

Avoiding greenhouse gas emissions

The essential role of chemicals

Life Cycle Assessment of circular systems

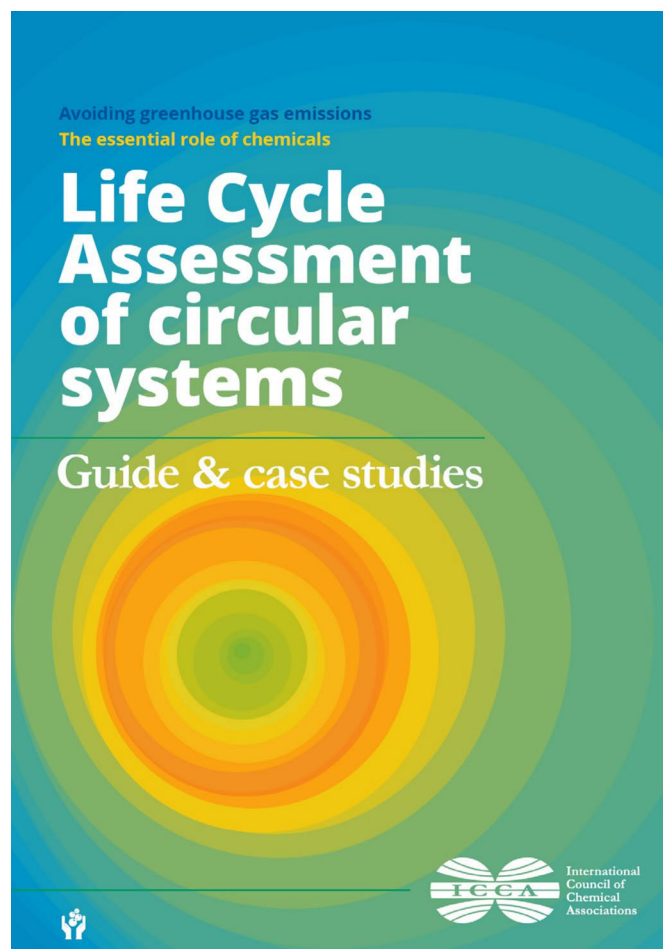
Guide & case studies

(日本語仮訳)

発行 国際化学工業協会協議会 (International Council of Chemical Associations : (ICCA))

翻訳 一般社団法人日本化学工業協会

監修 株式会社エティーサ研究所



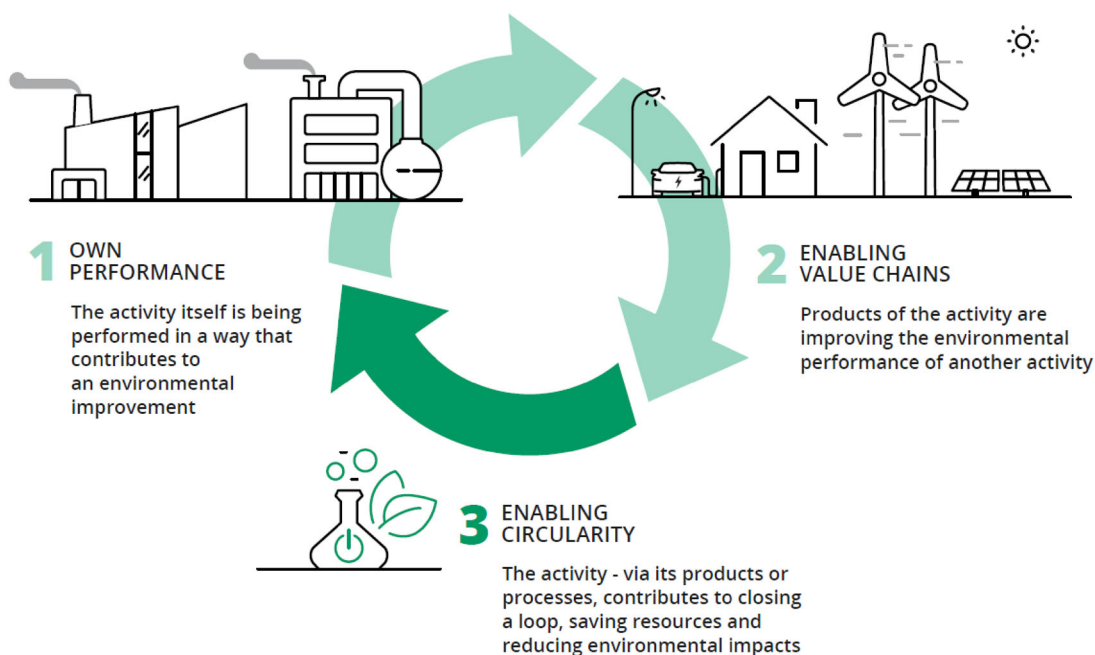
原文 (オリジナルの英語資料) は以下の URL より入手できます。

https://icca-chem.org/wp-content/uploads/2021/05/ICCA_Avoiding-GHG-Emissions_Life-Cycle-Assessment-of-Circular-Systems_Guide-and-Case-Studies.pdf

概要

国際化学工業協会協議会（ICCA）は、持続可能性の重要な要素である循環経済を後押しする重要な役割を果たすべく取り組んでいます。この取り組みによって、廃棄物を削減するため資源と材料を継続的に循環させ、バリューチェーンのステークホルダー全員に対して価値を提供します。

これが、ICCA がコンサルタント会社 Quantis 社の支援の下で、ライフサイクルアセスメント（LCA）に関するいくつかの調査や事例研究に取り組んでいる理由で、ICCA は LCA が循環型社会を推進するための不可欠なツールと考えています。



環境影響とその進展は全体論的な方法で眺める必要があります。

- (1) 産業分野自体の排出量という視点から、
- (2) バリューチェーンを通じた排出量削減のために、そして
- (3) 循環型社会へ貢献するために

環境ライフサイクルアセスメントは、製品または技術の環境への影響を定量化するための、広く受け入れられている方法論です。LCA は特定の製品のバリューチェーン全体と様々な幅広い環境課題を網羅する総合的なアプローチです。堅牢なデータ、分析の透明性、および結果の比較性により、持続可能なソリューションを（ISO 規格に則って）評価しようとする意思決定者のための頼りになるツールとして LCA の有用性を担保します。

環境影響領域の一つである気候変動に焦点を当て、循環型ソリューションと線形ソリューションをできる限り公平に比較することで、循環型ソリューションを LCA 手法を用いてどのように評価するかを理解することができるようになります。

このドキュメントでは、**循環型ソリューションの LCA 結果を読む際の主要な基本事項について解説**します。

- 評価では、各ソリューションで提供されるすべての製品/サービスを比較して、公平な比較を行う必要があります。**特に、廃棄物の処理や新しい原材料の生成などは、同時に複数のサービスを提供する循環型ソリューションでは重要です。

- 2つのソリューションが提供する原料の種類や出力製品(産出物)の品質の違いを考慮することで、LCA はその中の 1 つを過大あるいは過少に評価せず、関連性の高い比較を行うことができます。**材料や技術が最終評価時に重大な影響がない場合は、可能な限り材料や技術に中立的な立場を目指す必要があります。

- 各ソリューションを長期間にわたり評価することで、一時的な炭素貯蔵後に発生する排出遅延など、後に発生する環境への影響まで考慮することができます。**

- LCA は、ソリューション全体の潜在的な便益と負担を明示することができます。**循環性の向上による排出削減貢献量 (Avoided Emissions) は、多くの場合、複数のバリューチェーンパートナーによる努力によりその結果が得られます。パートナー間で分配するのではなく、**バリューチェーン全体に排出量の変化を帰属させることで、循環型ソリューションの利点を完全に把握することができます。**さらなる方法論の開発と業界の連携が必要になります。

- 利益を分割または個々の利害関係者が自分の貢献度を数値化できるように配分する必要がある場合、配分のアプローチは、透明性があり、公正で、正当化されている必要があります。**

- 循環型ソリューションが発展していくとき、LCA の結果にも各地域のエネルギー構成、プロセス効率、廃棄/最終利用の選択など、状況に依存する要素の変化が反映されることがあります。**このような変化は、新しい循環型ソリューションの環境パフォーマンスに大きな影響を与える可能性があり、同様に従来型ソリューションの環境パフォーマンスに対してもある程度影響を与える可能性があります。

- 低炭素エネルギーの将来的な可用性は、LCA で考慮することができます。**資源は節約するがエネルギーを大量に消費する循環型ソリューションでは、特に考慮する必要があります。どのような方法においても、適切な技術と経済的な実現可能性評価において、透明性を確保する必要があります。

- LCA は、回収された廃棄物または副産物の可用性の変化にも対応できます。**これは、最終的にそのシス

テムの環境パフォーマンスに影響を与える可能性があります。

•技術が熟し、回収の仕組みがより広範に実装されるにつれて、**新しい循環型ソリューションは進化し続けます**。このような要素は、LCA 算定で考慮する必要があり、また考慮することができます。

総括すると、このレポートでは LCA 方法論が循環型ソリューションと従来型ソリューションとの比較を可能にすることで、どのように循環型ソリューションの特性に対応できるかを示します。LCA の更なる展開により、意思決定において果たすべき中心的な役割をさらに強化することができます。例えば、評価する環境影響領域の拡大、プロセス固有のデータの可用性の向上、汎用のアプローチのより幅広い適用などがあります。これにより、循環型ソリューションと人の活動が環境に与える影響を削減するための潜在的な可能性を評価することができ、LCA の堅牢性がさらに向上します。

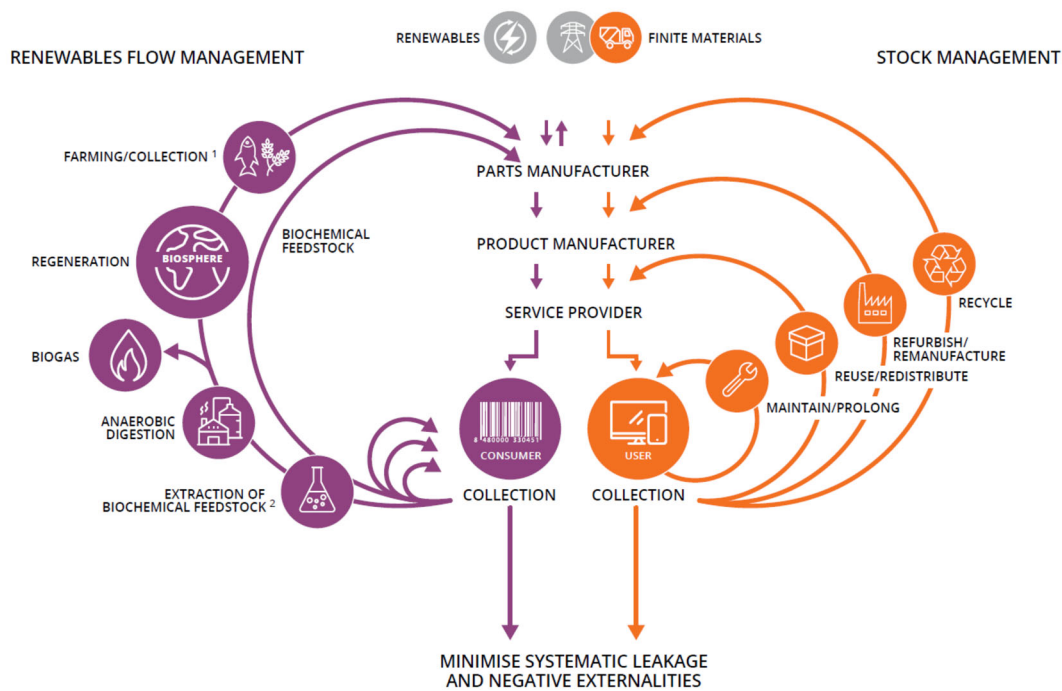
Part 1 循環型システムの LCA：領域の設定

p.8

はじめに

循環性の出現

長期的な価値創造には、原材料とエネルギーの使用量を減らし、自然資本の回復を可能にする新しいシステムが必要です。この点で、循環型システムは、企業が現在検討している魅力的な代替案を提供できます。循環型経済とは、「デザインされた復元と再生であり、循環を通じて製品、部品、材料の実用性と価値を最高位で維持することを目的としています。」[引用 1] このような循環型システムは、多くの場合、経済発展を有限資源の消費から切り離すことを目指しています。



1.狩猟と釣り

2.収穫後と消費後の両方の廃棄物を投入物として手に入れることができます

循環経済 - 広義 : 循環経済は長期間にわたり製品、部品、材料を最高の実用性と価値で維持することを目的としています

循環型システムにおける化学産業の役割

化学産業は、循環性において果たすべき重要な役割を担っています。分子を変換する能力により、様々な方法で循環型システムに貢献する可能性を有します。最近の研究は、化学産業界がより循環型で持続可能なモデルへの転換を目指すために取り組むべき 2 つの主なアプローチを示唆しています。(1) 分子を循環させるための技術とビジネスモデルの開発、(2) 下流産業での循環経済の実現[引用 2]。

循環経済への進展は、従来、廃棄物と見なされていた材料に残された価値を再利用、転用、リサイクル、回収できるかに依存しています。バリューチェーンにおける循環型システムを推進するための化学業界の取り組みは、独自のビジネス領域を越えたところに無数に存在し、その多くはすでに産業規模として成立し、開発段階のものはさらに多くあります。これらの新しい技術は、次のような課題に対する真のソリューションです。

● 材料の使用を最適化

- 高度な触媒と合成技術を用いてエネルギー消費を最適化します。
- 材料のロスや消費後の廃棄物をリサイクルして、新しい材料を製造します[引用 3]。具体的には、化学産業によって使用済み自動車部品からのポリマーをリサイクルして新しいものを作る、プラスチックボトルから携帯電話の一部を作る、リサイクルが難しい混合プラスチック廃棄物から高品質の二次プラスチックを製造するなどの例があります。
- システムにすでに存在する材料を再利用することで、新しい材料を用いた生産を回避(削減)します。例えば、溶媒回収や触媒再利用などがあります。
- 廃棄物を化学的に処理、精製、分離することでその後のリサイクルを可能にできることがあります。例えば、金属や包装の洗浄や、使用済み紙製品の漂白などがあります。

● 代替原料の利用




- 原料としての廃棄物使用(特定のバイオプラスチックの構成要素であるポリヒドロキシアルカン酸塩の製造など)。
- バイオ原料を利用した再生可能素材の開発(小麦や大麦のわらから製造するセルロース系バイオエタノール製品、セルロースから回収した化学的媒介法を用いたリグニンからのバイオエタノール又は酵母からのコハク酸製品)。
- CCU(二酸化炭素の回収利用)技術により、原料として再利用するための炭素を回収(排出ガスから回収したCO₂を使用して、多くの用途として重要な原料であるメタノールを製造など)。

気候変動緩和に向けた加速手段としての循環性

化学製品は、バリューチェーンや社会全体の温室効果ガス(GHG: Greenhouse Gas)削減および省エ

エネルギーに不可欠です。すなわち、化学製品を使用する産業が、自らのプロセスの効率、言い換えると GHG 排出量の観点からカーボンニュートラルに向けて対応するという事です。このような化学産業による気候変動緩和の実現化という役割を政策に統合することが急速に進んでいます。例えば、欧州では、欧州連合（EU）のグリーン・ディールの枠組みは、他の活動を直接可能にすることで、「経済活動は気候変動の緩和に実質的に貢献すると考えられる」と認識されています[引用 4]。

新しい循環型技術は、使用する一次資源が少ないほど環境への廃棄物の量と排出量を削減できるため、製品の効率面でさらに環境的なメリットをもたらします。循環型システムの利点を見る 1 つのアプローチは気候変動の視点です。製品、材料、化学製品の循環性が向上することは、気候変動の緩和対策の 1 つとなります。それは、バージン製品の製造に使用されるエネルギーやその他の貴重な資源を節約できるためです。

	製造から消費までバリューチェーンを横断する GHG 排出量の削減へ
	資源の効果的な使用
	カーボン再生技術対策（自然もしくは CCS）

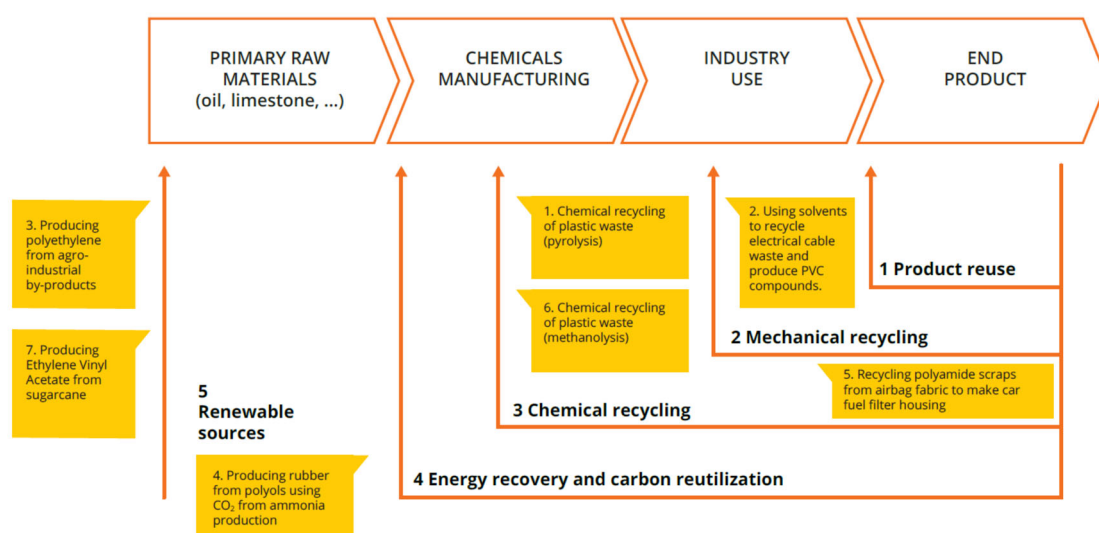
Three links between circular economy and climate change (adapted from Ellen McArthur Foundation, 2019) [引用 5]

p.10

この文書における循環型システム

本書では、循環型システムによってもたらされる環境影響と便益の算定に重点を置いて解説します。以下に示した事例を簡単に説明し、それぞれの循環型システム事例で注意が必要な特定の方法論的なアプローチを示します。循環型システムの多様性と、バリューチェーンでの多くの工程の循環構造の可能性についても説明します。また、以下に示した事例での炭素算定において明らかになった様々な疑問への解決策は、気候変動だけでなく、すべての環境への影響に有効です。

1. 熱分解による混合プラスチック廃棄物のケミカルリサイクルにより、バージングレードポリエチレンを製造。
2. 溶剤を使用して電気ケーブルの廃棄物をマテリアルリサイクルし、PVC 化合物を製造。
3. 農工業プロセスの副産物（食肉産業からの動物性脂肪廃棄物、パーム油精製からのパーム油脂肪酸）からポリエチレンを製造。
4. アンモニア生産工場から回収した CO2 を基にポリオールからゴムを製造。
5. エアバッグ生地くずからポリアミドをリサイクルし、自動車用燃料フィルターの枠を製造。
6. 混合プラスチック廃棄物を改質させるケミカルリサイクルにより、プラスチック樹脂、繊維、アセチル化学品などを生産する合成ガスの製造。
7. サトウキビからエチレン酢酸ビニルを製造。



