



サーキュラーエコノミーの 未来の実現へ、どうテクノロジーを 活用していくべきか

サーキュラーエコノミー実現への
テクノロジー活用トレンドと今後のシナリオの展望



www.pwc.com/jp

目次

はじめに ——サーキュラーエコノミーの議論の活性化	3
サーキュラーエコノミーの未来を見定める6つの外部要因とその状況	4
サーキュラーエコノミー発展によって起こり得る未来	6
サーキュラーエコノミーの発展へ向けた世界の動きとその先の未来	
循環型社会と経済合理性が両立した未来社会の特徴	
サーキュラーエコノミーの未来実現へのテクノロジーの活用トレンドと、 導出されるアプローチシナリオ	8
地域社会の資源調達手段を安定化する	
循環起点の変化に対応して循環量の適正化と品質の安定化を図る	
モノや資源のデータ取引や管理の低コスト化、アクセシビリティの公平化を図る	
モノや資源のデータ取引とそこから生み出される価値に関わる注目テクノロジー	11
モノや資源のデータ取引とそこから生み出される価値に関わる注目テクノロジー	
注目テクノロジーに対する世界と比較した日本の取り組み状況	
テクノロジー活用のアプローチシナリオの実行ステップ	14
ビジョン作成とKPI設定	
エコシステムのモデル設計と実証	
オープンクローズ戦略のシナリオ化	
アクションロードマップの作成	
サーキュラーエコノミーのステークホルダーへの示唆	16
Intelligent Business Analyticsによる分析	



はじめに

——サーキュラーエコノミーの議論の活性化

近年、サーキュラーエコノミーへの関心が高まっています。

サーキュラーエコノミーとは、従来の大量生産・大量消費、その後廃棄という一方通行の直線的な流れを前提とした経済から、生産・消費の後、回収し、再度、生産・消費の流れに組み入れる循環モデルのことを指します。

モノの流通がグローバル化し、大量生産・大量消費が加速する一方、資源の偏在性や有限性が懸念されていたところに、地政学的な影響によってモノの流通が滞るリスクが顕在化しました。また、資源獲得に際して環境負荷や倫理的側面への配慮についても重要視されるようになり、関連する法・規制の提案が見られるようになりました。

サーキュラーエコノミーは消費したモノを再び生産・消費のループに組み入れる上で履歴の記録が必要になるという意味において、モノの流通だけでなくデータの流通でもあります。データ流通の観点から、現代において十分発展した情報技術基盤を活用することで、サーキュラーエコノミーを促進し、よりサステナブルな社会を実現することが経済活動の新しい価値の側面として認識されつつあります。

このような背景を鑑みて、本レポートでは、ビジネスに影響を及ぼすサーキュラーエコノミーの6つの外部要因を踏まえてサーキュラーエコノミーにおける未来像を想定した上で、サーキュラーエコノミー対応のためにどのようにテクノロジーを活用すればよいかを考察し、アプローチシナリオを描き、実現のためのステップを示唆するものです。

まず、サーキュラーエコノミーの概念を説明した上で、政治的、経済的、社会的、技術的、法的、環境的の6つの外部要因を踏まえて、現在における未来の兆候を例示します。

その上で、サーキュラーエコノミーが発展したときに起こり得る未来を、①地政学対応やESG投資による新たなエコノミクス、②モノと資源の循環起点の変化、③モノと資源のデータ連動による新たな価値形成の3つのシナリオとして描きます。

その後、サーキュラーエコノミーの未来実現へのテクノロジーの活用トレンドとして、(i) 地域社会の資源調達手段を安定化する、(ii) 従来の資源調達を起点とした生産者主体の動脈バリューチェーンの考え方に対して、ユーザーを起点としたモノや資源の再利用の考え方により循環起点の変化に対

応して循環量の適正化と品質の安定化を図る、(iii) モノや資源のデータ取引や管理の低コスト化、アクセシビリティの公平化を図るといった3つのアプローチシナリオを示します。

特に、(iii) を実現するために注目されるテクノロジーと日本の取り組み状況を世界と比較して示します。それは、サーキュラーエコノミーにおいてテクノロジー活用が貢献できる場面として、特にモノの移動や利用に関するデータの管理に注目が当たっているからです。資源循環の履歴を把握するだけでなく、より効率的に資源循環させることによって新たな価値観へ対応したり、新たな付加価値を創出したりすることを通じて、結果的に事業構造の転換につながる可能性を秘めています。

一方で、サーキュラーエコノミーに用いられるテクノロジーは必ずしも新しいものだけではなく、データ管理を軸に、サプライチェーン全体で旧来のテクノロジーを組み合わせながら行われます。これら全ての技術を単独で保有することは困難であり、業種の垣根を越えてステークホルダーとアライアンスを組みながらエコシステムを構築していく必要があります。しかし、海外と比べると日本は後れを取っており、エコシステムの形成が始まったばかりです。

今後、日本でもサーキュラーエコノミーのエコシステム形成が進む上で、テクノロジーの活用のアプローチシナリオを実行するためには、(I) ビジョン作成とKPI設定、(II) エコシステムのモデル設計と実証、(III) オープンクローズ戦略のシナリオ化、(IV) アクションロードマップの作成という4つのステップを踏む必要があり、その実施においては、アライアンス、レビュー機能、デザイン思考、渉外といった組織機能が求められることが示唆されています。

特に、データを軸とした共創エコシステム形成が重要であり、業種の垣根を越えて取り組む必要があるため、多様なステークホルダーとの関係性を調整しながら戦略を進めていくアライアンス人材の巻き込みが不可欠でしょう。

本レポートが、サーキュラーエコノミーに向かってテクノロジーを活用して、環境的にも経済的にもより良い持続可能な社会を実現する上で、ステークホルダーの皆様の貢献価値を最大化していく一助となれば幸いです。

サーキュラーエコノミーの未来を見定める 6つの外部要因とその状況

サーキュラーエコノミーの考えは、生産・消費活動による資源枯渇と生物多様性の損失に対する危機感を背景に生まれました。サーキュラーエコノミーが進展した未来では、モノが生産・消費された後、回収され、再度、生産・消費の流れに組み入れられて循環することになります。流通がグローバル化された社会において、このような循環は特定の地域内の

みならず広域に及ぶため、各地域における政治、法に関する影響はもちろんのこと、社会、環境といった点についても影響を受ける外部要因として捉える必要があります。地域性が反映されやすい外部要因と経済的な観点を踏まえた上で、どのようなテクノロジー活用の可能性があるのかを考えることが求められます。

図表1. サーキュラーエコノミーの6つの外部要因



環境的要因 (environmental)

世界の人口は2022年時点の80億人から2050年には97億人に達する見通しで、生産・消費の活動規模拡大によってもたらされる環境影響に目を向ける必要があります。石油や鉱物、水などの資源が枯渇し、資源獲得の競争が激しくなると予想されています。生産・消費活動の拡大に伴い廃棄物についても、2020年時点の141.2億トンから2050年には320.4億トンに増加すると見られています。現在のまま適切な対策を

講じなければ、2050年には海洋中のプラスチック量が魚の量を上回るとの推計もあり、生物多様性の損失も懸念されています。

政治的要因 (political)

サーキュラーエコノミーで先頭に立つ欧州においては、2020年の域内の1次エネルギー総供給量の約44%は原油から得ており、その原油の約97%は外部に依存しています。ま

