

## 調査報告書

サーキュラーエコノミー指標の転換と KPI 化  
—資源循環の質評価から企業ダッシュボード実装まで—

2026 年度 CE-MVC 調査報告書

2026 年 4 月 6 日

本調査報告書は、2025 年度に AIST より委託調査研究として SUSDI が受託した「サーキュラーエコノミー指標の資源循環の質の評価に関わる動向調査と課題仮説抽出」の調査結果について、CE-MVC 研究会で討論し、その時、議論された KPI に関する討論を追加・取りまとめたものである。

## 序文

近年、サーキュラーエコノミー(Circular Economy、以下 CE)は、資源制約と環境制約の深刻化を背景として、持続可能な経済社会を構築するための基本原理として国際的に位置づけられるようになってきている。CE は従来、廃棄物削減やリサイクルの促進といった環境対策の一環として理解されることが多かったが、現在では資源利用構造そのものを再設計し、価値の維持と資源効率の最大化を図る包括的な経済モデルとして認識されている。このような認識の変化に伴い、CE の進展をどのように測定し評価するかという問題が、政策、産業、金融の各分野において重要な課題となっている。

とりわけ近年、CE 指標は単なる資源循環量の測定から、資源の価値保持、損失、寿命、さらには社会的持続性を含む多角的評価へと理論的転換を遂げている。この転換は、CE を単なる環境管理の対象から、経済および社会の構造を方向づける制度的装置へと変化させるものである。また、CE 指標は KPI(Key Performance Indicator)として制度化され、企業経営および政策意思決定の中核的な管理指標として機能するようになりつつある。すなわち、CE 指標は現実を測定するための手段であると同時に、資源利用のあり方そのものを規定する実践的装置となりつつあるのである。

しかしながら、現在提案されている多様な CE 指標は、それぞれが異なる側面を評価するものであり、資源循環の質をどのように統合的に評価すべきかについては、なお理論的および実務的な課題が残されている。特に企業においては、CE を理念として掲げるだけでなく、それを具体的な経営管理の対象として実装することが求められており、そのためには KPI およびダッシュボードとして運用可能な指標体系の構築が不可欠である。

本報告書は、このような問題意識に基づき、近年の CE 指標に関する主要な文献および制度的動向を整理し、資源循環の質の評価に関わる指標の理論的転換の構造を明らかにするとともに、企業における実務的活用を可能とする KPI およびダッシュボード設計の方向性を提示することを目的として作成されたものである。本報告書では、まず CE 指標の歴史的展開と理論的転換を整理し、次に CE 指標の KPI 化と制度的意味を検討し、さらに資源循環指標の理論的進化を分析する。そのうえで、これらの知見を企業経営に適用し、CE-KPI ダッシュボードの実務設計フレームを提示する。

## 第1章 サーキュラーエコノミー指標の歴史的展開と転換

### — 2015–2025年の理論的・制度的推移（説明版）

#### 1.1 問題設定：サーキュラーエコノミーは何を測ろうとしてきたのか

サーキュラーエコノミー（Circular Economy、以下 CE）は一般に資源循環を通じて環境負荷を低減する経済モデルとして理解されてきたが、この理解は本質的には不十分である。なぜなら CE は単なるリサイクルや廃棄物管理の技術体系ではなく、資源、製品、価値、時間、制度、労働といった社会経済の基本構造そのものを再編成する構想だからである。したがって、CE において何を測るのかという問題は単なる技術的問題ではなく、CE をどのような概念として理解するのかという理論問題と不可分の関係にある。

2015 年から 2025 年にかけての CE 指標の歴史的推移は、概念形成段階から指標の爆発的增加段階を経て、循環の質、価値、時間を評価する段階へと発展する構造として示される。初期段階では、CE は理念的概念として提示され、その定量的評価手法は確立していなかった。その後、2017 年前後から CE 指標が急速に増加し、製品、企業、都市、国家など複数の階層で指標が提案される段階に移行した。この段階では主に循環量を測定する量的指標が中心であったが、その後、循環量だけでは持続可能性を十分に評価できないという認識が形成された。その結果、指標は単なる物質循環の測定から、資源価値の保持、資源の品質、寿命、損失などを評価する質的指標へと転換した。さらに近年では、循環を時間的に持続する価値保持プロセスとして評価する指標体系へと進展している。このように CE 指標の発展は、単なる測定技術の増加ではなく、CE 概念そのものの深化と再構築の過程として理解される。

参考文献：EMF 2013, EU 2023, UNEP FI 2023, M. et al. 2019, Moraga, G. et al. 2019, Parchomenko, A. et al. 2019, Kravchenko, M. et al. 2020,

#### 1.2 2015–2016 年：概念的構想としての CE と初期指標

2015 年前後は、CE が政策および研究において急速に重要な概念として浮上した時期である。この時期には EU によるサーキュラーエコノミーパッケージの提示、エレン・マッカーサー財団による概念整理、UNEP や OECD による資源効率政策の提示などが相次いで行われた。しかしこの段階では、CE の定義そのものが確定しておらず、何を循環と呼ぶべきかという問題は未解決であった。

そのため、この時期に用いられた指標は循環そのものを直接測定するものではなく、既存の資源管理指標を代替的に使用する形を取っていた。具体的には、リサイクル率、廃棄物

回収率、資源生産性などが CE の進展を示す指標として用いられた。この段階では指標は CE の本質を測定するものではなく、概念を支えるための暫定的な定量化手段として機能していた。この状況は、指標が CE 概念の確立を支える補助的装置として位置づけられていたことを示している。

参考文献：EMF 2013, EU 2023, UNEP FI 2023

### 1.3 2017–2019 年：指標の爆発的増殖と分類体系の形成

2017 年以降、CE 指標は急速に増加した。この時期には製品レベル、企業レベル、都市レベル、国家レベルといった複数の階層において指標が提案されるようになり、同時にそれらを整理する試みが行われた。特に Saidani らによる分類研究は、指標を循環戦略および分析対象レベルに基づいて体系的に整理した点で重要である。

しかしこの時期に重要であったのは指標の数そのものではなく、指標の意味に対する批判的検討が開始されたことである。Moraga らは、多くの指標が実際には循環を測定しているのではなく、廃棄物管理の効率を測定しているに過ぎないことを指摘した。この批判は、指標が単なる測定装置ではなく、CE の理解を形成する認識装置であることを明確にした。

参考文献：Saidani, M. et al. 2019, Moraga, G. et al. 2019, Corona, B. et al. 2019, Parchomenko, A. et al. 2019

### 1.4 2020–2021 年：量的循環の限界と質的転換

2020 年以降、CE 指標は新たな理論的転換を迎えることになる。その中心にあるのは、循環量の増加が必ずしも持続可能性を意味しないという認識である。例えばエネルギー消費の大きいリサイクルプロセスは、資源循環を実現していても環境負荷を増大させる可能性がある。また、品質の低い再生材の大量循環は、資源の価値を低下させる結果となる。

このため循環の評価は単に回収量や循環率を測定することではなく、価値を保持した循環であるかどうかを評価することへと移行した。この転換は CE の概念そのものを物質循環の問題から価値保持の問題へと変化させるものであった。

2020 年以降の CE 指標の発展は、指標のマイクロ化と KPI 化の進展として示される。従来の

指標は国家や産業全体といったマクロレベルでの評価を目的としていたが、近年では企業や製品といったミクロレベルでの評価が重視されるようになった。この変化によって、指標は政策分析のための統計指標から、企業経営における管理指標へと転換した。企業は資源投入量、循環率、価値保持率、寿命延伸率などの指標を KPI として設定し、それを経営管理に利用するようになった。この過程によって、CE 指標は単なる分析装置から、企業の行動を方向づける管理装置へと機能を拡張した。

参考文献：Kravchenko, M. et al. 2020, EU 2023, UNECE 2021

### 1.5 2022 年以降：損失・価値・時間の指標化

2022 年以降、CE 指標はさらに新たな段階へと進展する。この時期に提案された指標の特徴は、循環量ではなく損失や価値保持を測定する点にある。Acircularity 指標は循環の程度ではなく非循環の程度を測定することで、循環過程における損失を定量化する。また Resource Efficiency Account は資源の物理量ではなく経済価値の流れとして資源循環を評価する。