本書で紹介する循環型の事例（上記囲み1～7）は、バリューチェーンの様々なステップにループがある循環型システムの多様性を示しています。

LCA で環境影響を測る

環境ライフサイクルアセスメントは、製品の環境への影響を評価し定量化するための広く受け入れられている方法論です。特定の製品のバリューチェーン全体と幅広い環境課題を網羅する総合的な特徴を有し、持続可能なソリューションの開発や、効果的なコミュニケーション手段を探求している意思決定者のための主力ツールです。

ライフサイクルアセスメント：どのように機能するか？

企業や公的機関は、自らの行動（購入、投資、プロセス）が可能な限り持続可能であることを確認する場合、様々なソリューションのパフォーマンスを評価するための堅牢な指標に頼る必要があります。環境ライフサイクルアセスメントは、製品ライフサイクル全体にわたって製品の環境影響（気候変動、水消費など）を評価し、定量化するための広く受け入れられている方法論です。これには、資源（エネルギーを含む）の消費と、空気、水、土壌に放出される排出が考慮されます。製品またはサービスのライフサイクル全体を通じて、すなわち、生産に必要な原材料の抽出から使用の終了までの環境への影響が評価されます。LCAの実施者は、「ゆりかご（cradle）」から「墓場（grave）」までと呼んでいます。

LCAのアプローチは、ISO 14040 および 14044 によって標準化されています。ISO 14040 および 14044 では、あらゆる評価の品質と堅牢性を確保するための主要な段階の手順が詳しく説明されています。詳細については、ICCA 発行の幹部のためのガイドの「なぜ、いつ、ライフサイクルアセスメントを実施するかを知る方法（日本語仮訳）」を参照してください。[引用 6]

全体的に、すべての LCA 実施者は以下の 4 つのステップに従う必要があります。

- ・ 事例の**目標と範囲を定義**します。目標には、対象読者と適用（applications）が含まれます。範囲の定義により、活動の範囲とシステム間で公平に比較できる比較単位が明確になり、社会に対するシステムの機能とサービスが正しく反映されるようになります。このプロセスは繰り返し実行され、各段階は評価プロセスのその他の段階へフィードバックを提供します。
- ・ すべてのライフサイクル段階での排出量の**インベントリを作成**します。インベントリの作成には、エネルギー（プロセス入力など）を含む資源の抽出と消費を定量化します。また、製品、共産品（Co-product）、廃棄物、空気、水、土壌に放出される排出（プロセス出力など）などの抽出と消費を定量化します。この段階では、多くの場合、既存のデータベースおよび信頼できる前提条件を用い、一次ソースから収集したデータを組み合わせる必要があります。データ品質は、LCA の品質を保証するために最も重要であり、このタイプの評価を読んだり実施したりする際には、慎重に検討する必要があります。
- ・ ライフサイクル影響評価（LCIA）方法論を使用して、システムが与える様々な潜在的な環境影響への**貢献度を評価**します。影響は、人間の健康（毒性、大気汚染など）、生物多様性（生態毒性、土地利用など）、資源枯渇（鉱物および化石）、さらに一般的な課題（気候変動、水枯渇など）に関連する問題を対象としています。
- ・ **結果を解釈**して、評価したソリューションが直面する主な課題の概要と、調査対象であるソリューションの全体的なパフォーマンスを改善するための詳細で重要な方策を示します。

LIFE CYCLE OF A PRODUCT



A. INVENTORY OF EMISSIONS (LIFE CYCLE INVENTORY)



資源、副産物、廃棄物、排出物の抽出と消費を定量化することにより、ライフサイクルのすべてのステップで排出量のインベントリを作成します。

B. LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT



潜在的な環境への影響は、環境への影響に対するインベントリからの排出量と使用量を「変換」する計算によって得られます。「影響カテゴリ」には、気候変動、人的および環境毒性、放射線、および資源基盤の劣化（水、再生不可能な一次エネルギー資源、土地など）が含まれます。

p.12

意思決定での LCA の重要な役割

LCA は、製品やサービスに起因する環境への影響を評価するために使用されます。そのため、LCA の結果は、プロセスのさらなる改善、最も効率的なソリューションの提示による政策への支援、および同じサービスを提供するソリューション間の比較のための確実な基盤を提供します。

非循環型システムおよび循環型システムの LCA 評価により、企業は製品の環境フットプリントの背後にある主な要因をより深く理解できます。これにより、あらゆる製品の環境パフォーマンスについて信頼性のある意見交換ができ、サプライヤーや顧客と連携する場合にも役立ちます。LCA は、製品の環境

配慮設計への取り組みを支援することもできます。これを使用して、材料や成分の代替、より多くのリサイクル成分の組み込み、パッケージングの変更など、設計変更の潜在的な便益を評価するのに使われます。さらに、より持続可能な製品が設計される場合、製品フットプリントの結果を使用して、改善について確実に意見交換することができ、透明性と比較可能性を高めながら、グリーンウォッシャー（注：グリーン [環境保護] を考慮していると世間に思わせるために偽情報 [虚報] を流布する人）のリスクを回避することができます。ICCA と WBCSD (World Business Council of Sustainable Development) が発表したレポートでは、LCA を使用して化学製品を含むシステムの排出削減貢献を測定、管理、および伝達する方法についてのガイダンスが提供されています[引用 7]。

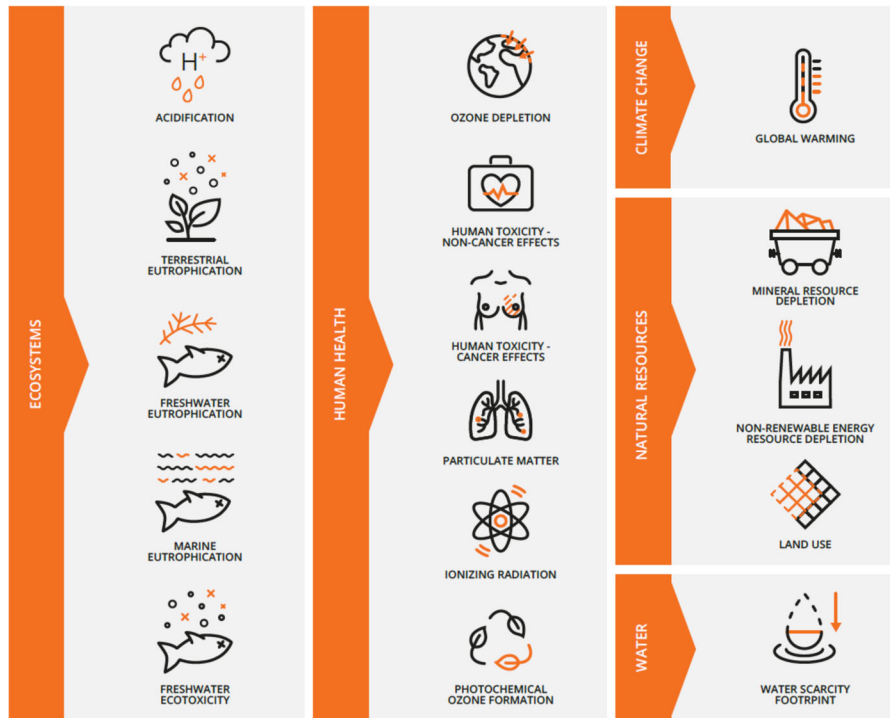
LCA は、システムの全体的な炭素バランスを定量化するために推奨される方法論であるため、気候政策の可視化にも役立ちます。これらのすべての側面から、LCA は、科学的根拠に基づいてソリューションを選択しようとする意思決定者のための主力ツールになっています。

LCA のヒント：ライフサイクルアセスメントは、ほとんどの場合、「直接的な環境負荷量の把握（帰属）」です。

LCA は通常、「attributinal：帰属的」です。LCA は製品に「帰属」し、別の製品の影響と比較できるライフサイクルの影響に重点を置いています。場合によっては、製品/サービスが社会に導入にされ、その環境負荷の社会への波及効果を把握する「consequential：結果的」アプローチを取る必要があります。例えば、カープールサービス（マイカーの相乗りサービス）の結果的な LCA では、市場の変化が移動のための行動変化につながり、旅行者の全体的な増加と、他の輸送モードからカープールへの切り替えが発生するという事実が考慮されます。

すべての影響を考慮することの重要性

評価が単一の影響項目に絞っている場合でも、LCA は、製品/サービスに関連する主要な環境上の課題についても把握できます。ただし、LCA の可能性を最大限に引き出し、他の環境影響領域とのトレードオフの可能性をチェックする場合は、マルチクライテリア・アプローチを推奨します。例えば、低炭素ソリューションと GHG 排出削減を目的としたソリューションを比較評価する場合などです。



ヒント：LCA を使用すると、環境および人間の健康に関する多数の問題を全体的に評価することができます。一般的に使用される環境影響カテゴリには、生態系への影響が含まれます(e.g. 酸性化, 富栄養化), 人間の健康への影響(e.g. 粒子状物質の排出、オゾン層破壊), 天然資源の使用 (e.g. 鉱物資源の枯渇、土地利用) 横断的問題 (e.g. 気候変動)

p.13

よく用いられる例は、バイオ燃料です。バイオ燃料は、エネルギーの生成と使用に関連する GHG 排出量を効果的に削減することができますが、その結果、より多くの農業資源の投入を必要とするため、他の環境負荷カテゴリにあたる環境負荷を追加で生じさせる可能性があります。そのため、環境への影響を完全に理解し、トレードオフを回避するための適切な対策を講じるためには、マルチクライテリア・アプローチが必要です。

循環性という観点での LCA

LCA の基本原則は、線形システムと同様に循環型システムへも簡単に適用できます。つまり、何を測定するのか、システム定義、および一般的にほとんどの方法論的なアプローチは、循環型システムに対して有効です。また、線形システムの場合、循環型システムによって実現される GHG 排出の削減は、一定の期間における循環型システムからの排出と参照システムとの差と等しくなります。ただし、LCA は循環型システムと線形システムとの比較が可能な限り公平であることを確実にする循環型システムの特異性をより適切に反映するためにも適用されています。

循環型ソリューションに LCA を適用する利点

気候変動の中では、循環型ソリューションの事例研究の意向が産業界、学术界、行政（政策）において急速に高まっており、CO2 由来の化学製品、ケミカルリサイクル、燃料、鉱物などの分野で有望な技術が数多く生まれています。LCA と技術経済評価（TEA：techno-economic assessment、技術の全体的な経済的実行可能性を確保するもう 1 つの評価方法論）の二つは、これらの技術を実証し、研究開発を商品化に導くために不可欠な方法論です[引用 8]。

LCA を使用すると、循環型ソリューションと従来型ソリューションを比較して、循環性に関する環境上の利点を評価できます。LCA は複雑な循環型システムのグローバルな概観を提供するため、バリューチェーンにおける関係者間の議論を促進し、意思決定者が循環経済の主要な成功要因を特定するのに役立ちます。

線形から循環性へ：留意すべきこと

LCA は、線形システムを念頭に開発されました。これは、評価対象のシステム（「ゆりかごからゲートまで (cradle-to-gate)」または「ゆりかごから墓場まで (cradle-to-grave)」) を説明するためによく使用される命名法に反映されています。循環型システムでは、考え方が循環であるので（「ゆりかごからゆりかごへ (from cradle to cradle)」）、評価に含めるべきプロセスと含めないプロセスの間の制限は明確ではありません。さらに、循環型システムの他のいくつかの特徴である複数のサービスを提供することが多い（従来型ソリューションと比較するのが困難）、またはまだ開発中（テクノロジーの潜在能力は完全には明らかにならない）など、LCA では、特別な注意を払う必要があります。この考え方は、LCA 実施者が循環型システムに LCA を適用する際に苦労し、次のような質問を投げかけています。

- ・ 社会にまったく同じサービスがない場合、循環型ソリューションと従来型ソリューションを比較するにはどうすればよいのでしょうか？
- ・ 例えば技術圏の中で炭素貯蔵を目的とした化石ベースの物質の焼却を回避するといった、排出を遅らせることの利点はどのように考慮しますか？
- ・ 循環型システムが主製品だけでなく、他の共産品も生成する場合、環境負荷を主製品にどの程度、配分させますか？
- ・ 製品をリサイクルする場合、リサイクルによる環境への影響は新製品または初期製品に起因するものですか？新製品には、バージン原料の使用を削減するための価値は付与されますか？
- ・ エネルギー多消費の循環型ソリューションでは、低炭素エネルギーを使用して環境フットプリントを削減できますか？
- ・ LCA では、原料の入手可能性とコストの変化が既存または革新的なプロセスに与える影響（純度の低い原材料の使用に伴うエネルギー消費量の増加など）をどのように考慮しますか？
- ・ 成熟していない循環技術の LCA では、今後の効率向上はどのように考慮されると予想されますか？
- ・ LCA を強化し、循環型システムに容易に適用できるようにするために必要な、方法論的または適合性のあるデータ類は何ですか？

LCA は、これらの循環性の問題を考慮するために進化し、循環型システムの場合に LCA 方法論の使用を改善するための重要な作業を進めています。本文書の第 2 部では、上記の各トピックについて説明し、LCA および循環性によって提起された次の 4 つの主な質問への答えについて、既に実施されている事例や取組の概要を紹介し、説明します。

1. 比較の基礎は何ですか？
2. 循環型システムの便益と負荷を主張するのは誰ですか？
3. 算定する内容の変更はいつ考慮すべきですか？
4. 循環型ソリューションの LCA 方法論はどのようにして強化していきますか？

Part 2：何を、誰が、いつ、どのように？

LCA は、循環型ソリューションの環境パフォーマンスを従来型ソリューションと比較し、評価する上で有効なツールです。

しかし、有効な結果を導き出すには、その比較が公正でなければなりません。

つまり、すべては、何がその比較において適切な基準となるべきかを定義することから始まります。同時に、ライフサイクル全体からの削減貢献は、特に、循環型システムでは、多くの場合、バリューチェーンに関わる複数のパートナーによる努力からもたらされます。したがって、次の論点が提起されます。誰が環境への負荷を担うのか、誰が循環型ソリューションによってもたらされる便益を主張すべきか。そして、LCA の結果は状況に依存する可能性があるため、いつその状況の変化を説明するか、例えば、循環型ソリューションが実施される国のエネルギー構成に応じて、結果は多様化します。特に、新しい循環型ソリューションは、将来的により成熟したソリューションへ進展するにつれ、その進展による変化の影響を受ける可能性があります。

何が、循環型システムと従来型システム間の比較の基礎となるか？

事例（study）の目的と範囲の設定には、いくつかの点を考慮する必要があります。一つめは、比較する両方のシステムが同じ機能（function）を提供することです。循環型ソリューションは社会に複数のサービスを提供するため、全ての機能が考慮されるよう事例の範囲の設定が必要です。さらに、循環型と従来型の 2 つのソリューションが同じ原料を使用していない場合（例：循環型ソリューションである廃棄物処理技術は、従来型ソリューション技術で使った物質の一部をさらに受け入れることができます）、LCA では、この違いを説明する必要があります。また、両方のソリューションからもたらされる製品の品質の違いも言及することが重要です。

事例の目的と範囲について考慮すべきもう一つの要素は、考慮される排出量の時間枠です。LCA 事例では、ソリューションに起因する排出量は、遅延排出量（例えば、製品の使用段階又は廃棄時に発生する排出量）を含む与えられた期間にわたって定量化されます。LCA では与えられた期間後に発生する排出量は考慮しません。すなわち、再排出されない炭素は永久に貯蔵されると見なされます。この継続期間の定義は、結果に大きな影響を与える可能性があります。

原料の特徴、複数のサービス、それらの背景を考慮に入れる

2つのシステム間の適切な比較単位を選択する

2つのシステムを比較するには、どちらのシステムも同じ機能を提供していることが必要です。例えば、1kgの再生プラスチックと1kgの再生ガラスを比較するのは全く意味がありません。なぜなら、例えば牛乳容器を作る工程では、各材料で必要な量が異なるからです。2つのソリューションは、提供される同じサービス、この場合は、1リットルの牛乳容器に基づいて比較する必要があります。

このため、比較を目的としたLCA事例では必ず、2つのシステムの共通かつ単一のサービス単位を定義します。それを「機能単位」と呼びます。上記の例での「機能単位」は、「牛乳製造工場から消費者世帯へ1リットルの牛乳を入れて提供する」ことです。

この共通単位により、2つの異なる製造技術の比較、または2つの異なる原材料間の比較が可能となります。

機能単位を選択は、評価の目的によります。評価後の比較が、製造工程（例：CCUからvs従来資源からの燃料による生産）或いは廃棄物処理技術（例：ケミカルリサイクルvs混合プラスチック廃棄物の焼却）なのか。異なる事例の目的は、機能単位の定義[引用9]の異なる方法になります。

- 2つの異なる方法（同じ化学構造、組成又は特性を持つ製品を提供する）で製造された同じ製品のLCAでは、機能単位は、単純に製造された製品が単位であり、その製品の特徴を反映しています。例えば、ケミカルリサイクルされたPET（ポリエチレンテレフタレート）のLCAでは、機能単位は1kgのPET（バージングレード）になります。これは、1kgのPET（バージングレード）に対して環境影響を定量化することを意味します。
- 異なる製品やプロセスによって同様のサービスを生み出す場合、共通の機能単位は、提供されるサービスに基づくべきです。具体的には、混合プラスチック廃棄物を原料として使用するケミカルリサイクルプロセスのLCAでは、機能単位は「1トンの混合プラスチック廃棄物の処理」となります。

多くの場合、循環型ソリューションは複数のサービスを提供します。例えば、BASFの事例（原文19ページを参照）では、プラスチックのケミカルリサイクルは2つのサービスを提供しています。それはプラスチックの廃棄物を処理するのに役立つだけでなく、新しいポリマーを製造するための原料を生み出します。LCAでこれら2つの機能を併せて評価するには、機能単位に「リサイクルされたPETを1kg生産すること」と、「プラスチックの廃棄物をXkg管理する」という両方のサービスを含めることが必要です。システムの複数の機能は全て単一のLCAに含まれるとするこのアプローチは、システム拡張とされています。多機能ソリューションを包含するLCAに頻繁に適用されます。その長所および短所、さらに可能な代替アプローチは次項および「2つの連続した製品ライフサイクル間の配分」（原文29ページ）の項で紹介します。

循環型システムを評価する時、適切な比較の基準を選択する方法について知っておくべきこと

2つのシステム間での比較のための共通単位を選択します：「機能単位」

LCA を用いて 2 つのシステムを適切に比較するには、2 つのシステムが同じサービスを社会に提供する必要があります。このため、比較検討を行う LCA 事例は共通の単一のサービスに基づいています。例えば、この事例の目的が、2 つの廃棄物処理技術を比較する場合、共通の単一のサービスは、「1 トンの廃棄物を処理する」ことです。LCA では、この単一サービスユニットを「機能単位」と呼んでいます。LCA で機能単位を定義する場合、その事例を行うソリューションによって提供されるすべてのサービスを考慮することが重要です。これは、特に複数のサービスを提供することが多い循環型ソリューションでは重要です。

