

Graduate School of
Business Administration

KOBE
UNIVERSITY



ROKKO KOBE JAPAN

2022-06

MFCAを用いたサーキュラーエコノミーへの対応
—太陽光発電事例を用いた中小企業への展開—

末次 憲一郎 國部 克彦

Discussion Paper Series

MFCA を用いたサーキュラーエコノミーへの対応

—太陽光発電事例を用いた中小企業への展開—

末次憲一郎（神戸大学大学院経営学研究科学術推進研究員）

國部克彦（神戸大学大学院経営学研究科教授）

1. はじめに

マテリアルフローコスト会計（MFCA）は、製造プロセスにおけるマテリアルのフローとストックを捕捉し、そのフローから生じる製品やマテリアルのロスをも物量単位と貨幣単位の両方で評価して、ロス削減を通じて資源生産性を高める手法である¹⁾。MFCA は 2011 年に ISO14051 として国際標準化され、その後サプライチェーンでの MFCA（ISO14052）と中小企業向けの MFCA（ISO14053）も発行され、資源生産性を向上させる手法として体系化されている。

一方、欧州を中心に、経済の構造を循環型に転換するサーキュラーエコノミーという政策が展開されている²⁾。サーキュラーエコノミーは、経済全体を循環型に転換するためのコンセプトであり、その実現のために多くの手法が活用されている。しかし、経済と環境を両立させる手段はまだ十分に開発されているわけではなく³⁾、そこに MFCA を活用する可能性が存在している。

また、現在の地球環境問題の最重要テーマである気候変動問題に対処するため、サーキュラーエコノミーを促進するためにも太陽光発電の重要性は非常に高まっている⁴⁾。太陽光発電の製造が環境負荷を増加させてはならない。この点にも MFCA の活用可能性は大いにあるし、特に中小企業にとって有効なものである。

本稿では、このような問題意識に立って、拡張型 MFCA という新たな MFCA のフレームワークを考案し、それをサーキュラーエコノミーや太陽光発電に適した場合の可能性を検討することを目的としている。

2. MFCA から拡張された MFCA へ

2-1. ものづくり設計思想としての MFCA

これまで環境と経済の両立を図る「ものづくり」の製品設計として、国内外において MFCA が広く活用され多大な実績をあげてきた。MFCA は主に生産における「調達→生産」を対象としており、「マテリアルのロスを物量とコストで見える化する手法であって、マテリアルロスの削減はその使用量・購入量を削減し資源効率を高める等の環境負荷低減の取り組み」となっている⁵⁾。

一方、欧州では資源の有効活用を目的として、サーキュラーエコノミーが EU 全体で推進されている。サーキュラーエコノミーは「調達→生産→使用→逆生産」までの循環トータルをター

ゲットとしている²⁾。いわゆる MFCA もサーキュラーエコノミーもムダをなくし、価値の最大化を図ることであって、基本的な方向性は共通している。しかし、サーキュラーエコノミーは社会全体のシステムであり、MFCA は個別の製造プロセスに適用される手法であるから、サーキュラーエコノミーに MFCA をどのように活用していくかが、今後の課題となっている。これまで MFCA では「調達」、「生産」までが主な守備範囲だったが、今後は「逆生産」から「調達」、「生産」までを範疇とする拡張したものづくりを MFCA 手法で行うなら、サーキュラーエコノミーへの貢献がより大きくなると考えられる。もちろん MFCA もサーキュラーエコノミー化への対応を考え、今まで以上にデータのデジタル化を行い、各プロセスにおけるプラットフォーム化を進めることが必要になる。これはこれまでの MFCA 手法に、デジタル化に対応できる計測器や生産製造プラットフォームなどを追加するための製造ソフトの導入等々によって、進化した製造ラインになっていくが必要になると思われる。

2-2. MFCA の具体的拡張プロセス

2-1 で考えた MFCA 拡張によるサーキュラーエコノミーへのアプローチとして、図 1 に示すようなステップアッププロセスを考案した。

まず新製品をつくるのに、資材を調達し製造して MFCA によってムダを省いた製品を製造する。つぎにこの製造した新製品が使用期間を経て回収され、使用済製品として解体分解を行う。この解体分解プロセスにおいても、MFCA 的手法でムダがない素材や部品へとつくられていく。新製品の製造から使用期間を経て回収され、資源として部品、材料へと分解された素材を、第一世代素材部品と呼び、これらの一連の方法を、第 1 世代 MFCA 手法と呼ぶことにする。

つぎに、第 1 世代で分解解体した部品や素材を使用して第 2 世代製品を製造する。したがって第 2 世代製品には、部品や素材のリサイクル品やリユース品である第一世代素材部品が一部搭載されたものとなっている。この使用済製品を解体分解においてもムダが生じないように第 2 世代の部品と素材などに分解する。これを第 2 世代素材部品と呼ぶ。これも従来の MFCA を拡張することで、より無駄のない形で実現することが可能になると考える。これらの一連の方法を第 2 世代 MFCA 手法と呼ぶ。次にリユース、リサイクルした製品や素材をさらに効率的に使用できるようにライフサイクル設計を実施し、第 2 世代の素材や部品を使って第 3 世代製品を製造する第 3 ステップへと進む。これを第 3 世代 MFCA 手法と呼ぶことにする。この第 3 世代までのスリーステップを拡張された MFCA 的手法を活用することによって、ムダのない製造を促進し、より資源効率的なサーキュラーエコノミーが実現されることが期待される。

実際これらと類似の手法によって、これまでも 4 大家電製品が金属やプラスチックに素材として分解され、また部品の一部をそのまま新製品に使用すること等が実施されてきている。いわゆる新製品化のために使用済製品を回収して素材や部品としてリサイクルし、これを新しい製品づくりに再使用し、これらを繰り返すことによって 4 大製品をムダなく再生リユース、リサイクルしてきたのである。

例えばテレビについては、テレビを解体して部材化し、その部材をテレビの部品に再利用して製造されてきた。従来の製品づくりでの部材等に使用済み製品の部材を投入して新製品づくりを行ってきている。冷蔵庫、エアコン等も同様である。このような4大製品においても新製品の製造から使用期間を経て回収され、第1世代素材部品を得る。この第1世代で分解解体した部品や素材を使用して第2世代製品をつくり、第2世代の部品と素材などに分解して第2世代素材部品を得る。さらにそれまでの製品づくりを効率的に実施できるようにライフサイクル設計を実施し、第2世代の素材や部品を使って第3世代製品を製造する。このように拡張したMFCA もしくはこの考え方と類似の方法によって、第3世代までのものづくりステップが実施されてきた結果だと考える。

