

特集にあたって

原田 幸明

近年、カーボンニュートラル、SDGsなどと並んで「サーキュラー・エコノミー」という言葉が見られるようになってきている。なかには「サーキュラー・エコノミー」の直訳である「循環経済」という言葉を使う人も多く、「循環」から「リサイクル」を連想し、本誌「金属」の特集記事もその「リサイクル」に関する特集と勘違いしている人も多いただろう。

しかし、サーキュラー・エコノミーは、単純に「リサイクル社会を作ろう」というものではない。レアメタルを例に挙げると、我が国のレアメタル貿易総額は年間4兆円規模であるのに対し、その典型的な用途である小型家電からの年間リサイクルポテンシャルは300億円規模に過ぎず現実の回収量はさらにその1割程度である。「リサイクル」だけに目を向けると「エコノミー」への影響はいまだそう大きくない。

欧州で生み出された「サーキュラー・エコノミー」は、リーマンショックやレアメタル危機を経て、それまでの大量生産を支えていた資源が価格や供給体制の面で安定性や入手困難性が増し、従来型の大量生産による利潤拡大が難しくなったという現実に対していかに対応していくかという「エコノミー」にアクセントのある取り組みなのである。しかるに「循環」はその重要な要素ではあるが、必要条件であっても十分条件ではない。何が求められているかという、資源効率(resource efficiency)すなわち、社会に与えるサービスをより効率的な資源の使用で達成することであり、量的な資源依存性を小さくしながら経済活力を高めることである。「モノ売り」から「コト売り」への転換とも呼ばれるサーキュラー・エコノミーの流れはその上にある。

しかし、これは「モノ」の放棄ではない。サービスの媒体には必ずモノがあり、モノやそのもとななる資源をより大切に使うという流れであり、その視点で「循環」も重要な要素である。そしてまた、モノづくりや、モノの処理技術も、より一層重みを増してくる。本特集は、その観点で、世界的な動きを背景にしながら、素材・資源そしてモノづくりとサーキュラー・エコノミーの関わりを、この分野の最先端の論者に論じていただくことにした。

すなわち、中村氏にはサーキュラー・エコノミーの世界動向を日本の強みをいかに生かすかという観点で明らかにしてもらい、村上氏には資源の視点からその変化と課題を浮き彫りにしてもらった。そしてモノづくりの観点からの今後の展開を梅田氏に論じていただき、その具体的な一つとして注目されているリマニュファクチャリング、リファーマービッシュを松本、早川両氏に深掘りしていただき、最後に原田からモノづくりの心と技術をその使用者に寄り添って伝えることこそ真髄であるとのメッセージを発しさせていただいた。

繰り返すが、サーキュラー・エコノミーはリサイクル屋の課題ではない。天が我々に与えた資源の恵みを自然資本を保持しながらいかに社会が享受し豊かな活力ある社会へと結びつけるかという、みんなの課題である。その中で材料屋のやることはまだまだ沢山ある。

はらだ・こうめい HALADA Kohmei

1979 東京大学大学院博士課程(金属)修了、科学技術庁金属材料技術研究所、(国研)物質・材料研究機構を経て、現在 物質・材料研究機構名誉研究員、(一社)サステナビリティ技術設計機構代表理事、サーキュラー・エコノミー・マルチバリュー循環研究会代表、2022年瑞宝小綬章受賞。

サーキュラー・エコノミーの 世界動向と日本の強み

中村 崇

サーキュラーエコノミーの概念がEUの政策として公式に提案されて久しい。EUでは現在2期目の活動に入っていると言っている。当然、その分より現実的な活動に移行しつつある。本稿は、サーキュラーエコノミーの世界標準に関する動きを紹介し、金属素材の循環における日本の強みをまとめた。

はじめに

循環型社会構築は、資源効率(Resource Efficiency, 以下REと略す)を高めることができることが最大のメリットである。そうでなければ、わざわざ移動コストと移動エネルギーを使って循環する意味はない。その資源効率であるが、United Nations Environment Program (UNEP)の資源パネルで議論されて久しい¹⁾。2015年からEUでは資源効率の言葉から循環経済(Circular Economy, 以下CEと略す)という言葉を使用始めた²⁾。その理由の一つは、REを突き詰めて評価しようとする時に用いる指標の難しさがあるのではないかと思われる。また、REは理念としては多くの人間が同意できるが、具体的な活動に繋がりにくく、その点CEの方が次の行動に結び付きやすい。ともかく資源効率の概念よりも積極的にヨーロッパ内の雇用創出に重心を移した環境政策を纏った産業政策と考えると納得がいく。本稿は、CEの国際的な動向とそれを受けて、我が国の産業政策の見直しを行い、主に素材の循環の視点からどう考えたらいいかを簡単にまとめたものである。

ISOTC323の現状

現在世界中でCEに関する議論がなされている³⁾。その中で提唱したEUの諸国が進んでいる

感は否めない。我が国も以前より、資源循環は、古くからリデュース、リユース、リサイクル(3Rs)として環境問題の解決を図るうえで重要な行動指針として提案されていた。昔からの日本語である“もったいない、Mottainai”はリユースの考え方である⁴⁾。この考え方は日本人には結構体感で理解できている。それをしっかり現代的なシステムや技術に裏付けされた形にするのが必要である。

具体的な国際化は国際標準を作成する機関であるInternational Organization for Standardization(以下ISOと略す)内のTC323で進められている⁵⁾。2019年の9月に投票が行われ、発足が決定した。TC323の議長国は提案を行ったフランスに決まった。日本は時機尚早として反対票を投じたが、発足した。それからコロナが蔓延し、対面での会議が行えないこともあったために3年半経過した現在もまだ正式文書の発行はなされていない。以下に各WG内で議論されている状況を簡単に説明する。

各WGの活動内容を下記に示す。まず、TC323の構成図を図1に示す。WG1から5まで存在し、別に2次原料取り扱いの標準化を目指すJWG14が設置されている。このJWG14はTC207SC5との合同WGであり、主担当はTC207SC5である。2次原料の取り扱いは素材のリサイクルにおいては重要な課題であるが、紙面の関係で本稿では取り扱わない。

WG1の現状を図2に示す。本来用語の定義やこ

- ・ 議長・幹事国はフランス、傘下にCAGと5つのWG
- ・ 2020年5月に新業務項目提案3件が採択されて以来、計6件が開発中

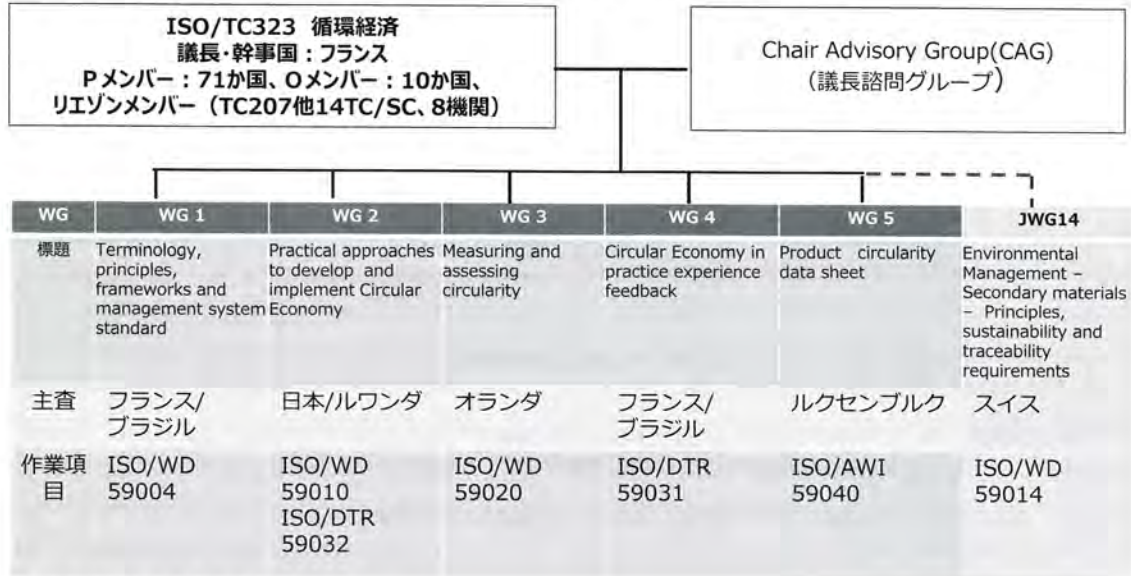


図1 ISO/TC323の各WG体制。

WG1 Circular Economy –Framework, principles, terminology, and management system standard

- ・ CEの定義、原理等の基本部分を決定する。

もっとも本質的に重要なパートとなる。現在最終のWorking Draftが提案され、それに対する各国の意見が集約されている。

2023年中にはなんとか最終文案を提出、2024年の初頭には正式文書として発行予定。本来このような基本的部分は、他のWGと異なり、もう少し早くまとめるべきであったが、各国で合意が得るのが難しく時間がかかってしまった。逆に言えばそれだけ概念が広く、多くの活動を包含するものともいえる。題目にmanagement system standardとあるが具体的なmanagement system standardは提案されていない。

我が国の方針

CEの中に廃棄物処理を含み、その中で廃棄物焼却からのエネルギー回収も定義を行い、CE内として議論を行うこの方針が通るかどうは最終的には決定されていないが、たぶん合意できる予定。ただ、一部の国はCEの中に廃棄物処理の文言を入れるべきでないとする意見がある。

図2 WG1の現状。

のTCの範囲、また原理等についてWG1で早めに議論されて確定してなくてはいけなかったと思われるが、まだ内容が議論中で確定されておらず、したがって文書化されていない。このことが他のWGでの議論の遅れに影響している。日本においてはこの原理原則のWGでリサイクルの高度化、CE内における廃棄物処理の位置、かつできればエネルギー回収も範囲に入れる方針で対応している。

図3にWG2の現状を示す。このWGは日本の市川氏がコンビナー（WGのリーダー、今回はウガンダの方と共同コンビナー）である。そのため比較的日本のペースで話が進みやすい。サーキュラー型、ネットワーク型のビジネスモデルの在り方について議論を進めている。当然であるが、サーキュラーエコノミーを進めるには異業種間の連携が鍵となる。ここでも初期の間は、事例をそろえて技

WG 2 Practical approaches to develop and implement circular economy

- 日本主導
- CE事業を推進する企業実務者向けの実践的アプローチを提供
- 1社のみではなくネットワークとして取り組むのがカギ

■ リニアなビジネスモデルをサーキュラーに変えるには？

■ サークュラーな事業を一層拡大するには？

■ CEのために製品やサービスが満たすべき条件は？

■ サステイナブル・ファイナンスをうまく活用するには？

- ビジネスモデルを提案することになっているが、その前に事例を幅広く取り上げることでTRの発行を目指している
- 事例は主にWG4で行うことになっていたが、WG4の事例は“Performance-based approaches”（新しいビジネスの在り方、複数の関係者が連携し、資源効率を上げる意味？）を中心とする事例に特化したため、高度な通常のリサイクルも含めた事例を取り上げたTRを目指した
- 現在一度WDの投票は通ったが、CAGでクレームが付き、再度修正をかけた投票にかけ、正式採用が決定した

図3 WG2の現状

WG3 Measuring and assessing circularity

- CEの計測・評価
- 異なるレベルの評価の考え方があることを踏まえて議論
- 測る項目(インプット/アウトプット)の議論が進行中、いち早い意見発信が必要(熱回収、エネルギー回収等)

	レベル	説明
様々のCircularityが議論されている	地域 (Regional)	地域的領域(都市, 国, 国際機関等)
	組織間 (Inter-organizational)	組織のグループ(業界間, 企業間ネットワーク等)
	Organization	個々の組織(企業, 消費者等)
	Product	単一の製品

- 最初のWDの基本がまとまりつつある
- ただし、ここで文章の中にしっかりとした要求事項を入れる議論がられ、その件についてまだまとまっていない。
- 日本として重要な廃棄物からのエネルギー回収についても真向から否定されない？雰囲気となっている

図4 WG3の現状(出所: The WBCSD 'Circular Metrics, Landscape Analysis' of May 2018 を参考に作成)。

術レポートを提案することにしてはいたが、議論の結果、事例はすべてWG4で取り扱うことになった。後述するが、WG2で収集した事例もほぼ完成し、投票も終わって、最後の文書の仕上げ段階に入っている。

次にWG3についてまとめたものを図4に示す。ここはまさにサーキュラーエコノミーの本質であるサーキュラリティの指標を検討するWGである。

当然であるが、サーキュラリティの捉え方は対象範囲、具体的な対象物に依存する。現段階ではこの分野の数値化ではなく、基本的な考え方についてまとめを行っている。

本来今回のWG文書は必須の要求事項を検討しないと合意の下に進めてきたが、現在このWGではその点を入れるかどうかも含めて議論が行われている。

WG 4 Circular Economy in practice: experience feedback

- ・特定の論点を分析、ケーススタディ・ベストプラクティスを提供
- ・第1号文書では“Performance-based approaches”の事例を分析（機能経済、サービス経済、PaaS (Product as a service) 等がキーワード）
- ・日本からも事例群を紹介、1件採用の見込

事例：(株)クラダシ「KURADASHI」

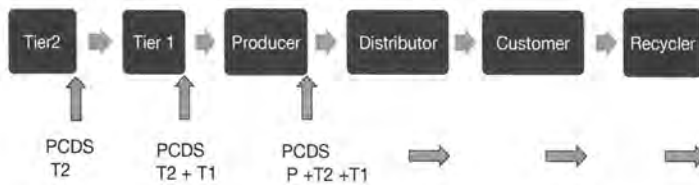
- ・2015年2月からサイトを運営
- ・会員数約23万人、協賛企業数約850社
- ・2021年3月には500トン/月の食品ロスを削減
- ・売上高の1~5%が環境保全や医療・福祉サービスの充実など、社会課題の解決に取り組む
- ・団体への支援金となり、累計支援金は14団体で6,000万円に到達



図5 WG4の現状(出所:「KURADASHI」, 運営株式会社クラダシ(代表取締役社長 関藤竜也)).

WG 5 PCDS (Product Circularity Data Sheet)

- ・製品のサーキュラーエコノミーの側面に関する情報を報告・交換するための方法論と形式を提供する標準の開発を目指す
- ・ルクセンブルク国内で先行している取り組み



議論は始まったばかり、まだあまり進んでいない
ただ、CEのDX化の際に大きな影響ならびにWG3とも関連が出てくるので
要注意

図6 WG5の現状(出所:ルクセンブルク経済省“Circularity Dataset Standardization”, ホームページ <https://pcds.lu/>).

