

LEARNING MADE EASY

PTC 特別版

製品持続可能性

for
dummies[®]
A Wiley Brand



環境フットプリント
削減のための設計

製造の効率化

収益性のある
サービスと循環

協力



ptc[®]

Dave Duncan

PTC について

航空機から医療機器、風力タービン、コンピューターに至るまで、PTC 独自のソフトウェアソリューションは、さまざまな企業の製品設計、製造、保守の変革に役立てられています。

PTC のソフトウェアは製品ライフサイクル管理の分野で世界をリードしており、製品のライフサイクル全体にわたりデータ管理をサポートして、製品の複雑度の軽減、エンジニアリングと設計の強化、製造とサプライチェーンの効率化、運用とサービスの最適化を促進しています。

PTC はデジタルテクノロジーのポートフォリオ、広範なパートナーネットワーク、業界の専門知識により、あらゆる規模の企業から信頼を得ています。また、市場をリードする製品ライフサイクル管理 (PLM)、アプリケーションライフサイクル管理 (ALM)、コンピューター支援設計 (CAD)、サービスライフサイクル管理 (SLM) など、製品ライフサイクルの各段階をサポートするソフトウェアも展開しています。

PTC は自動車、航空宇宙および防衛、産業機械、メドテック、電子およびハイテクなど、主要な製造分野のリーダーや革新的企業をはじめとする 30,000 社超のお客様を擁しています。お客様の成功のために尽力し、緊密な連携によりデジタルトランスフォーメーションを支援しています。

PTC の目標は、より良い世界を思い描くだけでなく、その実現を支援することです。この目標の下で企業としての価値観を構築し、持続可能性や社会貢献のための取り組みを進め、ソフトウェアソリューションを開発しています。



製品持続可能性

PTC 特別版

Dave Duncan 著

**for
dummies®**
A Wiley Brand

ゼロから学ぶ製品持続可能性® - PTC 特別版

発行：

John Wiley & Sons, Inc.

111 River St.

Hoboken, NJ 07030-5774

www.wiley.com

Copyright © 2026 by John Wiley & Sons, Inc.

この出版物のいかなる部分も、1976 年米国著作権法第 107 条または第 108 条で認められる場合を除き、発行者の書面に
よる事前の許可なしに、電子的、機械的、複写、記録、スキャンまたはその他のいかなる形式もしくは手段によっても、
複製、検索システムへの保存、または送信することは認められません。使用に関する許可については発行者にお問い合わせ
ください：Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030。
電話：(201) 748-6011、FAX：(201) 748-6008、Web：http://www.wiley.com/go/permissions

商標：「Wiley」、「For Dummies」、「the Dummies Man」のロゴ、「The Dummies Way」、
Dummies.com、「Making Everything Easier」、および関連するトレードドレスは、米国およびその他の国におけ
る John Wiley & Sons, Inc. および / またはその関連会社の商標または登録商標であり、書面による許可なしに使用する
ことはできません。PTC および PTC ロゴは PTC の登録商標です。その他すべての商標は、各所有者に帰属します。
John Wiley & Sons, Inc. は、本書で言及されている製品またはベンダーと一切関係ありません。

責任および保証に関する免責事項：発行者および著者は、本書の内容の正確性および完全性に関していかなる
表明または保証も行わず、すべての保証を明確に否認します。これには、特定目的への適合性の保証を含みま
すが、これに限定されません。販売資料または宣伝資料によって保証が設定および拡張されることはありません。
本書に記載された助言および戦略は、必ずしもすべての状況に適するとは限りません。本書が提供する情
報は、一般的な指針として意図されたものであり、税金、福利厚生、または法律に関する助言を行うものでは
ありません。本書は、発行者が法律、会計、またはその他の専門サービスの提供に従事していないと了解され
ることを前提として販売されています。専門的な支援が必要な場合は、適切な資格を有する専門家にサービス
を依頼してください。発行者および著者は、本書の内容に起因して生じたいかなる損害に対して責任を負わな
いものとします。本書で特定の組織または WEB サイトを引用および / または追加情報源として記載してい
ても、著者または発行者がその組織または WEB サイトから提供される情報または勧告を支持することを意味
するものではありません。さらに、本書に記載されているインターネット WEB サイトは、本書が書かれた
時点から読者が閲覧するまでの間に変更または消滅している可能性があることをご了承ください。

その他の製品およびサービスに関する一般情報に関するお問い合わせ、またはお客様のビジネスや組織に合わせた
特別版の *For Dummies* 書籍の作成のご依頼については、米国の当社 Business Development Department
(電話：877-409-4177、メール：info@dummies.biz) にお問い合わせいただくか、www.wiley.com/go/
custompub をご覧ください。製品やサービスに関する *For Dummies* ブランドのライセンス取得については、
BrandedRights&Licenses@Wiley.com お問い合わせください。

ISBN：978-1-394-36828-0 (pbk)、ISBN：978-1-394-36829-7 (ebk)、978-1-394-36830-3 (ePub)。
印刷版の空白ページは、ePDF 版に含まれない場合があります。

謝辞

本書の刊行にあたりご尽力くださった方々を、以下にご紹介します。

プロジェクトマネージャー兼開発編集者：

Carrie Burchfield-Leighton

編集幹事：Rev Mengle

編集企画担当者：Traci Martin

シニア顧客担当 マネージャー：Matt Cox

PTC の寄稿者：Elena Angst、

Sean McGrath、Ashley Pruitt、

Nicole Dwyer、James Norman、

Kristen Wells Griffith、

Brad Donegan

制作担当編集者：Magesh Elangovan

目次

はじめに.....	1
本書について.....	2
対象読者.....	2
本書で使用するアイコン.....	3
読み終えた方のために.....	4
第1章：製品持続可能性の基礎設定.....	5
持続可能性の定義.....	5
製品が引き起こす環境問題.....	7
コンプライアンスー規制遵守という「ムチ」.....	8
収益性ー利益という「アメ」.....	9
ライフサイクル思考による環境フットプリント（環境負荷）の削減.....	10
第2章：エコロジーとコンプライアンスに関する 問題とその解決.....	11
問題の把握.....	11
9つのプラネタリー・バウンダリー（地球の限界）.....	12
脱炭素化.....	13
有限資源の保護.....	14
諸問題に関する規制.....	16
環境製品宣言.....	17
有害物質に関する規制.....	17
脱炭素に関する規制.....	18
循環型経済に関する規制.....	21
第3章：持続可能性とビジネス価値の整合.....	23
脱炭素化の価値.....	24
部品設計における材料削減.....	25
組み込みソフトウェアによる脱物質化.....	26
サプライヤーデータと選定の改善.....	27
材料選定基準のバランス.....	27
分散型製造.....	28
製造可能性のシミュレート.....	29
EPDの自動作成.....	29
循環価値.....	30
モジュール設計.....	31
最終手段としての技術者派遣.....	32
最終手段としての保守部品注文.....	33
環境フットプリントによる製品の差別化.....	34

第4章：	持続可能性に配慮した設計の原則	35
	ライフサイクルの観点から見る Dfs の価値	35
	有益な Dfs 情報の収集	36
	個別製造業向けの Dfs フレームワーク	37
	構成部品レベル	37
	製品レベル	39
	製品サービスシステムレベル	40
	実社会における Dfs 順序の管理	40
第5章：	フルライフサイクル思考による	
	環境フットプリントの管理	41
	ライフサイクル思考の指針	42
	ライフサイクルインベントリの優先順位	43
	運用フットプリント	44
	上流工程での環境フットプリント	45
	下流工程での環境フットプリント	46
	循環性	47
	ライフサイクルデジタルスレッド	48
	エンジニアリングハブ	49
	アセットハブ	50
	PLM の BOM とアセットハブの統合	51
	構成固有の作業指示書	51
	機器ベースでの予測	52
	データ主導型の設計とサービス	52
	上昇する AI の価値	52
第6章：	ライフサイクル管理で収益とフットプリン	
	ト削減を両立する10のヒント	53
	フルライフサイクル思考	53
	循環性のためにハードウェアとソフトウェアをモジュール化する	54
	現場の作業者に配慮する	54
	BOM を充実させ、機能として EPD を実現する	55
	DPP のメリットを考慮する	55
	CFO に喜ばれるフットプリント削減活動から始める	56
	自社ブランドの重要分野で先行者を目指す	56
	脱炭素化の価値を直感的に理解する	57
	循環性を直感的に理解する	58
	持続可能性に関する要求事項を利用してデジタルスレッドを確立する	59

はじめに

よ り性能がよく、環境負荷が少なく、収益性の高い製品を。今こそ、これまで現実離れした戦略的メッセージとされてきた「製品の持続可能性」を、製品の設計、製造、保守、使用後の回収に携わる皆さんのようなリーダーが実現するときです。皆さんがアクションを起こさなければ、製品の環境フットプリントは改善されません。製品のフットプリントの約 80% は設計上の決定（製造や保守計画を含む）に左右されるため、収益性を確保しながらフットプリントの削減を実現できれば、環境保護の面でもビジネスの面でもヒーローになれるでしょう。

「持続可能性」は、ほとんどの人にとってまだ馴染みがなく、変化を追いくいトピックです。そのため、今の段階で深い知識がなくても心配はいりません。この本を読めば、すぐに第一人者たちと共に活動できるようになるでしょう。持続可能性界限は、新しい仲間を温かく受け入れてくれます。

大学の運動部やスポーツサークルに参加する場面を思い浮かべてください。サッカーを選んだ場合、子どもの頃からやっている人が多いため、新入りの活躍は難しいかもしれません。しかし、アルティメット（フリスビーを使った競技）なら、ほとんどの人が初心者なので、すぐに試合に出てチームに貢献できるでしょう。

製品の持続可能性は、このアルティメットのようなものです。基礎さえ覚えれば、すぐに活躍できます。本書では、筆者が真理と考える次の 3 点を軸に話を進めます。

≫ **製品の環境フットプリントの削減は、それが収益性をともなって初めて持続可能なものとなります。** 今後 5 ～ 10 年の間に、環境面だけでなく財政面で利益のためにも講じるべき措置によって、製品の環境フットプリントを半分に以下に削減できる可能性が大いにあります。2030 年代にはさらなる手法やテクノロジーが普及し、収益性を確保しながら残りのフットプリントも大幅に減らせるようになるでしょう。

≫ **政治的な意見は議論に絡めないようにしましょう。** 政治的な意見は移ろいやすいものです。より少ないコストおよび環境フットプリントでより良い製品を追求するテクノロジーの歩みは不可逆的であり、その耐久性、光熱費の節約、サプライチェーンの回復力に対する効果は、賛成派にも、否定派にも、中道派にも喜ばしいものです。

» 現在の働き方を全面的に変える必要はありません。元システム設計エンジニアリングディレクターの David Gente 氏によれば、現在の製品ライフサイクル担当者は、すでにコストと品質の各要素（性能、機能、信頼性、適合性、耐久性、サービス性、美観、知覚品質）を適切に両立できています。ここに、9 番目の要素として「持続可能性」を加えればよいのです。

それでは、PFAS フリーで 100% リサイクル可能なポリエチレン製の中古フリスビーを手に取って、さっそく始めましょう。

本書について

本書は、以下のトピックを扱う 6 つの章で構成されています。

- » 学習を始めるための製品の持続可能性の基礎設定および焦点
- » 製品が引き起こす環境問題と、環境フットプリント削減推進に関する法規制
- » ビジネスケース（環境フットプリント削減と財務上の優先事項の整合）
- » 持続可能性に配慮した設計 (DfS) の原則
- » フルライフサイクル思考による環境フットプリント管理
- » ライフサイクル管理で製品の環境フットプリント削減と収益性を両立させるための 10 のヒント

各章の内容は独立しています。そのため、気になるトピックがあったら、その章から読み始めてもかまいません。ご自分に合った順番で読んでください。

対象読者

持続可能性は幅の広いトピックですが、「製品の持続可能性」の焦点は絞られます。そのため、本書の読者層は、おおまかに以下のように想定されています。

- » 個別製造業における製品の持続可能性を理解したいと考えている読者：この製品には、飛行機、列車、自動車、フットウェア、X 線機器、オーブントースター、スマートフォン、エレベーター、ブルドーザー、バルブをは

2 ゼロから学ぶ製品持続可能性® - PTC 特別版

じめとする、足の上に落とすと痛いほぼすべての固形物が含まれます。石油、ガス、化学薬品、食品、ビール、原材料、レシピベース製品などのプロセス製造品については、本書では取り扱いません。

- » 以下のいずれかの経歴に当てはまる読者：「製品ライフサイクル担当者」または「企業の持続可能性担当者」（または、そのような業務を統括する幹部）。製品ライフサイクル担当者については、エンジニアリング、製造計画、サービス管理、IT、製品管理、ソーシング、コンプライアンスなど、幅広い業務のジェネラリストまたは専門家を想定しています。
- » 個別製造業の製品や持続可能性に携わっていない方にも、本書は、この業界の環境フットプリント削減への取り組み方を学ぶうえで役立ちます。

本書で使用するアイコン

本書では、重要な部分に注目してもらうために、特別なアイコンを用いています。これらのアイコンとその意味は以下のとおりです。



ポイント

覚えておきたい情報を示します。



ヒント

提案、アドバイス、または所見として、他の導入事例で得られた経験を活用するうえで役立つ情報を示します。



注意

予期せぬ落とし穴や金銭的損失など、障害を避けるために注意すべきポイントを示します。このアイコンのついた個所に特に注意すれば、よけいな障害を回避できます。



技術情報

2 とおりの意味があります。技術者にとっては、知っておくべき重要な情報です。ほかの人は読み飛ばしてかまいません。

読み終えた方のために

本書は入門書として最適ですが、ページ数の都合上、一部トピックでは詳細を割愛しています。詳しく学びたい方は、ぜひ [PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book) を参照してください。皆さんがリソースにアクセスしやすいよう、このリンクは本文の随所に記載されています。

- » 持続可能性の理解
- » 製品がもたらす影響の可視化
- » コンプライアンスとの連携
- » 収益性の追求
- » ライフサイクル思考による環境フットプリント
(環境負荷) の削減

第 1 章

製品持続可能性の基礎設定

持 続可能性 (サステナビリティ) という言葉は意味が広く、さまざまな分野にまたがっているため、自分がその取り組みの中でどのような役割を果たせるのかを見極めるのは、少し分かりにくいかもしれません。この章では、製品の持続可能性の基本を紹介しながら、製品ライフサイクルに関わる人たちが、どこで最も大きな貢献ができるのかをわかりやすく説明していきます。以降の章では、これらのトピックをさらに掘り下げていきます。

持続可能性の定義

1987 年、国連のブルントラント委員会は持続可能性を「将来の世代が自らのニーズを満たす能力を損なうことなく、現在のニーズを満たすこと」と定義しました。この定義は今なお有効です。私たちは、快適な住環境、便利な交通手段、冒険的な旅行、栄養豊かな食事を享受しています。そして、何代にもわたる子孫が、豊かな自然環境を楽しみながら、同じ特権を享受できることを望んでいます。持続可能性の精神とは、豊かな生活と環境保全のバランスを取り、製品やサービスを持続可能な方法で楽しむことにあります。

持続可能性は、「環境」、「社会」、「ガバナンス」の 3 つの要素から構成されます。それぞれの分野はさらに細分化されており、図 1-1 に示されています。図 1-1 の中で色が表示されているタイルは、管理する製品ライフサイクルにおいて、主に注目すべき領域です (ただし、火災報知器のように人命を守る製品は社会的にプラスの影響を与える一方で、兵器のようにマイナスの影響を持つ可能性がある製品もあり、製品によって社会的な影響の方向性は異なります)。