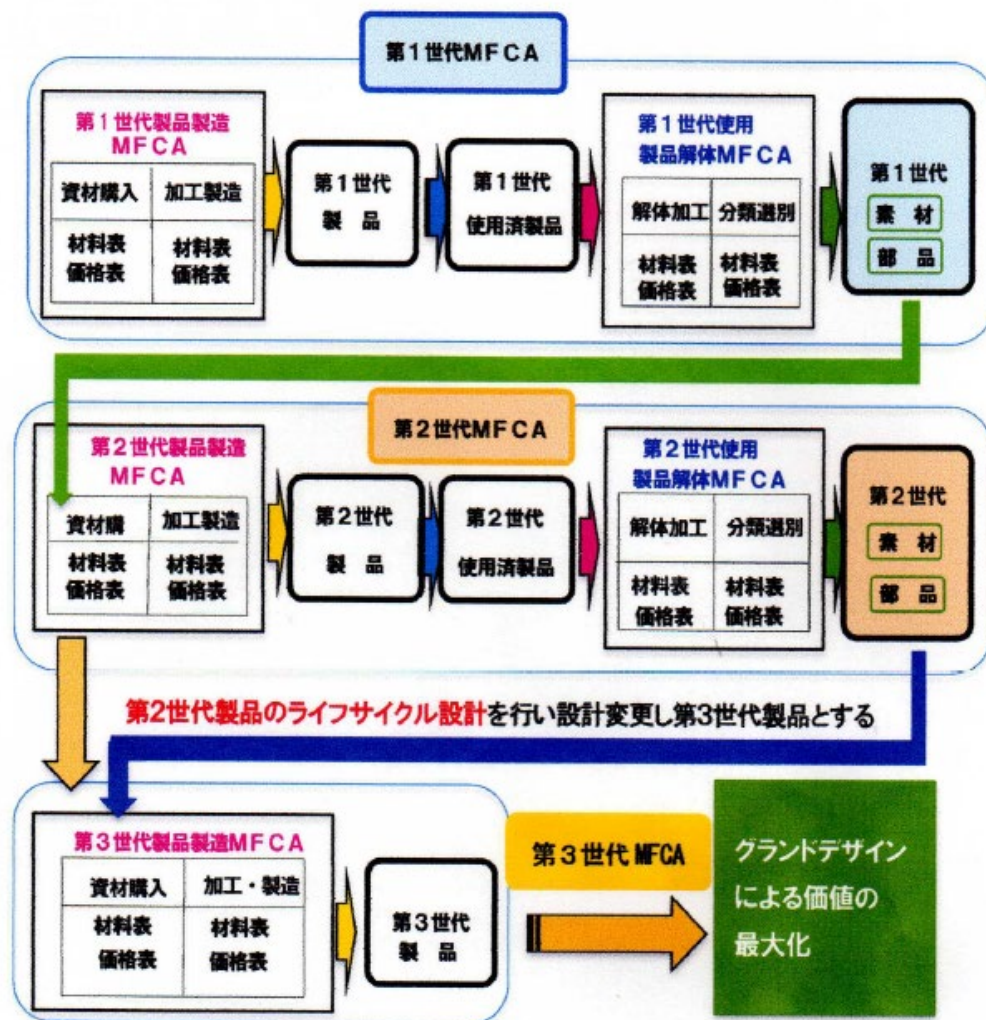


図1. 従来のMFCAから拡張型MFCAへの3ステップ

3. サーキュラーエコノミーにおける環境と経済の両立を図る課題

サーキュラーエコノミーでは、経済効果目標を明確にあげて公表している。欧州委員会としては、2030年までに4.5兆ドル、約45兆円の経済目標を掲げた活動を開始している⁶⁾。具体的には2030年までの都市ごみを65%リサイクルする、包装廃棄物を75%リサイクルすることや、都市ごみの埋立地を最大10%減らすことなどである。欧州ではこのような具体的な目標を掲げ、欧州全体で活動を推進している。

サーキュラーエコノミーの国際標準化も進んでおり、2018年6月26日に国際標準化機構ISOにおいて、フランスの国際規格協会が新しいサーキュラーエコノミーに関するTC案が可決され、このTCで取り上げられる4点が報告されている³⁾。

- (1) サーキュラーエコノミーに関するマネジメント規制
- (2) 実証ガイドライン
- (3) サーキュラーエコノミーに関わる用語、実行指標、規格補助ツールの開発
- (4) サーキュラーエコノミープロジェクト産業規制やファンクショナルエコノミー等のガイドラインの作成等

さらに2020年3月11日にサーキュラーエコノミーの実行計画案⁷⁾が公表され、実行計画の序文に、この10年の間にサーキュラーマテリアル、いわゆる循環材料の使用率をこれまでの2倍にする目標等が明記されている⁷⁾。あわせて製品の循環経済全体に関する取り組みについて発表されており、循環経済を推進するための法規制や改正も行うことなども発表されている。

例えばエレクトロニクスは、製品の寿命を延ばし、使用済みデバイスの回収を推進することなどを述べられており、とくに鉛など有害物質の使用制限に関する規制を見直すなどが書かれている⁷⁾。その他、バッテリーと自動車、包装、プラスチック、繊維、食品等についても具体的な活動の概要が書かれている。

4. サーキュラーエコノミーと環境負荷物質

サーキュラーエコノミーのような循環ものづくりサイクルを実施していくとき、大きな障害が発生することが考えられる。例えば電子電気機器分野で、資源の有効活用を徹底的に推進することを考え、使用済み製品の故障していない部品やデバイス等を使用する場合、これらの内部に検出しにくい環境に負荷を与える物質や有害物質が混入していれば、それらの部品やデバイスは廃棄されることなく「調達→生産→使用→逆生産」のサイクルを回り続けることになる。結果として有害物質が現在の線形経済以上に早く拡散することになり、大量の有害物質が市場に出回ることとなる⁷⁾。

とくに懸念されているのは電子電気製品で以前から問題となっている鉛についてである⁷⁾。これまでエレクトロニクス産業においては、資源の有効活用を図るため、3R活動が行われてきた。20世紀にエレクトロニクス製品の廃棄物が大量化するなか、この活動を阻むものとして