さらに Circularity Potential や Circular Construction Indicator は、資源の品質や寿命といった時間的要素を評価に組み込むことで、循環を動的プロセスとして捉える枠組みを提示した。

近年の CE 指標は、政策分野および産業セクターごとに KPI として体系化される構造を持つ。政策レベルでは、国家の資源効率、循環率、資源依存度などの指標が設定され、CE 政策の進捗を評価するために使用される。一方、産業セクターでは、製品寿命、再利用率、価値保持率、資源損失率などの指標が設定され、企業活動の循環性を評価するために使用される。このように CE 指標は、政策から企業に至るまでの複数のレベルにおいて KPI として制度化されている。この構造は、CE が理念的概念から実際の管理対象へと転換したことを示している。

参考文献：Jerome, A. et al. 2022, Halada, K. et al. 2022, de Oliveira, C. T., 2023

## 1.6 社会的次元の導入と倫理的転回

近年の CE 指標のもう一つの重要な特徴は、社会的側面の導入である。循環活動は労働集約的であり、その労働条件や社会的影響が循環の持続可能性を規定する。このため循環の評価には環境効率だけでなく社会的公正性を含める必要があるという認識が形成された。

この変化は CE を技術体系から社会制度の問題へと再定義するものであり、CE が単なる環境対策ではなく社会構造の変革を伴う概念であることを明らかにしている。

## 1.7 KPI 化という制度的転換

CE 指標の最も重要な転換は KPI としての制度化である。これは CE が理念的概念から実際の政策および経営の管理対象へと変化したことを意味する。KPI 化によって指標は単なる測定装置ではなく、行動を規定する統治装置として機能するようになった。

この変化の歴史的背景は図 1-1 に示されており、KPI が企業内部の管理指標から社会全体の統治指標へと拡張してきた過程として理解することができる（図 1-1 参照）。

参考文献：OECD 2024B, EU, 2025, Munonye, W. C. et al. 2025, Rasor, A. et al. 2025, Rodrigues, C. et al. 2025

### 2024-2025：政策・セクター別の KPI プラットフォーム化

- OECD（2024）国家レベルの CE モニタリング枠組みを再構築
- EU（2025）建設・電子機器・バッテリー等、11分野に CE KPI を提示
- Munonye（2025）指標整理で「寿命・ストック・循環効率」に収束
- Rasor（2025）都市・インフラの CE-KPI モデルを確立
- Rodrigues（2025）下水分野113KPIを循環性別にクラスタリング
- CE は“KPIセットとして管理されるシステム”として定着

図 1-1：KPI の歴史

## 1.8 小括

以上のように、CE 指標の歴史的展開は単なる測定技術の進歩ではなく、CE 概念そのものの進化過程である。CE は当初、物理的な資源循環の概念として理解されていたが、次第に資源価値の保持を重視する概念へと変化し、さらに社会制度としての構造を持つ概念へと発展した。

## 第2章 測ることの制度化

### — CE指標のKPI化と「資源指標の不完全性」(説明版)

#### 2.1 CEはなぜKPI化されねばならなかったのか — 国際制度の圧力

サーキュラーエコノミー(CE)は当初、資源循環を促進する理念的概念として提唱されたものであったが、2015年のSDGs採択を契機として、その性格は大きく変化した。CEは単なる理念ではなく、進捗を定量的に示し、達成状況を報告することが求められる制度的対象へと転換したのである。この転換は、CEが政策および経営の実行対象として扱われるようになったことを意味している。

この制度化の過程では、CEの達成度を測定し比較するための指標が不可欠となった。ISOにおけるサーキュラーエコノミー標準化の動きや、UNEPによる資源効率指標の導入は、CEが測定対象として制度に組み込まれたことを示している。このような背景のもとで、CE指標は単なる分析ツールではなく、意思決定および責任評価のためのKPIとして位置づけられるようになった。

KPI(Key Performance Indicator)が1950年代から2050年頃に至るまで、どのようにその機能と役割を拡張してきたかを示すと、以下ようになる。KPIはもともと1950年代から1960年代にかけて、企業内部の生産管理および業務管理のための指標として導入された。この段階においてKPIの目的は、生産効率、品質、コストなどの業務パフォーマンスを定量的に把握し、組織活動を効率的に制御することにあつた。すなわち、この時期のKPIは企業内部の管理技術としての性格を持っていた。

その後、1980年代から1990年代にかけて情報技術の発展とともに、KPIは企業の戦略管理と結びつくようになった。この段階では、KPIは単なる業務管理指標ではなく、企業戦略の達成度を評価するための指標として使用されるようになり、企業経営の中核的な管理手法として位置づけられるようになった。

さらに2000年代以降になると、KPIは企業内部の管理を超えて、企業の社会的責任や持続可能性を評価する指標として拡張された。この段階では、環境パフォーマンス、社会的責任、資源効率などがKPIとして設定されるようになり、企業活動は社会的評価の対象として定量的に監視されるようになった。

2015年以降、SDGsの採択およびESG投資の拡大に伴い、KPIは企業だけでなく国家および国際制度における統治指標として機能するようになった。この段階においてKPIは、政策の達成状況を評価し、社会全体の行動を方向づける制度的装置としての役割を持つようになった。

さらに将来的には、KPIはデジタル技術と統合され、リアルタイムで社会経済活動を監視し、資源利用および循環活動を直接制御する統治装置として機能することが想定されている。このようにKPIは、企業内部の管理指標から社会全体を方向づける統治指標へと歴史的に発展してきたのである。

参考文献：ISO 59020, 2024、UNEP Finance Initiative, 2023

## 2.2 KPIの進化とCEの接続 — 管理技術から統治技術へ

KPIはもともと企業内部の管理技術として発展したものであり、その目的は組織の活動を効率的に制御することであった。しかし情報技術の発展により、KPIは外部評価と結びつき、企業の社会的責任や持続可能性を評価するための指標へと変化した。

CEがKPIとして制度化されたことの意味は極めて大きい。それは循環が単に望ましい活動であるという認識から、達成しなければならない目標へと変化したことを意味する。すなわち、CEは理念ではなく達成責任を伴う政策課題となったのである。

この変化によって、CE指標は現実を記述するための分析装置から、現実を方向づける統治装置へと機能を変えた。指標は企業の投資判断、政策決定、技術開発の方向性を決定する力を持つようになり、CEの実現そのものを構成する要素となった。

## 2.3 統合資源指標はCEの資源軸を担うにすぎない

CEをKPIとして運用する際には、資源投入の削減と循環の質の向上という二つの異なる要素を同時に評価する必要がある。

資源投入の評価を担う代表的な指標がTMR (Total Material Requirement) およびMF (Material Footprint) である。TMRは、製品の生産に直接使用される資源だけでなく、その採掘および加工の過程で発生するすべての物質移動を含めて評価する指標であり、資源供給に伴う物理的負担の総量を示している。この指標は、資源利用の背後に存在する隠れた資源負担を明らかにする機能を持っている。

資源投入を評価する指標として代表的なものが TMR および MF である。TMR は資源採掘から製品生産に至るまでのすべての物質投入を含めて評価する指標であり、資源供給の物理的負担を示す。一方 MF は消費活動に起因する資源採掘量を評価する指標であり、資源利用の責任を消費側に帰属させる役割を持つ。

これに対して ICRP は循環の質を評価する指標であり、資源がどれだけ価値を保持したまま循環しているかを評価する。この指標は単なる循環率ではなく、寿命、価値保持、損失の程度を統合して評価する点に特徴がある。

これらの指標は CE の異なる側面を表しており、それぞれ単独では CE の全体像を表すことができない。資源投入の削減だけでは循環の質を評価することはできず、循環の質だけでは資源制約の問題を評価することはできないのである。

#### 2.4 統合指標 ICMI による資源投入と循環の質の統合

この問題に対して提案されたのが ICMI である。ICMI は資源投入の負担と循環の質を統合して評価する指標である。

資源投入と循環の質を統合して評価するために提案された新しい統合指標 ICMI の構造を示したものである。この指標は、資源投入の負担を表す指標と循環の質を表す指標を統合することによって、サーキュラーエコノミーの資源利用構造を総合的に評価することを目的としている。