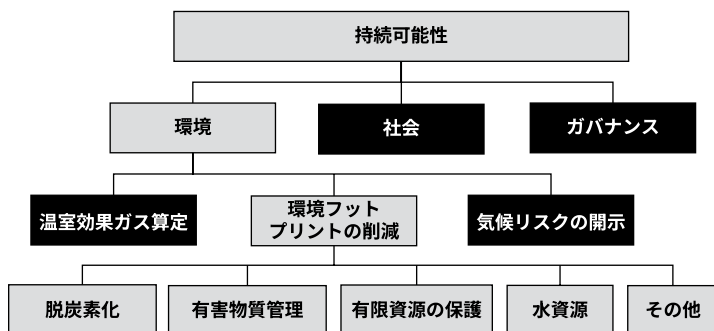


図1-1: 個別製造業における製品ライフサイクル実務者が共通して注力する持続可能性の重点領域。

「ESG」という言葉を「持続可能性 (サステナビリティ)」と同義で耳にしたことがあるかもしれません。ESG とは、環境 (Environmental)、社会 (Social)、ガバナンス (Governance) の頭文字を取ったもので、国連が掲げる 17 の持続可能な開発目標 (SDGs) に基づいています。この 17 の目標の根底にある考え方は、たとえば環境をより良く保全するための技術的手段が私たちの手元にあったとしても (実際、現在ではその多くが実現可能です)、市民や国家が協力しなければ、必要なスピードと規模でそれを実行することはできない、というものです。(ここで政治的なことに触れることはありません。このあと、どうすれば政治的に中立な形で貢献できるかをご説明します。)

たとえば、「貧困をなくそう」(目標 1) といった社会的目標や、「平和と公正をすべての人に」(目標 16) といったガバナンスの目標は、環境に関する目標 (E) を推進するうえで不可欠な要素です。本書では、この「環境 (E)」の領域に焦点を当てています。製品ライフサイクルに関わるすべての実務者は、この環境分野で、科学的根拠に基づいた技術とビジネス価値をもって取り組むことが求められます。本書で特に注目する SDG の 2 つの目標は以下のとおりです。

» **目標 9: 産業と技術革新の基盤をつくろう:** 製品ライフサイクルにおける設計の要素に関わります。

» **目標 12: つくる責任、つかう責任:** 製造、サービス、そして循環型の実行に関わる要素です。



技術情報

また、サプライチェーンにおける人権など、社会的な目標 (S) の一部は、設計段階での材料や部品の選定において重要なコンプライアンス項目となります。とはいえ、設計者自身がサプライヤーを直接評価するわけではありません。通常は調達部門がその役割を担い、紛争鉱物のコンプライアンスなどを踏まえて、承認済みのベンダーリストを提示します。

製品が引き起こす環境問題

前のセクションでは、本書における ESG の主な焦点が、国連の SDGs の枠組みにおける「E (環境)」であることをご紹介しました。このセクションでは、企業活動に内在する環境課題と、その改善の必要性について紹介します。詳細は第 2 章でさらに掘り下げていきます。

私たちの製品は、環境に対して主に次の 3 つの大きな悪影響を与えています。

- ▶▶ **有害物質:** 水銀、鉛、カドミウムなどの有害物質は人間や生物に有害です。プラスチックも近年では問題視されています。鉄鋼やアルミニウムなどの金属は製品中では比較的安定していますが、採掘の過程で発生する「鉱滓 (こうさい)」は水や土壌を汚染する可能性があります。

鉱業において、鉱滓 (こうさい) とは、鉱石から有用成分を分離した後に残る不要な物質のことを指します。

- ▶▶ **温室効果ガスの排出:** 製品のライフサイクル全体において、温室効果ガスは、化石燃料を燃焼させて製品を「製造」または「使用」するあらゆる工程から排出される可能性があります。

たとえば、ガソリンを燃料として走行する自動車は、その使用段階で直接的に温室効果ガスを排出する典型的な例です。電力を使う機械も、その電力が石炭や天然ガスで発電されていれば間接的に排出源となります。さらに、電力を使わない製品であっても、採掘、素材加工、製造、輸送といった工程で排出される「エンボディド・カーボン (製品に内在する炭素)」が存在します。冷媒など、温暖化効果の高いガスを排出する製品もあります。

- ▶▶ **有限資源の枯渇:** 地球の地殻に存在する金属、鉱物、石油などの資源は限られています。たとえば、ディーゼルを燃やすトラックや、壊れた製品を焼却・埋立処分するような直線的な消費を続ける限り、将来の世代はこれらの資源を利用できなくなる可能性があります。



技術情報



技術情報

こうした環境への悪影響を、企業が責任を持って減らしていくことが求められています。これらは企業のコストには表れにくいものの、社会全体にとっては大きな問題です。これらの取り組みは、しばしば自主的に行われますが、ビジネス価値を高める手段としても重要です。そして近年では、規制によって企業に責任を果たすことが求められるようになってきています。

コンプライアンス — 規制遵守という「ムチ」

「コンプライアンス」とは、規制を遵守することを意味します。この点については第2章で詳しくご説明いたします。有害物質に関するコンプライアンスは、すでに20年ほど前から産業界で制度化されており、多くの企業では成熟した管理体制が整っていると考えられます。

一方で、脱炭素化や循環型経済に関するコンプライアンスは、比較的新しい分野です。各国レベルでさまざまな規制が存在しますが、国際的な動向としては、欧州連合(EU)の「企業持続可能性報告指令(CSRD)」が主導的な役割を果たしています。CSRDはESG全般を広く対象としており、EU域内に製品を輸出する企業にも適用されます。そのため、EU市場で製品を販売している、あるいはEUと取引のあるサプライヤーと連携している企業は、これらの規制に対応する必要があります。

製品ライフサイクルに関わる実務者にとって、CSRDおよび関連する規制は、製造業者以下のような対応を求めています。

- » 製品の環境フットプリント(環境負荷)を測定すること
- » 定量的な削減目標を設定し、その達成に取り組むこと
- » 使用済み部品や製品から材料を回収し、再利用すること



ポイント

経済学的な観点から見ると、地球温暖化は温室効果ガスの排出という外部不経済をうまく管理できていない「市場の失敗」とされています。こうした外部性に対処するために、規制という「ムチ」が導入されているのです。

ビジネスの観点から見ても、コンプライアンス違反の代償は非常に大きなものになります。まず、各国や経済圏によって異なる法的制裁が科される可能性があります。とりわけB2B(企業間取引)を行う製造業においては、法的罰則そのものよりも、取引先からの信用喪失や取引停止といったビジネス上の損失の方が深刻な影響を及ぼす可能性があります。つまり、コンプライアンスを満たさないサプライヤーは、顧客から選定対象外とされるリスクを抱えることになるのです。



ただし、こうしたコンプライアンスを「足かせ」として捉える必要はありません。むしろ、製品設計の基準を引き上げ、競争条件を公平にし、さらには新たなビジネスチャンスを生み出すきっかけにもなり得るのです。

収益性 — 利益という「アメ」

コンプライアンスにおいては、「やらなければならないからやる」という理由だけでビジネス上の正当性は十分に成り立ちます。しかし、それだけでは差別化につながる投資を引き出すことはできません。幸いなことに、持続可能性にはそれ以上の大きな可能性があります。

本質的に、製品の持続可能性は、価値と効率の優先順位を明確にするための可視性をもたらします。そして、その優先事項に対して、実績あるソリューションと最先端の技術を組み合わせて対応するのです。たとえコンプライアンスのための取り組みとしての価値を除いたとしても、持続可能性の実践によって得られる成果は、企業が重視する経営目標や利益追求の方向性としっかり合致しています。たとえば、次のような効果が期待できます。

- » リサイクル、軽量化、スクラップの削減、組み込みソフトウェアの活用によって、材料や部品のコストを削減
- » 省エネルギー、再製造、リファーマービッシュによって、生産コストを削減
- » 顧客にとって本当に価値のある設計に集中し、過剰設計を回避
- » 耐久性、効率性、組み込みソフトウェアの革新によって、初期売上が増加
- » 効率的なサービス、アップグレード、二次市場の活用によってアフターセールス収益が向上
- » サプライチェーンの可視化とリスク耐性を強化
- » ブランド価値とグリーンプレミアム（環境配慮による付加価値）によって市場を拡大

これはまさに、やらない手はない取り組みです。ビジネスにも環境にも良く、企業としての法的リスクを回避することにもつながります。



ポイント

製品の環境フットプリントの削減は、それが収益性を伴って初めて持続可能なものとなります。そして、この収益性こそが、前述の「ムチ」に対する「アメ」なのです。まずは実現しやすい成果から着手し、次第により難易度の高い改善へと取り組んでいくことが推奨されます。たとえば、再生可能エネルギーによる電化、脱物質化、分散型製造、サービス化といった取り組みは、すでに多くの場面で収益性を伴って実現されています。

一方で、まだ本格的に普及していない段階であっても、先行者利益を得られる可能性のある分野や、次の段階での展開が見込まれる選択肢も存在します。これらの価値の詳細については、第 3 章でさらに掘り下げていきます。

ライフサイクル思考による環境フットプリント (環境負荷) の削減

従来の持続可能性における施策は、主に企業の工場内で目に見える範囲、すなわち運用段階の環境フットプリントに焦点を当てていました。たとえば、廃棄物の削減やエネルギー使用量の抑制が挙げられます。また、可能であれば再生可能エネルギーへの切り替えを進めたり、必要に応じて排出ガスの回収装置を導入したりすることも含まれます。

しかし、CSRD (企業持続可能性報告指令) への対応に加え、投資家や顧客からの期待が高まる現在、製造業者は工場の敷地内にとどまらず、製品のライフサイクル全体に対して責任を負うことが求められています。たとえば、工場に届く材料や部品については、それらが採掘、輸送、素材加工、下請け製造といった上流工程でどのような環境負荷をもたらしているかについても、製造業者が責任を持つ必要があります。また、製品の販売後に発生する下流工程、すなわち使用時のエネルギー消費、サービス提供、廃棄物処理などについても同様です。



ポイント

個別製造業においては、製品の環境フットプリントのうち、工場内の運用が占める割合はわずか 1 ~ 10 % 程度にすぎません。残りの 90 ~ 99 % は、上流および下流の工程に起因しています。したがって、工場内の運用だけに持続可能性の取り組みを限定しては、もはや十分とは言えません。製品のライフサイクル全体に対する責任が、今や不可欠となっているのです。このような背景から、製品ライフサイクルに関わる担当者は、持続可能性の実現において中心的な役割を担っています。企業は、製品の環境フットプリントを継続的かつ収益性のある形で削減していくために、しっかりとした業務プロセスとデジタル基盤を構築する必要があります。

持続可能な設計の原則については第 4 章で、それらをライフサイクル全体にどう実装するかについては第 5 章で詳しく解説しています。

- » 製品が環境に与える悪影響の解説
- » 悪影響を軽減するための法や規範の理解

第2章

エコロジーとコンプライアンスに関する問題とその解決

この章では、製品の持続可能性に関して解決が必要な問題を理解するうえで不可欠なトピックを取り扱います。気の滅入る内容が含まれているかもしれませんが、良いことばかりというわけにはいかないものです。

この章では、製品が環境に与える悪影響と、それに最も大きく関わる活動について解説します。また、製造業における製品の外部不経済を軽減する規制の枠組みも紹介します。

問題の把握

今日の工業製品は持続可能とはいえません。それらの製品は地球を汚染し、温暖化を進め、限りある資源を消費しています。したがって、マーケティング部門が自社製品を宣伝する際、「持続可能な製品」や「グリーン製品」などの表現は避けたほうがよいでしょう。企業として環境フットプリントのネットゼロ化に向けて努力を重ねているとしても、現時点では「より持続可能な製品」といった表現にとどめておくのが賢明です。



技術情報

「ネットゼロ」とは、企業による温室効果ガスの排出量を大幅に削減すること（炭素除去には実的な限界があるため、一般的には設定時点の排出実績から 90% 以上の削減が求められます）を指し、残余排出量については炭素除去クレジットなどを購入することで相殺して、排出量を実質ゼロにすることです。

9つのプラネタリー・バウンダリー (地球の限界)

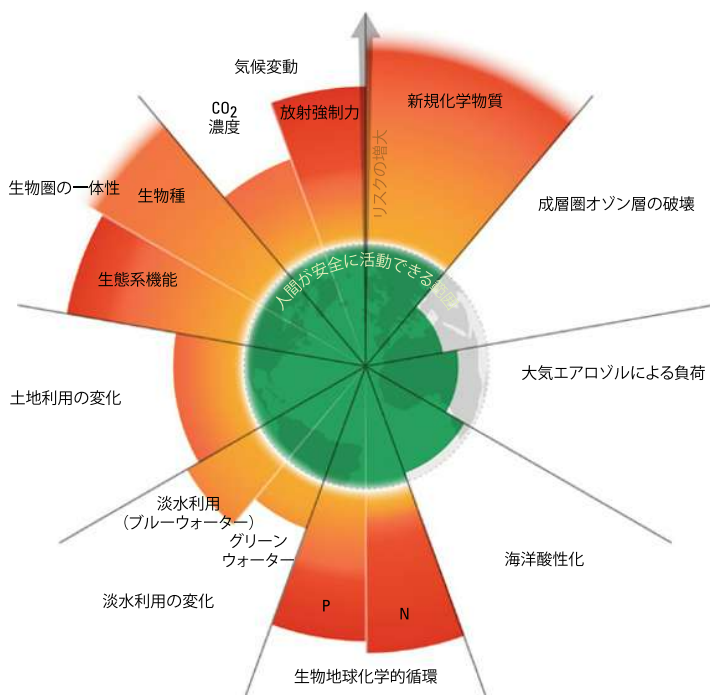
地球は、薄い大気圏（空気）、薄い生物圏（地面や土壌）、厚い地圏（地殻とマントル）によって生命を支えています。80 億人を超える人口が世界各地で暮らし、先進国並みの豊かな生活水準が求められるようになったことで、人間が地球の生命維持システムに与える負荷はこれまでにない形となっています。

Stockholm Resilience Centre では、プラネタリー・バウンダリー（地球の限界）の概念を使って、諸問題とその動向を表しています。これは図 2-1 に示すように、人間の活動が地球に与える悪影響を 9 個の項目にまとめたものです。人間が安全に活動できる範囲内にある項目は、長期的に問題がありません。問題があるのは、その範囲を超えてしまっている項目です。均衡を崩した大自然が過激で壊滅的な変化を起こす前に、できれば事を荒立てずに、人間が安全に活動できる範囲まで戻さなければなりません。

図 2-1 が示すとおり、多くの項目が安全な範囲を超えています。危機的な状況に思われるかもしれませんが、改善する方法はあります。成功例の 1 つが、「成層圏オゾン層の破壊」バウンダリーです。この項目が限界を超えてしまったことは、1980 年代後半に広く認知されていました。冷媒などの化学物質が大気圏のオゾン層の崩壊を招き、人間をはじめとする生物が光線を過剰に浴びることになると危惧されました。幸いなことに、手頃な代替化学物質という技術的な解決策があり、各国のリーダーたちも行動を起こしました（モントリオール議定書）。現在、このバウンダリーは 9 項目中で最も良い状態です。オゾン層は回復しつつあり、私たちは今でも空調設備や冷たい飲み物を手頃に享受できます。

個別製造業で作られる製品の中には、地球環境の他の問題を改善するのに役立つものもあります。以下に例を挙げます。

- » 精密農業では、高機能トラクター、播種機、ドローンなどを使用して過剰な施肥や農薬使用を防ぐことができます。これにより生物化学的循環が改善されます。
- » 水処理技術は、淡水をよりきれいに、より安全なものにします。



出典：Azote for Stockholm Resilience Centre, Stockholm University. Based on Richardson et al. 2023, Steffen et al. 2015, and Rockström et al. 2009.