生じてきたのが、電気製品の部品と基板を接合するものとして使用されていたはんだ中の鉛の問題だった。鉛は特定化学物質に該当しており、電子回路基板から有価物をリサイクルする場合に大きな問題となった。電子回路基板に接合された部品を基板から外す解体作業では、はんだ中に含まれている鉛成分も作業場や工場内外周辺に拡散することになり環境に負荷を与えるからである。また所定の回収ルートに乗らず電気製品が違法に廃棄された場合、電気製品中の電子回路基板も酸性雨を浴びることによってはんだ中の鉛が流出し河川流域に流れ込む場合があり、20 世紀末には大きな社会問題となった⁸⁾。

このようなことから欧州の RoHS 規制もあって、日本のエレクトロニクス産業では世界に先駆けてはんだの無鉛化に取り組んだ。1998 年 MD プレーヤーへの世界初の鉛フリーはんだの搭載による製品化に成功したことで、世界の電気電子機器製品に搭載されるはんだの鉛フリー化が推進された⁹⁾。鉛フリーはんだの開発の成功とこの材料による世界展開が 2006 年頃までに急速に進展した。電気製品の解体作業である基板から部品を取り外すことが鉛フリーはんだとなって可能となり、廃棄解体やリサイクルが飛躍的に発展することになった。国内において現在では当たり前になっていることだが、4 大製品である洗濯機、テレビ、冷蔵庫、エアコン等について、リサイクル法により現在資源の再利用が実施されるようになった。

上記の鉛フリーはんだ化の流れで現在では、世界の約 80%がはんだの鉛フリー化がなされ、残り 20%において未だに鉛はんだが使用されている⁹⁾。この 20%とは融点が 250℃以上の高温はんだである⁹⁾。この高温はんだについて国内では 2005 年頃までは国内のさまざまな大学や研究機関、エレクトロニクス関連トップメーカーで研究開発がなされていた。しかしながらリーマンショックの後、ほとんど国内の研究機関ではその研究開発がストップしている。一方海外の欧州では、「DA5」という Bosch、NXP、Infineon 等の欧州のトップメーカーでなるコンソーシアムが日本の研究開発の動向を知って立ち上げられた¹⁰⁾。また同じころ米国では同様に日本の動向を受け、「i-NEMI」と呼ばれる北米トップ企業、IBM、HP、モトローラ等でなるコンソーシアムが研究開発並びに実用化検討を開始した¹⁰⁾。欧米ともに材料メーカー、部品メーカー及びセットメーカーの三者が協力しあって研究を行ってきたが、未だに開発できたという報告がない。高温鉛はんだとまったく同等な性能を有するはんだ材料は、20 年近くたった現在でも開発されていない¹⁰⁾。このように高温鉛はんだの代替が極めて困難であるため、RoHS 環境規制においては適用除外となっている。しかしながら融点が 250℃以上の高温鉛はんだが現在も年間 6000 トン以上、車載部品、LED、パワーデバイス、光学製品等々さまざまな分野で使用されており⁹⁾、年間約 40 個分の摩周湖の水を汚染する量にまで上がっている。高温鉛はんだ等が部品、デバイス中に使用されている場合、その検出は部品デバイスを破壊して内部接合はんだを剥き出しにしない限りほとんど検出は不可能である。

例えば、現状の線形経済の場合、上記の高温鉛はんだにおいて鉛が問題になるのは、大きくいえば、製品を製造する工場での鉛拡散と使用済み製品を廃棄した時に起こる廃棄場所での鉛拡散においてである。このために現在工場内での鉛の管理や使用済み製品を廃棄した場合の土壌

や河川の鉛成分の環境基準は法的に極めて厳しいものとなっている。しかしながら今後の循環経済においては電気製品の製造から廃棄にいたるライフサイクルで、資源の有効活用を考え、製品はもちろんデバイスやモジュール、部品にいたるまで徹底した再利用、有効活用を行っていくことになる。このために高温鉛はんだを使用したデバイス、モジュール部品等が循環経済においてライフサイクルの各ステージで急速に幅広く拡散することが予測される。高温鉛はんだが部品、デバイス中に使用されている場合、その検出はほとんど不可能であることは前に述べた通りである。それだけに特化物である鉛が市場に急速に拡散していくことになり、環境と経済の両立を図るためのサーキュラーエコノミーにおいて大きな課題となっている⁷⁾。

上記の概要を図2に示した。(A)は従来の線形経済での新製品から廃棄にいたるまでの過程における鉛の拡散状態を示している⁸⁾。(B)は循環経済での新製品から販売、使用され廃棄されるまでの鉛の拡散状態の概要を示した^{2,7)}。(B)の循環経済モデルは、ただ資源を循環させるだけでは十分ではない。リサイクル過程においても多くのロスや無駄が発生するからである。そこに、前節で説明した拡張型 MFCA の適用可能性がある。