ICMI は、資源投入量が大きいほど、また循環の質が低いほど、評価値が不利になる構造を持っている。この構造によって、資源投入の削減と循環の質の向上の両方を同時に達成することが望ましい状態として評価される。

例えば、資源投入量が多く、かつ循環の質が低い場合には、資源が大量に消費されると同時に価値が十分に回収されないため、最も不利な評価となる。一方、資源投入量が少なく、かつ循環の質が高い場合には、資源利用の効率が高く、価値保持型の循環が実現されているため、最も有利な評価となる。

しかしこの統合指標も CE のすべてを表すものではない。ICMI は資源利用と循環の質を評価するが、社会的側面や制度的側面を直接評価するものではない。このことは CE が単なる資源管理問題ではなく、社会制度の問題であることを示している。

## 2.5 資源指標の位置づけと限界

資源指標の役割は CE の資源軸を評価することにあるが、それは CE の一部分に過ぎない。この関係は CE のダッシュボード構造として図 2-1 に示されている（図 2-1 参照）。

# ダッシュボードの全体像（KPI 一覧）

### ✦ 企業 CE-KPI の中核（5項目）

- TMR（Total Material Requirement）
- MF（Material Footprint）
- ICRP（統合資源循環パフォーマンス）
- CERI（Circular Extraction Reduction Index） =  $1 - MF/TMR$
- CRVI（Circular Resource Value Index） =  $\text{価値保持} \times \text{寿命} \div \text{MF(単位)}$

### ✦ 補助KPI（必要に応じて）

- 回収率、リユース率、修理率
- 製品寿命指数（設計寿命 vs 実使用寿命）
- 循環材使用率（PCR/リサイクル材）
- Downcycling 係数
- 廃棄量削減 KPI
- Scope3 原材料カテゴリ別 KPI

図 2-1 ダッシュボードの全体像

ダッシュボード構造において、資源指標は複数の評価軸の一つとして位置づけられる。CE の評価には資源効率だけでなく、価値保持、寿命、社会的影響、制度的条件などの要素が含まれる必要がある。このことは、CE を単一の指標で評価することの限界を示している。CE は多次元的な概念であり、その評価には複数の指標の組み合わせが必要である。

## 2.6 指標の制度的意味 — 指標は世界を方向づける

CE 指標の制度化は単なる測定技術の進歩ではなく、社会の意思決定構造の変化を意味している。指標は単に現実を測定するだけでなく、現実を方向づける機能を持つ。

例えば循環率のみを評価すれば量的循環が促進されるが、価値保持を評価すれば修理や再利用が促進される。このように、指標の設計は社会の行動を決定する。

このことは CE 指標が技術的問題であると同時に、制度的および倫理的問題であることを示している。

## 2.7 小括

CE 指標の KPI 化は、CE が理念から制度へと転換したことを示している。この過程において、資源指標は CE の資源軸を評価する重要な役割を担っているが、それだけで CE を完全に評価することはできない。

CE は資源利用、価値保持、社会制度の統合として成立する概念であり、その評価には複数の指標の統合が必要である。

したがって、CE 指標は単なる測定装置ではなく、社会の方向性を決定する制度的装置として理解する必要がある。

(参考文献)

ISO 590020, 2024、 UNEP FI, 2023

## 第3章 資源循環指標の理論的転換と制度的進化（簡略統合版）

### 3.1 本章の目的と理論的背景

本章の目的は、2020年以降に急速に進展した資源循環指標の理論的転換を整理し、サーキュラーエコノミー（CE）の測定対象がどのように変化してきたのかを明らかにすることである。従来のCE指標は主としてリサイクル率などの物量的循環を測定するものであったが、近年の研究はこの枠組みがCEの本質を十分に捉えていないことを明らかにしている。

CE-Hub および UNEP の技術報告書に示されるように、循環は単なる物質フローではなく、価値保持、時間構造、社会制度を含む複合的なシステムとして理解されるようになった。また、UNEP FI ガイダンスは、CE指標が単なる環境評価のための指標ではなく、金融・投資および政策意思決定の基盤となる制度的指標であることを明示している。

この転換は、CE指標が「循環を測る指標」から「循環を設計し統治する指標」へと変質したことを意味する。

参考文献：Lysaght, O. et al. 2022, UNEP Finance Initiative, 2023

### 3.2 量的循環から価値・損失指標への転換

CE指標の最も重要な理論的転換は、循環量の測定から価値保持と損失の測定への移行である。従来のリサイクル率は物質が回収されたかどうかを示すのみであり、その資源がどれだけの価値を保持しているかを評価することはできなかった。

この限界に対して、経済価値ベースの循環指標は、回収後の材料がどれだけ元の経済価値を保持しているかを評価対象とする。この構造は、循環を物理量ではなく価値保持として捉える転換を示している。

製品循環を経済価値の保持として評価する指標構造については、循環が単に物質が回収されたかどうかではなく、回収された資源がどれだけの経済価値を保持しているかによって評価されることを示している。この構造では、製品は使用によって価値を失い、回収後に再利用または再製造されることによって価値が回復するが、その回復は完全ではなく、一定の価値損失が生じる。循環の評価が物量ではなく価値保持率によって行われるべきである。

参考文献：EMF (Ellen MacArthur Foundation), 2013、 Fassio, F. et al 2023, Corona, B. et al. 2019, Jiang, L. et al., 2022,

さらに、非循環性（Acircularity）指標は、循環そのものではなく損失を直接測定することによって、循環の質を評価する枠組みを提示した。この指標では、品質劣化、用途逸脱、未回収資源がすべて損失として定義される（図 3-1 参照）。

参考文献：Halada, K. et al. 2022

## New Indicators: ‘Acircularity’ and ‘Resource Efficiency Account’” (2022)

- ・ 循環性を「量の評価」から「損失と価値劣化の評価」に転換した、初の CE 指標理論論文

本論文が示す、他に見られない重要な論点

- ①「循環の成果ではなく、循環の欠損（Failure）を指標化」
  - ・ ほとんどの CE 研究は「再生率」「循環率」など **成功側の量的評価**に着眼。
  - ・ 本論文はそれを**逆転**させ、失われた資源・価値・機会を定量化。
  - ・ これにより、「どこが循環できていないのか」を政策課題として可視化できる。
- ②資源効率を「**経済効率 vs 循環効率**」の対立として再定義
  - ・ GDP/MP（Material Productivity）の高さは、むしろ線形型大量生産を促進する可能性。
  - ・ したがって、**経済効率は資源循環と矛盾**しうという指摘を明示した。
  - ・ これは多くの研究が前提としている「**効率＝サステナブル**」を否定する重要な議論。
- ③「**価値保持（Value Retention）**」の劣化を循環に含める
  - ・ 物質だけでなく、\*\*再生過程での価値低減（Downcycling）\*\*をコストとして扱う。
  - ・ 資源循環の成否は「物質量」ではなく**再投入価値の大きさで評価すべき**と主張。
- ④ **CE 指標を「政策誘導型」から「市場修正型」に転換**
  - ・ 既存指標は目標管理型（目標達成率評価）。
  - ・ 本論文の指標は、**市場が失敗している領域を暴き、制度を修正**するための指標。
  - ・ これは経済学的に「**指標＝市場設計ツール**」であることを示す。
- ⑤ **資源循環の負荷（コスト）も評価対象に組み込む必要性**
  - ・ 従来：リサイクル＝良いもの（量が多いほど良い）
  - ・ 本論文：劣化回収や低価値リサイクルには**コスト・無駄がある**
  - ・ →ただ「量を増やす循環」は非効率であり、社会的に損失を招き得る。

図 3-1 損失・非循環性の例

また、建設分野などの応用研究では、材料品質と循環量を統合することによって質的循環を評価する試みが進められている（図 3-2 参照）。これらの研究は、循環を単なる再投入ではなく価値保持のプロセスとして再定義している。

**Circularity Criteria and Indicators at the Construction Material Level" (2024)**  
建設材料レベルに特化し、「**資源量 × 資源品質 × 寿命**」の三要素を統合する新しい CE 指標基準を提案することで、マスベース指標からの脱却を目指した

