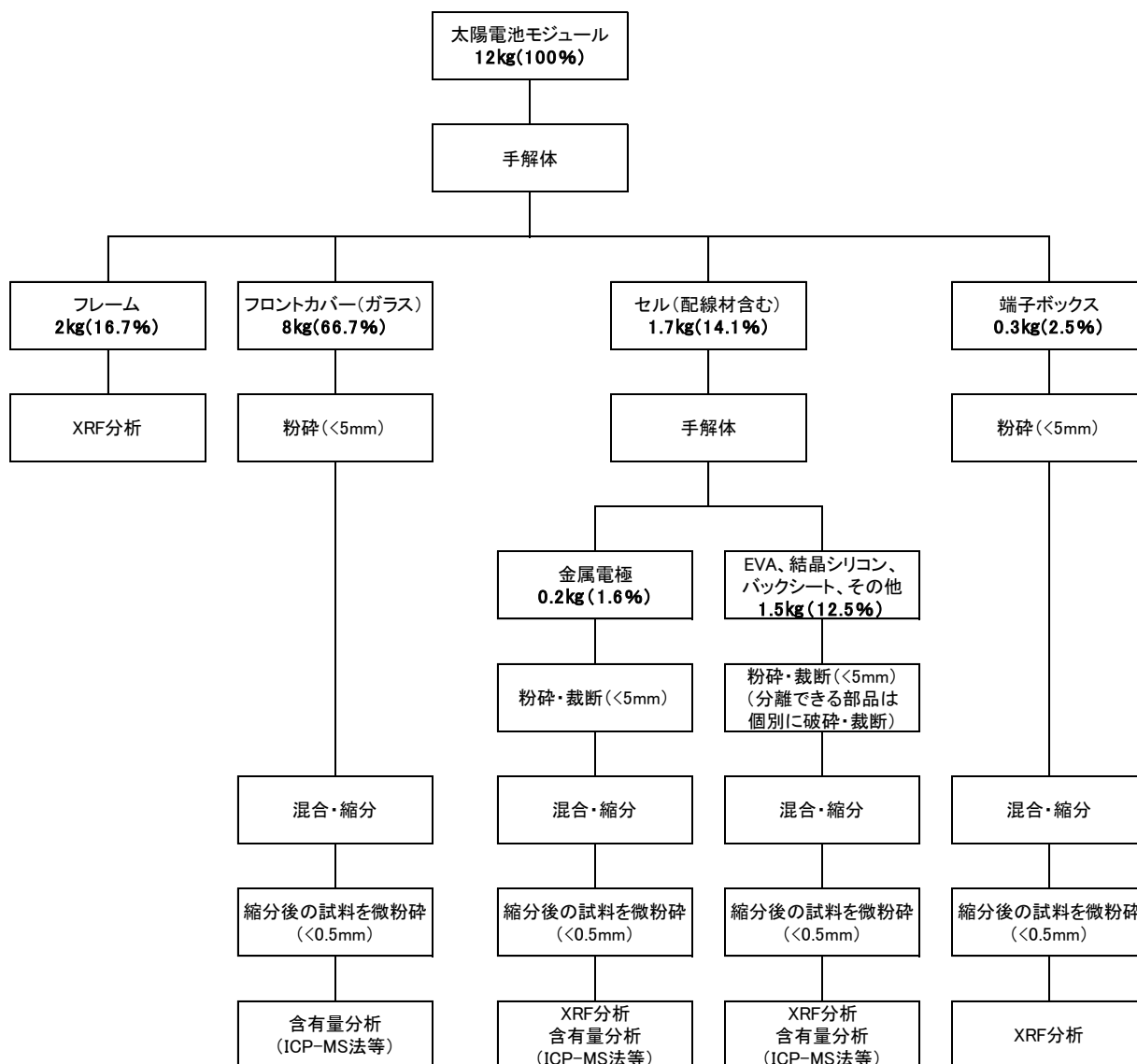
■結晶系モジュール

○素材構成調査（重量測定）

部位	試験対象	素材構成 重量測定
モジュール全量	全体	○
フレーム	個別	○
フロントカバー（ガラス）	個別	○
電極	個別	○
EVA	個別	○
Si結晶	個別	○
バックシート	個別	○
端子ボックス	個別	○

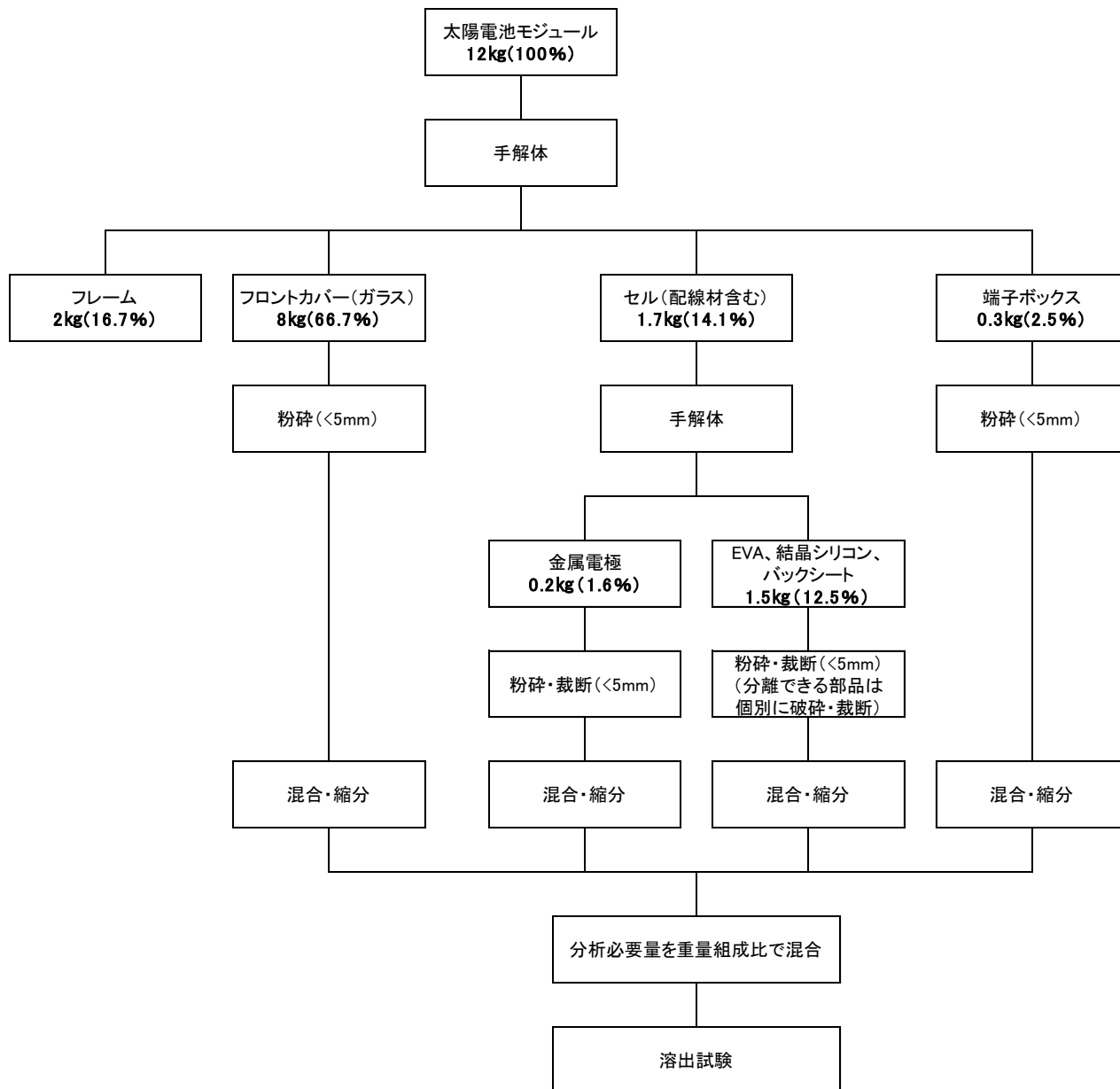
○含有量試験

部位	試験対象	含有量試験																	
		XRF	Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te	Cu	Zn	Sn	Mo	In	Ga	Ag	その他
モジュール全量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フレーム	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フロントカバー(ガラス)	個別	-	○	-	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-	-	-	△
電極	個別	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	△	-	○	-	-	-	△	△
EVA	混合	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Si結晶																			
バックシート																			
端子ボックス	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



○溶出試験（結晶系）

部位	試験対象	溶出試験								
		Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te
モジュール全量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フレーム	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フロントカバー(ガラス)	混合	○	○	○	○	○	○	○	○	○
電極										
EVA										
Si結晶										
バックシート										
端子ボックス										



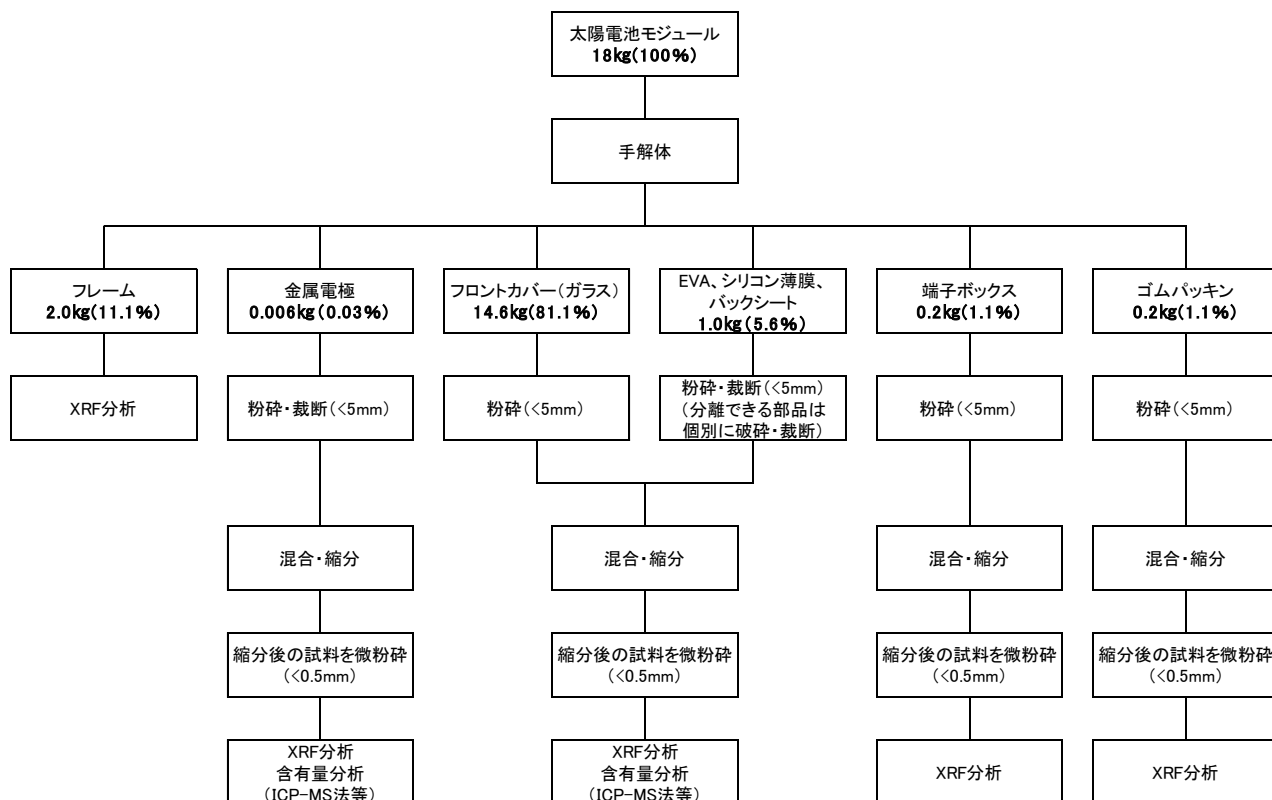
■薄膜系（シリコン系）モジュール

○素材構成調査（重量測定）

部位	試験対象	素材構成 重量測定
モジュール全量	全体	○
フレーム	個別	○
フロントカバー（ガラス）	個別	○
電極	個別	○
EVA	混合	○
Si薄膜		
バックシート		
端子ボックス	個別	○
ゴムパッキン	個別	○

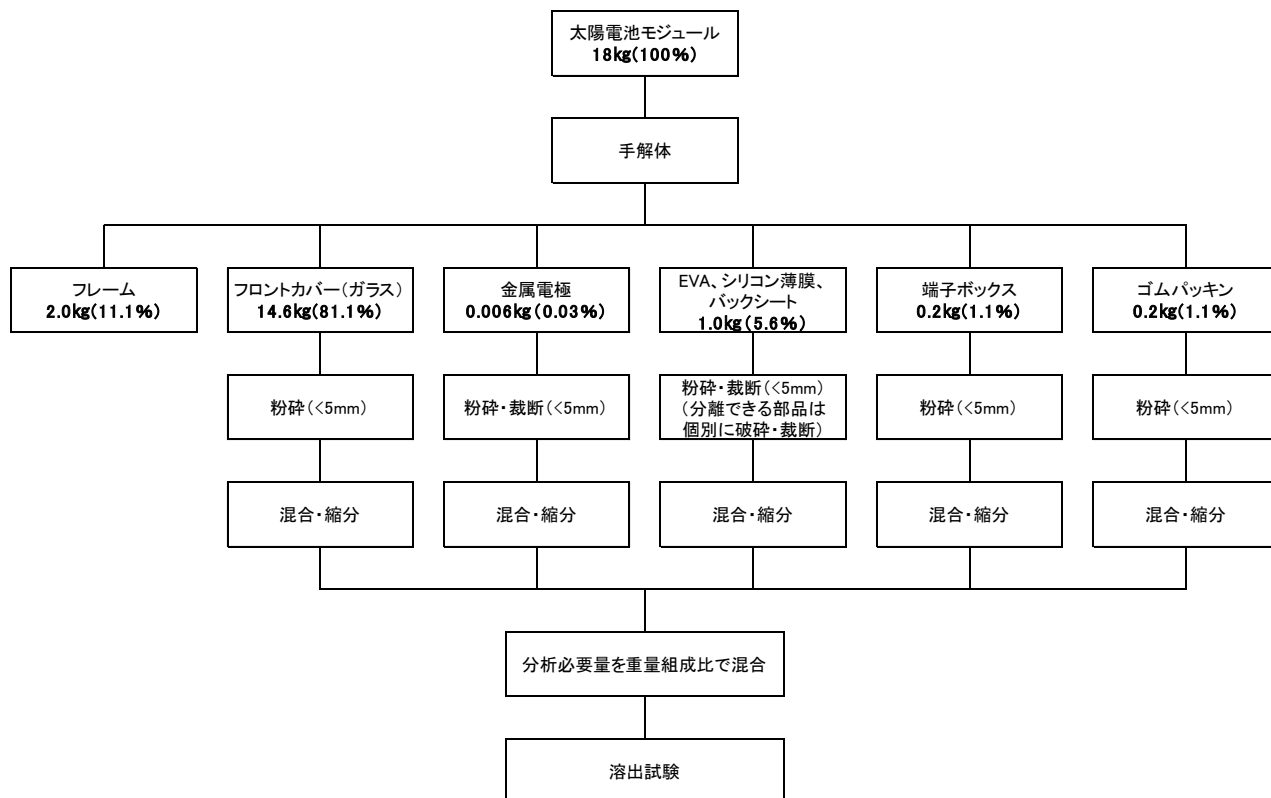
○含有量試験

部位	試験対象	含有量試験																	
		XRF	Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te	Cu	Zn	Sn	Mo	In	Ga	Ag	その他
モジュール全量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フレーム	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電極	個別	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	△	-	○	-	-	-	△	△
フロントカバー（ガラス）	混合	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
EVA																			
Si薄膜																			
バックシート																			
端子ボックス	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ゴムパッキン	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



○溶出試験（薄膜系）

部位	試験対象	溶出試験								
		Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te
モジュール全量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フレーム	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電極	混合	○	○	○	○	○	○	○	○	○
フロントカバー(ガラス)										
EVA										
Si薄膜										
バックシート										
端子ボックス										
ゴムパッキン										



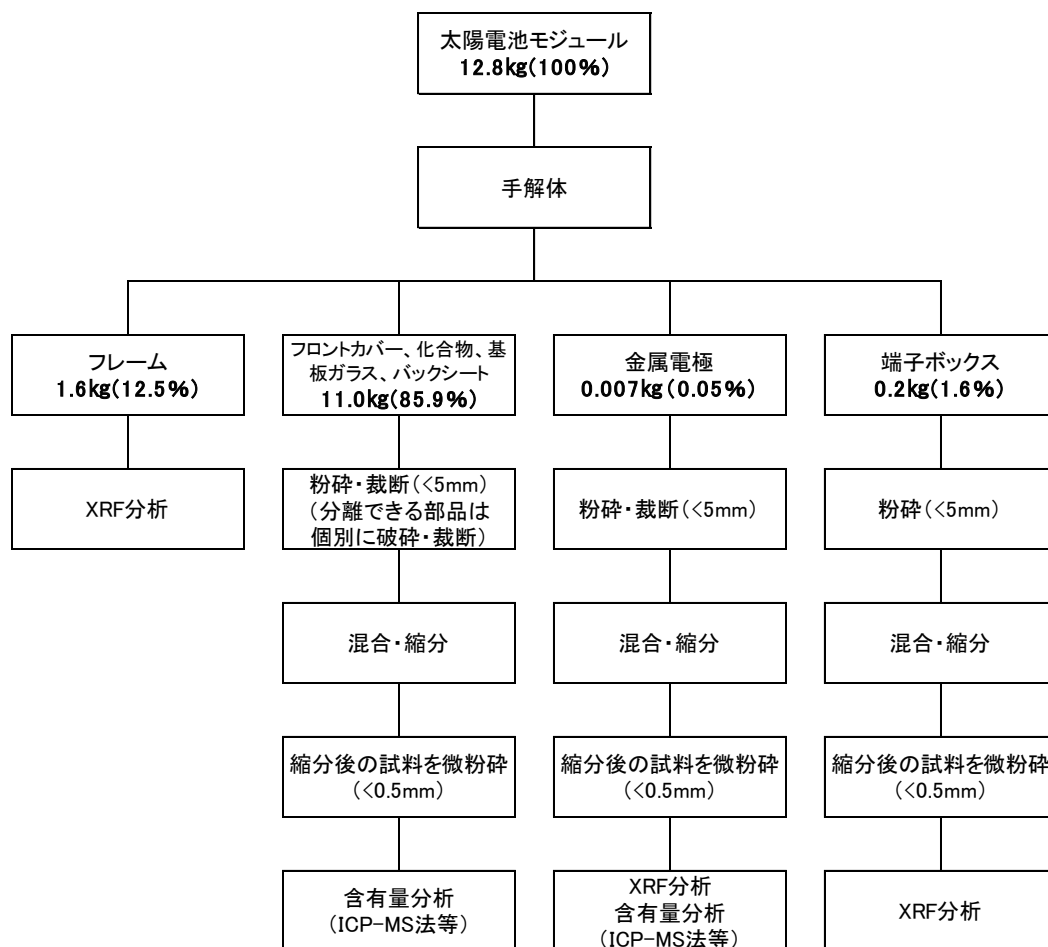
■化合物系モジュール

○素材構成調査（重量測定）

部位	試験対象	素材構成 重量測定
モジュール全量	全体	○
フレーム	個別	○
電極	個別	○
フロントカバー(ガラス)	全体	○
EVA		
CIS/CIGS化合物		
基板ガラス		
バックシート	個別	○
端子ボックス	個別	○

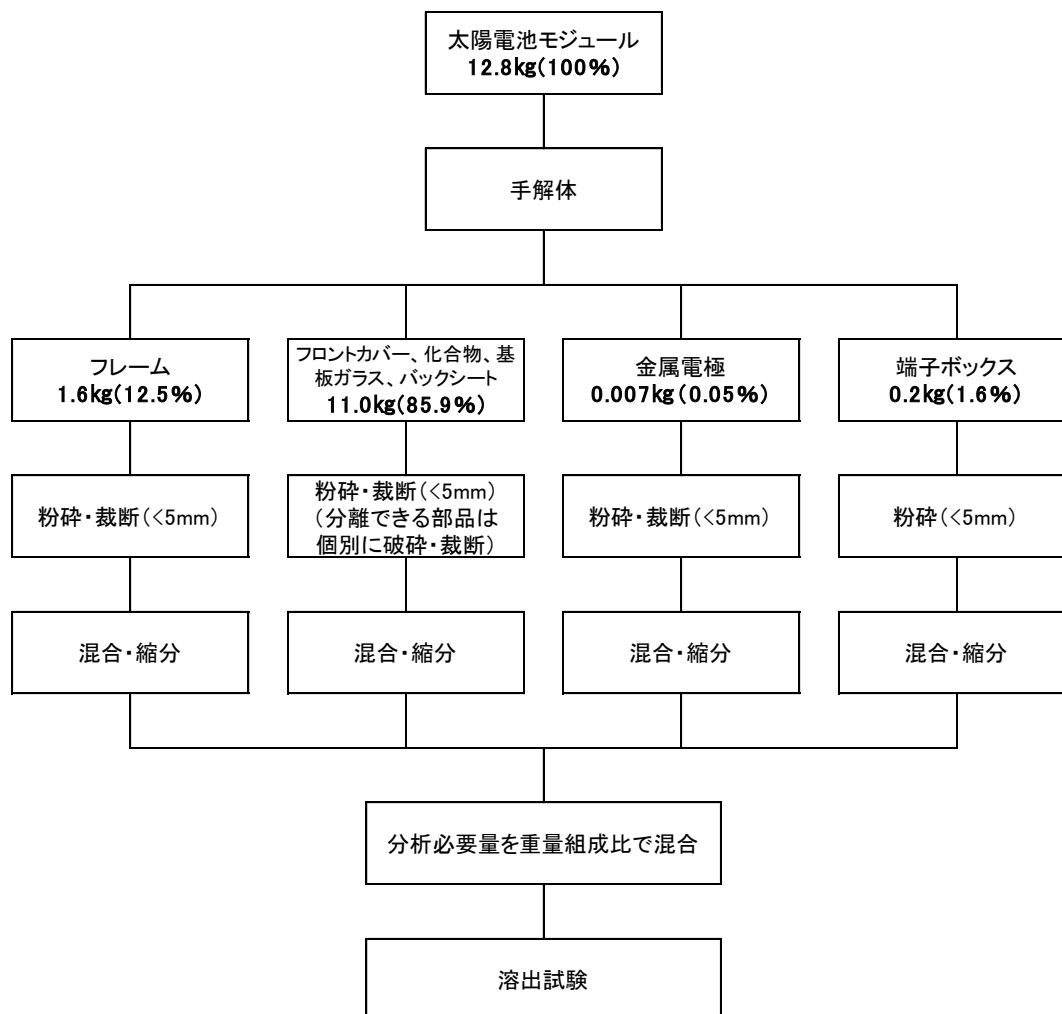
○含有量試験

部位	試験対象	含有量試験																
		XRF	Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te	Cu	Zn	Sn	Mo	In	Ga	Ag
モジュール全量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フレーム	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電極	個別	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	△	-	○	-	-	-	△
フロントカバー(ガラス)	混合	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
EVA																		
CIS/CIGS化合物																		
基板ガラス																		
バックシート	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
端子ボックス																		



○溶出試験（化合物系）

部位	試験対象	溶出試験								
		Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te
モジュール全量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フレーム	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電極	混合									
フロントカバー(ガラス)										
EVA										
CIS/CIGS化合物		○	○	○	○	○	○	○	○	○
基板ガラス										
バックシート										
端子ボックス										



3.2.3 調査・試験方法

(1) 解体性調査の方法

リサイクルする際の解体容易性の参考とするため、太陽電池モジュールを解体する際の「フレームのねじ形状」「パッキンの有無・形状」「ガラスとシリコン結晶又は化合物の分離しやすさ」「バックシートの分離しやすさ」の各観点から情報を収集・整理した。

(2) 素材構成調査の方法

フロントカバーガラスなどの構成部材については素材の特定（必要に応じて簡易蛍光 X 線分析装置等を使用）及び重量の測定を行い、サンプル全体としての素材構成を把握した。

(3) 含有量試験の方法

含有量試験は、廃棄物資源循環学会物質フロー研究部会にて検討された標準分析法をベースとした。含有量試験の分析項目は表 3-4 の項目とし、酸分解・アルカリ融解 ICP-MS 法にて実施した。ただし、Hg は酸分解還元気化冷原子吸光法、Cr6+は水抽出ジフェニルカルバジド吸光光度法にて実施した。

表 3-4 含有量試験の分析項目及び分析方法

分析項目		分析方法	単位
Pb	(鉛)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Cd	(カドミウム)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
As	(ひ素)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Se	(セレン)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Hg	(水銀)	硫硝酸過マンガン酸分解 還元気化冷原子吸光法	mg/kg
Cr ⁶⁺	(六価クロム)	水抽出 ジフェニルカルバジド吸光光度法	mg/kg
Be	(ベリリウム)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Sb	(アンチモン)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Te	(テルル)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Cu	(銅)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 フレーム原子吸光法	mg/kg
Zn	(亜鉛)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 フレーム原子吸光法	mg/kg

Sn	(スズ)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Mo	(モリブデン)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
In	(インジウム)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Ga	(ガリウム)	硫硝酸分解王水溶解後アルカリ融解 ICP 質量分析法	mg/kg
Ag	(銀)	硝酸酸分解 6M 塩酸溶解 フレーム原子吸光法	mg/kg

出所) 一般社団法人廃棄物資源循環学会物質フロー研究部会「製品中のレアメタル等の暫定分析方法」

(4) 溶出試験の方法

調製した試料について以下の項目について溶出試験を実施した。溶出試験は昭和 48 年環境庁告示第 13 号試験にて行うこととした。なお、環境庁告示第 13 号試験は本年 2 月に改定され、5 月には環境省より分析操作マニュアルが発行されているため、同マニュアルに基づく試験を実施した。