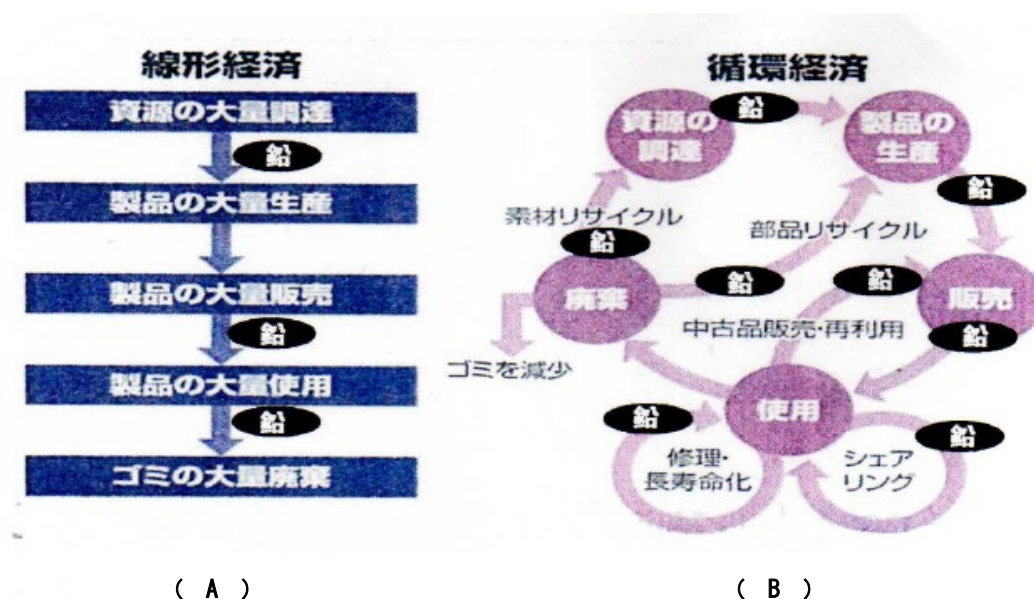


図2. 線形経済 (A) とサーキュラーエコノミー (B) での製品ライフサイクル

5. 太陽光発電の現状と今後

5-1. 太陽光発電の現状とクローズアップされてきた問題点

太陽光発電は環境に優しく、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーの重点技術として世界中で展開されている。世界中が温暖化対策の中核に太陽光発電を据えて、将来にわたって大量に製造し活用していこうとしている。すでに 2020 年段階で 250 万台が国内で使用されて

おり、今後ますます国内のみならず世界中で生産・製造され増加することが見込まれている¹¹⁾。
現在この太陽光発電において、以下の問題がクローズアップされている¹²⁾。

まず太陽光発電はRoHS 規制にかからない電子電気機器であり、そのために製品中に鉛の使用が可能となっている。つまり太陽光発電は鉛を使用した環境に負荷を与える製品となっており、中国を中心とした海外製品には鉛を使った従来の鉛はんだ（錫 37%、鉛 63%で構成。融点は183℃）が使用されている。次に大きな問題となっているのが、2019 年の消費者庁の報告で、住宅用太陽光発電が 10 年間に 128 件の発火、延焼を生じさせていることである。特に住宅用太陽光発電製品において、安全面で大きな問題となっている。

この発火に至るプロセスについて消費者庁は、太陽光発電の電子回路の経年劣化に着目し、図3に示すように以下の①から⑥のステップからなるプロセスで説明している¹²⁾。

- ① 太陽光パネルが経年劣化する
- ② パネル内の電子回路が高抵抗化する
- ③ 発電電圧がパネルの高抵抗によりバイパス回路へと流れる
- ④ バイパス回路が発熱して、この発熱によりはんだ接合の強度が低下して接合面にクラック等が生じる
- ⑤ 日常の温度差ではんだクラックが拡大する
- ⑥ はんだ接合部に断線が生じ発火する

上記のように消費者庁は、主たる原因は電子回路内のはんだ接合であると報告している。図3の第1段階にあるように②高抵抗化する。したがって発生した電圧は図3の③バイパス回路に流れ第2段階となり、常時通電して、第3段階の④接合面にクラックや断線に至るのである。

上記に関連して、図4に太陽光発電パネルの裏面に設置されたジャンクションボックスにおける接合断線事故事例について示している。上記④にあるように、バイパス回路が発熱してはんだ接合部にクラックが発生し、そのクラックが日常の温度差等の影響により拡大して断線が生じて故障を発生している¹²⁾。一般にはんだ接合の使用期限は10年とされているが、国内に250万台ある太陽光発電はすでに10年以上経過しているものが大多数であり、発火延焼の危険

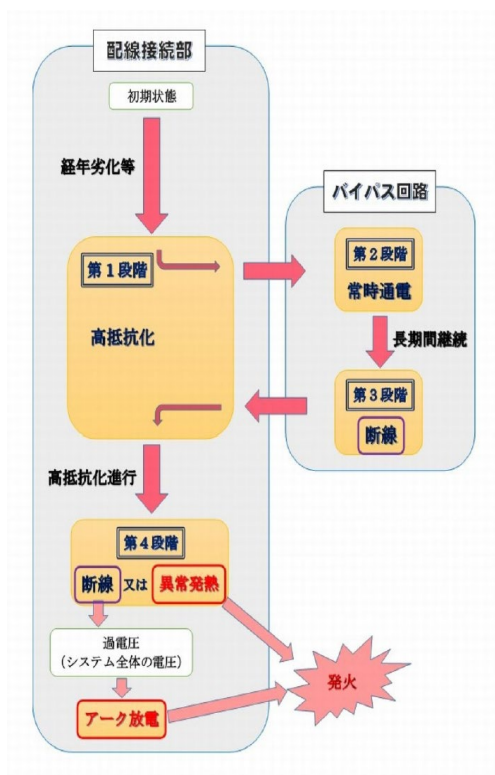


図3. 消費者庁による発火延焼プロセス

性は時間経過と共にますます高くなる。このため早急な具体的対策が求められている。

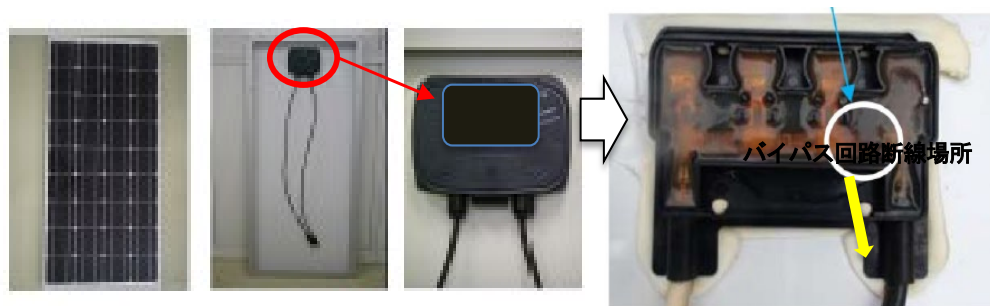


図4. ジャンクションボックス断線箇所（消費者庁報告書）

5-2. 太陽光発電における経済と環境への対応

（１）経済と環境の両立

上述したように安全面の確立ができていない場合は、経済経営面が不安定となり事業自体の継続も危うくなる可能性が生じる。このため経済経営面を確固とするために、第一に安全面、すなわち発火延焼への対策を明確にして対処を行っておくことが重要である。消費者庁は上記のように多発している太陽光発電の発火の主原因の一つが、図5 バイパス回路のキーデバイスであるジャンクションボックス内はんだ接合にあると述べている¹²⁾。このため現行のはんだ材料より高耐熱で高信頼性のある高温鉛フリーはんだで接合できれば、発火延焼防止や低減の可能性が考えられる。