異なる原料、複数のサービス、異なる背景などを持つ循環型システム間の比較

循環型システムを含む比較検討を行う LCA では、システム間において公正な比較を行うために特に注意が必要な事項が 3 つあります

- ・ **システムの一方または両方が多機能である場合**：つまり、複数のサービスを社会に提供する場合です。例えば、ケミカルリサイクルは、プラスチック廃棄物を処理する方法であり、新しいポリマーの原料を生産する方法でもあります。LCA では、複数機能は、比較対象の 2 つのシステムが同じサービスを提供できるように、「システム拡張」により扱われます。
- ・ **2つのシステムが同じ原料を使用しない場合**：この状況は、2 つの廃棄物処理技術、具体的には、プラスチック熱分解や脱重で、これらは同じ種類のプラスチック廃棄物を取り扱いません。LCA では、システム拡張を適用することで、2 つの技術間の比較が可能になります。この例として、システム拡張は、リサイクルできない残存プラスチックを代替する廃棄プロセス（焼却など）が含まれます。
- ・ 2 つのシステムが様々な品質の物質を生成する場合：例えば、ケミカルリサイクルでは、バージングレードリサイクルプラスチックを製造できるが、マテリアルリサイクルでは品質の低いプラスチックが製造され、あらゆる用途に使用することはできません。2 つのシステム間の比較が製品の機能に基づいている場合、品質の差異は LCA の結果に反映されます（例えば、低品質のリサイクル品は、使用回数が少なくなるため、より多くの量が必要になります）。もう 1 つのアプローチは、結果に品質係数を適用することです。

遅延炭素排出：循環型ソリューションの完全な価値を説明する

多くの循環型ソリューションは、炭素がプラスチックなどの新製品に一時的に貯蔵され、即時排出を削減します。

これらの製品ライフサイクル全体では、最初にリサイクルされ、貯蔵された炭素は大気中に再放出されます。これらの「遅延」排出量は LCA では考慮されます。

このような循環型ソリューションの価値は、一時的な炭素貯蔵だけでなく、従来のバージン原材料（例：再生プラスチックがバージンプラスチックに置き換わる）の使用を削減するという点でもあります。したがって、真の循環型ソリューションの価値は、従来型ソリューションと比較することで正しく評価されます。

炭素の永久貯蔵

多くの循環型ソリューションは、燃料やプラスチックなどの製品内に炭素を貯蔵します。一時的な炭素貯蔵は、LCA で説明される遅延炭素排出につながります。LCA では、炭素が特定の時間枠内、多くの場合 100 年間、再排出されなかった場合、炭素は恒久的に貯蔵されていると見なされます。

生物由来原料

生物由来の炭素は、大気から吸収され、植物に取り込まれ、最終処分として生物由来の製品を焼却した後、大気中に放出されます。ライフサイクルの観点から、これはカーボンニュートラルであり、炭素排出量から除外されます。一方、「ゆりかごからゲートまで (cradle-to-gate)」の LCA では、多くの場合、（追加情報として）バイオベースの製品の範囲での二酸化炭素の排出量として、カーボンフットプリントでの削減を計算します。

このような生物由来のソリューションの価値は、一時的な炭素貯蔵だけでなく、従来のバージン原料の使用に削減貢献するという重要な点でもあります。したがって、生物由来のソリューションの真の価値は、非生物由来原料で製造される従来型ソリューションと比較することで正しく評価されます。

p.18

比較可能性：2つのソリューションは同じサービスを提供していますか？

次の 3 つの主要な視点は、循環型ソリューションを LCA で比較する場合において特別な注意が必要です：

- ・ 比較対象のシステムの多機能性
- ・ 評価するそれぞれのテクノロジーで使用される原料
- ・ 比較対象ソリューション間の材料品質の差異

多機能性の管理

循環型ソリューションは多くの場合、複数の機能を有しており、複数のサービスを社会に提供します。

例えば、廃棄物や CO2 排出量を管理しながら、リサイクル製品を製造し、バージン材料の需要を減らします。事例の調査範囲にこれらのサービスすべてを含めずに、有益な相殺を説明することは不可能であり、不公平な比較となります。

例えば、ケミカルリサイクルされた PET と化石原料ベースの PET の環境パフォーマンスを LCA で比較する場合、共通機能単位に「1kg の PET を生産」を用います。しかし、ケミカルリサイクルはさらに、一定量のプラスチック廃棄物も取り扱い、廃棄物排出の流れを断ちます。完全に両方のソリューションの環境への影響を理解するには、廃棄物を処理する段階も事例に含めるべきです。すなわち、機能単位は（例：「1kg の PET 生産及び X kg のプラスチック廃棄物処理」）となります。

次に、2つの比較シナリオを次のように定義します。

- ・ シナリオ A：1 kg のリサイクル PET を生産、及びケミカルリサイクルによって X kg のプラスチックを処理します。
- ・ シナリオ B：1 kg のバージン PET を生産、及び従来の廃棄物処理技術（例：焼却および埋め立て）による X kg のプラスチックを処理します。

このシナリオを図 1 に示します。

この例では、ケミカルリサイクルされた PET とバージン PET は、2つの比較可能なシナリオを構築するためにシステム拡張という方法を適用することによって比較可能になりました。システム拡張は多くの場合、多機能¹を有する循環型ソリューションを LCA で比較する際に役立ちます。

LCA のヒント システム拡張

システム拡張では、事例の境界は関心のある単一の製品またはプロセスに限定されず、2つの比較可能なシナリオを構築するために追加のサービス（例：廃棄物の処理）を含め拡大されています。例えば、プラスチック廃棄物の埋め立ての場合とケミカルリサイクルの場合とを比較するには、埋め立てシナリオには、バージンプラスチックの生産を入れ、ケミカルリサイクルで製造されるリサイクルプラスチックの量と相殺する必要があります。

¹ このアプローチは、循環型システムの完全な比較を提供しますが、様々な利害関係者間または評価するライフサイクル間で、プロセスの環境上の利点または負荷を配分していません。PET ケミカルリサイクルの場合、廃棄物の生産者及びリサイクル材料のユーザーに環境負荷の配分については説明していません。事例の目標が配分を必要とする場合、「2つの連続する製品ライフサイクル間の配分」（原文 29 ページ）のセクションで説明しています。

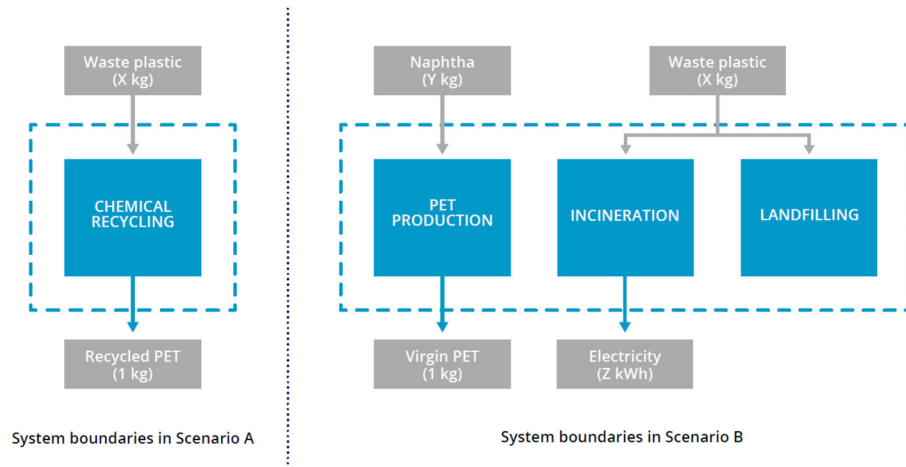


図 1: PET 製造の 2 つのシナリオにおけるシステム境界。シナリオ A はリサイクルされた PET1 kg の製造、シナリオ B はバージン PET 1 kg の製造。

p.19

事例

異なる視点から多機能ソリューションを評価する：BASF 社の事例

LCA による熱分解の評価-3 つの事例

この事例では、ChemCycling™ テクノロジーでケミカルリサイクルされたプラスチックの環境パフォーマンスを評価します。この技術は 2 つのサービスを提供します：プラスチック廃棄物処理と新しいバージングレードのプラスチックの製造です。

この事例では、ChemCycling™ テクノロジーが提供する複数の機能に基づき評価するために、評価者は、異なる視点とそれぞれの独自の機能単位を考慮した上で、次の 3 つの別々の LCA を選択し、実施しました。

- ・ 廃棄物の視点：熱分解（ChemCycling™）と 1 トンの混合プラスチック廃棄物の焼却処理との比較。
- ・ 材料の視点：熱分解油をベースにしたプラスチック 1 トンと一次化石資源（ナフサ）からの従来型プラスチック 1 トンの製造の比較。
- ・ プラスチックの品質の視点：次の 3 つの廃棄までの比較：ケミカルリサイクルと異なる品質の二次プラスチックを製造するマテリアルリサイクルとその焼却処分。この評価結果はここには示しておらず、セクション「循環型システムにおける化学産業の役割」（原文 9 ページ）に概念だけを示しています。

これらの視点は、ChemCycling™ は、(1) プラスチックの最終処理を取り扱い、(2) 化石原料ベースのプラスチックを置き換え、(3) マテリアルリサイクルとは異なり、バージングレードの再生プラスチック

を製造するということを考慮しています。最初の 2 つの視点、すなわち廃棄物と材料はリサイクルソリューションの LCA では典型的な視点です。

廃棄物の視点から、ChemCycling™ による熱分解は、熱回収を伴う焼却処分と廃棄物処理技術とを比較しています。ここでの機能単位は、「1 トンの混合プラスチック廃棄物の処理」です。

図 2 に示す LCA の結果は、混合プラスチック廃棄物の熱分解は、焼却より 50% 少ない CO₂ を排出します。

材料の視点から、ChemCycling™ による熱分解油で製造されたプラスチックと原油からのナフサで製造されたプラスチックを比較しています。機能単位は、「1 トンの LDPE の生産」です。

図 3 に示す LCA の結果は、ナフサの代わりに熱分解油を原料としてプラスチックを製造した場合、CO₂ 排出量を削減できます。ただし、ChemCycling™ の場合、より少ない排出量となるのは、焼却される混合プラスチック廃棄物を ChemCycling™ では資源として使った再生プラスチック製造に置き換えたためです。

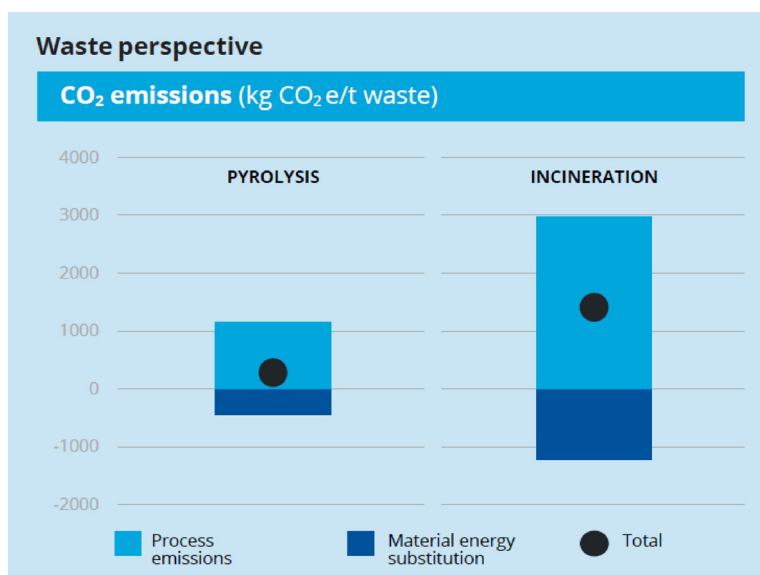


図 2：1 トンの混合プラスチック廃棄物の熱分解はエネルギー回収を伴う焼却に比べ、50%少ない CO₂ を排出します。各プロセスは CO₂ を排出（薄青色）しますが、材料/エネルギーの代替にもつながります。熱分解は、ナフサの代わりに熱分解油を製造することで原材料の削減ができます。

焼却は、電気と熱エネルギーを生み出すことでエネルギー削減ができます。

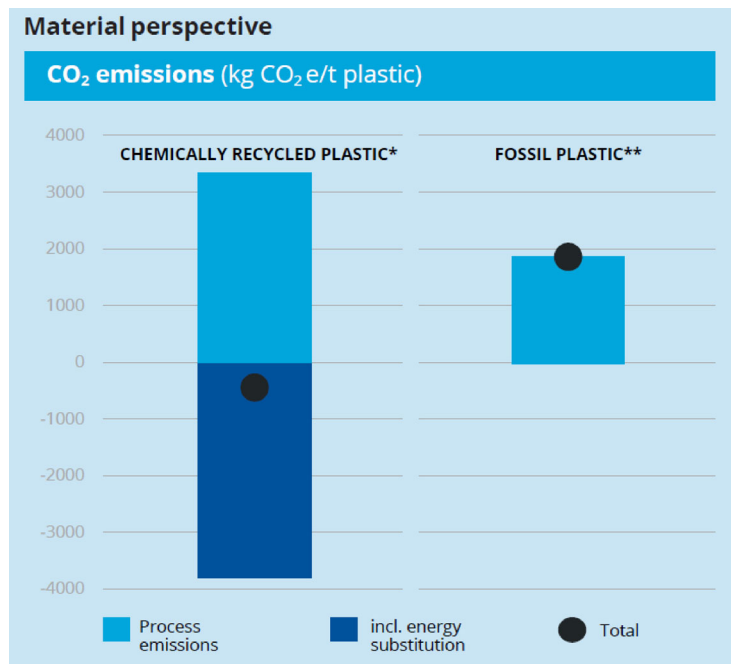


図 3：1トンの低密度ポリエチレン（LDPE）の従来の生産と熱分解からの1トンのLDPEとの比較。熱分解による1トンのLDPE製造では、全体的なCO₂排出量はマイナスになります。ケミカルリサイクルによって製造されたプラスチックは、参照シナリオである焼却による排出と置き換えることで排出量を削減します。

www.basf.com

More on study: <https://on.basf.com/3fWai2N>

p.20

原料の差異を考慮する

システム拡張は、異なる原料を使用する2つの廃棄物処理技術を比較するのにも役立ちます。ただし、社会にまったく同じサービスを提供することはできません。

次の様々な機能を持つ2つのプラスチック廃棄物処理技術を検討してみます。ケミカルリサイクル技術（技術A）は多種多様なプラスチック廃棄物を処理します。マテリアルリサイクル技術（技術B）は原料として適切なほんの一部のプラスチック廃棄物しか使えません。技術Bは、技術Aのように効果的に特定の種類のプラスチックをリサイクルしないため、技術Aと同じサービスを社会へ提供していません。

技術Aと技術Bを公正に比較するには、必要に応じて追加の技術を組み合わせて、投入する材料が同じ組成となるようにしなければなりません。

この場合、技術Aが投入された混合プラスチック廃棄物100%をリサイクルできた場合でも、技術Bは投入物の75%しかリサイクルできないかも知れません。

したがって、同じ機能単位（「1トンの混合プラスチック廃棄物を処理する」）を満たすためには、2つ

のソリューションは次のように定義する必要があります²：

- ・ ソリューション A：1 トンの混合プラスチック廃棄物をケミカルリサイクルします。
- ・ ソリューション B：0.75 トンの混合プラスチック廃棄物をマテリアルリサイクルし、**そしてマテリアルリサイクルできない0.25 トンを処理します。**

この例では、ケミカルリサイクルとマテリアルリサイクルの比較可能性は、ソリューション B においてリサイクルできない廃棄物を取り扱う追加の環境負荷を加え、リサイクルプロセスを超えたシステム境界に拡張することで担保できます。

品質の差異を考慮する

LCA を用いた比較で考慮すべきもう 1 つの重要な要素は、**製品の品質**です。多くの循環型ソリューションは、バージン品と比べて品質が劣ります。例えば、マテリアルリサイクルは、材料構造が劣化するため（例：ポリマーの鎖が短くなる）または不純物が蓄積するため、品質の劣化をもたらします。その結果、マテリアルリサイクルされたプラスチックは、バージン材料で補完されるか、特定の製品には品質が不十分となる可能性があります。

LCA 事例では製品の品質の違いに対処するための 2 つの解決方法があります：

•品質のばらつきは、使用方法に基づいた製品を比較することで説明できます。

牛乳容器を対象にした LCA の架空の例で示します。容器 A：ガラス瓶は、100 回使用できます。容器 B：プラスチックボトルは品質が低く、1 回しか使用できません。機能単位は、「牛乳 1 リットルの容量で、それを顧客に 100 回提供する」とします。この機能を実行するには、100 本のボトル B に対して、ボトル A は 1 本だけ必要です。したがって、品質の違いは、その対象（つまり、ボトル）より、その対象（ボトル）の使われ方（つまり、X 回使用されたボトル）に基づく機能単位の定義によって説明できます。

•「品質係数」は、製品間の品質の違いを説明することができます。

このアプローチは、製品の使用方法が明確に定義されていない場合に役立ちます（例：様々な用途に使用されるリサイクルされたプラスチック材料）。

欧州連合の合同研究センター（JRC）で開発されたサーキュラーフットプリントフォーミュラは、ライフサイクル間の循環型ソリューションの負担と利益を配分するためのものです（「2 つの連続した製品ライフサイクル間の配分」の項（原文 29 ページ）を参照）。それは、リサイクル材料の入りと出の両方を説明する品質比を含みます。品質比は、経済的側面（一次材料と二次材料の価格比）に基づくか、或いは、多くの場合は物理的側面に基づいています。これら比率が一貫して適用され、公正な比較につながるために専門家の判断が必要です。

² この例では、簡単にするために、両方のシナリオで同じ量の再生プラスチックが製造されると考えられます。

排出の時間枠：炭素の流れを説明する

遅延した炭素の流れの説明

多くの循環型ソリューションは、製品の内部に炭素を貯蔵します。したがって、大気への炭素の即時放出を防ぎます。例えば、発電所から放出された CO₂ は捕獲され、エタノール燃料に結合され、発電所からの GHG 排出量を削減します。別の炭素の回収と貯蔵の例は、それ以外の場合は焼却されるはずだった使用済みのプラスチックからリサイクルポリマーを製造することです。焼却は GHG を排出しますが、プラスチックをリサイクルすることは、これらの炭素排出を回避し、製品中に炭素を結合すること、すなわち新しいポリマーを製造するために回収された炭素を使うことを意味します。

どちらの例でも、即時の GHG 排出量の正味の GHG 排出量を削減する技術です。時間の経過とともに、製品に貯蔵された炭素は通常、遅かれ早かれ再放出されることになります。エタノール燃料が燃焼し、プラスチック製品は廃棄され、場合によっては焼却されます。最後には、GHG の排出は依然として発生し、製品の寿命まで遅延するだけです。

ただし、言及されている循環型システム（つまり、プラスチックのリサイクルや CCU）は従来型の製品の代替となる製品を生み出します。この場合、化石ベースのプラスチックや燃料です。したがって、循環型ソリューションの価値は、これらの従来型の製品との置き換えによって排出量を削減できることです。この利点は、循環型ソリューションを同等の従来型の代替として比較した場合、LCA で定量化できます。

二酸化炭素回収・利用（CCU）ベースの燃料の例が、2つの同等のシステム間の正しい比較として、原文本文22ページの図6に示しています。従来型のシステムは CO₂ を排出する工場で構成されています。そこでは、CO₂ を排出する従来の燃料が投入され、その燃料の寿命が尽きた時には他の GHG も排出します。CCU システムでは、CCU ベースの燃料の燃焼時に CO₂ が排出されます。また CCU のプロセス自体からも排出されます。LCA は、2つの同等のシステムを比較・評価し、すべての排出量を考慮することで、2つのシステムの環境パフォーマンスを正確に評価することができます。

p.21

事例

システム拡張による比較可能性の確保：Inovyn 社の事例

(Vinylloop) PVC 回収オプション：環境と経済システム分析

この LCA 事例では、PVC の分離に焦点を当て、混合ケーブル廃棄物を処理する 4 つの廃棄物処理技術を

評価します。検討を行った4つのPVC廃棄物処理技術は、北西ヨーロッパ（デンマーク、ドイツ）の国で実施されています。それらは次のとおりです。

- ・MVRハンブルク：エネルギーと金属回収を伴う廃棄物の焼却
- ・Stignsaes：熱分解プロセスによる原料のリサイクル
- ・Watech：加水分解後の熱分解プロセスによる原料のリサイクル
- ・Vinyloop：溶剤を使用したVinyloopプロセスによるマテリアルリサイクル