溶出試験の分析項目は日本国内の廃棄物溶出試験及びバーゼル条約で規制されている項目より重金属を主体に選定した。

表 3-5 溶出試験の分析項目及び分析方法

分析項目		分析方法	単位
Pb	(鉛)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 4 ICP 質量分析法	mg/L
Cd	(カドミウム)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 3 ICP 質量分析法	mg/L
As	(ヒ素)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 7 ICP 質量分析法	mg/L
Se	(セレン)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 24 ICP 質量分析法	mg/L
Hg	(水銀)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 2 還元気化原子吸光法	mg/L
Cr ⁶⁺	(六価クロム)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 6 ジフェニルカルバジド吸光光度法	mg/L
Be	(ベリリウム)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 29 別表第 7 第 4 ICP 質量分析法	mg/L
Sb	(アンチモン)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 準拠※ ICP 質量分析法	mg/L
Te	(テルル)	昭和 48 年環境庁告示第 13 号 準拠※ ICP 質量分析法	mg/L

※Sb 及び Te は環境省告示第 13 号に基づき検液を作成し、ICP 質量分析法により分析する。

3.2.4 調査結果

(1) 解体性調査

解体性調査に基づき、太陽電池モジュールを解体する際のフレームやカバーガラス等の取り外しやすさを確認した結果は以下のとおりである。

- フレームを固定するネジについては、汎用工具で取り外し可能な+型ネジのもの、ネジは無く金具で固定されたものが多く見られたが、中には特殊ネジを使用したものやフレームのないものも存在した。
- フレームとガラス・セル等は、樹脂で接着されているものが多かった。
- ガラスとセルの分離について、手作業では分離不可の製品がいくつか見られた。薄膜系、化合物系のモジュールにおいてはカバーガラスと基板ガラスの間に封止された化合物が挟まっている構造のため、その傾向が顕著であった。
- バックシートの分離について、手作業では分離不可の製品がいくつか見られた。2010年以降の製品はそれ以前のものと比較すると、分離不可のものが若干多く見られた。
- バックシートが層状になっているものもあり、その一部は分離できるものが見られた。
- 国内メーカー品と海外メーカー品を比較すると、海外メーカー品は結晶系でもガラスからの分離不可なものが多く見られるようだが、製造年代による違いの可能性もあることに留意すべきと考える。

(2) 素材構成調査

素材構成調査の結果は以下のとおりである。

- 結晶系のモジュールについては、フロントカバーガラスの重量が最も大きい、製品全体に占める重量割合は 56～77%と製品種類によってある程度ばらつく結果となった。次いで、フレームの重量が 15～30%程度、Si 結晶の重量が 14～20%程度となっていた。フレームはアルミ製のものが多かったが、鉄製のものも一部あり、鉄製のもののほど、全体に占める重量比が大きい結果となった。
- 金属電極の使用量は結晶系モジュールが多く、薄膜系・化合物系では端子ボックス等への接続のため部分的に使用されている程度であった。
- 薄膜系のモジュールについては、フロントカバーガラスの重量が約 80%となっており、結晶系に比べて、ガラスの構成比が高いという結果となった。次いで、フレームの重量比が 10%程度、Si 薄膜の重量比が 5%程度となっている。
- 化合物系のモジュールについては、フロントカバーガラス及び基板ガラスと CIS/CIGS 化合物の分離ができないものが多い(これら3つの部材の合計で全体の80%程度を占めている)。フレームの重量比は 10%程度である。
- パワーコンディショナについては、鉄の重量構成比が全体の半分程度、残りはアルミ、銅などの構成比が高い。基板の重量比は 10%程度である。
- モニター及び送信ユニットについては、プラスチックの構成比が 50%程度と高い。

(3) 含有量試験

含有量試験の結果は以下のとおりである。

- 結晶系のモジュールについては、フロントカバーガラスの一部から 1000ppm オーダーのアンチモン、100ppm オーダーの鉛の検出が見られた。電極、EVA・結晶・バックシートにおいても、1000ppm を超える鉛の含有が見られるモジュールが多数存在した。また、EVA・結晶・バックシートには 1000ppm オーダーの銀の含有が見られた。
- 薄膜系のモジュールについては、鉛の含有量が結晶系に比べて相対的に低い傾向が見られた。同様に銀についても結晶系に比べて相対的に低い傾向が見られた。なお、ガラスの分離が困難であったため、EVA・結晶・バックシートにガラスが含まれている点に留意が必要である。
- 化合物系のモジュールについては、鉛及び銀の含有量が結晶系に比べて相対的に低い傾向が見られた。一方で、アンチモン、セレン、モリブデン、インジウム、ガリウムの含有量が他の方式に比べて相対的に高い値となっていた。なお、薄膜系と同様にガラスの分離が困難であったため、EVA・結晶・バックシートにガラスが含まれている点に留意が必要である。

表 3-6 含有量試験結果

			上:最大値 下:最小値 含有量単位:mg/kg																		
種類	製造年	部位	Pb 鉛	Cd カドミウム	As ヒ素	Se セレン	T-Hg 水銀	Cr ⁶⁺ 六価クロム	Be ベリリウム	Sb アンチモン	Te テルル	Cu 銅	Zn 亜鉛	Sn スズ	Mo モリブデン	In インジウム	Ga ガリウム	Ag 銀	N数		
単結晶	国内	～1999	フロントカバーガラス	20	—	<1	—	—	—	5	—	—	—	—	—	11	—	—	—	3	
				5	—	<1	—	—	—	3	—	—	—	9	—	—	—				
			電極	110000	—	—	—	—	—	—	—	—	740000	—	69000	—	—	—	30000	6	
				85000	—	—	—	—	—	—	—	—	550000	—	490	—	—	—	18000		
			EVA・結晶・バックシート	1900	3	<1	<1	<1	<0.5	<1	69	<1	4500	220	1900	4	1	17	6200	3	
				1800	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	20	<1	320	51	1700	3	<1	15	4300		
		2000～2009	フロントカバーガラス	310	—	1	—	—	—	—	2100	—	—	—	—	—	2	—	—	—	6
				<1	—	<1	—	—	—	—	1600	—	—	—	—	<1	—	—	—		
			電極	1100	—	—	—	—	—	—	—	—	730000	—	150000	—	—	—	25000	6	
				44	—	—	—	—	—	—	—	—	670000	—	950	—	—	—	4900		
			ガラス・EVA・結晶・バックシート	110	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	12	<1	13	13	180	8	68	7	3200	3	
				32	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	8	<1	11	13	58	7	58	6	3200		
	2010～	EVA・結晶・バックシート	270	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	10	<1	460	40	1100	3	3	7	5300	3		
			220	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	6	<1	71	11	270	2	2	3	3100			
		フロントカバーガラス	120	—	4	—	—	—	—	2200	—	—	—	—	—	<1	—	—	—	9	
			16	—	<1	—	—	—	—	1200	—	—	—	—	—	<1	—	—	—		
		電極	170	—	—	—	—	—	—	—	—	950000	—	18000	—	—	—	23000	9		
			5	—	—	—	—	—	—	—	—	780000	—	3	—	—	—	280			
	海外	2008～2013	フロントカバーガラス	290	<1	25	<1	<1	<0.5	<1	96	26	160000	170	3700	7	400	6	9400	9	
				1	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	9	<1	49	12	26	2	<1	<1	150		
10			—	<1	—	—	—	—	—	780	—	—	—	—	—	<1	—	—	3		
			5	—	<1	—	—	—	—	—	510	—	—	—	—	<1	—	—		—	
電極			58000	—	—	—	—	—	—	—	—	880000	—	97000	—	—	—	22000	9		
			9	—	—	—	—	—	—	—	—	760000	—	9800	—	—	—	84			
ガラス・EVA・結晶・バックシート			66	<1	3	<1	<1	<0.5	<1	2200	2	140	100	87	3	<1	1	470	6		
			27	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	1200	<1	21	16	28	1	<1	1	280			
EVA・結晶・バックシート			10	<1	1	<1	<1	<0.5	<1	52	<1	110000	26	19000	2	<1	<1	120	3		
			7	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	36	<1	94000	13	16000	2	<1	<1	59			
多結晶			国内	2001～2005	フロントカバーガラス	360	—	<1	—	—	—	2000	—	—	—	—	17	—	—	—	12
						<1	—	<1	—	—	—	2	—	—	—	<1	—	—	—		
		電極		140000	—	—	—	—	—	—	—	—	830000	—	250000	—	—	—	32000	12	
				390	—	—	—	—	—	—	—	—	410000	—	460	—	—	—	4700		
		2012～	EVA・結晶・バックシート	7600	6	14	<1	<1	<0.5	<1	57	7	5600	940	14000	5	1	7	12000	12	
				100	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	5	<1	40	14	41	2	<1	3	290		
			フロントカバーガラス	8	—	3	—	—	—	—	2000	—	—	—	—	—	<1	—	—	6	
				<1	—	2	—	—	—	—	1700	—	—	—	—	—	<1	—	—		—
海外	2012～	フロントカバーガラス	64000	—	—	—	—	—	—	—	—	83000	—	89000	—	—	—	12000	6		
			5500	—	—	—	—	—	—	—	—	70000	—	2900	—	—	—	1800			
	EVA・結晶・バックシート	990	<1	14	<1	<1	<0.5	<1	35	7	890	940	290	5	1	4	2600	6			
		100	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	5	<1	40	97	41	2	<1	3	290				
Si薄膜	国内	2008～2013	フロントカバーガラス	30	—	6	—	—	—	1700	—	—	—	—	—	<1	—	—	6		
				1	—	<1	—	—	—	—	450	—	—	—	—	<1	—	—		—	
		電極	59000	—	—	—	—	—	—	—	—	850000	—	85000	—	—	—	19000	6		
			1400	—	—	—	—	—	—	—	—	750000	—	3700	—	—	—	3900			
	EVA・結晶・バックシート	1400	<1	19	<1	<1	<0.5	<1	100	100	2900	210	1500	5	3	5	2100	6			
		100	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	15	3	160	58	280	2	<1	3	160				
	化合物	国内・海外	2007～2013	電極	630	<1	10	<1	<1	<0.5	<1	570	16	200	51	1100	3	<1	3	3300	6
					41	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	81	2	13	20	10	2	<1	1	250	
ガラス・EVA・結晶・バックシート			70	—	—	—	—	—	—	—	—	690000	—	320000	—	—	—	10000	6		
			52	—	—	—	—	—	—	—	—	620000	—	1000	—	—	—	8500			
9	国内	2008～2013	ガラス・EVA・結晶・バックシート	15	<1	<1	2	<1	<0.5	<1	2	<1	4200	680	680	6	<1	2	180	9	
				1	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	<1	<1	12	21	240	3	<1	1	47		
化合物	国内・海外	2007～2013	電極	4100	—	—	—	—	—	—	—	840000	—	160000	—	—	—	5800	9		
				8	—	—	—	—	—	—	—	—	570000	—	26	—	—	—		12	
		ガラス・EVA・結晶・バックシート	26	390	2	370	<1	<0.5	<1	1600	470	4500	500	450	180	300	53	11	9		
			2	5	1	150	<1	<0.5	<1	<1	<1	18	10	15	8	<1	<1	<1			

1～100mg/kg

100～1000mg/kg

1000～10000mg/kg

10000mg/kg～

(4) 溶出試験

有害性の観点から注意が必要な物質の溶出について、太陽電池モジュールを対象とした公定試験法や基準等は存在しないため、ここでは、金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令に基づき定められている方法及び基準※（環境庁告示第 13 号試験及び燃えがら・ばいじん・鉱さい・汚泥等についての廃掃法による特別管理産業廃棄物の判定基準）に準じて太陽電池モジュールの溶出試験を実施した。本試験結果を表 3-7 に示す。

また、溶出試験の試料調製については、その方法によって調製した試料の性状や粒度に違いが生じる可能性があることから、化合物系のモジュールにおけるセレンの溶出に関し、試料調製方法を変更した上で、追加的な試験を実施した。具体的には、a) カuttingミルを用いて粉碎したサンプル（環境庁告示第 13 号試験で定める粒径サイズ 0.5～5mm よりも小さい粒子を含みうるもので、本試験と同じ調製方法。）と、b) 各部材をハンマー及びはさみを用いて粉碎した上で太陽電池モジュールの構成重量比で混合したサンプル（部材混合）の 2 種類を作製し、複数の分析機関による分析を実施した。また、参考データとして、c) 最終処分業者による処分方法確認のための試験（改訂前の環境庁告示第 13 号試験に準拠して試料調製）として実施された化合物付き基板の既存の試験結果についても表 3-8 に示す。

今回の調査で実施した溶出試験は、対象モジュール全体を試験対象とするため、部材構成の確認後に部材ごとに粉碎機による粉碎を実施しており、一部の部材については粒度が細くなるものも生じている。部材構成率での再混合の際には、可能な限り環境庁告示第 13 号試験で定める粒径サイズ 0.5～5mm の粉碎物を使用しているが、部材によっては 0.5mm 以下の細粒子部分も使用されている。破碎後の試料への細粒部の混入や破碎物への微粉粒子の付着の影響によって、溶出時の溶媒と試料との接触面積が増え、溶出率が高めとなる可能性が考えられる。

その他、溶出に影響を与える要因として、pH や酸化還元電位が異なる可能性や、粒子に付着したさらに細かい微細粒子がろ過の際にろ紙（孔径 1 μ m）を通過する可能性も考えられる。

試験結果における試料調製の要因が大きいことから、製品の評価にあたっては試験時用の試料調製方法について整理を行い、日本の標準法を基本としつつも破碎量全量に対して酢酸緩衝液を用いる TCLP 試験等の海外の試験方法も踏まえ、より詳細な評価を行うことが望まれる。

溶出試験の結果は以下のとおりである。

- 結晶系のモジュールについては、63 検体のうち 39 検体において鉛が検出された。また、39 検体においてアンチモンが、9 検体についてテルルの検出が見られた。
- 薄膜系のモジュールについては、いずれの物質も検出されなかった。
- 化合物系のモジュールについては、6 検体においてセレンの検出が見られた。また、3 検体についてカドミウムが、6 検体についてアンチモンが、3 検体についてテルルの検出が見られた。
- 参考までに本試験結果を上記基準値と比較すると、結晶系のモジュールの一部（63 検体中 6 検体）において鉛が基準値（0.3mg/L）を上回る結果となった。同様に、化合物系モジュールの一部（9 検体中 6 検体）においてセレンが基準値（0.3mg/L）を

上回る結果となった。

- 追加試験の結果、セレンの溶出量は a) 本試験と同じカッティングミル粉碎の場合で 0.02～0.13mg/L、b) 部材混合の場合で検出限界以下～0.01mg/L (9 検体中 9 検体) であり、いずれも上記基準値を下回る結果であった。

表 3-7 溶出試験結果

種類		製造年	単位	Pb 鉛	Cd カドミウム	As ヒ素	Se セレン	T-Hg 水銀	Cr ⁶⁺ 六価クロム	Be ベリリウム	Sb アンチモン	Te テルル	N数
単結晶	国内	～1999	検出数	6/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	6
			最大溶出量	0.13	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
			最少溶出量	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
		2000～2009	検出数	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	6/6	0/6	6
			最大溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.09	<0.01	
			最少溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	
		2010～	検出数	1/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	6/9	3/9	9
			最大溶出量	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.12	0.04	
			最少溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
	海外	2008～2013	検出数	5/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	9/9	0/9	9
			最大溶出量	0.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.09	<0.01	
			最少溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	
多結晶	国内	2001～2005	検出数	9/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	6/12	0/12	12
			最大溶出量	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.19	<0.01	
			最少溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
		2012～	検出数	6/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	3/6	0/6	6
			最大溶出量	0.42	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	
			最少溶出量	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
	海外	2012～	検出数	12/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	9/15	6/15	15
			最大溶出量	0.90	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	0.07	0.03	
			最少溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
Si薄膜	国内	2008～2013	検出数	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	0/9	9
			最大溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
			最少溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
化合物	国内・海外	2007～2013	検出数	0/9	3/9	0/9	6/9	0/9	0/9	0/9	6/9	3/9	9
			最大溶出量	<0.01	0.13	<0.01	1.1※	<0.0005	<0.01	<0.01	0.06	1.70	
			最少溶出量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

※試料調製方法、分析機関により結果にばらつきが生じる可能性があり、製品の評価にあたっては注意が必要。追加分析試験（表 3-8 参照）の結果、同一製品を同一の調製方法で分析した場合であっても、0.02～1.1mg/L と分析機関によってばらつきのある結果が得られている。

表 3-8 同一製品（化合物系モジュール）におけるセレンの溶出に関する
試料粉碎方法別分析結果(mg/L)

		分析機関 A (本試験結果)	分析機関 A (追加試験結果)	分析機関 B	分析機関 C	分析機関 D
本試験結果詳細(カッ ティングミル粉碎)	①	1.1	—	—	—	—
	②	0.9	—	—	—	—
	③	0.9	—	—	—	—
追加試験 a) カッティングミル粉碎 ※	④	—	0.10	0.02	0.049	—
	⑤	—	0.13	0.02	0.064	—
	⑥	—	0.11	0.02	0.076	—
追加試験 b) 部材混合※	⑦	—	0.01	<0.01	<0.005	—
	⑧	—	0.01	<0.01	0.006	—
	⑨	—	0.01	<0.01	<0.005	—
参考 c) 化合物付き基板 (最終処分業者によ る処分方法確認のた めの試験) ※※	⑩	—	—	—	—	0.047
	⑪	—	—	—	—	0.008

注) ①～⑨は、環境庁告示 13 号試験に準拠した方法に基づき試料調製・分析を実施。①～⑥はカッティ
ングミルを使用して試料粉碎したものであり、⑦～⑨は各部材をハンマー及びはさみを用いて粉碎した上
でパネルの構成重量比で混合したもの。

⑩、⑪は、環境庁告示 13 号試験（改訂前）に準拠した方法に基づき試料調製し、「水素化物発生原子
吸光法（JIS K 0102 67.2）」に準拠し分析。化合物付き基板のみの測定結果を全体重量比で 1/3 相当し
たもの。

出所) ※化合物系モジュールメーカーによる追加分析結果

※※化合物系モジュールメーカー提供データ

3.3 使用済太陽光発電設備のリサイクルに関する海外動向調査

世界的に太陽光発電設備の導入が進んでいるが、我が国に先んじて、固定価格買取制度が導入されていた欧州では、導入量が急増しているにも関わらず、廃棄時の処理について明確な措置が講じられていない点が問題視され、シナリオ分析により、太陽電池モジュールを欧州 WEEE 指令に追加することにより、不適切な処理・廃棄により発生する環境影響を低減し、結果として経済的利益が生まれる、という結論が得られたため、2012 年 8 月に発効した改正欧州 WEEE 指令において太陽電池モジュールが対象製品に追加されている。改正欧州 WEEE 指令の今後の課題としては、各国の国内法制定状況、国内法の施行状況、目標値の達成状況を確認し、各国法の機能状況や成果、目標設定の妥当性等の点を見直していく点が挙げられる。また、同指令の発効以前より、太陽電池モジュールメーカーが主体的に産業団体 (PV CYCLE) を立ち上げ、回収・リサイクルスキームを構築している。現在 PV CYCLE にて回収されている太陽電池モジュールの 95%以上は、工場でのロットアウト、および輸送時・設置時に損傷を受けたものであり、技術的寿命 (30 年以上) を全うして廃棄された太陽電池モジュールは全体の 1%に満たない。PV CYCLE の今後の課題としては、今後制定される各国の国内法への対応が挙げられる。国内法の内容が国により大きく異なった場合には、PV CYCLE のリサイクルシステムの変更等を求められる可能性がある。このような状況を踏まえ、我が国でも導入が急速に進んでいる太陽光発電設備への将来的な対応を検討する際の参考として海外動向を調査した。

3.3.1 欧州 WEEE 指令制定の背景と太陽光発電設備に関する議論・動向

(1) 欧州 WEEE 指令制定の背景

欧州では、1970 年代の環境問題に対する意識の高まり等を契機として、廃棄物枠組み指令 (91/156/EEC)、有害廃棄物：理事会指令 (94/31/EC)、有害廃棄物に関する枠組み指令 (91/689/EEC)等の、廃棄物に関する一連の指令が制定された。廃電気・電子機器の廃棄に関する欧州議会及び理事会指令 (以下、欧州 WEEE 指令) は、上記指令の基本原則を踏まえた、廃電気・電子機器 (以下、WEEE) に対応する指令である。

欧州 WEEE 指令の策定当時、欧州域内において WEEE が急増し、その約 90%は前処理なしで埋立／焼却／再利用され、重金属や臭素系難燃剤等の製品に含まれる物質が土壌・水・大気へ流出し、人への健康リスクや環境破壊につながっていると指摘されてきた。この状況を踏まえ、WEEE の耐用年数管理や環境配慮設計、ライフサイクルの考慮、生産者責任の拡張等によって環境への影響を軽減することを目的とし、欧州 WEEE 指令が 2002 年に欧州議会にて採択され、2003 年に発効した。欧州 WEEE 指令では、生産者責任原則に基づき、加盟国および生産者に、主に表 3-9 に示す事項について要求している。

表 3-9 欧州 WEEE 指令における主要な要求事項

カテゴリー	概要
製品設計	・ WEEE の再利用、解体、リカバリーを考慮した製品設計・製造の促進
分別回収	・ WEEE の分別回収率の向上 ・ WEEE の無料回収システムの構築 ・ 回収率目標の達成

処理	・ 分別回収された全ての WEEE の適正な処理 ・ 最善の技術を用いた WEEE のリカバリー ・ リカバリー・リサイクル率目標の達成
資金調達	・ 生産者の WEEE の回収・処理・廃棄に関するコスト負担と資金調達 ・ 資金調達に関する保証（共同スキームへの加盟、保険への加入、封鎖銀行口座への積み立て等）
情報提供	・ WEEE の分別、再利用、リサイクル等に関する消費者への情報提供
情報管理	・ 生産者の登録制度の確立、製品の上市に係る関連情報の収集・管理

出所) Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (recast WEEE)より作成

(2) 欧州 WEEE 指令制定前の WEEE 及び太陽光発電設備の処理状況

オランダやスウェーデン、オーストリア、ベルギー、デンマーク等、一部の EU 加盟国では、欧州 WEEE 指令に先行して、廃電気・電子機器（以下、WEEE）の取扱いについて独自の国内法や政策の導入を進めていたが、多くの国では WEEE のリサイクル制度は整備されていなかった。これらの国においては、廃棄物処理の基本原則となる「廃棄物枠組み指令（1991 年制定）」等に基づく国内法に準拠する形で、WEEE の処理が実施されていたと考えられる。

例えばドイツにおいても、欧州 WEEE 指令の制定前に WEEE リサイクルに係る制度は整備されていなかったが、1996 年に制定された循環経済・廃棄物法において、拡大生産者責任の概念に基づき、製造から消費までの全過程における廃棄物の排出回避、素材やエネルギーの再利用、環境に配慮した処理方法等が掲げられており、WEEE はこの法律に準拠して処理されていた。

太陽電池モジュールについては、80～90%がガラス、10%が金属及びプラスチック、0.1～0.2%が半導体で構成されており²、処理において特別な取扱いを必要としないため、後述する改正欧州 WEEE 指令（WEEE2）の制定前は、各国の廃棄物処理に関する国内法（ドイツの場合は循環経済・廃棄物法）に則った一般的な廃棄物処理がなされていたものと考えられる。

(3) 欧州 WEEE 指令の改正と太陽光発電設備にかかる変更点

1) 欧州 WEEE 指令改正の経緯

欧州 WEEE 指令発効を受けて、各国において WEEE の回収・リサイクルに関する国内法が制定され、WEEE の回収・リサイクルが実施された。その後、各国の国内法の運用状況の改善や、不要な行政負荷の削減を主要な目的として、2008 年に欧州委員会（以下、EC）より欧州 WEEE 指令改正に係る提案がなされた。2009 年より指令改正に向けた検討が開始され、その結果を踏まえて 2012 年に改正欧州 WEEE 指令（WEEE2）が発効した（表 3-10）。

改正欧州 WEEE 指令の大きな改正点として、太陽電池モジュールの対象品目への追加、製品カテゴリーの変更、回収及びリカバリー・リサイクルに係る目標の変更等が挙げられる。加盟国は、2014 年 2 月 14 日までに、改正欧州 WEEE 指令に対応した国内法を制定する必要がある。欧州 WEEE 指令は大枠を規定するものであり、太陽光電池モジュールの回収・

² PV CYCLE 提供資料より

リサイクル制度の詳細は、各加盟国の国内法で規定されることとなる。

表 3-10 欧州 WEEE 指令の制定・改正の経緯

時期	欧州 WEEE 指令の制定・改正の経緯
2002 年	欧州議会および理事会にて採択
2003 年	欧州 WEEE 指令 (Directive 2002/95/EC) 発効
2008 年	欧州委員会より欧州 WEEE 指令改正提案
2012 年	欧州議会および理事会にて採択 改正欧州 WEEE 指令 (Directive 2012/19/EC) 発効 ✓ 太陽電池モジュールを対象品目に追加 ✓ 加盟国に対し、2014 年 2 月 14 日までの国内法制定を要求

出所) EU ウェブサイト (http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm) より作成

2) 太陽光発電設備にかかる具体的変更点

a. 太陽電池モジュールの対象品目への追加及び分類の変更

欧州 WEEE 指令では、太陽電池モジュールは「科学・技術の進歩に適応し、今後追加する可能性がある品目」と位置付けられていたが、2011 年 12 月に欧州 WEEE 指令の改正案に対する合意がなされ、太陽電池モジュールが対象製品に追加されることとなった。また、太陽電池モジュールの追加に伴い、製品カテゴリーが表 3-11 の通り変更され、新たに太陽電池モジュール³がカテゴリー4 に追加された。この製品カテゴリーは 2018 年 8 月 14 日まで適用される。

表 3-11 改正欧州 WEEE 指令の製品カテゴリー (2018 年 8 月 14 日まで)

カテゴリーNo	対象品目
カテゴリー1.	Large household appliances (大型家電製品)
カテゴリー2.	Small household appliances (小型家電製品)
カテゴリー3.	IT and telecommunications equipment (IT 及び遠隔通信機器)
カテゴリー4.	Consumer equipment and photovoltaic panels (民生用機器及び太陽電池モジュール)
カテゴリー5.	Lighting equipment (照明器具)
カテゴリー6.	Electrical and electronic tools (with the exception of large-scale stationary industrial tools) (電動工具 (据付型の大型産業用工具を除く))
カテゴリー7.	Toys, leisure and sports equipment (玩具、レジャー機器、スポーツ機器)
カテゴリー8.	Medical devices (with the exception of all implanted and infected products) (医療機器 (全ての移植製品及び感染した製品を除く))
カテゴリー9.	Monitoring and control instruments (監視・制御機器)
カテゴリー10.	Automatic dispensers (自動販売機・自動現金引き出し機)