第二として環境面では、現在使用している250万台もの太陽光発電が廃棄の時期を迎え、資源の有効活用の観点から廃棄が大きな問題となっている¹¹⁾。もしも使用済み製品において、高温高耐熱鉛フリーはんだを用いることにより安全性が確保できるなら、リユース化推進のための大きなメリットとなる。

上記の対応により、安全安心なリユース太陽光発電が可能になるとともに、資源の有効活用を目指したサーキュラーエコノミーへの対応が容易になる可能性も生じてくる。国内250万台、世界で5000万台と言われる使用済み太陽光発電製品の将来に向けた持続可能な太陽光発電の展開が可能となる。

（２）太陽光発電の構成部品と中小企業

世界中が環境と経済を両立させる製品として期待している太陽光発電において、この製品を構成部材部品面から考えてみた。

まず光を電気に変える半導体が搭載されたA5サイズ程の「セル」が基本ユニットとなっている。「セル」を敷き詰めて、ガラスや樹脂で固定し、畳1枚程度の大きなパネルとしたものは「モジュール」と呼ばれている。「モジュール」を並べて電氣的に配列し、「架台」に配置されたひ

とまとまりが「アレイ」と呼ばれる。これらが一般家庭の屋根に設置されている太陽光発電製品である。この「モジュール」の裏面には、発電された直流電気を集める「ジャンクションボックス」がある。この「ジャンクションボックス」からの電気は、「ケーブル」によって「接続箱」に送られ、そこから直流電気を交流電気に変える「パワーコンディショナー」へと流され、家庭内で使用されるという構成部材部品となっている。

上記太陽光発電製品において、「セル」、「モジュール」以外の、「架台」、「ジャンクションボックス」、「ケーブル」、「接続箱」、「パワーコンディショナー」のほとんどが、中小企業において製造されている。大きな問題を孕んだ太陽電池発電であるものの、国内においては持続可能な製品を構成する部材、部品の多くが中小企業によって製造する製品となっている。中小企業の方々の協力なしには、今後の持続可能な社会システムへの対応は困難と考えられる。

5-3. 拡張 MFCA を用いた中小企業への展開ステップ

現在の太陽光発電を持続可能な製品とするためには、太陽光発電の構成部品の製造を支えている中小企業の方々の協力が必須である。この課題を解決するために以下のステップを考えた。すなわち、拡張した MFCA をベースに、「調達→生産→使用→逆生産」サイクルを、シンプルな構成部品からシステム化された製品全体へと発展進化させることを検討した。そのときに MFCA が貢献できる可能性は大いにある。図 1 に示した拡張型 MFCA のステップに従って、この問題を考えていきたい。

(1) 第 1 ステップ

第 1 ステップとして、キーデバイスである「ジャンクションボックス」部品に着目し、この「ジャンクションボックス」を使い拡張型 MFCA をベースとした「調達→生産→使用→逆生産」サイクルを実施することを考えた。第一ステップのキーデバイスである「ジャンクションボックス」部品は、「外装プラスチックケース」、「ダイオード半導体/電極端子」、「ケーブル」で構成されている。そこでシンプルかつ小さな拡張型 MFCA サイクルを考え、また環境への負荷軽減と安全安心を目的に、接合に用いるはんだ材料のみを交換することを検討した。すなわち「ジャンクションボックス」部品内で、現在使用されている鉛はんだ（錫鉛はんだ、融点 183℃）もしくは中温系鉛フリーはんだ（錫銀銅はんだ、融点 217℃）から、高信頼性高温耐熱鉛フリーはんだ（ビスマス銅等のはんだ、融点 270℃）に替えることを検討した。

現行のはんだは Sn3.0Ag0.5Cu の鉛フリーはんだを用いている。このはんだ材料の融点は 217℃であるが、消費者庁の報告資料ではパネルの割れなどによりパネルモジュールに発生する温度は 190℃近くまで昇温することが確認されている¹²⁾。実際現行はんだ材料は 130℃以上の状態で接合強度が半減することが確認されており¹³⁾、はんだ材料の融点が低いため接合強度低下等が起こり、モジュール内のはんだ接合にマイクロクラック等の不具合が生じると考えられ

る。これが一日の寒暖の差が大きい夏や冬において、その温度変化によってマイクロクラックが成長しはんだ接合に不具合を起こす。高耐熱鉛フリーはんだ（Bi 系）は神戸大学と広島大学が共同で開発し 2018 年 11 月に発表した材料である¹³⁻¹⁶。250℃以上の高融点材料でかつ鉛フリーであるはんだ材料は、世界でも唯一このはんだ材料だけである^{15, 16}。すなわち、ビスマスをベースに他元素を含んだ合金となっている。融点は 270℃（固相温度 263℃、液相温度 310℃）以上で、伸びは現行の SnAgCu と同等以上の合金材料である。これまで LED 実基板を用いて現行 217℃のはんだとヒートサイクル耐熱性の比較を実施しており、現行はんだ材料を用い LED 実基板と実部品でのヒートサイクルでは 100 回以下でクラックが生じるのに対し、本開発材料では 150 回以上でもクラックを生じない高信頼性の材料となっている^{13, 14}。



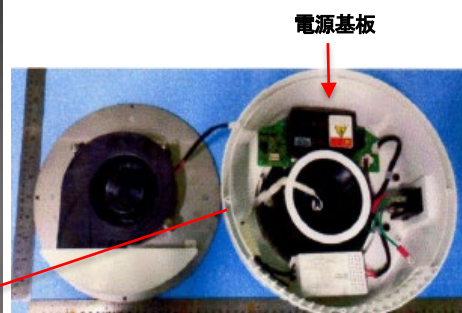
図 5. 高温鉛フリーはんだ搭載
ジャンクションボックス

第 1 ステップでは図 5 に示すように、「ジャンクションボックス」の接合はんだのみ替えることになり、従来はんだ材料と高温鉛フリーはんだ材料の価格差もあまりないことから、MFCA 的には大きな問題とならない。まず第 1 ステップとして「ジャンクションボックス」部品に着目し、拡張型 MFCA の考え方に基づいたものづくりサイクルの実用化を現在推進している。