- **MCI**
  - 再生材使用量、リユース量、廃棄量をもとに計算。
  - しかし本論文は、**質的劣化を無視する欠点**を指摘。
- **ECI (Element Circularity Index)**
  - 材料要素ごとに **解体性・再使用性・品質保持**を評価。
  - 建材向け指標として推奨される。
- **RPI (Reuse Potential Indicator)**
  - 部材の再使用ポテンシャルを示し、**解体容易性**とセットで用いるべきだとされる。
- **RDI (Resource Duration Indicator)**
  - 資源が経済内に留まる時間を評価 → **寿命 × 品質**が重要。
  - > 本論文が特に強調する点：  
**CE 指標は「資源量 + 資源品質 + 寿命」モデルに変わるべき。**

図 3-2 建材レベルの循環性基準・指標

この転換の理論的意味は、CE が廃棄物管理の問題から価値管理の問題へと変化したことにある（図 3-3 参照）。

### “The economy of material flow cycling in anthropized and anthropogenic systems”

- CEを「廃棄物循環」ではなく、エントロピーと Emergy を基盤とした“物質フロー減少経済”として再定義した、最も理論的な循環経済論文の一つ
- Emergy を次のように定義する（Odum, 1996 に基づく）：
  - ある生産物・プロセス・循環活動を生み出すために、自然および社会経済が投入した総エネルギー価値（Jなどの単位に換算）  
= 自然資本 + 経済資本の総価値
  - 数式表現（論文の定式化）：
    - $E_{total} = xE + F$
    - $xE$ ：自然由来・再循環・副産物として得られる Emergy  
（例：農業副産物、自然循環の再利用）
    - $F$ ：経済による投入 Emergy  
（例：労働、燃料、機械、化学処理）
    - → Emergy は、「値段ではなく、形成に必要な潜在価値」を示す。

図 3-3 循環の「経済的」把握＝量指標の限界を突く位置づけ

### 3.3 フローからストック・寿命を含む時間構造への転換

第二の重要な転換は、循環を単年度のフローではなく、ストックと寿命を含む時間的プロセスとして理解する枠組みの導入である。従来の指標は資源投入と回収の量を測定するのみであり、資源が社会の中でどれだけ長期間使用されるかを評価していなかった。

物質フローと社会的ストックを統合したモデルは、資源循環を投入、蓄積、廃棄、回収の時間的連鎖として表現する（図 3-4 参照）。このモデルは、現在の廃棄が過去の投入の結果であり、現在の設計が未来の循環を規定することを示している。

参考文献：Wiedenhofer, D. et al., 2024

From extraction to enduses and waste management: Modeling economywide material flows' (J. Industrial Ecology2024)

- 資源投入・用途別ストック・廃棄回収を一体モデル化し、「循環を遅延させる**ストック**」という逆説的視点で資源政策を再定義
- CE政策の成否は、数値の瞬間値でなく“蓄積されたストックとその寿命による循環遅延”を理解するかどうかにかかっている
- 資源効率**は瞬間値ではなく 未来の循環可能性 (R<sup>pot</sup>) を評価すべき**

従来の EW-MFA	本論文
流れ (flow) 中心	ストック (stock) 中心
年度ごとの採掘量・消費量	過去の蓄積から未来の廃棄を推計
リサイクル量を“現在の廃棄”から算出	過去投入 × 寿命で遅延推計
資源効率は「少量投入」	資源効率=投入×寿命×価値
回収率=技術係数	回収率=EoL 排出×遅延×可回収率

図3-4 物質フロー+用途別ストック+廃棄回収の一体モデル

また、資源ストックと経済活動の関係を分析した研究は、循環率が向上していても資源消費が増加する場合があることを示している（図3-5参照）。これは循環が単なる回収の問題ではなく、資源の社会的滞留時間の問題であることを意味する。

## How circular is the linear economy? Analysing circularity, resource flows and their relation to GDP” (2025)

### • 循環を“物質の循環率”ではなく、“ストック活用による経済価値の創出”として再定義した

- ◆ 2. 論文が導入した「新しい現実的CE指標」群
- 新指標 定義 意義
- Real Circularity (実循環率) 回収可能な資源のみを分母に入れて算出 → 27% リサイクル可能性の物理限界を反映
- Non-recoverable Circularity Exclusion エネルギー燃焼、食料消費など「不可逆資源」を除外 循環できない領域を明示
- Long-term Stock Exclusion 建物・インフラ等の長期固定材料 (31 Gt) を除外 循環材投入とは別物と認識

▶ 結果：

- 従来の「世界の循環率 9%」は、現実的には 27% であると算定。

### ◆ 3. 論文が新規に提案した「価値ベースのCE指標」

- 指標名 何で測るか 論文の意図
- GDP-based Circularity 循環活動がGDPに占める割合 (現状 = 1.4%) CEの評価軸を“価値”にシフト
- Stock Utilization Efficiency 既存ストックの利用で生み出す経済価値 (GDPの69%) CEの中心は資源循環ではなく利用サービス
- Service-based Circular Value 修理、保守、共有、寿命延長が生む付加価値 リサイクル中心の議論に対する転換
- 重要な思想
- CE指標は「循環量」ではなく、「循環によって維持された・創出された経済価値」を評価すべきである。

図 3 - 5 線形経済の循環性／資源フローと GDP の関係

設備寿命延伸戦略の研究は、修理、再製造、アップグレードが新規資源投入を削減する重要な手段であることを示している (図 3-6 参照)。また、建設分野では設計段階から循環性を評価する指標が導入され、循環が設計選択の結果として理解されるようになった (図 3-11 参照)。

参考文献：Fontana, A. et al. 2021

## Circular Economy Strategies for Equipment Lifetime Extension A Systematic Review (2025)

- CEを「リサイクル中心」から「機能寿命中心の価値循環」に転換し、機器産業における長寿命戦略をCEの主役として再定義した最初の体系的レビュー
- ■ 1) Functional Lifetime / Service Lifetime (機能寿命)
  - 定義 寿命は物理的寿命ではなく、機能性能が必要水準を満たす期間とされる。  
寿命は性能  $P(t)$  が要求性能  $P_{req}$  を下回った時点で終了：  
$$T_{life} = \{t \mid P(t) \geq P_{req}\}$$
- ■ 2) Lifetime Extension Rate (寿命延長率)
  - 定義 延長された寿命がどれだけ基準寿命を上回ったかを示す。  
$$LER = \frac{T_{extended}}{T_{baseline}}$$
- ■ 3) Resource Savings by Lifetime Extension (延命による資源削減)
  - 定義 延命により、新品製造に必要な資源投入・部材投入が削減される。
  - 新品製造に必要な資源量を  $M_{baseline}$ 、寿命延長後の資源量を  $M_{ext}$  とすると：  
$$RS = 1 - \frac{M_{ext}}{M_{baseline}}$$
- ■ 4) Value Retention Rate (価値維持率)
  - 定義 寿命延長により、製品の経済価値と機能性能を保持できた割合。
  - 新品価値  $V_{new}$ 、維持価値  $V_{retained}$  として：  
$$VRR = \frac{V_{retained}}{V_{new}}$$

図3-6 設備寿命延伸の体系レビュー

さらに、循環統計の分析は、循環率の上昇が必ずしも資源消費の削減を意味しないことを明らかにしており、この現象は見かけ循環として説明されている（図3-7参照）。

Circular Economy Design and Management in the Built Environment (book)  
「建築CE指標の百科事典」かつ「統合フレームワークの初の学術書」

比較点	従来研究	本書
評価対象	材料 or 建物 or 都市 (どれか)	全レイヤーを統合
資源指標	量中心 (リサイクル 率、MCI)	量 × 質 × 時間 の三次元
設計段階	一部扱う	中心的評価項目としてCEに統 合
社会価値	ほぼ扱わない	利用率・適応性・地域価値を CE指標化
国際ツールの 扱い	個別紹介	体系的に統合・比較