図 2-1： 9つのプラネタリー・バウンダリー

こういった役立つ製品を有する企業は一目置かれる存在です。地球を癒す力が、市場でも高く評価されるでしょう。



注意

9つの地球のバウンダリーのうち、いくつかは私たちの製品によって損なわれています。その1例が、「新規化学物質」（マイクロプラスチックなどの有害物質）です。ほかの2つは、「気候変動」と「海洋酸性化」（どちらも温室効果ガス排出が原因）です。幸いなことに、「成層圏オゾン層の破壊」バウンダリーのように、現在では状況を改善するための技術的方法とビジネスに沿った手段がますます増えています。

脱炭素化

「脱炭素化」とは、温室効果ガス (GHG) の排出を削減する取り組みです。排出される GHG は主に二酸化炭素ですが、メタンなど、ほかの温室効果ガスも含まれます。

プラネタリーバウンダリーの 9 項目中で、「気候変動」の緊急性が最も高いと考える人が多いでしょう。個別製造業における GHG 排出は、主にバリューチェーン全体での化石燃料の燃焼によるものです。



注意

この問題の概略を図 2-2 に示します。森林の倒木など、生物圏にある物質を燃やした場合、新しい植物としてすぐにサイクルに戻ります。一方、化石燃料は何百万年もの間、地圏の深部に閉じ込められてきました。これらを燃焼させて地球の大気圏へ放った場合、燃やされた燃料が地圏のサイクルへ自然に戻ることはないため、炭素の不均衡が生じます。

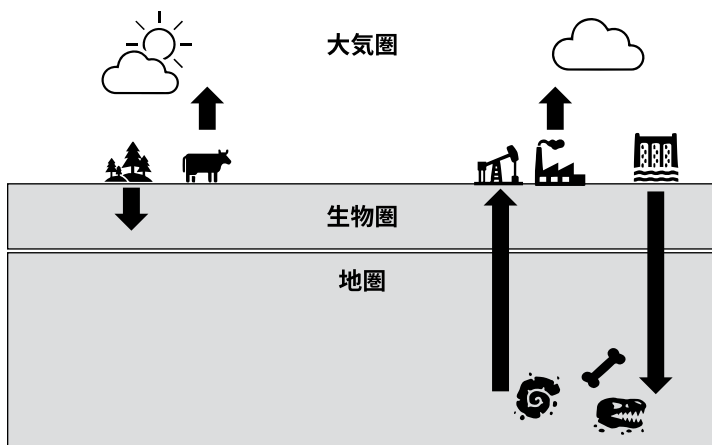


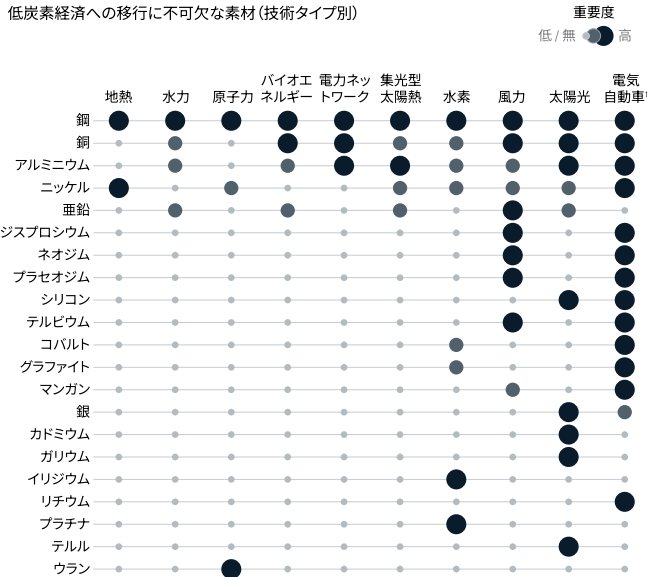
図 2-2： 炭素のサイクル

Climeworks 社や Charm Industrial 社などから提供されている炭素除去装置を使うと、炭素を地圏に戻すことができます。楽観的な見積もりでは、2030 年代から 2040 年代にかけて、このような炭素除去技術の普及によって現在の排出率のうち 10% を安価で地圏に戻せるようになると考えられています。炭素除去によってネットゼロを達成する場合、化石燃料の使用を完全に止める必要はありません。しかし、化石燃料の使用を大幅に削減し、よりクリーンな混合燃料にする必要があります（天然ガスの燃焼は石炭よりも 50% クリーンであり、各グレードの石油はその中間にあたります）。

有限資源の保護

個別製造業には、化石燃料の使用を減らして、有害物質を制御する責任があります。環境面と費用面を考慮し地圏に留める石炭、石油、ガスの割合を増やそうとするなら、今後数十年で大量の金属や鉱物を採掘して、エネルギーインフラを風力タービン、電池、ソーラーパネル、原子力発電所、スマートグリッドなどに置き換える必要があります。

McKinsey & Company による、エネルギー移行のための資源の相対的必要性を示した表を図 2-3 に示します。これらの資源は、家庭用電子機器、自動車、飛行機、家電製品、医療機器などの他製品でも必要とされています。



¹エネルギー貯蔵を含む。
出典: Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU, A foresight study, European Commission, Mar 9, 2020; The role of critical minerals in clean energy transitions, IEA, May 2021; McKinsey analysis

図 2-3： 経済的に重要な有限物質

図 2-3 の詳細については、PTC.com/beyond-the-book を参照してください。

米国、ヨーロッパ、日本、韓国などの産業経済圏は、自国だけではこれらの資源の多くを十分に入手できないという問題を抱えています。結果として、循環型経済は環境面での大きな利点になりうる一方、現在では重要資源を経済圏内で利用し続けるための国家安全保障上の指針として促進されています。



ポイント

先進工業国では循環型経済の必要性が高く、したがって維持もしやすいといえます。資源が不足すれば、生産ラインが止まってしまうからです。

諸問題に関する規制

個別製造が引き起こす環境問題を緩和するために、各種規制によって、有害物質の管理体制、脱炭素化、循環型経済に関するアクションが求められています。「規制」は、製品の計画や設計に組み込むべき市場条件です。

しかし、持続可能性に関する規制や基準は幅広いので、とまどうこともあるかもしれません。これらの対応は法務部門とコンプライアンス部門が管理しており、関与が必要な箇所は適宜指示されます。とは言え幸いなことに、ライフサイクル担当者にとって重要な規制は、製品ライフサイクルプログラムでよく登場する期待行動に絞り込まれます。表 2-1 を参照してください。

表 2-1 環境フットプリント削減推進のための規制

規制または指令	製品ライフサイクルとの関連性
企業持続可能性報告指令 (CSRD)	対象企業に環境への影響についての報告を義務付ける。EU の製造業とそのグローバルサプライチェーンが対象となる可能性がある（世界中のほぼすべての中規模および大規模の個別製造業が対象になると予想される）。
企業持続可能性デューデリジェンス指令 (CSDDD)	CSRD に関連。CSRD が「開示」を義務付けるのに対し、CSDDD は「行動」を要求する。監査できる方法で環境への悪影響を減らすことを企業に義務付ける。特に、脱炭素化と循環型経済に重点を置く。
化学物質の登録、評価、認可および制限に関する指令 (REACH)	あらゆる製品の有害物質管理。対象物質は広範囲にわたる（現時点で 241 物質、今後さらに増加する見込み）。
特定有害物質使用制限指令 (RoHS)	電気機器と電子機器の有害物質管理。10 物質にのみ適用される。
電気電子廃棄物指令 (WEEE)	循環型設計に関する指令。また、政府のリサイクルセンターでの電子廃棄物回収の資金とするために製造業者に税金を課す。



ポイント

規制の専門家になるようにする必要はありません。ライフサイクル担当者にとっては、製品の環境フットプリントを測定し継続的にその削減に努めることこそが、コンプライアンスへの貢献です。

環境製品宣言

持続可能性への期待から生まれたものの 1 つが、環境製品宣言 (EPD) です。EPD は、栄養成分表示のように、製品が環境に与える影響を示したものです図 2-4 は EPD の例であり、使用したエネルギー、炭素排出量、海洋酸性化、水質汚染、成層圏オゾン層破壊、地上オゾン汚染など、その製品が環境に与える影響を評価しています。

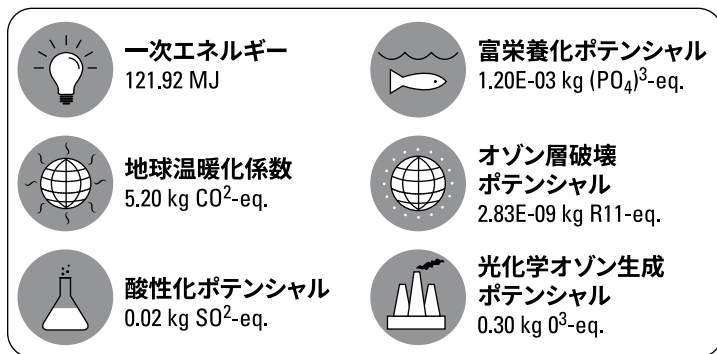


図 2-4: EPD の例

EPD は、より広範囲に及ぶライフサイクル評価 (LCA) から概要を抜き出したものです。EPD は賢明な消費者が購買の判断基準として利用されることもありますが、現在では企業間取引 (B2B) の使用がより一般的です。ただし、EPD が消費者向けの簡略形式で提示されるようになれば、この傾向も変わっていくでしょう。



ヒント

LCA も EPD も、部品表 (BOM) プログラムによって大幅に自動化できる場合があります。

有害物質に関する規制

REACH や RoHS などの有害物質規制は、同様のアプローチを採用しています。有害物質の使用をごくわずかな指定量以内にとどめることが最善です。指定量を超過する場合は、製造時、使用時、また使用済み製品の廃棄時に、取り扱う人にも環境にも有害でないことを証明しなければなりません。



PFAS（ペルフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物）には、次なる有害物質カテゴリとして同様の規制の対象が課せられると予想されていますが、本書の出版時点で一貫した規制はありません。耐熱性、耐油脂性、または耐水性をもつ製品がある場合、PFASの問題への対応が必要になるかもしれません。

脱炭素に関する規制

CSRD では GHG の測定が義務付けられており、CSDDD ではネットゼロに向けた排出量削減の科学的根拠に基づく目標 (SBT) が推進されています。当然のことながら、まずは改善対象となるものの測定が必要です。

GHG プロトコル

財務会計にドルなどの販売単位で取引を測定する規則 (GAAP など) があるのと同様に、GHG 算定では温暖化ガスの排出量を測定する独自のルールブック (測定単位は二酸化炭素トン、または MTCO_2e) が定められており、これを GHG プロトコルといいます。GHG 算定は「スコープ」と呼ばれるカテゴリで分けられており、各スコープが特定の企業行動を促すことを目的としています。ライフサイクル担当者に最も関連の高いものを次に示します。

- **スコープ 1 — 直接排出：** 所有または賃借するオフィス、工場、車両での燃料燃焼（サプライヤーによる燃料燃焼とは別）。メーカーには、工場での化石燃料燃焼を電気やその他の再生可能なエネルギー源に置き換えることが求められます。また、このスコープでは企業に対し、発送や派遣の回避と電気トラックへの転換による業務用トラックの GHG 排出量の削減も求めています。
- **スコープ 2 — 間接排出（発電）：** このスコープは、石炭、ガス、石油から生成される「ブラウン電力の使用」で構成されます。厳密には、購入した蒸気エネルギーもこのスコープに入ります。企業には、ブラウン電力を再生可能な発電方法によるグリーン電力の使用に置き換えることが求められます（注：原子力発電は低炭素発電として評価されていますが、再生可能エネルギーとは見なされません。しかし、スコープ 2 削減の選択肢ではありません）。
- **スコープ 3 — 間接排出（バリューチェーン）：** バリューチェーンで発生する排出量が対象です。これには上流工程（製品組み立て前）と下流工程（製品販売後）でのアクティビティが含まれます。スコープ 3 にはサブカテゴリがあり、製品に関して一般的に重要なものを以下に紹介します。

- **3.1 — 購入した商品とサービス：**このサブカテゴリの対象は、工場に搬入される物品のエンボディド・カーボンです。エンボディド・カーボンは、採掘、輸送、素材加工、下請け製造といった上流工程で発生する排出量を合わせたものを指します。企業には、炭素集約度が高いサプライヤーを選定し、使用材料を減らすことが求められます。
- **3.4 — 輸送と配送：**サプライチェーンでの出荷における GHG 排出が対象です。企業には、輸送における環境フットプリントを削減する選択（航空輸送ではなく陸上輸送、化石燃料ではなく再生可能燃料を使うなど）が求められます。また、このサブカテゴリでは、分散型製造と現地サプライチェーンの活用も求められます。
- **3.11 — 販売した製品の使用：**顧客が製品を動作させるための燃料消費、また非再生可能な発電による電力の使用が含まれます。このカテゴリでは、化石燃料を動力源とする製品を、再生可能なエネルギー源に置き換えること（主に電化）が企業に求められます。
- **3.12 — 販売した製品の廃棄：**使用済みの部品や製品の輸送、焼却、分解中に排出される炭素が対象です。企業には、循環性の向上（その結果、スコープ 3.1 の炭素効率の高い供給が促進される）が求められます。

会社から、全社における環境フットプリントの算定を求められることはありません。こうしたフットプリントには、社内での活動や出張なども含まれるためです。ただし、製品のカーボン環境フットプリント (PCF) の算定は求められるでしょう。GHG 算定の対象となる PCF は以下のとおりです。

- ≫ 製品のサプライヤーによる材料および部品のエンボディド・カーボン。工場への輸送を含む（スコープ 3.1 および 3.4）
- ≫ 自社工場における製品製造時に使用する非再生可能エネルギーによる GHG 排出量（スコープ 1 および 2）
- ≫ 製品が想定寿命を迎えるまでに、製品使用時に非再生可能エネルギーによって排出される GHG の予測排出量（スコープ 3.11）
- ≫ 使用済み製品の回収または廃棄時の予測排出量（スコープ 3.12）

保守等のサービスを目的とした人員の派遣、保守部品、業務上の輸送活動、および上流工程で使用する燃料も追加分野として範囲に含まれる可能性があります。環境フットプリントの数値は概して高くありません。

一見、管理が難しそうですが、ここで製品ライフサイクル管理 (PLM) システムが役に立ちます。BOM の内容が充実していれば、PCF を計算するためのデータを管理できます。炭素などの属性を対象として、材料、部品、構成レベルで集計します。

ネットゼロ達成への取り組み

科学的根拠に基づく手法を用いて PCF のネットゼロを目指すことも、脱炭素化で負うべき責任です。CSRD と CSDDD では、多くの企業にネットゼロ達成への取り組みと科学的根拠に基づく削減の監査を求めています。この活動は企業レベルですが、製造業における排出ガスの大部分は製品提供で生じるため、企業の製品ライフサイクル担当者には、大部分の削減を推し進めることが期待されています。