※適用対象外

ー軍事目的の機器 ー白熱電球

³ 欧州 WEEE 指令では “photovoltaic panels” と表記

－指令対象外機器の一部として特別に設定された機器で、その機器の一部としてのみ機能するもの
出所) Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (recast WEEE)

2018 年 8 月 15 日以降は、製品カテゴリーは表 3-12 のとおり変更される。欧州 WEEE 指令では、加盟各国に目標の達成状況等に関するレポートの提出を義務付けており、各国はレポートの中で表 3-11 の製品カテゴリーごとに上市量及び回収量を報告する必要があるが、各国において、各製品の分類に際して判断に迷う例が多く発生していた。この状況を受けて、2018 年以降は、製品分類を判断しやすいように、またリサイクルを進めやすいように、より広い定義の製品カテゴリー（表 3-12）に移行するよう改定されており、太陽電池モジュールはカテゴリー4に含まれることとなる。

表 3-12 改正欧州 WEEE 指令の対象品目（2018 年 8 月 15 日以降）

カテゴリーNo	対象品目
カテゴリー1.	Temperature exchange equipment（温度変換機器）
カテゴリー2.	Screens, monitors, and equipment containing screens having a surface greater than 100 cm ² （スクリーン及びモニター、表面が 100cm ² より大きいスクリーンを含む機器）
カテゴリー3.	Lamps（照明器具）
カテゴリー4.	Large equipment (any external dimension more than 50 cm) (大型機器 (いずれかの外形寸法が 50cm 超え))
カテゴリー5.	Small equipment (no external dimension more than 50 cm) (小型機器 (50cm を超える外形寸法がない))
カテゴリー6.	Small IT and telecommunication equipment (no external dimension more than 50 cm) (小型 IT・遠隔通信機器 (50cm を超える外形寸法がない))

※適用対象外

- －軍事目的の機器
 - －指令対象外機器の一部として特別に設定された機器で、その機器の一部としてのみ機能するもの
 - －白熱電球
 - －宇宙用機器
 - －据付型大型産業用工具
 - －大型固定装置（装置の一部として特別に設計・取付されていない機器を除く）
 - －人または物の輸送手段（型式承認されていない電動二輪車を除く）
 - －専門家用のみを目的とした非公道用移動機械
 - －B to B ベースでのみ利用可能な専ら研究・開発の目的で特別に設計された機器
 - －医療用機器及び体外診断用医療用機器（廃棄前感染が予想される場合）、能動型体内植込型医療用機器
- 出所) Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (recast WEEE)

なお、EC では、一般に太陽光電池モジュールの設置や撤去にあたっては、接続箱等の周辺機器（Balance of System: BOS）を含めた設備全体が一括して取り扱われるものと解釈されており、指令で定義される“PV panel”には、BOS が含まれると認識されている。他用途でも使用される汎用的な機器（パワーコンディショナ等）については、太陽光電池モジュールに付随する機器ではなくカテゴリー4に分類されると考えられるが、実際に BOS を扱うカ

テゴリーについては、加盟各国の国内法に任されている⁴。

b. 回収及びリカバリー・リサイクルに係る目標の変更

改正欧州 WEEE 指令では、WEEE の回収及びリカバリー・リサイクルに係る目標が変更されている。

欧州 WEEE 指令では、回収については、「一人あたり 4kg」の目標値が設定されていたが、指令制定後、同目標値の達成のために WEEE を輸入する必要のある国が出るなど、重量ベースの目標設定の不適切性が露呈した。目標値に関する各種議論及び実態調査を踏まえ、目標値はより市場の現状に則した合理的な形で設定されるべきであるとされ、改正欧州 WEEE 指令では、一人あたり重量ではなく、回収率（％）に目標値が変更された。目標値は段階的に高くなるように設定されており、2016 年から 2018 年は、過去 3 年間（2013～2015 年）に上市された EEE の平均販売重量の 45%、2019 年以降は過去 3 年間（2016～2018 年）に上市された EEE の平均重量の 65%、あるいは廃棄物発生重量の 85%に設定されている（表 3-13）。

表 3-13 改正欧州 WEEE 指令における回収率目標

時期	回収率目標
2016 年～2018 年	過去 3 年間（2013～2015 年）に上市された EEE の平均販売重量の 45%
2019 年～	過去 3 年間（2016～2018 年）に上市された EEE の平均重量の 65%、あるいは廃棄物発生重量の 85%

出所）Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (recast WEEE)

また、太陽電池モジュールが含まれるカテゴリー4 に設定されているリカバリー率、リサイクル率は、表 3-14 のとおり設定されている。

表 3-14 改正欧州 WEEE 指令におけるリカバリー・リサイクル率目標（カテゴリー4）

時期	リカバリー率	リサイクル率
2012 年 8 月 13 日～2015 年 8 月 14 日（カテゴリー4）	75%	65%
2015 年 8 月 15 日～2018 年 8 月 14 日（カテゴリー4）	80%	70%
2018 年 8 月 15 日以降（カテゴリー4）	85%	80%

出所）Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (recast WEEE)

（4）同指令への太陽電池モジュール追加の背景と議論

1) 太陽電池モジュールの対象品目追加の背景

欧州 WEEE 指令では、太陽電池モジュールは「科学・技術の進歩に適応し、今後追加する可能性がある品目」と位置付けられていたが、近年太陽電池モジュールの導入量が急増しているにもかかわらず、廃棄時の処理や責任については明確な措置が講じられていない点（費

⁴ EC へのヒアリング調査より。

用負担責任が不明確、回収・リサイクル制度が未整備、目標値が不明確（太陽電池モジュールメーカーの自主的目標のみ）である等）が EC 内で問題視されており、太陽電池モジュールについても、他の WEEE と同様に、拡大生産者責任に基づく費用負担の責任の明確化、回収・リサイクルシステムの構築の必要性が指摘された。

また、再生可能エネルギーを使う環境に優しい技術である太陽光発電技術が、将来的に環境負荷となることは望ましくないこと、太陽電池モジュールから有用金属を回収できること等から、太陽電池モジュールメーカーも太陽光発電設備の回収・リサイクルに対して強い関心を持っており、ドイツ等では、複数の太陽光電池モジュールメーカーで自主的な回収の仕組みを作ろうとする動きがあった。これらの状況を踏まえ、改正欧州 WEEE 指令の対象品目への太陽電池モジュールの追加について、検討が開始された。

2) 太陽電池モジュール追加に係る議論とステークホルダーの反応

改正欧州 WEEE 指令の対象品目への太陽電池モジュール追加の検討プロセスにおいては、EC と欧州太陽光発電協会（EPIA）等の機関が双方向にコミュニケーションをとりながら調整が進められた。

検討にあたっては、EC が主導して太陽電池モジュールの追加に係る影響評価⁵を実施し、環境影響評価に加えて、欧州 WEEE 指令の対象品目に太陽電池モジュールが追加されることによる費用対効果について分析が行われた。影響評価の結果、太陽電池モジュールを欧州 WEEE 指令に追加することにより、不適切な処理・廃棄により発生する環境影響を低減し、結果として経済的利益が生まれる、という結論が出された。

<EC による太陽電池モジュールの追加に係る影響評価の概要>

EC では、改正欧州 WEEE 指令の改正にあたり、欧州 WEEE 指令の対象品目への太陽電池モジュールの追加に係る影響評価として、2011 年に “Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive” を実施している。

本レポートでは、以下の 4 つのシナリオを設定し、欧州 WEEE 指令の対象品目に太陽電池モジュールが追加されることによる費用対効果について分析が行われている。検討当時、将来的な太陽電池モジュールの回収・リサイクルに関する具体的なデータが不足していたことから、現状得られるデータに基づいて分析が行われた。

- Baseline A（no policy action）：
政策的措置が講じられず、不適切な廃棄ケースが含まれるシナリオ
- Baseline B（Photovoltaic panels are outside the scope of the WEEE Directive）：
太陽電池モジュールを欧州 WEEE 指令の対象品目とせず、現在のボランティアな回収・リサイクルの取組みが実施されるシナリオ
- Policy Option A（policy action）：
住宅用太陽電池モジュールのみ欧州 WEEE 指令の対象品目に加えるシナリオ

⁵ “Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive Final Report” (2011, EC)

- Policy Option B (inclusion of photovoltaic panels in the scope of the WEEE Directive) :
全ての太陽電池モジュールを欧州 WEEE 指令の対象品目に加えるシナリオ

上記 4 つのシナリオ分析により、太陽電池モジュールを欧州 WEEE 指令に追加することにより、不適切な処理・廃棄により発生する環境影響を低減し、結果として経済的利益が生まれる、という結論が得られている。不適切に処理・廃棄される太陽電池モジュールの量を制限することにより、カドミウム溶出等による環境への悪影響を避けられることに加え、従来の有価資源やレアメタル等の回収による、潜在的な希少資源の喪失防止に寄与することが主な理由となっている。

例えば、Policy Option A と Baseline A との比較では環境への悪影響が 4 分の 1 に、Policy Option B と Baseline A との比較では環境への悪影響が 6 分の 1 に低減される結果が得られた。また、Baseline B における現在のボランティアな回収・リサイクルの取り組みでは、材料リサイクルから得られる収益がコストを相殺する結果にまでは至らなかったが、Policy Option A と Policy Option B では、高い回収率により、リサイクルに関するロジスティクスや前処理にかかるコストを相殺する以上の収益が得られる結果となった。

上記に例示した分析結果により、Policy Option B (全ての太陽電池モジュールを欧州 WEEE 指令の対象品目に加えるシナリオ) が推薦される政策オプションであることが確認され、その年間純利益は、2050 年時点において 151.1 億ユーロという試算結果となった。他のシナリオとの比較では、Baseline A を 165.8 億ユーロ、Baseline B を 164.9 億ユーロ、Policy Option A を 16.7 億ユーロ上回る結果となった。

表 シナリオ別の 2050 年時点の年間純利益

	Baseline A	Baseline B	Policy Option A	Policy Option B
2050 年時点の年間純利益	-14.7	-13.9	134.4	151.1
Baseline A との比較	N/A	+0.9	+149.1	+165.8
Baseline B との比較	N/A	N/A	+148.3	+164.9

出所) “Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEEE Directive Final Report” p.33 (2011, EC)

改正欧州 WEEE 指令の対象品目に太陽電池モジュールを追加し、製造業者にコスト負担義務を課すことについては、ステークホルダーから様々な反応があった。EC の予想通り反対意見もあったが、協議の結果、提案内容（太陽電池モジュールメーカーが回収・リサイクルにかかるコストを負担）以外の方法は現実的に有り得ないという見解で一致した。太陽電池モジュールは「電気電子機器」の範疇に含まれるべきである、という合意に至り、改正欧州 WEEE 指令に追加されることとなった⁶。

なお、WEEE の耐用年数管理や環境配慮設計、ライフサイクルの考慮、生産者責任の拡張等によって環境への影響を軽減することを目的とし、欧州 WEEE 指令と同年に、「電気電子機器に係る特定有害物質の使用制限(RoHS 指令)」が発効しているが、太陽電池モジュールは RoHS 指令の対象とはされていない。RoHS 指令では、第 2 条 4.(i)にて、「一般、商業、

⁶ EC へのヒアリング調査より。

産業、住宅用に、太陽光からエネルギーを生産するために、定められた場所で恒久的に使用するため専門家により設計、組立、設置されたシステム内で使用される太陽電池モジュール」は RoHS 指令の適用外とすることが規定されている。太陽電池モジュールが欧州 RoHS 指令の対象外とされた理由として、以下が挙げられる⁷。

- 欧州 RoHS 指令施行当時に太陽光発電設備の市場性が不透明であったこと
- 業者、メーカーに対する時間的猶予の必要性
- 専門の事業者によって設計・施工・撤去されるため適切な取扱いが成されると想定されること

⁷ EC へのヒアリング調査より。

(5) 加盟各国の国内法の改正状況

改正欧州 WEEE 指令は、加盟国に対し、2014 年 2 月 14 日までに改正欧州 WEEE 指令に対応した国内法を制定することを要求している。欧州委員会が 2013 年 10 月に実施した加盟国間の会議では、各国の国内法整備状況が確認され、比較的順調に準備が進められていることが確認されていた。

しかしながら、2014 年 2 月 14 日時点で、国内法の法制化が完了した国は、英国とブルガリアの 2 国にとどまり、ドイツ、イタリア、フランス、スペイン等の主要国においては、期限内の国内法制定は実現していない⁸。ドイツについては、2013 年 9 月に実施された連邦議会選挙の影響を大きく受けてスケジュールが遅延しており、国内法制定は 2014 年末または 2015 年始めになる見通しとなっている⁹。その他の国についても、ウェブ等の公開情報では動向が不明な点が多く、今後も国内法改正状況について注視する必要がある。

(6) 改正欧州 WEEE 指令の今後の課題等

改正欧州 WEEE 指令の今後の課題としては、各国の国内法制定状況、国内法の施行状況、目標値の達成状況を確認し、各国法の機能状況や成果、目標設定の妥当性等の点を見直していく点が挙げられる。

また現在、当該国に上市された EEE の重量および発生した WEEE の重量の共通計算手法の開発が、EC の大型プロジェクトとなっており¹⁰、2019 年からの運用開始が予定されている。加盟各国は回収率目標の達成状況を EC に報告する必要があるが、当該年の WEEE の排出量等を把握することが難しく、各国間で回収率の精度にばらつきがある状況となっている。共通計算手法の確立により、各国の回収率の計算方法を統一し、より正確な回収率達成状況を把握することが本プロジェクトの狙いとなっている¹¹。

⁸ PV CYCLE Press Release

(<http://www.pvcycle.org/country/germany/press/national-weee-regulations-come-into-force-major-changes-ahead-for-photovoltaic-industry/>)

⁹ ドイツ連邦環境省（BMU）へのヒアリング調査より。

¹⁰ 改正欧州 WEEE 指令の Article7-5 において、共通計算手法の開発が EC に義務づけられている

¹¹ EC へのヒアリング調査より。

3.3.2 PV CYCLE の最新動向

(1) 組織概要・設立の背景

PV CYCLE は、太陽電池モジュールの回収・リサイクルスキームの構築を目的とした世界初の産業団体である。2003 年の欧州 WEEE 指令発効を受けて、将来的に太陽電池モジュールが同指令の対象機器に含まれる可能性を見据え、EPIA（欧州太陽光発電産業協会）や BSW（ドイツ太陽光発電産業協会）、大手太陽電池モジュールメーカーにより、2007 年に設立され、2010 年より活動を開始した。

主要業務は、メンバー企業の廃棄太陽電池モジュールのリサイクルシステム（回収・輸送・リサイクルの一連の流れ）の運営であり、メンバー企業と関連業界（回収、輸送、リサイクルに係る事業者）とのネットワークを活用したシステム運用が図られている。現状においては、リサイクルに係る取組みのみ実施しており、リユースに関する業務は行っていない。

メンバーとして、欧州市場に太陽電池モジュールを供給する太陽電池モジュールメーカー、輸入業者および関連機関等が参画している。現在のメンバー数は約 750 社で、欧州市場で販売されている太陽電池モジュールの 90%をメンバー企業による製品が占めている¹²。なお、太陽電池モジュールの製造事業者、輸入業者、販売業者であれば、どの企業でも PV CYCLE に加盟することが可能である。

表 3-15 PV CYCLE の概要

項目	概要
組織形態	非営利組織（NPO）
設立年	2007 年
所在地	ベルギー ブリュッセル
主要業務	欧州域内（EU 加盟国および EFTA 加盟国）で廃棄される太陽電池モジュールのリサイクルシステム（回収・輸送・リサイクル）の運営
メンバー企業・機関	欧州市場に太陽電池モジュールを供給する太陽電池モジュールメーカー、輸入業者および関連機関等が参画（現在のメンバー数は約 750 社）。
活動原資	メンバー企業の年会費および回収・リサイクルサービス利用料（Contribution fee、後述）

出所) PV CYCLE Annual Report 2011, PV CYCLE Status Report(Dec. 2012), PV CYCLE へのヒアリング調査より作成

(2) 回収・リサイクルサービスの概要

1) 回収・リサイクルサービスの対象

PV CYCLE のリサイクルシステムは、欧州域内（EU 加盟国および EFTA 加盟国）で廃棄される太陽電池モジュールのみを対象としている。太陽電池モジュールと合わせて接続箱、接続ケーブルも回収しているが、パワーコンディショナは現在取り扱っていない。太陽電池モジュールの種類としては、シリコン系太陽電池と非シリコン系太陽電池（CdTe 系、CIS 系、CIGS 系）の両方を扱っており、現在リサイクルされているものの約 8 割がシリコン系太陽電池モジュールである。

¹² PV CYCLE へのヒアリング調査より。

現状では、PV CYCLE の回収リサイクルサービスの対象は、92%が事業用の大規模廃棄。8%が小規模廃棄であり、一般家庭等からの廃棄量は非常に小さい状況にある。また、現在回収されている太陽電池モジュールの95%以上は、工場でのロットアウト、および輸送時・設置時に損傷を受けたものであり、技術的寿命（30 年以上）を全うして廃棄された太陽電池モジュールは全体の1%に満たない。ただし、PV CYCLE では、今後10～15年間で、技術的寿命を迎えた太陽電池モジュールの廃棄量が増加すると見込んでいる。

パワーコンディショナは太陽電池モジュールと比較して寿命が短い（10 年程度）ことや、業界リーダーのドイツメーカーが、自社で回収するシステムを構築していることから、現状ではPV CYCLE の回収・リサイクルサービスの対象からは外れているが、将来的には回収範囲を拡大する可能性がある。また、各国の国内法の改正状況により、回収の範囲が変わることも想定されている¹³。

2) 回収・リサイクルスキーム

a. 太陽電池モジュール枚数 40 未満の場合

PV CYCLE の回収・リサイクルサービス内容は対象システムの規模により異なっている。太陽電池モジュールの枚数が40 未満（住宅用太陽光発電システム約1 件分に相当）の場合、最終ユーザーは、太陽電池モジュールの設置場所から最も近い回収ポイントを PV CYCLE のウェブ情報をもとに特定し、PV CYCLE に必要書類を提出した上で、太陽電池モジュールを撤去し、回収ポイントまで輸送する。太陽電池モジュールの撤去・運送に係るコストは最終ユーザーが負担する。

PV CYCLE は、回収ポイントに運び込まれた太陽電池モジュールを保管し、一定量を超えた時点でリサイクル事業者を選定し、リサイクル事業者のプラントまで太陽電池モジュールを輸送する。回収ポイントにおける太陽電池モジュールの収集・保管、リサイクルプラントまでの輸送、およびリサイクルにかかるコストは PV CYCLE が負担する。

《モジュール枚数 40未満の場合》

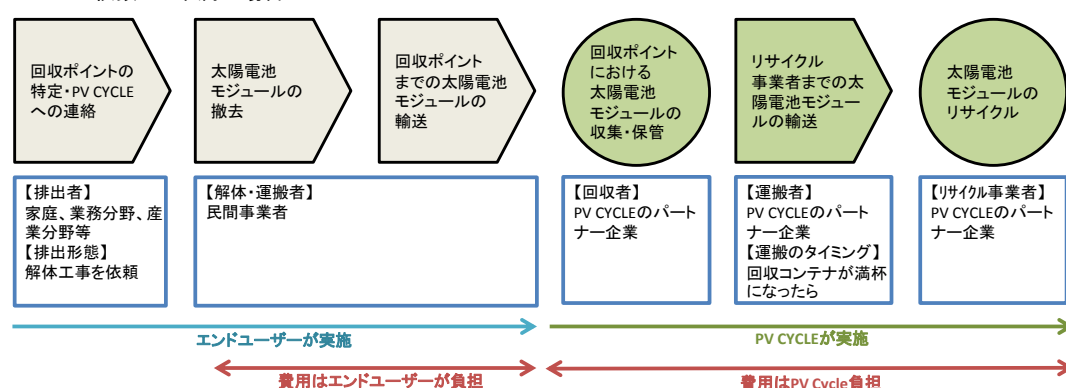


図 3-8 PV CYCLE のリサイクルスキーム（モジュール枚数 40 未満）

出所）PV CYCLE Annual Report 2011, PV CYCLE Status Report(Dec. 2012), PV CYCLE へのヒアリング調査

¹³ PV CYCLE へのヒアリング調査より。

b. 太陽電池モジュール枚数 40 以上の場合

太陽電池モジュールの枚数が 40 以上の場合、最終ユーザーは、回収依頼に係る必要書類を PV CYCLE に提出した上で、太陽電池モジュールを撤去する。太陽電池モジュールの撤去に係るコストは最終ユーザーが負担する。

PV CYCLE は、最終ユーザーからの連絡を受けてリサイクル事業者を選定し、太陽電池モジュールの撤去場所からリサイクル事業者の元まで直接輸送する。太陽電池モジュールの輸送、リサイクルにかかるコストは PV CYCLE が負担する。

リサイクルコストは国によって異なるが、例えばドイツでは、約 250 ユーロ／トンとの情報を得ている。

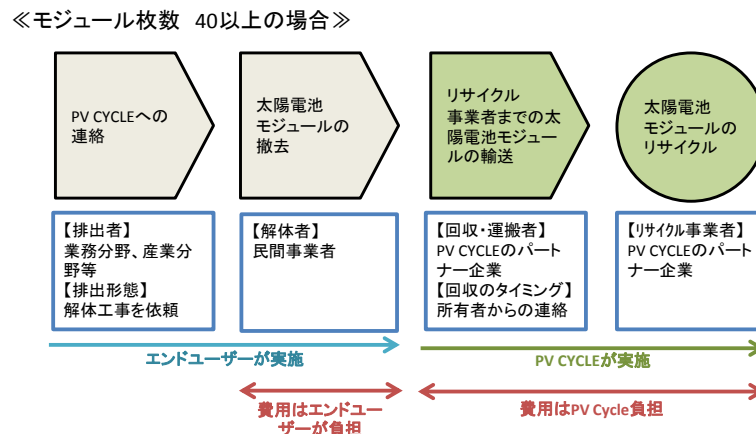


図 3-9 PV CYCLE のリサイクリスキーム（モジュール枚数 40 以上）

出所）PV CYCLE Annual Report 2011, PV CYCLE Status Report(Dec. 2012), PV CYCLE へのヒアリング調査

(3) PV CYCLE の運営経費・会費の種類

1) 欧州 WEEE 指令の改正等に伴う会費の見直し

PV CYCLE の活動原資は、メンバー企業の年会費および回収・リサイクルサービス利用料（Contribution fee）により賄われている。

2011 年までは、メンバー企業からの会費（membership fee）のみを財源とし、5,000～25,000 ユーロ／年（会費は企業により異なる）に設定していた。2011 年までは PV CYCLE の主な業務は EU や各国政府へのロビー活動であり、回収・リサイクルに係るコストは実質的にかかっていなかったため、会費のみでも組織運営は可能であった。

しかし、改正欧州 WEEE 指令で太陽電池モジュールが対象製品に加えられたことや、廃棄量が増加することが見込まれることから、2012 年からは、これまでの会費とは別に、回収・リサイクルサービスに対して支払う“Contribution Fee”の徴収を開始しており、これに伴い、会費は一律 1,000 ユーロ／年に変更されている。

“Contribution Fee” とは、“pay as you go（捨てた分だけを支払う）”という考え方で、その年の太陽電池モジュールの予想廃棄量（トン）に基づく回収・リサイクルコスト（リサイクルコスト＋直接経費）や将来的に発生する回収・リサイクルコスト等を考慮して当該年の予算を決定し、前年度の各社の販売実績（トン）に基づく市場シェアに応じて、今年度の各

社の支払い額を決定する方式である。

例えば、2013 年に 100 トンの太陽電池モジュールが廃棄されると推定され、将来的な回収・リサイクルコスト等も考慮して 1,000 ユーロの予算が必要とされた場合、2013 年に PV CYCLE の回収・リサイクルサービスを利用する企業各社の 2012 年の市場シェア（トンベース）が 25%ずつであったとすると、2013 年の各社の支払い額は各社 250 ユーロずつとなる。なお、会費（membership fee）を支払っていない企業でも、Contribution Fee を支払えば、PV CYCLE の回収・リサイクルサービスを利用可能となっている。

太陽電池モジュールの予想廃棄量は、太陽電池モジュールの寿命を考慮した回収率カーブに基づき推計されている。太陽電池モジュールの寿命は、メーカーの保証期間や固定価格買取制度（Feed-in-Tariffs）の買取期間、メンバー企業へのアンケート調査結果等を考慮して設定されている。また、火災等による消失の可能性があることや、欧州で上市された太陽電池モジュールの全てが欧州で廃棄されるとは限らないことから、総回収率は上市された太陽電池モジュールの 80%に設定されている。

表 3-16 太陽電池モジュール廃棄量見通し

	廃棄量（PV CYCLE 試算）	市場見通し（EPIA 試算）
2013	2,300 トン	15.5GW
2014	2,800 トン	17.5GW
2015	3,400 トン	19.5GW

出所) PV CYCLE Annual Report 2011

なお、PV CYCLE では、Contribution Fee を支払うか、自社で回収・リサイクルコストを徴収・運用するかのいずれかを選択可能となっている。例えば、First Solar 社は PV CYCLE のメンバーだが、他のメンバーとは異なる独自の回収・リサイクルシステムを運用している。First Solar 社はモジュールの販売価格に回収・リサイクルコストを上乗せして専用口座に積み立てており、万一 First Solar 社が倒産しても、回収・リサイクルを継続できる資金体制を整えている。

First Solar 社のように自社で回収・リサイクルコストを徴収・運用している場合、PV CYCLE に Contribution Fee を支払う必要はない（First Solar 社は会費（membership fee）のみを支払っている）。ただし、現在はメンバーの多くが Contribution Fee の支払いを選択していると考えられる。