図3-7 Built Environment の指標・統合フレーム

これらの研究は、循環が単なる物質の回転ではなく、資源を長期にわたり使用することによって資源投入を削減するプロセスであることを示している。

### 3.4 単一指標から多次元統合フレームへの転換

第三の転換は、単一指標による評価から多次元統合フレームへの移行である。循環は資源、価値、環境、社会など複数の次元から構成されるため、単一の数値で評価することはできない。

技術的側面を独立した評価軸として扱う研究は、循環が複数の独立した次元から構成されることを示している (図3-8 参照)。また、材料とエネルギーの統合指標は、循環が物質とエネルギーの複合的プロセスであることを示している (図3-9 参照)。

Halter et al. (2025)「*Techno-sustainable analysis of circular economy indicators for corporate supply chains*」

- CE指標に欠けていた“技術的循環可能性”を独立軸として明示し、既存798指標を67階層に統合することで、企業が導入可能な実務ベース指標体系を実現した

指標	導出特徴	目的
Circular Resource Use	CE指標の共通ベクトルを抽象化	循環量そのもの
Resource Efficiency	LCA/MFCAの純物量化	効率性
Recycled Content	ISO14021の供給源抽象化	調達戦略
Resources Saved	削減量の単位化	改善効果

### “Technical Pillar” の関係

- 本論文の最大の独自点は、従来の**3本柱 (環境/経済/社会)**に加え、**技術的柱 (Technical pillar)** を CE 指標体系に組み込んだ

技術因子	内容
材質劣化	物性、汚染、機械的強度
解体可能性	DD, DR, モジュール性
再製造性	修理可能性、互換性
材料設計	単一素材、多層、複合材

なぜ「数式には品質因子(Q)を入れなかったのか？」  
 品質係数 (Q) を導入すると、製品別に異なり汎用性が失われる  
 そこで本論文は Q を別指標として独立軸化し、循環式とは切り離れた  
 つまり：  
 資源循環式は“質量のベース指標として統一”し、  
 品質・設計などの技術要素は Technical pillar として別評価

図3-8 Technical pillar を独立軸化

参考文献：Halter, F. et al. 2025

A multi-dimensional indicator for material and energy circularity: Proof-of-concept of exentropy in Li-ion battery recycling (iScience, 2023)  
 Exentropy により 材料損失とエネルギー損失のバランス

(1) Statistical Entropy Analysis (SEA) と RSE

- 材料  $i$  が流れ  $s$  に存在するときの統計エントロピー :
- $h_{i,s} = -\dot{m}_{i,s} c_{i,s} \log_2(c_{i,s})$
- ステージ  $q$  における総エントロピー :
- $H_{i,q} = \sum h_{i,s}$
- 最大エントロピー (通常インプットを基準) を使った相対値 :
- $RSE_{i,q} = \frac{H_{i,q}}{H_{i,1}}$
- ● 0 に近いほど材料が濃縮され CE に好ましい。

(2) REX (Relative Exergy Content)

- ステージ  $q$  のエクセルギーを  $Ex_q$  とすると :
- $REX_q = \frac{Ex_q}{Ex_{input}}$
- ● 1 に近いほどエクセルギー破壊が少なく, エネルギー効率が高い。

(3) Exentropy (本論文の新指標)

- 論文では RSE と REX の差を使って次式で定義 :
- $c_q = REX_q - RSE_q$
- ●  $c > 0$  : 材料濃縮効果がエネルギー損失より大きい → CE 的に望ましい
- ●  $c < 0$  : エネルギー損失の方が大きい → 工程改善が必要
- 工程全体の評価 :
- $\sum c_q$  (大きいほど CE パフォーマンス良好)

図 3-9 exentropy による材料×エネルギーの多次元循環性

参考文献 : Vierunketo, M. et al., 2023

統計分析を用いた研究は、循環指標が複数の独立した構造から構成されることを示している (図 3-10 参照)。さらに、循環指標と持続可能性指標を統合する研究は、循環が持続可能性の重要な構成要素であることを示している (図 3-11 参照)。

Munonye, W.C. (2025) "Towards Circular Economy Metrics: A Systematic Review"

- この論文は、既存指標を分類するだけでなく、ISO 59020の登場と、社会・制度・経済を含む“多次元統合指標”の必然性を明確にした点が新規性
- 資源ではCIとRPIを対比して重要視する。それはCE指標に必要な「二つの資源観」を代表するから
- ●Circularity Index (CI)
- 目的：どれだけ資源が循環しているか（再利用・再製品化・再生材の比率）
- $CI = \frac{\text{回収量} + \text{再利用率} + \text{再生材利用量}}{\text{総資源投入量}}$
- ●Resource Potential Indicator (RPI)
- 目的：廃棄物がどれほど再資源化可能か
- $RPI = \frac{\text{再生可能資源の潜在量}}{\text{廃棄物の総量}}$

資源観	代表指標	意味
現在の循環の実態（現状評価）	CI	どれだけ循環しているか（結果）
潜在的な循環可能性（未来の可能性評価）	RPI	どれだけ循環し得るか（潜在能力）

図3-10 メトリックス体系整理

参考文献：Munonye, W. C. et al. 2025,

Rodrigues et al.(2025) “Building bridges between circularity indicators and sustainability

- 循環指標を持続可能性指標と統合し、マクロ・メゾ・ミクロの階層横断でCEをガバナンス設計に結びつけた、指標統合型の次世代CE研究の基盤論文」
- ■ 資源循環・資源効率に関する指標
- ● CMU：Circular Materials Utilization Rate
- 国家レベルで 二次資源利用率 を測定し、経済の循環度を直接評価。
- ● Material Productivity
- 経済価値（GDPなど）÷ 使用資源量。  
資源効率性と経済成長の両立 を評価。
- ● MCI：Material Circularity Indicator
- 製品の リサイクル含有率、寿命延長、再利用性 を統合して循環度をスコア化する

図3-11 circularity 指標と sustainability の橋渡し

参考文献：Rodrigues, C. et al. 2025

多変量解析は、循環が複雑な多次元システムであることを示しており、単一指標による評価の限界を明らかにしている（図 3-12 参照）。

この転換によって、CE 指標は単なる報告指標から意思決定支援指標へと変化した。

“Multivariate analysis of some circular economy indicators” (Fernanda & Adelaide Figueiredo, 2025)

- 「指標の提案」ではなく、既存CE指標の時系列相関変化を多変量解析で明らかにした
- 使用された多変量解析手法
- 手法 目的
- 主成分分析（PCA） CE 指標間の相関をまとめ、共通因子（潜在軸）を抽出
- 階層クラスタリング（HC） PCA 結果に基づき、地域を CE パフォーマンスの類似度で分類
- バイプロット 複数指標と各地域の位置関係を同時に可視化
- ● PCA により抽出された潜在軸（例）
- 軸 意味
- PC1：資源投入と消費削減型 CE      Material use, Domestic extraction
- PC2：循環回収・再資源化型 CE      Recycling, Secondary raw material use
- PC3：廃棄物処理効率性      Waste treatment, landfill avoidance

図 3 - 1 2 多変量解析

参考文献：Figueiredo, F. et al. 2025

### 3.5 デジタル技術による測定可能性の拡張

第四の転換は、デジタル技術による測定可能性の拡張である。従来の指標は統計データに依存していたが、AI、IoT、ロボティクスの導入により循環の実態を直接測定することが可能となった。

ロボット分解技術は、材料の品質、再利用可能性、分解成功率を直接測定することを可能にした（図 3-13 参照）。また、AI 研究の進展は循環の構造を新たに理解する手段を提供している（図 3-14 参照）。

この技術的進展により、CE 指標は推定から実測へと変化した。

CIRO7.2: A Material Network with Circularity  $\lambda$  and Reinforcement Learning Controlled Robotic Disassembly

- 「動的熱力学 × 希少性 × ロボット制御」により、循環経済を数理的に最適化する新領域 CIRO を提案した研究
- ● Circularity  $\lambda$  の意味
- 循環損失を物質量と機能価値で重み付け
- 負値⇒損失、0に近いほど循環が良い
- MFA型指標に比べ、時間・機能価値・希少性を含む点が革新的
- ● Criticality (cf)
- EU Critical Raw Materials (CRM) と整合
- 希少資源の損失は、平常資源の損失より重く計算される
- 循環経済に「質」を追加する指標
- ●  $\mu_{f,b}$  (機能喪失係数)
- リユース可能でも焼却される損失を数値化
- 単なる重量ではなく\*\*製品価値保持 (value retention) \*\*を評価