図 2-5 に、科学的根拠に基づくネットゼロ達成への道筋を示します。これには以下が含まれます。

- ▶▶ **ベースラインの測定：**これが企業の活動開始時の環境フットプリントとなります。この測定値を基準として今後の削減活動に取り組みます。
- ▶▶ **2030 年までの短期の取り組み：**2030 年までに、ベースラインのスコープ 1 および 2 を 42% 以上削減する必要があります。また、スコープ 3 のうち最も排出量が多い領域（通常はスコープ 3.1 のサプライチェーン）で排出量を 25% 以上削減する必要があります。
- ▶▶ **2050 年までのネットゼロの取り組み：**2050 年までに、実質排出量をベースラインの 90% 未満に削減する必要があります。排出量が残っている場合（最大 10%）は、監査に対応した炭素除去の購入を通じ、ネットゼロを達成する必要があります。

除去には実際の費用がかかりますが、公表したネットゼロ達成予定日までには実施する必要はありません。たとえば、貴社の取引先の材料サプライヤーが、2051 年になっても加工機に化石燃料を使用しているとします。貴社の注文した材料を用意するために、この機械から 1 MTCO₂e の炭素が排出される場合、スコープ 3.1 に 1 MTCO₂e が計上されます。この場合、貴社はたとえば Climeworks 社などに費用を支払うことで、市場価格（たとえば \$100）で 1 トンの CO₂ を恒久的に隔離してもらいます。これでネットゼロの取り組みは維持されますが、実質的には材料のコストが \$100 上乗せされることになります。

図 2-5 の詳細については、[PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book) を参照してください。

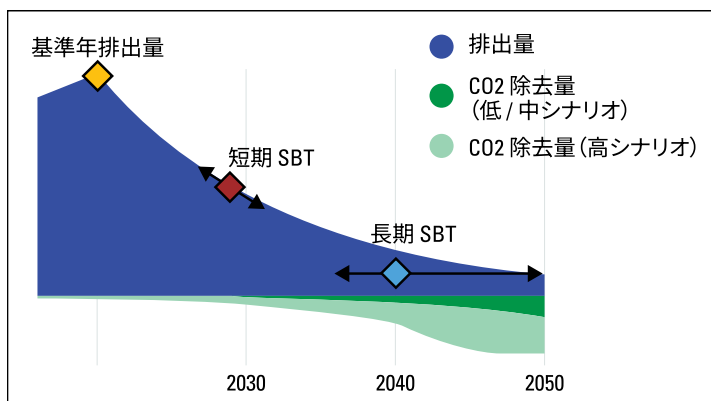


図 2-5： 脱炭素化の道筋

循環型経済に関する規制

「製品の循環型経済」には、修理、再使用、リファビッシュ、再製造、リサイクルによる廃棄物削減が関わってきます。現在、電子機器の基本的なリサイクルを推進している WEEE は、REACH や RoHS における、電子機器によく使用される有害物質の使用完了後の管理と深く関連しています。

これから 10 年の間に、バッテリーメーカーを対象としたデジタル製品パスポート (DPP) によって、一部のメーカーは製品材料の循環的回収の責任を負うことになります。使用済みの部品や製品も回収の対象になります。バッテリー以外の製品分野でも DPP が義務付けられる予定ですが、本書の出版時点では導入日は確定していません。

図 2-6 に示すとおり、DPP では製品が与える影響の概要と物質の流れを記録します。記載内容は、製品の含有物質、有害物質、二酸化炭素排出量、水使用量、循環性です。このデータは販売前に周知、公開されます。販売後のデータには、保守部品の取引や返品証明、使用済み製品や部品の転送証明や返品証明が含まれます。

DPP に関しては、販売前と販売後の両方のデータ追跡が具体的にどの製品でどれほど必要になるか未定の部分があり、まだ「近日公開予定」といったところです。初期段階で販売後の追跡が求められる可能性が高いのは、ロット単位を基準とする非耐久性製品よりも、シリアルナンバーで管理される高額アセットでしょう。

概要

製品シリアル番号：4040425A1

製品メーカー：Universal Exports

製品モデル：Lightning-A.1

二酸化炭素排出量：1.2 kg

水使用量：14.5 リットル

含有物質

アルミニウム 1.23 kg（リサイクル材料 60%）

ステンレススチール 0.29 kg（リサイクル材料 30%）

コバルト 0.003 kg（リサイクル材料 0%）

活動台帳

2024 年 11 月 18日：デンバーの施設にて製造

2024 年 11 月 19日：所有者 XYZ により受領

2025 年 1 月 23日：部品 123 を RMA 456 と交換

図 2-6： 簡略版 DPP の例

DPP への対応には、設計とサービスデータに関する強力な基盤が必要です。幸いなことに、コンプライアンス面にとどまらず、DPP はかなりの追加収益の機会にもつながります。その価値については、第 3 章では説明します。

- » 環境フットプリント削減で利益を出すテクニックの解説
- » 脱炭素化と循環型経済への注力

第 3 章

持続可能性とビジネス価値の整合

製

品の環境フットプリントの削減は、それが収益性をともなって初めて持続可能なものとなります。「環境にやさしい」ことを売り込むには、「ビジネスにおける優先事項である」ことと組み合わせない限り、反発のリスクを免れません。

幸いなことに、収益性の高い選択肢が豊富にあり、しかもそれらは新しい技術やスケールの拡大によってさらに増え続けています。以下に、金銭的価値を提供しながら、環境負荷の高い従来品に取って代わる製品の例をいくつか示します。

- » **コンシューマ製品：**LED 電球は白熱電球と同様の価格でありながら、持続性は 30 倍、エネルギーコスト節約効果は 7 倍あります。
- » **自動車：**電動ドライブトレインには 20 個ほどの可動部品が使用されていますが、内燃機関 (ICE) ドライブトレインの可動部品の数は約 2,000 個に上ります。充電は給油よりも 50 ~ 90% 安上がりです。電気自動車 (EV) の加速性能は、同等価格の ICE 車よりも 50% ほど優れています。
- » **産業：**実用規模で展開された太陽光発電所や風力発電所は、一般的に、新規の化石燃料発電所よりも経済的です。小規模であっても、オンサイトの太陽光発電は通常 5 ~ 7 年以内に損益分岐点に達します。

≫ **ハイテク**：ポケットサイズのスマートフォン 1 台で、従来の折りたたみ式携帯電話、GPS 機器、デジタルカメラ、MP3 プレーヤー、電卓、懐中電灯といった素材を多く使う複数の機器をまとめて、より安価かつ便利に多くのことがこなせます。

≫ **航空宇宙**：ギア付きターボファンなどの高度なエンジン技術、より軽量の複合材料の開発、空気力学の進歩により、燃料効率は 15 ～ 20% 向上しました。座席密度を 8% 高め、スケジュールを 10% 最適化することで、乗員 1 人当たりの効率は 30 ～ 40% 向上します。

この章では、脱炭素化と循環型経済を高めるさまざまな機会に焦点を当てます。有害物質の管理体制（第 2 章に記載）と比較すると、脱炭素化と循環型経済のアプローチは柔軟でありながら、規制と同様の成果の達成が見込めます。多くの場合、コンプライアンス上の価値があるだけでなく、収益性も兼ね備えたアプローチです。

脱炭素化の価値

炭素の排出には費用がかかるので、不必要な排出活動の削減は節約につながると考えられます。図 3-1 に、McKinsey 社によるこの説の検証結果を示します。この検証によれば、個別製造業は 2030 年までに利益を上げながら炭素排出量を 20 ～ 60% 削減できるとされています。多くの個別製造業が 50 ～ 60% 削減できる見込みです。

解析者視点で見た価値の整合

Forrester 社の Paul Miller 氏は、2024 年のレポートで、環境フットプリント削減がもたらすビジネスチャンスを次のように強調しています。「2021 年における世界全体のエネルギー消費量の 31%、再分配後の二酸化炭素排出量の 38% は、産業由来のものです。また、産業界は限りある天然資源も非常に多く消費しています。気候変動にどれほど懐疑的な経営幹部でも、エネルギーと原材料のコスト上昇と環境規制の強化を鑑みれば、消費と廃棄物の削減が健全な経営判断であると認識するでしょう」

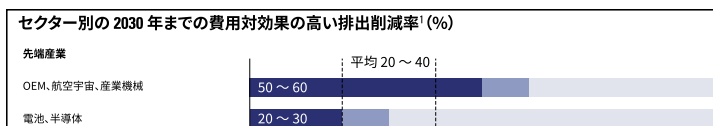


図 3-1： コスト効率と排出量削減の両立

図 3-1 の詳細については、[PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book) を参照してください。



技術情報

バッテリーや半導体は陳腐化が早いいため、古い部品の再利用によって新製品で発生する炭素を抑制するのは容易ではありません。しかし、CIMdata 社の Mark Reisig 氏によれば、炭素排出削減を目的としてエネルギー効率の高いハードウェア、リサイクル素材、サプライチェーンの最適化に投資したハイテク企業は、投資開始から 18 か月以内に 10 ~ 30% の投資利益率 (ROI) を得たとされています。

このセクションでは、製品ライフサイクル担当者として脱炭素化の機会を活かすためのアクションについて説明します。

部品設計における材料削減

コンピュータ支援設計 (CAD) ソフトウェアには、性能シミュレーションと組み合わせて反復されるジェネレーティブデザイン機能があり、指定の制約条件（ジオメトリ、熱、強度、製造プロセスなど）の範囲内で材料の使用を最適化できます。たとえば電動自転車用ステアリングステムの材料削減では、ジェネレーティブデザインにより、図 3-2 のような制約条件を満たす選択肢 3 種が提示されます。エンジニアは、コストなどほかの基準とのバランスを考慮していずれかの選択肢を採用します。通常、材料使用量が最も少ないのは積層方式ですが、除去加工方式よりもコストが高かったり、生産スループットが低下したりする場合があります。

この最適化アプローチを支持するベテランエンジニアたちは、新人でも、彼らが何十年の経験をもってしても思いつかなかったような効率的な部品を設計できると話しています。CAD は材料削減に役立ち、それに比例して材料サプライヤーからのエンボディッド・カーボン（スコープ 3.1）と材料コストの削減効果もあります。さらに、軽量化という利点もあります。自動車（スコープ 3.11）などの車両において、軽量化はエネルギー効率面で大きなメリットとなります。各種スコープについては、第 2 章を参照してください。



図 3-2： ジェネレーティブデザインによる部品材料削減の例

組み込みソフトウェアによる脱物質化

材料削減を突き詰めると、一部の機械部品をソフトウェアに置き換えることができます。この価値を理解していただけるよう、私の体験を紹介します。あるとき、所有する電気自動車がリコールになったと知らされました。パワーウィンドウの安全スイッチが確実に格納されないため、たとえば子供が窓を触っているときに指をけがするおそれがあるということです。「なんということだ。ディーラーの待合室で大音量のテレビドラマを数時間も眺めるはめになる」と私は思いました。しかし、通知をよく読んでみると、私の車の年式では、物理的なウィンドウセンサーの代わりにソフトウェアが使われていることがわかりました。自動車メーカーからリモートでソフトウェアアップデートが提供され、この問題を迅速かつ簡単に解決できるということです。

このようにウィンドウセンサーをソフトウェアに置き換えることで、メーカーは部品表 (BOM) の物理部品のコスト、重量、エンボディド・カーボンを節約するだけでなく、リコールにかかる技術者の作業や交換部品も廃止できました。さらに、ますます忠実な顧客として、何もしなくても直っていたという、前向きでシンプルな結果に満足しました。



このやり方を成功させるには、モジュール式の組み込みソフトウェアがモジュール式の機械設計を補完できるように、アプリケーションライフサイクル管理 (ALM) と製品ライフサイクル管理 (PLM) にまたがる製品設計にアプローチするシステムが必要です。このようなソフトウェアとハードウェアの融合には、先に述べたパワーウィンドウの例のように、安全上重要な機能の要件とテストの追跡も欠かせません。

サプライヤーデータと選定の改善

商品の材料や構成部品では、コストも環境フットプリントも大きく異なることがあります。また、リスクも多様です。設計エンジニア、特に BOM 管理者が材料とサプライチェーンのデータベースにアクセスできるようにすることで、初期段階の選定を改善できます。サプライヤーの提供条件が改善されると、低コストでの変更指示のチャンスを特定し、コスト、環境フットプリント、リスクも改善できます（商品サプライヤーの変更が性能や製造プロセスに影響を与えることはめったにありません）。

材料選定基準のバランス

いつでも安価に変更できる商品サプライヤーの選定とは異なり、部品材料の変更は、ジオメトリ、性能、ツーリング、その他に影響するので、相当な手間がかかります。

材料にはそれぞれ工学的性質があり、この性質は時間の経過で変化すること也不例外、サプライヤーごとの差ありません。たとえば、銅の熱膨張係数は常に 0.000017 です。もし管理する材料が少数で、このような不変の工学的性質のみに着目できるのなら、商品材料データベースを統合することなく作業できます。

ただし、持続可能性の観点で見ると、材料データには管理が必要な 3 つの変動的要素があります。

環境フットプリント、コスト、リスク属性

コストや炭素強度などの属性は頻繁に変化し、サプライヤーによっても異なります。材料データベースは通常、グローバル平均のコストと環境フットプリント属性に対応していますが、サプライヤー別ではありません。多くの場合、グローバル平均は、情報に基づきコスト、性能、環境フットプリントの基準のバランスを取って材料選定（アルミニウム対スチール、銅種 A 対銅種 B など）を行うのに十分な精度です。一般的に、サプライヤーの選定は、設計上の判断としてその後に行われます。

新しいリサイクル混合素材

スチールなどの一般的な素材には、再生素材の新たな配合と加工方法を用いたもの（リサイクルスチール 80% など）があります。配合や加工方法によって、コストや環境フットプリントに差が出るだけでなく、工学的性質も変化します。そのため、バージン材のスチールを再生材で代替するだけでは、強度、剛性、その他の性能特性を同一にできません。

新素材

AI が登場し、さらに中核的な材料科学への投資が増加しているおかげで、新素材がどんどん増えています。適切な材料を選定するには、材料データベースを CAD および PLM の意思決定者と連携させることが重要です。材料の選定は（コスト、性能、および環境フットプリントの点で）リスクの高い決定であり、設計の後半や製造後の材料変更にはかなりの費用がかかります。さらに、設計者は材料の使用箇所を追跡し、材料属性のアップデートで設計変更が保証されるタイミングを検出し、評価する必要があります。



Google の 2023 GNoME プロジェクトを読むと、新素材がどれほど速いペースで登場しているかがわかります。このプロジェクトでは 38 万種もの安定した新素材が発見されました。のプロジェクト以前に人類が発見していた素材は 4 万 8,000 種類に過ぎません。詳細については、本書のリソースページ (PTC.com/beyond-the-book) に掲載されているリンクを参照してください。

分散型製造

グローバル市場向けの大型で高価な製品には、多額の輸送費や通関費用のリスクがあります。たとえば、ある自動車メーカーが組立工場を世界共通で 1 カ所のみ展開し、ここから一元的に 2 トンの国際供給品を工場に出荷し、各工場から 2 トンの自動車を世界各地の顧客向けに出荷するとしましょう。この場合、かなりの通関手数料がかかり、輸送費が膨らむ可能性があります。今日では輸送費の大部分が化石燃料のコストであり、製品自体のコストにエンボディド・カーボン分も加わります。

今日の大手自動車メーカーは、一般的に分散型製造を採用し、現地サプライチェーンを持つ現地市場（米国、ドイツ、中国など）の近くに組立工場を配置しています。これにより、コストと環境フットプリントを削減できます。また、台風、関税、紛争などのサプライチェーンショックが発生した場合のリスクヘッジにもなります。