日本は、このWGにおいてもリサイクルの指標としてエネルギー回収も入れるように働きかけを行っている。サーキュラーエコノミーの理想からするとエネルギー回収を入れたくない委員も多く、まだ完全な形で決着していない。

図5にWG4の現状を示す。前述したようにこのWGは事例であるので、比較的まとまりやすいと考えていたが、結構議論が出て、これもやっと文書化直前にまできた状態である。この図4には最初の技術レポートに掲載される日本からの提案を示している。複数の提案を行ったが、最終的には、複数のプレイヤーの協力が明示的でないといけなると活動の具体的なカーボンフットプリン

ト(CFP)の数値がはっきりしていないといけななどの制限がかけられ、この提案が残った。

もちろん、この事業は素晴らしいものであるが、あまり大規模な活動でもないで、具体的なCFPの値も大きなものではなかった。ただ、このような公共的かつ食ロスにかかわるようなテーマは多くの人間の賛同が得やすい。この点は、注意しておく必要がある。そのほかWG2で議論したレポートも投票も終わり、正式にレポートとして発行が決まっている。こちらには日本からの提案も複数記載されている。

次にWG5の状況を図6に示す。

このWGは少し遅れてルクセンブルグから提案

された。議論はまだ始まったばかりと言える。コンピナーはルクセンブルグの政府の担当者が指名されている。このWGはサーキュラーエコノミーを具体的に進めるために必要な情報を如何に伝達するかを議論している。これもWG3と同様大変重要なWGである。特に最近EU内で進められているデジタルプロダクトパスポート(DPP)との関係で、多くの注目を集めている。腰が重かった日本企業も積極的に対応を始めたところである。EU内では並行してバッテリーパスポートの議論が進んでおり、最近の議論は多少それに引きずられている感もある。我が国としても注意が必要である。このWGではまだ具体的な対象物については議論が行われていないが、このデータの管理をどうするかなど大変重要な議論も始まった。

以上のようにコロナの影響とサーキュラーエコノミーの内容の複雑さのために送れていた議論も最近急速に進み始めた。その背景にはEUのDPPの進み具合に歩調を合わせたいというEUの一部の国の思惑が見え隠れする。だからこそ日本としては、拙速を避け、十分な議論を行い、慎重に進めるように持っていく必要を感じている。このような国際化の議論を行うにつれて、この分野

における日本側の人材が不十分ではないかと感じることが多い。この人材育成は大きな課題である。

CEの本質

CEでは、本質的には資源生産性が向上し、将来の地球にかかる負荷低減を図り、かつ経済発展を継続することにある。そのために製品、部品、素材の循環利用、かつ食料供給も継続性をもつことを目標としており、両者を循環利用することをイメージするためにEllen MacArthur財団はサーキュラーエコノミーの概念図を提案した⁵⁾。ここでは環境省が日本語訳を行ったものを図7示す⁶⁾。ただし本稿では、多少図の表現を変更した。変更箇所は、左側のバイオ系循環の部分を生圏とし、広げたところである。

この図が提案され、頻繁に引用されるようになったため、なんとなくこの図を用いて説明される機会が多い。ただし、この図をよく見ると枯渇性資源の循環については、イメージが先行し、現実的でないところが見受けられる。特にこの図には廃棄物処理過程が含まれていないため、CEに廃棄物処理が入らないという主張が行われる場合がある。

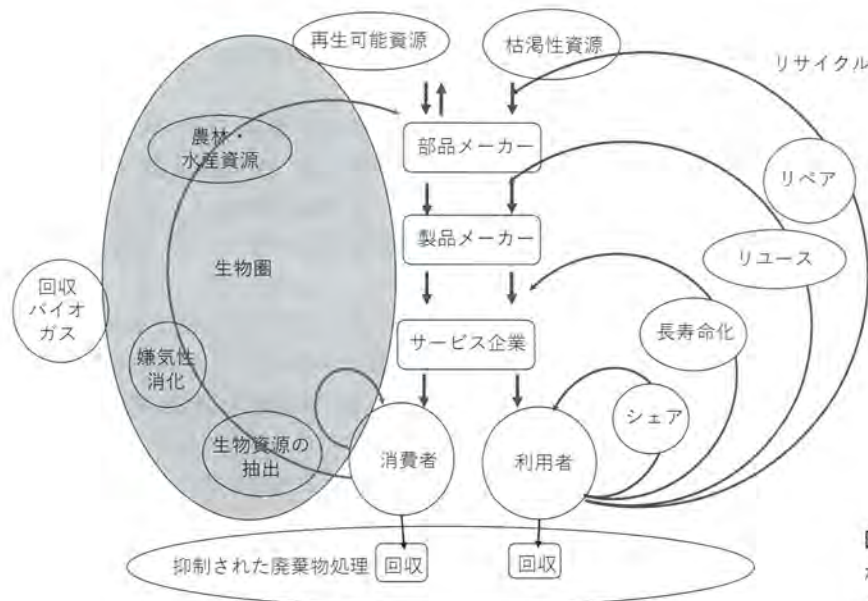


図7 エレンマサー財団が示したサーキュラーエコノミー概念図の日本語訳。

図8に日本の経済産業省でまとめられた循環経済ビジョンのCE概念図を示す⁷⁾。この図は生物圏の循環が含まれておらず、そのぶんわかりやすい、特にポイントは再利用中心のビジネスと従来のリサイクルのビジネスを大まかに分離して記載されている点である。図7のエレンマッカーサーの図では、製品の長寿命化やリユースを強調するあまり、それだけでかなりの部分が循環されるように表現されているが、現実の世界では、長寿命化、リユース促進の現場でリサイクル対象物が発生するし、当然従来の廃棄物も発生する。

CEビジネスを考えるにあたって、CEと従来の経済と何が本質的に異なるのかを確認する必要がある。その違いの本質の一つは、従来外部化されていた環境コストを内部に取り込むことである。

例えば、製品のカーボンフットプリントを考慮し、それを最小限にするためのサプライチェーン

を考える。ここでは、製品の使用をより効率的行うために、製品を売るのではなく、その製品からもたらされる便益を売る、いわゆる“もの売り”から“こと売り”と言われるビジネスへの転換が有効である。このように突き詰めれば、従来の経済の中に環境コストを内部化し、環境対応を取りながら、従来コスト的に不利であった高環境対応製品・サービスの合理的な使用を進めるための提案とみることができる。つまりこれは“環境対応をすること”に新しい付加価値をつけていることに他ならない。この手法は単にCEの概念を出したから動くものではなく、そこに実利を生み出さないと付加価値がでない。そのためにEUでは大きな枠組みとして“Green deal”⁷⁾を提案し、かつカーボンプライシング⁸⁾も進めている。もちろんESG投資⁹⁾もその一環であり、遅れていた日本もやっと活発になってきた。

循環経済(サーキュラーエコノミー)と成長志向型の資源自律経済

- **線形経済**：大量生産・大量消費・大量廃棄の一方通行※の経済
※調達、生産、消費、廃棄といった流れが一方の経済システム 'take-make-consume-throw away' pattern
- **循環経済**：あらゆる段階で資源の効率的・循環的な利用を図りつつ、ストックを有効活用しながら、サービス化等を通じ、付加価値の最大化を図る経済
- **成長志向型の資源自律経済**：資源循環経済政策の再構築等により、汎用的な工業用品や消費財も射程に含め、国際的な供給途絶リスクを可能な限りコントロールし、国内の資源循環システムの自律化・強靱化を図るとともに、国際競争力の獲得を通じて持続的かつ着実な成長を実現する経済。



図8 経済産業省でまとめられた循環経済ビジョンでのCE概念図。

本来我が国では、3Rsを推奨し、さらに多くの個別リサイクル法の整備により、我が国の資源循環は世界でトップクラスである。ただ、EUのCEの概念には従来の3Rsの枠組みを超えた部分があり、産業構造の変更を促す力が込められている。具体的には現在のIT技術をダイナミックに取り入れ、従来の動脈産業とリサイクラー、廃棄物処理業者も一体となった経済圏を作り上げる方向に進むと思われる。さらにCEは、食料、有機系物質（現段階で光合成起原の素材）の循環、無機系素材（枯渇性）の循環をできるだけショートカットで行うことを目指しており、いわゆる動脈と静脈の産業の融合も視野に入れている。

CEも経済であるので、その過程において付加価値の創造が必要である。それではCEを行うときの付加価値はどのように生まれるのであろうか。従来のリニア経済とCEの違いを簡単にまとめたものを図9に示す。

左側が現在でリニア経済、右側が循環経済中心である。よく言われるように“もの”から“こと”への転換が進むと考えられる。リニア経済では環境コストは外部経済であったが、循環経済では内部化される。当然その際に廃棄物処理コストも最小化が求められることになる。また、気候変動リスクを回避するために資源生産性を挙げなくてはならず、そこで気候変動対応にかかるコストの吸収も必要となる。それをすべて経済合理性で行う

のがサーキュラーエコノミーである。

環境コスト発生事例と対応を下記に箇条書きで示す。

- 資源循環による将来の発展の担保と環境コストの吸収
- 環境コストとは 人類？もしくは現在の地球の生態系の確保のための費用
- 廃棄物処理費用も含む
- CO₂ 処理はまさに新たな廃棄物処理
- CEを進めれば廃棄物処理業は縮小 CEの進化と廃棄物処理業はトレードオフ？
- 直接的な耐環境汚染物質処理費 便益はだれが受ける 人類全体
- 例えばダイオキシン等 POPs の処理コスト
- 重金属の処理コスト 海洋投棄の防止
- 海洋プラ廃棄の禁止と廃プラの処理

基本、リニア経済では、“もの”の価値が“サービス”の価値より大きい。本来サービスで受け取る価値を“もの”に乗せてビジネスを行っていたともいえる。CEに移行すると、“もの”と“サービス”の価値が逆転する。またリニア経済では、環境コストは主に外部経済とされ、はっきり言えば税金の形で取り扱われることが多かった。CEではそれを限りなく内部化することになる。その実例の一つがカーボンニュートラルで気候変動の原因とされるCO₂発生抑制である。簡単に言えば

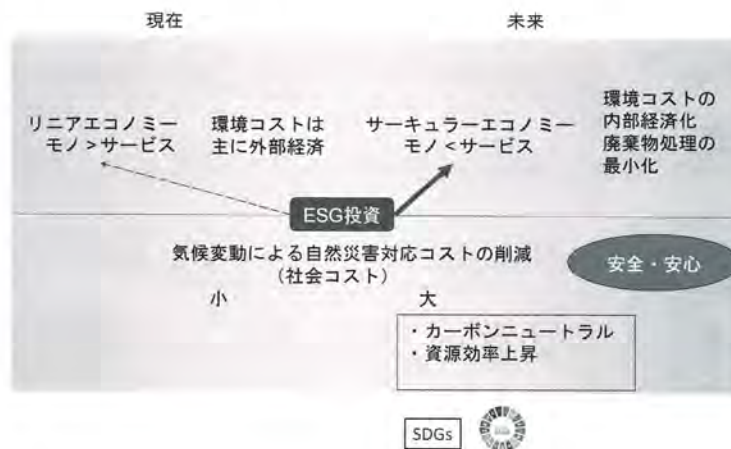


図9 サークュラーエコノミーの付加価値の源泉。

CO₂はエネルギー利用の際の廃棄物である。これは今まで無料で大気放出されてきた。一部直接的に生命体にかかわる部分、例えば重金属やダイオキシン等 POPs には規制がかかっていた。カーボンプライシングは明確に排出される CO₂ に対して負の付加価値を付け、経済活動全体で発生抑制を図ろうとしている。気候変動問題の議論が、具体的に進まなかった理由は、CO₂の発生にどのような形で負の付加価値を付けるのか国による違いがあまりにも大きかったためである。この課題はエネルギーの在り方について本質的な問いを投げかけており、現在のパリ協定¹⁰⁾の目標達成には多大の投資が必要である。EUでは各国の政府機関の資金では十分に達成できないことを考え、タクソノミー¹¹⁾の考え方を提案し、民間も含めた投資の呼び込みを考えている。

したがって、CEの大きなモチベーションは、未来の資源制約の課題を資源生産性の向上でカバーし、かつ過剰 CO₂ 発生から生じる負の付加価値をいかに物質循環で吸収できるかとなる。ある意味、未来の安全安心をいかに評価し、そこに付加価値を認めるかが重要な点となる。特に投資は近い、遠いはあっても未来の価値を創造するために行うものであることを認識すれば、現在の ESG 投資も納得がいく。ただ、人間によりどのくらいの未来を見るのか、またそれをどう評価するのは大きく

異なり、人間は目の前に利益に走りやすい性質を持ちやすい。そこにある指針を与えるのが SDGs の概念と言える。未来を見つめるための具体的な行動指針として SDGs を捉えることができる。

日本の強み

以前から言われているが、我が国は製造業が強いとされている。ただ、最近になってわかってきたことであるが、製造業で強いのは自動車産業と素材、材料製造の分野が中心である。もちろん他の製造分野でまだ競争力を発揮している部分もあるが、以前に比べると脆弱化している。その代表例が半導体製造で、現在官民挙げて再生中である。

以下、まだ強みが残っている素材、材料の分野、本誌の名称でもある金属に関して循環の強みと課題について述べる。ただし、サーキュラーエコノミーを考える場合、長寿命化、リユースとリサイクルの立場違いを明確にしないといけない。

高度な資源循環を実現するための技術としては、必ずしも狭義のリサイクル技術だけでなく、材料特性そのものの技術についても重要である。素材・材料の資源循環に資する技術としては図10に示すように長寿命化など材料そのものに関する技術とリサイクル支援技術に分かれる。高性能素材製造については、鉄鋼製品、アルミニウム、銅等の加

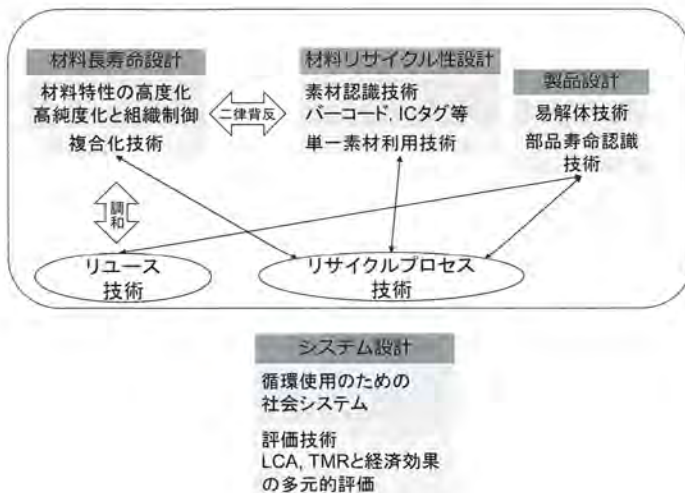


図10 資源循環にかかわる材料技術。

工品製造技術、かつリサイクル技術について日本は大変優れており、かつ素材製造からリサイクルまで一貫した技術を保持している。さらに自動車等最終製品メーカーとの連携も強い。まさにこれが大きな強みである。

また、製品化の際に易解体設計性も重要となるが、そのような観点から動脈系の製造業を中心にリサイクル技術まで連携も進んでいる。ただし、注意が必要なのは、長寿命化とリサイクル支援技術は本質的に二律背反の可能性もあることである。リユースが主体になるとリサイクルの活動が短期的に縮小する可能性が高くなる。その一例として、現在多くの研究開発、ならびに製造設備の増強が行われている LiB を例にとる。サーキュラーエコノミーの視点から考えると、①長寿命化、②リユース、③リサイクルの順となる。これらは EU のサーキュラーエコノミーのパッケージの中に明記されている。ところで、長寿命化には多くの研究開発が必要で、バッテリーの構造、電極、電解質、セパレーターの技術革新が必須であり、実際に進んでいる。それではリユースはどうであろうか、基本的には長寿命化と相性がよく、矛盾はしない。ただ、診断技術については革新が必要となる。一方リサイクルはどうかというと長寿命化、リユースが進むと、大量のリサイクルが必要になるには時間が必要である。車載用だと平均で 10 年、その後種々の形でリユースガス生むとさらに数年寿命が延びる。リサイクルはその後の問題であるので、大規模な設備、ビジネスが少なくとも電池が製造されて 10 年はおかかると思われる。その間は、製造工程で排出される端剤が対象となる。もしくは途中事故を起こした車載から出てくるようなものが対象で受け入れる量は不確かである。さらに長寿命化で指摘したように電池そのものが大きく変容する可能性もある。そうするとリサイクルで回収した資源を使用できない可能性もある。そのような対象物に対してリサイクル技術開発を進め、ましてや大規模な設備投資を行うのは大きなリスクと言える。このことから本来リサイクルのプロセス技術はそれぞれ最終製品のライフサイクルの

状況と密接に結びついて検討されるべきものであるが、現在までにそのような動きは少ない。さらに全体として、総合的に材料を循環使用することによる環境負荷低減の評価技術も重要な課題である。これをどう解決していくのかは、社会システムの構築とそれを運用するプレイヤー(必ずしも民間企業ではない可能性もある)である。それぞれ各分野で細かい技術が存在するが、それは各材料によって大きな違いがあるので、これ以上は書ききれない。

まとめ

CE の国際化の動きと、CE を実現するための技術課題のポイントについて述べた。個々の優れた材料技術、リサイクル技術を生かすには製造メーカーとリユース業とリサイクル業の密接な連携が必要である。残念ながら動脈系製造業とリサイクラー、廃棄物処理業との連携は十分でなく、その連携を進める情報処理技術も不十分である。特に社会システムづくりは我が国の不得意とする分野である。一方、循環に関する意識は非常に高い。この気持ちを保持し、連携を進めれば、実際にサーキュラーエコノミーの実現に近い位置にあると思われる。切り札は、日本人の地味であるが、きつちりとした性格、行動にあると言える。

サーキュラーエコノミー型産業の構築に向けて我が国関係者に注文したいのは、下記のとおりである。

廃製品を資源循環する場合、始めに行うことは、解体である。解体は同じものが連続して流れてくることはまずなく、種々の形態の廃製品が持ち込まれる。そのようなものに対して、始めは大きく素材別に解体がなされる。この部分の自動化技術が重要で、ここにはロボット技術が有効であることはすぐに理解できる。ただ残念ながらロボット研究者はこのような分野には興味を持たない。また、解体の結果として生じる 2 次原料の情報制御も IoT 技術として大きなインパクトが予想されるが、またこれもこのような分野に正面切って IoT

を導入するという情報を情報処理研究者は考えない。このミスマッチを是正するような国のプロジェクトが重要である。この部分は、静脈系の企業の大企業化に伴い、ある意味での2次資源の情報公開とつながる。したがって、既存の企業からの大きな抵抗が予想されるが、世界的規模での資源の流れ、また社会的企業価値の存在を考えれば避けて通れない部分であり、この部分の推進にはある程度国の指導も重要と言える。