た、電気自動車で使用する電池やモーターを作るために必要なレアメタル・レアアースの供給についても同様に外部依存している状態です。このような状態は、禁輸や経済制裁など政治的要因の影響を受けやすく不安定であり、循環経済への転換によって外部依存を軽減することを目指しているとも見られるでしょう。

法的要因 (legal)

サーキュラーエコノミーに関する政策や法律は各地域で制定されています。例えば、欧州の「サーキュラーエコノミー行動計画 (2020)」をはじめとして、中国の「循環経済の発展に関する第14次5カ年計画 (2021)」、米国の「国家リサイクル戦略 (2021)」¹、および日本の「循環経済ビジョン2020」など、生産・消費および廃棄物管理から再資源化原料まで含めた、ライフサイクル全体を網羅する対策および法律案の制定が相次いでいます。欧州ではさらに詳細に踏み込んだ「エコデザイン規則案 (2022)」が合意され、対象製品に耐久性、再利用可能性、改良・修理可能性、エネルギー効率性などの基本要件達成を求め、その情報を消費者に開示することが義務付けられました。

社会的要因 (sociological)

生産・消費など経済の主体である生活者の価値観の変化も考慮する必要があります。2040年にはサステナビリティや社会貢献を重視するミレニアル世代・Z世代が消費活動の中心となります。この世代を中心に、環境・社会課題に取り組む必要性を理解・共感し、行動を実践することが当たり前の社会に変容する可能性を考える必要があるでしょう。モノ・サービスの選定基準の上位にサステナビリティが上がってくると、非循環利用を想定した購買は見送られ、提供企業への印象も悪化するといった新たな価値観の浸透が想定されます。また、人権意識への高まりによって、強制労働やハラスメントなどを伴う企業活動は人権に対する負の影響として強く認識されるようにもなるでしょう。

経済的要因 (economic)

一方で、経済的側面に目を向けると、希望的な見方もできます。例えば、循環経済モデルによって創造される価値や新たな産業の規模は2030年までに4.5兆米ドルに上ると言われており²、特に欧州ではサーキュラーエコノミーは成長戦略の1つに位置付けられています。サーキュラーエコノミーに関する技術への投資額も年々大きくなっており、2018年から2022年の間にも2,600億米ドルの投資が行われました³。また、サーキュラーエコノミー関連ファンドも組成されるなど、投資テーマとしても重要性が高まっています。投資家・金融機関が、技術や事業でサーキュラーエコノミーに貢献する企業に対して事業資金を提供するには、企業活動が可視化され、適切に評価できる状態になることが重要でしょう⁴。

技術的要因 (technological)

サーキュラーエコノミーは消費したモノを再び生産・消費のループに組み入れる上で、その履歴の記録が必要になります。これは、サーキュラーエコノミーが進展するにつれて、モノの循環の履歴を記録したり、参照したり、評価したりする機会が増加するため、関連するデータの流通が活性化することを意味しています。一方、技術的な視点から見ると、情報技術基盤を活用することで、サーキュラーエコノミーの促進や、よりサステナブルな社会の実現に貢献し、経済活動の新しい価値を創出することにつながると捉えられます。

以上の6つの外部要因を踏まえて、未来の兆候とも言える事例を紹介します。

欧州のCatena-Xという取り組みであり、モノの循環とデータ流通基盤の整備をリンクさせたものです。Catena-Xとは、自動車産業全体でサプライチェーンに関するデータを共有するプラットフォームであり、資源循環に関するデータも扱います。プラットフォーム構築に向けて、関連する欧州企業を中心となってオープンかつセキュアなデータ連携基盤の確立を進めています。また、データ連携基盤の試行実証については政府も支援しています⁵。資源循環のデータとは、例えば、どの原材料がどのくらい、どの部品に含まれているかなどが挙げられます。これらをデータ化することで皆が循環の記録を参照できるようになり、あるいは、部品の状態を記録すれば、使用後にリサイクルするかリユースするかの判断ができるようになります。

Catena-Xとも関連する別の事例として、バッテリーパスポートが挙げられます。これは、バッテリーのバリューチェーン全体とライフサイクルの各段階の情報をデータプラットフォームで記録することで、データに基づき仮想空間上で実社会を再現したり、カーボンフットプリントやデューデリジェンスなどの情報の透明性を確保したりすることを目的としたものです。バッテリーパスポートは欧州の電池指令改正 (2022) に沿った内容となっており、要件を満たさない製品は市場から排除されてしまいます。一方で、バッテリーパスポートによって、持続可能性の観点で電池をベンチマークできるようになり、新たな品質指標として定義される可能性もあります。

このように、モノの循環とデータ流通を連動させて業界ごとのプラットフォームを立ち上げ、事業機会を創出したり、競争を排除しようとする動きが既に見られています。これはサーキュラーエコノミーが進展した未来の兆候と見ることもできるでしょう。

サーキュラーエコノミー発展によって 起こり得る未来

サーキュラーエコノミーの発展に向けた世界の動きと その先の未来

前述のような政策や企業の取り組みが発展した先の2040年の未来には、地球資源利用の最適化を目指した新しい社会展望が見えてきます。その未来では、企業とユーザー、国・自治体、そしてステークホルダーの間での新たな価値観やエコノミクスのもと、エコシステム内で資源や製品が循環する社会システムと経済的な合理性が両立した社会が実現していると考えられます。

循環型社会と経済合理性が両立した未来社会の特徴

循環型社会と経済合理性が両立するサーキュラーエコノミーが発展した2040年は、地政学リスクやESG投資の発展により現在の社会システムや市場ルールとは異なる価値観、エコノミクスが生まれることが想定されます。またユーザー起点のバリューチェーンの考え方により、企業や国・自治体は、モノと資源の循環データを核とした新たな価値創造や社会システムの運用を重要視するでしょう。これらを踏まえると、未来社会の特徴として下記の3点が挙げられます。

● 地政学リスクへの政策的対応とESG投資の発展による 新たなエコノミクスの実現

企業や政府は、資源調達や資源と製品の再利用に対するサプライチェーン、技術優位性構築に関する地政学リスクにさらされています。また、資本市場のESG投資基準のさ

らなる発展により、社会や企業活動の持続性に資する新しい付加価値の経済的評価概念が構築されています。企業はその概念に基づいた製品・サービスを提供し、投資家はその評価をよりどころの1つとした投資活動が常態化することで、新たなエコノミクスが社会経済として稼働しています。

● モノと資源の循環起点の変化

資源は採掘されたものだけではなく、また製品は製造されるものだけではなく、それぞれ再利用されることが基本コンセンサスとなっている将来社会では、一般ユーザーに長く所在する製品および構成要素としての資源量が各段に増えています。また、従来の資源起点としたメーカー主体の動脈バリューチェーンの考え方よりも、ユーザーを起点とする静脈から動脈へのループでの価値構築が企業の戦略上重要となっています。

● モノと資源のデータ連動による新たな価値形成

新たなエコノミクスを駆動力としユーザー起点とするサーキュラーループでは、その中でダイナミックに循環する製品や資源に関するデータが企業の価値創出の源泉となっており、共有と他のデータシステムとの連動による活用拡大の場が市場エコシステムの中で醸成されています。国や自治体は、さらにデータ活用の場の形成を支援し、自らの政策・行政データとの連動により、持続的な循環型の社会システム運用を実現しようとしています。