参照オプションとして埋め立てが選択されています。

上記の技術は、PVC廃棄物処理の観点から同じサービスを提供しますが、それぞれの技術は、回収金属や電気（MVRハンブルク）、塩化ナトリウム、金属スクラップ（Stignsaes）、コークスと金属スクラップ（Watech）、または再生PVC化合物（Vinyloop）など異なる出力製品を産出します。

これらの4つの技術の比較を可能にするために、次のシステム拡張が適用されました：

- ・各技術部の出力製品を一覧表示する
- ・表示されたすべての出力製品を含む全体的な製品群を定義する
- ・各技術では製造できない出力製品の従来型製造ルートを追加して各技術システムを拡張する

結果として得られるソリューションを図4に示します。

本事例における各技術の環境への影響は、製品を製造する上での影響と言い換えられます。ただし、この製品は本事例の対象の技術によるアウトプットではなく、他のオプションによって製造された製品です。この追加の負担は、ある特定の選択をする際の「環境機会費用」を表します。すなわち他の技術がある中で、この技術を選択した場合に、この技術を補完するために必要な追加のサービスになるということです。

LCAによる比較の結果は図5に示し、システム拡張の重要性を明確に示しています。

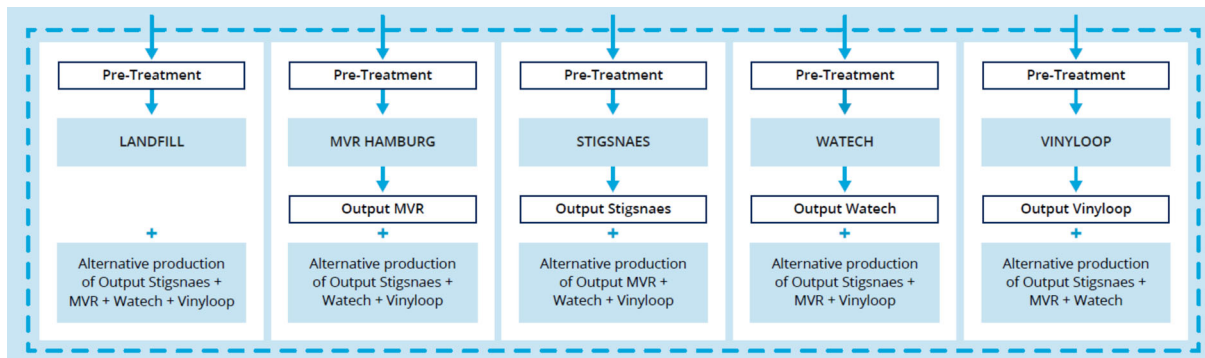


図4：システム拡張後、各システムはLCAの下、技術の出力製品を含むだけでなく、その技術ではもたらされない出力製品も含みます。例えば、Stignsaes技術の出力は塩化ナトリウム、油留分、固形残留物、ポリエチレン、金属のスクラップ。しかし、Stignsaes技術は、他の技術（MVR、Watech、Vinyloop）の出力製品である電気、コークス、PVC化合物を生成しません。これらの製品の代替生産をシステムに追加し、Stignsaesシステムを拡張する必要があります。

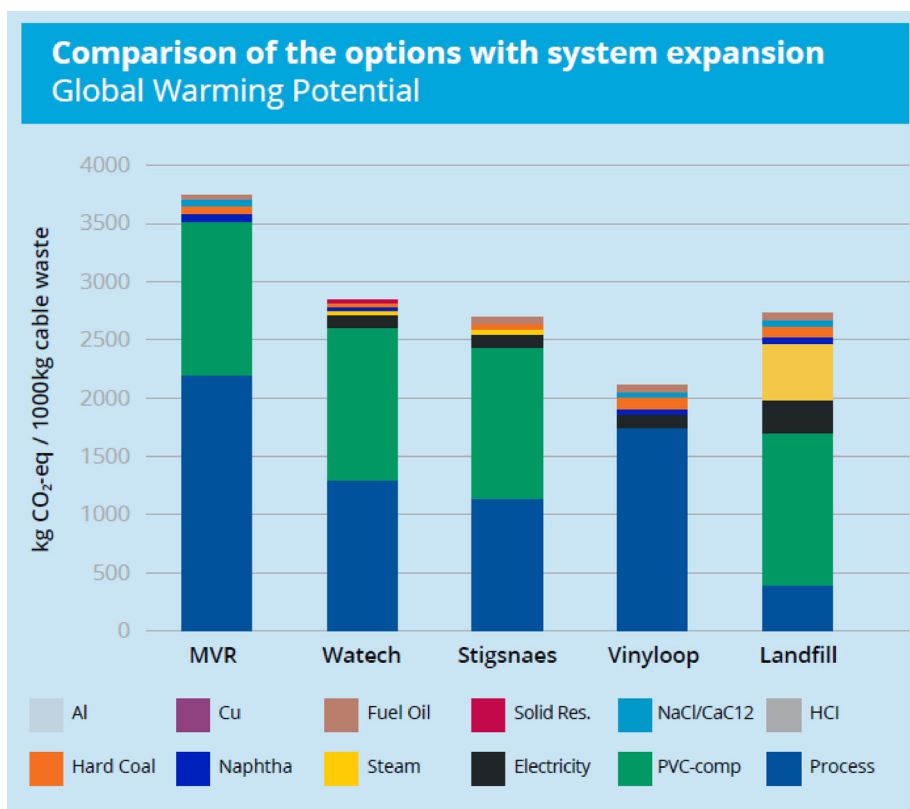


図 5：5 つの PVC の廃棄物処理技術の気候変動の視点での環境への影響。技術毎に、プロセス自体の影響を紺色で示します。LCA の結果は、Vinyloop プロセスの地球温暖化係数が焼却に次いで 2 番目です。ただし、PVC 化合物を生成し、それにより、環境影響度の高い PVC 化合物のステップを回避します。システム拡張を通じて、この事例は、Vinyloop は、気候変動の観点から 5 つの技術の中で最良の選択肢であることを示しています。

www.inovyn.com

p.22

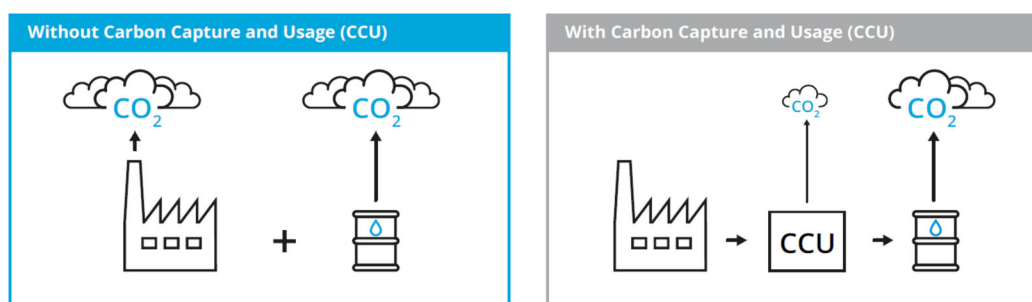


図 6：CCU を使用すると、発電所から排出される CO₂ が回収され、CO₂ の排出が削減されます。その後、燃料が合成され、燃料が燃焼する時に GHG が発生します。CCU システムは、発電所が直接排出する従来型のシステムと同等で、従来型の燃料が燃焼時に炭素を発生することとも同様です。

(補足：左図は従来ソリューションで工場から CO2 が排出され、さらに燃料の使用に伴って CO2 を排出します。右図は工場からの CO2 を低炭素技術で捕集・回収して燃料等を製造し、その燃料を使用した際に CO2 が放出されます。)

炭素貯蔵はいつ恒久的と見なされますか？

CCU やプラスチックリサイクルなどの循環型ソリューションは、それらが生み出す製品中に炭素を貯蔵することで炭素を回収し、大気中へ炭素が排出するのを削減します。これらの製品を使用した後、貯蔵された炭素はしばしば大気中に放出されます。それは、CCU ベースの燃料を燃やし、リサイクルプラスチックを焼却処分することによってです。LCA ではこれらの排出量は考慮されます。「遅延炭素の流れの計算」の項 (原文 20 ページ) は、遅延排出についてのトピックと、貯蔵している炭素が急速に大気中に放出されたとしても、なぜ循環型ソリューションに価値があるのかを説明しています。

貯蔵された炭素は、数ヶ月から数年以内に再び放出される可能性があります。ただし、一部の製品は炭素をより長期間にわたり貯蔵できるかもしれません。一般的に引用される例の一つは、建物です。木造建築物や CO2 ベースの断熱材は、最初の製造後も数十年後という製品寿命まで長期間使用され続けます。

一定年数まで炭素の排出が発生しない場合、この炭素は通常永久に貯蔵されているとみなされます。LCA では、炭素がどの時点で永久的に保存されたと定義することが重要です。

この時間枠内で発生するすべての排出量を考慮しなければなりません。後で発生する可能性のあるものは差し引かれます。時間枠の選択は、LCA の目的によって異なります。2 つの異なる時間枠に対応したアプローチを以下で詳しく説明します。

100 年の時間枠アプローチ：

LCA は通常、製品のライフサイクルにおいて吸収または放出されるすべての炭素の流れを正確に把握できるように遅延排出を含む排出量について、100 年の期間内で考慮します。

この期間内に発生する排出物は、すべて考慮します。100 年以降も排出されない炭素は、永久に保管されていると見なされます。

例として、貯蔵する炭素量は同じだが、2 つの異なる製品に貯蔵するという 2 つのリサイクルソリューションについて説明します。

プロセス 1 はエタノールを製造し、プロセス 2 は建設部門向けのプラスチックポリマーを製造します。簡単にするために、電気など、他のすべての要素は同一の二つのプロセスについて考えてみます。どちらの製品も、最初はリサイクルによって同じ量の炭素を貯蔵し、同じ正味の炭素削減を保証します。ただし、二つの製品は同じ運命ではありません。プロセス 1 では、エタノール分子に蓄積される炭素は、燃焼時に完全に CO2 として再放出されます。プロセス 2 では、プラスチックポリマーが 100 年を超えて建物内に残る可能性があります。両方のリサイクルソリューションの長期的な効果は異なるので、異なる方法で説明する必要があります。

この例で示されているように、遅延排出につながるソリューションの比較は、100年以内の時間枠で遅延排出が考慮され、定量化されていることを確認するために、両方の製品のライフサイクル（「ゆりかごから墓場まで（cradle-to-grave）」のアプローチ）全体をカバーする必要があります。

少なくとも、遅延排出の影響は、意思決定者が環境評価結果をよく理解してもらうためにも言及する必要があります。

将来を見据えたアプローチ

気候変動は、100年後にはさらに重大な問題になる可能性が高いため、LCA実践者は、100年以上に排出の時間枠を延長する将来を見据えたアプローチで検討することもできます。

最近の情報源には、500年以内[引用 10]或いは1万年[引用 11]以内に発生するプロセスから発生する全ての排出量を考慮することを推奨しています。例えば、CCUの場合では、標準の100年の期間はこれまでは炭素貯蔵に対してインセンティブを与えることができたが、今後いつかの時点でなお重大な社会的問題となるかも知れません。

このアプローチは、CCUの場合では「クイックフィックス：一時的な解決策」であるソリューションと他の長期にわたる解決策とを区別するのに役に立ち、かつ意味があります。ただし、短期ソリューションにも価値があり、軽視されるべきではありません。

CO₂は地球温暖化に累積的な影響を与えるため、任意の期間の貯蔵は有益です。生物由来炭素を含む一時的な炭素貯蔵の問題はLCA事例において非常に重要です。生物由来の炭素循環は速いサイクル（つまり、植物と大気間の速い炭素循環）で、化石由来の炭素と同じような気候変動影響はありません。このため、生物由来の炭素はLCAでは別に検討します（次項を参照）。

p.23

事例

なぜ（一時的な）生物由来の炭素貯蔵が重要なのか？：SABIC社の事例

動物脂肪または植物油の廃棄物から水素処理された植物油に基づく再生可能ポリエチレン

この事例は、スチームクラッカー用の原料として水素処理された植物油（HVO）ディーゼルを使用して製造されたポリエチレンの環境への影響を定量化しています。HVOは食肉加工の副産物である動物性脂肪の廃棄物を水素処理したもの、またはパーム油製造の副産物であるパーム油脂肪酸を水素処理したことから製造されます。

最終製品に取り込まれる炭素、つまりポリエチレンは、化石由来ではなく生物由来です。この区別は炭素を計算する上で重要です。生物由来の炭素の場合、CO₂は大気から取り入れます。例えば、パーム油脂

脂肪酸を構成する炭素、それは最終的にポリエチレンに組み込まれますが、その由来は大気からです。一方、化石由来のポリエチレンの場合、焼却時に化石貯蔵（原油）の炭素は大気に放出され、炭素の実質の移動があります。図7は2つのシステムの違いを示しています。

したがって、この事例は、生物由来の炭素を特別に定義した算定ガイドラインに則っています。

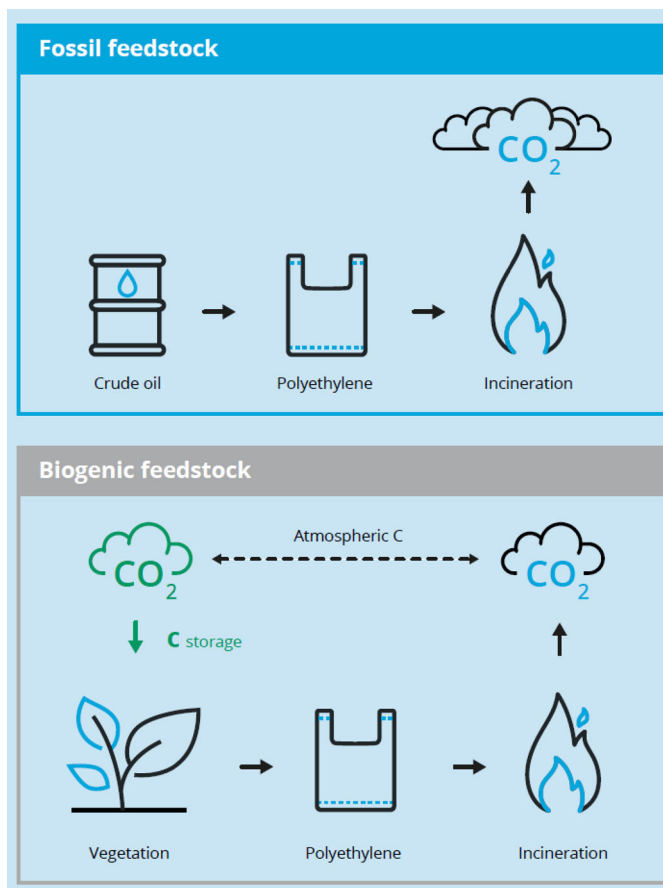


図7：化石原料から作られたポリエチレンは、製品が廃棄され焼却される時、正味のCO₂が大気へ放出される。一方、パーム油脂肪酸などの生物由来の原料を使用する場合、焼却時に排出されるCO₂は再び植物により吸収されたものとみなされます。

www.sabic.com

More on study: <https://bit.ly/39UyQ8I>

p.24

生物由来の炭素固有の課題

一般的な炭素算定ガイドライン、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) のガイドライン[引用 12]や JRC [引用 10]のより専門的な LCA ガイドラインでは、生物由来の CO₂ 排出は自然循環の一部であるため、炭素算定から除外されるべきであると記されています。この一般的なルールには一つの例外があります。メタンの形で放出されるごく一部の炭素です。確かに、メタンは気候変動に二度影響を与えます。

最初はメタンとして、次にそれが CO₂ に酸化される時です。CO₂ は再び植生により吸収されるため、この 2 番目の影響は無視できます。ただし、最初の影響は LCA でモデル化して説明する必要があります。例えば、生物由来の燃料の燃焼についての循環型ソリューションの LCA では、すべての CO₂ 排出量は差し引くことができますが、メタン排出量は生物由来のメタンとして計算する必要があります。

一部の LCA 実施者は、最終的な合計には含まれていませんが、生物由来の CO₂ フローのモデル化を選択する場合があります。例えば、JRC は、生物由来の CO₂ の影響をゼロと見なしたすべての生物由来の炭素フローをモデル化することを推奨しています。最終的な結果は、生物由来の CO₂ フローがモデル化されていない場合と同じですが、炭素の流れ全体を把握するのに役立ちます。

このデフォルトアプローチは LCA で広く受け入れられ、利用されていますが、それは他のアプローチの開発につながった二つの課題を提起しています。一つ目は、図 8 に示すように、生物由来の炭素には炭素回収時に削減（緩和）効果がありますが、それが大気中に放出されたときは気候変動を悪化させる方に働きます[引用 13]。従ってこの循環で生物由来の炭素を使用することによる全体的な気候変動への影響はニュートラルですが、ある時点での効果はニュートラルではありません。二つ目は、生物由来の炭素は長期間使用する製品に埋め込まれている可能性があります。この炭素貯蔵は、LCA から省略されたときは生物由来の炭素として考慮されません。

一時的な炭素貯蔵の重要性に対する意識の高まりは、これらの課題を考慮した新しいアプローチの開発につながりました[引用 14]。従来の LCA は、排出の時間枠を考慮せず、集約された「一時的（スナップショット）」の排出量を示します。一方、新しい LCA は、すべての GHG 排出（正）および炭素の隔離（負）の経時的な影響の一貫した評価が可能です。結果の信頼性において、一時的な貯蔵を定量化するためにはすべての排出時期を考慮する必要があります。したがって、新しい LCA を実行することは複雑で、現在も試行段階のままです。ただし、より広く実装されれば、意思決定者/政策立案者に一時的な貯蔵についてより良い理解を得るための貴重なアプローチとなりえます。

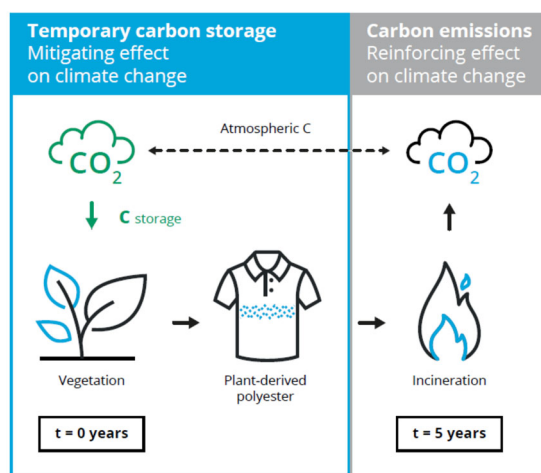


図 8：一時的な炭素貯蔵：生物由来の炭素には、生物が吸収した時に気候変動への緩和効果があります。この効果は、吸収された炭素が大気中に放出された時点で終わります。

誰が循環型ソリューションの環境への負担を負い、その恩恵を主張するのか？

ライフサイクルにおける排出削減貢献量、特に循環型システムにおいては、ほとんどの場合、バリューチェーンに沿った複数のパートナーの努力によってもたらされます。システムをより循環型にするには、原材料サプライヤー、化学会社などの材料メーカー、材料加工メーカー、部品組み立てメーカー、そして技術の利用者を含めたバリューチェーンに沿った複合的な変化が必要です。そうすることによって、全体的な排出量の変化および排出削減貢献量の変化が循環型システムによって実現され、排出削減貢献量はシステム内のすべてのプレーヤーに帰属します。