参考文献

- 1) UNEP: Decoupling: natural resource use and environmental impacts from economic growth, <http://www.unep.org/resourceefficiency/Publications/Publication/tabid/444/language/en-US/Default.aspx?BookID=6195>
- 2) COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe¹⁸ COM/2014/0398 final */ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52014DC0398>
- 3) S. Murakami, K. Shimizu, C. Tokoro, T. Nakamura, Role of Resource Circularity in Carbon Neutrality, Sustainability, 14 (24) (2022), Article number 16408. DOI: 10.3390/su142416408
- 4) <http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=3713>
- 5) <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- 6) <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h28/html/hi1601030301.html>
- 7) www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004-1.pdf
- 8) https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- 9) <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>
- 10) https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance_en
- 11) <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- 12) <http://www.wfwm.com/articles/the-eu-taxonomy-for-sustainable-investmentmining-metals-minerals/>

なかむら・たかし NAKAMURA Takashi

1968 九州大学工学部冶金学科卒業。修士を経て、1977 博士課程修了。同年 九州工業大学工学部講師。1991 同大工学部教授。1998 東北大学素材工学研究所教授。2017 東北大学多元物質科学研究所教授。2017 退職。名誉教授。同年 福岡県リサイクル総合研究事業化センターセンター長。現在に至る。2011 資源素材学会会長。

資源問題の今とその解決に資する サーキュラー・エコノミーの方向性

村上 進亮

本稿では、まず天然資源の「資源問題」を整理、新しい問題が現れていると言うよりは、多くの問題がかつてより深刻になっていることと、それを社会が認識したことが重要であることが明らかになった。その後、CEの目指すものの流れを整理した。そして循環側の「資源問題」も少なくないことを明らかにした上で、CEの在り方を整理、ライフサイクル全体の適切な設計、評価、そしてそのための情報の共有が重要であることを明らかにした。

はじめに

資源の安定供給の確保は、政策担当者にとっても、当然業界にとっても常にもっとも重要な目標の一つである。このある意味古典的とも言えるテーマが昨今脚光を浴びてしまっているのは、ロシア-ウクライナ情勢だけによるものではない。

ここ20年弱、クリティカリティの研究が盛んであったこともあり、供給リスクであるとか資源の社会にとっての重要性の評価手法の整理は学においても、より現実的な政策現場においても進みつつある¹⁾、それにも関わらず次々と新しい論文が現れるのは、新しい評価手法が現れているだけではなく、残念ながら新しいリスク要因が現れているからと言う側面もある。

本稿では、まず現時点で考えるべき供給リスクを整理することで、いわゆる「資源問題」の現在地を探ることとする。まず、天然資源供給における資源問題を整理し、その後、サーキュラー・エコノミー(Circular Economy 以下CEと略す)の目指すものの流れとこれが資源供給に与える影響を整理した後、今度はCEの目指す世界における多様な「資源問題」を再整理する。その後最終的にどのようなCEを目指すことが、残念ながら天然の金属鉱物資源等については資源小国である我が国にとって望ましいのかを整理する。なお基本的に対象は金属鉱物資源とする。

天然資源の資源問題の現在地

ここでは、供給リスクというかより広い意味での供給にかかる懸念材料を整理する。まず古典的に言われてきた、枯渇、に近い点を金属鉱物資源について考える。

元々専門家の中で、絶対的な枯渇を金属鉱物について論じることは超長期的な視点以外ではなかったかと思うが、昨今ようやく資源の専門家以外の、例えば持続可能性を論じる環境科学に近いような専門家の中でも用いられるようになってきた用語が「劣化」である。広い意味での品位の低下と呼んでも良い。

まず考えるべきは、狭い意味での品位、すなわち目的鉱物の鉱床中の濃度の低下である²⁾。この傾向は二つの形で顕在化しており、一つは実際の操業中の鉱山における品位の低下と、探査において高品位でそれなりの規模を持つ新規鉱床の発見が極めて少なくなってきたことの2点である。鉱山の経営戦略はそれぞれだが、時間的な割引率を考えれば、その初期段階で品位の高い場所を優先的に掘ってしまうことは考えられるため、前者だけで強く主張するのは難しいのだが、後者の探査による発見の問題は長期的な視点からもより深刻である。

これ以外の物理的な側面で言うと、不純物(特に忌避物質)濃度の上昇、採掘現場の難化(特に大

深部化)があげられる。前者は選鉱および製錬によって対処される問題で、銅鉱石中のヒ素などはすでに問題が顕在化し技術開発も進みつつある³⁾。ただ技術的に乗り越えたとしても費用の増加は避けがたく、また除去したヒ素の処理の問題は残される。後者は露天掘にとっては剥土比の悪化という、経済的・環境的両面での大きな費用増加をもたらす。そのため大規模坑内掘手法であるケービング法の適用などによって解決を目指しているものの、鉱体の崩落現象を用いることから制御が難しく決して技術的に容易なものではない。

劣化に関する側面の中で環境的な意味でのコストについて述べたが、採掘現場の難化については、そもそも環境面からアクセスしにくい現場というものが含まれ、そこには土地改変⁴⁾と水利用(汚染)⁵⁾という二つの要素がある。例えば生物多様性のホットスポットにある鉱床は仮に高品位であったとしても採掘は難しいし、水資源の限られた現場でも結果は同じことである。これらは鉱床そのものの問題ではなく、採掘環境の劣化である。同様に再エネによる電力の調達が増加する場合も、結果的にカーボンフットプリントが増加するという意味において同じ意味で使いにくい。

ここまで鉱体そのものの劣化、そしてその周辺環境も含めた採掘現場の難化の2点に触れた。次に社会環境的な意味での懸念に触れねばならない。鉱山開発において、海外企業が鉱山開発を実施する際には、現地にもどのように利益還元をするか、また環境に配慮した操業を行えるかなど、現地コミュニティとの関係が重要な論点であること自体は古くからよく知られている。状況が変わりつつあるのは、そうした事態が現地だけではなく、社会一般に広く知られていること、また問題が起こればその情報が広く伝播されることである。

こうした状況を受け、法的な許認可だけではなく、社会に認められねばならないと言う意味で、昨今はSLO(Social License to Operate)⁶⁾を得なければならないというような言い方をよく使うが、このときのSocialは現地のコミュニティと、より広い社会一般の双方を指す。

逆に現地よりもより広範な社会に認められることに重きが置かれるようなポイントとしては、紛争鉱物や児童労働と言ったどちらかという倫理的な側面に近い部分がある。例えば水銀の問題の一つの発生源としての小規模金採掘(artisanal and small-scale gold mining, 以下ASGM)⁷⁾などはよく知られた例である。

こうした問題とも間接的には関係するのだろうが、資源国による資源ナショナリズムもまた古典的で、かつ近年重要度の増している話題である。一例としてインドネシアのニッケル・鉱石輸出禁止の問題はWTOへEUが提訴、これを支持する裁定が出たものの、インドネシアが上訴するに至っている⁸⁾。東南アジア諸国は我が国にとって重要な資源供給国でありこうした動きは見逃せない。また、資源保有国がそこから得られる便益を極力自国内に確保しようとする動き自体は、責められるものではなく、より良い解決策が望まれるところである。

本節をまとめると、枯渇性資源である金属鉱物について、かつては枯渇と呼んでいた物理的な資源の入手可能性については、劣化が急速に進んでいることが顕在化しており、その解決策は完全には見だせていないこと、環境問題はSLOにかかわるような社会・倫理的側面とあわせて社会全体に広く知られているがゆえに、より重要なものになってきていること、そして資源保有国による資源ナショナリズムの動きは激化していること、の大きく3つの側面からそれぞれ問題は深刻化している、というのが天然資源の資源問題の現在地である、といえよう。

CEのもたらす資源利用の姿

CEを普及させる上で大きな役割を果たしていると考えられる、エレンマッカーサー財団(The Ellen MacArthur Foundation, 以下EMF)によるよく知られた解説図に再生可能資源というか資源の再生を左に、人工物の資源循環を右にそれぞれ蝶の羽のように描いたButterfly Diagramと呼ばれるも

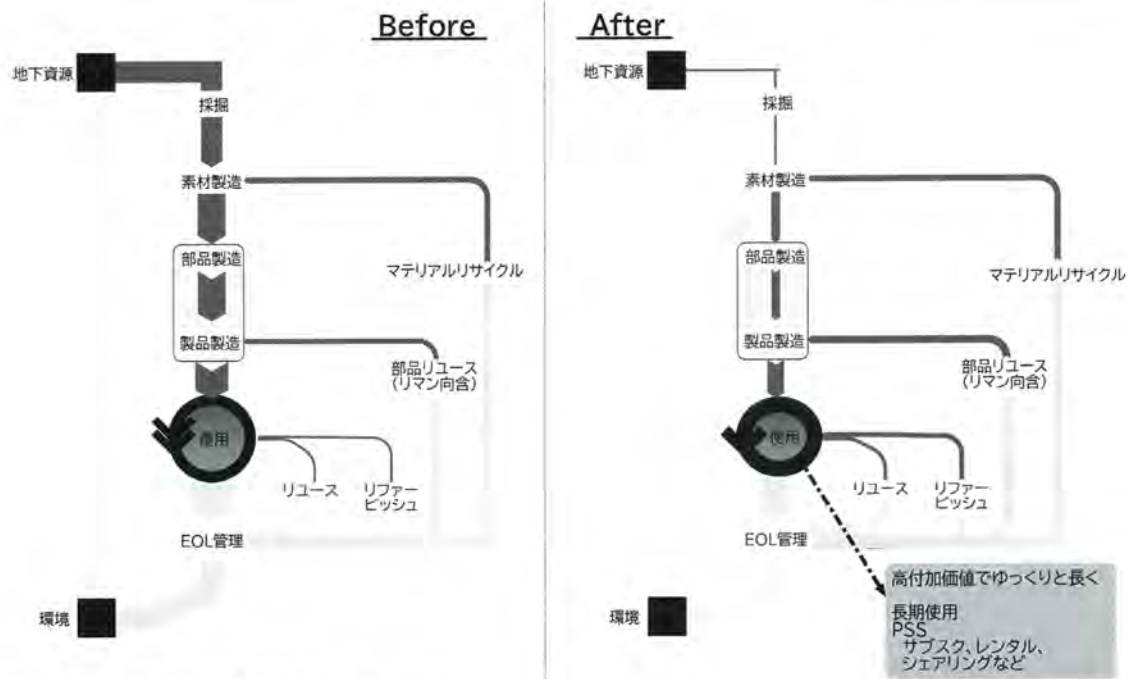


図1 CEの社会実装前後でのものの流れの変化。

の⁹⁾があるが、それをもとに金属鉱物についてCEのもたらす変化を描いた図を図1に示す。

図1から分かるように、流れに劇的な変化は生じない。図の左側の現状については、リファーマピッシュやリマニュファクチャリング(図中ではリマン)など、ほぼ存在していないものを書いていることもあるが、特に金属の流れを考えると、コンセプトとしてはすでに出そろっているとんでもない、にもかかわらず天然資源の採掘量や最終処分量(図中のEOL(End Of Life)管理から環境への流れ)が劇的に減っていることにはいくつか理由がある。それは図の右側の循環の流れがそれぞれ太くなっていることもあるが、そもそも使用に入るフローの太さ、需要の量が下げられていることによる。使用という段階の中での使い方が重要である。図中にも示したとおり、長期使用を進めることで新規需要を減らす、もしくはある種類のPSS(Product Service System)、サブスクやレンタル、シェアリングなどを通して、社会で存在している使用中の製品の稼働率を上げることで製品の需要量自体を下げるなどへの効果が大きく期待さ

れている。

これらに限らず、より大きなリユース、リサイクルといった循環も含めてCEの概念の中で重要な部分は「一度社会中に投入した資源はもっとも価値の高い状態で循環させ続ける」ことである。これは資源効率の高い資源利用そのものであって、これを通して枯渇性資源の利用量を下げ、また最終処分量や違う意味での汚染物質の排出などをなくしていくことが原則とされている。

もう一点気にすべきは環境から地下資源の間には流れを引くことができる点である。ただしこれは金属の場合には現実的ではなく、再生可能資源であれば我々の社会にとって検討しうる時間軸でこの「再生」が起こることになる。素材系で言えばバイオマス由来のプラなどはこれにあたる可能性がある。逆に枯渇性資源である金属については、このフローがかけないがゆえに採掘して社会に取り出すという行為が不可逆であり、よってその量を減らせと言われることになる。特に前節で述べたように、新規の優良な鉱床の発見が減ってきている今、この点の重要性も高まっている。

循環資源の資源問題

時折循環資源には供給リスクがないかのような議論を見かける。ここにはおそらく背景があって、これまでは循環資源が資源供給全体の中の主役でない場合が多かったからであろうと思う。資源供給全体の中の半分以上を、つまり時折聞く発生した使用済みの中のどれだけがリサイクルされるかというEOL-RR (End Of Life Recycling Rate)ではなく、供給サイドにおけるリサイクル原料の比率 (Recycled Contents, 以下RC) が半分を超える金属というのは非常に少ない。そもそも世界的に金属に対する需要が増え続けている限り、EOL-RRが100%であってもRCは100%にはならないので、RCが50%になるというのは中々難しい。

原料の中に占めるシェアが少ないうちは、その量が多少増減しても全体に与える影響は少ないわけだが、例えば国内スクラップだけで供給全体の半分だとか、7割だとかになるとこの量が安定しないことの問題は大きい。ここで循環資源固有の問題として量的な安定性への懸念をあげておきたい。

循環資源とは加工屑以外は老廃屑、すなわち使用済み製品からの回収である。そして使用済みになるかどうかはユーザーの意志決定によるものである。鉱山で採掘を行うかどうかはそのオーナーによる意志決定だが、都市鉱山の場合、これを回収し素材へ回そうとする静脈産業はこの意思決定権を持たない。鉱山においても採掘する企業にその権益を与えるかどうかは、元々の所有者、例えば国家等の意思決定ではあるが、鉱山企業は長期的に採掘する権益を得て初めて操業を開始することがほとんどである。ところが静脈産業は発生した使用済み品を処理する契約を持っているだけで、その量が確約されているわけではない。

その典型的な事例は、2005年前後あたりに急に使用済みPETボトルの輸出が増え、国内の静脈へ回る量が減った事例である。これは原油価格の高騰やそもそもの需要の拡大により、輸出価格が急

上昇した使用済みPETボトルが国内の容り法ルーフトに流れずに輸出に回り、国内の原料不足がおきたというものだが、当時国内の関連企業は大変な苦勞をしたときく。しかもその後、リーマンショック等で価格が下落した際には、輸出できなくなり逆に困ったステークホルダーもいたようである。

幸い関連する素材産業全体から見て、それを左右するほどの供給量ではなかったことから、そうした問題にはならなかったが、ここでそのシェアが高ければ大きな問題になっただろう。

今の事例の中でちらっと述べたが、価格の影響も少なくない。ベースメタルや貴金属であれば基本的には地金等の素材に市場価格があって、これに連動する形でその原料価格は動くことになる。それらの価格が高ければ、天然資源で言えばより低品位の鉱床が採掘可能になり、循環資源であっても同じことが言える。価格の乱高下のリスクは天然資源であっても循環資源であっても基本的には変わらない。リサイクル制度がこれを担保してしまえば別だが、我が国のリサイクル制度であっても有価物の価格を保証するようなメカニズムは持ち合わせていない。

次に環境側面だが、これも問題がないわけではない。まず地球温暖化とサーキュラー戦略については、必ずwin-winとは言い切れず、バックファイア効果などと呼ばれる逆に意図せず温暖化を加速させることもある¹⁰⁾。理由は多くあるが、その一つは輸送である。PSSのいくつか、例えばレンタルやサブスクは、設定によっては頻繁に製品がユーザーとサービス提供者の間を輸送される。その結果、これらの輸送が地球温暖化ガスを排出する限りそれは増え続けることになる。またリサイクルについても、結果的に非効率な収集になる。これまで考えていなかったような規模の輸送を伴うなど、色々な可能性がある。

またそもそも、循環資源のものとしての特徴が循環を阻む可能性もある。その典型を金属類のリサイクルに見ることができる。単純な元素濃度としては非常に高い循環資源であっても、リサイクルが難しいことは多くある。それは受け手側の素

材産業が、天然資源の処理を念頭に置かれたプロセスを利用している場合、これらの鉱物と、使用済み製品に見られる人工物の組成がまったくことなることによる。よって、これを解決すべく分離選別の技術が進む必要があるが、人工物の種類は多様であり、難しい。

社会的な側面を考えるならば、天然資源で見られた紛争鉱物や、児童労働などに近い話を我々は e-waste や船舶解体で見してきた。これらは、現地の社会環境に問題を来している一方で、現地社会にとって貴重な資源供給であったり収入源であったりする。よって、ただ止めれば良いという問題ではなく、現地の技術力にあわせて改善する必要がある。