【製品ライフサイクルの未来】 社会の循環型経済への移行が加速した結果、家電や自動車、家具などの耐久財においては、より壊れにくい製品だけではなく、壊れても修理しやすい製品が人々に好まれるようになっていく。メーカー企業は、製品自体の耐久性を高めるだけではなく、分解しやすい機構やスペア部品の共有化、標準化など、製品設計のモジュラー化をさらに進めている。その結果、各企業は自社製品の競争優位性を、モジュラー設計の利点を生かしたユーザー側での製品カスタマイズサービスや、販売店ネットワークの強化を通じた自社製品の改修・修繕、再流通といったリファービッシュの新しいビジネスモデルの拡大に重きを置いている。そのようなリファービッシュビジネスを好機と捉え、修繕部品製造や修繕業務に特化したローカル企業も多く登場している。

【ユーザー動向の未来】 人々は、いかにして耐久財を長持ちさせているか、修繕して利用しているかのアイデアをインターネットを通じて共有することに価値を見いだしているが、そこにメーカー企業も参加することで、作り手と使い手を越えたインクルーシブな新しい関係性が醸成されている。その結果、これまでにないような製品設計やコア部品だけの半製品で提供し、使い手側で組み立てて最終製品化するような新たなバリューチェーンも登場している。



【地球環境経済の未来】 欧州を起源とした循環型経済推進の考え方は、地政学リスク対応の高度化も相まって先進国を中心に広く波及し、各国の産業競争力確保の視点を踏まえて最適化された法規や規制が整備されている。また新興国においては、人権保護と経済発展のバランスからスタンスの濃淡が分かれるが、気候変動の深刻度を勘案した賛同の意向が強い。資本市場は社会の新しい価値観に呼応しており、ESGに関する企業のガバナンスの強化や情報開示度のみならず、戦略的重要度の指標としての循環型社会を高い位置付けのうちの1つとして設定。企業経営におけるアジェンダの1つとして活発な議論や活動推進がなされている。

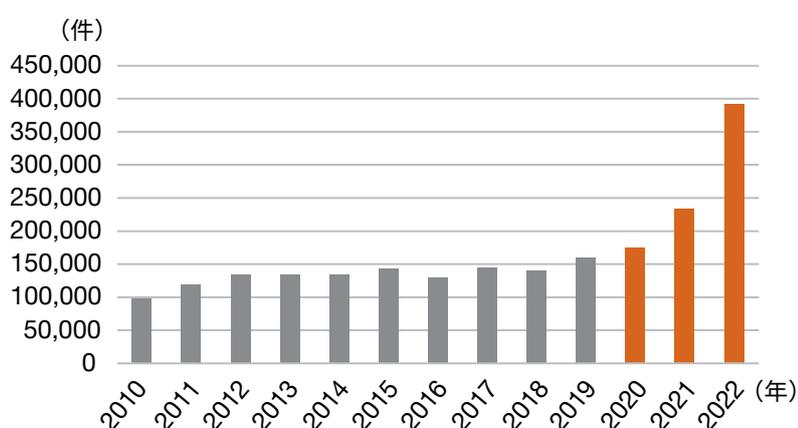


サーキュラーエコノミーの未来実現へのテクノロジーの活用トレンドと、導出されるアプローチシナリオ

サーキュラーエコノミーに関わるテクノロジーの研究開発は、活発に行われています。世界での特許出願数では、特に

2020年以降で著しい増加が見られます。

図表2. サーキュラーエコノミーに関わる特許出願数の推移



2020年における特許出願数

18万件



2020年以降の増加率

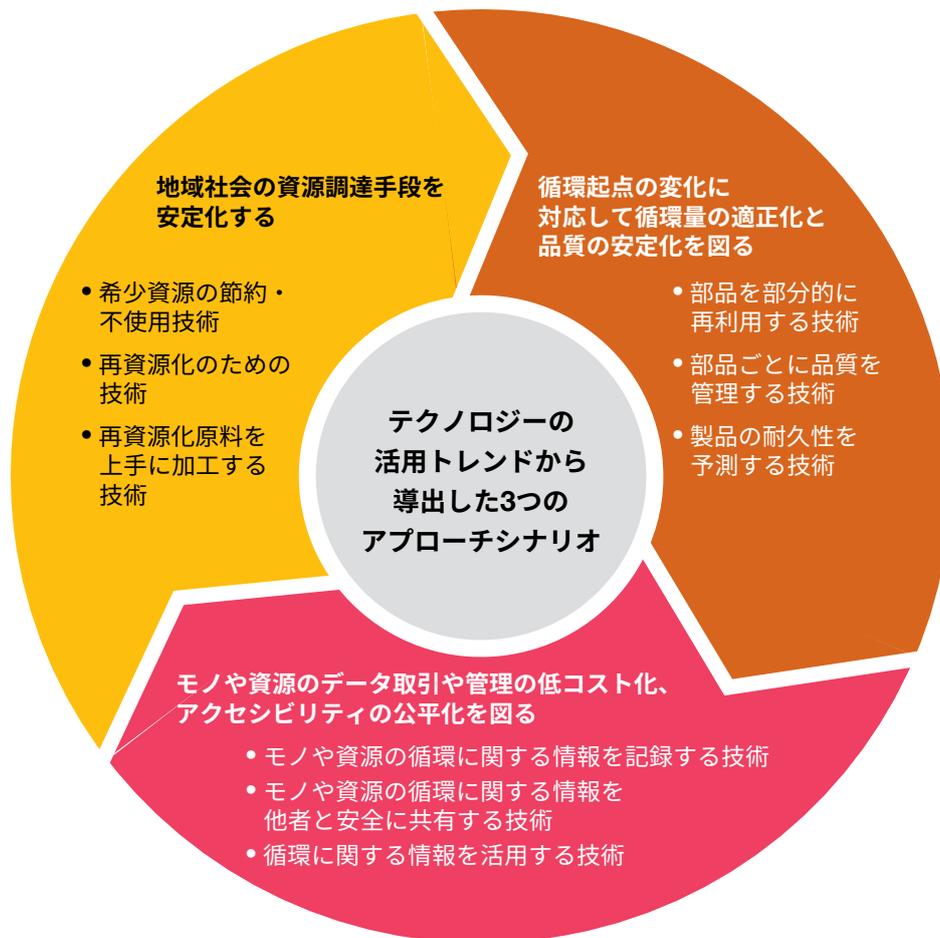
>51%

サーキュラーエコノミーでは、資源を効率的に循環させ続けられるように製品やサービスをデザインし、ライフサイクルについてモニタリングします。サーキュラーエコノミーを実現し、環境的にも経済的にもより良い持続的な発展を成し遂げるためには、設計から廃棄までテクノロジーの活用が欠かせ

ません。以下では、サーキュラーエコノミーが発展した2040年の社会の特徴を見据え、対応する3つのアプローチシナリオを想定し、テクノロジー活用のトレンドを考察します。



図表3. テクノロジーの活用トレンドから導出した3つのアプローチシナリオ



地域社会の資源調達手段を安定化する

地政学リスク視点を踏まえると、平時と有事の双方で地域社会の資源調達を安定化するソリューションが望まれます。資源調達の安定化に関する技術としては、次のようなものが想定されます。

- **希少資源の節約・不使用技術**
希少資源を使わずに従来並みの性能・機能を発現します。例えば、化石燃料由来エネルギーの代わりに風力や太陽光などの再生可能エネルギーを使用すること、リチウムイオン電池や燃料電池に含まれるレアアースやレアメタルなどの希少な鉱物資源を使わずに同等の性能・機能を有する製品を作ることなどが考えられます⁶。この技術は、電気を生産する電力会社や鉱物資源を用いている自動車、家電をはじめとする幅広い製造業に関連し、活発な開発が進められています。また、基礎的な研究が必要になることも多く、産官学連携が活発な領域です。
- **再資源化のための技術**
素材を分類して、最適な程度にまで再生します。例えば、プラスチックのリサイクルでは、品質の高い再資源化のた