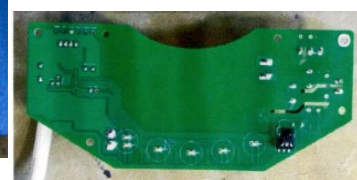
ちなみに上記高温鉛フリーはんだについては、コロナ禍の現在、図 6 に示すようにコロナ菌を除菌するサイクロン式 UV-C 除菌装置電源基板において、接合はんだの一部にすでに実際に使用し実用化を達成している。現在は機種の一部において極少量での製造を行っているが、今後の販売状況によって生産拡大も視野に入れ推進を行っている。



サイクロン式 UV 除菌装置



電源基板



高温鉛フリーはんだ一部使用

図 6. 高温鉛フリーはんだ実用化製品

(2) 第2ステップ

第2ステップとしては資源の有効活用を考えたリユース・リサイクルの方法である。現在太陽光発電の「パネル」は大企業で大量につくられている。この「パネル」のバックボードには中小企業の部品メーカーが製造した「ジャンクションボックス」が設置されている。パネルメーカーは「ジャンクションボックス」を購入して工場内で「ジャンクションボックス」をパネルのバックボードに設置し、「パネル」と「ジャンクションボックス」を一体化して工場から送り出している。使用期間が過ぎて廃棄の時期になった時、一体化した「パネル/ジャンクションボックス」が継続して再利用できるかどうか、現状では一体化したままの製品状態で判断している。不良の場合はこの一体化した「パネル/ジャンクションボックス」ごと、リサイクルなど分解解体に回されることになる。現在はほぼ半数が再利用に耐え、半数以下が解体リサイクルに回っていると言われている。

ここで重要なのは、上述したように太陽光発電を稼働させた場合、「ジャンクションボックス」に一番熱負荷がかかり、不具合が発生しやすいということである。一体化した製品の場合「ジャンクションボックス」のみが故障した場合、パネルモジュールが正常であっても不良と判定されて廃棄されてしまう。すなわち使用済みパネルの「ジャンクションボックス」のみを取り替えることが可能になれば、リユースによる再利用の割合は大幅に増加することになる。実際世界の他海外メーカー、Solexus、WindyNation 等においては、「ジャンクションボックス」のみを取り換えリユースに回すことが行われており¹⁷⁾、これにより資源の有効活用が日本以上に進んでいる。このリユースプロセスにおいても、拡張型 MFCA を実施することにより、リサイクルするのに比べて格段の資源の無駄を省くことが可能になると考えられる。

すなわち「使用済みパネル/使用済みジャンクションボックス」の一体型製品から「使用済みパネル」と「使用済みジャンクションボックス」を分離し、「使用済みパネル」に「高温鉛フリーはんだ接合新ジャンクションボックス」を搭載して「使用済みパネル/高温鉛フリーはんだ接合新ジャンクションボックス」の一体型リユース製品に改良することを検討している。具体的には図7に示すように、使用済み製品のパネルモジュールから「使用済みジャンクションボックス」を外し、バックボードからリボン接続端子が露出している状態にする。つぎに「ジャンクションボックス」内の接合部を高耐熱鉛フリーはんだで接合した「新規ジャンクションボックス」を準備し、パネルバックボードから出たリボン接続端子と「新規ジャンクションボックス」接続端子とを高耐熱はんだにて接合する。このようにして得られた「使用済みパネル/高温鉛フリーはんだ接合新ジャンクションボックス」の一体型リユース製品を展開していくというやり方である。

ここで予測される大きな技術課題の一つが、リユース製品としての長期使用可否評価方法である。環境省は「太陽電池モジュールの適切なリユース促進のガイドライン」¹⁸⁾を公表しており、使用済み製品の発電性能の検査と絶縁性能の検査の2点を基本的な検査としてあげている。

発電性能については I-V 曲線の測定と EL 検査をあげており、絶縁性能検査は目視と絶縁抵抗検査をあげている。これら使用済製品の基本的性能検査結果と、リユース製品として使用する長期信頼性期間とをどう関連づけて評価するのが大きな課題になると考えている。

上記のリユースとあわせ第2ステップとして、太陽光発電の主構成部品である「モジュール」内「セル」で発生した電気を取り出す金属線（タブ線）がある。タブ線の種類によっては現在も鉛はんだで被覆されているものがある。タブ線についてはすでに鉛フリー接合テープの各種が開発されているが、とくに高耐熱高信頼性を考えた独自の鉛フリー接合タブテープの実現においても、拡張型 MFCA の実施検討を行っている。

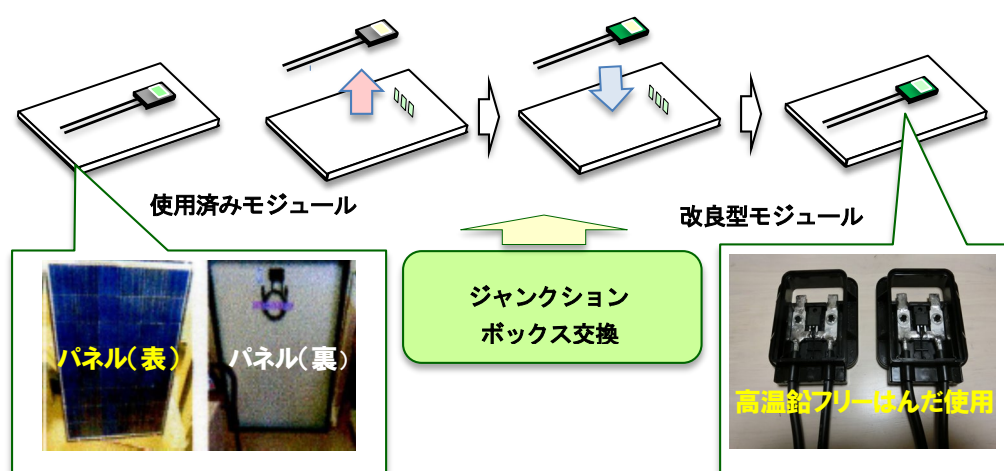


図7. 使用済みパネルと高温鉛フリーはんだ接合部品を使った第2ステップ

(3) 第3ステップ

発電製品の将来に向けた持続可能な太陽光発電の展開を目指すため、第3ステップとして、「セル」、「モジュール」、「架台」、「ジャンクションボックス」、「ケーブル」、「接続箱」、「パワーコンディショナー」等の太陽光発電全体を拡張型 MFCA サイクルで実施することを考えている。またとくに第3ステップとして、太陽光発電の主構成部品である「モジュール」において、「セル」間の接続に使用しているタブ線についても、環境負荷低減を含め拡張型 MFCA を用いて具体的に鉛フリー接合タブテープとして実施していく。