2) PV CYCLE の会費徴収方法に対する欧州委員会の反応

PV CYCLE の Contribution Fee（“pay as you go” 方式）に対し、太陽電池モジュールメーカーが欧州市場から撤退した場合、あるいは倒産した場合に、20～30 年後の廃棄コストをどのように担保するのかを、EC は懸念し、改正欧州 WEEE 指令では、機器メーカーに対し、保険への加入または閉鎖口座への積み立てを求めることとなった¹⁴。改正欧州 WEEE 指令への対応として、PV CYCLE においても、メンバー企業に対して保険への加入または閉鎖口座への積み立てを求めている。

¹⁴ PV CYCLE へのヒアリング調査より。

(4) 今後の課題、各国の国内法への対応状況

PV CYCLE の今後の課題としては、今後制定される各国の国内法への対応が挙げられる。

WEEE 指令により、EU 加盟国は 2014 年の第一四半期までに太陽電池モジュールの回収・リサイクルに係る国内法を制定する必要がある、国内法の内容が国により大きく異なった場合には、PV CYCLE のリサイクルシステムの変更等を求められる可能性がある。

3.3.3 First Solar 社の取組み

(1) First Solar 社の概要とリサイクル事業に取り組んだ背景

First Solar 社は、1999 年に設立された、米国に本社を置く太陽電池モジュール製造専門企業であり、Cd-Te 太陽電池モジュールの世界最大手である。世界で 8GW 以上の設置実績があり、米国とマレーシアに製造工場を有している（生産能力 1GW）。欧州市場にも多くの販売実績を有している。

First Solar 社は、拡大生産者責任の観点から、太陽電池モジュールのライフサイクルマネジメントを重要視しており、製造工程で出る廃棄物を効率的にリサイクルすることを目的に、ドイツの東部のフランクフルトオーダーに立地する太陽電池モジュール製造工場の建設と同時に、隣接してリサイクル工場を建設した。将来的に太陽電池モジュールのリサイクルが重要課題となることを見込まれたことから、自社でリサイクル技術・ノウハウを蓄積することが、リサイクル工場を建設した大きな目的の一つであった¹⁵。

(2) リサイクル実績

欧州市場全体で、累積 4.5GW の First Solar 社製太陽電池モジュールが導入されており、製造に要した材料の重量は、累計 50 万トン（94%がガラス）に達している。フランクフルトオーダーのリサイクル工場の処理実績は 7,000 トンであり、現状では設置された太陽電池モジュールの重量の 1 %程度である。

太陽電池モジュールの寿命は 20～30 年と長いため、寿命を迎えて廃棄された太陽電池モジュールは、現状ではほとんど発生していない。リサイクルされた太陽電池モジュールのうち、98%が製造工程で発生しており、残りは輸送時・設置時に割れたものである¹⁶。

(3) リサイクルシステムの概要

First Solar 社は、独自のリサイクルプログラムである“First Solar Panel Collection and Recycling Program”を運用しており、自社生産のモジュール（業務用を含む）を回収・リサイクルする体制を整えている。

First Solar 社のリサイクルシステムにおける収集の流れを図 3-10 に示す。最終ユーザーは、太陽電池モジュールの撤去に係るコストを負担し、梱包材料、回収、輸送、リサイクル処理に係るコストは、First Solar 社が回収・リサイクルにかかる準備金から拠出している。

¹⁵ First Solar 社へのヒアリング調査より。

¹⁶ First Solar 社へのヒアリング調査より。

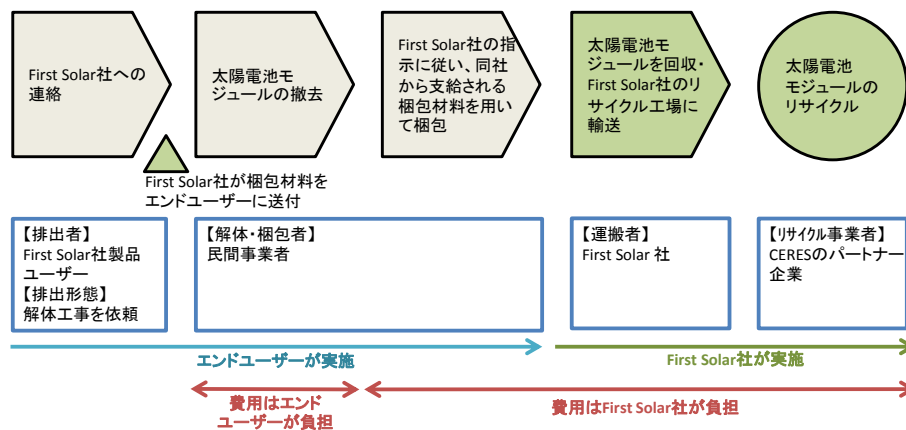


図 3-10 First Solar 社のリサイクルシステムにおける収集の流れ
出所) First Solar 社ホームページ、First Solar 社へのヒアリング調査等をもとに作成

(4) リサイクルコストの回収方法

First Solar 社は、リサイクルプログラムを運用するためのファンド（First Solar Recycling Trust Fund）を用意しており、モジュールを販売する際に、将来の回収・リサイクルコストを消費者から徴収し、回収・リサイクルにかかる準備金として積み立てている。2012 年までに同社が販売した製品の回収・リサイクルコスト総額（将来的に必要となる回収・リサイクルコストの予測額）は 301 百万ドルに達している¹⁷。

リサイクルコストは消費者から徴収しており、2011 年までは前払い方式（製品購入時に支払い）でリサイクルコストを回収していたが、2012 年より、消費者の経済的メリットを考慮し、前払い方式と後払い方式（製品廃棄時に支払い）のいずれかを選択することが可能となるよう、リサイクルプログラムが改定された¹⁸。

前払い方式（製品購入時に支払い）は、購入時に価格が明確であり、消費者にとって分かりやすい点がメリットであるが、リサイクルコストが将来的に下がることを考えると、高いリサイクル料金を初期の段階で支払う点がデメリットとなる。

後払い方式（製品廃棄時に支払い）は、後払いに関する契約（First Solar's Recycling Service Agreement）が別途必要になり、消費者にとって手間になる点がデメリットと考えられるが、リサイクル技術の向上により、製品購入時よりリサイクル料金が下がる可能性がある。また、後払い方式の場合、消費者（特に事業者）は First Solar 社以外のリサイクル業者への委託も可能となっており、最も委託費用の安い業者を選択できる点もメリットに挙げられる。

¹⁷ First Solar 社へのヒアリング調査より。

¹⁸ First Solar 社によると、日本においては、後払い方式を契約にて義務化する可能性がある。

表 3-17 First Solar 社のリサイクルコストの支払方法と特徴

方式	概要	メリット	デメリット
前払い方式	製品購入時に支払い	購入時に価格が明確であり、消費者にとって分かりやすい	リサイクルコストが将来的に下がることを考えると、高いリサイクル料金を初期の段階で支払うことになる
後払い方式	製品廃棄時に支払い	リサイクル技術の向上により、製品購入時よりリサイクル料金が下がる可能性がある。 First Solar 社以外のリサイクル業者への委託も可能であり、最も委託費用の安い業者を選択できる。	後払いに関する契約が別途必要になり、消費者にとっては手間になる

出所) First Solar 社へのヒアリング調査をもとに作成

(5) リサイクル方法・技術

First Solar 社のリサイクルプロセスを図 3-11 に示す。最終ユーザーから回収された使用済み太陽電池モジュールは、大きくガラスと半導体部分 (CdTe) に分けられる。ガラスは新しいガラス製品として、半導体は新しい太陽電池モジュール材料として再利用される。

First Solar 社のリサイクルプロセスにおけるリサイクル率は、ガラスが 90%、半導体材料が 95%で、全体としてモジュール重量の 90% (大半はガラス) がリサイクルされている。同社によると、同社の新製品においては、半導体材料の 95%がリサイクル可能となっている。

現在 First Solar 社は、米国、ドイツ、マレーシアに製造工場を有しており、これら全ての工場にリサイクル設備を備えている。米国工場とマレーシア工場の、年間の処理容量は 10,000 トンである。

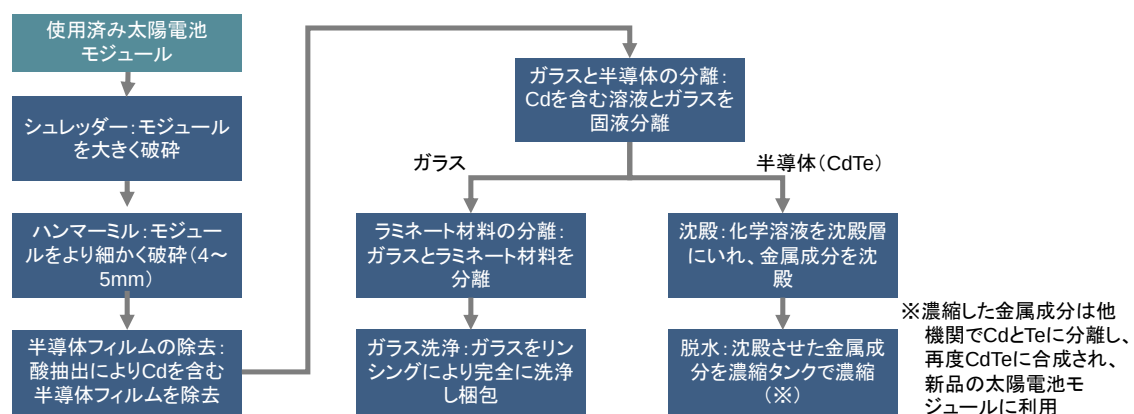


図 3-11 First Solar 社のリサイクルプロセス

出所) First Solar 社ホームページ、First Solar 社へのヒアリング調査等をもとに作成

(6) リサイクルのコスト・事業性

リサイクルコストは、国や地域の状況により大きく異なるが、輸送費の抑制が、リサイクルコスト削減の課題の一つとなっている。例えばドイツの場合、現在の輸送ルートは、自治体の回収ポイントからリサイクル工場に届くまで細かい段階に分かれており、最終的にリサイクル工場に着くまでに4～5回の積み替えを経由することが、輸送費が高くなる要因となっている。

太陽電池モジュールのリサイクル事業収支は現状では赤字の状態にある。原因としては、現状では廃太陽電池モジュールの量が少なく、スケールメリットを得られないことが挙げられる。ただし、リサイクル技術の進歩と、処理量の増加により、将来的には採算が取れるようになる想定されている。また、現在はリサイクル量が小さいため、電極に使用されている銀を回収できていないが、処理量が増えれば銀も回収可能となり、リサイクル事業の収益増加につながると考えられている¹⁹。

(7) 今後の活動計画、各国の国内法への対応状況

First Solar 社の今後の課題としては、海外市場における各種規制への対応が挙げられる。現在米国では、太陽電池モジュールのリサイクルに係る連邦レベルの規制は存在しないが、欧州の WEEE 指令や、その他各国における拡大生産者責任の要求等に対応する必要がある。また、効率的なリサイクルシステムの構築に向けて、PV CYCLE 等、関連団体との連携を深め、先進的な取組みにより業界をリードすることを目標としている。

なお、現在米国、マレーシア、ドイツの3箇所のリサイクル工場に、周辺国の太陽電池モジュールを集約して処理しており、仮に日本で発生した同社の廃太陽電池モジュールは、マレーシアのリサイクル工場で処理することが想定されている²⁰。

¹⁹ First Solar 社へのヒアリング調査より。

²⁰ First Solar 社へのヒアリング調査より。

4. 太陽熱利用システムのリユース・リサイクル・適正処分に関する検討

現在市販されている太陽熱利用システムは、自然循環式と強制循環式に大きく分けられ、太陽熱を集める集熱器は、平板形、真空ガラス管形などがある。自然循環式では、集熱器とお湯を貯める部分が一体となっているのに対し、強制循環式では集熱器とお湯を貯める部分がそれぞれ機器として完全に分離している。平板形集熱器は高効率の割には比較的安価であるため、ソーラーシステムの主流を占めている。

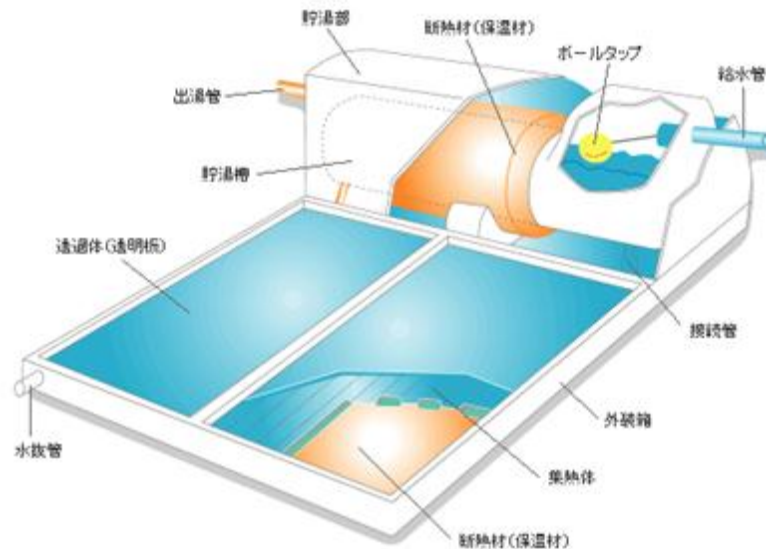


図 4-1 自然循環式の太陽熱利用システムの構造
出所) 一般社団法人ソーラーシステム振興協会ウェブサイト²¹



図 4-2 強制循環式の太陽熱利用システムの構造
出所) 一般社団法人ソーラーシステム振興協会ウェブサイト²¹

²¹ <http://www.ssda.or.jp/energy/mechanism.html#onsuiki>

4.1 使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのフローに関する調査

使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのフロー及びフロー上の関係者における使用済太陽熱利用システムの取扱実態や必要なコスト等を把握することを目的として、アンケート調査・ヒアリング調査を実施した。

表 4-1 調査の概要

関係者	調査内容
① 建物解体業者	公益社団法人 全国解体工事業団体連合会に協力を依頼し、解体工事施工技士保有企業を対象とした郵送によるアンケート調査を実施 (3,000 社に発送、有効回答数 851 社、回収率 28.4%)。(太陽光発電設備に関する調査と一体的に実施。)
② 太陽熱利用システムメーカー	一般社団法人ソーラーシステム振興協会の協力により、太陽熱利用システムメーカーを対象としたアンケート調査を実施 (有効回答数 7 件)
③ ハウスメーカー	一般社団法人 住宅生産団体連合会に協力を依頼し、大手ハウスメーカーを対象としたアンケート調査を実施 (有効回答数 11 社)。(太陽光発電設備に関する調査と一体的に実施。)
④ 施工業者	一般社団法人ソーラーシステム振興協会及び太陽熱利用システムメーカーの協力により、太陽熱利用システムの施工業者を対象としたアンケート調査を実施 (有効回答数 33 件)。
⑤ 産業廃棄物処理業者	建物解体業者への調査結果に基づき、太陽熱利用システムの処理を実施している事業者を特定してヒアリング調査を実施 (2 件)。

4.1.1 使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのフロー

調査結果を踏まえ作成した、使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのフローを図 4-3 に示す。これらのルートは、アンケート調査やヒアリング調査から推定した流れであり、この他にもフローが存在する可能性がある点に留意が必要である。

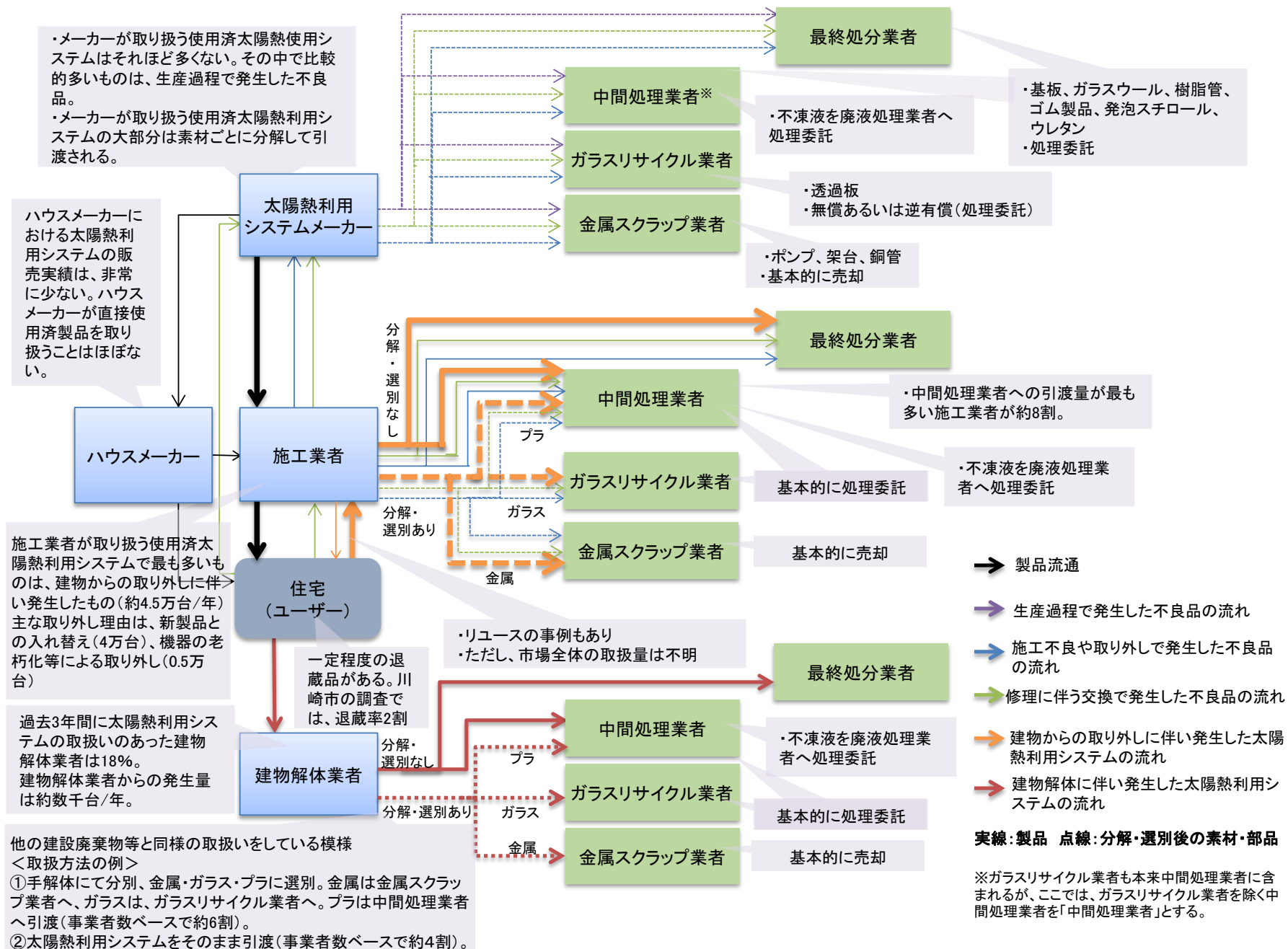


図 4-3 使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのフロー

(1) 全体の状況

太陽熱利用システムの設置実績は図 4-4 のとおりである。

平均的な使用期間を 15 年間で設定し、15 年前に設置された太陽熱利用システムが使用済になると仮定すると、平成 25 年の使用済太陽熱利用システムは年間約 9 万台となる。

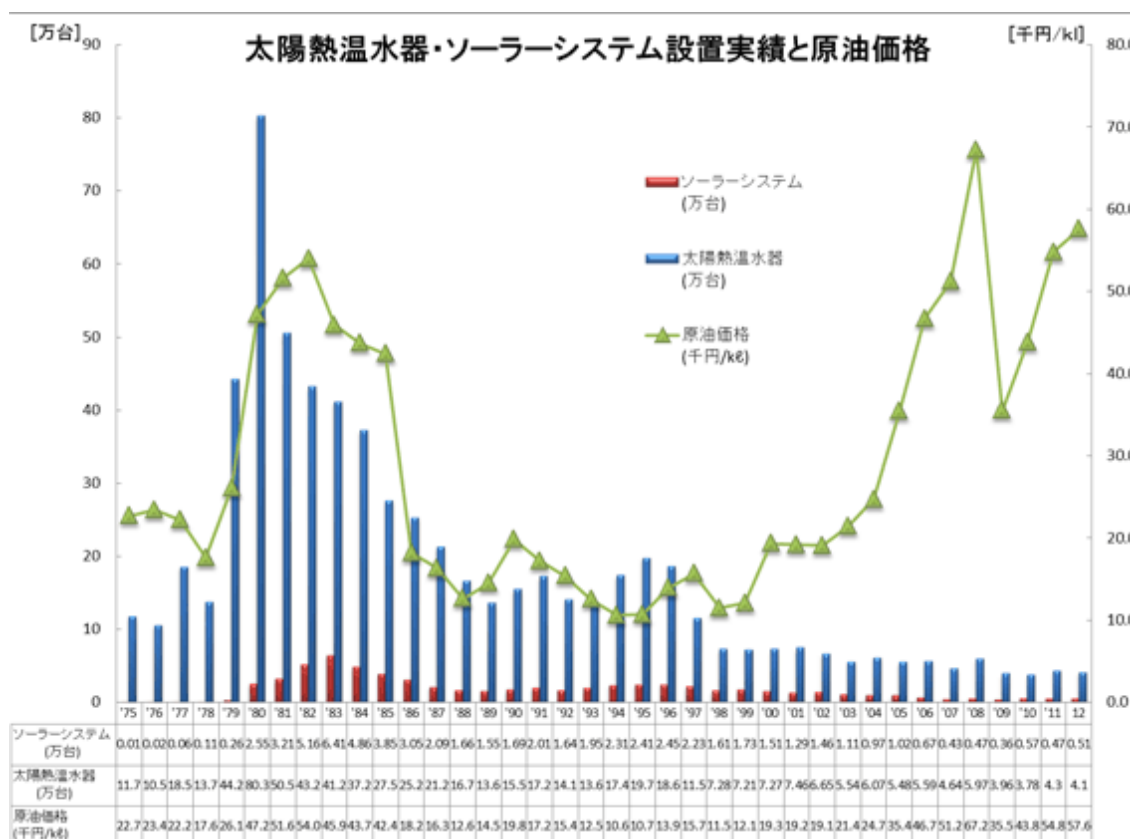


図 4-4 太陽熱利用システムの設置実績と原油価格

出所) 一般社団法人ソーラーシステム振興協会ウェブサイト²²

使用済太陽熱利用システムの内訳は以下のとおりと推察される。

- 施工業者による太陽熱利用システムとの入れ替え：約 4 万台
- 施工業者による取り外し（入れ替え以外）：約 0.5 万台
- 家屋解体時の取外し：約 0.3～0.6 万台
- 太陽熱利用システムメーカーからの排出：若干
- 退蔵：約 2 万台（川崎市の調査結果²³による退蔵率 20%から、9 万台×0.2=1.8 万台）
- 不明：約 2 万台（退蔵分が含まれている可能性あり）

使用済太陽熱利用システムの発生は、主に施工業者・建物解体業者であり、発生量はこの順に多いと推察される。太陽熱利用システムメーカーからの排出にあるが、量的にはかなり少ない。

住宅の屋根から撤去後の太陽熱利用システムのフローは、施工業者・建物解体業者・メーカー

²² <http://www.ssda.or.jp/energy/result.html>

²³ 井田淳「川崎市における太陽熱利用促進策」、太陽エネルギー2012（平成 24 年） Vol.38 No.5

によらずほぼ同じ流れと考えられ、金属は金属スクラップ業者、ガラスはガラスリサイクル業者、プラスチックは中間処理業者に引き渡されている。

なお、一部の施工業者では、比較的新しい太陽熱利用システム（設置後 10 年以内の太陽熱利用システム）を撤去する際には、別のユーザーに再利用を進めている。ボールタップやゴム管等の部品交換や適切な修理・メンテナンスを行えば、リユースすることは可能とのことである。ただし、太陽熱利用システムのリユース市場の全体についての詳細は不明である。

(2) ユーザーの状況

本調査では、ユーザーに対する調査を行っていないが、既存の調査より以下の状況が確認できている。

- 川崎市による太陽熱利用システムを設置している市民に対するアンケート調査²³（平成 23 年度調査 回答世帯：234 世帯）では、太陽熱利用システムの使用状況について、使用しているが 81%、使用していないが 19%であった。またその理由としては、「故障したまま修理をしていない」が 79%、次いで「メンテナンスが面倒」が 26%であった。

また、以下の点から、全国で見た退蔵の割合は、上記の調査結果よりも高いことがと推察される。

- 撤退したメーカーが多い。
- 家屋の空き家率は 13.1%²⁴ であるとともに、太陽熱利用システムでは 1980 年代の設置台数が多い。

(3) 施工業者での取扱実態

1) ユーザーから排出された背景

施工業者では、主に新製品との入れ替えに伴い、使用済太陽熱利用システムの取外しを行っている。新製品の設置に占める旧製品との入れ替えの割合は、9 割程度である²⁵。

また、新製品との入れ替え以外の使用済太陽熱利用システムの取り外し理由としては、製品の使用を止めたため、住宅のリフォームのためといった理由があり、取り外し全体に占める新製品との入れ替えの割合が約 9 割、その他の理由での取り外しが約 1 割となっている²⁵。

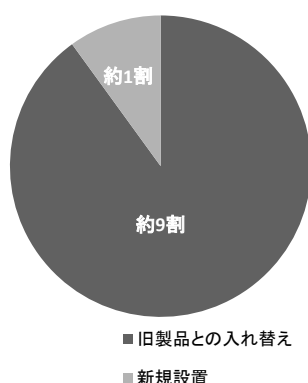


図 4-5 太陽熱利用システム設置時の状況²⁵

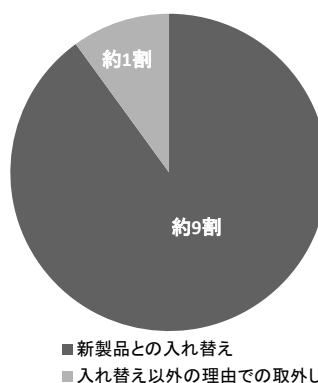


図 4-6 太陽熱利用システム取り外しの理由²⁵

²⁴ 総務省統計局 平成 20 年住宅・土地統計調査 (http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/10_1.htm)