めにプラスチックを種類ごとに分別する必要があります。回収したプラスチック製品の状態や再資源化に係るコスト、再生後の製品に求められる品質などを考慮して、プラスチックを加工前のプラスチックペレットに再生させるのか、プラスチックの原料であるモノマーと呼ばれる化学物質まで戻して再資源化するのか、あるいは、他の化学物質と反応させる原料として使用するのかなどの方法があり、使い分けが考えられます。この技術は、回収、再資源化業者に関連します。さらに、分別を考慮した材料設計、製品設計を行う必要があるため、原料を提供する業者、製造業にも関連します。

- **再資源化原料を上手に加工する技術**
再資源化原料を加工し従来並みの性能を発揮します。例えば、現状では使用済みのプラスチックを破碎し、再資源化原料として従来のプラスチックと混ぜて加工する場合に、強度や色調を維持することが難しいため再生プラスチックを用いることのできる製品に限られます。再資源化原料の成分を最適に調整すること、加工条件を最適に調整することなどにより強度や色調を維持する必要があります。プラスチック、繊維、金属などの原料を提供する業者や部品を提供する業者に関連します。

循環起点の変化に対応して循環量の適正化と品質の安定化を図る

再利用が当たり前となっている社会においては、従来の資源調達を起点とした生産者主体の動脈バリューチェーンの考え方よりも、ユーザーを起点としたモノや資源の再利用による静脈から動脈への循環について、流通の適性化と品質安定化を図るソリューションが望まれます。流通の適性化と品質安定化に関する技術としては次のようなものが想定されます。

● 部品を部分的に再利用する技術

部分的な再利用を前提として分解しやすいモジュールを設計します。例えば、ノートパソコンなどの電子機器を製造する際に接着剤やケーブルを使わないようにすることで、バッテリーやディスプレイなど古くなったモジュールだけを交換したい場合の分解作業が簡略化され、再利用を促進します。また、モジュール化によりロボットが分解やモジュール交換作業を担うことにより、再利用のスケラビリティ向上とコスト削減効果を狙うことも可能です。部品、製品設計を行う製造業に関連する技術です。

● 部品ごとに品質を管理する技術

部品の使用履歴などの情報を読み取り、再利用の可能性を評価します。例えば、電気自動車のバッテリーは、「セル」と呼ばれる電池としての最小単位を直列や並列につないで「モジュール」と呼ばれる単位に組み上げ、さらに電流や電圧を制御するシステムなどを付帯させて「パック」と呼ばれる単位にまで組み上げて使用されます。この使用済みバッテリーを二次利用する際に、パックとして再利用できるのか、一部のモジュールなら使えるのか、セルにまで分解すれば使えるのかなどを評価するためには、使用履歴、修理履歴を読み取り、再利用の可能性を評価することが必要です。製造業では履歴を残し、回収業者や再資源化業者が参照できるようにします。

● 製品の耐久性を予測する技術

再利用部品を一部に含む製品の寿命を予測し、製品の予知保全に生かします。再利用部品はそうでない部品と比較して寿命にばらつきがあることが考えられます。現在でも行われている部品の常時モニタリングに加え、例えば、部品が製造されてから、製品に組み入れられ、使用されるまでの一連の情報を個別の部品に振られたIDとひも付けて記録しておくことで、その部品が再利用された際にはID照会によって部品個別の情報を読み取り、運用履歴や劣化情報を収集し、管理するなどが考えられます。製造業が自社の製品を中心にサービスを提供することに加えて、プラットフォームやクラウドサービス提供者もシステム全体の管理、分析の支援サービスを提供できるでしょう。

モノや資源のデータ取引や管理の低コスト化、アクセシビリティの公平化を図る

地域社会の資源調達を安定化させたり、ユーザー起点でモノや資源を再利用したりする社会においては、モノや資源の循環に関するデータが他者と共有される必要性が高まるだけでなく、他のデータシステムと連携して新たな価値創出につなげる取り組みも広がるでしょう。その場合、モノや資源の循環に関するデータ取引や管理費の低コスト化、アクセシビリティの公平化を図るソリューションが望まれます。次のようなデータ連携基盤技術が想定されます。

● モノや資源の循環に関する情報を記録する技術

資源の使用状況、再資源化率などの情報を正しく記録し、データ化して、履歴を追跡できるようにします。例えば、欧州におけるバッテリーパスポートでは、電池の生産者、素材の構成比率、再資源化原料の含有率、電池の性能や健康状態、製造時の炭素排出量、デューデリジェンス関連などの情報を記録し、共有できるようにする取り組みが進められています。データを扱う製造業、輸送業、回収業などでは、大量のデータの取得や入力自動化、簡易化が必要とされます。

● モノや資源の循環に関する情報を他者と安全に共有する技術

性能や特徴など製品・サービス固有の価値に直結する情報は伏せたまま、循環に関するデータのみを他者と共有できるようにします。例えば、製品のライフサイクルにおける資源調達、製造、流通、回収、分解、再資源化などの各工程の履歴は個別に記録しておき、トータルでの炭素排出量を算出して、結果のみを他者と共有するような適切にデータ連携が設計されたプラットフォームのアーキテクチャが考えられます⁷。プラットフォームやクラウドサービス提供者が関わります。

● 循環に関する情報を活用する技術

データ化された循環情報に基づき、製造条件や品質管理を適正化します。例えば、原料構成、製造履歴、使用履歴、評価結果といった個別の情報をそのまま記録するのではなく、情報データを暗号化して統合し、重要な情報は秘密にしたまま生産効率向上や品質改善のための分析を実行できるようにするなどの取り組みが考えられます。プラットフォームやクラウドサービス提供者に加え、情報の活用を専門的に支援する会社が出てくるでしょう。