資源問題を緩和するような CE の方向性

ここまで、天然資源、循環資源双方の資源問題について見てきた。後者について資源問題と呼んで整理している事例はあまり多く見ないが、間違いなく資源問題が存在し、そして循環が促進されればその意味はより大きくなる。

よってただ CE を推進すれば良いと言うものではなく、天然資源側の問題を、基本的には使用量を減らすという方向で緩和しつつも、循環側の問題も大きくせず、緩和していくためには CE ほどのような点に気をつければ良いのかを最後に整理しておきたい。

まず天然資源側の問題解決は基本的には需要を減らすことである。そうした意味において、CE というか、我が国のこれまでの 3R に近い言い方をすれば 2R、すなわちリデュース、リユースがより効果的であろう。3R の優先順位は今でも変わることはなく、この 2R を推し進めるためのビジネスモデルであったり考え方であったりの具体化が進められているのが CE の特徴だと考えても良い。例えばシェアリングで稼働率を上げることはリデュースにつながるだろうし、またサブスクとリマニュファクチャリング、リファービッシュを組み合わ

せることである種のリユースとみても良い。ただし、これらの実践においてはバックファイア効果を顕在化させないような注意が必要である。

また、リサイクルを念頭に置かならば、これまた新しくない論点だが易解体設計は重要である。これは製品組み立ての問題だけではなく、素材の選定もまた重要になろう。

ここで重要な点は 2 点あり、一つはライフサイクル全体で、望ましい形で循環が起こるかどうかについて経済性をきちんと評価しておくことである。循環の段階でもきちんと経済性を持って回るように最初からその製品の「ライフサイクルを設計」しておく必要がある。機械設計ではなくライフサイクルの設計である点に注意されたい。CE の基本理念にあるとおり、「高い価値」の状態におかれているからこそ循環の環に乗り続けるのであって、そうでなければ循環はおきない。ライフサイクル全体をある種のビジネスモデルとして設計することが重要である。

これに関連してもう一つ重要な点は、「情報」の扱いである。よく聞く資源循環の DX は、例えば発生量の情報が精緻化、リアルタイムかされることで収集・運搬の効率が上がるとか、組成情報が最初から明らかになることでリサイクルがしやすくなる、電池などであれば使用履歴が明らかになることでリユースとリサイクルの正しい振り分けが可能になる、などが良く言われる。

情報の共有に際しては、競争領域と非競争領域の情報を正確に区別し、可能な限り多くの情報を安全に共有することが必要になろう。

情報の共有がもたらすのは、先に述べたような意味での循環の促進だけではなく、例えばライフサイクルの各段階でのカーボンフットプリントの履歴を含めておくことで、その分岐点でどちらを選ぶ方が望ましいかが分かる。倫理的問題への懸念があるならばそうした情報の管理という意味でのトレーサビリティが担保されるなど、決して狭い意味での資源循環のためだけに行うわけではない。また、こうした情報の蓄積は、分離選別技術や、発生量予測を通じた収集といった、各段階

での技術や操業における AI 等の援用に際して重要な知見となろう。

このことから分かることは、こうして共有された情報を使い、常にアップデートされた「評価」を行うことが重要だという点である。CE については「循環性(サーキュラリティ)」などと呼んでその進捗状況を測るような評価¹³⁾も行われつつある。

この共有がブロックチェーンや Web3 を通して行われるのであれば、トークンの利用によるダイナミックプライシングを通じた適切な価格付け、場合によっては安定化などまで可能性は広がるが、それは本稿の扱う範疇を超えるためまた別の機会に譲ることとしたい。

参考文献

- 1) S. M. Hayes and E. A. McCullough: Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies, *Resour. Policy*, **59** (2018), 192-199.
- 2) Gavin M. Mudd, Simon M. Jowitt and Timothy T. Werner: "The World's Lead-Zinc Mineral Resources: Scarcity, Data, Issues and Opportunities", *Ore Geology Reviews*, **80** (2017), 1160-1190.
- 3) D. J. Lane, N. J. Cook, S. R. Grano and K. Ehrig: Selective leaching of penalty elements from copper concentrates: A review, *Miner. Eng.*, **98** (2016), 110-121.
- 4) Y. Iwatsuki, K. Nakajima, H. Yamano, A. Otsuki and S. Murakami: Variation and changes in land-use intensities behind nickel mining: Coupling operational and satellite data, *Resour. Conserv. Recycl.*, **134** (2018), 361-366.
- 5) S. A. Northey, G. M. Mudd, E. Saarivuori, H. Wessman-Jääskeläinen and N. Haque: Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities, *J. Clean. Prod.*, **135** (2016), 1098-1116.
- 6) J. Prno and D. Scott Slocombe: Exploring the origins of "social license to operate" in the mining sector: Perspectives from governance and sustainability theories, *Resour. Policy*, **37** (2012), 346-357.
- 7) L. J. Esdaile and J. M. Chalker: The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining, *Chem. - A Eur. J.*, **24** (2018), 6905-6916.
- 8) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) ニュースフラッシュ. インドネシア: ニッケル鉱石輸出禁止紛争に対する WTO 裁定を不服とし, 上訴 <https://mric.jogmec.go.jp/news_flash/20221220/174632/> (最終閲覧日: 2023/3/2)
- 9) The Ellen MacArthur Foundation: What is a circular economy?, <<https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>>, (最終閲覧日: 2023/3/2)
- 10) R. Koide, S. Murakami and K. Nansai: Prioritising low-risk and high-potential circular economy strategies for decarbonisation: A meta-analysis on consumer-oriented product-service systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **155** (2022), 111858.
- 11) A. Terazono, S. Murakami N. Abe, B. Inanc, Y. Moriguchi, S. Sakai, M. Kojima, A. Yoshida, J. Li, J. Yang, M. H. Wong, A. Jain, I.-S. Kim, G. L. Peralta, C.-C. Lin, T. Mungcharoen and E. Williams: Current status and research on E-waste issues in Asia, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, **8** (2006), 1-12.
- 12) 小出瑠, モハマドスジャウディン, 小松孝裕, モハマド ムシャラフホセイン, 東田啓作, 所千晴, 村上進亮: バングラデシュ・チッタゴンにおける船舶リサイクル産業. 廃棄物資源循環学会論文誌, **27** (2016), 161-175.
- 13) 村上進亮: サークュラリティの評価とクリティカリティ, *日本 LCA 学会誌*, **19** (2) (2023), 58-63.

むらかみ・しんすけ MURAKAMI Shinsuke

2000.5 Colorado Sch. of Mines, Div. of Economics and Business を修了 (Ms. Mineral Economics)。2004 東京大学大学院工学系研究科修了 (博士 (工学))。国立環境研究所を経て, 2007 東京大学大学院工学系研究科, 講師, 准教授を経て, 2022 同大工学系研究科技術経営戦略学専攻教授。現在に至る。専門は産業エコロジーと資源経済学を用いた持続可能性と資源利用の関係性, 消費者行動を含めた社会システム設計・評価等。

モノづくりとサーキュラー・エコノミー

梅田 靖

資源を作って、使って、捨てるリニア・エコノミーから、資源循環を基本とした経済社会へ転換するサーキュラー・エコノミー(CE)に対する関心が急速に高まっている。本稿では、モノづくりの観点からCEの意味と促進要因を整理する。次に、製造業の今後の在り方としてライフサイクル産業化を議論し、その実現に必須となる4つの要素、すなわち、循環プロバイダー、ライフサイクル設計、ビジネス設計、デジタル化について議論する。

はじめに

サーキュラー・エコノミー(CE)は、資源を作って、使って、捨てるリニア・エコノミーから、再生可能資源、再生不能資源の長寿命化、メンテナンス、リマニュファクチャリングなどのリサイクルだけでない循環的利用を謳っている¹⁾。それを受けてEUが主導するCE政策は、資源枯渇対応、廃棄物処理対応などの環境政策であると同時に、雇用対策、欧州企業の競争力強化を実現する経済政策である。これらが示すように、CEは単に廃棄物をリサイクルするだけでなく、モノづくりの在り方や価値提供の方法にも大きな変革を求めており、従来の我が国で良く言われる、動脈側、静脈側という言い方は成り立たなくなる可能性が高い。このCEに対して我が国の産業界の関心が急速に高まっている。

本稿では、モノづくりの観点からCEが意味していることを読み解き、製造業の今後の在り方について議論する。

CEの2つの柱とその背景

CEでは、資源枯渇、鉱山の環境破壊、クリティカルメタル不足、廃棄物問題、海洋プラスチック問題など様々なことが語られているが、本質的には、資源枯渇問題の解決を目指した2つの柱から

構成されている。1つは、プラスチック・リサイクルに代表される資源循環を社会に定着させる流れであり、もう1つは、いわば、脱大量生産・大量販売ビジネス社会への移行である。1990年代後半から我が国が進めた3R(リデュース、リユース、リサイクル)・循環型社会は、いわば、従来の資本主義経済の下で何とか循環を成立させようとしてきたが、現在その限界が見えている。だとすると、環境問題の枠内に留まらず、経済の仕組み自体を変える、市場競争の座標軸を変える、すなわち、ものづくりや価値提供のやりかたを変えるというアジェンダがCEには含まれている。それがゆえに、リサイクルよりも、長寿命化/長期使用、メンテナンス、アップグレード、リマニュファクチャリングなどが強調され、また、シェアリング、サブスク、Product-as-a-Service(PaaS)なども強調されるのである。この意味では、WEEE、ELV、IPP(統合製品政策、現在ではほぼ使われないが)など、EUの環境部門が繰り返し追求していた資源循環の動きと、2000年代初頭に一時盛り上がったサービサイジング、サービス工学、製品サービスシステム(PSS)が組み合わさることにより、今回のCEの隆盛が起き、それをデジタル技術・サービスが不可欠なインフラとして下支えしているという構図である。ただし、シェアリング、サブスク、Product-as-a-Service(PaaS)などの非製品販売ビジネスが常にサステナビリティに対してプラスの影響を持つかということ必ずしもそうではなく見極め

が必要である²⁾。

このようにEUがCE政策を強力に推進する理由は何であろうか。GAFAMに代表されるような米国のデジタル力、ビジネスパワーで押すこともできず、中国や日本のように技術力、大量生産力で押すこともできない欧州としては、EU市場の大きさとルールメイキング力でイニシアティブを取るというEUの典型的な行動パターンは確かに見られる。その上で、以下のような要因は考えられるのではないか。

- ものの所有から、経験価値、文脈価値を重視する、人々の価値観の変化
- ESG金融の隆盛やEUのタクソノミー規則により、金融がサステナビリティと連携した結果、製造業を含む企業は、つねに襟を正していなければいけない、それを評価され、社債や融資に影響を受ける状況
- 上記のEUの行動パターンにより、主導権をEU圏外のグローバル大量生産メーカーからEU圏内のユーザや地域産業に移行させる政策的方向付け。特に2015年頃には、EUの巨大なメガリサイクラー(日本にはいない)が、多様な循環を駆動して儲けるというのが1つの典型的なCEビジネスのイメージであった。さらに近年では、ユーザによる修理権が取り入れられていたり、ユーザが商品選択において正しい判断ができるようにデジタル製品パスポート(DPP)の概念³⁾が提示されるなど、ユーザ、市民を重視する姿勢が色濃くなっているように見受けられる。これらの意味では、EU型のCE社会においては、メーカーは主役でない危険性も高い。
- DPPにせよ、PSSにせよその基盤技術の第1はデジタル技術であり、米国ほどではないにしろ、そこにはまだ強みがあるとEUは判断しているのではないか。日本はむしろこの面でも立ち後れつつあるように見える点が不安材料である。
- コロナ禍やウクライナ危機によりサプライチェーンの途絶問題が注目を浴びており、その対策としてCEの注目度が上がっている。日本政府もCEのこの側面を重視しているように思われる。

1990年代から進展した我が国の3R・循環型社会の考え方とCEは似て非なるものであると思っている。3R・循環型社会は当時としては最先端の考え方であったし、その社会実装はまさに世界の模範となるレベルで高度になされたと考えている。本節の冒頭で述べた、CEの1つ目の柱である資源循環を作るという点では共通性が高いのであるが、2つ目の脱大量生産・大量販売ビジネス社会への移行という視点は3R・循環型社会にはなかったと思われるし、ヨーロッパにおけるCEの議論の重心はこの2つ目の柱に移っていると考えられる。別の言い方をすると、3R・循環型社会は、当時の最重要課題であった埋立処分場枯渇対策として、「ゴミ」を捨てないでリサイクルしましょうという考え方である一方、CEは、資源をできるだけ使わずに人々のwell-beingを高めるためにどうすれば良いか、その社会システムを考えましょうという考え方である。この意味で、CEはモノづくり、価値提供のやり方を変える話であり、それは例えば、モノづくりのやり方を制約するエコデザイン規則案³⁾やISO TC323においてCEの規格作りが進行している⁴⁾ことでも明らかのように、製造業への影響は大きい。

Vision-Meso-Seeds モデル

筆者らは、図1に示すVision-Meso-Seeds(VMS)モデルを提案している⁵⁾。これは、図中のSeedsレベルの技術開発が必ずしもVisionの実現に繋がらない現実を説明しようと作ったものである。すなわち、SeedsレベルとVisionの間には、いわば社会そのものを表すMesoレベルがある。Seedsレベルの要素技術が高度化したとしても、それが効果を発揮するためには、社会に普及しなければならず、それは技術の善し悪しとは別次元の問題である。さらに、技術が普及したとしてもそれが副作用やバックファイアを起こしてしまって、却ってSustainabilityが低下する場合もありうる²⁾。すなわち、Seedsレベルの要素技術開発と並行して、開発された技術を活用してVisionを達成するよう

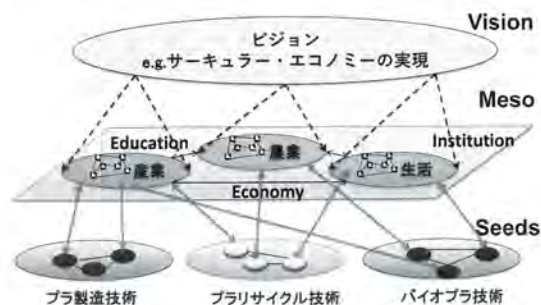


図1 Vision-Meso-Seeds モデル。

な社会システム作りやビジネスの実現が重要なのではない、その設計やシステム構築も工学の対象なのではないかという問題意識である。そう考えると、リサイクル技術開発というのは Seeds レベルに位置し、CE 社会の実現は Meso レベルの問題であると位置づけることができる。技術者やメーカーは得てして Seeds レベルにばかり注目するが、CE 時代におけるモノづくりでは、Meso レベルが重要であると考えている。すなわち、CE 社会がどのような姿なのか、その中での CE ビジネスはどのような形なのか、さらには、現状から CE 社会に行くにはどうすれば良いのかといったことが重要な課題である。

CE 時代のモノづくりのイメージ：ライフサイクル産業

筆者自身は、CE 時代のモノづくりの姿として、製造業はライフサイクル産業化すべきであると考えている。すなわち、モノを製造することをミッションとした製造業から、モノのライフサイクル全体を担い、循環を駆動するライフサイクル産業への転嫁が必要だと考えている。そのライフサイクル産業のイメージは以下のように考えている。

- 製品：企業はハードウェアを売るのではなく、「価値」を売る。そのための手段として、ハードウェアを作り続けることはあり得る。CE は、必ずしもモノづくりを止めるという話ではない。「価値」を高めるために、さらなる高品質化、長寿命化、デジタルとの融合などが求められる。特に、「CE

の2つの柱とその背景」の節で述べたように CE の基本概念としてユーザ中心主義を忘れてはならない。日本企業はこの点先進的である。また、価値提供の最適な方法を探るために PaaS、PSS、シェアリングなどのビジネスモデルの転換を自由にデザインし、実装することが必要となる。

- 価格：製造コストをベースに製品価格を考えるのではなく、提供する価値に対する対価として価格が決まる。コストを考える場合も、製造だけでなく、ライフサイクルコストが基本であり、間接的な環境影響コストを含めて考えなければならない。
- DX の進展により近い将来、価値提供手段としてのモノの超ライフサイクルマネジメント、すなわち、全てのモノの状態がリアルタイムに把握できるようになる。それをビジネス価値化できるか否かが勝負の分かれ目になる。
- 設計：モノの設計だけでなく、製品ライフサイクルの設計が必須となる。そこでは、資源循環と、モノではなく価値提供が前提となる。
- 製品ライフサイクル：結果として必然的に製品ライフサイクルは閉ループ化し、多様なループが組み合わさって社会が成立する。リマニュファクチャリングされた組立品、部品、リサイクル材の使用が前提となり、足りない分をバージン品、バージン材で補う。