²⁵ 太陽熱利用システムメーカーへのヒアリング調査より

2) 取扱量

施工業者では、使用済太陽熱利用システムとして、「施工過程において発生する機器・部品等」「修理過程において発生する機器・部品等」「取外しの過程で発生する機器・部品等」の取り扱いがある。3つの過程のうち、「取外しの過程で発生する機器・部品等」の取扱重量が最も多い²⁶。

太陽熱利用システムの設置実績は、4.6万台²²（平成24年）であるため、新製品の取り付けに占める入れ替えの割合9割を乗じて、使用済太陽熱利用システムの入れ替えに伴い施工業者から排出される台数は、約4.1万台（＝4.6万台×0.9）と推察される。

入れ替えによる排出台数約4.1万台から、施工業者から排出される使用済太陽熱利用システムの全体台数は、約4.6万台（＝4.1万台÷0.9）、入れ替え以外の理由での取り外し台数は、約0.5万台（＝4.6万台×0.1）と推察される。

3) 引渡先

使用済太陽熱利用システムは、「解体」「素材選別」後に引き渡している場合と「何も手を加えない」で引き渡している場合がある²⁶。

引渡先としては、「中間処理業者」が大部分を占め、そのほか「金属スクラップ業者」「最終処分業者」といった場合もある²⁶。

(4) 建物解体業者での取扱実態

1) 取扱状況

家屋の解体時に太陽熱利用システムが設置されている場合、太陽熱利用システムを撤去した後に家屋の解体を行う場合が大半を占めている²⁷。

- 建設リサイクル法では、床面積が80m²以上の建物解体では分別解体・再資源化等が義務付けられている。また、解体に占める80m²以上の建物が占める割合は94%²⁸（廃棄物量ベース）。
- 分別解体を行わない場合、混合廃棄物となり安定型処分場にて処分する必要があるため、処分費用が高くなる。そのため、床面積に関わらず、分別解体を行う建物解体業者が多いと考えられる²⁷。

2) 取扱量

過去3年間に太陽熱利用システムの取扱のあった建物解体業者は18%²⁹であった。また、建物解体業者からの使用済太陽熱利用システムの排出台数は年間3,000～6,000台程度³⁰と推察される。

²⁶ 太陽熱利用システム施工業者へのアンケート結果より

²⁷ 建物解体業者へのヒアリング調査より

²⁸ 国土交通省「建設リサイクル法の施行状況の点検について」

²⁹ 建物解体業者へのアンケート調査より

³⁰ 建物解体業者へのアンケート調査に基づく推計

3) 取り外し・解体の状況、引渡先

取り外し後の太陽熱利用システムは、①太陽熱利用システムを分解して素材ごとに引き渡す、②取り外した状態のままで引き渡す という概ね2つの場合に分けられる。事業者数ベースでは、①が約6割、②が約4割となっている²⁹。

建物解体業者では、太陽熱利用システムを特別に扱っているのではなく、他の解体時の発生物と同様に取り扱っている場合が大半であると推察される。

- ①太陽熱利用システムを分解して素材ごとに引き渡す場合は、金属スクラップ業者へ引渡される、中間処理業者へ引き渡されるという2つのルートが主なルートである。金属スクラップ業者へ引き渡されるものは、売却可能な分解した後の鉄・非鉄であり、中間処理業者へ引き渡されるものは、処理費用のかかる廃プラ・ガラスである²⁹。
- ②取り外した状態のままで引き渡す場合は、事業者数ベースで約7割が中間処理業者へ引き渡され、約2割は最終処分業者へ引き渡される²⁹。

(5) 太陽熱利用システムメーカーでの取扱実態

1) 取扱量

太陽熱利用システムメーカーで取り扱っている使用済太陽熱利用システムとしては、①工場の生産過程で発生した不良品、②点検等の目的で回収した施工不良の機器・部品がある。ただし、生産過程で発生する不良品、施工業者からメーカーに引き渡されるものはいずれも量的に少なく、多くは、施工業者が処理業者等へ引き渡している³¹。

2) 引渡先

太陽熱利用システムメーカーの引渡先に関する調査結果は以下のとおりであった。

- 使用済太陽熱利用システムは、素材選別後に引き渡している³¹。
- 引渡先として、「金属スクラップ事業者」「ガラスリサイクル事業者」「最終処分業者」「中間処理業者」の順に回答数が多い³¹。
- 「金属スクラップ事業者」へは、ポンプ・架台・銅管が売却されている²⁵。
- 「ガラスリサイクル事業者」へは、透過板が無償・あるいは処理費を払って引き渡されている²⁵。
- 「最終処分業者」「中間処理業者」へは、基板・グラスウール・樹脂管・ゴム製品・不凍液・発泡スチロール・ウレタンが処理費を支払って引き渡されている²⁵。

(6) ハウスメーカーでの取扱実態³²

ハウスメーカーがユーザーから太陽熱利用システムの修理に関する問合せを受けた場合、「ハウスメーカーが設備メーカーに連絡し、設備メーカーが修理を行う」という場合が最も多く、次いで、「ハウスメーカーが契約している取付け業者が修理を行う」というケースが多い。ハウスメーカー自身が修理を行うことはないという結果であった。

³¹ 太陽熱利用システムメーカーへのアンケート調査より

³² ハウスメーカーへのアンケート調査より

ハウスメーカーがユーザーから太陽熱利用システムの取外しに関する問合せを受けた場合、ハウスメーカーが契約している取付け業者が取外しを行う」というケースが多く、ハウスメーカー自身が取外しを行うことはないという結果であった。

ハウスメーカーがユーザーから太陽熱利用システムが設置された住宅の解体に関する問合せを受けた場合、ハウスメーカーが契約している建物解体業者が住宅の解体を行うというケースが多く、ハウスメーカー自身が、太陽熱利用システムが設置された住宅の解体を行うことはないという結果であった。

4.1.2 使用済太陽熱利用システムの撤去から処分までのコスト

(1) 施工業者における使用済太陽熱利用システムの取り外しコストの推定

施工業者へのアンケート調査結果によれば、使用済太陽熱利用システムの取り外しに要する述べ人数・取り外し時間の平均は、表 4-2 のとおりであった。

表 4-2 使用済太陽熱利用システムの取り外しに要する平均述べ人数・取り外し時間

機器の種類や作業環境	取外し作業の平均延べ人数・取り外し時間
自然循環型（大きな機器等を使用できる場合）	5.5 人・時間
自然循環型（大きな機器等を使用できない場合）	7.2 人・時間
強制循環型（大きな機器等を使用できる場合）	7.3 人・時間
強制循環型（大きな機器等を使用できない場合）	9.3 人・時間

平成 24 年度賃金構造基本統計調査によれば、廃棄物処理業者（企業規模計 10 人以上）のきまって支給する現金給与額は 290.5 千円/月、所定内労働時間数は 175 時間/月であり、時給に換算すると 1,660 円/時間となる。以上より、単純に上記の平均延べ人数・取り外し時間を乗じると 9,130 ～15,438 円と推計される。

(2) 建物解体業者における使用済太陽熱利用システムの取り外しコストの推定

建物解体業者へのアンケート調査結果によれば、使用済太陽熱利用システムの取り外しに要する述べ人数・取り外し時間の平均は 4.1 人・時間であった。平成 24 年度賃金構造基本統計調査によれば、廃棄物処理業者（企業規模計 10 人以上）のきまって支給する現金給与額（290.5 千円/月）及び所定内労働時間数（175 時間/月）であり、時間給に換算すると 1,660 円/時間となる。以上より、単純に上記を乗じると 6,806 円と推計される。

4.1.3 使用済太陽熱利用システムの撤去、運搬、リサイクル・処理に関する留意事項

実施したアンケート調査、ヒアリング調査を基に太陽熱利用システムの撤去、運搬・リサイクル・処理に関する留意事項を整理した。

表 4-3 太陽熱利用システムの撤去、運搬、リサイクル・処理に関する留意事項等

段階	作業工程	Ⅰ：安全の確保		Ⅱ：廃棄物の適正な処理の確保		Ⅲ：資源の有効利用の確保	
		想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策
撤去	太陽熱利用システムの確認（太陽熱利用システムの種類・サイズ・重量、架台の形状等の確認）	—	—	確認が不十分であったことによる不適正な処理	太陽熱利用システムの種類（自然循環式・強制循環式※1	—	—
	撤去作業現場の確認（設置場所、作業スペース・搬出ルートの確認）	作業場所の広さが不十分であったための事故	十分な広さの作業場所の確保	—	—	—	—
	足場・スライダの設置、安全対策等	墜落・転落	適切な足場、養生シートの設置。親綱・安全帯・保護帽等の使用	—	—	—	—
	不凍液の取り出し（強制循環式の場合）	—	—	不凍液の不適切な処理	太陽熱利用システム本体の撤去前に、不凍液を取り出し、容器に入れる。廃液処理業者者に処理を委託する。	—	—
	温水の取り出し	高温水による火傷	太陽熱利用システム本体の撤去前に、温水を取り出す。	—	—	—	—
	本体の取り外し	高温な集熱部による火傷	保護帽、グローブ、保護メガネ、作業着等の着用	—	—	—	—
	製品解体・分別※2	破損等によるけが	保護帽、グローブ、保護メガネ、作業着等の着用			資源価値の低下	適切な分別による資源の有効利用
運搬	廃棄物処理法に則った運搬・積替・保管の実施	—	—	—	—	—	—

段階	作業工程	Ⅰ：安全の確保		Ⅱ：廃棄物の適正な処理の確保		Ⅲ：資源の有効利用の確保	
		想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策	想定されるリスク	リスク回避策
リサイクル・処理	製品解体・分別※2	—	—	—	—	資源価値の低下	適切な分別による資源の有効利用
	金属リサイクル						
	廃棄物処理法に則った処理の実施	—	—	—	—	—	—

※1：過去に販売された強制循環式のごく一部では、熱媒にフロンを使用しているものがある。当該製品のメーカーはすでに撤退しており、現在はフロンを使用した製品は販売されていない。また、過去に販売された製品については、メーカーが HP にてメーカー紹介の案内を行うとともに、一般社団法人ソーラーシステム振興協会においても、問い合わせがあった場合には、メーカーの紹介を行っている。

※2：製品の解体・分別は、撤去現場で行われる場合とリサイクル・処理の段階で行われる場合がある。

表 4-4 使用済太陽熱利用システムの適切な分別方法

自然循環式	<貯湯部> ・ タンクを覆う外装材を固定するねじを外す ・ 保温材を外す ・ タンクを取り出す <集熱部> ・ 透過体と外装材を固定するねじを外す ・ 透過体を外す ・ 集熱体を取り出す
強制循環式	<貯湯部> ・ タンク等を覆う外装材を固定するねじを外す ・ ポンプ、配線等の部品を取り出す ・ 保温材を外す ・ タンクを取り出す <集熱部> ・ 透過体と外装材を固定するねじを外す ・ 透過体を外す ・ 集熱体を取り出す

4.2 太陽熱利用システムの素材構成調査・含有量試験・溶出試験

太陽熱利用システムのリサイクルや適正処分に関する製品特性を把握するため、次の調査・試験を実施した。

- 素材構成調査：
 - ✓ 有用資源や有害性の懸念がある物質の使用状況を把握する観点から、太陽熱利用システムメーカーへのアンケート・ヒアリング調査で代表的な機器の素材構成を把握した。加えて、実サンプルを対象に、部材毎の重量測定を実施するとともに、蛍光 X 線分析装置（ハンドヘルド XRF）により含有可能性がある物質のスクリーニングを実施。
- 含有量試験：
 - ✓ 有用資源や有害性の懸念がある物質の含有状況を把握する観点から、素材構成調査で含有可能性があるかと判断された物質の定量化のため、含有量試験を実施。
- 溶出試験：
 - ✓ 太陽熱利用システムが埋立処分された際の環境影響を把握する観点から、有害性の懸念がある物質の溶出試験を実施。

4.2.1 調査対象機器

調査対象とした太陽熱利用システムは以下の 3 点であり、いずれも一定期間使用後に撤去されたものとなっている。

表 4-5 調査対象とした太陽熱利用システム

番号	種類	メーカー	製造年
1	太陽熱利用システム（自然循環式）	A 社	不明
2	太陽熱利用システム（強制循環式）	B 社	2013
3	太陽熱利用システム（強制循環式）	C 社	1997 年以前

4.2.2 試料調製方法

太陽熱利用システムは大部分が単一素材の部材で構成されていると考えられることから、強制循環式(B 社)の基板以外の部材については素材構成調査(蛍光 X 線分析装置(ハンドヘルド XRF)を用いた簡易分析と重量測定)のみを行った。

強制循環式(B 社)の貯湯部から取り出した基板については、複合素材で構成されており、物質の含有や溶出を素材構成調査で把握することが困難であることから、含有量試験・溶出試験対象とした。なお、自然循環式の太陽熱利用システムには基板は含まれていなかった。

素材構成調査、基板の含有量試験及び溶出試験の試料調製方法を以下に示す。

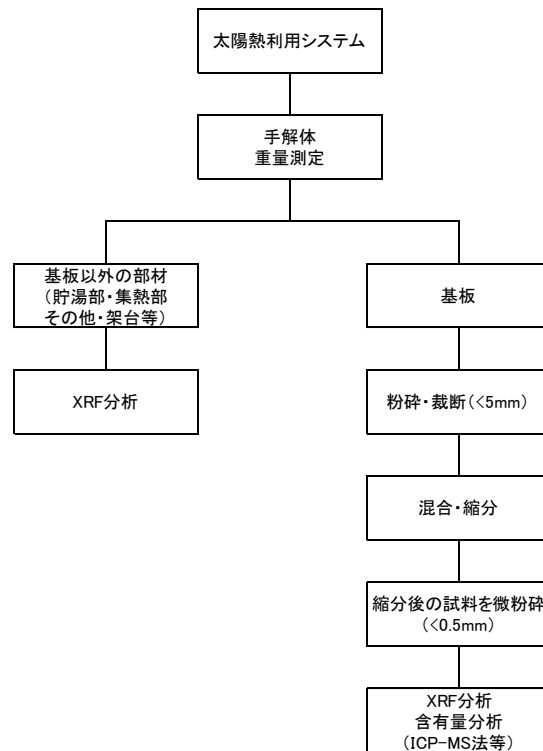
○素材構成調査（重量測定）

部位	試験対象	素材構成 重量測定
モジュール全量	全体	○
貯湯部各部材	個別	○
集熱部各部材	個別	○
その他各部材	個別	○

※各部材については手作業で可能な限り分解した。

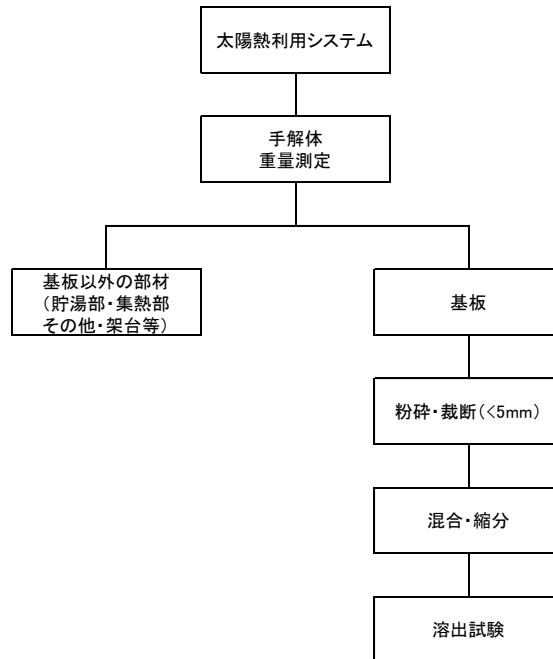
○含有量試験

部位	試験対象	含有量試験															
		XRF	Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te	Cu	Zn	Sn	Mo	Ga	Ag
貯湯部タンク	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
貯湯部外装材	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
貯湯部基板	個別	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
集熱部フィン	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
集熱部外装材	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
架台	個別	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



○溶出試験

部位	試験対象	溶出試験								
		Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr6+	Be	Sb	Te
貯湯部タンク	個別	－	－	－	－	－	－	－	－	－
貯湯部外装材	個別	－	－	－	－	－	－	－	－	－
貯湯部基板	個別	○	○	○	○	○	○	○	○	○
集熱部フィン	個別	－	－	－	－	－	－	－	－	－
集熱部外装材	個別	－	－	－	－	－	－	－	－	－
架台	個別	－	－	－	－	－	－	－	－	－



4.2.3 調査・試験方法

素材構成調査、含有量試験、溶出試験とも太陽光発電設備と同様の方法とした（詳細は 3.2.3 を参照）。ただし、含有量試験については、含有が想定されない項目を除いた以下の項目を分析項目とした。

鉛、カドミウム、ひ素、セレン、水銀、六価クロム、ベリリウム、アンチモン、テルル、銅、亜鉛、スズ、モリブデン、ガリウム、銀

4.2.4 調査結果

(1) 素材構成調査

1) 太陽熱利用システムメーカーに対するアンケート・ヒアリング調査

一般社団法人ソーラーシステム振興協会の協力のもと、太陽熱利用システムメーカー7 社に対して、製品の種別（強制循環式・自然循環式別）に素材構成・含有物質に関するアンケート調査・ヒアリング調査を実施し、製品の種別に代表的な製品としての素材構成・含有物質を整理した。

表 4-6 太陽熱利用システムの素材構成アンケート・ヒアリング調査結果（自然循環式）

1台あたりの重量 70 kg
1台あたりの容量 216.4 リットル
1台あたりの集熱面積 3.14 m²

部材		主な素材	その他素材	製品全体に占める当該部材の重量	1台当たりの総重量[単位: kg/台]	含有物質	含有箇所
貯湯部	タンク	ステンレス100%、プラスチック100%	一部ゴム等を含む	0.07	5.0	鉛、カドミウム、六価クロム	ビス、ボルト、ワッシャの表面処理剤
	断熱材	発泡スチロール100%orはウレタン100%		0.02	1.2		
	外装材	鉄100%、ステンレス100%	一部銅、アルミ、ゴムを含む	0.09	6.1	鉛、カドミウム、六価クロム	ビス、ボルト、ワッシャの表面処理剤
	ボールタップ	真鍮	プラスチック	0.00	0.2	鉛、カドミウム	真鍮
	タンク脚	発泡スチロール100%		0.00	0.2		
集熱部	フィン	ステンレス100%		0.08	5.9		
	透過板	ガラス100%		0.40	28.3		
	断熱材	発泡スチロール・グラスウール		0.00	0.2		
	外装材	鉄orステンレス	一部ゴムを含む	0.07	5.1	鉛、カドミウム、六価クロム	
その他	弁・配管	鉄、銅、真鍮、プラスチック	アルミ、その他	0.01	0.5	鉛、カドミウム	真鍮
	架台	鉄、アルミ	0	0.23	16.4		
	接続金具	ステンレス	0	0.01	0.8	六価クロム	ビス、ボルト、ワッシャの表面処理剤

表 4-7 太陽熱利用システムの素材構成アンケート・ヒアリング調査結果（強制循環式）

1台あたりの重量 100 kg
1台あたりの容量 275 リットル
1台あたりの集熱面積 3.98 m²

部材		主な素材	その他素材	製品全体に占める当該部材の重量割合	1台当たりの総重量[単位: kg/台]	含有物質	含有箇所
貯湯部	タンク	ステンレス100%		0.18	18.0		
	シスタンク	プラスチック100%		0.01	0.8		
	断熱材	グラスウール90～100%	ポリエチレン、フェノール樹脂	0.01	0.8		
	外装材	鉄100%あるいは鉄・塩ビ鋼板100%	一部ゴムを含む	0.22	22.3		
	センサー	複合素材		0.00	0.1		
	集熱ポンプ	鉄、アルミ、プラスチック、	銅、セラミック	0.01	1.1	鉛、カドミウム	はんだ
	基板	プラスチック等の複合素材		0.00	0.4	鉛、カドミウム	はんだ
	電線	プラスチック等の複合素材		0.01	0.8		
	弁・配管	鉄、銅、真鍮、プラスチック		0.05	5.3	鉛、カドミウム	真鍮
集熱部	フィン	アルミニウム100%		0.03	2.6		
	水管	銅100%or銅・真鍮100%		0.03	2.6	鉛、カドミウム	真鍮
	透過板	ガラス100%		0.12	11.6		
	断熱材	ポリウレタン100%orポリスチレン100%orグラスウール100%		0.01	1.0		
	外装材	鉄100%orアルミ100%orステンレス100%	一部真鍮、ゴムを含む	0.07	7.0	鉛、カドミウム	真鍮
その他	弁・配管	鉄、銅、真鍮、プラスチック	アルミ、その他	0.20	20.5		真鍮
	架台	アルミ100%、鉄100%		0.05	4.8		
	リモコン	プラスチック	鉄、ゴム、銅合金	0.00	0.2	鉛、カドミウム	はんだ

2) 使用済製品の解体・分析による素材構成調査

使用済製品の解体・分析による素材構成調査結果を以下に示す。なお、太陽熱利用システム（自然循環式）には、基板は含まれていなかった。

表 4-8 素材構成調査結果①（A 社太陽熱利用システム（自然循環式））

種類	メーカー	製造年	全量 (部品重量 総計) [kg]	貯湯部				集熱部				その他
				タンク	断熱材	外装材		フィン	透過板・ 集熱管	断熱材	外装材	
				ポリエチレン	発泡スチロール	めっき鋼板	ステンレス鋼板	ステンレス鋼板	ガラス	発泡スチロール	めっき鋼板	
自然循環式	A社	不明	108.38	9.16	2.24	6.30	9.80	30.40	28.52	0.72	18.80	2.44
			100.0%	8.5%	2.1%	5.8%	9.0%	28.0%	26.3%	0.7%	17.3%	2.3%

※集熱部各重量は2枚分の合計

表 4-9 素材構成調査結果②（B 社太陽熱利用システム（強制循環式））

種類	メーカー	製造年	全量 (部品重量 総計) [kg]	貯湯部							集熱部			
				タンク	外装材	金具	基板	電線	弁・配管	その他 部品	フィン	透過板	断熱材	外装材
				ステンレス	鉄	鉄	—	—	銅	—	ステンレス	ガラス	グラスウール	鉄
強制循環式	B社	2013	141.44	31.10	17.98	2.92	0.36	0.92	2.42	7.50	17.72	33.56	1.72	25.24
			100.0%	22.0%	12.7%	2.1%	0.3%	0.7%	1.7%	5.3%	12.5%	23.7%	1.2%	17.8%

※貯湯部その他部品は水道減圧弁、循環ポンプ、タンク。集熱部各重量は2枚分の合計

表 4-10 素材構成調査結果③（C 社太陽熱利用システム（強制循環式））

種類	メーカー	製造年	全量 (部品重量 総計) [kg]	貯湯部								集熱部			架台	その他
				タンク	断熱材	外装材	基板	電線	弁・配管	金具	その他 部品	フィン	水管	外装材	架台	金具等
				ステンレス	グラスウール	鉄	—	—	銅	鉄	—	アルミニウム	銅	鉄	鉄	—
強制循環式	C社	(1997年以前)	101.03	25.50	3.36	21.70	0.58	2.22	6.76	6.08	11.98	4.35	0.93	9.44	5.22	2.9
			100.0%	25.2%	3.3%	21.5%	0.6%	2.2%	6.7%	6.0%	11.9%	4.3%	0.9%	9.3%	5.2%	2.9%

※貯湯部その他部品は水道減圧弁、循環ポンプ、フロンタンク

3) 素材構成調査結果のまとめ

1) 太陽熱利用システムメーカーに対するアンケート・ヒアリング調査及び 2) 使用済製品の解体・分析による素材構成調査結果から、自然循環式・強制循環式の素材について以下に整理した。

a. 自然循環式

- 資源性等について
 - 貯湯部タンクについては、ステンレスあるいはプラスチックの単一素材でできており、ステンレスの場合は金属リサイクルが可能である。
 - 貯湯部外装材についても、鉄またはステンレス等の金属でできており、金属リサイクルが可能である。
 - 集熱部フィンについては、金属であり、金属リサイクルが可能である。
 - 集熱外装材についても、鉄またはステンレス等の金属でできており、金属リサイクルが可能である。ただし、一部ゴムでできている部分もあることに留意が必要である。
- 有害性等について
 - ボールタップの金属部分は真鍮でできているため、鉛を含んでいることが確認された。

b. 強制循環式

- 資源性等について
 - 貯湯部タンクについては、ステンレス等の金属でできており、金属リサイクルが可能である。
 - 貯湯部外装材についても、鉄等の金属でできており、金属リサイクルが可能である。
 - 集熱部フィンについては、アルミニウム・鉄等の金属であり、金属リサイクルが可能である。
 - 集熱部外装材についても、鉄等の金属でできており、金属リサイクルが可能である。ただし、一部ゴムでできている部分もあることに留意が必要である。
 - 配管については、銅のみでできているものもあり、金属リサイクルが可能である。
 - 架台については、アルミニウム・鉄等の金属であり、金属リサイクルが可能である。
- 有害性等について
 - 基板は、複合素材で構成されており、蛍光X線分析より、臭素を含んでいることが確認された。
 - 基板ボックスは、プラスチック等で構成されており、蛍光X線分析より、臭素・アンチモンを含んでいることが確認された。

(2) 含有量試験

太陽熱利用システム（強制循環式）の基板の含有量試験の結果から、鉛とすずの含有が確認された。これははんだに由来するものと考えられる。また、銅の含有も確認されている。

表 4-11 含有量試験結果（太陽熱利用システム（強制循環式）の基板）

種類	メーカー	製造年	部位	単位:mg/kg							
				Pb 鉛	Cd カドミウム	As ひ素	Se セレン	T-Hg 水銀	Cr ⁶⁺ 六価クロム	Be ベリリウム	Sb アンチモン
基板	B社	2013	基板	17000	4	1	<1	<1	<0.5	<1	93
				Te テルル	Cu 銅	Zn 亜鉛	Sn すず	Mo モリブデン	Ga ガリウム	Ag 銀	
				5	77000	3300	12000	3	<1	85	

1~100mg/kg
100~1000mg/kg
1000~10000mg/kg
10000mg/kg~

(3) 溶出試験

太陽熱利用システム(強制循環式)の基板の溶出試験では鉛が検出された。

参考基準値である燃え殻・ばいじん・鉱さい・汚泥等についての廃掃法による特別管理産業廃棄物の判定基準を超過しているが、同基準は汚泥等を対象にした埋立基準であり、そのまま基板に適用されるものではない。実際の処分形態や最終処分量等を考慮した上で、廃棄物処理法に基づく適正処分が担保されていれば、特別な配慮等は必要ないと考えられる。