モノや資源のデータ取引とそこから生み出される価値に関わる注目テクノロジー

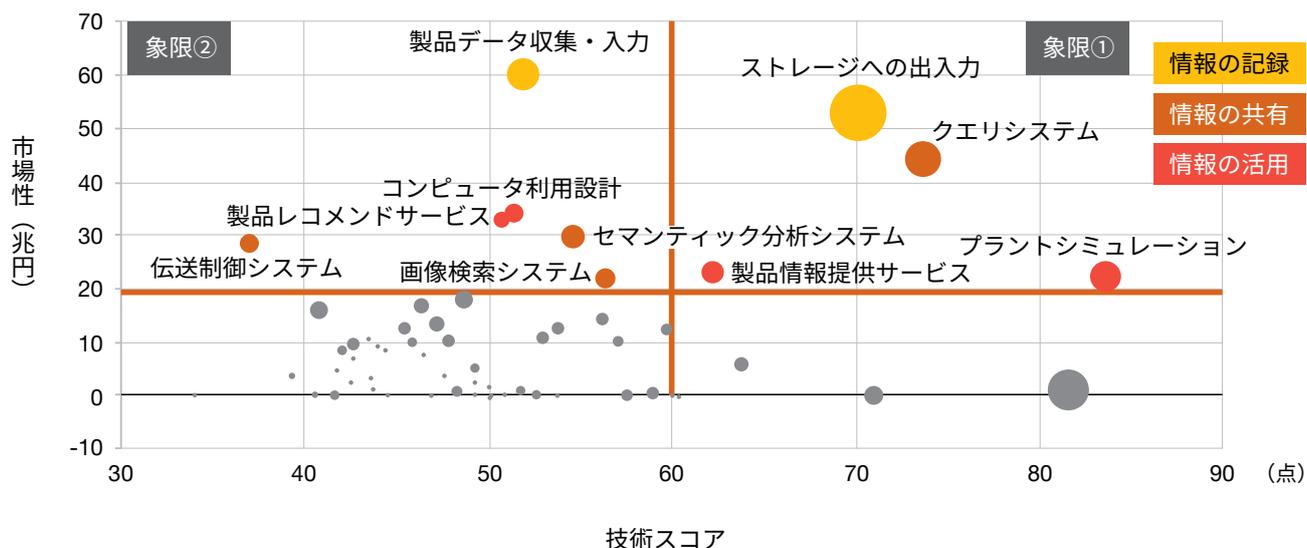
モノや資源のデータ取引とそこから生み出される価値に関わる注目テクノロジー

データを高度に連携させ資源循環を促進することはサプライチェーン分断に対する備えともなり、資源調達安定化につながります。また、生産者起点の単なるモノの生産・消費から消費者起点の再利用・再資源化といった循環消費にシフトすることで、データ連携とも相まって新しい価値基準が生まれ、顧客の生涯価値の捉え方にも変化がもたらされるでしょう。そして、このサーキュラーエコノミー実現に資する一連の取り組みが、データ連携基盤を通じて、さまざまなステーク

ホルダーに対して可視化されることで、投資家からも好意的に評価されることになるでしょう。

広くステークホルダー間でのモノや資源の循環に関するデータ取引とそこから生み出される価値は、従来の環境負荷を軽減するための考え方である3Rなどとは異なり、サーキュラーエコノミーに見られる特徴的なものです。モノや資源のデータ取引とアプリケーションに着目して、PwCが保有する市場と技術の両側面から網羅的調査を行い、有望技術や技術課題の抽出ができるAIソリューション「Intelligent Business Analytics (IBA)」を用いてより詳細な分析を行いました。

図表4. モノや資源のデータ取引とアプリケーションに関わる注目テクノロジー



技術力を特許出願の量ではなく質である技術スコア^{※1}で捉え、市場性^{※2}と併せてトレンド分析を行い、「情報の記録」「情報の共有」「情報の活用」の3つにカテゴリー分けを示しました。

象限①には、技術スコアおよび市場性が高い（技術が成熟しつつあり投資が活発）技術要素が含まれます。象限②には、技術スコアが低く市場性が高い（技術が未成熟であり投資が活発）技術要素が含まれます。

※1 技術スコア：IBAにより技術の中心性を定量化しスコア化したものであって、技術開発の進展度を示す

※2 市場性：クラスターに含まれる企業への出資額の累計

図表5. 「情報の記録」「情報の共有」「情報の活用」別の注目テクノロジー

	象限① 技術スコアおよび市場性が高い (技術が成熟しつつあり投資が活発) 技術要素	象限② 技術スコアが低く市場性が高い (技術が未成熟であり投資が活発) 技術要素
情報の記録	・ ストレージへの出入力	・ 製品データ収集・入力
情報の共有	・ クエリシステム	・ セマンティック分析システム ・ 伝送制御システム ・ 画像検索システム
情報の活用	・ 製品情報提供サービス ・ プラントシミュレーション	・ コンピュータ利用設計 ・ 製品レコメンドサービス

サーキュラーエコノミーにおいては、大量の情報を記録する必要があり、投資額上位には「情報の記録」が見られます。「情報の記録」においては、データ格納やストレージ管理に関わる技術が見られ、特にデータの収集や入力の自動化・省人化は技術が未成熟であり技術開発が期待されています。

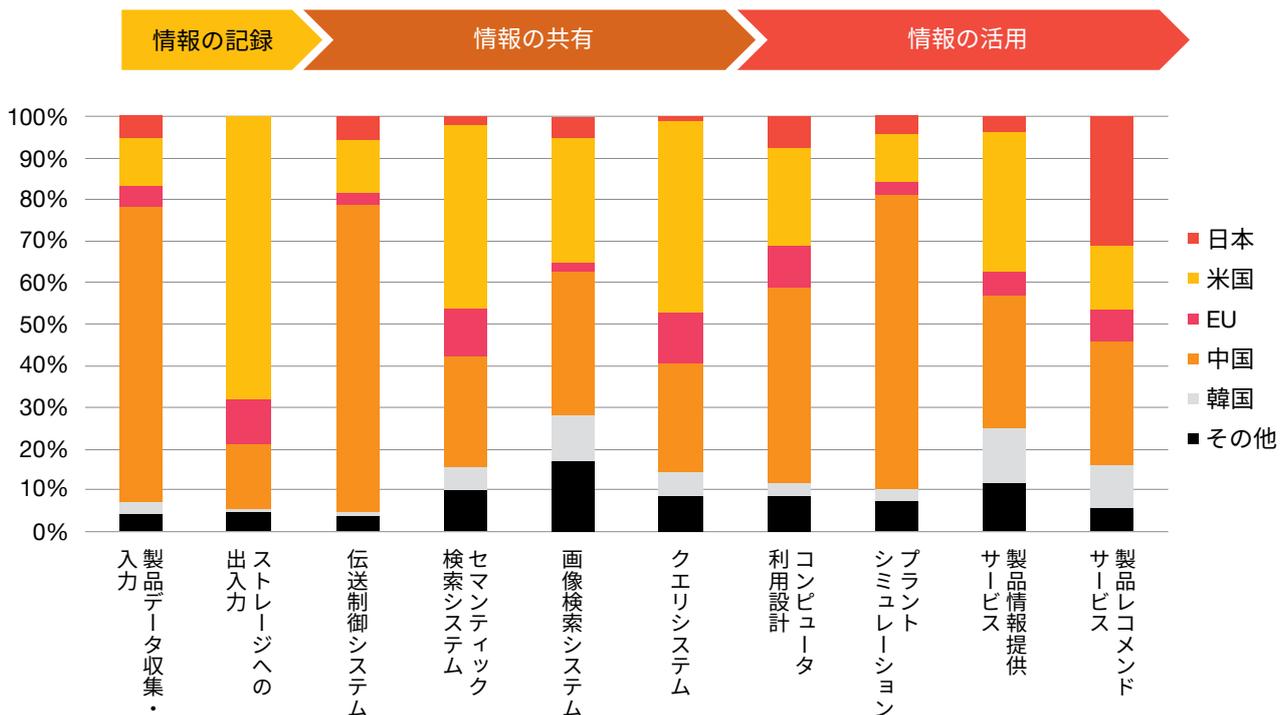
「情報の共有」では、データ連携やデータ活用基盤整備、データ転送などに関わる技術が見られます。効率的なデータ転送を可能にするクエリシステムについては投資額も多く、技術も成熟しつつあります。整合性をもたせたデータ連携を可能にする伝送制御システム、画像検索やセマンティック検索(検索ユーザーの意図・目的を考慮した検索)システムを可能にするデータクレンジング、タグ付け、機械学習などは市場から注目されているものの技術が未成熟です。

「情報の活用」では、製造に関わる生産シミュレーションやコンピュータを利用した設計、消費者へのデータ提供に投資が集まっています。特に、設計については軽量化やカスタマイズに対応した技術開発、データ提供については提供するだけでなく適切にレコメンドできる機能が望まれます。