分散型製造の恩恵を得られるのは、自動車だけではなく。世界規模で大型製品や高価な製品を扱うのであれば、どのようなメーカーにも利点があります。ただし、工場の製品ラインやサプライチェーンごとのばらつきを管理する必要が生じます。このような複雑な問題には、モジュール設計と製造計画の組み合わせが役立ちます。循環型経済がもたらすチャンスを見据えると、当初の完全製造よりも再加工の方がシンプルであるならば、再製造によってさらに大きな流通が見込める可能性があります。

製造可能性のシミュレート

自社製造部品（「内製部品」ともいいます）では、コスト最適化と環境フットプリント削減が相関しているケースが多々あります。廃棄物を削減することで、材料のエンボディッド・カーボンとコストも削減できます。エネルギー効率が高まれば、光熱費（およびエネルギー源が 100% クリーンでない場合の環境フットプリント）も節約できます。

特定の製造プロセスについて、シミュレーションによってジオメトリ、制御特性、加工処理、その他の調整を推奨し、廃棄物とエネルギー使用を削減できます。さらにシミュレーションを活用すると、コストと環境フットプリントの削減につながる材料と製造プロセスの代替案も得られます。

また、製造可能性のシミュレーションにより、環境製品宣言書 (EPD) に盛り込む必要がある製品の環境フットプリントへの影響を予測できます。これにより、手動での解析作業を省略できます。

EPD の自動作成

製品カーボン環境フットプリント (PCF) レポートを含む EPD を手作業で作成すると、高額のコストがかかります。見積もりはさまざまですが、よくある価格帯は 10,000 ドルから 50,000 ドル超です。多くの製品バリエーションを提供するメーカーにとって、これは大きな支出を要するだけでなく、人員配置のボトルネックにもなります。新しい PCF/EPD 需要の波に対応できる環境エンジニアの数が限られているからです。



幸い、PCF データの大部分は高品質の PLM BOM 内に集約でき、さらに同じ BOM をライフサイクル評価 (LCA) ツールに送ることで、ほぼすべての EPD を自動化できます。持続可能性の観点から言えば、各種環境負荷を示すライフサイクルインベントリ (LCI) データが PLM BOM によって管理され、EPD に出力されるライフサイクル影響評価 (LCIA) が LCA ソフトウェアによって算出されます。この自動化の鍵となるのは、健全な PLM BOM です。健全な PLM BOM を作成するには、エンボディッド・カーボンや活動起因の環境フットプリントへの寄与に関する、含有材料、部品、サプライヤー、構成レベルの属性が含まれることが推奨されます。次に重要なのは、BOM ペイロードを受信し、算定を行い、環境への悪影響の結果を PLM に返せる LCA ツールです。

循環価値

循環型経済で重視する成果は、有限資源の保全です。循環型経済に関するグローバルな枠組みとして最も認知されているのは、Ellen MacArthur Foundation によるバタフライダイアグラムです。大変細かいため本書では再現できませんが、一見の価値があるのでぜひオンラインでご覧ください。詳細については、PTC.com/beyond-the-book を参照してください。

循環型経済には、（堆肥化と再生をとまなう）有機的な物質の流れと有限素材の流れがあります。個別製造業で取り扱うのは、ほとんどの場合、金属、鉱物、セラミックス、プラスチックなどの有限素材です。産業に取り入れられる生体材料は徐々に増え、特に使い捨て部品や摩耗の激しい部品については、再生可能な素材の安全な堆肥化も進められています。



ポイント

有限素材の循環で重要な点は、リサイクルは決して最善の結果ではないということです。修復、再使用、リファーマービッシュ、再製造のほうが望ましいため、リサイクルの前にこれらの可能性を検討することが推奨されます。これを経済学的な観点で捉えたものが、図 3-3 に示す循環型経済のバリューヒル（価値の丘）です。この図は、循環型経済とビジネス価値の整合を示しています。

製品のライフサイクルが線形である場合、原料の採掘、材料加工と下請け加工、最終組み立て、小売販売に向けた輸送、および顧客がいる場所への輸送が必要です。製品が壊れたり、顧客が製品を使わなくなったりした場合、製品を捨てることで 5 つの価値レベルすべてが破壊されます。修理、再使用、リファーマービッシュ、再製造、リサイクル（優先順）を通じて、より高い階層で製品価値を還元し、維持する方が好ましいのです。

常識と思われるかもしれませんが、ポイントは収益性であり、そのためには適切な設計意図とサービス実施が欠かせません。

バリューヒルの詳細については、PTC.com/beyond-the-book を参照してください。

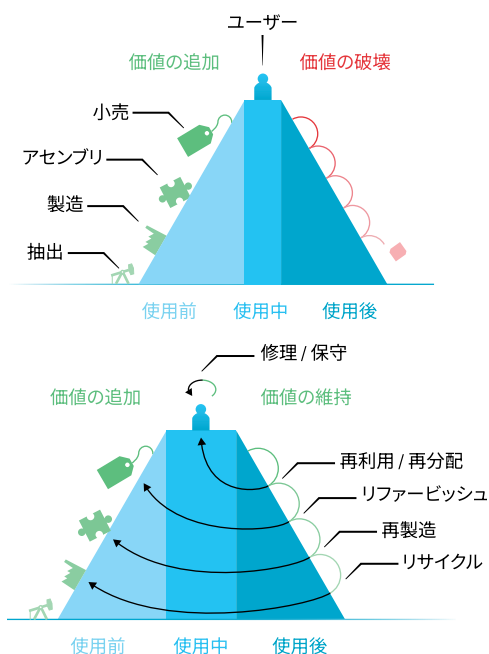


図 3-3： 循環型経済とビジネス価値の整合を示すバリューヒル



ポイント

モジュール設計

モジュール化によって、部品の再利用、リファーマビッシュ、再製造に対する需要と供給の両方が生じます。また、ユーザーに製品をより長く使用し、維持し、複数の製品世代間で循環させたいと思わせられる優れた設計を容易に生み出せます。

有名な玩具ブランドの中には、モジュール化のおかげで何十年にもわたって市場を席卷し続けている企業も複数存在します。私が子供の頃にずっと遊んでいたものを私の子供たちも喜んで使い、その子たちが将来自分の子供にも遊ばせたいから捨てないでくれと私に懇願した（そのため屋根裏部屋を占領することとなった）玩具が 2 種類あります。それは、レゴとプレイモービルです。どちらも、ユーザーの欲求の変化に応じて構成部品を再構成して新しい製品を生み出せる、極めて優れたモジュール設計です。海賊ブームが過ぎたなら、同じブロックを宇宙ステーションに作り変えることができます。消費者がレゴやプレイモービルを捨てることはめったにありません。

モジュール設計をいち早く採用した業界としては、自動車業界も挙げられます。現在ではどの自動車の **Web** サイトでも、モーター、カラー、ホイールサイズ、サンルーフ、フォグラмп、スポーツシート、10 インチスピーカーなどを選び、好みに合わせて車を構成できます。この仕組みには、顧客が希望するバリエーションを実現できるというメリットだけでなく、自動車メーカーが限られた種類の部品ですべての構成に対応し、保守部品ネットワークを効率化できるという効果もあります。自動車のモジュール化は、より幅広い購買者市場を獲得し、マージンの高いスペアパーツビジネスにつながっています。分解して回収可能な部品を別の用途に利用し、残りの個別の材料の多くを効率的にリサイクルできるように設計されているため、廃車になっても商業的価値があります。

モジュール設計でなければ、基本的なリサイクル以上の循環的価値を生み出して採算を取るのには困難です。ライフサイクル担当者にとっては、モジュール設計はソフトウェア、ハードウェア、エレクトロニクスの分野に広がり、それぞれでモジュールの相関があります。モジュール式バッテリーをさまざまな製品で動作させるためには、付随するモジュール式ソフトウェアが必要です。このようなモジュールシステムを管理するうえでは PLM の統合設計 BOM が効果的で、モジュール ALM ソフトウェアオブジェクトも有用です。モジュール化されたインテリジェンスを必要とする下流工程では、製造 BOM、サービス BOM、分解 BOM、および現場の作業への指示書などが派生します。

最終手段としての技術者派遣

バリューヒル（前述の「循環価値」セクションを参照）の頂上にとどまるためには、修理を前提とした製品設計が必要です。これにより製品が長もちするだけでなく、保守ビジネスによる成長やマージンも期待できます。

現在、すべてのメーカーが少なくとも基本的な保証を設けており、製品サービスシステム（保守契約、リース、成果主義契約など）の継続レベルも多数存在します。製造に付加されるサービスコストのリスクがますます高まるなか、利益向上の目標は、最小限のコストチャネルで顧客にサービスを提供することです。よくできたことに、表 3-1 に示す低コストのサービス提供オプションは環境フットプリント削減の目標と一致しています。



ポイント

すべてのレベルで、構成ごとの指示が不可欠です。モジュール設計では、連続したタスクで同じ製品を扱うことがめったにないため、現場の作業者の仕事は複雑になります。部品リスト、運用手順、サービス手順を正確な構成でフィルタリングすることで、時間と部品を節約できます。循環型経済を実現するには、これらのサービス手順が分解や部品や材料の返品にまで及んでいることが重要です。

表 3-1 サービス提供オプション

サービスチャネル	メーカーのコスト	環境フットプリント
セルフサービス	(小) なし、またはコンタクトセンター	ごくわずか
リモートでの修正	(中) 無線でのソフトウェアアップデート	ごくわずか
初回訪問での修正	(大) 技術者の派遣、部品	トラックの走行距離、部品のエンボディド・カーボン
複数回の訪問	(特大) 追加の派遣と部品	回数分のトラック走行距離、部品のエンボディド・カーボン

組み込みソフトウェアを活用することで、セルフサービスと技術者サービス（正確なアラートと通知）を促進できます。さらに、技術者が物理部品をリモートで変更するのは不可能であるため、リモートで修正を行う場合はこれが唯一の方法でもあります。

フィールドサービスの場合、アセット集中型のアプローチを採用すれば、予約ベースの派遣よりもはるかに最適化を進められます。アセット集中型のアプローチでは、担当者の派遣を行わずに済むように、まずスマートな製品機能を利用してセルフサービスまたはリモートサービスを試みます。派遣が必要な場合は、持参する部品をリモートでトリアージして調整し、必要と思われる修理に対応できるようにします（訪問回数を減らすため）。また、リアクティブな訪問と定期メンテナンスを同時に実施できるタイミングも計算します。



最終手段としての保守部品注文

部品は費用およびエンボディド・カーボンと切り離せないため、保守部品ネットワークには注意が必要です。たとえば、10 億ドル規模の耐久消費財メーカーであれば、サービスレベル目標を達成するために、数千万ドルから数億ドルの保守部品在庫を抱えているでしょう。

過去の需要から予測して多段階最適化（集中型倉庫からトラック在庫やその間の領域まで）を導入することで、サービスレベルを向上させながら、部品の在庫コストを大幅に削減できます。また、PLM データとスマートコネクテッド製品を使えば、コストと環境フットプリントの削減量は飛躍的に増加します。部品計画担当者が特定のアセットの場所、契約レベル、設定、および条件をしっかりと把握すればするほど、在庫と優先出荷コストを削減できるのです。

さらに、循環的モジュール部品の回収ループを追跡できます。たとえば、ブレーキディスクの回収と再製造を行っており、補充リードタイムが 10 日間である場合、10 日以内にディスクのニーズがないと予想されるのであれば、新しいディスクをサプライヤーから買わずに済みます。また、再使用、リファービッシュ、再製造の実施において、購買の回避によって節約した金銭と削減した環境フットプリントも測定できます。この循環価値は財務的に監査可能です。

環境フットプリントによる製品の差別化

市場セグメントによっては、割高であっても環境フットプリントの少ない製品が選ばれます。この収益差を「グリーンプレミアム」といいます。消費者を対象とした取引 (B2C) では環境意識の高い消費者、企業間取引 (B2B) ではネットゼロ達成に取り組む企業が二次市場に含まれます。ABI Research 社の Alex McQueen 氏は次のように指摘しています。「今日の消費者は持続可能性の高い製品に魅力を感じ続けており、購買の意思決定において持続可能性の高い製品属性をますます考慮するようになっていきます。今や LCA は、消費者の持続可能性への期待に応えようとする消費者企業にとって価値の高いツールです」



ヒント

そのうえ、政府が環境をより重視したアプローチや製品に助成金を支給することもあります。グリーンプレミアムと政府助成金を活用するとともに、これらの資金をビジネスケースに対する変動的な寄与要因として管理しましょう。

- » ライフサイクルの観点から見る DfS の価値
- » DfS に関する有益情報の取得
- » ライフサイクル担当者に合わせた DfS フレームワーク
- » 実社会での実施順序

第 4 章

持続可能性に配慮した設計の原則

この章では、環境や社会への影響を最小限に抑えて製品を作る「持続可能性に配慮した設計 (DfS)」の基礎について簡単に説明します。その後、この分野について解説し、個別製造業向けの DfS フレームワークの概要も紹介します。

ライフサイクルの観点から見る DfS の価値

製品の環境フットプリントの約 80% は設計段階で決まります。そのため、前段階で適切な決定を下すことに価値があります。後に行けば行くほど、材料、ファスナー、ジオメトリ、製造プロセス、ソフトウェア、サービス計画、ビジネスモデルなどの変更にかかるコストが上昇します。

エンジニアが DfS に関する知識を備え、要件システムを参照できる環境にあれば、設計初期段階でより適切な判断が可能になります。

有益な Dfs 情報の収集

現在のところ、個別製造業で製品設計の持続可能性を高めるための統合的な指針は存在していません（それが本書執筆の理由の 1 つです）。幸い Dfs は進化し続けており、資金が潤沢なトピックとなったため、有益な情報を得ることはできます。このセクションでは、とっておきの情報収集法を紹介します。

Dfs は ISO14000 ファミリーで扱われていますが、今のところは主に概要レベルでの取り扱いです。ISO14001（環境マネジメントシステム）の認証は広く普及しており、何千もの企業が導入しています。しかし、プログラムレベルでは優れているものの、個別製造業の製品に関する詳しい設計指針は提供されません。

製品の設計初期段階の指針としては、ライフサイクル設計戦略 (LiDS) の円形チャートが早見表として役立つでしょう。LiDS については、第 5 章で詳しく説明します。

インターネットで入手可能な設計指針のうち、詳しい構造が示されているものとしては「デザインフォーエックス (DfX)」フレームワークが挙げられます。DfX には、公開コンテンツと有償コンテンツの両方に多くの寄稿者が存在します。これに関連する領域の一部を表 4-1 に示します。

表 4-1 持続可能性に配慮した設計方法

DfX の手法	持続可能性に関連する目標
組み立て (DfA)	製造と修理を容易化
循環性 (DfC)	ビジネスモデルと人的要因の調整により、材料の回収を支援
分解 (DfD)	修理と使用終了時の返却を容易にし、製品の長寿化を促進
エネルギー効率 (DfEE)	製品使用時のエネルギーと消耗品を削減
ロジスティクス (DfL)	保守部品の購入、輸送コスト、環境フットプリントを制御
耐用年数 (DfLG)	摩耗しやすい部品としくにくい部品を管理して製品寿命を延ばし、廃棄物を削減
製造 (DfM)	廃棄物とエネルギーを削減
リサイクル (DfR)	材料の分離と価値の高い二次使用や繰り返し使用を実現
DfX の手法	持続可能性に関連する目標