図3-13 CIRO7.2+強化学習ロボット分解

参考文献： All Noman, A. et al., 2022

## Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: A Bibliometric Analysis (2022)

「CE × AI × データ不足」を体系的に分析し、AIが循環指標の精緻化と意思決定に不可欠であると明示した最初期の文献レビュー

- 「循環性 × 価値 × 社会影響」の統合評価が未発展である」という指摘の整理
  - ① CE指標の評価は依然として LCA に依存
  - ② 「循環性 × 価値 × 社会影響」の統合が未整備
  - 循環性 (Circularity) は単なるリサイクル率や寿命延長ではなく、
  - 資源価値 (経済価値、品質)
  - 社会価値 (雇用、健康、安全、教育的効果)
- =>AIは価値と社会影響の測定の突破口になり得るが、まだ方法論が未成熟

AIによる推定対象	意義
製品寿命予測、劣化診断	価値保持の判断が可能 (修理 or 交換)
リユース市場価格予測	経済価値・投資意思決定に使用
回収効率・再資源化率の最適化 廃棄ロス削減	→ 社会的便益
資源分別や材料識別	高付加価値の資源回収を可能にする

図3-14 CE×AI ビブリオメトリクス

参考文献：All Noman, A. et al., 2022, Wiedenhofer, D. et al. 2024

### 3.6 資源安全保障および社会的価値の導入

近年の研究は、CE 指標に資源安全保障および社会的側面を導入している。循環は単なる資源管理ではなく、資源供給の安定性、経済競争力、社会的公正と密接に関連している。

この転換によって、CE は環境政策の一部ではなく、経済および社会の構造的課題として位置づけられるようになった。

### 3.7 小括

以上の分析から明らかになるのは、資源循環指標が根本的な理論的転換を経験していることである。

この転換は次の三点に要約される。

第一に、循環は量ではなく価値保持として理解されるようになった。

第二に、循環はフローではなく時間構造を持つストックプロセスとして理解されるようになった。

第三に、循環は単一指標ではなく多次元統合システムとして理解されるようになった。

これらの転換は、CE を環境対策から社会経済システムの設計問題へと再定義するものである。

すなわち、CE 指標は単なる測定装置ではなく、社会の資源利用構造を設計するための制度的装置となりつつあるのである。

## 第4章 企業のための CE-KPI ダッシュボード設計

### 4.1 なぜダッシュボードが必要か

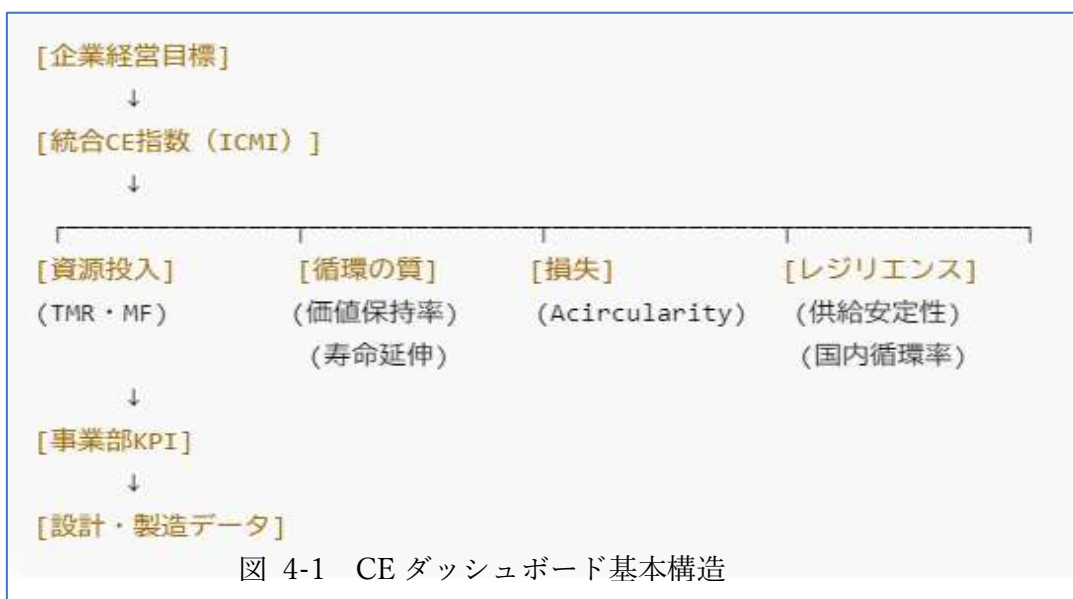
サーキュラーエコノミー（CE）を企業経営に実装するうえで最大の課題は、「循環を理念ではなく管理対象に変えること」である。理念は共有できても、それが日々の意思決定に反映されなければ、企業行動は変わらない。ここで不可欠となるのが KPI であり、さらにそれを統合的に可視化するダッシュボードである。

KPI は単なる測定指標ではなく、経営行動を方向づける管理装置である。何を KPI として設定するかによって、企業の意思決定は構造的に変化する。例えば資源投入量が KPI になれば資源削減が優先され、製品寿命が KPI になれば耐久設計や修理対応が重視される。この意味で、KPI は現実を測る道具であると同時に、現実を作り替える装置でもある。

一方、KPI が短期効率のみを追求すると、長期的な持続可能性が損なわれる可能性がある。ここで重要となるのが KSI（Key Sustainability Indicator）である。KSI は短期の効率ではなく、循環を支える構造条件を評価する指標である。例えば供給の安定性や修理可能性は短期利益に直結しないが、長期的な資源安全保障と企業存続に不可欠である。KPI が「現在の成果」を測るのに対し、KSI は「将来の持続性」を担保する指標である。

これらを個別に管理するだけでは、企業全体としての循環性は把握できない。そこで必要となるのがダッシュボードである。ダッシュボードは複数の KPI と KSI を統合し、経営者が資源投入、循環の質、損失、リスクの全体像を一目で把握できるようにする。この可視化によって初めて、循環は理念ではなく経営判断の対象となるのである。

図 4-1 に、CE ダッシュボード基本構造を示す。



## 4.2 CE-KPIの4軸モデル（実務設計フレーム）

CEを経営管理に組み込むためには、指標を体系的に整理する必要がある。本報告書では、企業が実務で使用可能な設計フレームとして、CE-KPIを四つの軸で構成するモデルを提示する。

第一は資源投入軸である。この軸は企業活動がどれだけ資源採掘に依存しているかを示す。代表的な指標がTMR（総物質要求量）とMF（マテリアルフットプリント）である。TMRは製品に直接投入される資源だけでなく、採掘過程で発生する隠れた物質移動を含めて評価するため、資源供給の実質的な負荷を把握できる。またMFは消費活動が世界の採掘にどれだけ依存しているかを示し、外部依存リスクの評価に有効である。これらは企業の資源戦略の基礎となる指標である。

第二は循環の質軸である。ここでは単に循環しているかではなく、どれだけ価値を保持した循環が実現しているかを評価する。価値保持率は再利用された資源が元の価値をどれだけ維持しているかを示し、寿命延伸率は資源がどれだけ長期間利用されているかを示す。またICRPは価値保持、寿命、非循環性を統合し、循環の質を総合的に評価する指標である。この軸は企業が価値保持型の循環へ転換しているかを示す。

第三は損失・非循環軸である。この軸は循環の不足ではなく、損失そのものを評価する。Acircularityは資源のうち実際に循環していない割合を示し、廃棄ロス率は価値が回収されずに失われた資源の割合を示す。これらは企業の循環の弱点を特定するうえで重要である。

第四は社会・レジリエンス軸であり、これはKSIに対応する。この軸は循環を支える基盤条件を評価する。供給安定性は資源調達のリスクを示し、修理可能性は製品が長期利用可能かを示す。また国内循環率は資源循環の自立性を示し、労働安全性は循環プロセスの社会的持続性を示す。この軸は企業の長期的な競争力を評価する指標である。