ライフサイクル産業の実現に不可欠な要素

このようなライフサイクル産業を実現するためには、ビジネスの主体としての「循環プロバイダー」が、ビジネスと製品ライフサイクルを自由に設計し、それを高度なデジタル技術で下支えする。これらの要素を適切に組み合わせることでイノベーションを起こすことが必須であると考えている。以下、各要素の概要を述べる。

循環プロバイダー

CE の時代においては、大量生産・大量廃棄から

脱却した価値づくりビジネスが求められる。必要なのは、モノ、情報、お金が循環する仕組みを作ることである。メーカーはモノを作るのは得意であるが、このような仕組み作りは必ずしも得意ではないのではないかと。そこで、この仕組み作りを行うステークホルダーを「循環プロバイダー」と仮称している。「循環」を提供するステークホルダーという意味である。

もう一つ重要なことは、欧州にはメガリサイクラーがいるので、彼らが単独で循環プロバイダーになる可能性は高いと思われるが（必ずしもリサイクルの循環だけでなく）、我が国の場合は、リサイクラーの規模が必ずしも大きくないので、様々な企業、NGO、自治体、場合によっては大学などが連携して、ライフサイクル産業化することが有効なのではないか。この場合、循環プロバイダーは、仲間を集め、CEビジネスの企画、ビジネス化、設計、運営をチームで行うためのオーケストレーションをする役割を担うことが想定される。これが筆者がイメージしている循環プロバイダーの役割である。

ライフサイクル設計

上記のCEビジネスの企画、ビジネス化、設計を行うための技術を「ライフサイクル設計」と呼んでいる。従来のエコデザインは、製品設計段階で、分解性、リサイクル性など対環境性を向上させるための製品設計の小改良を行うことであった。しかし、CEを実現するためには、循環を設計する必要がある。

実際、我が国の家電品においてもエコデザインはすでに充分実施されているし、LCAも行われている（ただし後者は多くの場合、設計者によっては実施されておらず、従って、LCAの結果が設計に反映されることも少ない）。例えば、ネジの本数を明示したり、ネジの方向を揃えたり。しかし、実際のリサイクルの現場においては、回収された製品は時代もメーカーも異なるものであり、個々の製品におけるエコデザインの工夫は活用されず、一括してシュレッダー処理されてしまう。この製品設計とライフサイクル上のプロセスのミスマッチ

が大きな課題である。リサイクルの優等生であるペットボトルの場合は、PETボトルリサイクル推進協議会が、材料はPET単体のみ、着色はしない、ボトル本体への印刷はしない、キャップはPEかPPなどと決めてしまっており、そのためにメーカーによらず、統一的にリサイクルができる。この辺がエコデザインの難しさである。

実際、エコデザイン規則案³⁾においても、この点は指摘しており、同案においてはエコデザインを「環境サステナビリティの配慮を製品の性質およびそのバリューチェーン上のプロセスに組み込むこと」としている⁶⁾。製品設計だけでなく、ライフサイクル設計とマネジメントを明確に求めている。

図2に筆者らが提案するライフサイクル設計の手順⁷⁾を示す。重要なことは、製品ライフサイクル全体を明示的に考え、製品のみならず製品ライフサイクル全体を設計することである。そのためには、製品そのものを設計する「製品設計」とライフサイクルの流れを設計する「ライフサイクルフロー設計」の両方を行う必要があるが、その前に、ライフサイクル全体の循環戦略を決める「ライフサイクル・プランニング」を行うことが重要である。ここで、顧客に提供する価値である「製品コンセプト」、長寿命化、メンテナンス、リユース、リサイクルなどの循環の方法である「ライフサイクル・オプション」、および、シェアリング、PSSなどのビジネスのやり方である「ビジネス・オプション」の3項目をセットで考えることが重要である。これらを明確に決めた後にそれを製品設計、ライフサイクルフロー設計に展開することによって、エコデザイン規則案の言うところの「環境サステナビリティの配慮を製品の性質およびそのバリューチェーン上のプロセスに組み込むこと」が初めて実現可能になる。

ビジネス設計

筆者は、大量販売によらず顧客に価値を提供でき、かつ、顧客側から見ても製品所有よりも便利であったり、コストが安かったりして選好されるようにビジネスを設計することが最も重要な要因

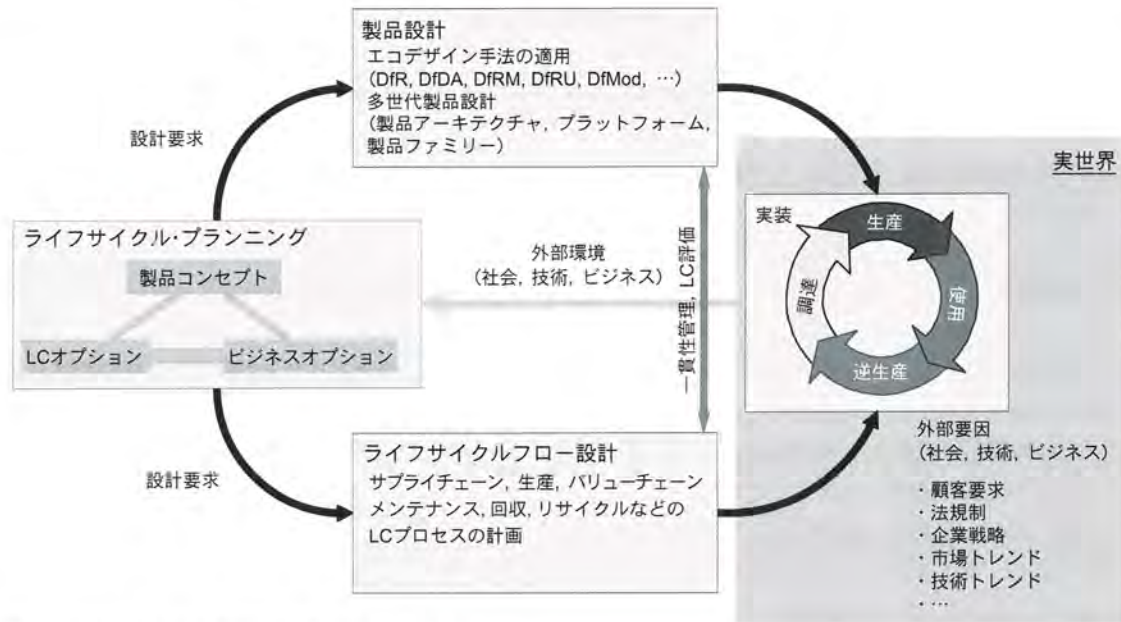


図2 ライフサイクル設計の手順(文献7)を和訳。

だと考えている。この点については、2000年代以降、サービス工学、サービサイジング、サービス・サイエンス、PaaS、シェアリングビジネス、サブスクなど様々な流行り言葉と方法論が提案されている。本稿ではその詳細を述べることはしないが、基本的な考え方として、「製品・サービスシステム」(PSS)が重要だと考えている。すなわち、ハードウェアとしての製品とサービスを適切に組み合わせることによって様々なビジネスのバリエーションを生み出すことができるという考え方である。この意味では、単純な脱物質化、すなわち、モノを作らない、使わないことを指向する立場は取っていない。

例えば、Rolls-Royceは、航空機エンジンのトータルケアサービスを実施している⁸⁾。これは、自社で航空機エンジンを製造するが、航空会社には販売せず、メンテナンスも自社で実施することで使用料とメンテナンス料を徴収するビジネスモデルである。メンテナンスを実施するために航空機のオペレーションデータを受け取り、ビッグデータ分析により合理的にメンテナンスを行う。また、修理部品はリマニュファクチャリング部品を活用し、コスト削減に繋げる。こういった事例が典型

的なCEビジネスであると考えている。我が国でもブリヂストンは、タイヤの寿命を倍にするリトレッドとメンテナンスを組み合わせたサービスビジネスを展開している⁹⁾。

デジタル

前項のRolls-Royceの例に見られるように、データを活用し付加価値を高めることがCEビジネスの死命を制すると言っても良い。エコデザイン規則案においてもデジタル製品パスポート(DPP)が提案されている³⁾。これは、ユーザ、リサイクラー、規制当局に対するバリューチェーンを通じた情報提供、トレーサビリティ確保を目的としており、有害化学物質、カーボンフットプリントの情報も含まれる⁶⁾。バッテリー規則によりバッテリーが先行して2024年から実施されるとも言われており、ドイツを中心に自動車におけるサプライチェーン情報を交換するプラットフォームCatena-X¹⁰⁾が準備されており、ISO TC323においても製品循環性データシートの規格化が進められている。

ここで扱うべき情報は、化学物質、材料、製品構造、使用部品、分解方法などの設計情報をも

もちろん必要であるが、「CE時代のモノづくりのイメージ：ライフサイクル産業」の節で述べた超ライフサイクルマネジメントを実現するためには、個別製品の使用状況、メンテナンス、再生履歴などのライフサイクルにわたる履歴情報の収集と活用が極めて重要である。そのための情報プラットフォーム、情報を処理するAI技術、ビッグデータ分析技術も重要であるが、特に、IoTに代表される、物理世界とサイバー世界の間を繋ぐ技術が極めて重要であり、この部分での決定的な方策はまだ生まれていないと思っている。

まとめ

サステナビリティとデジタル革命が今後のものづくりの方向性を決める最重要な要因である。特に、サーキュラー・エコノミー(CE)やカーボン・ニュートラルは、市場競争の座標軸を変えてゆくと考えられる。本稿ではこのうち、CEの考え方と、そのモノづくりへの影響について述べた。CEを従来の廃棄物処理、3Rと同列に理解するのは危険であり、本質は、脱大量生産・大量販売ビジネス社会への移行である。そのためには、Vision-Meso-Seeds (VMS) モデルで言うところのMesoレベル、これは社会やそこにおけるビジネスを表しているが、におけるデザインとオペレーションが最重要課題である。具体的には、製造業のライフサイクル産業化が必要であり、そのためには、ビジネスの主体としての「循環プロバイダー」が、ビジネスと製品ライフサイクルを自由に設計し、それを高度なデジタル技術で下支えする、これらの要素を適切に組み合わせることでのイノベーションを起こすことが必須であり、この各要素について議論した。本稿の立場は、Seedsレベルの要素技術開発ももちろん重要であるが、このMesoレベルのデザイン、システム化問題が重要な課題であるということである。

参考文献

- 1) Ellen Macarthur Foundation: "Towards The Circular Economy Vol. 1, Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition," (2013).
- 2) Rui Koide, Shinsuke Murakami and Keisuke Nansai: "Prioritising low-risk and high-potential circular economy strategies for decarbonisation: A meta-analysis on consumer-oriented product-service systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.155, (2021).
- 3) European Commission: "Proposal for Ecodesign for Sustainable Products Regulation," https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en, 2022.
- 4) <https://www.iso.org/committee/7203984.html>.
- 5) Keishiro Hara, Michinori Uwasu, Hideki Kobayashi, Shinji Kurimoto, Shinsuke Yamanaka, Yoshiyuki Shimoda and Yasushi Umeda: "Enhancing Meso Level Research in Sustainability Science - Challenges and Research Needs," *Sustainability*, 4 No. 8 (2012), 1833-1847.
- 6) 市川芳明: グローバルビジネスを左右する法規制と標準規格, *World Eco Scope* 第46回, 第47回, 第一法規出版, (2022).
- 7) Yasushi Umeda, Shozo Takata, Fumihiko Kimura, Tetsuo Tomiyama, John W. Sutherland, Sami Kara, Christoh Herrmann and Joost R. Dufflou: "Toward integrated product and process life cycle planning -An environmental perspective," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61 No. 2 (2012), 681-702.
- 8) <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/airlines/br715.aspx#technology>
- 9) https://tire.bridgestone.co.jp/tb/truck_bus/solution/business/index.html
- 10) <https://catena-x.net/en/>

うめだ・やすし UMEDA Yasushi

1992 東京大学大学院博士課程修了, 博士(工学), 東京大学, 東京都立大学, 大阪大学を経て, 2014.1 東京大学教授, 現在 東京大学大学院工学系研究科人工物工学研究センター価値創成部門教授. 専門は, 設計学, 次世代生産システム, エコデザイン, 製品ライフサイクル設計. 主な著書に, 『サーキュラー・エコノミー～循環経済がビジネスを変える』(勁草書房)がある.

リマニュファクチャリング・リファービッシュの進展状況

松本 光崇, 早川 正夫

サーキュラー・エコノミーへの転換が求められる中で、製品のリマニュファクチャリング(リマン)、リファービッシュの推進が一つの重要な鍵を握る。本稿ではリマン・リファービッシュの定義とメリット、今日の市場規模、産業事例、進展状況を示し、その上でリマン・リファービッシュの社会普及に向けた障害と課題を見る。その中で技術的な課題について見た上で、重要な研究開発トピックスを解説する。

はじめに

サーキュラー・エコノミーの概念は、2013年にエレン・マッカーサー財団がレポート¹⁾を発表して以降世界的に大きく広がった。レポートでは、世界のマテリアル資源の有限性を考慮すると、現在の社会システムは持続可能ではなく、社会経済の構造を転換することの必要性が主張された。またその転換は、経済活動や生活の縮小が必須なものではなく、むしろ活性化して実現することが可能であることが主張された。従来、資源循環や省資源の主要な手段はリサイクルであり、技術開発的にも政策的にもリサイクルが中心に進められてきたが、リサイクルをする以前に、製品あるいは部品やサブパーツのレベルで、可能な限り長く使用することが省資源・省エネ・省CO₂に有意であり、リマニュファクチャリング(リマン)やリファービッシュはその手段である。またサーキュラー・エコノミーは資源政策や環境対策であると同時に、あるいはそれ以上に、経済政策・産業政策・雇用政策である。少なくとも欧州ではそうした視点で捉えられてきている。国にとっても個々の企業にとっても、世界的なサーキュラー・エコノミーへの転換の動きを、自国の産業競争力の強化や自社の事業拡大の機会に繋げていくことが必要である。そのときにリマンやリファービッシュは重要な鍵になる。

本稿では、リマン・リファービッシュに焦点を当て、それらの定義とそのメリット、今日の市場規模と産業事例、進展状況を示し、併せてその推進の障害と課題を示し、その中で技術的な課題、研究開発トピックスについて見る。

リマン・リファービッシュの定義とメリット、実践事例

リマン・リファービッシュは、一度使用した製品を、回収して解体、洗浄、検査、修復、再組立て、最終検査して再度製品に戻すプロセスであり、部品レベルでのリユース・長期使用に該当する。リマン・リファービッシュの一般的なプロセスを図1

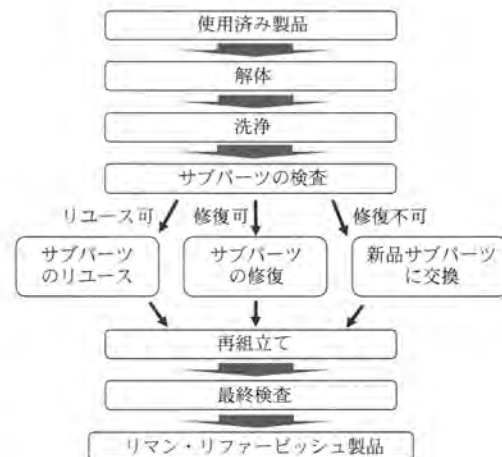


図1 リマン・リファービッシュのプロセス。

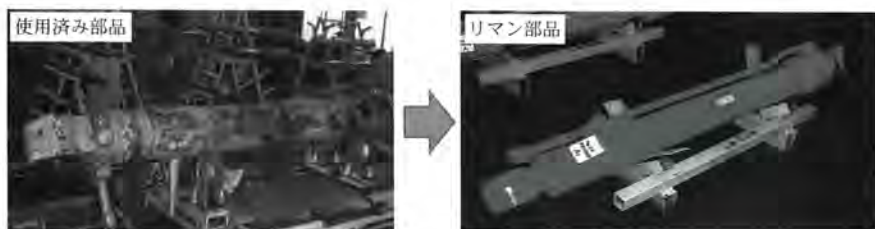


写真1 建設機械の油圧シリンダーのリマン。

に示す、リマンとリファービッシュは類似であるが、厳密に定義するときは、リマンは新品同様の機能状態に戻すことを指し、一方リファービッシュはリマンほど高機能ではなく(新品同様とまで行かず)、コスト・価格もその分低い²⁾。その他にリペア(修理)やリビルド、リコンディション、レトロフィット、オーバーホールなど類似の概念と呼称がある。