DfX の手法	持続可能性に関連する目標
再製造とリファービッシュ (DfRM-DfRF)	耐久性のあるモジュールと部品について、製品ライフサイクルの繰り返しを実現
修理とメンテナンス (DfR-DfM)	製品の耐用年数を延長
再利用と転用 (DfRR)	二次使用 (例: 摩耗したタイヤをドックの係留用具に使用) を計画
持続可能性に配慮した行動 (DfSB)	エンドユーザーに対して責任ある製品の運用、廃棄、返却を奨励
使用 (DfU)	エネルギー使用量および消耗品と製品の寿命のバランスを確保

ISO14000 シリーズ、LiDS 円形チャート、DfX の研究分野のほか、推奨書籍、ブログ、グループ、リソースも PTC.com/beyond-the-book で紹介しています。

個別製造業向けの DfS フレームワーク

この DfS フレームワークは、製品ライフサイクル担当者向けに DfS の研究（前セクションを参照）の大部分を中位の成熟度マトリックスとしてまとめたものであり、3 つのレベルで構成されています。このセクションでは、これらの各レベルについて説明します。

図 4-1 に、これら 3 つのレベルとその関係を視覚的に示します。



ポイント

構成部品レベル

自社で設計する部品については、以下の環境フットプリントの削減に関する考慮事項を意識してください。

» **最適な材料を選択する：** 強度などの工学的属性に加えて、炭素強度、水強度、リサイクル「済み」材料含有率、リサイクル「可能」材料含有率、毒性、サプライヤーのコンプライアンス、コストなどの材料特性を考慮する必要があります。市販材料データベースを統合すると、材料選定に役立つだけでなく、社内承認済みの材料内での選定実施にも便利です。材料の種類が多すぎると、使用終了時におけるリサイクル目的での分離工程が複雑になる可能性があります。再製造サイクルでは問題ない場合もあります。

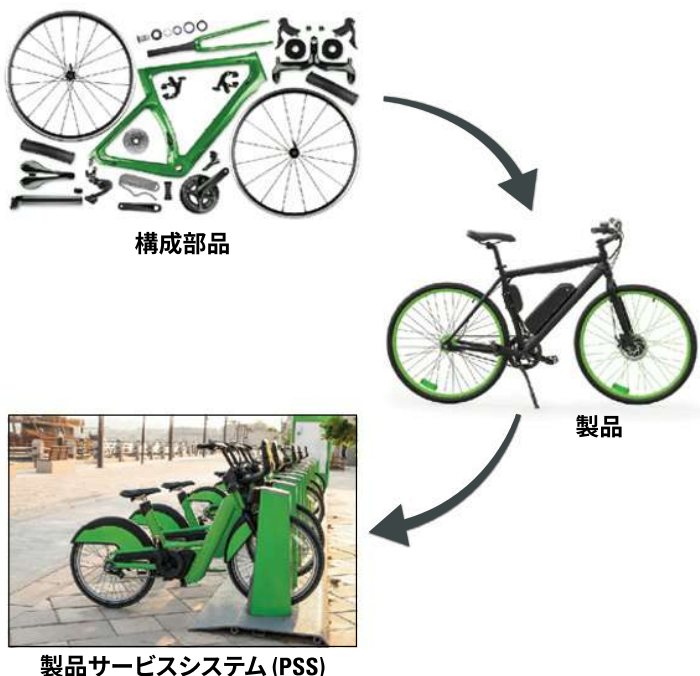


図 4-1： 個別製造業向けの Dfs 成熟度レベル

- 選定した材料の使用量をできるだけ減らす：性能、ジオメトリ、外観に関する制約の範囲内で、余分な材料の使用を削減します。そのためには、ジェネレーティブデザインと付加製造の2つのツールが役立ちます。
- 最適な製造プロセスを選択する：一見単純に思えますが、適切な評価を行うには、材料、ジオメトリ、制御特性の選択を再検討する必要があります。このような事態の予測と微調整には、製造可能性と見積りのシミュレーションが役立ちます。

このレベルにおいては、サプライチェーンデータ（材料データベース）およびシミュレーション（ジェネレーティブデザイン、性能、製造可能性）へのコールアウト機能を備えたコンピューター支援設計 (CAD) が、デジタル成熟度を最適化する拠点となります。

製品レベル

このレベルでは、特に「ゆりかごからゲートまで」、つまり材料の抽出と取得から製品の組み立てまでの製品ライフサイクルに焦点を当て、製品を最適化します。このレベルで最優先に考慮すべき事項は以下のとおりです。

- ▶▶ **ホットスポット分析：** 環境ホットスポット分析で、製品のライフサイクルにおいて持続可能性に最も大きな影響を与える活動を特定し測定します（測定単位は炭素当量、水使用量、毒性など）。製品レベルで解析を実施することで、削減の余地を基準として、環境フットプリントの削減活動の効果が大きい部品から優先的に取り組みを進められるというメリットがあります。
- ▶▶ **環境負荷の少ないサプライヤー：** 環境負荷の少ない材料や部品のサプライヤーを選択することで、スコープ 3.1 の排出量を削減できます。内製部品材料のサプライヤーの選択は一般的にソーシング部門が行うため、製品ライフサイクル管理 (PLM) では主に購入部品が対象です。評価対象となるフットプリント属性は材料の場合と同様ですが、サプライヤーの測定値は通常、材料レベルではなく部品レベルです。
- ▶▶ **分散型製造：** 世界規模の顧客市場を有する大型製品の場合、生産を現地化することで、コストとフットプリントを節約できます。しかし、生産を現地化すると、モジュール型製品、サイト固有のサプライチェーンや生産ラインなど、複雑な可変要素が生じる可能性があります。設計者と作業者の仕事を簡潔化するために、PLM の設計部品表 (BOM) から、サイトや構成ごとの製造 BOM、プロセス計画、作業指示書を作る場合があります。
- ▶▶ **効率的な運用：** 製品のエネルギー効率を向上させる方法には、軽量化、電化、熱調整などがあります。PLM の BOM で、CAD のジェネレーティブデザイン機能で実現できる軽量化の機会を特定します。その他のエネルギー効率分析は、通常、PLM ワークフローに統合されたシミュレーションで行います。

PLM にはライフサイクル評価 (LCA) およびサプライチェーンデータベースとの統合機能と CAD へのループ機能（構成部品レベルでの改善用）が備わっており、製品レベル DfS のデジタル成熟度を高める拠点となります。

製品サービスシステムレベル

製品サービスシステムは、顧客のニーズを満たすサービスと製品をまとめたものです。製品サービスシステムの範囲は、「ゆりかごからゆりかごまで」の循環型ライフサイクル全体に及びます。このレベルでは、製品とリスク共有ビジネスモデルの両方を含め、次の事項を考慮する必要があります。

- ▶▶ **当初の製品寿命の延長**：製品の寿命は、サービス費用やアセットの再販による利益と比べ、利用者にとっての価値が最も大きくなる長さとする必要があります。そのためには、故障モード影響解析 (FMEA)、保守部品ネットワーク、部品カタログ、サービス手順、技術者の対応体制を含むサービス計画が必要です。
- ▶▶ **EOL システムの最適化**：EOL（ライフサイクル終了時）を見据えて部品および製品を計画的に設計することで、「再利用、リファビッシュ、再製造、リサイクル」の優先度順に価値が保持されます。

企業で製品サービスシステムレベルの導入を進める場合、アプリケーションライフサイクル管理 (ALM)、サービスライフサイクル管理 (SLM)、モノのインターネット (IoT) が重要な追加要素となります。SLM にはサービスプロセスを推進する効果があり、無理なく拡張し資材返却のループを促進できます。ALM では、IoT 対応の組み込みソフトウェアによりサービス効率を高め資材回収を促進します。IoT コネクテッド製品では、ジオトラッキング、無線アップデート、リモートトリアージ、アラート、操作ガイダンス、返却の追跡などが可能です。

実社会における DfS 順序の管理

DfS フレームワークの順序は構成部品レベル、製品レベル、製品サービスシステムレベルとなっていますが、多くの企業は異なる順序で DfS を実行しています。たとえば、歴史の長い企業は、PLM の BOM を使用して製品レベルから始める傾向にあります。これらの企業は、新しい環境規制が登場すると、まずそれぞれ数百または数千の部品で構成された数多くの製品の環境フットプリントを測定する必要があります。次に、削減を進めるために、構成部品レベルのループに含まれる上位 X% (割合はニーズに合わせて選択) の部品を優先し、収益性のある環境フットプリント削減を実現できるようにします。

スタートアップ企業や既存製造業の新規プラットフォームでは、多くの場合、DfS は製品サービスシステムレベルから始まります。このレベルからなら白紙の状態で始められて障壁も少なく、成果は競合他社との差別化につながるからです。

- » ライフサイクル思考に関する指針の確認
- » 優先順位の整理
- » ライフサイクルデジタルスレッドの紹介
- » PLM の BOM とアセットハブの統合

第 5 章

フルライフサイクル思考による 環境フットプリントの管理

突

き詰めて言えば、循環型経済は個別製造業にとって救世主です。現在、この業界の循環率は平均で 10% 未満ですので、課題は盛りたくさんです。

同じ材料を繰り返し使う循環型経済は、資源に限りがあるという問題を直接的に解決します。また、サプライチェーンでの再処理によるエネルギーの浪費を防ぎ、材料を安全に使用し続けることができます。したがって、循環型経済は、別の共通課題である「脱炭素化」と「有害物質管理」の大部分の解決にもつながります。

材料の取得から製品組み立てまで（持続可能性の用語で「ゆりかごからゲートまで」）の製品フットプリントの最適化だけでは、もはや十分ではありません。ライフサイクル担当者は、運用、サービス、再利用、材料回収（いわゆる「ゆりかごからゆりかごまで」）を考慮して、製品やサービスの多世代にわたる価値を評価する必要があります。



顧客からの返却も含めたループを想定するのであれば、製品にサービスを付随させる必要があります。

この章では、ライフサイクル全体にわたる管理に役立つプロセスとデジタルフレームワークについて説明します。ポイントは、全面的な見直しではなく、現行のデジタル製品管理を拡張していく点にあります。持続可能性は、新たな付加価値の側面の 1 つにすぎません。

ライフサイクル思考の指針

設計の初期段階において、持続可能性について大まかに洞察し指針を立てると大きなメリットがあります。図 5-1 に示すライフサイクル設計戦略 (LiDS) の円形チャートを利用することで、ライフサイクル思考を効率的に導入できます。LiDS フレームワークは、設計者にとっての一般的なルールを時計回りのライフサイクルで示したもので、8 領域のそれぞれについて設計での採用度を測定します（中心から遠いほど採用度は高くなります）。各領域の推奨事項は明白なものに思えるかもしれませんが、設計の初期段階でシステムを総合的に検討することが重要なのです。

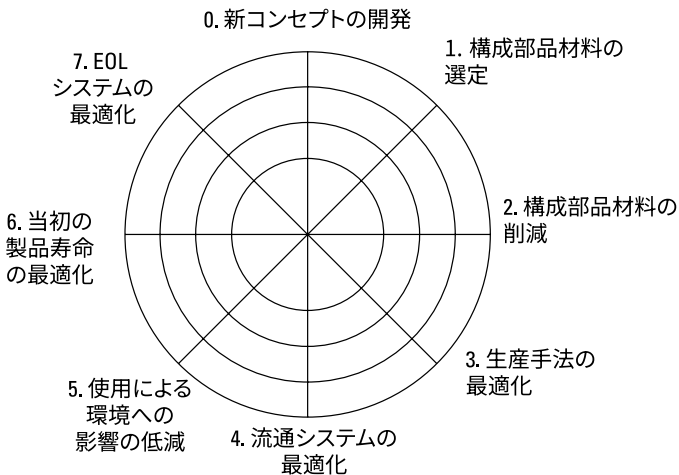


図 5-1: LiDS 円形チャート

LiDS 円形チャートの詳細については、PTC.com/beyond-the-book を参照してください。

このライフサイクル思考を習慣として定着させるために、持続可能性に配慮した設計 (DfS) の指針 (「正しいことをする」) を要件管理システムに直接組み込んでよいでしょう。これらの要件テンプレートを一般化し、そこから派生させて製品固有の要件を作ります。テスト、設計、およびシステム機能の要件を追跡することで、設計者が DfS のベストプラクティスを製品サービスシステムに組み込んでいくか検証します (「正しい方法で進める」)。

モデルベースのシステムエンジニアリング (MBSE) を採用している場合には、エンボディ・カーボン、水やエネルギーの使用量、重量 (モバイル製品の場合)、毒性などの定量化可能な環境フットプリント目標を、設計の初期段階でシステムモデルに組み込むことをおすすめします。これにより、設計チームのサブシステムターゲットを設定し、必要に応じてシステムレベルで実行または再調整できるようになります。その後、製品ライフサイクル管理 (PLM)、アプリケーションライフサイクル管理 (ALM)、電子コンピューター支援設計 (ECAD)、およびその他の支援システムで値を集約して、システム全体でフットプリント目標を達成しているか検証できます。

ライフサイクルインベントリの優先順位

図 5-2 は、製品ライフサイクルの担当者と持続可能性の担当者が相互理解を深めるためのものです。

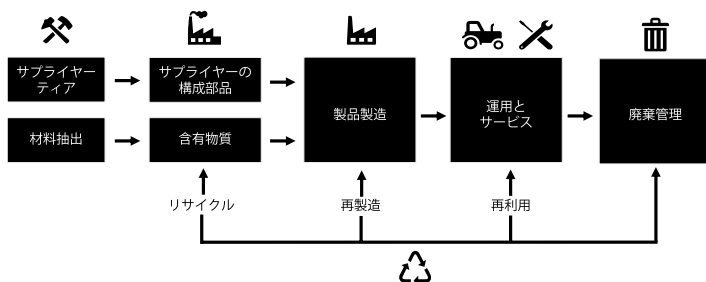


図 5-2: ライフサイクルインベントリ

製品ライフサイクル担当者の視点では、内製部品や購入部品は工場へ送られて製品コンフィギュレーションどおりに組み立てられ、その後、販売後サービスやライフサイクル終了の段階へと流れていきます。

持続可能性担当者の視点では、環境フットプリントを蓄積する活動のライフサイクルインベントリ (LCI) を示すダイアグラムがあり、最終的にライフサイクル評価 (LCA) ツールに送られて、製品のライフサイクル影響評価 (LCIA) の計算に用いられます。

このセクションでは、図 5-2 に示したライフサイクルを 4 つのカテゴリに分けて説明します。

運用フットプリント

図 5-2 のうち、まずは製造 (図 5-3) について分析しましょう。



製品製造

図 5-3: 運用のライフサイクルステージ：製造

運用フットプリントは、工場で発生するものと考えてください。直感的には、工場の環境フットプリントが最も大きく、優先順位も最も高いように思えるかもしれませんが。工場からは排気ガス、熱、金属くず、有害物質などの廃棄物が出るからです。しかし、実際には、工場由来の環境フットプリントは驚くほど小さく、以下の 2 つの理由からライフサイクル担当者にとっての優先順位も低くなっています。

- » 一般的に、工場由来の環境フットプリントは個別製造業の製品の環境フットプリント全体の 1 ~ 10% にすぎません。個別製造業は、鉱業や材料加工などの上流 / 下流工程の活動と比較すると少ないエネルギーで済む加工や組み立ての工程が大半を占めます。
- » 脱炭素化のために工場を進めるべき優先事項の 1 つは、生産機械の電化です (資本購入部門の担当)。さらに、工場の電力調達のクリーン化も挙げられます (財務部門の担当であり、太陽光発電や仮想電力購入契約 (VPPA) などの投資方法を使用)。注記：産業用加熱においては、再生可能な方法で生成できる水素を天然ガスの代わりに使うことも、機械設備面での一般的な取り組みの 1 つです。通常は天然ガスを燃焼し、水素を利用できるときは水素に切り替えられるデュアルバーナーも導入が進められています。