このため、排出削減貢献量は、パートナー間で細分化するのではなく、バリューチェーン全体に帰属するものとします。これにより、環境便益の全体像が示され、政策立案者は循環型ソリューションを政策支援するか否かを決めるためにそのソリューションの便益と負担を包括的に理解する上でも役に立ちます。

参照システムと異なり、循環型システムによって可能になる排出削減貢献量は、必要に応じて、関与するプロセスや関係者で分割するか、配分することがあります。これにより、関係するそれぞれのプロセスや関係者自身の影響を定量化でき、二重カウントを避け、それぞれの排出量に応じた行動をとることを可能にします。循環型システム全体での環境への便益と負担について、異なる視点や影響力を持つ様々な利害関係者がいることが、循環型ソリューションについて特筆する点です。

ある循環型ソリューションは、既存のプロセスからの副産物を利用することを目的としています。そのプロセスは多機能で、その環境への影響は共産品間で共有する必要があります。別の循環型ソリューションは、新しい製品サイクルを開始するために使用済みとなった材料を使用することを目的としています。この循環型ソリューションによってもたらされる環境への便益と負担は二つの連続する製品システム間で共有されます。

多機能システムの共産品間の配分

多くの循環型ソリューションは、既存のプロセスの副産物を価値のある製品に変換する目的で開発されています。この場合、循環型ソリューションは、主要製品及び循環型ソリューションから得られる2次製品も同様に提供するより広範で多機能なシステムの一部です。

例えば、サトウキビの搾りかすからのエタノール製造の場合、サトウキビの搾りかすは、主に砂糖の生産を目的とする既存のシステムの副産物です。サトウキビ栽培の環境への影響は主製品である砂糖と共産品であるサトウキビの搾りかすとで共有しなければなりません（原文 27 ページの図 9 を参照）。

循環型ソリューションの環境パフォーマンスそのものの評価を可能にするために、システム全体の負担と便益を主要製品と2次「循環」製品とで共有しなければなりません。LCA では、これを「多機能型

解決策 (solving multi-functionality)」と呼んでいます[引用 15]。多機能型解決策は、循環型ソリューションに特有ではなく、LCA に関する文献では、広く議論されてきており、推奨されるアプローチとして提供されています。

標準化やガイドラインは、多機能型解決策の扱いについて次の方法を提供しています。以下に ISO14044 [引用 8]での推奨順に示します：

- 1 システム拡張
- 2 代替 (置換)
- 3 物理的な比率を基準とした配分
- 4 別の関係性を使用した配分

1. システム拡張：単一のシステム内のすべての共産品を受け入れる

システム拡張では、システム全体を評価するという考え方があります。この考え方は、関心のある共産品のみに焦点を当てるのではなく、システムが提供する全ての共産品 (または機能) を考慮します。システム境界は製品システムの他の機能まで含むように拡張されます。機能単位は、これらの追加機能を含むように変更されます。比較のために用いられる参照システムは同等の機能を提供する必要があります。このアプローチは図 9 (原文 27 ページ) に示されています。

前に引用したサトウキビの搾りかすからのエタノールを生産する例では、システム拡張アプローチは砂糖とエタノールを同時に生産する砂糖生産システム全体の LCA を実施することです。比較のための参照システムは、2 つの製品例 (砂糖とエタノール) を従来どおりに製造するのに必要な 2 つの別々のシステムの組み合わせです。このアプローチでは製品固有の結果は得られないことを指摘しておきます。つまり、エタノールだけの環境フットプリントを特定することはできません。

p.26

負担と便益の配分について知っておくべきこと

「配分」が答えです。

多機能システムの共産品間の負担と便益を配分するアプローチはいくつかあります (例えば、砂糖とサトウキビの搾りかすからエタノールを製造するシステム)。それらは、標準とガイドラインに従って優先順にリスト化されています。

• **システム拡張**では、システム全体 (例えば、砂糖とエタノールの両方を製造するシステム) で評価し、さらに、循環型ソリューションが提供しているすべての機能を有する参照システム (例えば従来型の砂糖の製造に従来型のエタノールの製造を追加したもの) と比較します。このアプローチは潜在的な配分

のバイアスを回避しますが、製品固有の結果は得られません。製品固有の結果が必要でない場合に限り、一般的に推奨されます。

•**代替（置換）**については、循環型ソリューションは、リサイクルと関連のない既存の共産品（砂糖など）の生産による負荷について控除されます。このアプローチでは、製品固有の結果が得られます。つまり、循環型ソリューションのみによって生成された共産品の影響を決定することができます。ただし、結果の解釈が難しい場合があります。

•**物理的な比率を基準とした配分**を用いたアプローチでは、多機能システムの影響は、内在する物理的基礎（例えば、それぞれの質量またはエネルギー構成）に基づく共産品の間で共有されます。このアプローチは、二つの共産品は同じ物理的背景のもの（例えば、ケミカルリサイクルプロセスによって製造された二つのモノマー）である場合に適しています。

•**経済的配分**のアプローチは、共産品間の背景が異なる場合に適切です。多機能プロセスの影響は、それぞれの経済的価値に基づいて共産品間で共有されます。このアプローチは製品固有の結果を導きますが、共産品間の価格変動により結果が変更される場合があります。全体的に、経済的配分は、共産品の需要と供給の間の市場バランスを反映します。

回収された廃棄物は、そのリサイクルによって可能になる削減貢献量の恩恵をうけられるのか？

多くの循環型ソリューションは、廃棄に至った材料を新しい製品サイクルで使用する材料として使用すること目的としています。それらは、環境への便益（新たな未使用の材料の使用を回避する）と環境への負荷（リサイクルプロセスによって発生する環境影響）に関連付けられます。よって、誰が廃棄物を使って二次原料を生産することの環境負荷（排出）または利益（クレジット）に説明責任を負うのでしょうか？その答えは、製品の廃棄時（ライフサイクル末期）の配分の選択方法によって異なります。このアプローチの選択は、廃棄物の収集とリサイクル、或いは、市場のニーズに基づく 2 次原料の使用を促進するのに役立ちます。すなわち、市場のニーズに依存すると言えます。

クローズドループシステム：単純配分

クローズドループシステムは、廃棄に至った製品がそれと同じ特性を持つ製品としてリサイクルされるというリサイクルの特定の例です。同じ関係者が、廃棄時にリサイクル可能な材料を製造し、それを新しい製品に組み込むことに関与することです。このようなシステムでは、配分アプローチは、すべての利益をリサイクル可能な材料を利用、製造する利害関係者一人が獲得するため、配分が単純化されます。実際には、これらの利益は、最初の製品サイクルで投入される必要な最初の未使用材料の量を削減することで直接、評価できます。

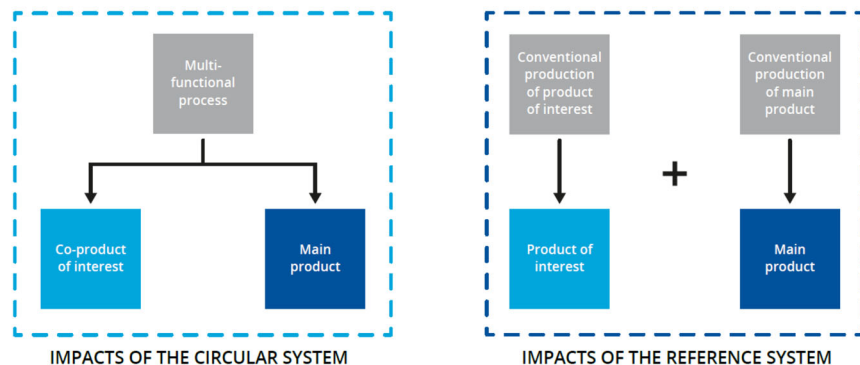


図9：システム拡張：システムは、対象の共産品（エタノールなど）と主産物（砂糖）の両方を含む全体として拡張し評価されます。参照システムは、対象製品（エタノールなど）と主産物（砂糖など）の従来型の生産システムです。

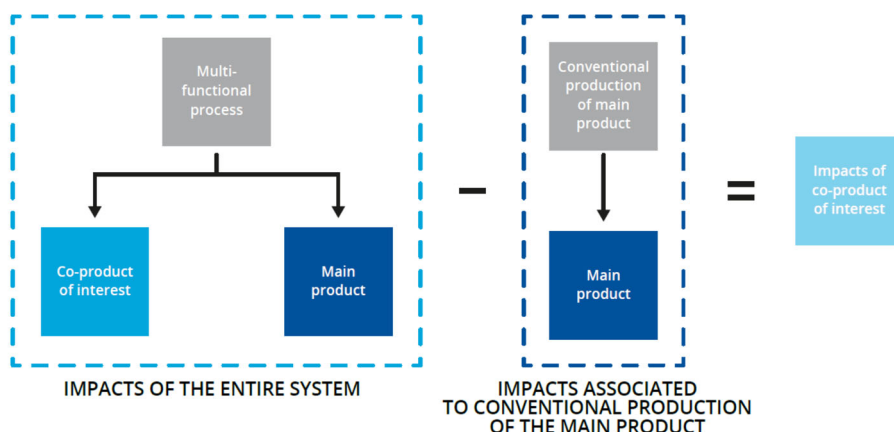


図 10：代替：主産物（砂糖など）の生産は回避され、循環型ソリューションの排出削減貢献量が認められます。結果は、対象の共産品のみに関連する影響に対応しており、製品固有のものです。

2. 循環プロセスの出力が別のものに置き換わった場合の代替/置換

システム拡張とは異なり、代替は評価において追加の機能は含みません。むしろ、図 10 に示すように、循環型ソリューションは、従来型の生産を置き換えることによって回避された環境負荷（環境負荷の削減貢献）を表す主産物（砂糖など）生産へのクレジット（価値/評価）を受け取ります。

サトウキビの搾りかすから製造されるエタノールの例では、代替アプローチは、最初に砂糖とエタノールを製造する全体のシステムを評価することを意味します。次に、従来型の砂糖生産の影響を引き算します。このアプローチは製品固有の結果を出します。すなわち、エタノールの環境フットプリントは、砂糖の環境フットプリントとは別に定量化されます。

数学的には、代替はシステム拡張と同等です。ただし、双方のアプローチでの結果とその解釈は異なり

ます。例えば、代替は、そのシステムが二酸化炭素を吸収し、大気中から二酸化炭素の量を減らすという誤った印象を与えるというような否定的な結果（例：負の排出）につながる可能性があります。さらに、代替によるクレジットは、参照として選択した「従来型の」生産に大きく依存するため、様々な場合があります。そのため、LCA 実施者は、最も実現可能なソリューションに置き換えるか、感度分析³で様々なシナリオを考慮するかの選択に注意を払う必要があります。つまり、代替アプローチによって得られた結果は、どのようにその結果を得たかを念頭に置いて慎重に解釈する必要があります。

p.28

事例

共産品間の配分：RWTH アーヘン大学による事例

二酸化炭素から持続可能なエラストマー合成に向けて：ゴム製造のための炭素回収と利用のライフサイクルアセスメント[引用 16]

共産品間の配分の課題は、ポリオール合成のために Covestro 社が開発した Cardyon[®]技術を使用し、アンモニア生産工場から回収された二酸化炭素を使って製造されたゴムの LCA で解説されています。本事例は、地球温暖化といくつかの他の環境要因について二酸化炭素ベースのゴムとその代替となる従来のゴムの環境への影響を比較します。

この事例で考慮されるシステムは、多機能です。すなわち、このシステムはアンモニア生成、CO₂ を原料としたゴム、およびゴムが焼却された最終処分時のエネルギーを生成します。ISO および CCU 固有のガイドラインに従って、システム拡張は多機能に対処するために適用されます。この LCA で考慮する拡張システムには次の 3 つの機能があります。

- ・ 1 kg の CO₂ ベースのゴムを生産
- ・ 0.185 kg のアンモニアを生産（ゴムに含まれる CO₂ の 30 wt% の二酸化炭素由来のゴムを製造するために、CO₂ の共産品として必要な量）製造時のエネルギー源として 1 kg の CO₂ ベースのゴムを焼却
- ・ エネルギーを生成するための 1kg の CO₂ ベースのゴムの焼却

比較する従来型のシステムは同じ機能であり、1 kg の従来のゴムの生産量の合計です。これには、廃棄時にエネルギー源とする焼却と二酸化炭素を大気中から回収しない 0.185 kg のアンモニア生産を含みます。

³ 従来型の生産方法を参照として選択する方法は、削減貢献量報告についての ICCA のガイドライン[引用 6]に記載されているように、排出削減貢献量の計算のためのベースラインシナリオを定義するために使用されるアプローチと整合させます。

LCAの結果は、図11に示すように、CO₂ベースのシステムの方がGHG排出量がより少なくなります。これらの削減はシステム全体の結果であり、製品固有のものではありません。CO₂ベースのゴムのみ結果を得るために、本事例では、環境影響削減のどの程度をゴムに配分するかを推定するために、感度分析を行っています。

配分アプローチが製品固有の結果に与える影響を明確にするために、二つの可能性が考慮されます。第一に、最悪の場合の配分は、アンモニアが共産品であることを考慮せず、CO₂ベースのゴムに全ての影響の要因とすることです。第二は、最良の場合の配分は、アンモニア製造のためのクレジットを導入し代替アプローチを使うことです。

図12に感度分析の結果を示します。最悪の場合の配分シナリオでは、1kgのCO₂ベースのゴムの生産による排出量は4.83 kgCO₂eqです。最良の場合の配分シナリオでは、排出量は4.57 kgCO₂eqになります。結果として、感度分析は、どんな配分方法を選択しても、CO₂ベースのゴムが従来のゴムと比べて気候変動影響が少なくなることを示しています。それは、原料と製造工程が異なることと、エネルギー源に焼却を利用しているためです。

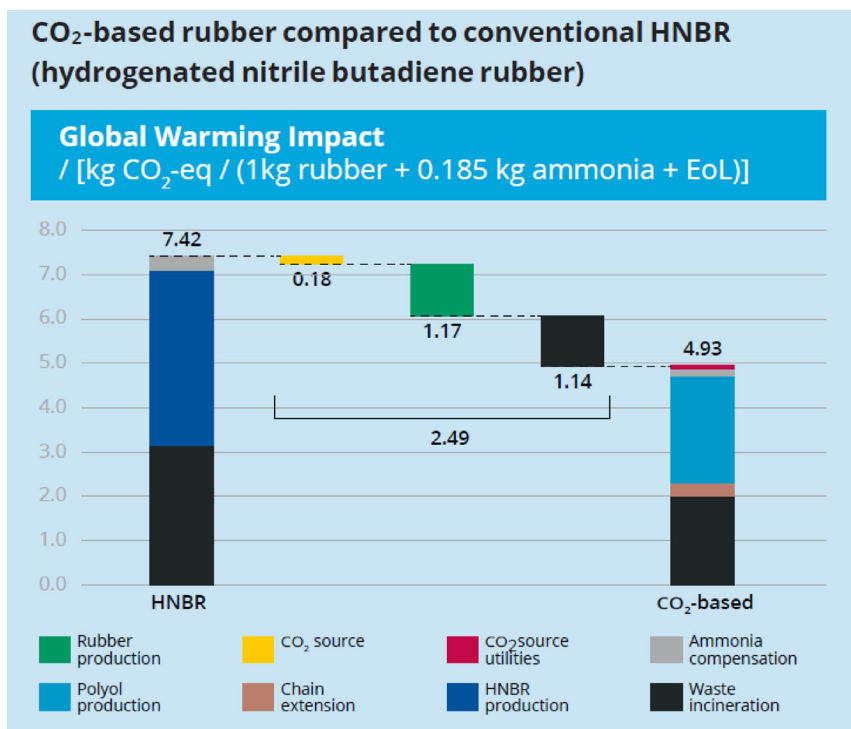


図11：CO₂ベースのゴムと従来のゴム1種類（水素化ニトリルブタジエンゴム（HNBR））との比較結果を示します。この削減は、(1) アンモニア製造時に排出されたCO₂を回収し、CO₂ベースのゴムに貯蔵します。ただし、主な削減は、(2) ゴム生産自体の製造の変化（CO₂ベースのゴムには様々な原料が使用）によるものです。(3) 焼却時の排出ガスの削減（CO₂ベースのゴムはHNBRよりも炭素含有量が少なく、焼却によるエネルギー生成時のGHG排出への影響が小さいことを意味します）。

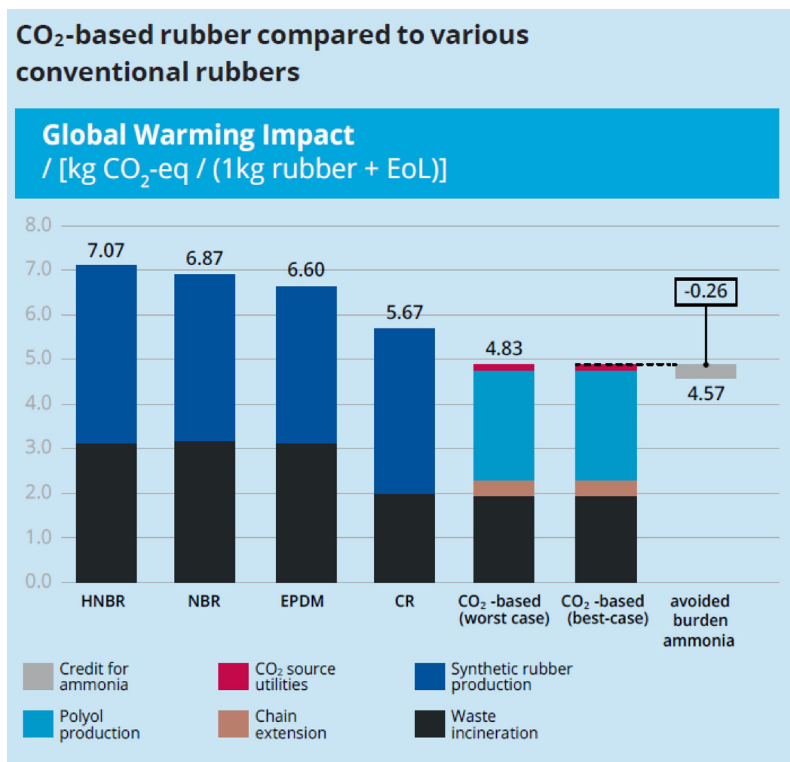


図 12 : 1 kg のゴムと 1 kg のゴムの廃棄処理における製品固有の地球温暖化影響を kg CO₂eq で示しています。

従来のゴムとして HNBR、ニトリルブタジエンゴム (NBR)、エチレンプロピレンジエンモノマーゴム (EPDM)、クロロプレンゴム (CR)。CO₂ ベースのゴムについては、次の環境への影響がありました。