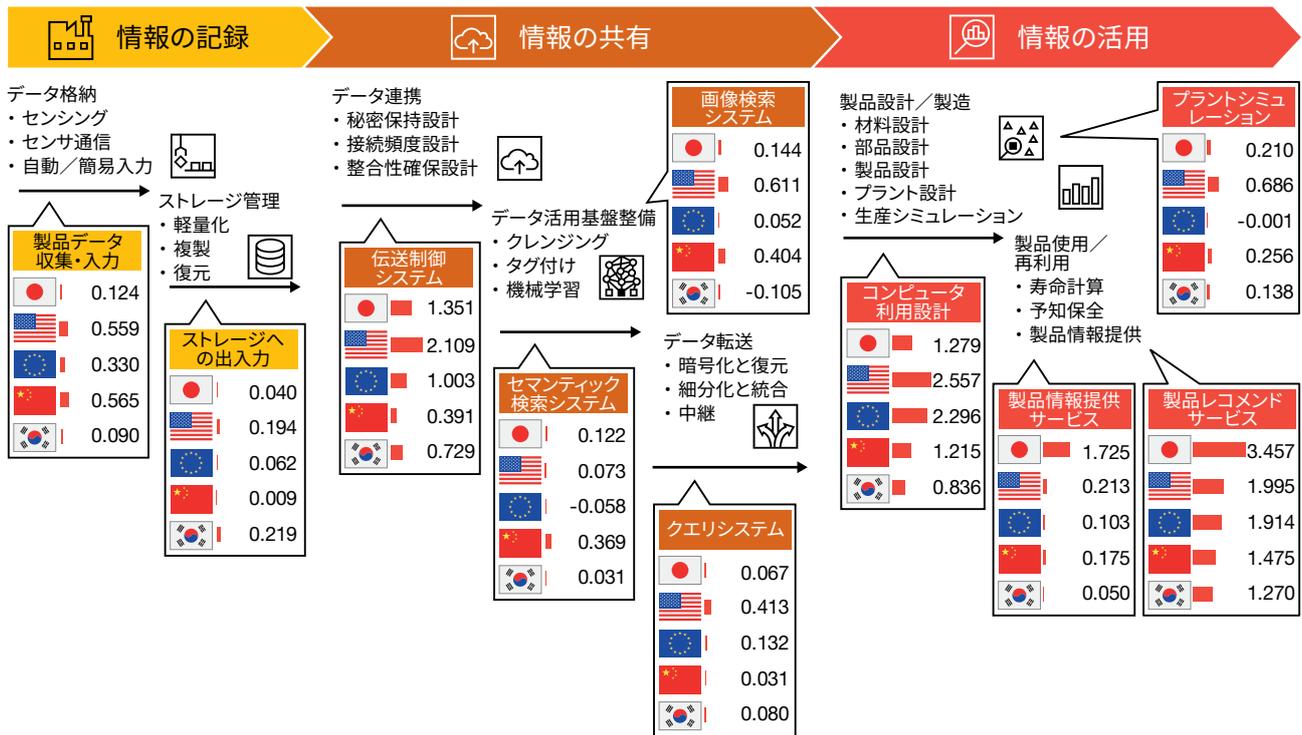
注目テクノロジーに対する世界と比較した日本の取り組み状況

これらの要素技術について、特許の量と質を用いて国・機関別に取り組み状況を示すとともに、世界と日本を比較しました。

図表6. 注目テクノロジーの国・機関別特許出願割合



図表7. 注目テクノロジーの国・機関別技術スコア



図表6では、要素技術について、国・機関別にどの企業が特許を出願しているのか特許出願の量を分析しました。日本は、「情報の活用」の一部、特に製品レコメンドに関する技術での出願が目立ち、EC事業者や広く製造業からの出願が見られます。

総じて、米国と中国の出願が多く見られます。米国の出願は、「情報の記録」のストレージ管理や「情報の共有」のデータ連携基盤整備、データ転送などで多くなっており、ITや業種に特化したDX企業、金融などによる基礎からアプリケーションまでの出願が見られます。中国は、産業オートメーションやECを背景として、「情報の記録」のデータ格納、「情報の共有」のデータ連携、「情報の活用」の製品設計/製造などの出願が多く見られます。

特許出願量こそ少ないもののEUは米国と同様の傾向を示しています。また韓国は、高いEC化率や家電で培ったIT技術を背景として、「情報の共有」のデータ連携基盤整備、「情報の活用」の製品情報に関わる技術で出願が見られます。

図表7では、要素技術について、国・機関別にどの企業が質の高い特許を出願しているのか技術スコアを分析しました。日本は「情報の活用」の製品情報提供や製品レコメンドサービスに関わる技術スコアが高くなっており、広く製造業が強みを発揮しています。

総じて米国の技術スコアが高い傾向が見られ、ITや金融、DXに加え製造業の強みも発揮されています。EUは「情報の活用」の製品設計/製造で技術スコアが高いのが特徴的で、上位の企業にはITや製造業が挙げられます。中国は、特許出願の量では広く首位を占めていたのに対して、「情報の記録」ではデータ格納、「情報の共有」ではデータ連携基盤整備でのみ高い技術スコアとなっています。これは、産業オートメーションやECが背景にあると考えられます。

なお、技術スコアは、現在の技術範囲でどの程度中心的な技術をもっているかを表します。中国企業からの特許出願が多く技術スコアが低いのは多様な特許を出願しているともいえ、今度、現在主流の技術とは違う技術が出てくる可能性があります。現在主流の技術の中心は米国であると言えますが、中国の動向にも注意を払う必要があります。

テクノロジー活用のアプローチシナリオの実行ステップ

従来の生産者主体の動脈重視の考え方から、ユーザーを含めた静脈から動脈への循環重視の考え方に転換することは、新たなステークホルダーとも連携するためのデータ連携基盤の構築を必要とするでしょう。また、サーキュラーエコノミーを促進するような制度やステークホルダー連携などの仕組みの標準化・規格化などの整備も進み、さらにサーキュラーエコノミーへの事業的取り組みを投資家が支援するファイナンスの仕組みも導入されるでしょう。

事業者には、こういった一連の制度や標準化・規格化、ファイナンスの仕組みなどを理解した上で、サーキュラーエコノミー実現に向けて目標を定め、活用すべきテクノロジーを取り入れ、実証を重ねていくことが求められます。

このようなアプローチは単独で実行することは困難であるため、ステークホルダーとのアライアンスや標準化・規格化に関わる渉外といった機能が重要となります。また、設定した目標からバックキャストして実行計画に落とし込むためのデザイン思考や、計画を戦略的に実行するための評価能力といった機能も求められるでしょう。

このような機能を携えながら、テクノロジーを活用するアプローチシナリオとしては、次の4つのステップを踏むことが想定されます。それは、(I) ビジョン作成とKPI設定、(II) エコシステムのモデル設計と実証、(III) オープンクローズ戦略のシナリオ化、(IV) アクションロードマップの作成というステップです。

ビジョン作成とKPI設定

まず、ビジョンを作成することが挙げられるでしょう。将来のある時点におけるサーキュラーエコノミー社会を具体的に思い浮かべ、テクノロジーを活用したアクションを通じてどのようにサーキュラーエコノミーに貢献できるかを想像しながら、自らのあるべき姿を思い描きます。次のアクションとして、自らのあるべき姿への到達度を測るためのKPI設定が挙げられます。テクノロジーを活用した自らの活動や貢献の結果として、将来のある時点におけるサーキュラーエコノミー社会にふさわしいKPIの設定が望まれます。