これらのプロセスは上述のとおり広義のリユースであり、原料レベルまで戻すリサイクルと区別される。リマン・リファービッシュは、そのやり方に依存するが、つまりパーツをどれだけ再利用するかに依存するが、新品製造と比較して、5%前後の資源消費・エネルギー消費・CO₂ 影響で済むことがあることも UNEP-IRP (国連環境計画 国際資源パネル) のレポートで紹介されている²⁾。またリサイクルと比較しても、省資源・省エネ・省 CO₂ であり、例えばリサイクルではレアメタルは道路の路盤材に再利用されてリサイクルとされることもあるが、この場合レアメタルの省資源効果はない。一方リユースや長期使用がされれば省資源効果があり有意である。さらに、リサイクルよりも経済効果(付加価値)が大きく、例えばリサイクルしてその材料売価が数百円である場合も、リマン・リファービッシュで製品として組み直せば売価は数千円、数万円になることが珍しくない。このように経済性も高い。

リマン・リファービッシュはリペア(修理)の延長であり、歴史的には例えば自動車パーツでも欧州や米国では百年近く前から実施されているが³⁾、それらが特に注目されるようになったのはサーキュラー・エコノミーへの関心が高まった 2010 年代からである。リマン・リファービッシュの市場規

模・産業規模は必ずしも精緻に把握されていないが、米国では 2012 年の USITC (米国国際貿易委員会) のレポートでリマンの生産額が 430 億ドル(約 5 兆円)と推計されている⁴⁾。欧州では 2015 年の ERN プロジェクトのレポートで、リマンの売上が 298 億ユーロ(約 4 兆円)と推計された⁵⁾。なおリマンの産業分野としては概ね次の分野の順で大きい⁴⁾⁵⁾。

- 航空機
- 建設機械・重機
- 自動車パーツ
- 産業機械
- IT 製品
- 医療機器

日本ではこれらの分野の他、リコー、キヤノン、富士フイルム等による複写機・複合機のリマンや、1990 年代に遡るが富士フイルム(当時は富士写真フイルム)のレンズ付きフィルムのリマンが代表的な事例である。また国内の自動車パーツ(リビルトパーツ)の市場は 1,000 億円強と推定されている。写真 1 には建設機械の油圧シリンダーのリマンを示す。コンシューマ製品のリマンの普及は課題であるが、世界的にはスマートフォンのリマン・リファービッシュが近年行われている。

リマン・リファービッシュの障害と課題

リマン・リファービッシュは各種のメリットがありながらも、いまだ普及が限定的であるのは、普及の障害要因があるためである。障害要因や課題項目としては次の 4 点が挙げられる²⁾。

- 回収の課題 (collection barriers) : 一般に使用済

製品(コア)の回収は容易ではなくコストもかかる。

- 技術的な課題 (technological barriers) : リマン・リファービッシュのコスト低減と品質確保のために各種の技術課題がある。
- 制度的な課題 (regulatory barriers) : リマン・リファービッシュの制度はまだ未整備である。使用済み製品の越境に制約がある場合などもその例である。
- 市場の課題 (market barriers) : 需要側(顧客・消費者)が品質の不安やイメージの悪さを持ち、受容しないことがある。また供給側(メーカーなど)が新造製品の販売の減少を恐れてリマン・リファービッシュに消極的であることがある。

この中で特に企業や産業界にとっては回収、技術、市場の課題が重要である。ビジネスモデルの構築、サプライチェーンの構築、そして技術開発によりリマン・リファービッシュを事業として成立させていく必要がある。一方、政策決定者には、制度と市場の課題が重要であり、次いで回収や技術開発の課題解消を支援していくことが重要である。学界の側は技術開発の支援を中核にそれぞれを支援していくことが求められる。

リマン・リファービッシュの技術的課題

リマン・リファービッシュのコストの低減と製品性能の向上のために技術開発が必須である。それらが実現すれば市場的な課題の解消にも寄与する。リマン・リファービッシュの技術的課題には、プロセス技術課題とシステム技術課題とがある。プロセス技術課題は、図1に示した各プロセスに対応する技術課題であり、一方、システム技術課題は複数の項目に横断的に関連する課題である。技術課題については既存文献も参照できる^{2)3)6)~8)}。前者のプロセス技術課題は次の項目が挙げられる。

- 解体と再組立ての技術
- 洗浄の技術

- 検査(損傷検査, 電子部品検査, 最終検査)の技術

- 検査(信頼性評価, 余寿命評価)の技術

- サブパーツ修復の技術

第一の解体と組立ては、自動化を含めた生産性向上の実現が求められる。

洗浄もコストを要する工程である。自動車パーツでは最も高コストであるとする調査もある。また有機溶剤の使用を要することも多く環境対策も求められている。化学洗浄や、ショットブラストをはじめとする機械洗浄など各種の洗浄があるが、洗浄技術の高度化は重要な課題である^{6)~8)}。

検査の技術はリマンの生産性向上と品質確保の鍵となる。信頼性評価と余寿命評価は、サブパーツをもう1ライフサイクル使用できるか、それとも新品サブパーツに交換するべきかを、的確に判断できるか否かを決定づけるものであり、リマンの経済性、信頼性、省資源効果を決定づける。材料組織の非破壊検査による評価法の構築は重要な課題である。本課題については後節で再述する。

検査の中でも電子部品の検査は重要性を増している⁶⁾。多くの製品分野で電子化・メカトロニクス化が進んでおり、電子部品の検査と再生が課題である。特にサードパーティメーカーが実施する場合は電子部品の解析を独自に実施(リバースエンジニアリング)することが多く、解析は難化しておりリマンの障害要因である。またメーカーがリマンを行う場合も電子部品の検査は容易でないことがあり課題である。

損傷や劣化した部分の修復もリマン・リファービッシュの重要な工程である。図2は破損した部分を持つ製品の、3D スキャン画像である。損傷や劣化したサブパーツを新品に取り換えるのではなく修復して再利用することにより、リマンの経済性と省資源性は向上する。修復の性能の向上と、修復プロセスの自動化・半自動化を含めた効率化は重要な課題である。

以上のプロセス技術課題に加えて、生産システムやサプライチェーン、物流の管理や、製品設計、



図2 破損した部品の3D スキャン図(筆者作成).

情報活用などシステム技術的な課題がある。以下の課題がある^{2)3)6)~8)}。

- リマン・リファービッシュを容易にする製品設計
- 生産計画, 在庫管理, 生産管理
- 回収物流の管理(リバース・ロジスティクス)
- データ活用, 製品ライフサイクル情報管理, スマート製造の拡張

製品設計について、上述のプロセス技術の開発を、製品設計とセットで進めることにより大きく効果が上げられる。製品の解体を配慮した設計と、配慮しない設計では解体の容易性は大きく異なる。今日の製品のほとんどは解体を配慮した設計は行われていない。プロセスの自動化も、製品設計との連携があるかないかによって難易度は全く異なる。リマンをできるか否かの2/3は設計によって決まるとも言われる³⁾。製品特性に応じたリマン配慮設計の実践が必要である。

またリマン・リファービッシュでは新品の製造と異なり、製造の元となる使用済み製品(コア)の回収のタイミングと品質の不確実性が大きい。そのため生産計画や生産管理は新品製造以上に複雑になることが少なくない⁸⁾。生産管理や物流管理の課題がある。

研究開発トピックス

前節で取り上げた技術的課題の中でいくつかを以下に取り上げる。



写真2 スマートフォンの自動解体機の開発(オーストリア ProAutomation 社, 筆者撮影)。

デジタル化とデータ利用

デジタル化やAI(人工知能)技術の進歩は著しく、スマート製造やインダストリー4.0の動きが製造業に変革をもたらしている。多品種少量生産であるリマン・リファービッシュにはAIによる高度化実現の可能性がある。デジタル化、スマート製造化、インダストリー4.0の動向をリマン・リファービッシュに展開していくことが求められる。また制度的にもデジタル製品パスポート(DPP)などを通して、製品情報や製品稼働情報を資源循環に活用していく動きが進められている。デジタル化による情報連携の推進がリマン・リファービッシュの高度化の鍵を握る。

プロセス自動化

デジタル化に関連して、リマン・リファービッシュのプロセスの自動化が有用である。大量生産の製造工程では従前より自動化が進められてきているが、変種変量生産の自動化は難度が高く、リマン・リファービッシュはさらに多品種少量である。写真2は欧州の公的研究プロジェクトで開発されていたスマートフォンの自動解体システムである。自動化に向けた研究開発が進められている。またリマンプロセスで複数の装置で処理・加工していく場合は高精度の位置決め・位置合わせが必要である。プロセス自動化の課題になる。

積層造形 (AM) によるパーツ修復

材料やパーツの修復はリマン・リファービッシュの重要な工程である。劣化したパーツを新造品に取り換えるのではなく、修復して再利用することにより、リマンの経済性と省資源性が向上する。現有の技術として、航空機や建機・鉱山機械、自動車のパーツのリマンでは、肉盛溶接による損傷部の修復や、再めっき、溶射、レーザークラディングによるパーツ表面の修復が行われている。より新しい技術としては、積層造形 (Additive manufacturing (AM) : 3D プリンター、以下 AM と記す) をリマン・リファービッシュの修復プロセスに適用する研究開発が進められている^{8)~11)}。AM は従来の製造法では難しい複雑な形状や材料組み合わせの部材の製造を可能にする。また生産のデジタル化や自動化、分散化を促進することで製造業に構造的な変革をもたらすことが期待されている。AM はリマン・リファービッシュにも変革をもたらす可能性を持つ。

AM による修復の現在の中心は、DED 式 (デポジション方式) AM による修復である。DED 式はパーツの欠損部に直接材料を付加できるため、パーツの大きさや据付の自由度が高い。また既存の修復法の肉盛溶接やクラディングともプロセスが類似しており使いやすい。樹脂成型の金型の補修等では DED 式 AM による修復がすでに実用化されている。ただし現時点では AM 修復は多くは研究開発段階であり、実用化・商業化されているものはごく一部である。タービンプレードの単結晶部材の損傷修復も研究開発として進められている⁹⁾。

DED 式と並んで AM の主流である PBF 式 (パウダーベッド方式) の AM 修復への適用も進められている。図 3 は PBF 式 AM による修復の工程である¹⁰⁾。欠陥部があるパーツ (図中 (1)) を、前処理して平坦な積層面を形成し (同 (2))、PBF 積層し (同 (3))、後加工・後処理をして修復パーツとする (同 (4))。写真 3 は試験材料による実験の

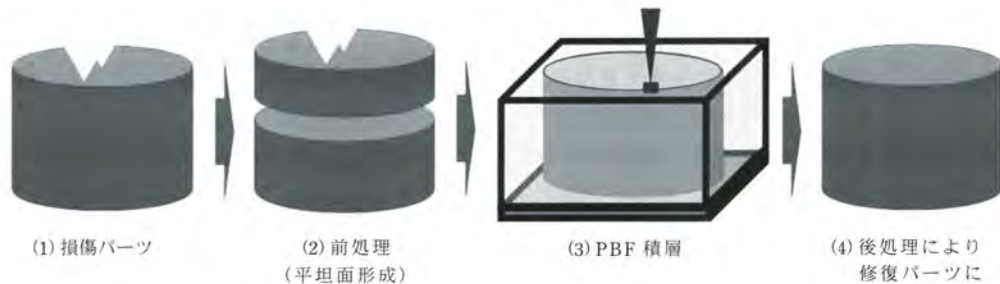


図 3 PBF 式 AM による修復プロセス¹⁰⁾。

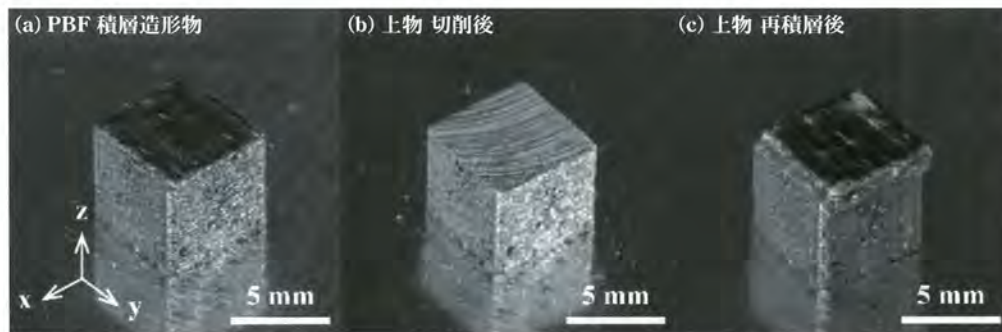


写真 3 PBF 式 AM 修復の実験¹⁰⁾。

図である。

PBF 式 AM による修復の課題は、AM そのものの課題を含めていくつかあるが、パーツと修復部の位置ずれ(写真3の右図も約 300 μm のずれがある¹⁰⁾、パーツと修復部の接合界面における熱収支に起因する欠陥原因発生、界面でのマイクロ組織(結晶組織)の断絶、修復部の熱変形などがあり、これらの解消が課題である。

PBF 式 AM 修復の実用化事例としては、Siemens 社がガスタービンの燃焼器の先端部(バーナーチップ)の修復に利用したことが報告されている(図4)¹¹⁾。従来の溶接接合では図の左下2番目の線から先を再製造して接合していたが、PBF 式 AM 修復により、左下線から先のみを修復し、修復期間の短縮とオンデマンド修理を可能にした。AM 修復の実現はリマン・リファーマピッシュの高度化と広範化の要件と言える。



図4 ガスタービンの燃焼器¹¹⁾。

信頼性評価・余寿命評価

信頼性評価と余寿命評価は、サブパーツをもう1 ライフサイクル使用できるか、それとも新品サブパーツに交換するべきかを、的確に判断できるか否かを決定づけるものであり、リマン・リファーマピッシュの経済性、信頼性、省資源効果を決定づける。事故の7割は疲労が原因と言われており¹²⁾、製品設計において疲労特性の評価は重要である。疲労事故の主な原因としては、使用した材料に欠陥があること、設計ミス、メンテナンスの落ち度等が挙げられ、全て人為ミスと見なされるために、製造者は過度の安全側設計に陥りやすく、リマンの経済性を損なう場合が多い。また疲労試験には時間と費用を要し、負担が大きい。そこで機械構造部品として汎用性の高い鋼材では、硬さと引張強度、疲労限(引張・圧縮の負荷を1千万回付与しても壊れない強度)との相関関係¹³⁾を利用して、簡便に材料をスクリーニングする手法が知られている。それでもやはり疲労損傷の実態を知ること、材料(多くは金属の)組織の非破壊検査による評価法の構築は重要な課題である。リマンに際しては、表面傷や金属組織の変化を定量的に判定できる非破壊検査が重要となる。

写真4は建設機械の稼働(摺動疲労)前後の歯車表面の浸炭鋼組織の違いを示すもので、摺動疲労により鉄の結晶相の変化を引き起こし、断面を切出し組織観察することによって、定量的にその差を評価することができる。結晶構造の違いはX線回折法(XRD)により非破壊的に評価することが可

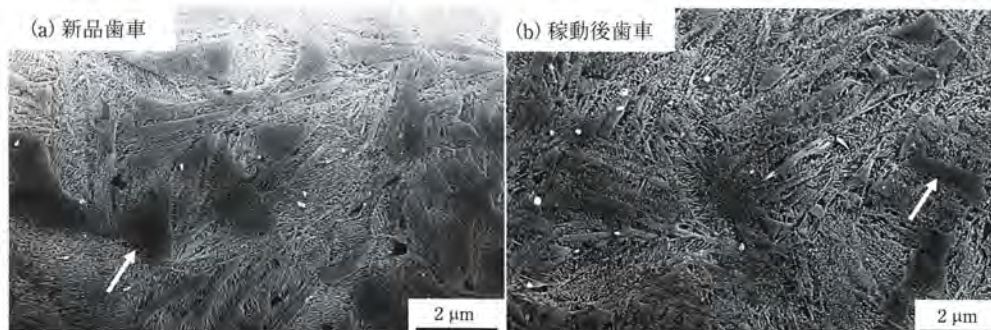


写真4 歯車表面の断面における金属組織の変化(残留オーステナイト相が減少する)¹⁴⁾。

能であるため、歯車のリマンの可否判定技術に生かされている¹⁴⁾。さらに、この金属組織の変化を疲労前に戻すことによって、歯車の機能回復(摺動疲労寿命の長寿命化)が試みられている。リマンを目的とするため、簡便かつ安価な方法として、レーザー焼入れによる瞬間熱処理を採用し、相変化(残留オーステナイト相の加工誘起変態による減少)を摺動疲労前の存在量に戻すとともに金属組織を微細化することによって、摺動疲労の長寿命化が達成されている¹⁵⁾。金属組織の機能回復技術を使いこなし、疲労寿命を改善することは、機械構造部品のリマン普及に大きく貢献するものと期待される。

おわりに

リマン・リファービッシュの高度化と普及はサーキュラー・エコノミー実現に向けた一つの柱である。同時に、世界的なサーキュラー・エコノミーへの転換の動きを、日本の産業競争力の強化に繋げていく必要がある。リマン・リファービッシュの強化が重要な要件である。その強化には、社会システムの課題、ビジネスの課題、技術的・研究的な課題があり、いずれも戦略的に進めていくことが必要である。技術的・研究的な課題では特に材料とパーツの信頼性評価、機能・形状修復、劣化制御が重要である。リマン・リファービッシュの強化に向けた取り組みが求められる。

参考文献

- 1) Ellen MacArthur Foundation: Towards the circular economy, (2013).
- 2) UNEP International Resource Panel (UNEP-IRP): Redefining value: The manufacturing revolution – Remanufacturing, refurbishment, repair and direct reuse in the circular economy, (2018).
- 3) R. Steinhilper: Remanufacturing – The ultimate form of recycling, Fraunhofer IRB Verlag, (1998).
- 4) U. S. International Trade Commission (USITC): Remanufactured goods: An overview of the U.S. and global industries, markets, and trade, USITC Publication 4356, No. 332-525, (2012).
- 5) European Remanufacturing Network (ERN): Remanufacturing market study, European Commission, (2015).
- 6) GIS, Rochester Institute of Technology (RIT): Technology roadmap for remanufacturing in the circular economy, (2017).
- 7) 産業技術総合研究所: 循環型社会実現に向けた技術のスペックロードマップ, (2022).
- 8) M. Matsumoto, S. S. Yang, K. Martinsen and Y. Kainuma: Int. J. Precis. Eng. Manuf. – Green Technol., **3** (2016), 129.
- 9) 下畠幸郎, 川崎憲治, 貴志公博, 片山聖二: 溶接学会誌, **76** (2007), 466.
- 10) N. Sato, M. Matsumoto, H. Ogiso and H. Sato: Int. J. Autom. Technol., **16** (2022), 773.
- 11) O. Andersson, A. Graichen, H. Brodin and V. Navrotsky: J. Eng. Gas Turbines Power, **139** (2017), [031506-1].
- 12) 日本材料学会編: 疲労設計便覧, 養賢堂, (1995), 頁(1).
- 13) 科学技術庁金属材料技術研究所: 金材技研材料強度データシート資料, **17** (1997).
- 14) 金澤智尚, 早川正夫, 吉本光宏, 田原佑規, 畑典仁, 目黒奨, 廣戸孝信, 松下能孝, 菅原道雄: 日本金属学会誌, **85** (2021), 198.
- 15) T. Kanazawa, M. Hayakawa, Dan Vinas, Y. Tahara, N. Hata and M. Yoshimoto: J. Mater. Res. Technol., **24** (2023), 39.