表 4-12 溶出試験結果（太陽熱利用システム（強制循環式）の基板）

種類	メーカー	製造年	単位:mg/L								
			Pb 鉛	Cd カドミウム	As ひ素	Se セレン	T-Hg 水銀	Cr ⁶⁺ 六価クロム	Be ベリリウム	Sb アンチモン	Te テルル
基板	B社	2013	1.2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

5. 風力発電設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討

5.1 風力発電設備のリユースに関する基礎情報

5.1.1 風力発電設備のリユース形態と市場ニーズ

風力発電設備（以下、風車とする）のリユース形態としては、表 5-1 に示す 3 種類が想定される³³。

表 5-1 風車のリユース形態と市場ニーズ

リユース形態	概要	想定される市場ニーズ
(ア) 風車単位 	何らかの理由で、設計寿命前・故障前に使用済となった風車を、他の場所に移設し、風車ごと再利用する。	- 高価な新品風車購入のための資金調達が困難なため、あるいは高価な新品風車では採算が合わないため、安価な中古風車を購入したい - 広大な土地があり、高価な新品風車よりも、安い中古風車を多く設置した方が事業採算性がよい
(イ) 部品 ³⁴ 単位  ドライブレイン部 ナセルベース部	何らかの理由で、設計寿命前・故障前に使用済となった付加価値の高い部品（増速機、発電機等）を、他の風車で再利用する。	- 事業期間数年を残して部品が故障した場合、高額な新品の増速機や発電機では採算が合わないため、安価な中古部品を購入したい - 調達期間が数か月かかる場合、その間発電を停止することから事業収益に大きな損失を与えるため、すぐに調達できる中古部品があれば購入したい
(ウ) 部材 ³⁵ 単位 	何らかの理由で使用済となった部品を構成する、軸受、ボルト、歯車等の部材を、他の風車で再利用する。	新品を購入するよりも、他の故障部品内の部材を用いて安価に修理したい

出所）事業者へのヒアリング調査より取りまとめ

風車単位のリユースとしては、何らかの理由で設計寿命前・故障前に使用済となった風車を撤去し、他の場所に移設して風車ごと再利用する形態が想定される。この際の市場ニーズとしては、高価な新品風車を購入する資金能力がない個人や団体、中小企業などが、安価な中古風車を購入するケースが想定される。また、立地や資金調達等の制約から数機しか導入出来ず、スケールメリットが出ないために高価な新品風車では採算が合わない場合に、中古風車を購入するケースなどが考えられる。

部品（増速機や発電機等、複数の部材により構成される機器）単位のリユースとしては、何らかの理由で、設計寿命前・故障前に使用済となった付加価値の高い部品（増速機、発電機等）を、他の風車で再利用する形態が想定される。この際の市場ニーズとしては、事業期間（一般に 20 年間）を数年だけ残して、高額な増速機や発電機が故障した場合に、新品の購入では採算が取れな

³³ 本報告書では、一度使用された製品を「中古品（部品）」、中古品のうち修繕・メンテナンスを施してリユース可能な状態にしたものを「リビルド品（部品）」と定義する。

³⁴ 本報告書では、部品：増速機や発電機等、複数の部材により構成される機器と定義する。

³⁵ 本報告書では、部材：部品を構成するパーツ（軸受、歯車、ブレーキ、シリンダー等）と定義する。

いため、安価な中古部品の購入を希望するケースが想定される。また、部品によっては、新品の調達するために2～3ヶ月を要する場合があります、事業収益に大きな損失を与えることから、すぐに調達できる中古部品の購入を希望するケースが考えられる。

部材単位のリユースとしては、何らかの理由で使用済となった部品を構成する、軸受、歯車、ブレーキ、シリンダー等の部材を、他の部品の修理時に利用する形態が想定される。この際の市場ニーズとしては、新品を購入せずに、中古部材を用いることで安価に修理を行うケースなどが考えられる。

5.1.2 部品・部材のリユースの概況

風車の主要構成要素としては、タワー、ナセル、ブレード、電機機器等が挙げられる。表 5-2 に風車の主要構成要素と中古品利用のニーズ・現状について示す³⁶。

事業者へのヒアリング調査によると、基本的にはほぼ全ての部品についてリユースの可能性がある、中古品の発生時期と需要側のニーズが合致すれば、事業者の個別の状況に合わせて市場で取引されているとのことであった。また、部品メーカーの生産中止等により、新品の調達が不可能な場合は、中古品を調達せざるを得ず、保証契約期間内であればメーカー、それ以外は事業者の責任のもとで、中古品（リビルド品）が利用されているとのことであった。

表 5-2 風車の主要構成要素と中古品利用のニーズ・現状

部品・部材		中古品利用のニーズ・現状
ナセル	増速機	高価かつ風車の設計寿命（約 20 年）の中で 2～3 回修理が必要とされること、新品の調達に数ヶ月要する場合があること等から、安価で短期間に調達できれば、中古品の利用ニーズが高い。海外では最大の中古部品市場を形成。
	発電機	高価であり、新品の調達に数ヶ月要する場合があること等から、安価で短期間に調達できれば、中古品の利用ニーズが高い。
	電機機器（制御系機器、モーター、変圧器等）	比較的成本が高く、修理・修復が必要となる電機機器の中古品利用ニーズが高い。
	部材（軸受、歯車、ブレーキ、シリンダー等）	モーターのブレーキや、油圧装置のシリンダーなど、特に小型部品内の部材について、中古品利用のニーズ・事例がある。
	その他部品・部材	中古品の発生時期と需要側のニーズが合致すれば、基本的にはどの部品であっても、中古品利用のニーズは存在。事業者の個別の状況に合わせて市場で取引されている。
ブレード		台風や落雷等により最も損傷を受けやすく、使用不能になるまで修繕を繰り返すのが一般的であるが、調達に時間を要すること等から、中古品利用の事例がある。
タワー		輸送コストがかかることから現地調達にメリットがあり、遠方から中古品を取り寄せるより、近くで新品を購入の方が安価である可能性が高い。

出所) 事業者へのヒアリング調査より取りまとめ

³⁶ 本節については、主に国内外事業者へのヒアリング調査結果により取りまとめている。

(1) ナセル内部品・部材

風車を構成する部品の中でも、最も中古品利用ニーズが高いのはナセル内部品であり、海外では増速機、発電機、電気機器（制御系機器、モーター、変圧器等）の中古品市場が形成されている。

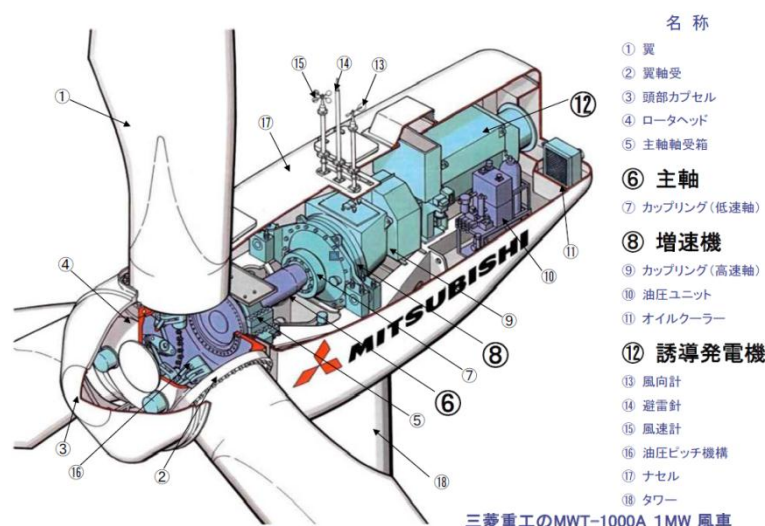


図 5-1 ナセルの部品構成

出所) 三菱重工業（株）『風力発電における永久磁石利用の動向』（2011, 第 6 回産総研レアメタルシンポジウム資料）

1) 増速機・発電機

増速機は、新品で 2,000～3,000 万円³⁷と高額であり、風車の設計寿命（約 20 年）の中で 2～3 回修理が必要とされることが、新品の調達に数ヶ月要する場合があること等から、最も中古品の利用ニーズが高い部品となっている。海外では最大の中古部品市場を形成しており、増速機の中古販売・修理の専門業者が存在している。海外からの輸送コストを加味しても、新品に対する中古品のコストメリットが出る場合があり、特に新品の調達期間が数ヶ月必要となる場合には³⁸、短期間で調達できる中古の増速機の付加価値は高くなる。なお増速機は、遊星ギアやその周辺部品が壊れている場合、中古品としての価値はほとんどなくなる可能性があり、メンテナンス・修繕の実施状況により、中古品としての利用可否や価値が大きく変わってくる。

発電機は、増速機と比較すると故障頻度は低い、高価であり、新品の調達に数ヶ月要する場合があることから、増速機と同様に中古品の利用ニーズが高い部品の一つである。

2) 電気機器

電気機器については、比較的成本が高く、一定頻度で修理が必要となる電機部品・ユニットの中古品利用ニーズが高い。ヨー制御機器、ピッチ制御機器等の制御系機器が代表例で、新品は

³⁷ 2～3MW 風車の場合。事業者へのヒアリング調査より。

³⁸ 例えば日本に設置されている海外製風車の場合、保証契約上、メーカー担当者による故障原因の調査・特定をした上で新品部品・部材を取り寄せることから、新品部品・部材の取り寄せに 2 か月以上を要する事例も存在する。

数百万の投資となることから、安価な中古品を購入する事例が多い。また、高価な大型電機部品に限らず、例えば高級風況計測器のように、新品で購入すると 50 万円を超える小さい電機部品についても、中古品のニーズがあり、市場で取引されている。

3) 部材

中古部材については、今回の調査では利用状況に関する情報は多く得られなかったものの、モーターのブレーキや、油圧装置のシリンダーなど、特に小型部品内の部材について、中古利用のニーズ・事例が確認された。

(2) ブレード

ブレードは、台風や落雷等により最も損傷を受けやすく、使用不能になるまで修繕を繰り返すのが一般的であるが、調達に時間を要することや運搬コストがかかることから、安価に調達できる場合、中古品利用のメリットがある。海外では、リパワリングの際に、撤去した風車のブレードが近隣の風車に再利用されている事例がある。また、国内においても、新品のブレードを購入したかったものの、同型のブレードをメーカーが生産しておらず、中古品を手配して対応した事例が確認された。

(3) タワー

タワーは輸送コストがかかることから現地調達にメリットがあり、遠方から中古品を取り寄せるより、近くで新品を購入する方が安価である可能性が高い。

なお、日本においては、旧建築基準法のもとで設置されたタワーは、新建築基準法のもとでは移設することが出来ない。これは旧建築基準法のもとで建設された風車は IEC 規格に適合しているが、改正建築基準法では JIS 規格への適合が求められており、国際認証を取得した風車であっても JIS 規格に適合していなければ、タワー・基礎の移設は認可されないためである。

5.1.3 海外のリユース動向

欧州や米国では、中古風車および中古部品の市場が形成されている³⁹。

(1) 中古風車のリユース動向

欧米では、寿命前の中小型風車（数百 kW）が大型風車（2～3MW）に一斉にリプレースされた際に、大量の中古風車が発生し、中古市場が形成された。欧州ではデンマークやドイツなどが中古風車を多く輸出しており、仲介業者を通して安く風車を購入したい事業者や個人に販売されている。中古風車の販売先としては、欧米に限らず、ベトナム、中南米、東欧（ルーマニア、ブルガリア、ポーランド等）、トルコ等が挙げられ、中古風車の国際市場が存在している。

寿命前の中小型機が大型機にリプレースされた要因として、風車の技術開発に伴う、風車サイズの急激な大型化が挙げられる。図 5-2 に示す通り、風車のサイズは 1990 年代後半から急激に大型化が進んでいる。ここ 20 年で最新機種が発電容量は 7MW、現在設置されている陸上風車の平均サイズは約 2MW まで大型化しており、風車 1 本あたりの年間発電量が増加している⁴⁰。一般に風車の設計寿命は 20 年であるが、寿命前であっても中小型風車を所有するよりは、大型風車にリプレースした方が事業採算性がよい状況となったことが、寿命前の中古型風車が大量に市場に出回る大きな要因となった。

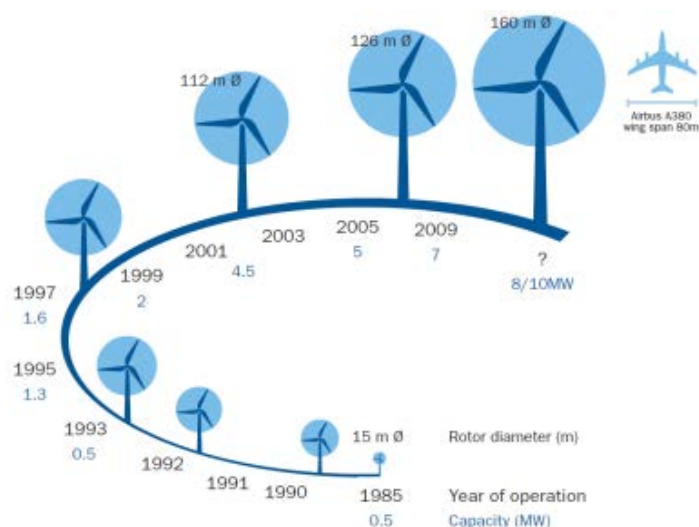


図 5-2 世界の風車の大型化の推移

出所) “Wind Energy Factsheets 2010” (2011, EWEA)

中古風車は、数百 kW クラスのものが主流であるが、近年では 1MW 以上の大型風車も中古市場に出回り始めている。

中古風車の取扱い業者は、専門販売業者、およびサービス会社の中古販売部門・子会社の 2 種類が主流となっている。中古風車の専門販売業者としては、オランダの Windbrokers⁴¹が大手に挙

³⁹ 本節については、主に国内外事業者へのヒアリング調査結果により取りまとめている。

⁴⁰ 風の持つ運動エネルギーは風を受ける面積に比例し、風速の 3 乗に比例して増大する性質を持っており、理論的には風速が 2 倍になると風力エネルギーは 8 倍になる。従って、より多くの発電量を得るためには、風の強い場所に設置すること、大きい翼で効率よく風を受けることが重要となる

⁴¹ Windbrokers 社ウェブページ (<http://www.windbrokers.com/>)

げられる。Windbrokers は自社ウェブページにて、中古品のリストや、直近の販売実績を公開している（図 5-3）。販売方法としては、管理コストに見合わないため在庫は抱えない場合が多く、先物取引となるのが一般的である。中古風車の入手時期・納入スケジュールも契約内容に含まれている。



Vestas V52 - 850

READY FOR SHIPMENT!

- Inspected by Germanischer Lloyd before dismantling
- dismantled in July 2013
- stored at Wind Turbine Trade Centre (WTTC) Harlingen port, NL
- tower is mainly new, stored in Galicia, Spain.
- 24 months insured product warranty.

Specification

Type:	Vestas V52 - 850
Quantity:	1 unit
Generator capacity:	850 kW
Rotor diameter:	52 m
Swept area:	2.124 m ²
Power control:	Pitch control
Hub height:	65 m
Voltage / grid frequency:	690 Volt / 50 Hz
Initial commissioning :	2004

→ REQUEST OFFER

図 5-3 中古風車の販売事例（蘭 Windbrokers 社）

出所）Windbrokers ウェブページ

中古風車の販売価格は、メンテナンス状況、保証の有無により異なる。Windbrokers 社のように、保険会社を活用して 1～2 年間の保証をつけている事業者も存在するが、メンテナンスせずに、保証無しで販売されている事例も多い。メンテナンスサービス会社の中古販売部門・子会社は、メンテナンスをした後に販売している事例が多いと考えられる。

（2）中古部品・部材のリユース動向

欧米は風車市場が大きく、かつプラントあたりの基数が多いことから、同じ地域に同一機種が大量に存在しており、互換性のある部品が一定地域に一定数量で回るなど、中古部品市場が成立しやすい条件が揃っている。

機械系部品では、風車の設計寿命約 20 年の中で、2～3 回修理が必要になるとされている増速機が最大の市場となっている。一般的に、増速機は 1 年の保証付きで販売されている。また、5.1.2 節に整理したニーズに基づき、発電機、電気機器についても、中古品が取引きされている。ナセルごと中古品として販売されることもある（図 5-4）。

なお、今回の調査では、部材単位の中古市場の状況については、具体的情報は得られなかった。



(Nordex 1MW 機ナセル)



(Vestas 1.65MW 機制御装置)



(Micon 750kW 機ブレード)



(Micon 2MW 機タワー)

図 5-4 中古部品の販売事例

出所) Green-Ener-Tech Denmark ウェブページ

中古部品を取扱っている業者は、メーカー系、独立修理サービス会社、又はメンテナンスサービス会社の増速機修理部門・子会社などが挙げられる。増速機とブレードについては、専門の修理サービス業者も存在している（表 5-3）。

欧州には風車のメンテナンスを主要業務とするメンテナンスサービス会社が数十社存在しており、同業者間でアライアンスを組んでいる。欧州では、GE や Vestas 等の風車メーカーの OB が、風車のメンテナンスサービス会社のエンジニアとして働いており、得意なメーカー・機種に合わせて各社で人員を融通し、顧客のニーズに合わせたメンテナンス事業を展開するとともに、中古部品利用のノウハウを蓄積している⁴²。

⁴² 事業者へのヒアリング調査より。

表 5-3 中古風車ビジネスの業種

風車・部品種類	業種
中古風車	・ 専門再販業者 ・ メンテナンスサービス会社の中古販売部門・子会社
増速機	・ メーカー系 ・ 独立修理サービス会社 ・ メンテナンスサービス会社のギアボックス修理部門・子会社
その他電気機械・機器	・ メーカー系 ・ メンテナンスサービス会社の修理部門・子会社
ブレード	・ メーカー系 ・ 独立修理サービス会社 ・ メンテナンスサービス会社のブレード修理部門・子会社

出所) 事業者へのヒアリング調査より取りまとめ

5.1.4 国内のリユース動向

我が国においても、過去に欧州の中古風車を輸入していた事業者が存在していたが、現在は中古風車の流通に係る事業は確認されていない。国内中古市場が形成されない要因としては、我が国の風車市場は欧米と比較して小さく、導入が本格化したのは 2000 年代以降であることから、市場を形成するに十分な量の中古風車および中古部品が存在しないことが挙げられる。また、プラントあたりの設置数が少ないため、一定地域内に同一機種の同一部品が存在しないことも、中古市場が形成されにくい要因となっている。このような状況から、我が国においては、欧米のような風車専用のメンテナンス事業者は極めて少ない状況にある。

日本の大手発電事業者は自社でメンテナンス体制を整えており、メンテナンス・修繕用に大型部品の予備品を保有し、故障時には予備品に取り換え、故障した部品は修繕して再度別の風車に利用している⁴³。増速機や発電機などの主要部品は、メンテナンス・修繕を繰り返し、利用出来なくなるまで使用するのが通常であり、中古部品として市場に出回る例は少ない。

中小の発電事業者や、本業とは別に風車を所有する事業者・個人は、メーカーにメンテナンスも含めて発注している事例が多いと考えられる。メーカーがメンテナンスする場合は、品質保証の観点から、故障部品は新品に取り換える場合が多いと推察され、中古部品の利用ニーズは低いと考えられる。

上記に示す市場環境により、すぐには、国内中古市場は立ち上がらないことが予想されるが、国内の発電事業者へのヒアリング調査では、先に取りまとめた市場ニーズにより、安く短期間で入手可能な中古部品があれば、利用意向があるとの回答を得ている。また、風車の設計寿命を踏まえると、今後数年の間に 1990 年代初期に設置された数百 kW クラスの風車の建替え・廃棄の時期を迎える可能性があり、我が国においても中古風車・部品のリユース事例が増加する可能性がある。

⁴³ 事業者へのヒアリング調査より。

5.1.5 リユースを想定した解体手順・留意事項

(1) 一般的な風車の解体手順

風車および部品・部材のリユースを想定した場合、解体作業は丁寧に、各部品を損傷することなく実施する必要がある。基本的には設置手順の逆順となり、ローター（ハブ・ブレード）、ナセル、タワーの順に、慎重に解体作業が実施される（図 5-5）。ナセル内部品（増速機、発電機、その他電気機器）は、ナセルごとタワー上から下ろした後に、部品別に解体するのが一般的と考えられる。



（ローターの取外し）



（ローター・ナセルの解体）



（ナセルの取外し）



（タワーの解体・運搬）

図 5-5 風車の解体事例

出所）Green-Ener-Tech Denmark ウェブページ

風車を設置したまま、部品を単体で解体する場合は、ナセルカバーの上部（ナセルルーフ）を取り外した後に、クレーンを用いて各部品を取り外す手順が取られる（図 5-6、図 5-7）。発電機、および電気機器（制御系機器、モーター、変圧器等）については、単体で比較的容易に取り外せる場合が多い。増速機については、機種によってはローターごと取り外す必要がある。ブレード

についても、機種により、ブレード単体で取り外せるものと、ローターごと取り外す必要があるものの両方があり、それぞれに工事手順が異なってくる。

ベスタス製風車など、機種によっては、大型部品をタワーの中からクレーンで下ろすことができる設計の風車もあるが、現在は大型クレーンを用いた作業が主流となっている。

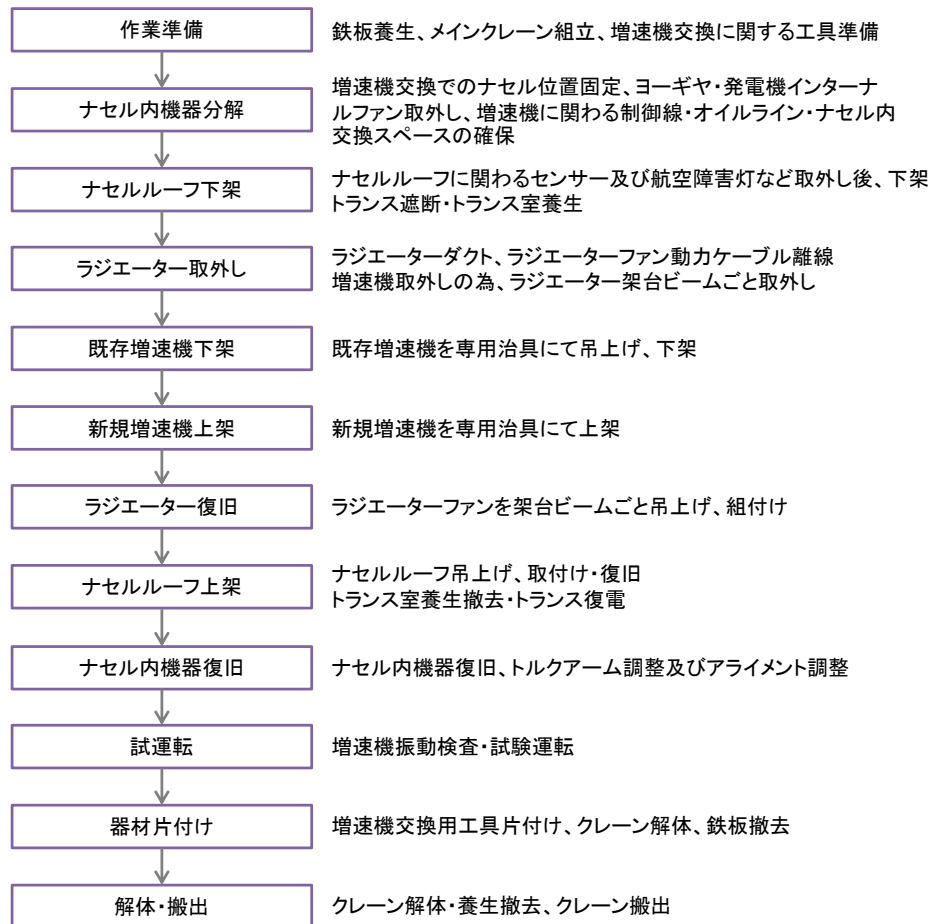


図 5-6 増速機交換工事の手順事例

出所) 事業者提供資料



(ナセルルーフの取外し)



(増速機、発電機の取外し・搬入)

図 5-7 ナセル内部品の解体事例

出所) 事業者提供資料

ナセル内部品の解体手順や、必要となるクレーン・重機的能力は、増速機の有無や発電機方式、機種の種類により大きく異なる。

増速機付き・誘導発電機方式の場合、増速機で回転数を上げることから発電機サイズは小さくなり、ナセルサイズ、重量ともに小さくなる。一方、ギアレス・同期発電機方式の場合、発電機の極数を増やす必要があることから、発電機の直径が大きくなり、ナセルサイズ、重量ともに大きくなる。風車の形式に合わせた適切な解体計画、クレーン・重機の手配が重要となる。



図 5-8 100kW 風車のナセル内構造の比較
(左：増速機付き／誘導発電機、右：ギアレス／永久磁石式発電機)

出所) 左：TEMBRA 社ウェブページ、右：三菱総合研究所撮影

(2) 小型風車（100kW）の解体事例

小型風車（100kW、ギアレス／永久磁石式同期発電機式）⁴⁴の解体試験結果概要を次表に示す。

解体にあたっては、作業工程によって、1 名～5 名程度の手が必要であり、合計所要時間は、10.75 時間（21.875 時間・人）であった。なお、今回は、リユースを想定した場合の解体試験を実施しており、リユースを想定しない場合は、解体方法が異なる点に留意が必要である。

⁴⁴ 本調査では、環境省の浮体式洋上風力発電実証事業で使用されていた 100kW 試験機（増速機なし（ギアレス）／永久磁石式同期発電機）を用い、解体試験・素材構成調査・含有量調査を実施した。