この四軸モデルによって、企業は資源依存、循環の質、損失、持続性を統合的に管理することが可能となる。

図4-2にKPI/KSIマトリックス図を示す。

	[効率KPI]	[持続KSI]
資源投入	TMR MF	外部依存度 国内循環率
循環の質	価値保持率 寿命延伸率	修理可能性 モジュール化
損失	Acircularity	資源安全保障
社会	回収率	労働安全性

図 4-2 KPI/KSI マトリクス図

#### 4.3 ICMI の実務活用

ICMI は資源投入と循環の質を統合する指標であり、企業の CE パフォーマンスを単一スコアとして示すことができる。このため ICMI は経営会議における統合指標として有効である。複数の指標を個別に説明することなく、企業の循環性の改善状況を経営層に伝えることが可能になる。

また ICMI は部門別にも展開できる。例えば製造部門では資源投入削減の成果を評価し、設計部門では寿命延伸の成果を評価するなど、各部門の活動を共通の指標で比較できる。

ただし ICMI は単一スコアであるため、その値だけでは改善の要因はわからない。したがって ICMI はダッシュボードの入口として使用し、その背後にある個別指標を併せて管理する必要がある。

#### 4.4 ダッシュボード階層構造

CE ダッシュボードは企業の階層構造に対応して設計する必要がある。

経営レベルでは、統合 CE 指数と外部依存リスクを管理する。これにより企業全体の循環戦略の方向性を把握できる。

事業部レベルでは、製品寿命、回収率、素材代替率を管理する。これにより各事業の循環性を評価できる。

製品設計レベルでは、分解可能性、モジュール化指数、リユース適合度を管理する。これにより設計段階で循環性を改善できる。

このように階層的に指標を配置することで、経営戦略と現場設計を一体化できる。

図 4-3 にダッシュボード階層図を示す。

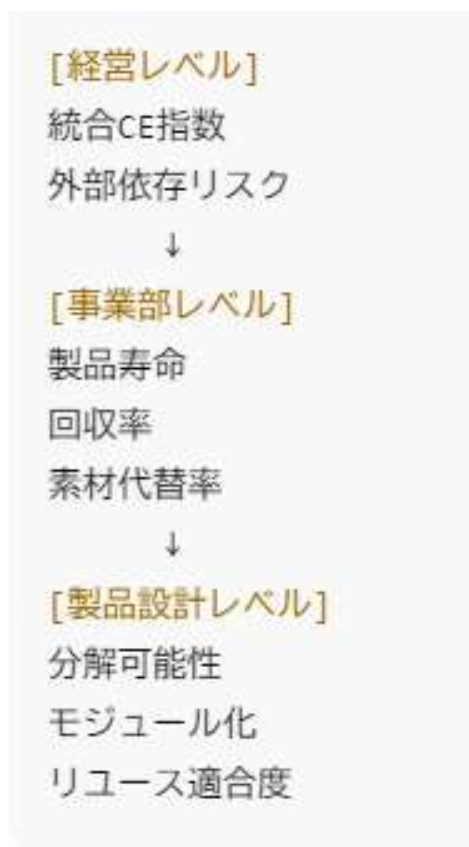


図 4-3 ダッシュボード階層図

#### 4.5 導入ステップ（実装ロードマップ）

CE ダッシュボードの導入は段階的に進める必要がある。

まず資源投入量を測定し、自社の資源依存構造を把握する。次に循環の質を評価し、価値損失の構造を明らかにする。そのうえで KPI を階層的に整理し、ダッシュボードとして統合する。最後にこれを投資判断や評価制度に接続することで、循環を経営行動に組み込む。

このプロセスによって、循環は理念から管理対象へと転換する。

#### 4.6 日本企業の課題と解決方向

日本企業が CE ダッシュボードを導入する際には、いくつかの課題が存在する。

第一にデータ不足である。資源投入や回収に関するデータが部門ごとに分散しており、統合が困難である。

第二に LCA への過度な依存である。LCA は有用だが、リアルタイム管理には適していない。

第三に組織の縦割り構造である。設計、調達、製造、回収が分断されており、循環全体を最適化できない。

第四に投資回収の問題である。循環投資の効果が短期利益に反映されにくい。

これらの課題を解決するためには、ダッシュボードによって循環を可視化し、経営判断と直接接続することが不可欠である。可視化によって循環の価値が明確になり、投資判断の根拠となる。

図 4 - 4 に産業別実装例を示す。

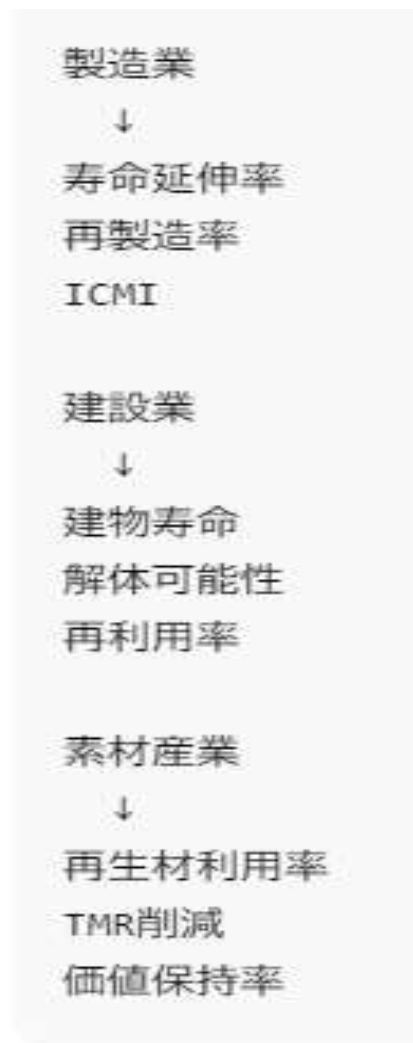


図 4-4 産業別実装例

#### 4.7 小括

CE ダッシュボードは単なる報告ツールではない。それは企業の資源戦略を方向づける経営装置である。資源投入、循環の質、損失、持続性を統合的に管理することで、企業は資源制約時代において持続的な競争力を確保できる。

## 第5章 結論

本報告書は、サーキュラーエコノミー（CE）指標の理論的展開と制度的進化を整理し、企業における KPI およびダッシュボードとしての実装可能性を明らかにすることを目的として検討を行った。その結果、CE 指標は単なる資源循環の測定指標ではなく、資源利用構造および経済活動を方向づける制度的装置へと転換しつつあることが明らかとなった。

第1章で示したように、CE 指標は当初、リサイクル率や資源生産性など既存の資源管理指標を代替的に用いる段階から出発した。しかし2017年以降、指標の爆発的増加とともに、循環量の測定がCEの本質を十分に表していないことが認識され、価値保持、損失、寿命といった質的要素を評価する指標へと理論的転換が進んだ。この転換は、CEを物質循環の問題から価値保持の問題へと再定義するものであった。

第2章では、CE 指標が KPI として制度化された過程を分析した。その結果、CE 指標は単なる分析ツールではなく、企業および政策の意思決定を方向づける統治装置として機能することが明らかとなった。また、TMR や MF などの資源投入指標と ICRP などの循環の質指標は、それぞれ CE の異なる側面を評価するものであり、単一指標によって CE 全体を評価することは不可能であることが示された。このことは、CE 評価が多次的構造を持つことを意味している。

第3章では、資源循環指標の理論的転換の構造を整理した。その結果、資源循環指標は次の三つの根本的転換を経験していることが明らかとなった。第一に、循環は物量ではなく価値保持として理解されるようになった。第二に、循環は単年度のフローではなく、ストックと寿命を含む時間構造として理解されるようになった。第三に、循環は単一指標ではなく、多次元統合フレームとして評価されるようになった。この転換は、CE 指標が資源管理指標から社会経済システム設計のための制度的指標へと変化したことを意味している。

第4章では、これらの理論的知見を企業実務に適用し、CE-KPI ダッシュボードの設計フレームを提示した。その結果、企業における CE 管理は、資源投入、循環の質、損失、社会的持続性の四軸から構成される統合的指標体系として設計される必要があることが明らかとなった。また、ICMI のような統合指標は経営判断の入口として有効であるが、実際の管理には複数の個別指標を統合したダッシュボードが不可欠であることが示された。