上記第1ステップ、第2ステップ、第3ステップを段階的に推進することによって、資源の有効活用を目指したサーキュラーエコノミーへの対応が容易になるとともに、Bi系高耐熱はんだでの接合により安全安心なリユース太陽光発電が可能になると考えている。

5-4. 拡張型 MFCA サイクルの進化

第1ステップにおいて部品レベルでの拡張型 MFCA サイクルを実用化後、第2ステップで「モ

ジュール」の製品レベルでの拡張型 MFCA サイクルを実施し、第3ステップで太陽光発電事業における事業全体の拡張型 MFCA サイクル実現を図っていくことを述べた。今後太陽光発電は大きく成長していくため、上記の3ステップをベースに業界の垣根を越えて関連事業を巻き込み、中小企業の方々とともに国全体で拡張型 MFCA サイクルを確立していきたいと考えている。

さてこれまで環境と経済の両立を考え MFCA やサーキュラーエコノミー等、ものづくりの観点で、太陽光発電事業における持続可能な社会システムについて論じてきた。当然ながら実際には、MFCA の拡張を推進する際の国際的な方向性や法規制の確認や、サーキュラーエコノミーとの関わりをどうしていくのか等々の問題が生じてくる可能性がある。また太陽光発電についてリユースの関係では電気電子機器の国際的な安全規格との調整も生じてくる。そのほか中小企業への展開については、各製品を高温鉛フリーはんだで実装していく場合の実務指導や設備化の問題等々が生じてくる可能性が大である。

このようなことから太陽光発電を事例として拡張型 MFCA をスムーズに推進していくためには、国内にこれらの多くの推進課題に対応できるセンターの設立が望まれる。というのも持続可能な製品の核となる将来の太陽光発電事業においては、さまざまな事業分野が関係しておりこれらを調整し統括して推進していくことが必要だからである。

同じような事例として 21 世紀初頭に日本が世界にリーダーシップを発揮し世界を引っ張っていった鉛フリーはんだの世界展開がある^{8,19)}。周知のように従来エレクトロニクス等で使用されるはんだは錫と鉛でできており、この鉛はんだが 5000 年近く世界中で使用されていた。20 世紀の末から日本が世界を牽引して鉛のない鉛フリーはんだの実用化を開始し、さらにこの技術を世界へと展開していった。この鉛フリーはんだの世界展開においてもさまざまな分野の事業体に関わっており、世界展開の道のりは困難を極めながら達成した事実を考えれば、当時の推進体制等が大いに参考になることは確かである。

当時工業製品のかなめである鉛はんだから鉛フリーはんだへのスムーズな移行を図るため、松下電器産業は、鉛フリーはんだ推進体制として大きく 3 つの連携組織を立ち上げた^{8,19)}。第 1 は環境本部内の全社環境部会である。ここで国際的な環境法や規制について情報を集め、各国の工業界との調整を行った。また国内の環境法や環境規制、また材料、部品及び設備製造メーカー等各種業界間での調整を行った。第 2 は全社技術部会であり、そこで鉛フリーはんだに関する最新技術や製造プロセス、また設備やシステムに関する技術課題とその具体的な対策が検討された。全社の研究所や開発センターの先端技術者の他、各工場の熟練技術者も部会に参加して、情報交換や課題の予測などが熱心に議論された。第 3 はテクノスクールであり、技術部会で明らかになった製造方法や評価方法などを仕様書として文書化し、国内は大阪府門真市、神奈川県藤沢市の 2 拠点、海外について米国はシカゴ、欧州はハンブルク、ウィーン、東南アジアはシンガポール、中国は上海の 5 拠点到テクノスクールを設置し、ここで各工場の製造メンバー

に具体的なものづくりのやり方について現場の生産設備を使って製造技術指導を行った。

今回の太陽光発電事業における推進体制も、上記のような大きく3つの連携組織体制が必要であるとする。第1は推進本部であり、国際的な太陽光発電に関する法や規制について情報を集め、各国の工業界との調整が必要であろう。また国内の法や規制、また各種業界間の調整も必要になると考える。とくにものづくりのベースとなる理論については、MFCAをベースとした拡張型MFCAをISO/TC323の中核へ発展させる必要がある。サーキュラーエコノミーにもリンクさせ、ビッグデータのシミュレーションが可能なものづくり理論構築も必須である。第2は技術本部であり、これは各種工業界を巻き込んだ部会となると考える。太陽光発電だけではなく、周辺の安全や制御関係の研究会、工業界も技術面で参加することが必要だ。第3は展開本部であり、ソーラー技術を横展開するトレーニングセンターである。技術本部でいかに技術見通しができたとしても、それが一般の製造担当者や作業者が実施できない技術なら横展開はできない。リユースを考えた場合、さまざまなトライ&エラーによってリユース製品が完成されていくと予測される。製品がわかり技術がわかった人材でないと、業界を越えた技術融合の調整やデリケートなノウハウ等改良が必要なリユースへの製品化は困難と考える。

上記について図8に松下電器鉛フリーはんだ推進体制と対応させ、拡張MFCAソーラー事業推進センターの組織体制概要図を示した。太陽光発電を対象としてMFCAの発展進化を進め、安全安心で持続可能な太陽光発電製品を産業界全体で実現するために、上記のような三つの連携組織体制を持ったセンター組織の早期設立が望まれる。