まつもと・みつたか MATSUMOTO Mitsutaka

1994 京都大学工学部卒業。京都大学修士課程修了。東京工業大学博士課程満期退学。博士(学術)。NEC 勤務を経て、2006 産業技術総合研究所に入所。現在に至る。リマニュファクチャリング、エコデザイン、スマート製造の研究開発に従事。2023.4 より製造技術研究部門 副研究部門長。

はやかわ・まさお HAYAKAWA Masao

1989 九州大学工学部卒業。九州大学修士課程修了。1992 科学技術庁金属材料技術研究所に入所。(組織改編)物質・材料研究機構(NIMS)。2003(在職まま)九州大学博士課程修了。博士(工学)。高強度鋼の遅れ破壊、焼もどしマルテンサイト鋼の組織解析、高温疲労等に従事。2023.4 より構造材料研究センター 極低温疲労グループリーダー。

モノ「売り」から「コト」の時代の材料技術

原田 幸明

サーキュラー・エコノミーはリサイクルでもモノをコトに変えることでもなく、大量生産に依存した売りっぱなし経済から使用者に寄り添った経済への転換である。その基軸として、残存価値、プラットフォーム、サービサイジングがある。それらのために、サービスの媒体であるモノの技術はこれまで以上に使うということを意識したものに発展していく必要がある。

はじめに

サーキュラーエコノミー¹⁾へのトランジション(遷移)の重要な要素として、「モノからコトへの転換」が叫ばれている。この現象はすでに起こっており、2019年段階での世界の会社の時価総額トップ50社のうち17社はIT・情報系であり、金融につづいて、一般消費財、サービス、医療となりそのあとに工業(4社)しか入っていない。30年前の1989年にはエネルギー(9社)、工業(5社)そして素材(3社)が入っていたのに対して大きく様変わりしてきている²⁾。産業の世界は急速に「モノからコトへの転換」が進んでいるのである。では、「モノ」その典型としての素材はもう必要ないのであろうか。ここでは、サーキュラーエコノミーが目指す将来社会を抑えたいうえで、その将来社会における素材技術、および素材関連ビジネスの在り方についてみてみる。

大量生産時代の転換としてのサーキュラーエコノミー

まず、サーキュラーエコノミーは直訳すれば「循環経済」であり、これがこれまで日本が進めてきた「循環型社会」と極めて類似した表現であることから「リサイクル社会がサーキュラーエコノミー」であるかのような誤解を世の中に与えている。こ

れは大きな誤りであり、サーキュラーエコノミーは、「循環型社会」を指すものではない。

図1にサーキュラーエコノミーが生まれてきた系譜を示す。筆者が子供時代の1960年代は無限の未来が広がっており、新たなフロンティアを求めて人々は活動していた。そこに問題を提起したのがローマクラブの「成長の限界」³⁾であり、オイルショックが資源の制約を人々の心に焼き付けた。この「成長の限界」に続いて「環境の限界」が認識され「かけがえのない地球」や「宇宙船地球号」⁴⁾が叫ばれ、現在SDGsとして展開している「持続可能な開発(sustainable development)が東京で開催されたブルントライト委員会⁵⁾でまとめられたのが1980年代である。そして、これらの動きの背景には無限の成長を前提とした大量生産・大量消費そしてその結果でもある大量廃棄が我々の成長と環境の限界に突き当たっているという認識が広まり、大量消費社会への問いかけとそこから脱皮の模索が始まってきた。

特に環境問題はそれまでの公害問題から日常生活の問題として広く認識されるようになり、環境配慮、グリーン、エコなどの表現が登場したのもこの時期である。この大量消費の問題を真正面から受けたのが日本であり、狭い国土に大量の廃棄物があふれる状態になっていた。そこで、日本が打ち出したのが「循環型社会」であり、資源の観点に触れながらも基本的には廃棄物の減量化に軸足を置いた施策としてそれなりに成果を上げた。



図1 サークュラーエコノミーが生まれてきた背景。

このような経済外の弊害だけでなく、経済界においても限界効用の陰りや経済のバブル化、カジノ経済化など飽和性と不安定性に対する問題提起が出されるようになってきた。その一つの方向としてサーキュラーエコノミーのプロトタイプとして議論されたのが、インダストリアル・エコロジーさらには脱物質化(dematerialization)などの潮流であった。21世紀になるとレアメタル危機が訪れ従来にも増して資源制約が意識されるようになり、その直後のリーマンショックそしてその後の世界的な株価バブルは、経済の持続的安定性に対して多くの人々が懐疑的になる状況を作り上げた。その一方で気候危機や生物多様性の喪失など人間活動の弊害が人類の存在そのものに対して重荷となっている現状認識も強まり、人間活動全体を持続可能性のあるものに転換していかねばならないという認識とともに、そのためのアクションを開始しなければならないという切迫感、このような状況を背景として資源効率⁶⁾の改善、資源消費と経済成長の連動の回避(デカップリング)が唱えられ、その転換の方向として打ち出されたものがサーキュラーエコノミーである。

それゆえにサーキュラーエコノミーは、名前は

サーキュラーではあるが、循環の要素は主たる目的ではなく、その一部に過ぎない。なぜサーキュラーというかと言えば、対置される大量消費経済をリニア(直線的)経済と呼びそこから脱皮を図るためであり、サーキュラーはリニアの対置語として使われたと理解しておくのがよいだろう。

このように、サーキュラーエコノミーは、「廃棄物問題の解決のために循環型システムを作ろう」という局所的なアプローチではなく、産業革命以来の大量生産・大量消費で経済活性を得たシステムをリニア経済ではない別の形で経済活性を与える方向に転換しようという取り組みなのである⁷⁾⁸⁾。

「なげやり経済」から「よりそい経済」へ

リニア経済で問題にしなければならないことは3つある。1つは「会社は何のためにあるのか」ということである。リニアな大量消費社会ではマスを大きくし効率を上げる観点から投資を呼ぶことが必須とされ、そのために「会社は株主のためである」という理解が広められ、そのため収益増こ

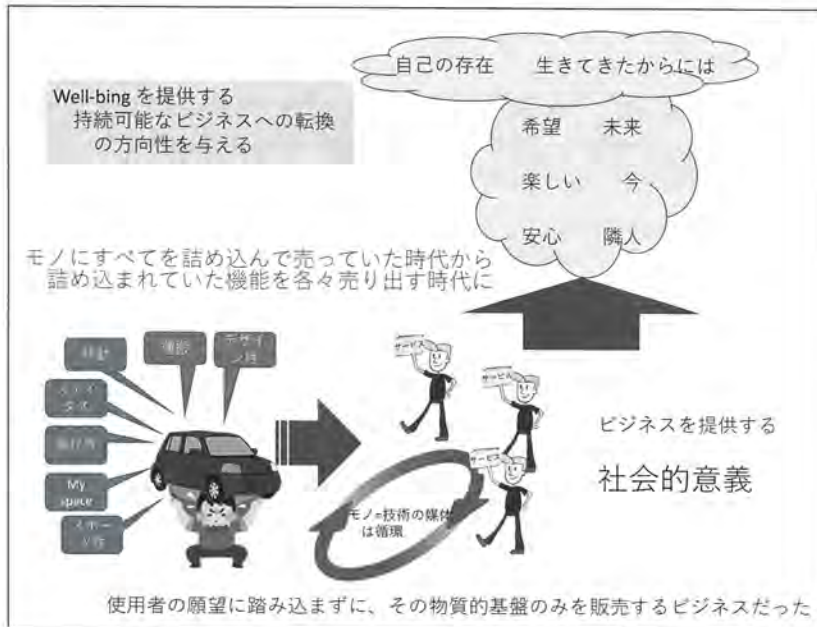


図2 モノに多様な機能を詰め込んで売る。

それが会社の目的であるとまでされるに至った。今、会社の持続可能性の観点からこの前提を見直す考えが広まりつつある。すなわち「社会の必要に答える会社が生き残れる」という発想である。すなわち株主のための利益追求の会社は長期的には生き残れず、社会的便益の追求として必要性を認められる会社こそ生き残れるという発想であり、中には「将来、株式会社はなくなる」とまで言う経営専門家もいる。その入り口にいるのが、SDGsへの取り組みや環境への取り組みの社会的アピールであるといえる。

2つ目に、「モノを売る」ということの意味である。現在の一般的常識では、売買はモノのやりとりと意識されている。しかしその実、我々はモノに幾多のサービスを込めて販売している。図2の下方に自動車の絵を描いたように、自動車は単なる輸送機械ではなく、自分の空間であり、快適性の追求媒体であり、ステイタスでもある。これらの多用な移動時に満たされるサービスを「自動車」というモノに詰めて販売している。ここで、このような形でモノに詰め込まれていた機能やサービスをばらうりすれば、自動車車体を変えない人にも機能を販売でき、自動車車体の変更(買い替え)

なしでも適宜その時代に即応したサービスを提供できる。これまでこのような多様なビジネス形態を「モノを売る」という形でしか経済機会としえなかったのがリニア経済であり、大量消費と大量生産を結び付ける構造であった。そして「モノ」と「サービス」の分離は、作り売側視点ではなく、well-beingを求めて使う側に寄り添ったより多様なサービス形態を追い求め経済行為化していくことができる。

3つ目の視点は、まさにそのwell-beingと経済行為を結び付ける視点である。これまでの大量生産→大量消費→大量廃棄が大きな問題だったのは、それが一方向だったからである。このとき「一方向」とは循環の反意語ではなく、大量生産から消費という一つの方向性、すなわち、「モノを売る立場」でしか経済行為をとらえていないという「一方向性」である。図3の上を示すように、これまでのリニアな「モノ売りきり経済」では、販売までが社会の経済行為であり、消費者に手渡されたところで「製造者責任」というフィードバック以外は図のように使う機能をうまく発現させるか、とにかく保守するか、さらにいかにカスタマイズするかなどは消費者に任せられ、製造販売側はそれを可

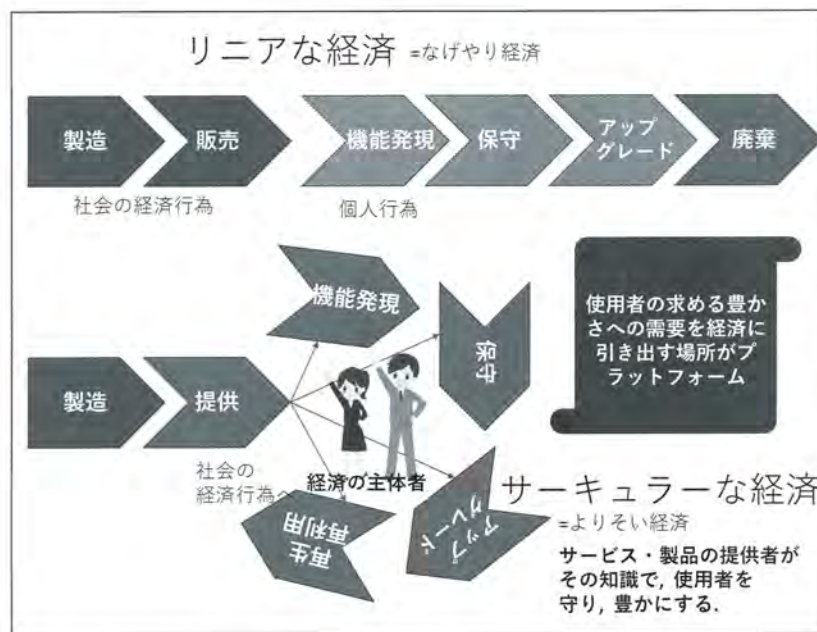


図3 リニアな「なげやり経済」からサーキュラーな「よりそい経済」へ。

能性で膨らんだ過剰パッケージとして「モノに込めて売る」だけであった。ここで経済行為の主体者が製造側ではなく、図3の下ように使用する側だとすれば、これまで個人に任されてきた様々な機能発現などの行為のサービス化が、新たな経済行為として浮かび上がる。リニアな経済は、製造販売側の「なげやり経済」であり、それに対置してサーキュラーと呼ばれる経済は、生活者への「寄り添い経済」なのである。

残存価値，プラットフォーム，サービサイジング

このようなサーキュラーエコノミー、すなわちリニアな「なげやり経済」から転換する「よりそい経済」の基本的な要素を上げれば、①残存価値、②プラットフォーム、③サービサイジングになる⁹⁾。

残存価値 (retained value) は、使っていたり使い終わったものに残されている価値である。リニアな「なげやり経済」では、新たな製品の販売行為を妨げるものとして、この残存価値が極めて低く評価されてきた。しかし経済全体を「よりそい経済」まで広めるとなると、ここに大きな経済市場が形

成される。「なげやり経済」で回収される残存価値はリサイクルして原材料資源となる資源価値が関の山であった。しかし、使用済みという段階だけでも、リユースで賄えたり、さらには工夫をこめたアップグレードで付加的に価値を創成することもできる。使用している段階では、修理 (repair) して延命し手慣れた製品を使い続けることもできるし、EV用のバッテリーを家庭蓄電に使うなどのマルチパーパスと呼ばれる使い方もできる。さらに使用中での共有、シェアリングなど、モノ売りでは売りつくせない消費者に渡ったものにある残存価値に目を付けたビジネス展開が、これからの重要な視点となる。

次いで、プラットフォームは、今のGAF A型のプラットフォームを目指そうというものではない。むしろ自動車部品のリサイクル(再利用)システムをイメージしてほしい。インターネットで再利用可能部品の情報がつながるまではそれぞれの解体サイトでの在庫管理となり、膨大なヤードを持ちえない解体業のユーザーが必要とする部品とのマッチングは不可能に近かった。これがインターネットを基にプラットフォーム化することで、日本の解体業全体が巨大なヤードとなり、北海道の