エコシステムのモデル設計と実証

次にテクノロジーを活用するフィールドやステークホルダーを具体的に描きます。誰と協力して、誰に製品やサービスなどの便益を提供して、どのような対価を得るのか、その際に誰と競争することになるのかなどについて、バリューチェーンを通じたエコシステムモデルを具体化します。自らが最良の便益提供者になるためには、何が活用できて、何が不足しているのかを洗い出すことで協力者を絞り込めたり、競争環境をイメージすることで競合を特定したりできるでしょう。その上で、エコシステムモデルに基づき、協力者とともにテクノロジーを活用して実証すべきコンセプトを定めます。このコンセプト実証 (PoC) によって、あるべき姿に近づくことが示されるものであることが好ましく、コンセプトとしては最小限のビジネスモデルのようなものやサービスや製品の一部のようものが例示されます。

オープンクローズ戦略のシナリオ化

自らのケイパビリティを最大限活用して不足分を協力者に効果的に補ってもらうためには、何をオープン化し、何をクローズ化するかを見極めなければなりません。競争環境においても、多くの仲間を集め、協力関係を築けるようなオープンクローズの線引きとなっているかに特に留意する必要があります。オープン化には標準化や規格化といった仕組みを活用することも想定されますし、コンソーシアムのような産学官連携も有効な手段となり得るでしょう。サーキュラーエコノミーでは、モノや資源の循環量が増えるにつれて関連データの流通も活性化されるため、データをどのように共有したり活用したりするかについては、オープン・クローズにおける線引きが1つのポイントとなるでしょう。

アクションロードマップの作成

ここまで述べてきた、ビジョンやKPI、ステークホルダーとの関係性構築、PoCなどについて、将来のある時点に実現すべき状態からバックキャストする形でロードマップに起こします。具体的には、ビジョン到達に向けた段階的なKPIを設定したり、アライアンスに向けてステークホルダーと段階的な連携案について協議したり、PoCを実施する内容、時期を定め

図表8. テクノロジーを活用するアプローチシナリオの実行ステップ

ビジョン作成とKPI設定	エコシステムのモデル設計と実証	オープンクローズ戦略のシナリオ化	アクションロードマップの作成
<ul style="list-style-type: none"> ● テクノロジーを活用した自らのあるべき姿の検討 <ul style="list-style-type: none"> - サークュラーエコノミー社会に貢献すべく、自らが目指すビジョンを検討 例)「製品ライフサイクルにおける廃棄物ゼロ」など ● KPI 検討 <ul style="list-style-type: none"> - ビジョン達成度を測るKPIを検討 例)「2030年の廃棄物リサイクル率〇〇%」「2030年の再資源化原料使用率〇〇%」など 	<ul style="list-style-type: none"> ● テクノロジーを活用するフィールドやステークホルダーの検討 <ul style="list-style-type: none"> - ビジョンを推進するために必要なテクノロジーを検討 例)「廃棄物ゼロ」のためには、自らの製品の「追跡」や製品・部品の「分別」「評価」「再資源化」などが必要 - 川上～川下まで誰がステークホルダーとなるのかを検討 例)「再資源化業者」「部品業者」「同じ製品を製造するメーカー」「小売業者」「消費者」「回収業者」など ● エコシステムモデルの具体化 <ul style="list-style-type: none"> - 自らが担当する部分とアライアンスで補う部分を検討 例) 自らの事業と親和性の高い「評価」を行うが、「追跡」「分別」「再資源化」はアライアンスで補うなど ● 実証コンセプトの検討 <ul style="list-style-type: none"> - 実証のための最小限のビジネスモデルを検討 例) エコシステムの中の数社とアライアンスを組み、一部の製品の一部の部品で回収・再利用の実証 	<ul style="list-style-type: none"> ● オープンクローズの検討 <ul style="list-style-type: none"> - 技術やデータの記録～利用において、どの部分を自らで行って収益とし、どの部分をステークホルダーに開放して普及を図るかを検討 例)「評価」技術は自社で保有しつつ、自社保有のプラットフォーム上で評価のソフトウェアを開放して広く普及を図るなど ● 標準化、規格化、産官学連携などの手段の検討 <ul style="list-style-type: none"> - 業界団体や産官学連携などを用いて、自らの技術の標準化、規格化を推進 例) 再資源化イニシアティブに加入し、自らのセンシング技術を普及させて、標準となるよう推進など ● 関連データの流通の検討 <ul style="list-style-type: none"> - 業界団体や産官学連携などを用いて、データ流通の標準化、規格化を推進 例) 再資源化イニシアティブに加入し、必要なデータ項目の整理をリードして、標準となるよう推進など 	<ul style="list-style-type: none"> ● ロードマップ検討 <ul style="list-style-type: none"> - 将来のビジョン、KPI、ステークホルダーとの関係性構築、PoC などからバックキャストして時間軸上で整理

たりするなど、必要なアクションを時間軸上で整理して、ロードマップの形式に仕上げます。こうして作られたロードマップは、産学官のそれぞれにおいて活用シーンが想定されます。例えば、「産」においては中長期の経営計画への反映や技術戦略立案への活用が想定されますし、「学」においては解決されるべき技術課題の特定や社会システムの科学的モデル

検証に用い、「官」においては標準化戦略立案への活用などが挙げられます。サーキュラーエコノミーではアライアンスが特に重要です。多様なステークホルダーの利害関係を調整しながら自らのサーキュラー戦略を進めていくアライアンス人材が不可欠になり、アライアンス人材の巻き込みが必要とされます。

サーキュラーエコノミーのステークホルダーへの示唆

サーキュラーエコノミー社会では、モノや資源がグローバルに循環することからローカルとグローバルの両側面から政治、法、社会、環境などの外部要因を意識し、経済的な観点で踏まえたテクノロジー活用の可能性を検討する必要があります。

サーキュラーエコノミーが実現した未来においては、企業とユーザー、国・自治体などステークホルダーの間での新たな価値観やエコノミクスが形成されていて、エコシステム内で資源や製品が循環する社会システムと経済的な合理性が両立しているでしょう。

そうした未来社会においては、地政学リスクやESG投資の発展、現在の社会システムや市場ルールとは異なる価値観、エコノミクス、ユーザー起点のバリューチェーンの考え方などの特徴を踏まえ、製品やサービスのライフサイクルをデザインします。循環を容易にする製品やサービス設計から再利用のための分別や資源再生に至るまでテクノロジーの活用は欠かせず、テクノロジーを活用するシナリオを想定する必要があります。

テクノロジー活用が貢献できる場面は、地域社会の資源調達手段の安定化や、循環起点の変化に対応した循環量の適正化ならびに品質安定化、さらにはモノや資源のデータ取引、管理の低コスト化、アクセシビリティの公平化などが挙げられます。特に、モノの移動や利用に関するデータの管理に注目が集まっています。資源循環の履歴を把握するだけでなく、より効率的に資源循環させることによって、新たな価値観に対応したり、新たな付加価値を創出したりすることを通じて、結果的に事業構造の転換につながる可能性を秘めています。

サーキュラーエコノミーに用いられるテクノロジーは必ずしも新しいものだけでなく、データ管理を軸にサプライチェーン全体で旧来のテクノロジーを組み合わせながら行われます。これら全ての技術を単独で保有することは困難であり、業種の垣根を越えてステークホルダーとアライアンスを組みながらエコシステムを構築していく必要があります。

日本では、エコシステムの構築が始まったばかりです。サーキュラーエコノミーを一定のレベルで普及させるためには、さまざまな標準化や規格化が必要となり、長期にわたる実行計画を立案する上では将来像からのバックキャストिंगも求められるでしょう。また、情報の活用を軸とした共創エコシステム形成が重要であり、業種の垣根を越えて取り組む必要があるため、多様な利害関係を調整しながら戦略を進めていくアライアンス人材の巻き込みが不可欠でしょう。