(1) 最悪のシナリオ (CO₂ ベースのゴムに 100% の環境影響を配分) の場合および (2) 最良シナリオ (アンモニアをクレジットとする) で、CO₂ 源ユーティリティには、CO₂ 圧縮と CO₂ 輸送が含まれます。

www.covestro.com

More on closing the carbon loop: <https://bit.ly/39YWgJT>

p.29

3. 環境負荷の割り当てを物理的な比率を基準とした配分

システム拡張および代替は、共産品間や機能間の多機能プロセスの環境影響の配分です。

共産品または機能間でプロセスを実行します。この割り当ては共産品間の質量の比率またはエネルギー構成の比率に基づきます。

サトウキビから砂糖とエタノールの共産品間の例 (原文 25 ページを参照) より、質量またはエネルギー配分は、砂糖とサトウキビの搾りかすからさとうきび生産の影響を割り当てることができます。質量の配分は、精製に投入されるサトウキビの量、すなわち砂糖と搾りかすの量の重量比を規定すると評価できます。エネルギー配分は、砂糖とサトウキビの搾りかすとの間の発熱量の比率です。これは 2 つの共

産品の間でサトウキビ生産の環境負荷の割り当てに使われます。

ただし、この例では、多くの循環型ソリューションの場合と同様、共産品は、異なる物理特性、使われ方、価値を持っています。砂糖は食品に使用され、搾りかすはエネルギーに使用されます。従って、前述のように、物理的な比率に基づいて割り当てることは可能ですがこのアプローチはほとんど意味がなく、代替案を検討する必要があります。

物理的な比率を基準とした配分は、共産品の物理的性質が同じである場合（例：単量体）は、適切です。架空の例として、EVA（エチレン酢酸ビニル）をエチレンと酢酸ビニルモノマーに再生するケミカルリサイクルの例があります。モノマーの分子量の比率で化学プロセスの負荷と便益を割り当てることができます。

4. 別の関係性を使用した配分

物理的な比率が適切でない場合は、**別の関係性**を使います。多機能プロセスの環境への影響は、これらの共産品または機能の適切な属性に従って、その共産品または機能の間で分配されます。多くの場合、共通属性として経済的な価値が選択されます。影響の最大部分は最大の経済価値を持つ製品に帰属されます。

経済的配分は、循環型ソリューションの便益の帰属に大きな影響を与える可能性があります。多くの場合、このようなソリューションでは経済的配分の結果として経済的な価値がほとんどない共産品を使用するため、製品へ与える影響はごく一部にしかありません。つまり、多くの場合、経済的価値は殆どなく、それらの製造の影響はゼロと見なされ、単純に負荷なしと考えられます。

前に引用したサトウキビの搾りかすから製造されたエタノールでは、主製品（砂糖）の市場価値は、従来、利用できない廃棄物と見なされた関心がもたれている共産品（サトウキビの搾りかす）の市場価値よりもはるかに高くなります。このため、経済配分によれば、サトウキビ生産の影響のわずかな割合が搾りかす、結果的にはエタノール製造に割り当てられます。

経済的な配分は、製品固有の結果を生み出すためには、意味のあるアプローチです。その結果には、廃棄物とみなされる共産品に対して市場の需要が低いのか、または高いかが反映されています。例えば、循環型ソリューション（サトウキビの搾りかすからエタノール生産など）が広く導入され、共産品の需要が高まってくると、需要の変化が起こるかもしれません。この場合、LCAの結果は変化する前の市場の経済的配分に基づいており、修正する必要があります。これについては、「原料の入手可能性と費用のバリエーション」で詳しく説明します（原文 38 ページ）。

2つの連続した製品のライフサイクル間の配分

多くの循環型ソリューションは、新しい製品サイクルで廃棄に到達した材料を再利用することを目的としています。リサイクルには2つのタイプがあります。

- ・ オープンループのリサイクル（開ループ）：1つの製品サイクルからの材料を別の製品にリサイクルすることです。例えば、PET プラスチックボトルをマテリアルリサイクルし、ポリエステル衣料にすることです。
- ・ クローズドループのリサイクル（閉ループ）：ある製品サイクルからの材料を同じ製品にリサイクルすることです。例えば、PET プラスチックボトルをケミカルリサイクルし、新しいPET ボトルにリサイクルすることです。

開ループ、閉ループ、どちらの場合も、バージン材料の消費を削減することができるため、これらのリサイクルは有益です。例えば、廃棄PETがポリエステル衣料にリサイクルされる場合、そのリサイクルする工程は環境への影響はありますが、同時にバージンPETを製造する環境コストは削減できます。バージン材料の使用を減らすことによる環境への便益とリサイクル工程による環境負荷は、最初の製品サイクル（プラスチックボトル）と二次製品サイクル（ポリエステル衣料）との間で共有する必要があります。

ライフサイクル間でインパクトを分配するいくつかの方法

ライフサイクル間でインパクトを分配する方法は複数あります。それぞれの方法からは異なる結果が得られます。それぞれの方法はオープンループとクローズドループの両方の状況に適用することができます。単純化されたアプローチは、クローズドループのリサイクルに対して使われます。その理由は、クローズドループのリサイクルは単一のシステム（このシナリオにおいては、PET ボトル廃棄物の生産者はリサイクルされたPETの消費者にもなりうる）だからです。すべてのアプローチは、有益な結果を提供し、一つまたはその他のアプローチの選択は、主に製品の廃棄時の経済的或いは政策的牽引力によるところが大きいです。

p.30

事例

配分アプローチの選択：DOMO Chemicals社の事例

一次原料を用いた樹脂と高品質にリサイクルされた樹脂（Technyl®4earth®）の二つのポリアミド66ベースのエンジニアリングプラスチックを用いたライフサイクルの比較評価



図 13：自動車用エアバックを製造するためにコーティングされたディスクのスクラップから生成された高品質のポリアミドの再生

この LCA 事例は、DOMO Chemicals 社の Move 4earth®技術についてです。この技術はエアバックの生地を裁断からできる端材から高品質にリサイクルされたポリアミド 6.6 を製造する技術です。この端材（製造時の廃棄物）は、エアバックが安全に作動するという性能特性を確保するシリコンコーティングしたポリアミド 6.6 織糸で構成されています。

このシリコンコーティングを除去するための革新的な分離技術の使用により、Move 4earth®工程が非常に高品質なポリアミド 6.6 ポリマーの再生を可能にしました。非常に高品質なポリアミド 6.6 ポリマーは、高性能なリサイクルされたポリアミド、Technyl®4earth®のための主要な原料として使われています。この LCA 事例では、サーマルエンジン自動車用燃料のフィルターの筐体の製造に使われるリサイクルされたポリアミドと同じ性能のバージン原料で作られたものとの製造工程の環境性能を調査しています。

LCA 結果は、Move 4earth®分離プロセスによる再生ポリアミドは一次原料から製造されたポリアミドと比較して、GHG 排出量が 32%削減されました。

この比較は、仕様が同一（安全マージン係数、寿命など）である 2 つの燃料フィルターの筐体の「ゆりかごから墓場 (cradle-to-grave)」までのライフサイクルに基づいています。

環境への影響のどのくらいの割合を生地の端材に割り当てるべきか？

この事例で取り上げられた一つの重要な課題は配分の問題です。一次製品（コーティングされたポリアミド 6.6）の製造による環境への影響は、エアバッグディスクと生地端材の間で適切に配分する必要があります。

あります。

感度分析では、次の三つの可能な配分アプローチが考慮されます：

1. 主なアプローチ：カットオフ。バージン生地製造の影響は、エアバッグファブリックディスクに完全に配分されます。生地の端材への負担はありません。このアプローチは、この事例で最も適切であると考えられるアプローチです。
2. オプション1：経済的配分。バージン生地製造の影響は、それぞれの経済的価値に基づいて、エアバッグディスクと生地の端材の間で配分されます。
3. オプション2：生地の製造及びリサイクルの両方のステップからの影響の経済的配分。これを行う理由は、生地の端材をリサイクルするには、エアバッグに必要なコーティングを取り除く必要があるということです。この除去ステップは環境への影響を与えるため、それらをエアバッグディスク自体に部分的に起因させることが正当化される場合があります。このアプローチは、より広い「システム」の観点を取り込みます。つまり、システム全体の影響を、エアバッグディスクとリサイクルされたポリアミドの両方の最終製品に配分します。

注記：この事例では、質量に基づく配分は適切ではありません。生地の端材は、エアバッグファブリックと同じ単位質量あたりの影響を担います。これは、紡績、サイジング、織りなどのプロセスが含まれているため、一次ポリアミド（新規の原料から新たに作るポリアミド）よりも高くなります。これらのプロセスはエアバッグファブリックの製造に必要ですが、リサイクルポリアミドには必要ありません。

主なアプローチでは、生地の端材はリサイクルされる廃棄物とみなされます。上記の「オープンループシステムまたはクローズドループシステムの両方の一般的な配分アプローチ」（原文 32 ページ）で説明したように、カットオフは、需要が少なく、廃棄物の供給が多い状況で一般的に使用されます。これは、「2つの連続する製品ライフサイクル間の配分」（原文 29 ページ）のセクションで引用した例とは少し異なり、生地の端材は「未使用のスクラップ」となります。（端材となったが、生地そのものは使用されていません。）

p. 31

しかし、この「新しいスクラップ」は、当然のことながら共産品ではなく廃棄物とみなされます。それは、Move 4earth®リサイクル技術は、エアバッグ製造プロセスの後に開発され、この既存プロセスによる制約をすべて修正することなく統合しています。すなわち、カットオフアプローチは適切で、この事例で実際に実施されているアプローチです。

オプション1では、生地のスクラップは廃棄物としてではなく、エアバッグ生地ディスクとして共産品と見なされます。生地製造プロセスのインパクトは、経済価値に基づくディスク切断の操作の2つの共産品間で共有する必要があります。「多機能システムの共産品間での配分」セクション（原文 25 ページ）で説明されているように、物理的な関係（重量など）または相対的な経済的価値に基づいて実施します。

この場合、後者オプションにより、2つの共産品間の経済的価値の大きな差について正当な説明がなされています。このアプローチでは、市場価格の変動の可能性があることに注意する必要があります。

オプション2はオプション1と似ていますが、検討する2つの共産品がエアバック生地ディスクと再生ポリアミド(生地の端材(廃棄物)ではない)という点が異なります。このアプローチでは、ポリアミドからコーティングを除去する工程が全体のプロセスの一部であるとみなされ、切断したディスクとスクラップは二次ポリアミド6.6にリサイクルされます。これは、安全上の理由からコーティングされているエアバッグ生地の構成により、リサイクル工程上このステップが必要であることを反映しています。このアプローチでは、リサイクルの影響の一部は、エアバッグディスク自体に起因します。ここでも、配分は、オプション1と同じ理由で、エアバック生地ディスクと二次ポリアミド6.6の相対的な経済的価値に基づいています。

配分の前提条件は、計算された Technyl 4earth の環境上の便益に影響する

この結果は、カットオフ(主なアプローチ)から経済配分(オプション1および2)までのどの配分アプローチでも、Move 4earth®工程で得られた再生ポリアミド6.6は考慮したすべての影響について、一次ポリアミド6.6よりも影響が少なくなっていることを示しています。

図14は、気候変動の影響度に関する結果を示しています。カットオフアプローチが経済的配分(オプション1)に置き換えられた場合、算出された気候変動の影響度はわずかですが高くなります。実際、生地の端材の市場の経済的価値は現在、低いものの0ではありません。ポリアミドの生産負荷の割合は、環境負荷がないとするカットオフアプローチとは対照的に、生地の端材に配分されます。

一方、生地製造の負荷とリサイクルの負荷の両方ともがエアバックディスクと端材間で共有されるオプション2では、算出された気候変動の影響はオプション1と比較して減少します。これは、端材のリサイクルの負荷が端材自体とエアバッグディスクの間で共有される場合、リサイクル製品が環境に与える全体的な影響は減少します。

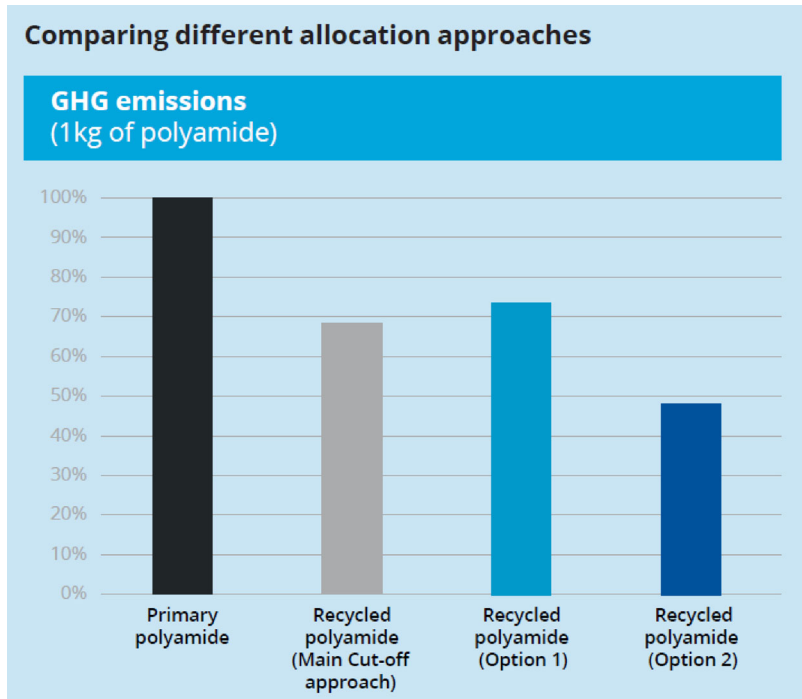


図 14：エアバックディスク（一次製品）と Move 4earth®技術テクノロジーを使用してリサイクルされる生地の端材との間の一次ポリアミド繊維製造の影響を配分するための方法の選択に関する感度分析の結果。主な選択はカットオフアプローチです。オプション1は、エアバッグディスクと生地の端材間の経済的配分である。オプション2は、エアバッグディスクとリサイクルポリアミドの間で、生地とリサイクル品の負荷の経済的配分です。

配分の正当化

この事例では、Move 4earth®プロセスが開発されるまでは端材は全く経済的価値がないという事実によって、カットオフアプローチが正当化されています。オプション2の配分は、より大きな削減貢献量を示唆し、また、エアバッグがスクラップを再処理するという新たな環境コストの一部になっている必要があるという考えから生じています。これは、リサイクルがいかなる生産システムにおいて不可欠な要素としてますます認識されることで正当化されます。

この選択肢は、配分の決定がリサイクルプロセスの履歴にいかに影響されるか、また、一次製品（エアバッグ生地のディスク）製造と連動または分離と見なすかを示します。

一次使用とリサイクルの間の相互依存の程度については、共有する環境負荷について大きな影響があるとともに、リサイクルされた製品の経済的及び環境的価値について議論の扉を開けることに注意を払うことが重要です。また、端材/廃棄物の経済的価値は、最終的に安定した平衡に達するまで、リサイクル可能な素材の需要の急増に伴い、高まるでしょう。

www.domochemicals.com

More on study: <https://bit.ly/2Q7z0Cs>

オープンループシステムとクローズドループシステムの一般的な配分アプローチ

便益と負荷を連続するライフサイクルにいかに関与するかは、市場におけるリサイクル制度の確立に密接に関連しています。市場は、リサイクルに影響を及ぼすと同時に市場の供給と需要によって影響を受けます。マテリアルリサイクルによって PET ボトルからポリエステル生地を製造する循環型ソリューションの例を考えてみましょう。原材料として使用される廃棄 PET は初期原材料の抽出および変換での環境負荷はある意味ありません。ただし、この廃棄 PET はプラスチックボトルから新しい加工可能な材料に変換する必要があります。そうすると、誰が環境負荷（排出）または廃プラスチックボトルを使用して再生 PET を製造することで得られるメリットに対して責任を持つのでしょうか？その答えは、廃棄時に選択した配分のアプローチによって異なります。これは、リサイクル可能な材料の供給と需要のバランスによると言えます。

- リサイクル可能な材料（廃棄 PET など）の供給が需要より多い場合は、製造品に再生材料の使用量を増やすことは理にかなっていません。この場合、配分アプローチは、リサイクルによる便益をリサイクル素材の使用（例えば、リサイクルペットボトルからポリエステルにする製造者）に帰属させるべきです。
- リサイクル可能な材料の需要が供給より多い場合（廃アルミニウム）は、一次製品廃棄時に再生することが望まれます。ここでの望ましい配分アプローチは、リサイクルによる便益をリサイクル可能な材料の製造（例：アルミニウムを生産する）に帰属させます。

この2つの視点から、図 15[引用 17]に示すように、ライフサイクル間の負荷と便益の配分を3つの主なアプローチとして定義できます。

3 ways to share environmental impacts between the primary and the recycled product

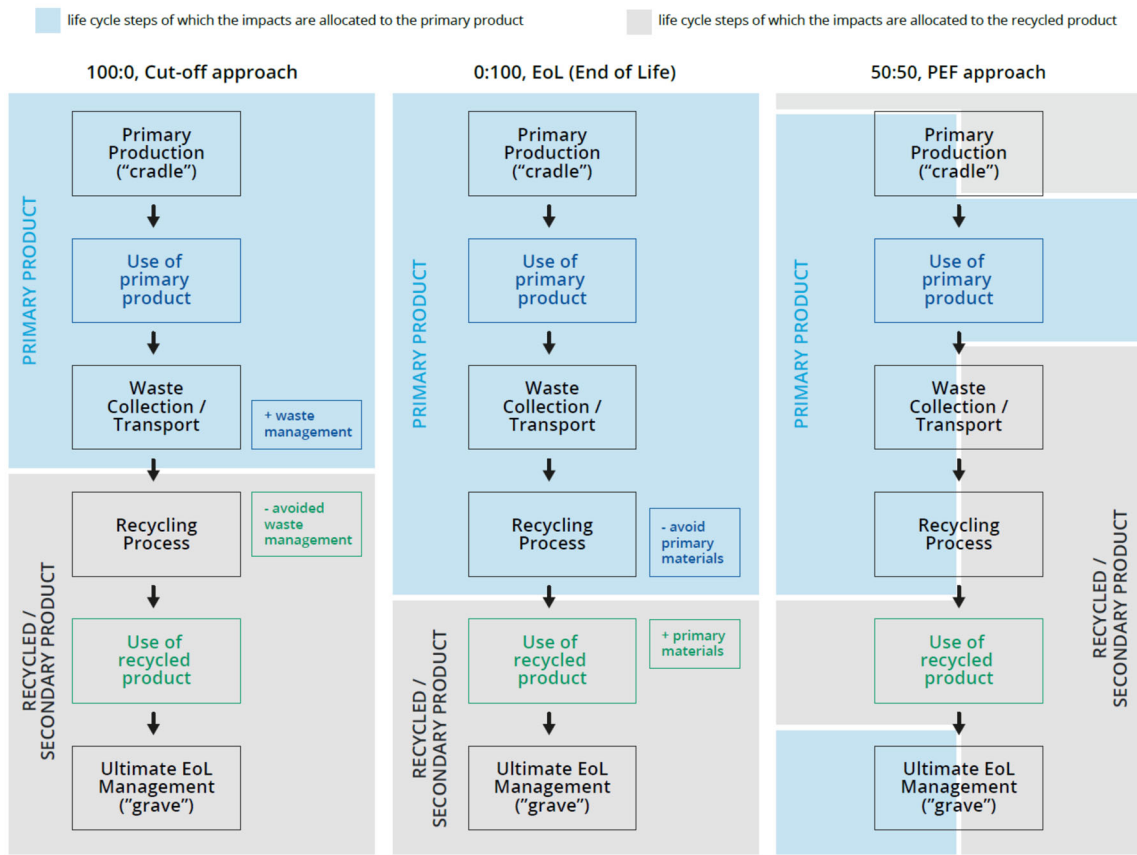


図 15：一次と二次サイクルの間の LCA の負荷と便益の主な配分アプローチ。

100 : 0 アプローチ又はカットオフアプローチが次の場合、推奨されます。供給より廃棄物の需要が低い場合。このアプローチでは、リサイクル工程では負担のない原料を使うと考えます。