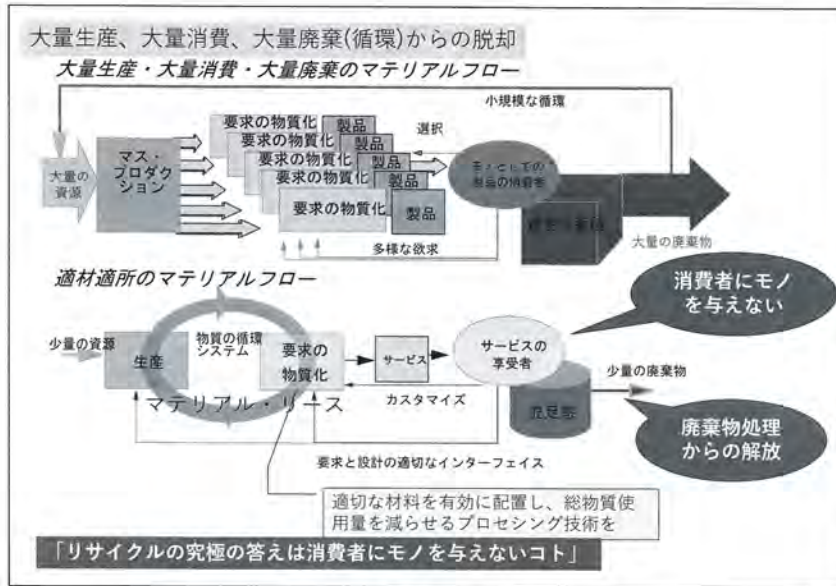


図4 サービスサイジングの選考概念マテリアルリース。(HALADA: 3rd International Conference on Ecomaterial, 1997, 9 Tsukuba)

中古車修理に必要な部品を沖縄から取り寄せることは苦もなくできるようになった。このようなプラットフォーム化が部品の管理だけでなく、製造技術の連結などに対しても行われてくるようになる。電気自動車で有名なテスラはアルミニウムの巨大ダイカスト装置を発表したが、それはテスラ社が内製するためではなく、中国などの製造会社に使ってもらうためのものであり、アディティブマニファクチャリングの設計情報などとともに製造技術や設計技術もプラットフォームの下で横軸展開をしていくことになるのである。

サービサイジングはMaaS (mobility as a service)、LaaS (lighting as a service) などと呼ばれるように、移動媒体の自動車や照明媒体の電灯を売るのではなく、移動の便宜や照明のノウハウの方にこそビジネスポイントがあるという見方である。筆者は1997年に図4のようなマテリアルリース¹⁰⁾という名で、使用者はモノを購入するのではなくサービスを享受し、モノはサービスプロバイダー側であたかもリースされているかのように管理循環されるシステムを提案していた。当時は、非現実的であるとお叱りを多くの方面から受けたが、現在まさにこの形が進行し、使用者はモノの消費者ではなく、サービスの享受者であるという考え方は

当たり前になってきているのである。

モノに込められた技術を使用者へ

ここまで見てきてわかるように、サーキュラーエコノミーの目指す産業システムのトランジションは「モノからコト」ではなく、リニアな「なげやり経済」の「モノ売り」から脱却し、使用者の必要をコトとしてとらえ、そこに適切にモノを配置してサービスを実現するところに経済の活力を使うことである。すなわちサーキュラーエコノミーの目指す方向は、モノ離れではなく、使用者に寄り添ったサービスのためにモノを有効に使うことである。もちろん、「モノを売ればよい」という「なげやりな」発想は過去のものとなり、そのモノがいかに使用者に対してサービスを具現化(materialize)するか、そしてそのサービスを持続さらには使用感をふくめて高度化するかが問われることになる。

実は気づかないうちに我々はそのようなモノの提供の仕方を始めている。たとえばリチウムイオンバッテリー(LiB)であるが、図5はそのLCAの結果からどの部分の環境負荷が大きいかを示したものである。LiBはコバルト等活物質の負荷が大

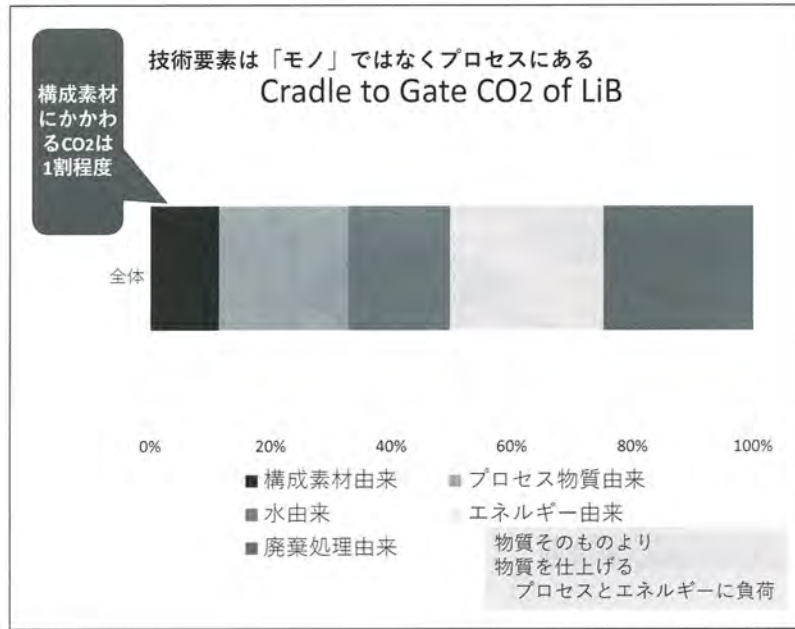


図5 LiB(リチウムイオンバッテリー)の環境負荷の構成。

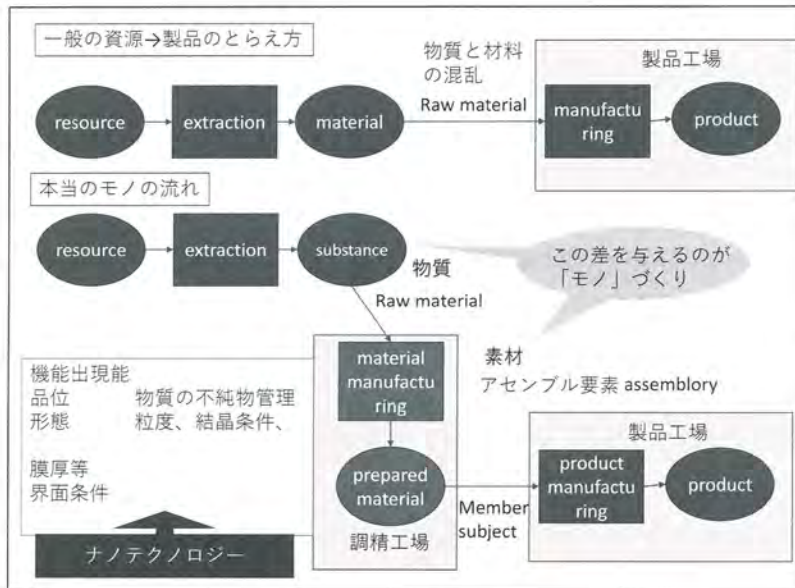


図6 重要だが忘れ去られている機能現出・調整工程。

きいかのように言われているが、資源そのものではなく、それをLiBとして高性能で機能させるための造粒、粉碎、浄化の繰り返しにかかわって投入されるプロセス物質やエネルギー、水、そして浄化の結果として排出される廃棄物の処理、これらの使用性能にかかわる物質制御技術に負荷がかかっているのである。すなわちLiBはモノではな

く、使用段階を強く意識した技術の集約体を使用者に与えているのである。

よく、図6の上のように、資源が抽出されて素材となりその素材が組み立てられて製品となる、というような説明がなされているが、実は図6の下部のように資源から抽出された物質は、調整工程において、使用時の機能発揮可能なアSEMBル

要素となるための技術投入が行われ、そこで初めて使用時の価値を生み出しているのである。すなわち、モノを売っているように見える製品の多くは、モノに込められた技術を売っているのである。

しかし、先に図2にみたように、それらの技術はモノに込められてはいるものの、モノとしてマーケットで取引され、売るところまでしか責任を持たない「なげやり経済」の枠からは出られていなかった。この技術をいかに使用者とともにより効果的に使いこなせるようにしていくか、これがサーキュラーエコノミーで求められるモノづくりの発想になり、またそこにビジネスチャンスを見出したモノづくりは持続的に展開していくことができる。

製品・素材の「医者」「教師」

サーキュラーエコノミーの中では、right to repair (修理する権利) ということが唱えられている。ここにリニアな「なげやり経済」を脱却する方向性が見えている。それは、使用者が修理し維持するところまで製品サービスの提供者は面倒を見る(サービスの対象としてビジネス化する) ということである。ヒトでいうならば体調を整える医者

の役割を意識するということである。図7にそのイメージを記したが、これまでの製造側の努力はモノを市場に生み出すまで、すなわち助産師の役割で満足していた。しかし製品のライフサイクルをヒトに例えると、重要なものは活動のコンディションを整える医者であり、さらに高度な活動形態を導き出す教師ではないだろうか。実はモノづくりにかかわる人々は、「使ってもらおう」という重要な段階に至る前の「使えるものを渡す」というところの満足にとどまっていたのだ。

となると、right to repair はまだその入り口に過ぎない、right to upgrade, right to customize など使用段階でのモノの管理にこそ、モノづくりの技術は結実させていかねばならないのではないだろうか。その際重要になるのは「劣化の科学」だろう。モノは必ず劣化する。従来のリニアななげやり経済では、劣化は新しい販売の契機となる現象としてあまり注目されていなかった。しかし人間界において医者が重要な役割であるように、劣化の科学はサービスを支えるモノの管理として極めて重要な役割を担う。社会インフラとしては、首都高や新幹線のメンテ技術は世界的にも高い評価を与えている。しかし、そこに対する資金投入はまだ少ない。それは現在の社会がまだリニアななげやり

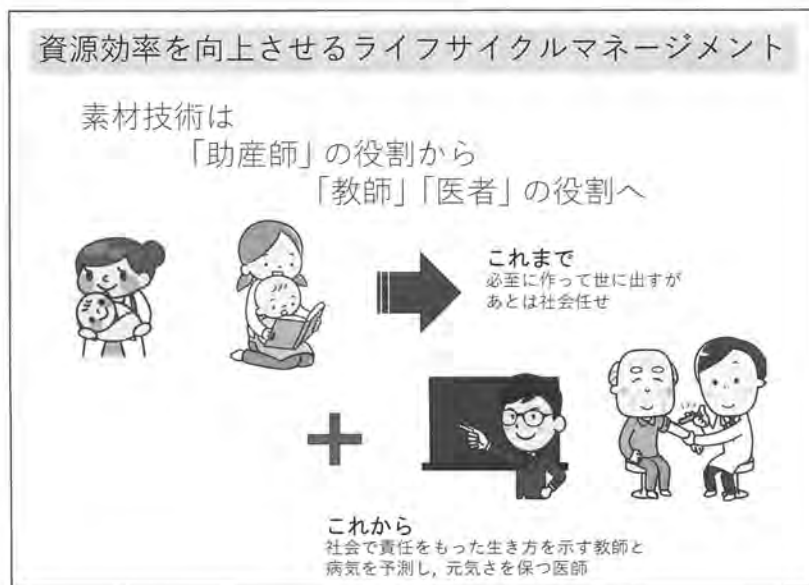


図7 素材の助産師から医者に。

経済だからであり、サーキュラーエコノミーへのトランジションは社会全体を「安心してモノが使える」ことにお金をかける方向にもっていくことでもある。

なお、right to customize は、モノを買った後のcustomize だけではなく、製造段階から使用者側のcustomize が組み込まれることも意味している。これまでのリニア経済では、大量の同一品質のものを社会に供給する、いわゆる巨大なコピー技術であり、消費者はその類型化されたコピー製品から選択しなければならなかった。しかし、使用段階でのサービス媒体としてのモノは、より使用者に寄り添いその個性に対応できる製品提供に進化する。その手段のプロトタイプも我々は手にしている。3D プリントとして知られるアディティブマニュファクチャリングである。すでに医用材料や補聴器などでは使用者の個人に合った製品の製造がおこなわれている。従来の大量生産コピー技術の到達点を踏まえつつ、このような個々の使用を意識したカスタマイズ技術をいかに組み込んでいくかということも、サーキュラーエコノミーに向けた素材技術の発展課題である。

インベンション(発明) 指向から イノベーション(革新) 指向へ

このようなモノづくり・素材技術の転換をすすめていくのに求められるのはイノベーション(革新的)発想である。この言葉はよく聞かされるが、実は間違った理解が横行している。すなわちインベンション(発明)との混同である。インベンションは従来にない新しいものを生み出すが、イノベーションの要素は新しいものである必要はない。従来にある技術やシステムを利用して、それらの革新的組み合わせでかつてなかった新たなファンクションやサービスを生み出すのがイノベーションである。

よく「技術イノベーション」と日本では言われるが、それは新しい技術や智の創成ではなくそれらの総合といってよい。しかし、我が国で「技術イ

ノベーション」と言われると従来型の新技術創成のための研究開発投資になってしまっており、そこからは単純にはイノベーションは生まれない。

そもそもイノベーションが叫ばれてきた背景には、インベンションの新技術たよりの新マーケットの開拓速度では今の市場の飽和感を打破できず急速に転換していく社会の要請にこたえられないということがあり、そのために既往の技術を総合化して目的のために再組織していく新しい発想が求められたところがある。それを従来型の技術開発と読み替えてしまった国は世界の後塵を拝しても仕方がない。QR コードは日本の素晴らしい発明ではあったが、それをネット上の認証システムとして展開したところにイノベーションはあったし、アフリカでの日本を大きくしのぐ数のベンチャー企業は巨大な設備投資のいらぬイノベーションを展開しビジネスを拡大している。

サーキュラーエコノミーは、新しい画期的な技術の出現は歓迎はするがそれを待機することはしない。既存の技術でもこれまでなかった社会ニーズに応えることができ、それを形づける総合化力とその社会適用が求められるのである。先に素材・製品の「医者」という表現をしたが、人間社会ではすべての医者が先端医療を行っているわけではないことに注目すべきである。知識の総合的視点を持った具体的事象への適用、そしてそれをモノに具現化して使用者に寄り添ってサービスする媒体となすことのできる技術、これがこれからのモノづくりに求められるのである。

世界が求める「わ」の技術

われわれは、モノではなくモノに込めた技術を売っていたと述べた。また、「売る」ことではなく、使用者に寄り添うようにサービスを具現化することにモノの役目があることも述べた。まとめると、「心を込めた技術をみんなで使ってもらう」ことに創作者の喜びがあり社会的意義がある、ということになる。その意味で日本が狭い国土の中で争いを極力避けながら培ってきた文化が今世

界のこれからの方向を指し示す可能性として求められている。それは、*mottainai* であり相手を思い図る *omotenashi* であり、コンパクトさに美を求める *kawaii* であり、次の使用者まで配慮する *atoshimatsu* である。これらは、和・環・話・輪と列挙できる「わ」の文化と言えらる。このような「わ」の文化を体現したモノづくりとモノ管理がサーキュラーエコノミーで世界が求めている素材技術であるといえる。そして日本の多くのモノ作り者の中にはその心が存在している、問題はそれをいかにしてビジネスとして新しい経済の姿に結び付ける本当のイノベーションを生み出せるか、なのである。

参考文献

- 1) EU Circular Economy Action Plan, https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf, (2015).
- 2) STARTUP DB 報告. https://media.startup-db.com/wp-content/uploads/2022/01/ad335371940fbfbfe706871bf9e6bfe.png?_ga=2.74692570.919518820.1678949725-1934946793.1678949725
- 3) ドネラ・H・メドウズ, ローマクラブ人類の危機レポート「成長の限界」、訳大喜多佐武郎, ダイヤモンド社, (1972).
- 4) 国連環境会議, 1972 スtockホルム.
- 5) 環境と開発に関する世界委員会 (ブルントラント委員会) 報告書 - 1987 年 - 『Our Common Future (邦題: 我ら共有の未来)』, https://www.env.go.jp/council/21kankyo-k/y210-02/ref_04.pdf
- 6) K. Halada, S. Tahara and M. Matsumoto: New Indicators 'Acircularity' and 'Resource Efficiency Account' to evaluate the effort of Eco-Design in Circular Economy, *International Journal of Automation Technology*, **16** No.6 (2022), 684-695.
- 7) 原田幸明: 自動車産業のサーキュラー・エコノミーと部品産業の将来, プレス技術, 2022 年 8 月号.
- 8) 原田幸明: プラスチック問題とサーキュラーエコノミー, 包装技術, **57** No.8 (2019), 10-19.
- 9) Kohmei Halada: Activities of Circular Economy in Japan - Towards Global Multi-Value Circulation -, *International Journal of Automation Technology*, **14** No.6 (2020), 867-872.
- 10) Kohmei Halada: 3rd International Ecomaterial Conference, (1997) の本人訳.

はらだ・こうめい HALADA Kohmei

1979 東京大学大学院博士課程 (金属) 修了, 科学技術庁金属材料技術研究所, (国研) 物質・材料研究機構を経て, 現在 物質・材料研究機構名誉研究員, (一社) サステイナビリティ技術設計機構代表理事, サークュラーエコノミー・マルチバリュー循環研究会代表, 2022 年瑞宝小綬章受賞.