ただし、製品ライフサイクル担当者は廃棄物とエネルギー使用の削減のため、工場の環境フットプリントにまつわる活動に着目し、主に製造可能性を考慮した設計に留意すべきです。これには、加工だけでなく、現場作業者に対する構成ごとの指示も含まれます。サプライチェーンの距離を縮めるため、分散型製造を設計上の優先事項とすることも推奨されます。

上流工程での環境フットプリント

次に取り上げるのは、図 5-2 の最初の 2 項目にあたる上流工程の環境フットプリントステージ（図 5-4）です。

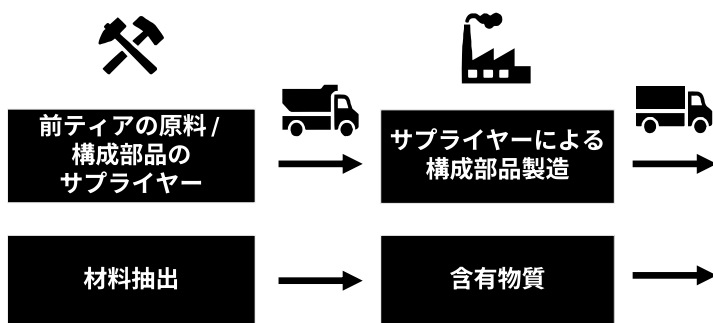


図 5-4： 上流工程の環境フットプリントステージ

ほとんどの個別製造業では、工場に納品される材料と部品が製品の環境フットプリントの 75 ～ 90% を占めています。構成部品である鋼棒を例として考えてみましょう。まず鉄鉱石が遠隔地で採掘され、重い塊の状態でトラックに載せられて遠く離れた製鋼所まで運ばれ、鋼棒に加工されて、再び遠くの工場までトラックで運ばれます。この工程で大量のエネルギーが消費され、しかも今日の経済ではそのほとんどが化石燃料です。さて、工場ではこの鋼棒を、所定の形状に曲げてアセンブリにねじ込みます。この工程で消費されるエネルギーは前工程に比べれば少量です。

上流工程の環境フットプリントの要因は、重金属や構成部品だけではありません。一見無害な軽量の電子機器の方が、実ははるかにフットプリントが大きいこともあります。たとえばノートパソコンの場合、大きく重いケースやバッテリーよりもプロセッサの方が、炭素強度や廃棄強度が高い可能性があります。電子機器にはレアアースが使われていますが、レアアースの選鉱は採掘した原鉱のうち重量比で通常わずか 5 ～ 10% ほどしかありません。そして、その選鉱に含まれるレアアースの 50 ～ 70% を抽出するためにさらなる処理が必要です。

企業の持続可能性担当者が注目するのは、上流工程のスコープ 3.1「購入した商品とサービス」でしょう。このスコープは製品の環境フットプリントへの影響が大きいだけでなく、規制によって削減を義務付けられる可能性があり、一般的な科学的根拠に基づく方法では 2030 年までに少なくとも 25% の削減が期待されています。製品ライフサイクル担当者の観点では、フットプリント削減に取り組むべき領域の 1 位または 2 位は上流工程になるでしょう。この領域については、ほとんどの場合、企業の持続可能性担当者からも最も迅速な対応が求められます。

下流工程での環境フットプリント

図 5-2 から 3 番目に取り上げるのは、下流工程のライフサイクルステージです。これは線形プロセスであり、同図では最後の 2 つの項目にあたります（図 5-5）。

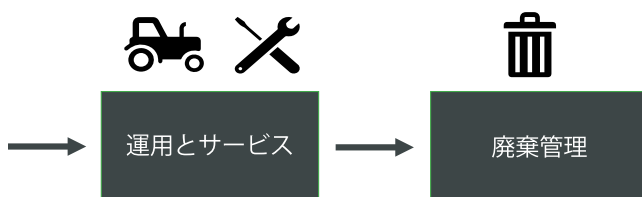


図 5-5： 下流工程のライフサイクルステージ（線形プロセス）

下流工程（販売後）が環境に与える影響も、メーカーの責任です。これには、製品の動作時のエネルギー、サービス、廃棄物による環境フットプリントが含まれます。大量の電力を要する製品を製造しているメーカーの場合、スコープ 3.11「販売した製品の顧客による使用」フットプリントが大きくなる可能性があり、上流工程でのフットプリントを超える場合もあります（現在、自動車メーカーや機械メーカーでは一般的に総フットプリントの 95% を超えます）。燃料源によっては、積極的な対策が求められるでしょう。

現在の製品の燃料源が電気であるか、再生利用の進んでいるエネルギー源であれば、取り組みは順調に進められます。石炭やガスで発電する電力システムを顧客が利用していると、スコープ 3.11 のフットプリントが大きい可能性がありますが、こうした電力システムも 2050 年までには十分にクリーンになるはずで、電力システムのクリーンエネルギー化のおかげで、自然とスコープ 3.11 の排出量を減らせるでしょう。



注意

しかし、化石燃料を使う製品を製造している場合、再生可能なエネルギー源に切り替えない限り、ネットゼロは達成できないでしょう。化石燃料の効率を向上できる機会は限られているからです。したがって、電化を進めるか、水素ガス技術のような別の再生可能な電力源に移行することが目標になります。長距離輸送が前提となる航空宇宙などの少数の分野を除いては、化石燃料に置き換わる技術の拡大展開が始まっています。

サービス集約的な製品では、トラックでの発送、保守部品、消耗品、部品の輸送（特に、標準的な地上輸送よりも迅速な航空輸送を優先する場合）なども、環境フットプリントに大きく影響します。ただし、これらが占めるフットプリントの割合は、上流工程には遠く及びません。注記：上流工程には保守部品在庫のエンボディ・カーボンも含まれるため、この大規模な維持費を可能な範囲で削減しましょう。

循環性

最後に分析するのは、図 5-2 の複数のセクションを組み合わせた下流工程の循環ライフサイクルステージ（図 5-6）です。

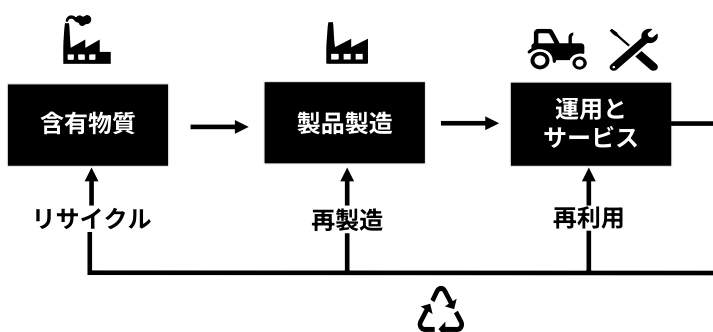


図 5-6： 下流工程のライフサイクルステージ（循環プロセス）



ポイント

環境フットプリント削減活動の中心は上流工程になりがちですが、収益を上げながら削減目標を達成する唯一の方法は、循環性を高めることです。再びノートパソコンを例に挙げて説明します。以下の理由から、ノートパソコンを再製造し、新品同様の機能と新品同様の保証を付けることができれば、新規原料で製造したノートパソコンよりも二酸化炭素効率を 90% 高められます。

➤ **再利用：** ノートパソコンのアルミ製ケースは、初回生産時に多量のエネルギーを要しました。しかし、ケースには耐久性があり、そのデザインは流行に左右されません。おそらく、新作のケースも 5 年前の製品とあまり変わらないでしょう。そのため、ケースはそのまま再利用できます。つまり、ボーキサイトの採掘をやり直したり、アルミニウムを再加工したり、ノートパソコンのケースに変形させる必要はありません。

» **再製造**：ノートパソコンのキーボードは、後5年間はほぼ問題なく使えるでしょう。「Q」のキーはあまり使われていませんが、母音のキーは摩耗しているため、一部キーの再製造は必要です。場合によっては、ばねの交換も必要でしょう。プラスチックの採掘、材料加工、成形を再度行う必要はありません。軽微な調整のみでキーボードを修復し、新品同様の状態で動作させられます。

» **リサイクル**：マザーボードの速度は、もはや他製品に勝てません。最善策は、マザーボードを細断して材料を分離し、新品を製造することです。これにより、レアアースの再採掘で環境に大きな負荷がかかる事態を回避できます。

上記の再利用、再製造、リサイクルという3工程を合わせると、レアアースの保護や有害な電子廃棄物のリスク回避という利点があるのはもちろんですが、ノートパソコンの再製造で90%の炭素効率を達成できます。他の分野でも再製造はフットプリント削減に効果的で、私が関わったメーカーの事例では炭素効率の幅は60～95%に達していました。

ライフサイクルデジタルスレッド

ライフサイクル思考の原則を学んだからといって、それをすぐに大規模で実践できるかという別問題です。この思考を成功させるには、強力なデジタルバックボーンが必要です。製品デジタルスレッドには接続された2つのハブがあり、それぞれが新しい規制や義務に適合しています（このことがハブ実現の資金調達に役立ちます）。

図5-7に、設計システム内の製品データと設計レシピ（「構成仕様」ともいいます）との関連を示します。運用システム内の製品データは、アセットのシリアル番号に関連付けられています。

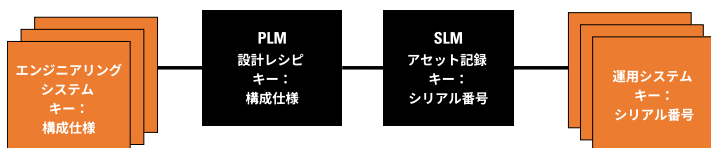


図5-7: ライフサイクルデジタルスレッド

エンジニアリングハブ

1 つ目のハブは、PLM システムのモジュール BOM です。図 5-8 は、この構造におけるフットプリントデータ（またはライフサイクルインベントリ）の位置付けを示しています。材料データベースは CAD を介して材料レベルで PLM にリンクしており、生産活動による環境フットプリントを「内製部品」レベルで集約します。サプライヤー構成部品データベースは「購入部品」レベルでリンクしています。構成部品レベルでは、PLM の BOM 関連のサブルーチンを LCA ツールに連携させ、設計段階での環境への影響をシミュレートし、設計完了時に EPD を出力します。

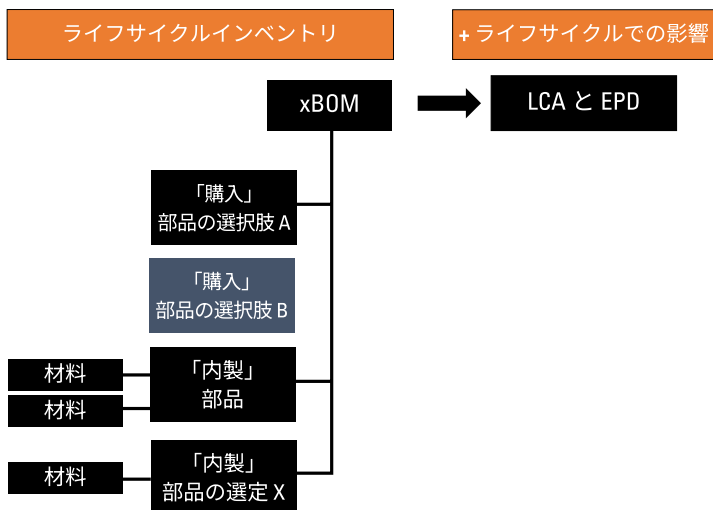


図 5-8: モジュール BOM で製品のライフサイクルインベントリを集約



ヒント

設計データの場合、持続可能性の観点から重視されるのは、モジュール性、サプライチェーンの統合、新しいシミュレーションの 3 領域です。エンジニアリングの観点から見ると、LCA は「環境シミュレーション」です。

ALM と BOM の統合には、モジュール BOM でのフットプリントの集約に加えて、2 とおりの方法があります。図 5-9 にこの統合方法を示します。1 つ目の方法では、モジュール式ソフトウェア部品を統合 BOM にリンクし、物理的部品を補完します。2 つ目の方法では、ALM の管理対象要件を ALM テストと PLM 設計オブジェクトの両方から追跡し、持続可能性の要件が満たされテストでカバーされていることを確認します。

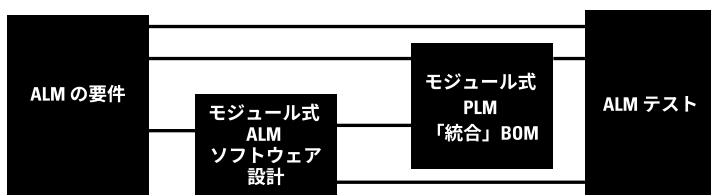


図 5-9 : ALM 統合の詳細

アセットハブ

2 つ目のハブは、図 5-10 に示す物理アセットの SoR（記録のためのシステム）です。アセットの作成時には、まず PLM から該当の BOM レシビをコピーします（該当する場合は、生産オーダーの詳細情報で補完します）。

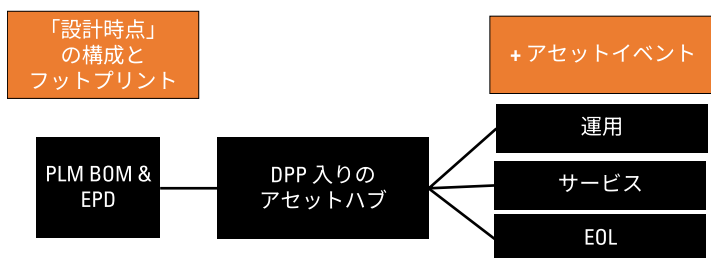


図 5-10 : デジタル製品パスポート (DPP) はアセットハブのサブセット

次にアセットハブは、所有者、サービスプロバイダー、設計者、保証の裁定担当者、その他の役職が活用できる各種アクティビティの台帳を管理します。デジタル製品パスポート (DPP) ワークフローでは、この台帳の一部に場所、所有情報、返品情報が含まれ、使用済みの材料や部品（最終的には廃棄製品）の循環的回収の証明になります。



技術情報

持続可能性の観点から見ると、アセットデータに関するサプライチェーンとアフターセールスの統合要件はほかにも数多くあります。幸いなことに、賢明な業界のリーダーたちが協力し合い、交換規格の策定を進めています。Industrial Digital Twin Association (IDTA) により、企業間および企業内のアセットデータ交換に用いる一連のアセット管理シェル (AAS) サービスが開発されました。IDTA のマネージングディレクターである Meik Billmann 氏は、「AAS によってアセット情報が標準化され、アセットのライフサイクル全体で使用できるようになります」と述べています。

この連携により、AAS は循環型ビジネスモデルの理想的な基盤となります。

PLM の BOM とアセットハブの統合

持続可能性に関する規制、特に DPP を支持する規制により、ライフサイクル全体のデータバックボーン関連の機能が義務化されつつあります。以下に、このバックボーンを活用できる 4 つの分野を紹介します。あまり目立たないものの、相当な利益増加とフットプリント削減が期待できる分野です。

構成固有の作業指示書

製品アセンブリライン、検査場、運用拠点、メンテナンス施設、フィールドサービス用トラック、再製造施設に従事する現場作業員には、構成固有の最新の作業指示書が必要です。（収益をともなう循環に必要な）モジュール設計では、製品を目にするたびに以前と変わっていることも珍しくありません。