廃棄物の需要が供給より多い場合は、0 : 100 アプローチ又は EOL リサイクルアプローチが推奨されます。このアプローチは、リサイクルのすべての便益を廃棄時にリサイクルされた材料を生成する主要製品システムに帰属させます。2 番目のライフサイクル（グレーで表示）は、廃棄物は環境負荷がなく、リサイクル/二次製品を使用する負担を軽減します。

50 : 50、或いは PEF（製品環境フットプリント）アプローチで、一次と二次製品サイクル間で負荷と便益を共有します。

[引用 17]より編集

p.33

•**100 : 0 アプローチ**、（カットオフアプローチとも言う）は、廃棄物の需要が供給と比べて低い場合に推奨されます。このアプローチは、原料に伴う環境コストが発生しないとみなした二次製品のシステム（循環型ソリューションなど）は、環境上の負担がないとみなされます。このため、循環型ソリューションは、リサイクルのすべての便益を享受します。ただし、これらの便益のいずれも、リサイクルのために廃棄物を生成する製品システムには加算されません。このアプローチは、当然ながら、技術面や経済面の境界に沿っているため、適用しやすく、理解しやすいです。廃 PET ボトルをポリエステル衣料にリサイクルした例では、循環型システムは一次製品システムから廃 PET の破片フレークを受け取ります。この原料は、

負荷なしと見なされ、PET の破片フレークは、その破片フレークが循環型システムに投入される際は関連する環境への影響はゼロになります。一次製品のシステムは再利用可能な材料を生成しても価値を受け取らず、その価値は PET 破片フレークを製造するプロセスの影響に配分されることを意味します。

•**0 : 100 アプローチ** (EOL リサイクルアプローチとも言う) は、廃棄物の需要が供給よりも多い場合に推奨されます。このアプローチは、リサイクルのすべての便益をリサイクルされる廃棄物を生成する一次製品システムに帰属させます。これらの便益は、バージン原材料の更なる生産を削減する環境価値の形成に帰属します。リサイクルされた材料を新しい製品に作り替えるという循環型システムは、リサイクルによってもたらされる便益を全く享受せず、まるで未使用の材料を使用している場合のように負担を被ることになります。このアプローチを廃棄 PET ボトルをリサイクルしてポリエステル衣料にする例に適用した場合は、一次製品システム (PET ボトル) はリサイクル製品によって削減貢献できるバージンの PET 製品の量と同等の環境便益を受け取ります。リサイクル PET を用いる二次製品サイクルは、バージン PET と同様の環境負荷を被ります。

いずれのアプローチも簡単に適用でき、製品にリサイクル成分や廃棄時の回収を明確に推進しているリサイクル材料の市場における需要と供給のバランスにおいて、便利なアプローチです。ただし、そうでない場合は、廃棄物を生み出すライフサイクルとそれを消費するライフサイクルの間でリサイクルによる便益と負荷を均等に分担する中間的なアプローチが必要です。

•**50 : 50 アプローチ**では、リサイクルのメリットが一次製品と二次製品のライフサイクル間で均等に分担されます。一次製品システムはリサイクル素材を生成するための価値の半分を受け取ります。二次製品システムは、使用される素材の負荷の半分を負います。

•このアプローチを応用することで市場の現実をより正確に反映するために便益の共有をさらに調整ことができます。例えば、循環型フットプリント方式 (CFF : Circular Footprint Formula)⁴は、欧州委員会の製品環境フットプリントイニシアチブ (PEF : Product Environmental Footprint) の一部として開発され、リサイクル可能な材料[引用 18]の市場における需要と供給のバランスを示す要因/ファクター「A」を含んでいます。PEF による事例では、低いファクター (例 $A = 0.2$) は、供給が小さく、需要が大きい場合に推奨されます。一方、高いファクター (例 $A = 0.8$) は、供給が大きく、需要が少ない⁵場合に推奨されます。CFF は、二次製品は一次製品に比べ品質が悪くなるというダウンサイクルの問題に対処するための品質比も含んでいます。これらの品質比は、多くの場合、経済的側面 (二次素材と一次素材の価

⁴ 循環型フットプリント方式は、欧州委員会の製品環境フットプリントイニシアチブの一環として開発されました。製品及び素材の廃棄における環境負荷と便益の計算方法を標準化する目的で開発されました。製品及び埋め立て、焼却、リサイクルなどの素材の廃棄におけるリサイクル含有のモデル化に使われています。

⁵ ファクターA は、リサイクル材料の供給者と利用者間で負荷と便益を配分します。CFF 方式は、素材の利用者の需要と提供者の供給の市場現実性を反映することを可能にします。ファクターA が低い場合、リサイクル材料の需要が供給よりも高く、その工程の影響と価値は、主に材料 (金属など) を生成するライフサイクルに与えられます。反対に、需要が低く、リサイクル材は十分に入手可能な場合 (例 EOL タイヤ)、影響および価値のほとんどがリサイクル材料の利用者に配分されます。プラスチックの場合は、市場は均衡していると見なされ、欧州委員会は 0.5 の値を推奨しています。

格比)あるいは関連性がある場合は物理的側面に基づいています。

ライフサイクル間でリサイクルの便益を共有することによる中間的なアプローチは、新製品にリサイクルの推進とリサイクル素材を含めることのバランスを提供します。これは、特に、市場の状況が明確でなく、かつ、一つの要因でなくリサイクル工程全体を網羅するほうが最善である場合の循環型ソリューションに対して適しています。

クローズドループシステムの具体的な事例

クローズドループシステムでは、廃棄に達した製品がリサイクルされ、同じ性能を持つ同じ製品になります。PET ボトルはケミカルリサイクルにより同じ品質を持つ新しいボトルになる例です。また、アルミ缶が新しいアルミ缶になる例もあります。これらの例では、一次製品の製造には、廃棄時に何度もリサイクルにより再生成されるリサイクル材料の一部が使用され、同じ品質の二次製品を含んでいます。

p.34

このようなクローズドループシステムでは、「オープンループシステムとクローズドループシステムの両方に関わる一般的な配分アプローチ」の項(原文 32 ページ)で説明した配分アプローチが該当しますが、必須ではありません。その理由は、リサイクル可能な材料(例、PET ペレット)は、同じ製品システムによって使用および生成されます。また、複数の関係者間でリサイクルの負荷と便益を共有する必要もないからです。実際は、投入に必要なバージン材料の削減量を直接計算できるからです。廃 PET の回収と PET をペレットに変換するというリサイクルの負荷は廃棄時点で考慮することが可能です。

図 16 は、クローズドループシステムを示しています。そこでは、製品はリサイクル可能な材料 (R_1) の一部を使用し、廃棄時にはより多くのリサイクル可能な材料 (R_2) を生成します。最も単純なクローズドループシステムの例では、 R_1 イコール R_2 であり、このシステム内ではリサイクル可能な材料が継続して使用されます。リサイクルすることの負荷 (E_{recycled}) は含まれます。二次材料をリユースする便益は製品サイクル ($1-R_1$) で必要なバージン材料の削減量、つまり関連する負荷 (E_v) で説明されます。

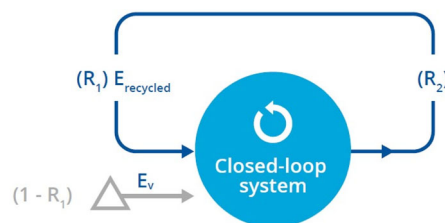


図 16: クローズドループシステムの概略図。このシステムでは、製品はリサイクル可能な材料 (R_1) の一部を使用し、廃棄時にはより多くのリサイクル可能な材料 (R_2) を生成します。二次材料をリユースする便益は製品サイクル ($1-R_1$) で必要なバージン材料の削減量で説明されます。

出典: Quantis (ScoreLCA 文書)

LCA のヒント マスバランスの加工・流通過程管理モデルによる炭素の把握

工場がリサイクル原料とリサイクルされていない原料を混合し最終製品を製造する場合、配分に関する新たな課題が発生します。ケミカルリサイクル技術を例にとると、マテリアルリサイクルと異なり、バージンと同等の原料を生成し、プラスチックを製造するために使われます。このプラスチックの製造は、既存のプラスチック製造から切り離して操業すると非常に大規模な設備投資が必要になります。そのため、ケミカルリサイクル技術は既存の設備に単純に接続させます。

バージン原料と混合したリサイクル原料は、最終プラスチックのリサイクル成分を分析することはできません。また、すべての製品はリサイクル原料の一部から製造されていると言えます。但し、原料と最終製品の物理的な関係を追跡することは可能です。ISO 22095 はマスバランスの加工・流通過程管理モデルについて解説しています。

マスバランスを用いた算出では、リサイクル原料は、一定のルール[引用 19]に従って、様々な最終製品に配分されます。これらの製品は「リサイクル」または「循環型」製品として遡及し、販売されます。

プラスチックメーカーから見ると、再生プラスチックは、別の原材料と同様に工場に納入され、他の原材料と混合し、様々な製品を製造します。「リサイクル」または「循環型」製品と見なされる製品の量は、工場に入荷した量と同じです。消費者の視点から見ると、「リサイクル」または「循環型」として販売されている製品とそうでない製品は別のもので、「リサイクル」または「循環型」製品はリサイクル工程に投資したプレミアム価格で販売されているとみなします。

p.35

事例

最終製品がリサイクルされた原料とリサイクルされていない原料の混合から製造された場

合の環境上の便益の配分：Eastman Chemical 社の事例

Eastman 社の炭素再生技術のカーボンフットプリント。石炭の代替として、様々な混合プラスチック廃棄物から合成ガスを生成する技術：「マスバランス」算出アプローチ

この LCA は、リサイクルされた原料とリサイクルされていない原料の混合物から固有の（中間）プロダクトを生成する場合の方法を適切に示しています。本事例では、Eastman 社の炭素再生技術(CRT)、すなわち混合プラスチック廃棄物より合成されたガス（以下「合成ガス」）を生成する上市されている分子リサイクル技術と同じ合成ガスの従来型製造方法とを比較しています。一酸化炭素と水素で構成される合成ガスは、新しいプラスチック樹脂、繊維、化学製品を製造するための「基礎原料」として使用されています。

CRT リサイクルに適した廃棄物原料の例として、使用済みポリエステル製カーペット繊維、未消費の架橋ポリエチレンの廃材、および工業用セルロース酢酸プラスチックの廃材です。これらの材料はどれも従来型のリサイクルには適しておらず、一般的に埋立て処分されています。これらを分子レベルまで分解することで、CRT 技術は、プラスチックの品質を損なわず、新しいプラスチック材料となる合成ガスに変換することで廃棄物に価値を与えます。

CRT のリサイクルプロセス（「改質」技術）は、石炭から合成ガスを製造する Eastman 社の既存の製造システムで行われています。CRT 技術を使用すると、合成ガス製造のために原料として使われている石炭と同じ量に相当するプラスチックの混合廃棄物に置き換えることができます。このプラスチックの混合廃棄物原料は 2020 年にはリサイクルされた実際の原料として幅広く使われています。カーボンフットプリントに着目した分析では、2 つの異なる由来より製造された合成ガス 1 kg を比較しています。気候変動影響は次の 2 つのアプローチに基づき配分しています。

1. リサイクル原料のカットオフアプローチ：廃プラスチックは環境負荷ゼロと見なす。

廃プラスチック原料は、環境負荷がない原料とみなされます。このカットオフアプローチは、廃棄物とみなされるプラスチックの経済的価値が低く、原料と最終製品の多様性があるために選択されています。CRT 技術は、多様な混合廃プラスチックをプラスチックと繊維にリサイクルします。

2. 生産された合成ガスのマスバランス：その一部はリサイクルとみなされます

既存の設備を活用して、Eastman 社の CRT リサイクル工程は、石炭から合成ガスを製造する既存の製造工程で実施しています。既存の世界規模の製造施設を活用することで、独立・分離した設備を建設するのに必要な大規模で非効率的な投資を回避できます。

合成ガス製品は、リサイクルされたプラスチックと石炭を含む混合原料を再生し得られた区別できない水素と一酸化炭素の混合物です。合成ガスの特定された量は、改修した工程に投入される廃プラスチック原料の量に基づき、リサイクル成分を含むものとして配分されます。これは「マスバランスアプローチ」であり、Eastman 社は ISCC PLUS の下で認定されています。一つは CRT 合成ガスのカーボンフットプリントの計算をする場合ともう一つは従来型の合成ガスのカーボンフットプリントの計算をする場合に、同じ数学的な帰属は使用されます。リサイクル成分を配分された CRT 合成ガスは、下流段階でのマスバランスアプローチでリサイクル成分を含むプラスチックや繊維を製造します。図 17 は、石炭をベースとした合成ガスのカーボンフットプリントと CRT 合成ガスのカーボンフットプリントを比較したものです。

CRT 技術によるリサイクルにより、廃棄物の輸送と前処理を考慮しても GHG 排出量が 20%削減されます。廃棄物原料が CRT 工場から半径 500 マイル以内から発生している場合、最も有利な条件での廃棄物の原料とみなされ、その場合の削減率は 50%になります。

石炭ベースと CRT ベースの混合物の合成ガスの実際のカーボンフットプリントは図 17 の 2 つの値の間

にあります。マスバランスは、この技術で得られるであろう最大の削減を示し、CRT 技術をさらに開発することの価値を示しています。

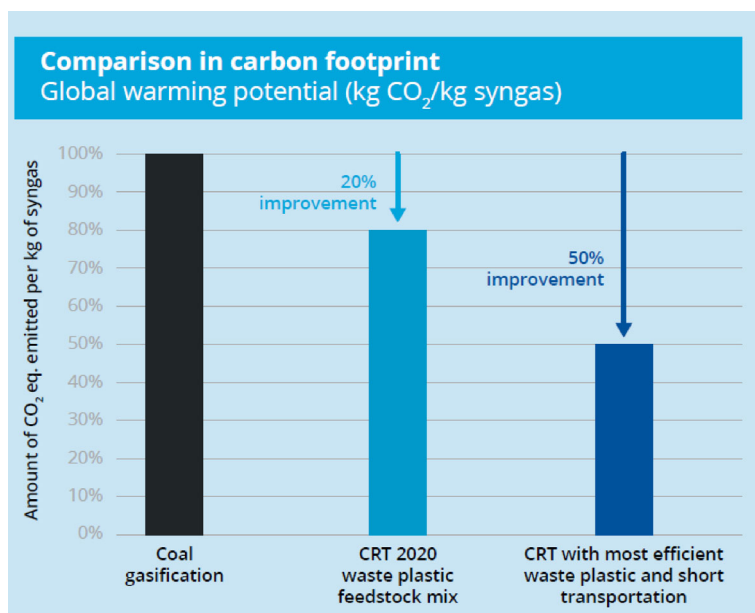


図 17：石炭からの合成ガスと再生原料からの合成ガスのカーボンフットプリントの比較です。これらの原料は、様々な廃棄物の発生源（水色）に対応しているか、プラスチック廃棄物の種類と場所（濃い青）の観点より有利なシナリオに対応しています。

www.eastman.com

More on study: <https://bit.ly/3t6uqTx>

p.36

状況の変化はいつ考慮すべきか

LCA を用いた比較（Comparative LCA）は、2 つのソリューションのどちらが、環境の観点から最適かを決定するために用いられます。ただし、LCA の結果は、LCA 評価の設定条件に依存しています。すなわち、例えば、より炭素の影響が少なくなるエネルギー構成の国で実装される場合とそうでない場合では、結果は異なります。新興の循環型ソリューションは、将来的には成熟したソリューションに発展するにつれて、特に状況の変化による影響を受けます。

考慮すべき重要な状況要素は次のとおりです。

- **グリーンエネルギー**：エネルギーの環境への影響は、再生可能なエネルギー源からであれば低くなります。エネルギー多消費の循環型ソリューションでは、よりクリーンなエネルギーからの便益は大きく、需要と同様に、将来的には低炭素エネルギーの利用可能性が非常に増加することが期待されます。
- **原料の供給とコスト**：多くの循環型ソリューションは、プラスチック廃棄物など、現在、豊富で入手しや

すい回収資源を活用しています。このようなソリューションが発展することにより、需要が増加し、原料の入手競争の激化にさらされる可能性があります。

•**新興技術**：循環型ソリューションは、まだ成熟していない新しい技術群をベースにしていることがよくあります。LCA は、データの欠落や新たな技術の効率改善の可能性に対応するように調整できます。

LCA では、各事例において上述した今後の発展の可能性、環境への影響が数年にわたって進化するという認識について言及しています。いくつかの事例では、単純な評価ではなく、LCA の結果について様々な状況変化の影響を分析する感度分析を実行しています。

グリーンエネルギーの供給を進める

電気または熱を使用するプロセスの LCA では、エネルギー源に由来する排出に影響を与えます。このため、エネルギー構成は、循環型システムの環境への影響に顕著な影響を与える可能性があります。特に再生可能エネルギー（再生可能電力やバイオガスなど）は、グリーンエネルギーと呼ばれ、石炭や天然ガスなどの従来のエネルギー源よりも気候への影響はるかに少なくなります。

ほとんどの場合、LCA 事例は、テクノロジーが実装されていて、グリーンエネルギーをある割合で含まれている国のエネルギー構成に基づいて計算されます。グリーンエネルギーのみを使用するプロセスの場合、エネルギーミックスは「100%再生可能エネルギー」と定義できます（詳細については、「循環型ソリューションがグリーンエネルギー供給からどのようにメリットをもたらすか」（原文 38 ページ）を参照）。

グリーンエネルギーは気候変動への影響が少ないため、グリーンエネルギーの需要の増加が LCA 結果においてエネルギー多消費ソリューションを正当化する方向に転換させるかもしれません。この転換は、多くの国が、全体の GHG 排出量を削減することを約束しているように、エネルギー構成全体におけるグリーンエネルギーの比率が継続して上がると想定されます。また、経済全体がカーボンニュートラルを目指しているため、今後数年においてグリーンエネルギーの需要が大幅に増加すると予想されます。

循環型ソリューションの LCA では、グリーンエネルギーの将来の利用可能性と需要を考慮することが大切です。実際、循環型ソリューションの LCA ではエネルギー構成が進化し、完全に実装されるという仮定の下に、運用されるまでには今後数年かかる可能性のある新しい技術に基づいて調査を行うことがよくあります。これは、いかにこのような潜在的発展を LCA に統合し、意思決定を最適化するか、その方法についての最初の質問につながります。

また、脱炭素エネルギーに関連した排出削減の要因に関する二つ目の質問にもつながります。すなわち、化石エネルギーの代わりにグリーンエネルギープロセスを基幹とする際、グリーンエネルギーの生成に積極的に関与せずに排出削減を主張することはできますか？という質問です。

将来的にグリーンエネルギーを利用できるようになると、循環型ソリューションの環境上の利点が変わる可能性があります

将来予測的な循環型ソリューションの LCA 評価は、その循環型ソリューションの発展をさらに後押しするかどうかを判断する上で役立ちます。関連する革新的技術とパートナーシップの関与によって、その技術が完全に成熟して導入されるまで進化し続けることが期待されています。その時点までにエネルギー構成にはグリーンエネルギーが大きな割合を占める可能性があり、排出量は少なくなるでしょう。