以上の分析から、本報告書の最も重要な結論は次の三点に要約される。

第一に、CE 指標は資源循環の測定指標から、資源利用構造を設計する制度的装置へと転換している。

第二に、CE の評価は単一指標ではなく、資源投入、価値保持、損失、社会的持続性を統

合した多次元指標体系として構成される必要がある。

第三に、企業における CE の実装には、KPI および KSI を統合したダッシュボードが不可欠であり、これによって循環は理念から経営管理の対象へと転換する。

資源制約と環境制約が強まる現代において、CE は単なる環境対策ではなく、経済構造そのものを再設計するための基本原理となりつつある。その実現の鍵となるのが CE 指標であり、それを KPI およびダッシュボードとして実装することによって、初めて循環は理念から実践へと転換する。

したがって、CE 指標の整備とダッシュボードの導入は、企業の持続可能性を確保するための基盤であると同時に、資源制約時代における新たな経営管理の中心的装置となるのである。

## 参考文献

- All Noman, A. et al., 2022, Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review, *Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC)*, Vol. 6, No. 2, 2022"
- Anastasiades, K. et al. 2023, Circular Construction Indicator: Assessing Circularity in the Design, Construction, and End-of-Life Phase, *Recycling*, Volume 8, Issue 2, 10.3390
- Bragança, L. et al. (Editors), 2025, Circular Economy Design and Management in the Built Environment A Critical Review of the State of the Art, SPRINGER NATURE Link, Book, Open Access, 2025
- Corona, B. et al. 2019, Toward sustainable development through the circular economy — A review and critical assessment on current circularity metrics, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 151, December 2019, 104498
- de Oliveira, C. T., 2023, What Circular economy indicators really measure? An overview of circular economy principles and sustainable development goals, *Resources Conservation and Recycling*, 190, 106850. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106850>
- EMF (Ellen MacArthur Foundation), 2013, Towards the Circular Economy Vol. 1: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- EU 2023, EU Commission includes new Indicators in revised CE Monitoring Framework, ECN Compost and Digestate for a Circular Bioeconomy, NEWS, 23-5-2023
- EU 2025, The 2025 Annual Single Market and Competitiveness Report, EC
- Fassio, F. et al 2023, The Circular Economy and the Food System: A Review of Principal Measuring Tools, *Sustainability* 2023, 15, 10179. <https://doi.org/10.3390/su151310179>
- Figueiredo, F. et al. 2025, Multivariate Analysis of Some Circular Economy Indicators, *Research in Statistics*, 3(1). <https://doi.org/10.1080/27684520.2025.2519288>
- Fontana, A. et al. 2021, Circular Economy Strategies for Equipment Lifetime Extension: A Systematic Review, *Sustainability*, 2021, 13(3), 1117; <https://doi.org/10.3390/su13031117>"

Halada, K. et al. 2022, New Indicators 'Acircularity' and 'Resource Efficiency Account' to Evaluate the Efforts of Eco-Design in Circular Economy, *Int. J. of Automation Technology* Vol.16 No.6, 684-695.

Halter, F. et al. 2025, Techno-sustainable Analysis of Circular Economy Indicators for Corporate Supply Chains, *Journal of Cleaner Production*, Volume 503, 25 April 2025, 145078

ISO 59020, 2024, Circular economy — Measuring and assessing circularity performance. Geneva, ISO, 2024

Jerome, A. et al. 2022, Mapping and testing circular economy product-level indicators: A critical review, *Resources Conservation and Recycling*, 178:106080

Jiang, L. et al., 2022, Measuring product-level circularity performance: An economic value-based metric with the indicator of residual value, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 186, November 2022, 106541

Kirchherr, J. et al. 2023, Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 194, July 2023, 107001

Kravchenko, M. et al. 2020, To what extent do circular economy indicators capture sustainability?, *Procedia CIRP*, Volume 90, 2020, Pages 31-36

Lysaght, O. et al. 2022, A GUIDE TO PUBLIC DATA RESOURCES FOR A CIRCULAR ECONOMY MODELLING AND MEASUREMENT FRAMEWORK, CE-HUB, UKRI National Interdisciplinary Circular Economy Research, CE-Hub Technical Report, 11-2022

Moraga, G. et al. 2019, What Do Circular Economy Indicators Measure?, *Resour Conserv Recycl.* 2019 Jul:146:452-461.

Munonye, W. C. et al. 2025, Towards Circular Economy Metrics: A Systematic Review, *Circular Economy and Sustainability*, (2025) 5:4093–4135

<https://doi.org/10.1007/s43615-025-00604-5>

Negrei, C. et al., 2022, The economy of material flow cycling in anthropized and anthropogenic systems, *Proceedings of the International Conference on Business, Excellence*, 16(1):367-380

OECD, 2024A, An International Review of National and Subnational Circular Economy Monitoring Frameworks Lessons and Ways Forward for Italy, OECD 2024

<https://www.oecd.org/termsandconditions>.

OECD, 2024B, Monitoring Progress towards a Resource-Efficient and Circular Economy, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/3b644b83-en>.

Parchomenko, A. et al. 2019, Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics, Journal of Cleaner Production, Volume 210, 10 February 2019, Pages 200-216"

Pineda-Martos, R. et al., 2025, Circularity Criteria and Indicators at the Construction Material Level, Springer Tracts in Civil Engineering, Part F3604: 299-333.

[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8\\_12](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8_12)"

Pitkänen, K. et al., 2023, How to measure the social sustainability of the circular economy? Developing and piloting social circular economy indicators in Finland, Journal of Cleaner Production, Volume 392, 15 March 2023, 136238

Rashid, A., 2025, How circular is the linear economy? Analysing circularity, resource flows and their relation to GDP, arXiv:2505.13048v1 [econ.GN] for this version),

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.13048>

Rasor, A. et al. 2025, Key performance indicator system for evaluating the circular economy along the value chain, Procedia CIRP, 135 (2025) 972 – 977

Rodrigues, C. et al. 2025 From Efficiency to Circularity in the Wastewater Sector: A Review of Performance Indicators in Regulated Countries, Water, 2025, 17(15), 2226;

<https://doi.org/10.3390/w17152226>"

Rodrigues, M. et al. 2025 Building Bridges Between Circularity Indicators and Sustainability, Discover Sustainability, (2025) 6:1242

Saidani, M. et al. 2019, A taxonomy of circular economy indicators, Journal of Cleaner Production, Volume 207, 10 January 2019, Pages 542-559"

Schulte, A. et al., 2023, Measuring the circularity potential of recycled LDPE based on quantity and quality conservation - a functional requirement matrix approach, Resources, Conservation & Recycling Advances, Volume 17, May 2023, 200127"

Teixeira, A., 2024, Balancing materials needs with carbon footprint mitigation: an integrated

climate-economy-materials prospective for France, Environment and Society, École des Hautes Études en Sciences, Sociales, 2024. English. (NNT : 2024EHES0081). (tel-05147574)

UNECE 2021, Second Regional Conference: Measuring and monitoring the circular economy and the use of data for policy-making, UNECE, Task Force on Measuring Circular Economy, UNECE Homepage, Environmental Policy, Events and Meetings.

UNEP Finance Initiative, 2023, Guidance on Resource Efficiency and Circular Economy Target-Setting” (2023) UNEP, Principles for Responsible Banking, Version 2

Vierunketo, M. et al., 2023, A multi-dimensional indicator for material and energy circularity: Proof-of-concept of exentropy in Li-ion battery recycling, iScience, Volume 26, Issue 11, 17 November 2023, 108237

Wiedenhofer, D. et al., 2024, From Extraction to End-uses and Waste Management: Modelling Economy-wide Material Cycles and Stock Dynamics Around the World, Journal of Industrial Ecology, 2024;28:1464–1480.

Zocco, F. et al., 2025, CIRO7.2: A Material Network with Circularity of  $-7.2$  and Reinforcement-Learning-Controlled Robotic Disassembler, arXiv preprint arXiv:2506.11748, 2025