表 5-4 小型風車（100kW）解体試験結果の概要（リユースを想定した場合）

品目	100kW 風車		
			
解体実施日	2014年1月9日(木)・2014年1月13日(月)・2014年1月15日(水)		
解体部品・解体手順 及び所要人数・時間	2014年1月9日解体作業内容		
	①ナセルカバー取り外し	2名	1時間
	②油圧ユニット取り外し	2名	0.5時間
	③主軸ブレーキ装置(油圧)取り外し	2名	0.5時間
	④ピッチ制御装置ナセル強電ユニット盤取り外し	1～2名	0.25時間
	⑤冷却装置取り外し	1～2名	0.25時間
	⑥ピッチ制御装置取り外し	2名	0.75時間
	⑦風車制御装置ナセルサブユニット盤取り外し	1～2名	0.25時間
	⑧ヨーモーター取り外し	1～2名	0.25時間
	⑨主軸受固定ボルト取り外し	1名	0.75時間
	⑩発電機ユニット外側カバー取り外し	1名	1時間
	2014年1月9日解体合計所要時間		5.5時間
	2014年1月13日解体作業内容		
	⑪発電機ユニット取り外し	4～5名	1.25時間
	⑫主軸・主軸受取り外し	2～3名	0.25時間
	2014年1月13日解体合計所要時間		1.5時間
	2014年1月15日解体作業内容		
	⑬主軸受から主軸の取り外し	2～3名	0.75時間
	⑭ディスクブレーキ取り外し	2名	0.5時間
	⑮架台からナセルカバー下部取り外し	1名	0.25時間
	⑯電力ケーブル取り外し	1名	0.75時間
	⑰発電機から固定子取り外し	2名	1.5時間
	2014年1月15日解体合計所要時間		3.75時間
	合計所要時間		10.75時間

5.1.6 解体時の留意事項

(1) 使用工具・設備

風車の解体には、機種ごとに専用の治具が必要となる。これらはメーカーが独自に保有している場合が多く、事業者が独自に解体を行う際の課題となっている。また、風車の各部品（ブレード、ハブ等）を吊り上げる際の、バランスを保つための適切な吊り位置の確認も必要となるが、メーカーのみが把握している場合が多く、治具の手配と合わせて検討が必要となる。

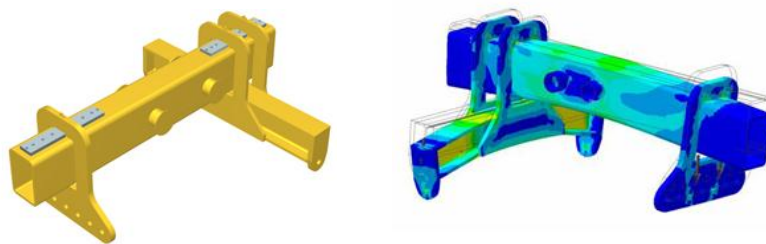


図 5-9 風車の組立て・吊り上げ用治具の例

出所) TEMBRA 社ウェブページ



図 5-10 専用治具を用いたローター・ブレードの吊り上げ作業の様子

出所) 事業者提供資料

(2) 油漏れの防止

ナセル内部品は、油圧装置や変圧器等に油が多く含まれているほか、軸受にはグリースが大量に使用されていることから、油漏れに注意する必要がある。また、軸受などグリースが多く含有されている部品についても、取扱いに注意が必要であり、油やグリースは、あらかじめ抜いてから解体作業を実施することが望ましい。

油・グリースが多く含まれる主要部品としては、以下が挙げられる。

- 油圧ユニット
- 主軸受
- 変圧器

- モーター
- ピッチ制御装置

(3) 残留ガス等の確認

解体作業にあたっては、作業者の安全を確保し、事故の防止に十分注意する必要がある。

また、油圧ユニットのアクチュエーターやピッチ制御装置など、窒素ガスが含まれる可能性のある部品については、破裂事故が起きないように、ガスの残留状況を確認し、事前にガスを放出した上で取り外す必要がある。

5.1.7 我が国の風力発電設備のリユースに係る課題

我が国の風車のリユースに係る課題として以下が挙げられる。

(1) 中古品の品質に係る課題

中古風車や中古部品は、トレーサビリティがなく使用履歴やメンテナンス・修繕履歴が分からないことに加え、外見では疲労の度合いは分からず、どの程度疲労が蓄積されているか評価出来ない状況にある。現在はメンテナンス事業者が独自の判断で品質保証を行っているが、中古品の品質管理・評価をどのように行うかが課題の一つに挙げられる。

欧州では、中古風車の多くは保証無し販売されているが、保険会社を活用して1～2年間の保証をつけている事業者も存在する。同様に、国内の事業者においても、保険会社と連携して1年間の保証をつけている事例が存在する。

(2) 技術者不足の課題

風車は同じ機種でも製造年などが違えば異なる部品を使用しているケースが多く、国内の風車（1,700～1,800 台）だけでも、発電機と増速機の組み合わせで、約 300 種類くらいのパターンが存在する⁴⁵。また、発電機は種類が多く、周波数の違いもある。従って、中古部品を利用する際には、所有する風車に取り付け可能かどうかの目利き能力、正規品とは異なる部品を取り付ける技術を持った技術者が必要となる。

また、中古品の品質は、稼働時の運用状況に大きく左右されるため、日頃から適切なメンテナンス・修繕を実施することが非常に重要となる。一人の作業員がメンテナンスできる風車の数は、2MW 風車の場合には年間 3 基程度であり、国内の風車（1,700～1,800 基）を管理するためには 700 名ほどの専門的なメンテナンス要員が必要になるが、現状では 300 人程度にとどまるとされている⁴⁶。風車の健全な運用も含めて、メンテナンス要員の育成が重要となる。

(3) 建築基準法上の課題

現状我が国においては、旧建築基準法の元で設置されたタワーは、新建築基準法の元では移設することが出来ず、実質的にタワーのリユースが出来ない状況にある。これは旧建築基準法のも

⁴⁵事業者へのヒアリング調査より。

⁴⁶ 事業者へのヒアリング調査より。

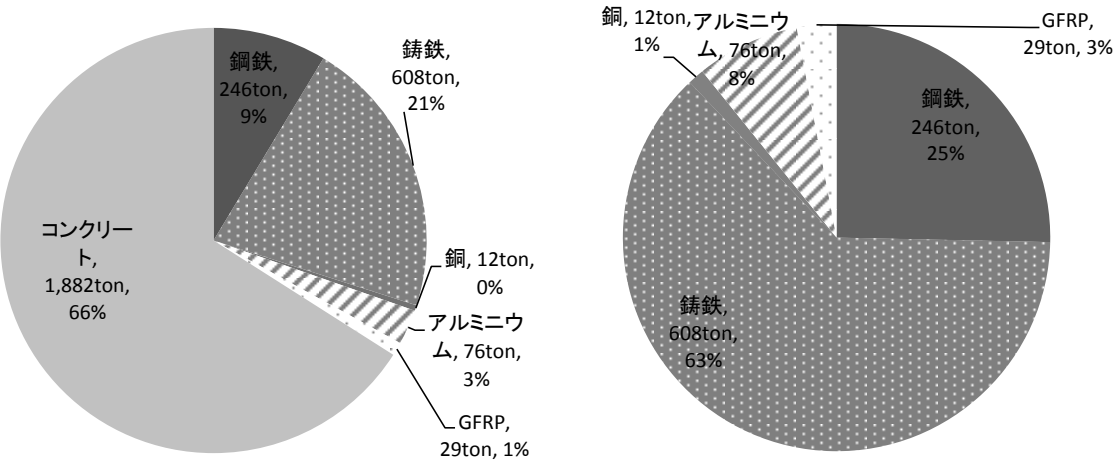
とで建設された風車は IEC 規格に適合しているが、改正建築基準法では、「建築物の主要構造部等に使用する鋼材等について、その品質が国土交通大臣の指定する日本工業規格（JIS）等に適合するもの又は国土交通大臣の認定を受けたものでなければならない」とされており、国際認証を取得した風車であっても JIS 規格に適合していなければ、タワー・基礎の移設は認可されないためである。現在、平成 24 年 4 月に閣議決定された「エネルギー分野における規制・制度改革に係る方針」のもと、「風力発電の導入促進に係る建築基準法の基準の見直し」として、建築基準法における評価基準の妥当性に関する検討が行われている。風車のリユースを促進するためには、適切な規制・基準の緩和が望まれる。

5.2 風力発電設備の主要構成素材

5.2.1 風力発電設備の主要な構成素材

代表的な 2MW クラスの風力発電設備（ENERCON⁴⁷製 2.3MW 機）の主要な素材割合を図 5-11 に、風力発電設備の主要部位別の素材構成および重量を表 5-5 に示す。

風車全体としては、基礎に使用されるコンクリートが重量の 8 割を占めている。基礎を除いた風車本体の主な素材は鉄（約 88%）や銅（約 3%）、アルミニウム（約 0.4%）といった金属や、ガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRP とする）（約 8%）であり、約 9 割が金属で構成されている。



※ENERCON 社の 2.3MW 機を想定

図 5-11 風車の主要素材の割合

（左：基礎を含んだ設備全体における割合、右：コンクリート以外の素材における割合）
出所）“LCA of ENERCON Wind Energy Converter E-82 E2”（ENERCON）

表 5-5 風車の主要な素材および重量[単位：トン]

素材	合計重量	ブレード	ナセル	タワー	電子機器	基礎
鋼鉄	246	1	53	103	37	52
鋳鉄	608	-	73	-	535	-
銅	12	-	11	-	1	-
アルミニウム	76	75	1	-	-	-
GFRP	29	29	-	-	-	-
コンクリート	1,882	-	-	791	-	1,091
合計	2,853	105	138	894	573	1,143

※ENERCON 社の 2.3MW 機を想定

出所）“LCA of ENERCON Wind Energy Converter E-82 E2”（ENERCON）

⁴⁷ ドイツを代表する風力発電機メーカー。ギアレス・同期発電機式の風車を販売。

5.2.2 ナセルの主要な構成素材

(1) ナセルの主要部品

ナセルには、増速機や発電機、主軸や主軸受等、発電に係る重要部品が格納されている（詳細は図 5-1 を参照）。

風車の発電方式は、増速機付き／誘導発電機と、増速機なし（以下、ギアレス式）／同期発電機式に大別され、メーカーにより、増速機の有無や、発電機の種類が異なっている。

(2) 大型風車（MW クラス）の構成素材

代表的な風車（Gamesa⁴⁸製 2MW 機、増速機付き）のナセルの主要素材の割合を図 5-12 に、ナセルの主要部品別の素材および重量を表 5-6 に示す。ナセル内部品の約 90%は鉄で構成されており、残りは銅、アルミニウム、FRP、潤滑油等で構成されている。

また、ギアレス式の風車では、永久磁石式同期発電機が使用されている場合がある。永久磁石には、レアメタル（ネオジウム、ジスプロシウム）が含まれており、ギアレス／永久磁石式同期発電機を用いている 2MW の風車では、1.5～2 トンの永久磁石を使用し、うち約 30%がネオジウム、約 4%がジスプロシウムで構成されている⁴⁹。

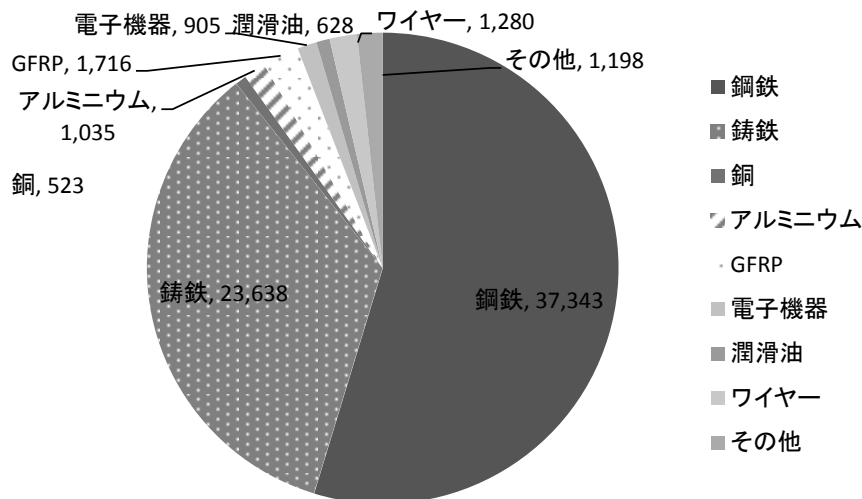


図 5-12 ナセルの主要な素材の割合[単位：kg]

※GAMESA 社の 2.0MW 機を想定

出所) “LIFE CYCLE ASSESSMENT OF 1KWh GENERATED BY A GAMESA ONSHORE WINDFARM G90 2.0 Mw”
(2013, Gamesa)

⁴⁸ スペインを代表する風力発電機メーカー。増速機付き・誘導発電機式の風車を販売。

⁴⁹ 第 6 回産総研レアメタルシンポジウム「風力発電における永久磁石利用の動向」（2011 年 10 月 24 日/三菱重工業（株）発表資料）

表 5-6 大型風車 (MW クラス) のナセルの主要構成素材および重量

MATERIAL(Kg)	増速機 (GEARBOX)	発電機 (GENERATOR)	変圧器 (TRANSFORMER)	低速シャフト (SHAFT LOW SPEED)	高速シャフト (SHAFT HIGHT SPEED)	架台 (FRAME)	ヨーシステム (YAW SYSTEM)	電子機器 (ELECTRIC CABINETS AND CONVERTER)	ナセルカバー (NACELLE STRUCTURE)	クレーンシステム (CRANE SYSTEM)	油圧装置 (HIDRAULIC GROUP)	その他 (OTHER NACELLE)	TOTAL (kg)
低合金鋼 (Low alloy steel)	1,913.43	5,408.71	3,225.06	615.79	662.28	2,963.42	1,636.66	1,551.78	757.65	2,307.85	499.94	262.47	21,805.05
高合金鋼 (High alloy steel)	6,246.01	46.85	0.00	7,724.90	0.03	2.00	1,445.66	0.00	17.79	20.00	0.06	35.07	15,538.36
鋳鉄 (Casting)	8,008.22	123.10	0.00	3,134.60	126.26	10,899.90	1,229.40	0.00	0.00	116.80	0.00	0.00	23,638.28
銅 (Copper)	0.00	352.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	155.28	0.00	0.00	15.00	0.00	522.65
アルミニウム (Aluminium)	2.56	24.00	675.02	3.79	0.00	53.63	240.00	0.00	11.37	0.00	25.00	0.00	1,035.38
真ちゅう (Brass)	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.10	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	38.00
ポリマー (Polimer)	9.87	14.00	22.49	0.00	2.60	7.68	22.91	22.17	35.72	0.00	6.00	1.32	144.74
繊維ガラス (Fiberglass)	0.00	10.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.47
ガラス強化プラスチック (GRP, Glass Reinforced Plastic)	2.70	3.47	7.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,702.22	0.00	0.00	0.00	1,716.08
塗料 (painting)	37.70	35.48	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	73.68
電子部品 (Components electric/electronic)	191.82	126.00	0.00	0.00	0.00	0.00	144.00	443.44	0.00	0.00	0.00	0.00	905.26
潤滑油 (Lubricant)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	627.77	627.77
ワイヤー (Wires)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.12	0.00	0.00	0.00	1,236.16	1,280.28
その他 (Other materials)	10.21	109.58	344.99	28.80	0.87	409.70	3.50	0.00	3.64	0.36	0.00	19.07	930.72
TOTAL (Kg)	16,425.26	6,254.02	4,275.26	11,507.88	792.04	14,336.83	4,757.23	2,216.79	2,528.54	2,445.01	546.00	2,181.86	68,266.72

※GAMESA 社の 2.0MW 機を想定

出所) “LIFE CYCLE ASSESSMENT OF 1KWh GENERATED BY A GAMESA ONSHORE WINDFARM G90 2.0 Mw” (2013, Gamesa)

(3) 小型風車（100kW）の構成素材

本調査で、解体試験・素材構成調査を行った小型風車（100kW、ギアレス／永久磁石式同期発電機式）の素材構成調査結果を以下に示す⁵⁰。

小型風車についても、大型風車と同様に、主要な構成素材は鉄であった（約 97～99%の構成比率）。また、発電機には永久磁石が 112.8kg（188g の磁石を 600 個使用）使用されていた。永久磁石の構成比は、鉄：65%、ネオジム：20%、プラセオジウム：8.1%、ジスプロシウム：4.2%、コバルト：1.9%、ニオブ：0.2%であり、構成比を乗じると、ネオジムが約 22.6kg、ジスプロシウムが約 4.8kg 使用されていることとなる。

表 5-7 小型風車（100kW）のナセルの主要構成素材および重量

測定対象			重量 (kg)	測定状況						
設備	部品	詳細部品		測定箇所	測定状態	素材構成				
タワー			4,390	タワー本体 (外側)	塗装あり※1	鉄：97.0% 亜鉛：2.0% マンガン：1.0%				
				タラップ	塗装なし	亜鉛：98.1% 鉛：1.2%				
パワーコンディショナ			95	-	-	-				
ハブ			1,510	ハ ブ 本 体 (外側)	塗装あり※1	鉄：99.7%				
ナセル	ナセルカバー		440	-	-	(GFRP と推測される)				
	永久磁石式発電機 (PMG)	永久磁石	112.8		塗装なし 加熱による 脱磁、粉碎後 に測定	鉄：65% ネオジム：20% プラセオジウム：8.1% ジスプロシウム：4.2% コバルト：1.9% ニオブ：0.2%				
		固定子					1,635	-	-	—
		回転子					1,530※2	-	-	—
	主軸		490	主軸本体	塗装なし	鉄：97.9% クロム：1.1%				
	主軸受		385	主軸受本体 (外側)	塗装あり※1	鉄：99.6%				
	主軸ブレーキ装置 (油圧／ディスク)		250	ディスク	塗装なし	鉄：97.9%				
	架台		3,110	架台本体	塗装あり※1	鉄：98.4% マンガン：1.4%				
	ピッチ制御装置 (電動式／油圧式)		225	-	-	-				
	油圧装置		120	-	-	-				
	冷却装置 (コンデンサ)		25	-	-	-				
	ヨーモーター		35	ヨーモーター 一本体	塗装あり※1	鉄：99.1%				
	電力ケーブル・制御ケーブル		35	-	-	-				
	各種計測装置、センサー類		60	-	-	-				

※1 測定は塗装をはがした上で実施。

※2 永久磁石 112.8kg 含む。

⁵⁰ 本調査では、環境省の浮体式洋上風力発電実証事業で使用されていた 100kW 試験機（増速機なし（ギアレス）／永久磁石式同期発電機）を用い、解体試験・素材構成調査・含有量調査を実施した。

5.3 風力発電設備（主にナセル）のリサイクル・適正処分に関する基礎情報整理

5.3.1 風力発電設備のリサイクル・処理フロー

風車が解体された後に想定される、一般的なりサイクル・処理フローについて、リサイクル事業者へのヒアリング調査等により整理した結果を図 5-13 に示す。風車の主要な構成素材である鉄や銅、アルミニウムといった金属、コンクリートや GFRP は既存のリサイクル・処理ルートが確立しており、風車の撤去時には、産業廃棄物処理業者・リサイクル業者等への委託により、一般的なりサイクル・処理が行われていると考えられる。

風車の解体は、重機（クレーン等）と手解体を併用し、素材別に分別することとなる。素材別に分別した後の一般的な 2 次処理・資源売却先としては、以下が想定される。

- 鉄については、手解体またはガス溶断を経て、売却できるものは電炉メーカーに売却される。
- モーターや、ハーネス、制御盤（基板）は、溶断の前に手解体にて取り外し、モーターは、モータスクラップとして、専門リサイクル業者に売却される。中にエナメル線などが入っているため、鉄より少し高い値段で売却可能。
- ハーネスは、線の部分を取り外して、ナゲット処理業者に売却する。2 次処理後、銅は製錬メーカーに、ポリ塩化ビニル（PVC）はプラスチックリサイクルか、最終処分に回される。
- 基板は制御盤から取り外した後に破碎し、磁力選別・アルミ選別を経て、鉄は電炉メーカーに、アルミニウムはアルミ 2 次合金メーカーに売却される。金銀類（金、銀、プラチナ、パラジウム等）は銅製錬メーカーに売却され、残ったプラスチックは、磁力選別・アルミ選別を経て、チップは製紙メーカー、石灰メーカー、スラグリサイクル業者等に売却される。チップは、従来 A 重油を使用していたボイラの代替燃料としても販売される。
- GFRP は破碎後、製紙メーカー等に売却するか、最終処分を行う。破碎したものは、サーマルリサイクル後に残渣を埋め立てるか、一部はセメント材料として利用される。
- 金属複合物は、破碎をして、磁力選別・非鉄選別を経て、各種素材（鉄、アルミニウム、銅、ステンレス、プラスチック等）がそれぞれ売却される。

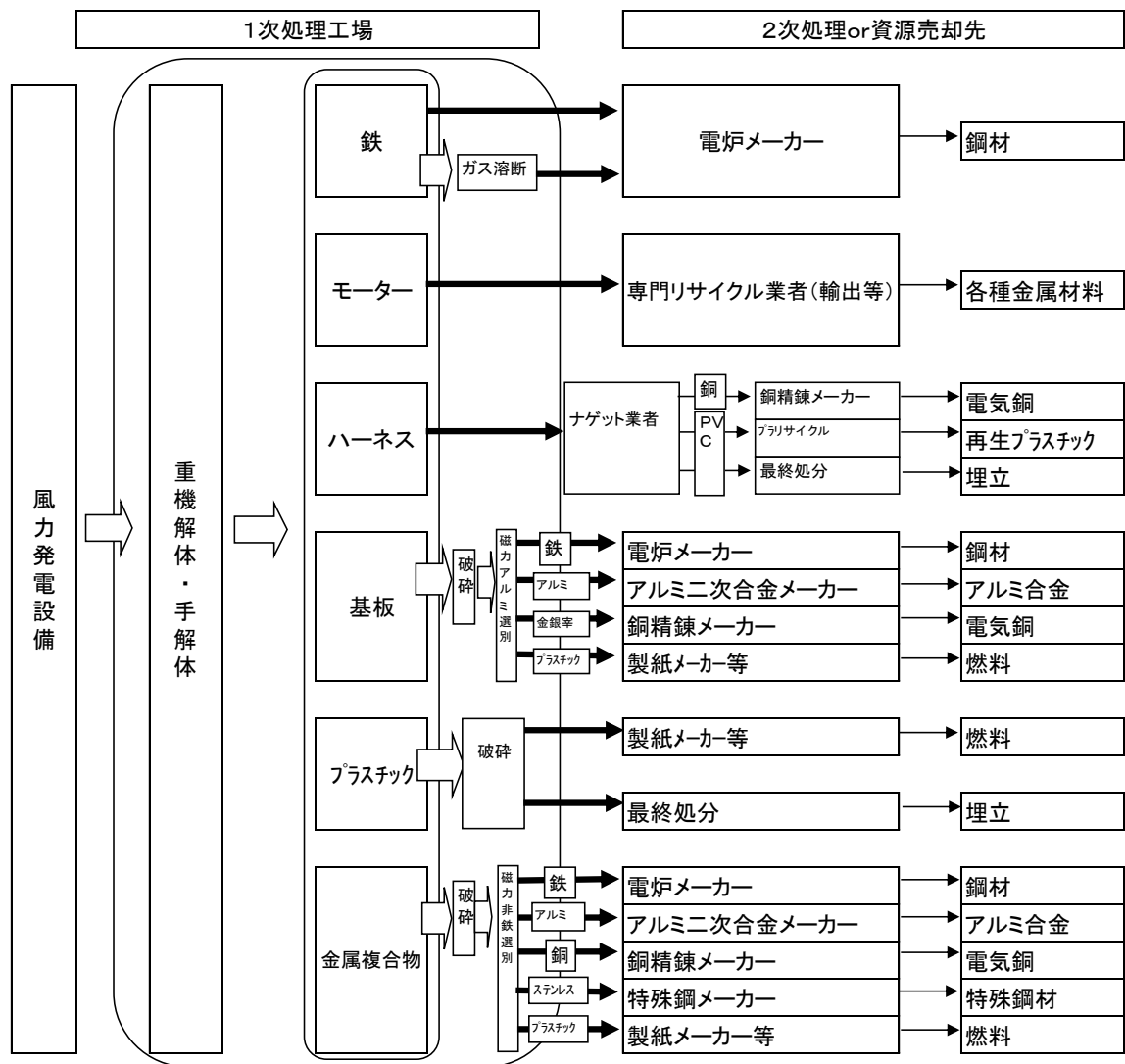


図 5-13 風車のリサイクル・処理フロー

上記フローに基づきリサイクルされた、部品・素材別の有償レベルおよび買取単価事例⁵¹を表 5-8 に示す。ここで、有償レベルの判定結果および買取単価・買取額に関しては、あくまで検討の一例であり、今後市況等により変化することに留意が必要である。

表 5-8 風力発電設備を構成する素材の有償レベル・買取単価事例

部品・素材		有償レベル	買取単価（円/kg）	
鉄		1	30	
モーター		1	50	
被覆線（ハーネス）		1	160	
基板		1	200	
プラスチック（GFRP）		3	(60)	
金属複合	鉄	1	30	20
	銅			120
	プラスチック			(30)
	アルミ			80
	ステンレス（304 系）			80

※1 有償レベルは以下のように設定。

レベル1：そのままの状態で、有償で譲渡可能

レベル2：破碎・選別など通常のリサイクルで想定される工程を経ることによって有償で譲渡可能

レベル3：上記以外

※2 括弧内は逆有償

5.3.2 リサイクルを検討する際の留意点

鉄や銅、アルミニウム等の金属が風車、ナセルの主な素材であり、風車全体（基礎を除く）およびナセルの約 90%を占めている。これらの素材は既存のリサイクルルートが確立している。

GFRP はブレードやナセルカバーに使用されており、一定の重量を占めるため、リサイクル技術確立の必要性が議論されており、研究が進められている、ガラスとプラスチックの分離が難しくコストがかかるため、現状ではリサイクルは困難とされている。

(1) 永久磁石式発電機のリサイクル可能性

資源価値が高いものとしては、発電機内の銅コイルやケーブルに含まれる銅に加えて、永久磁石式発電機が用いられている場合、磁石に含まれるネオジム、ジスプロシウム等のレアメタルが挙げられる。永久磁石式同期発電機を用いた 2MW 風車の場合、1.5～2 トンの永久磁石を使用し、うち約 30%がネオジム、約 4%がジスプロシウムで構成されている⁵²。また、100kW 風車では、112.8kg の永久磁石が使用されており、構成比は、鉄：65%、ネオジム：