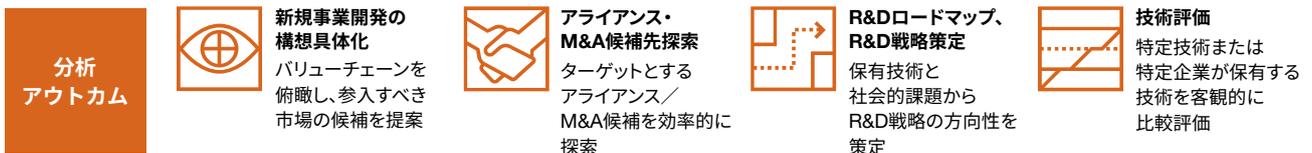
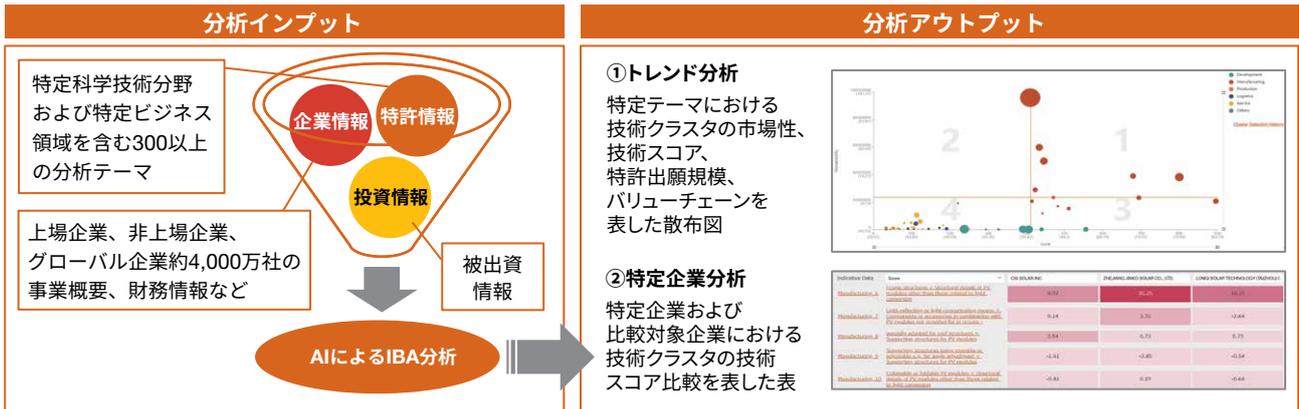
これらを踏まえた上でビジョンを描き、KPIを設定し、想定エコシステムにおけるステークホルダーとのアライアンスを通じて、バリューチェーン横断でのオープンクローズシナリオを実行するためのアクションロードマップとして形式化するアプローチが、テクノロジーを活用してサーキュラーエコノミーを実現するためのフレームワークと言えるのではないのでしょうか。このアプローチを通じて作られたロードマップは、その過程でさまざまな要因を検討しているため、産官学のそれぞれにおける戦略立案や科学的検証などの場面において活用することが期待されます。

本レポートが、サーキュラーエコノミーに向かってテクノロジーを活用して環境的にも経済的にもより良い持続可能な社会を実現する上で、ステークホルダーの皆様の貢献価値を最大化していく一助となれば幸いです。

Intelligent Business Analyticsによる分析

世界中で環境問題や社会問題が深刻化する中、重点を置くべき分野において環境負荷の低減と社会的ニーズに配慮し、長期的な視点での投資や効果的な事業展開を行うことが必要不可欠となっています。IBAは、300以上の分析テーマからなる「特許情報」、4,000万以上のグローバル企業の事業概要および財務情報を含む「企業情報」、被出資情報からなる

「投資情報」に基づきAI分析を行うことにより、特定テーマにおける「トレンド分析」、特定企業および比較対象企業における「特定企業分析」を迅速かつ効率的に行えます。IBAにより技術や市場のトレンドに焦点を当てたマクロ分析および個々の企業や特許に焦点を当てたマイクロ分析が可能となり、新規事業開発の構想具体化、アライアンス・M&A候補先探索、R&DロードマップおよびR&D戦略策定、技術評価のようなユースケースに活用できます。



参考文献

1. 経済産業省, 2023. 『成長志向型の資源自律経済戦略(案)』
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/shigen_jiritsu/pdf/007_03_00.pdf
2. PwC, 2020. 『循環型経済への道 - なぜサーキュラーエコノミーが主流になりつつあるのか』 (2023年6月閲覧)
<https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership/circular-business-models-are-very-well-possible.html>
3. PwC, 2023. 『State of Climate Tech 2022 気候テック投資の停滞からの脱却』 (2023年6月閲覧)
<https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership/overcoming-inertia-in-climate-tech-investing.html>
4. 経済産業省, 2021. 『「サーキュラー・エコノミーに係るサステナブル・ファイナンス促進のための開示・対話ガイダンス」を取りまとめました』 (2023年6月閲覧)
<https://www.meti.go.jp/press/2020/01/20210119001/20210119001.html>
5. 経済産業省, 2022. 『データ連携について』 (2023年6月閲覧)
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/chikudenchi_sustainability/pdf/003_03_00.pdf
6. 経済産業省, 2021. 『2050年カーボンニュートラル社会実現に向けた鉱物資源政策』 (2023年6月閲覧)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/kogyo/pdf/007_03_00.pdf
7. 内閣府, 2023. 『戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) サーキュラーエコノミーシステムの構築 社会実装に向けた戦略及び研究開発計画(案)』 (2023年6月閲覧)
https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/pdf/230201_besshi_7.pdf

お問い合わせ先

PwC Japanグループ

www.pwc.com/jp/ja/contact.html



PwC コンサルティング合同会社



三治 信一郎
パートナー



林田 大造
シニアマネージャー



近藤 芳朗
マネージャー



www.pwc.com/jp

PwC Japanグループは、日本におけるPwCグローバルネットワークのメンバーファームおよびそれらの関連会社（PwCあらた有限責任監査法人、PwC京都監査法人、PwCコンサルティング合同会社、PwCアドバイザリー合同会社、PwC税理士法人、PwC弁護士法人を含む）の総称です。各法人は独立した別法人として事業を行っています。

複雑化・多様化する企業の経営課題に対し、PwC Japanグループでは、監査およびアシュアランス、コンサルティング、ディールアドバイザリー、税務、そして法務における卓越した専門性を結集し、それらを有機的に協働させる体制を整えています。また、公認会計士、税理士、弁護士、その他専門スタッフ約10,200人を擁するプロフェッショナル・サービス・ネットワークとして、クライアントニーズにより的確に対応したサービスの提供に努めています。

PwCは、社会における信頼を構築し、重要な課題を解決することをPurpose（存在意義）としています。私たちは、世界152カ国に及ぶグローバルネットワークに約328,000人のスタッフを擁し、高品質な監査、税務、アドバイザリーサービスを提供しています。詳細は www.pwc.com をご覧ください。

発刊年月：2023年8月 管理番号：I202306-06

©2023 PwC. All rights reserved.

PwC refers to the PwC network member firms and/or their specified subsidiaries in Japan, and may sometimes refer to the PwC network. Each of such firms and subsidiaries is a separate legal entity. Please see www.pwc.com/structure for further details.

This content is for general information purposes only, and should not be used as a substitute for consultation with professional advisors.