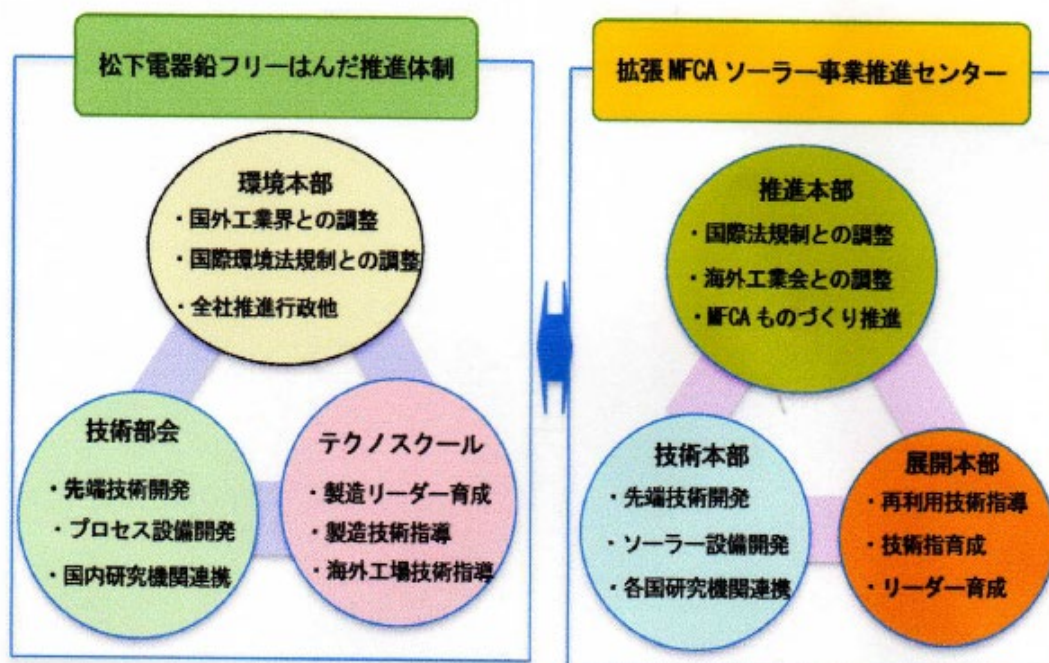


図8. 拡張型MFCA応用ソーラー事業推進センター事業体制構想イメージ

6. おわりに

MFCA は日本で生まれたものづくり理論である。資源の無駄をなくし価値を高めるものづくりには、なくてはならない、世界に冠たる実践的な理論である。数十年に渡って企業の各現場で叩かれて磨かれたものづくり実践理論であり、21 世紀の新しい社会でこれからさらなる進化が求められている。太陽光発電という今後必要不可欠な事業での課題が浮き彫りになってきている現在、この事業を対象に MFCA のさらなる進化をはかっていきたいと決意している。

最後に、筆者の末次は、2004 年に専門技術書『詳説鉛フリーはんだ接合技術—創造、開発、量産への原典—』⁸⁾を上梓したが、それからすでに 18 年の年月が経過してしまった。地球環境の現状を観じるとき、最後通告のように考え続けていることは、「環境と経済の両立した経済システム」から「環境を優先する経済システム」への早期転換である。この「環境を優先する経済システム」への転換は、地球環境破壊の急速な拡大を考えれば、その時はまさに今、現在であり、MFCA の果たすべき役割は大きいと確信している。

謝 辞

広島大学先進理工学科学研究科松木一弘教授はじめ関連企業の方々には、ご協力、ご支援を頂き、深く感謝申し上げます。

松下電器産業(株)元技監森本孝克博士には、40 年の長きにわたってご指導を賜りました。とくに鉛フリーはんだ研究開発に関してご支援、ご協力を賜り、深く感謝申し上げます。

最後に約 18 年間、論文の校正等に協力支援を惜しまなかった末次真理子に深く感謝します。本稿は、JSPS 科研 18K18577 の研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 國部克彦・中畠道靖編. マテリアルフローコスト会計の理論と実践. 同文館出版. 2018.
- 2) 横手広樹. サーキュラーエコノミーの転換に向けて. 経済産業省報告書. 2020、pp. 4-6.
- 3) 21 世紀政策研究所. 欧州サーキュラーエコノミー政策が目指すもの. 21 世紀政策研究所報告書. 2019. pp. 21-33.
- 4) 環境省. 再エネの更なる導入に向けた環境省の取り組み方針. 環境省報告書. 2021. pp. 2-19.
- 5) 日本 MFCA フォーラム. “ MFCA フォーラムとは ”. 日本 MFCA フォーラム・マテリアルフローコスト会計. 2022-3-5. <http://www.mfca-forum.com>. (参照 2022-3-10).
- 6) 浦島邦子. サーキュラーエコノミーの動向と 2050 年のビジョン. ほらいずん. 2019、5(1)、pp. 30-34.
- 7) European Commission. Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more

competitive Europe. European Commission Report. 2020, pp.16 - 18.

- 8) 末次憲一郎. 詳説鉛フリーはんだ接合技術. 工業調査会、2004.
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 3R プログラム高温鉛はんだ代替技術開発. NEDO 事後評価報告書. 2008. pp. 7-10.
- 10) 松重和美. 環境対応型鉛フリーはんだ. コロナ社. 2009.
- 11) 野田公平. 廃棄太陽光発電パネルのリサイクルシステム構築に向けて. 廃棄物資源循環学会誌. 2019. 30(6). pp. 387-392.
- 12) 消費者庁. 消費者安全法第23条第1項の規定に基づく事業等原因発表報告. 消費者安調査委員会報告書. 2019. pp. 10-50.
- 13) 末次憲一郎、松木一弘、小西琢磨、許哲峰、崔龍範. EU サーキュラーエコノミーのキーテクノロジーとなる高温鉛フリーはんだの開発と実用化展開. 第14回日本LCA学会講演予稿集. 2019. C3-03.
- 14) 末次憲一郎、松木一弘、許哲峰、崔龍範. 鉛フリーはんだの世界展開と高温化. 第14回日本LCA学会特別セッション講演予稿集. 2019. A1-22.
- 15) 広島大学広報グループ. “[研究成果]高融点化を実現した次世代用高温はんだ材料を開発ーオール鉛フリーエレクトロニクス製品化に期待ー”. プレスリリース. 2022-3-3. <http://www.hiroshima-u.ac.jp/news/48635>、(参照 2022-3-10).
- 16) 国立大学法人広島大学. はんだ材料及び接合構造体. 特許 W0-A1-2015/083661. 2015-6-11.
- 17) WindyNation. “Solar Panel Diode Replacement Instructions V2”. Windy Nation. 2022-3-3. <https://www.windynation.com/cm/Solar>、(参照 2022-3-10).
- 18) 環境省. 太陽光モジュールの適切なリユース促進のガイドライン. 環境省報告書. 2021. pp. 20-30.
- 19) 日本電子工業振興協会. 鉛フリーはんだに関する調査研究成果報告. 鉛フリーはんだに関する調査研究成果報告会報告書. 2000.

[2022.3.23 1362]