⁵¹ リサイクル業者へのヒアリング調査より設定。リサイクル工場における引取り時の単価を想定している。

⁵²第 6 回産総研レアメタルシンポジウム「風力発電における永久磁石利用の動向」（2011 年 10 月 24 日/三菱重工業（株）発表資料）

20%、プラセオジウム：8.1%、ジスプロシウム：4.2%、コバルト：1.9%、ニオブ：0.2%であった。また、重量に換算すると、ネオジムが約 22.6kg、ジスプロシウムが約 4.8kg 使用されていた。

これらネオジム、ジスプロシウムのリサイクルを行うためには、選別・脱磁した上で、専用の金属回収プロセスにて回収する必要がある。現在、国内においては永久磁石からレアメタルを精錬できる事業者が限られていることもあり、量・性状によっては市場での取引が困難であり、母材である鉄としてリサイクル（電炉に投入）され、ネオジム等については回収されない可能性がある。また、磁性を帯びた状態では現場の作業や運搬が困難であることが想定されることから、実際にリサイクルする際の作業工程を検討する必要がある。

永久磁石式同期発電機を用いた風車の世界の累積導入量に占める割合は、現状で 10%程度であり、直近の永久磁石の廃棄量は小さいと考えられるが、小型風車であっても一定量のレアメタルが使用されているため、資源の有効利用の観点から、その回収可能性について検討すべき材料であると考えられる。

(2) GFRP のリサイクル技術の開発動向

5.3.1 に示したように、GFRP はブレードやナセルカバーに多く使用されており、リサイクル技術の確立が必要とされている。ここでは、GFRP（特に、ブレード）のリサイクル技術の開発動向を整理した。

1) ブレードの廃棄量予測

ドイツ風力エネルギー研究所（DEWI）の報告によると、世界における直近のブレード廃棄量は小さいが、2020 年以降廃棄量は増加し、2034 年までに最大で約 22.5 万トンのブレードが廃棄される（リサイクルの対象となる）と予測されている。

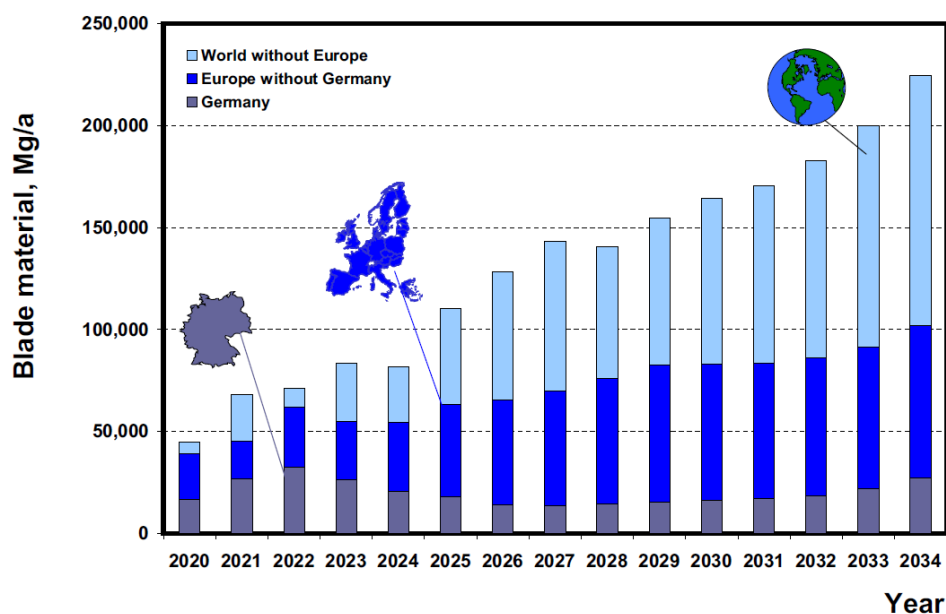


図 5-14 世界全体のブレード廃棄量の将来推計

出所) “Recycling of Wind Turbine Rotor Blades – Fact or Fiction?” (DEWI Magazine No.34, Feb.2009)

2) 海外におけるブレードのリサイクルに関する情報

ブレードのリサイクルについては、現状では、ガラスとプラスチックの分離が難しく、処理にコストがかかるため、一定量の廃棄量が見込まれない場合、リサイクル事業の成立は困難とする見方が多い。デンマーク工科大学は、現時点の風力発電設備の廃棄量は少ないため、ファイナンス的観点からみるとリサイクルは難しく、商業上の実現可能性はないとしている。ECRC（European Composite Recycling Company）も同様の意見であり、廃棄量が毎週何百トンというレベルであれば回収処理してセメント製造等に利用できるが、年間何十トンという現状では難しいとしている。また NaREC（National Renewable Energy Centre (英国)）は、ガラス強化繊維プラスチックの粉碎時に多くのエネルギーを消費する課題に触れ、リサイクル技術の改善が課題になるとしている⁵³。

ドイツのフラウンホーファー研究所では、ブレードの FRP の含有率が高い部分と低い部分を分別し、それぞれの状態に合わせたマテリアルリサイクルを行うリサイクル技術について研究が行われている。しかし、FRP の含有率が高い部分と低い部分を分別する点で技術的な課題があり、このフローに沿ったリサイクルは実現されていない。

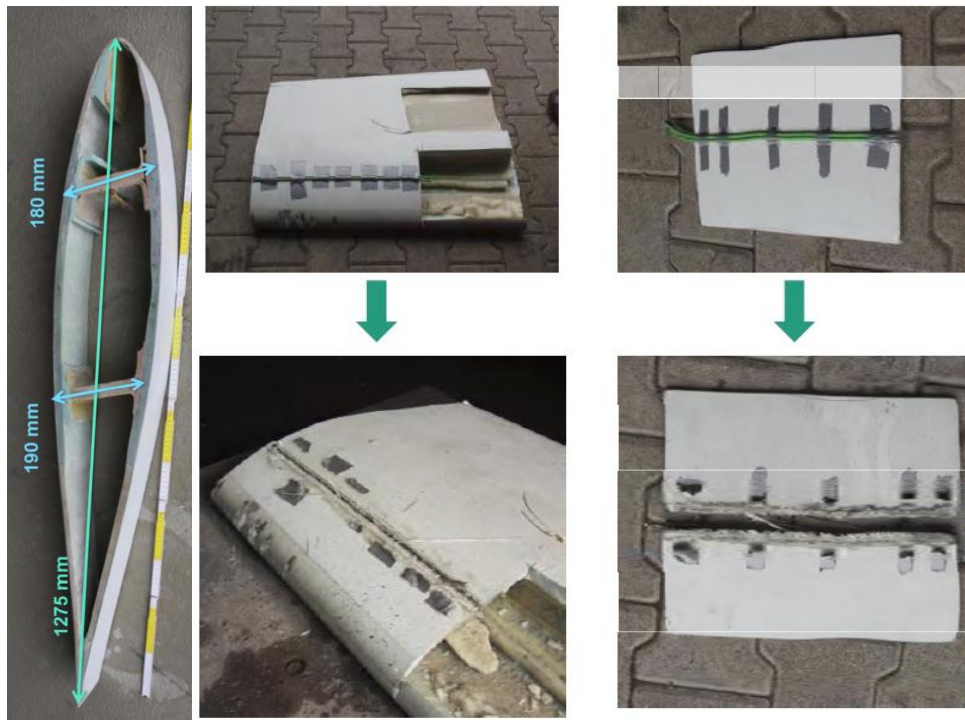


図 5-15 ブレード解体の様子

出所) “Recycling von Windkraftanlagen” (2013 年 6 月, フラウンホーファー研究所 Hamburg T.R.E.N.D 講演資料)

⁵³ Renewable Energy Focus “Recycling wind” (31th Jan 2009)

3) 国内における GFRP のリサイクルに関する情報

GFRP のリサイクルに関する取組として、国内では、平成 19 年より、FRP 船のリサイクルシステムが運用されている。FRP 船の製造事業者等の団体である一般社団法人日本マリン事業協会が中心となり、主要製造事業者 7 社（川崎重工業、スズキ、トーハツ、トヨタ自動車、日産マリーン、ヤマハ発動機、ヤンマー船用システム）等と連携し、システムを構築した。

適正処分が困難とされていた FRP 船を、指定引取場所に収集、粗解体した後、FRP 破材を中間処理場に輸送し、破碎・選別等を行い、セメント利用されている。FRP 船の収集・解体・破碎を広域的に行うことで、コストを抑えたリサイクルシステムが実現した。

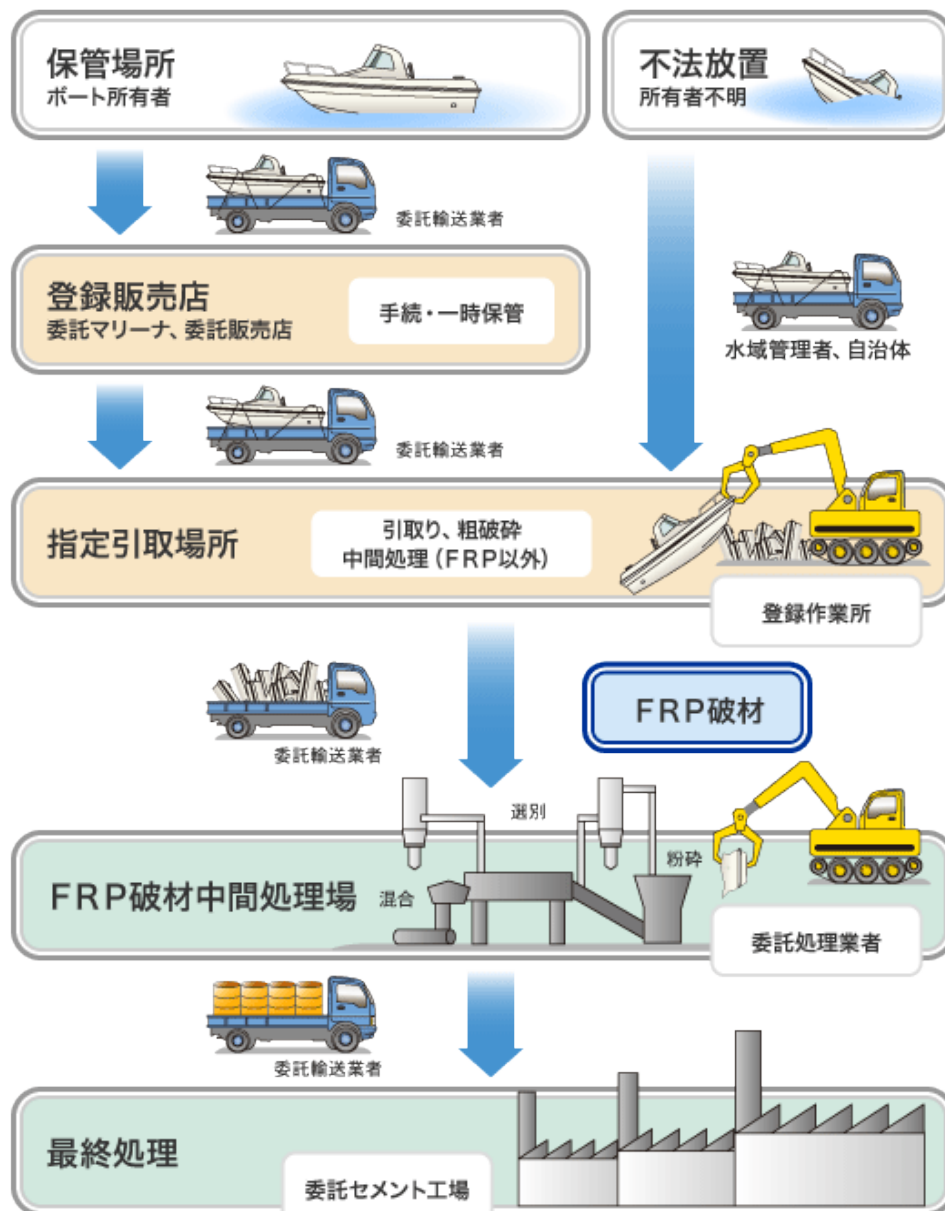


図 5-16 FRP 船リサイクルシステム

出所）一般社団法人 日本マリン事業協会「FRP 船リサイクル」⁵⁴

⁵⁴ <http://www.marine-jbia.or.jp/recycle/>

5.3.3 適正処分を行う上で留意する項目

適正処分の観点から注視すべき素材としては、「油」と「重金属」が挙げられる。

油は、油圧ユニットをはじめ、ナセルを構成する多くの部品に含まれる。発電機や軸受に含まれるグリースは、ふき取って、廃油として処分する必要がある。また、ナセル内の油は摩擦により発生する鉄粉等が含まれている状態であるため、適正に廃油処理を行うよう、留意する必要がある。

埋立処理を想定した場合、溶出の観点から注視すべき部材として、基板、有機塗料、めっき等に含まれる重金属（鉛等）が挙げられる。100kW 風車の素材構成調査結果からは、鉛の含有が一部の部材（タワー、ナセル等に用いられる塗料、タワー内のタラップ）で確認された。本調査で用いた 100kW 風車は、洋上に設置されていた風車であることから、防錆性を持たせるために塗料に鉛が使用されたものと推察されるが、海岸近くに設置する陸上風車においても防錆性は要求されるため、処理にあたっては、鉛の含有有無、埋立処分の際の溶出可能性についても留意する必要がある。

また、現場の作業環境の観点からは、FRP の粉塵等の問題が挙げられる。FRP を用いたブレードの切断等を行う際は、FRP の粉塵が発生するため、作業者の安全対策等を講じる必要がある。



図 5-17 ブレード解体作業の様子

出所) Green-Ener-Tech Denmark ウェブページ

5.4 風力発電設備のリサイクル・適正処分、リユースに係るコスト

5.4.1 リサイクル・適正処分に係るコスト

(1) 国内のリサイクル・適正処分に係るコスト事例

1) 解体・撤去に係るコスト

風力発電設備のリサイクル・適正処分においては、「①解体・撤去に係るコスト（現場で風力発電設備を撤去し、輸送するための解体を行う）」「②輸送に係るコスト（現場から解体事業者まで、風力発電設備を輸送する）」「③リサイクル・適正処分に係るコスト（解体事業者において、リサイクル・適正処分を行う）」が生じる。

「①解体・撤去に係るコスト」については、風車のサイズにもよるが、事業者へのヒアリングにより、1MW 前後の風車一機あたり 1,000 万円/機程度との情報を得ている。

表 5-9 に、750kW 風車 4 機の解体・撤去（所要約 30 日）に係る主要費目のコスト事例を以下に示す。クレーン等重機のレンタルコストや人件費の他、専用治具のレンタルコスト等のコストも大きい。

なお、ここで示す数値はあくまで一例であり、風車の解体・撤去にかかるコストは、風車の立地や数、基礎や埋設ケーブルの状況等により大きく異なることに留意が必要である。

表 5-9 解体・撤去に係るコスト事例

費目	主要コスト事例	備考
クレーンのレンタルコスト	3,300 万円程度	大型クレーンのレンタルコストのほか、大型クレーンを組み立てるためのクレーンや、クレーンの運搬に係るコストなど。ここでは、具体的に、500t クラスのクレーン 1 台、および、50t クラスのクレーン 2 台を想定。
解体コスト	800 万円程度	解体に係る一般管理費・人件費等。
クレーン養生（鉄板敷設等）に係るコスト	200 万円程度	クレーン設置養生や作業道路補修、砂利施設工などに係るコスト。
専用治具のレンタルコスト	300 万円程度	クレーンで風力設備の部品を釣る際に要する専門器具。
基礎の撤去、埋設ケーブル解体に係るコスト	200 万円程度	基礎に関しては、表面の 30cm 程度を取り除き、埋め戻すケースが多い。
合計	4,800 万円程度 (16,000 円/kW 程度)	

出所) 事業者提供資料

2) 素材の売却収入

ここでは、表 5-8 で示した有償レベルおよび買取単価⁵⁵に基づき、図 5-11 に示した 2MW クラスの風力発電設備をリサイクルした際の、素材の売却収入を試算した。なお、買取単価・買取額に関しては、あくまで検討の一例であり、今後市況等により変化することに留意いただきたい。

試算の結果、売却収入は、合計で 3,140 万円、kW あたり 13,652 円/kW（輸送費を含まない）となった。前節にて、解体・撤去に係るコストが 16,000 円/kW 程度であったことから、輸送費を含まない場合でも、現状では素材の売却収入によるコスト回収は難しいと考えられる。

表 5-10 2.3MW 機をリサイクルした際の売却収入試算例

素材		重量 (kg)	比率	有償 レベル	買取単価 (円/kg)	買取額 (万円)
鉄		854,000	88%	1	30	2,562
プラスチック (GFRP)		29,000	3%	3	(60)	(174)
金属 複 合	銅	12,000	1%	1	120	144
	アルミニウム	76,000	8%		80	608
合計		971,000	-	-	-	3,140 (13,652 円/kW)

※1 有償レベルは以下のように設定。

レベル1：そのままの状態で、有償で譲渡可能

レベル2：破碎・選別など通常のリサイクルで想定される工程を経ることによって有償で譲渡可能

レベル3：上記以外

※2 括弧内は逆有償

(2) 海外の解体・撤去に係るコスト評価事例

海外においては、米国等において、風力発電プラントの建設時の許認可時に、事業期間終了後の風力発電設備の解体・撤去に係るコスト評価（Decommissioning Plan）が行われている。表 5-11 に、米国における3つのプラントのコスト評価事例を示す。各事例を比較すると、プラントサイズが大きいほどスケールメリットが働き、解体処理コストが安くなる傾向が見られる。

海外の事例と、前節の国内における試算結果を比較すると、国内の解体・撤去に係るコストは海外の1.5倍から3倍程度を要している。この要因としては、事業者等のヒアリングにより、重機のレンタル費、輸送費、立地等の違い等が挙げられている。

<国内外の風車の解体・撤去コスト差の要因>

- ・ 日本のクレーンのレンタル費用は高く、国内のクレーンの台数が少ないことや、クレーンを輸送するコストが高いことなどが、要因として挙げられる。

⁵⁵ リサイクル業者へのヒアリング調査より設定。リサイクル工場における引取り時の単価を想定している。

- ・ 日本では、山間部等、交通が不便な場所に風力発電設備が立地していることが多い。また、日本は道幅が狭く、風力発電設備など大型のものを運搬する際は、特殊車両通行許可申請が必要となる。

また、売却収入に関して前項の試算結果と比較すると、国内の試算結果は海外の試算結果の2倍から4倍の値となっている。この要因の一つとして、素材の売却単価の違いが挙げられる。前項の国内試算では、鉄の売却単価を30円/kgに設定したが、表5-11の海外試算では鉄の売却単価は0.235ドル/kg⁵⁶（23.5円/kg⁵⁷）に設定されている。同様に、アルミニウムについても、国内試算では80円/kgに設定したが、海外試算では0.5ドル/kg⁵⁶（50円/kg⁵⁷）に設定されており、単価設定額の違いが売却収入の差に現れていると考えられる。

表 5-11 海外における風車の解体・撤去に係るコスト試算事例

プラント名	Sibley Wind Project ^{※1}	Bowers Wind Project ^{※2}	Buffalo Ridge II Wind Farm ^{※3}
プラント出力	20MW	48MW	306MW
風車の単機容量、本数	1.95MW、20本	3.0MW、16本	2.1MW
解体処理コスト（ア）	9,236 円/kW	4,693 円/kW	4,324 円/kW
売却収入（イ）	5,752 円/kW	3,409 円/kW	3,779 円/kW
正味コスト（ア）－（イ）	3,482 円/kW	1,283 円/kW	545 円/kW

※1 ドル＝100円で算出

出所）※1：DECOMMISSIONING PLAN（Sibley Wind Project）

※2：MDEP NRPA/Site Location of Development Combined Application（Bowers Wind Project）

※3：Buffalo Ridge II Wind Farm Decommissioning Report（Buffalo Ridge II Wind Farm）

⁵⁶ MDEP NRPA/Site Location of Development Combined Application（Bowers Wind Project）

⁵⁷ 1ドル＝100円として換算。

5.4.2 リユースを想定した解体コスト

風車および部品・部材のリユースを想定した場合、解体作業は丁寧に、各部品を損傷することなく実施する必要があることから、リサイクル・廃棄を想定した場合より、解体にかかるコストは高くなることが想定される。

国内事業者へのヒアリングでは、中大型風車（MW クラス）のリユースを想定した解体作業にかかるコスト、日数・人員について、以下の情報が得られている。

＜国内事業者へのヒアリング結果＞

- 風車単体の解体コスト（産廃処理コストを含む）は、基礎を破砕する場合 1,500 万円程度、基礎を残す場合 1,000 万円程度であり、風車・部材のリユースを想定した場合には、より丁寧な作業が必要となるため、解体コストはより高くなると考えられる。
- ナセル内から発電機を単体で取り外す作業は半日程度かかる。所要人数はオペレータが 1 人、クレーンの荷を引っ張る人員が 2 人、ナセル上で解体作業を行う技術員が 3 人程度、合計 6 人程度である。解体のための事前準備（発電機周辺の電気配線を外すなど）も含めれば、追加 1 日かかる。
- 解体作業には、スーパーバイザー⁵⁸の立会いが必ず必要であり、治具の取付箇所、ボルトの取外し手順、解体方法等、安全確保のための助言を受けながら作業を実施する。スーパーバイザーの人件費は、海外の場合は最低でも時給 100 ユーロ、国内でも日給は 8 ～12 万円程度必要となる。
- 大型クレーンのレンタルには、本体使用料に加えて、回送料が必要となる。また、500 トンクラスのクレーンの場合、組立・解体用に 50 トンクラスのクレーンが 2 台必要となる。また、強風等、気象条件により作業できない場合は、追加的な待機料金がかかる。
- 部品により、解体にかかる工程は異なる。発電機の場合は半日で取り外しが可能だが、増速機の場合は作業に数日かかる場合があり、事前準備を含めると 3 日程度は要すると考えられる。

以上を踏まえると、風車全体のリユースを想定した解体にかかるコストは、1,000～1,500 万円程度以上と考えられる。

また、部品単体を取り外す場合、風車全体を解体する場合と比較して所要日数が短くなるため、クレーンレンタル料は安くなると考えられる。一方で、事前の作業準備（鉄板養生、メインクレーン組立等）や、使用するクレーン・器材、所要人員は、風車全体の解体と大きく変わらないことから、相応のコストがかかることを想定する必要がある。

⁵⁸ スーパーバイザー（英語: supervisor）とは、監督・管理・監修を担当する人物。日本では S V と略されることがある。

6. 本年度調査結果のまとめと今後の検討課題

検討結果を踏まえ、検討対象とした再生可能エネルギー設備毎に、本年度の調査結果を総括するとともに、次年度以降の検討課題について整理した。

6.1 太陽光発電設備

太陽光発電設備について、製品特性の観点からは、今回の含有量・溶出試験結果からは、使用済設備の資源価値は銀の含有量によって左右されること、含有量は機器の種別等によって一定のばらつきを有すること、一部のモジュールにおいて有害性が懸念される物質の溶出可能性があることが確認された。

製品流通特性の観点からは、現状は太陽光発電設備メーカーから生産不良等として排出されるルートが主であり、中間処理業者・金属スクラップ業者に引き渡されていること（一定量がまとまれば有償となるケースもあること）、銀等の有用資源は非鉄製錬業者で回収されていること、建物解体業者や施工業者からの排出は少なく、その他の排出物と同様に従来の産業廃棄物処理の流れの中で処分が行われているケースが多いことが確認された。

社会システムの観点からは、海外動向調査によって欧州において WEEE 指令改正により太陽電池モジュールの回収・リサイクルが義務づけられたこと、その担い手として PV CYCLE 等の団体や企業が対応を始めていることが確認された。

調査結果から、我が国では、現状において排出以降の段階で課題が顕在化している状況にないと考えられる。ただし、将来的な排出量の増加やそれに伴う排出・処理の流れの変化には留意が必要である。特に、将来のリユース可能性や排出動向の調査や、太陽光パネルの地域偏在性を考慮したリサイクルに関する費用対効果分析などを進め、太陽光パネルのリサイクルに関する情報を引き続き収集していくことが求められる。また、有害性が懸念される物質の溶出可能性については、適切な試験手法を検討し、体系的な試験の実施により、更なるデータの蓄積を図り、リユース、リサイクル、適正処理を進める上で潜在的な社会問題が存在しないかどうか、海外動向も注視しつつ、引き続き検討を進めていくことが重要である。

6.2 太陽熱利用システム

製品特性の観点からは、鉄等の単一素材より構成される部品が支配的であり、一定の（比較的安定した）資源価値を有していること、有害性が懸念される物質の使用はあるが、汎用的な用途が主であり、太陽熱利用システムに特化したものではないことが確認された。

製品流通特性の観点からは、施工業者や建物解体業者からの排出が主であり、その他の排出物と同様に従来の金属リサイクル・産業廃棄物処理の流れの中で取り扱われているケースが多いことが確認された。

調査結果から、現状において排出以降の段階で課題が顕在化している状況にないと考えられるが、使用済となった後もそのまま屋根に設置されている機器が相当量存在している可能性があることも踏まえ、将来的な排出量の変化に留意しつつ、リユース・リサイクル・適正処理を進めていくことが重要である。

6.3 風力発電設備

製品特性の観点からは、鉄や銅、アルミニウム、コンクリートが主たる構成材料であること、ブレードに GFRP が使用されていること、永久磁石式発電機を用いた風車にはレアメタル（ネオジム、ジスプロシウム）が使用されていることが確認された。

製品流通特性の観点からは、主要な構成材料については既存リサイクルルートが存在しているが、リサイクルの観点からは GFRP や永久磁石に、適正処理の観点からは油や重金属に注視すべきことが確認された。また、中古風車や部品へのニーズはあるものの、機種が多様性に富み、市場を形成するに十分な量の中古風車・部品が流通しないことから、国内の中古市場は顕在化していないことが確認された。

調査結果から、現状において排出以降の段階で課題が顕在化している状況にないと考えられるが、将来的な排出量の増加に加え、ブレードの GFRP や永久磁石に使用されるレアメタルのリサイクル可能性、風車・部品のリユース可能性にも注視していく必要がある。