都合の良いことに、アセットハブに作業対象機器の構成パラメータが保存されるので、PLM でこれを使用して指示書や部品リストを絞り込むことができます。デジタルスレッドを導入することで、可変要素がもたらす複雑性を解消し、現場の作業者の負担を軽減できます。

循環型経済の実現にはデジタルテクノロジーの成熟が必要

IDC 社でグローバルサステナビリティ研究・実践責任者を務める Bjoern Stengel 氏は次のように語っています。「持続可能性担当者は、自社業務やサプライチェーンにおける循環性の管理に役立つソフトウェアがないことを、循環性をビジネスに導入するための業務上の最大課題と捉えています。循環型経済の原則に基づく持続可能なビジネスモデルに IT を活用したアプローチで取り組むには、業界やビジネスに固有のニーズを理解しているプロバイダーとの協力が非常に重要です」

機器ベースでの予測

保守部品を販売している企業には、衝撃的な数字が 2 つあります。第 1 の数字は保守部品の収益性です。多くの場合、これは元の製品売上の利ざやの 4 ～ 5 倍に相当します。第 2 の数字は保有在庫の規模です。10 億ドル規模のメーカーの場合、世界各地の倉庫の棚やトラックに、数千万ドルから数億ドルの部品が保管されていることも珍しくありません（そして、その各部品に大量のエンボディド・カーボンが含まれています）。

そのため、保守部品を最適化するソフトウェアを導入することで、適切な数量の部品を適切な場所に保管し、サービスレベル目標の達成に近づけます。このようなソフトウェアは、少なくとも過去のデータを利用して将来のニーズを予測する機能を備えています。耐久性、製品構成、アセットの場所や状態などの部品属性も理解できる機能も備えたソフトウェアなら、さらに数百万ドル分の在庫を減らし、エンボディド・カーボンの削減も実現できます。

データ主導型の設計とサービス

エンジニアリングのリーダーや解析担当者は、何十年もの間、データ主導型の設計について議論を重ねてきました。理想は、製品設計者が現場のアセットから確かなデータを途切れることなく得られる状態です。このデータを利用すれば、オーバーエンジニアリングやアンダーエンジニアリングの問題に迅速に対応し、サービスでカスタマイズ製品の展開を広げることができます。

とても魅力的ですが、メーカーが確実なフィールドデータを取得するのは容易ではないため、このような設計は机上の空論となりがちでした。しかし、デジタル製品パスポートの導入が進めば、アセットハブで製品ライフサイクルデータを迅速に収集し、社内でも活用できるようになります。

上昇する AI の価値

昨今、AI は注目の的です。AI と持続可能性はどのような関係にあるのでしょうか。その答えは簡潔で、しかも説得力があります。持続可能性は、AI によるインサイト生成に必要な豊富な製品データを取得するための触媒なのです。EPD と DPP には、ライフサイクル全体にわたって関連付けられた体系的で詳細なデータが必要です。このデータを使って AI ができることは数多くあり、その可能性は環境フットプリントの削減に留まりません。

- » 循環性の追求
- » DPP 導入を見据えた対応
- » CFO を納得させる方法
- » デジタルスレッドの確立

第 6 章

ライフサイクル管理で収益とフットプリント削減を両立する 10 のヒント

製品の持続可能性は奥深いトピックですが、知名度が高まり投資が増えるにともない、ますます難解なものになっています。この章では、収益とフットプリント削減の両立に役立つ 10 のヒントを紹介します。この章から読み始めれば本書の概要を把握でき、この章を最後に読めば重要ポイントの確認になります。

フルライフサイクル思考

個別製造業の場合、一般的に、工場での業務が製品フットプリントに占める割合はわずか 1 ～ 10% です。残りの 90 ～ 99% は、上流工程と下流工程のライフサイクルステージで発生します。

- » 「上流工程」では、材料の選定と使用、サプライヤーの構成部品の選択にさらなる注意が必要です。優れたデータと意思決定ツールを導入することで、サプライチェーンのコスト、回復力、環境フットプリントを改善できます。

» 「下流工程」では、モジュールシステム、部品回収、電化、ソフトウェア制御型サービスなど、材料とエネルギーの循環を実現するプログラムが必要です。下流工程での循環性は、上流工程の価値を高めるうえで意外に重要な要素です。これは、循環性の向上によって部品の再利用、再製造、リサイクルが効率化されるためです。

このようなライフサイクル思考の詳細については、第 5 章を参照してください。

循環性のためにハードウェアとソフトウェアをモジュール化する

収益性のある循環を実現するには、モジュール化が欠かせません。モジュール化は、再製造部品の需要と供給の両方を備える唯一の方法です。現代の製品では、ソフトウェアとハードウェアの両方のモジュール化が必要です。たとえば、製品 A から再製造した制御ユニットは、ソフトウェアアップデートを調整しない限り製品 B に再展開できません。またソフトウェアは、持続可能性の高いユーザー行動、機器の保守サービス、返却の追跡にも役立ちます。

現場の作業者に配慮する

循環型の製品にはモジュール化が必要ですが、モジュール化によって可変要素も増えます。可変要素のおかげで購入者の選択肢が増えるので営業には役立ちますが、適切に管理しないと現場作業の複雑度が増してしまうことになります。モジュール設計の際には、現場の作業者を必ず考慮に入れましょう。

現場の作業員にとって、モジュール型製品は、アセンブリライン、検査場、顧客施設のそれぞれで見た目が異なるものです。したがって、作業者に配慮し、可変要素がもたらす複雑性をデジタルの力で排除しましょう。



ヒント

そのためには、製品ライフサイクル管理 (PLM) のコンフィギュレーションロジックを活用して、作業者が組み立てやサービスを行う製品ごとに作業指示を絞り込めるようにすると役立ちます。

BOM を充実させ、機能として EPD を実現する

環境製品宣言 (EPD) は、驚くほど複雑な製品エコラベルのようです。環境問題に精通していて、企業で販売するすべての製品の EPD を手動で計算できる人材を見つけ、資金を提供することなど不可能といっていでしょう。

しかし、部品表 (BOM) 管理がしっかりしていれば、EPD 作成作業のほとんど、またはすべてを自動化できます。持続可能性の観点からは、炭素強度、水強度、有害物質関連のコンプライアンスフラグ、リサイクル率、リサイクル性などの属性から、製品のライフサイクルインベントリ (LCI) を BOM に集約できます。LCI の情報をライフサイクル評価 (LCA) ツールに取り込むと、EPD のライフサイクル影響評価 (LCIA) を計算し、その結果を基に製品の CO₂ 排出量といった環境への具体的な影響を計算できます。



ポイント

アルファベットの略語が並んでわかりにくいかもしれないので格言風に短くまとめる、「豊かな BOM は、EPD 自動化の実を結ぶ」ということです。EPD の詳細については第 2 章を参照してください。

DPP のメリットを考慮する

悲観的な見方をすると、デジタル製品パスポート (DPP) は、ただでさえ広い生産者責任の範囲を材料回収にまで拡大するものです。しかし、楽観的な見方をすると、DPP は金のなる木です。下流工程のサービスプログラムでは、DPP により製品販売後の顧客との関係を深められます。これにより、利ざやの高いサービス、新たなビジネスモデル、循環型回収の価値、以後の販売における顧客ロイヤリティが促進されます。上流のエンジニアリングプログラムでは、サプライヤーの DPP は、相互に関連付けられた構成部品と材料のデータを豊富に提供し、部品や材料の選定や BOM の充実化に役立ちます。



ポイント

製品データのバックボーンの観点から見ると、パスポートはアセットの SoR (記録のためのシステム) を拡張する強制機能を提供します。サービスライフサイクル管理 (SLM) と PLM を連携させることで、データ主導型の設計と、構成を意識した現場の意思決定支援につながります。データ連携の詳細については、第 5 章を参照してください。

CFO に喜ばれるフットプリント削減活動から始める

まず、環境フットプリントの削減が収益につながるという評価を得ましょう。持続可能性に関する目標とは無関係な理由で活動するべきです。ビジネスの観点から見て好ましく、「そのうえ」環境にも良い活動が存在します。最高財務責任者（CFO）を確実に喜ばせるのは、コストの削減です。一般的に、製品やサービスから不要な材料やエネルギーを省けばコストを節約できます。フットプリント削減によってビジネス価値を高める手段には、ほかにもグリーンプレミアムに基づく顧客セグメンテーション、コンプライアンスとサプライチェーンのリスク低減、地域助成金の活用などがあります。



技術情報

さまざまなアナリストやアドバイザーが、今日では経済的に有益な手法でフットプリントの半分以上を削減できると認めています。2020年代は収益性の高い持続可能性プロジェクトで成功を収め、新たなアプローチが拡大する2030年代に次なる高みへと進みましょう。詳細については、第3章を参照してください。

自社ブランドの重要分野で先行者を目指す

持続可能性の分野では、商業規模でアプローチが確立されるまで待ってから導入するよりも、先行者となる方がコストが高い可能性があります。しかし、いち早く行動することで、自社ブランドと親和性が高い分野で優位に立つことができます。

持続可能性関連の対策について十分に準備したうえで、場面に応じて大胆になることも大切です。現時点で、参考となるベンチマークが数多く公開されています。たとえば、ドキュメンタリー映画『Beyond Zero』は Interface 社のモジュール化事例を描いており、ケーススタディに最適です（詳細は beyondzerofilm.com を参照してください）。パタゴニア、シュナイダーエレクトリック、イケア、ベスタスなど、有名ブランドの持続可能性レポートも、ビジネスとの整合を図る参考になります。

イノベーションの分野は多岐にわたりますが、以下に一例を示します。

» 「グリーンプレミアム」の顧客セグメントに向けた最先端の素材やエネルギーの調達

- ▶▶ 付加製造による軽量化や保守部品の回復力向上の実現
- ▶▶ リース型またはアップグレード可能な商用プログラムを搭載した多世代循環型プラットフォーム

脱炭素化の価値を直感的に理解する

脱炭素化を進めるにあたって、貴社に最適なチャンスを感じ取りましょう。根本的に言えば、人類には地圏の炭素を地圏深部にとどめておく（そして取り出したら同じ量を戻す）ことが求められます。これは、個別製造業にとっては、ライフサイクルのバリューチェーン全体で化石由来のエネルギーを削減することです。

しかし、長期的に（2050 年以降も）化石燃料の燃焼が必要な場合はどうすればよいのでしょうか。その場合は化石燃料を利用したうえで、直接空気回収技術（DAC）などの手段で同等の炭素量を地圏に注入するのにかかる将来のコストをモデル化しましょう（炭素循環の詳細については第 2 章を参照してください）。

化石燃料削減の現在および将来的な価値を簡単につかめるように、表 6-1 を作成しました（ただし、企業は将来の収益性の予測に基づいて評価されることに留意してください）。この表では、化石燃料車、化石燃料由来の電力で充電した電気自動車（EV）、太陽光発電で充電の EV のそれぞれを使用した場合のコストを比較しています。

表 6-1

米国で 4,000 km 走行した場合のコスト比較

自動車の種類	エネルギーコスト	kg CO2e	DAC コスト
ガソリン車	\$300	1,000	\$100
化石燃料電力で充電した EV	\$140	500	\$50
家庭用太陽光発電で充電した EV	ほぼ \$0	ほぼ 0	ほぼ \$0

上表は、現時点でのドライバーごとのエネルギーコストと自動車の炭素排出量、さらにネットゼロ活動において将来的に直接空気回収技術で CO2 を地圏に回収するためのコストを示しています。このコストは、2050 年で二酸化炭素トン (MTCO2e) あたり \$100 になると予測されています。この知見をライフサイクル内の他の領域に広げて、鉱業、材料加工、輸送、製造、運用、サービス、発電、その他の化石燃料燃焼を潜在的にともなう活動についても直感的に理解してください。

循環性を直感的に理解する



注意

循環性の原則を適用して、エネルギーを大量に消費する活動をできるだけ繰り返さない製品提供に努めましょう。

- ≫ 良い：リサイクルで採掘を回避する
- ≫ より良い：再製造で材料加工と採掘を回避する
- ≫ 最も良い：再利用や修理で上記すべてを回避する

ただし、環境フットプリントの削減だけでは、必要なことが半分しかできていません。残りの半分は、収益をとまなう循環を実現することです。

- ≫ 良い：先見性を持って行う材料の選択と分解しやすい設計で、リサイクルの規模を拡大する
- ≫ より良い：モジュール化で、再製造部品の需要と供給の両方に応える
- ≫ 最も良い：製品サービスシステムで、使用、サービス、回収の効率化を促し、直接的な利益に貢献する

循環性は、焦点を絞ったビジネスの成果です。クラス最高の収益性を可能にするだけでなく、製品の持続可能性に関する以下の 3 つのフットプリント領域すべてに対応できます。

- ≫ 有限資源の保護（廃棄物が少ない、またはない）
- ≫ 脱炭素化（再製造製品は線形製品よりも炭素効率が 60 ～ 95% 良い）
- ≫ 有害物質管理（焼却、水質汚染、埋立地浸出水の回避）

持続可能性に関する要求事項を利用してデジタルスレッドを確立する

理想的には、PLM のモジュール BOM が構成 SoR（記録のためのシステム）となり、物理的設備の SoR としてアセットハブに接続されます。参加システムは、これら 2 つのハブと連携します。ライフサイクルデジタルスレッドの詳細については、第 5 章を参照してください。

EPD と DPP の導入を拡大する規制により、重要項目を迅速に確立させる必要があります。PLM の BOM は EPD の自動作成につながり、アセットハブは DPP として機能します。このように安定した製品データバックボーンがあれば、AI など、持続可能性以外にもさまざまな価値を生み出せます。それについては、また別の書籍でご説明しましょう。本書が皆さんのお役に立てば幸いです。



PTC への信頼

ptc.com



PTC のお客様は、世界中を支える製品を製造しており、設計から製造、サービス、生産終了に至る製品ライフサイクルにおいて PTC のソリューションを活用しています。PTC は、産業企業やプロセスに関する幅広い専門知識と市場をリードする技術を活かし、お客様のビジネス変革を支援します。

より性能のよいクリーンな製品で利益を増大

収益性を高めながら製品の環境フットプリントを削減する秘訣を解き明かします。個別製造業向けの実用的なヒントと専門的な洞察を交えて、読者を製品の持続可能性の世界へと案内します。この分野の経験が豊富な人にも、初めての人にも、持続可能性に貢献するための鮮度の高い情報をわかりやすく紹介しています。製品の持続可能性に関する生きた情報、主な重点分野、製品ライフサイクル全体を通じて優先すべきアクションについて学びましょう。製品を見直し、環境に配慮した未来へと続く道は、この1冊から始まります。

本書の内容

- 製品の持続可能性の定義
- コンプライアンス要件の理解
- 製品の環境フットプリント削減と収益性の両立
- 持続可能性に配慮した設計の詳細
- フルライフサイクル思考の導入
- 循環型経済への移行
- 製品提供の差別化



Dave Duncan は PTC の持続可能性責任者です。PTC の製品ポートフォリオの持続可能性を高め、お客様がより持続可能性の高い方法で製品を設計、製造、保守できるよう支援しています。また、環境や社会への影響に関する PTC のコーポレートプログラムも担当しています。

動画、ステップごとの写真
によるチュートリアル、
ハウツー記事、そしてご購入は、
Dummies.com で！

ISBN: 978-1-394-36828-0

再版禁止

for
dummies
A Wiley Brand



WILEY END USER LICENSE AGREEMENT

Go to www.wiley.com/go/eula to access Wiley's ebook EULA.