よりグリーンなエネルギー構成は、循環型ソリューションと非循環型ソリューションの両方に便益をもたらしますが、大量のエネルギーを必要とするソリューションでは、排出ガスの削減のための負担が相対的に大きくなります。例えば CCU では、水素を使用して CO2 を活性化することができますが、水素自体は製造するのにエネルギーコストがかかります。エネルギーの環境への影響が減少すれば、水素製造の環境影響も小さくなり、さらには、CCU 技術の環境影響も小さくなります。

また、国のエネルギー構成におけるグリーンエネルギーの割合が増加し、環境への影響が減少すれば、焼却などのエネルギー生産ソリューションの環境価値も減少します。例えば、焼却とケミカルリサイクルを2つのプラスチックの廃棄シナリオで比較すると、焼却は熱と電気の回収のための価値（クレジット）が計上されます。この価値は、国内のエネルギー構成による従来型の熱や電気の生産を回避（削減）することに相当します。国のエネルギー構成による影響が減少するにつれて、焼却に起因する価値も低下することになるため、プラスチックの廃棄時のケミカルリサイクルが期待されています。

p.37

状況の変化について知っておくべきこと

グリーンエネルギーの将来的な利用は、循環型ソリューションの環境上の便益が変わる可能性があります

循環型ソリューションは、開発初期段階の環境パフォーマンスを評価することがよくあります。つまり、完全に実装されるまで数年かかる場合があるということです。このため、このようなソリューションを LCA で比較する際には、将来的に様々なグリーンエネルギーの有効性のシナリオを検討する必要があります。エネルギー多消費の循環型ソリューションについては、影響が大きくなるかもしれません。多くの場合、このような潜在的な影響は感度分析によって検討されます。

グリーンエネルギーを購入するプロジェクトは、供給の増加につながりますか？

地球規模では、グリーンエネルギー源の開発により、エネルギー消費全体に対する気候への影響が軽減

されます。しかし、グリーンエネルギーを購入するシステムは、一般的にエネルギー供給の増加につながるわけではありません。このため、グリーンエネルギー源によるプロセスの LCA では計算に国内エネルギーミックスのものが使用されます。ただし、問題のプロセス自体が、グリーンエネルギーの生成に直接責任を負うことが示されており、そのグリーンエネルギーを使用する場合は除きます。

回収された原料の豊富さや不足は時間の変化や配分に影響を与える可能性があります

多くの循環型ソリューションは、豊富で経済的な価値がほとんどない資源（既存のプロセスからの副産物や廃棄材料など）を利用しています。これらのソリューションをさらに開発・実装することで、二次原料の需要が増加し、それに伴い、徐々に豊富さが減少し、価格も上昇していく可能性があります。これらの資源の市場は新たな均衡に達し、この新しいバランスを反映するように配分アプローチを調整する必要があります。

二次原料不足：長期シナリオを考慮

循環型ソリューションの基盤となる豊富な回収資源が不足するにつれ、入手も困難になります。そうなると、循環型ソリューションは、経済的にも環境的にも、収益性が低下する可能性があります。これはシナリオを用いて炭素を計算する場合に考慮することができます。または少なくとも結果の解釈において定性的に説明する必要があります。

循環技術の今後の改善は、シミュレーションや予測が可能

新しい循環型ソリューションの LCA は、現在の成熟度と環境効率を反映しています。一方、循環型ソリューションに対応する従来の技術は、広く導入され、すでに（環境や）経済規模による恩恵を受けた完全に成熟した技術であることがよくあります。循環型ソリューションのプロセス効率の向上は、考慮すべき重要な点です。公平な比較評価を行うには、循環型ソリューションの改善は、将来のパフォーマンスを評価するためにシミュレーションまたは予測によって可能となります。

新しい、または革新的な循環型ソリューション：データのギャップに注意

LCA 方法論は、データの入手可能性と重要度（Criticality）に応じて、平均データとプロセス固有データの組み合わせで評価します。特定のデータがない場合は、LCA データベース、文献、またはシミュレーションから取得した代替データ（surrogate data）を使います。データギャップは、循環型ソリューションなどの新しい或いは革新的な技術を評価する際に特に頻繁に発生する可能性があります。このような場合（例：リサイクルプロセスのエネルギー消費量やプロセスの歩留まりに関するデータが無いなど）は、慎重に結論を出す必要があります。

p.38

実際には、エネルギー構成の変化は「感度分析」として検討されます。現状維持シナリオから完全に脱炭素化されたシナリオへのエネルギー構成の移行を検討するために、複数の道筋を調査するシナリ

オ分析を実行することのある文献 [引用 8]は、推奨しています。もう一つのアプローチは、エネルギー構成を計算で再生可能なエネルギーに完全に置き換えることです。どちらのアプローチでも、エネルギー構成の移行を正確に予測することはできませんが、評価したソリューションがグリーンエネルギーへの移行によってどの程度影響を受けたかについて貴重な見通しを得ることができます。

グリーンエネルギーの供給から循環型ソリューションは、どのように恩恵を受けるのか

グリーンエネルギーは、エネルギー多消費プロセスの環境パフォーマンスを向上させます。循環型ソリューションは、エネルギー多消費ではあるが、化石の原料を使用しないので、利用可能なグリーンエネルギーの増加は支持されます。

グローバルレベルでは、グリーンエネルギーの開発はエネルギー産業からの排出量を削減することにつながることは明確ですが、この排出削減量を認定されたグリーンエネルギー利用者と、単に国のエネルギー構成を使用する利用者との間で、どのように配分するかについては、まだ議論が続けられています。

1つの選択肢は、グリーンエネルギーに関連する削減された排出量をグリーンエネルギーを使ったプロセスに完全に帰属させることです。例えば、ケミカルリサイクルプロセスで 100 kWh の従来型エネルギーを使用する場合、そのエネルギーを再生可能エネルギーに切り替えることで、プロセスのエネルギー由来の排出量が削減されます。このアプローチは、感度分析としてよく使用されます。プロセスの LCA は、まず従来のエネルギー源を考慮して実行され、感度分析で再生可能なエネルギー源に置き換えられます。計算により算出された排出削減量の大きさは、プロセスのより環境に優れた成果にグリーンエネルギーがいかに関係しているかを示します。

ただし、プロセスの電源として 100%グリーンエネルギーの電力を購入しても、再生可能な発電所がエネルギー消費に伴う排出量の削減という理由で特別に建設されない限りは、全体的な電力の供給量は増加していないことになります。むしろ、別の顧客からのグリーンエネルギーを転用しただけにすぎません。このため、多くの場合、グリーンエネルギーを電源とするプロセスの LCA において、国のエネルギー構成を用いることが推奨されています。

例えば、CCU(CO₂回収利用)の LCA に関する EU の推奨事項では、「結果として生じる (Consequential) モデルに沿って、CCU プラントを含む追加の電力消費が既存の再生可能エネルギー設備から再生可能電力を要求できるようにすることは、LCA 内では許容されない」と規定しています。そのプロセス専用にグリーンエネルギーを生成するような特別な評価の場合でのみ、現場または電力購入契約を通じて、LCA は 100%グリーン電力を考慮することができます。ただし、製品のカーボンフットプリントについての ISO 14067 を含むその他の規格および基準は、より広範な状況における LCA でのグリーンエネルギーの

使用を支持しています⁶。したがって、LCA レポートを読む際には、グリーンエネルギーの LCA 評価のために選択されたアプローチに留意することが重要です。

LCA の目的が循環型ソリューションとそれと等価の従来型ソリューションを比較することである場合、2つのソリューションを公平に比較するために、2つのソリューションが同じエネルギー源を使用していることが重要です。実際、1つのソリューションが再生可能エネルギーを電源とし、もう1つのソリューションが従来のエネルギーを使用している場合、LCA の結果は循環型ソリューションに偏ったものになります。比較を公平にするために、LCA は、両者の環境パフォーマンスの比較を真に反映するために、両方のソリューションが同じエネルギー源（例：国の電力網）を使用していることを考慮する必要があります。

原料の入手可能性と費用の多様性

回収された原料が十分か不十分かが配分の決定に影響

多くの循環型ソリューションは、既存のシステムの共産品（例：食肉加工からの廃棄される動物の脂肪など）や最終処分の廃棄物（例：廃プラスチック）として生成される金銭的価値がほとんどないが豊富にある資源を利用しています。これらの資源は有用性がほとんどないため、安く、豊富で、実際は、処分にも負荷がかかります。これらの特性が、現在の循環型ソリューション開発の推進力となっています。

循環型テクノロジーの成熟に向けた進化、或いは新しいソリューションが開発されるにつれて、前述の金銭的価値がほとんどないが豊富にある資源を相当な量を使用することになります。そのため、時間の経過とともに、供給と需要のバランスが変化し、コストも変化します。また、その逆も起こりえます。回収の仕組みが確立するに伴い、ほとんど回収されていない原料が豊富になるなどです。LCA では、このような市場による作用は、配分の決定を通じて結果に影響を与えます。

これは、多機能システムの共産品の場合に当てはまります。この場合、共産品の相対的な経済的価値に基づいて、負荷と便益が配分されることがよくあります。このアプローチは経済的配分と呼ばれ、「多機能システムの共産品間の配分」（原文 25 ページ参照）で詳しく説明されています。例として、砂糖の生産の副産物であるサトウキビ搾りかすから製造されるエタノールがあります。サトウキビの搾りかすは一般に、経済的な価値がほとんどない廃棄物とみなされます。一方、砂糖は非常に価値のある製品です。このため、サトウキビ栽培の影響の経済配分は、そのほとんどが砂糖に帰属し、搾りかすには帰属しません。搾りかすの需要が増加した場合（エタノール生産のためなど）、搾りかすの経済的な価値も増加します。これは、サトウキビ生産の影響の大部分が、搾りかすに起因するという配分に移行することになります。

⁶ ISO 14067, 14021 and 14026 for further guidance を参照

事例

エネルギー源の進化：Braskem の事例

環境に配慮したエチレン酢酸ビニルと化石原料由来のエチレン酢酸ビニルの LCA

この LCA では、バイオベースのエチレン酢酸ビニル（EVA）（以下「グリーン EVA」）と従来型の化石原料由来生産工程で製造されたエチレン酢酸ビニル（以下「化石 EVA」）とを比較し、環境への影響を評価しています。EVA は、エチレンと酢酸ビニルから製造され、広く使用されているポリマーベースの素材です。この LCA は、LCA 算定でどのようにグリーンエネルギーの問題に対処できるかを示しています。

「グリーン EVA」のシナリオでは、エチレンはサトウキビから、酢酸ビニルは化石ベースです。「化石 EVA」のシナリオでは、エチレンと酢酸ビニルの両方が石油から製造されます。この事例は、ゆりかごからゲート（cradle-to-gate）までの評価です。このグリーン EVA と化石 EVA の比較検討では、使用時と廃棄時を含みません。これらの段階は同一条件であるためです。

「グリーン EVA」ソリューションによる発電

グリーン EVA のシナリオでは、サトウキビをエタノールに加工し、残りのバイオマスを燃焼させて発電します。そのため、グリーン EVA システムは多機能で、共産品としてエタノールと電気を生産します。多機能性は、システム拡張の変形、置き換えとして扱っています（「多機能システムの共産品間の配分」（原文 25 ページ）を参照）。

グリーン EVA のシナリオは、従来の供給源をバイオマスの残りかすの燃焼により得られる発電量、1.5 kWh に代替することで価値を得られます。本事例では、実施された国であるブラジルで運転されている天然ガスを使用した熱発電による発電所の電気を、バイオ電力に置き換えるものと仮定しています。この仮定は今のところ現実的であり、バイオ発電は熱発電に置き換えられることが期待されていますが、ブラジルのエネルギー構成は大きな変化の過程にあり、ブラジルにおいて熱発電は代表的とまでは言及できないことを本事例は認めています（ブラジルでは、グリッドミックスはすでに水力発電が大部分を構成しています）。このため、本事例ではグリーン EVA シナリオで代替される従来の電源について感度分析を実施しました。

この分析では、化石 EVA のシナリオは同じままです。しかし、グリーン EVA のシナリオは、搾りかすの燃焼による余剰電力が、100%の熱発電ではなく平均的なグリッドミックスに置き換える変更がされています。結果を図 18 に示します。

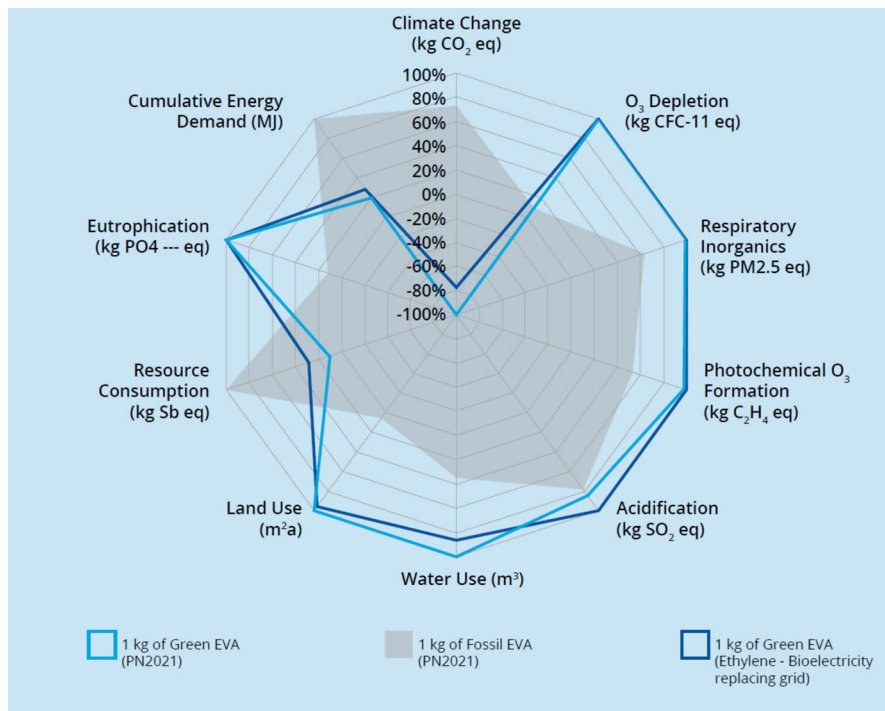


図 18: サトウキビの搾りかすの燃焼から得られた余剰電力により、電力グリッドミックスを置き換えることについての感度分析

参照シナリオ（化石 EVA）は、同じ（灰色の部分）のままです。オリジナルのグリーン EVA シナリオは明るい青色で表示されています。感度分析の結果は濃い青色で示されており、搾りかすの燃焼で得られる余剰電力が 100%の熱電力ではなく平均的なグリッドミックスに代わるグリーン EVA の製造に相当します。気候変動指標⁷については、化石 EVA のシナリオが最大の影響を及ぼしています。感度分析（濃い青色）は、オリジナルのグリーン EVA シナリオ（明るい青色）と比較してわずかに排出量が増加します。これは、グリーン EVA の余剰電力が平均的なグリッドミックスを代替する場合、熱発電を代替する場合よりも気候変動影響に対する利点が低いという事実を反映しています。

www.braskem.com

More on bio-based ethanol: <https://bit.ly/39Z6bPH>

p.40

寿命を終えた製品から得られる廃棄物原料では、市場が配分の決定に影響を与える可能性があります。実際、リサイクルによる環境への影響は、廃棄物を発生させている製品のライフサイクルとこの廃棄物から製造されるリサイクル製品のライフサイクルの 2 つのライフサイクルで共有する必要があります。ライフサイクル間の配分にはいくつかのアプローチがあります。これについては、「2 つの連続するプロダクトライフサイクル間の配分」（原文 29 ページ）で詳しく説明しています。一般的に使用されている

⁷ この事例には、環境への影響を示す 10 の指標が含まれています。

グリーン EVA は気候の観点からは明らかな利点を示していますが、他の環境問題に対する従来の代替案よりも影響が大きいことを示しています。

アプローチの1つである循環型フットプリント（CFF）は、廃棄物の供給と需要のバランスが配分にどのように影響するかを示します。CFFでは、市場の状況に応じて「A要素」が設定されます。多くの金属のように廃棄物の需要が高い場合は0に近く、繊維のように需要が低い場合は1に近くなります。循環型ソリューションで使用される資源（廃棄物）が利用しにくくなるにつれて、A要素を0に近い値に設定して、供給と需要の新しいバランスを反映する必要があります。

経済的および環境的な利益の減少

循環型ソリューションの基盤となる豊富な資源が不足してくると、資源の回収が困難になってきます。一般的に、循環型ソリューションは、入手しやすい資源（原料）、例えば、非混合の産業用プラスチック廃棄物やアンモニア製造からのCO₂排出などのように大量に流通しているものを使用することから始まります。入手しやすい資源（原料）がますます利用されるようになると、これまでは量が豊富でない資源（原料）や入手が困難な資源（原料）などの他の資源を検討するようになります。すなわち、プラスチックの含有率が低い都市固形廃棄物、もしくは産業用排ガスのCO₂よりもはるかに少ない濃度の大気中のCO₂も検討していくということです。

基盤となる資源（原料）が入手しにくくなり、費用が高くなるなど経済的な見返りが減少する現象に伴い、循環型ソリューションの経済的な実行可能性が低くなります。これは環境的な観点からも当てはまります。果物の包装施設からPET廃棄物を収集することは、輸送、仕分け、処理において多くの費用を必要としませんが、都市廃棄物に混合された状態からPET（ポリエチレンテレフタレート）を回収することは、物流的にも技術的にもより複雑なプロセスが必要になります。輸送、仕分け、処理の必要性が高まるにつれて、循環型ソリューション全体の環境への影響も増大します。

このため、製品の循環性を最大化することと、製品がもたらす環境への影響とのバランスを取る必要があります。自然に平衡状態へ到達するよりも前に最適なりサイクルの程度を判断することは困難です。この課題は依然として重要であり、LCA事例で少なくとも定性的に対応することができます。

新しい循環技術

循環型ソリューションは、これまで使用されなかった資源の（再）使用を可能にする新しい技術に基づいています。新しい技術に基づく循環型ソリューションは、多くの場合、既存のソリューションの代替として投資し続ける価値があるかどうかを判断するために、開発の初期段階で環境パフォーマンスを評価する必要があります。LCAは、その付加的な研究と開発を通じて、なお一層改善される可能性がある「環境ホットスポット」の早期検出に役立ちます。

LCAによる将来性の評価（Prospective LCA）は意思決定の指針となりますが、次の点に特に注意する必要があります。

•**データの可用性**：試行段階の技術では、そのプロセスの1つまたは複数の部分に関するデータが欠落している可能性があります。このようなデータの不足を補足する必要があります。

•**将来の技術的改善**：技術が試行段階から成熟段階に進化するにつれて、その技術はより効率的になり、環境パフォーマンスが向上します。LCA 事例では、参照する技術（この技術も時間の経過とともに進化する可能性あり）との公平な比較を行う必要があることを留意しなければなりません。

なぜ、データが不足していることが問題なのか

LCA 方法論では、そのアプローチの全体的な堅牢性を確保するために、水、エネルギー、原材料の入力に関するプロセス固有のデータに基づく必要があります。循環型システムの構成要素として、このデータの一部がまだ入手できない場合、LCA は代替データを使用して不足を補足します。この代替データは、LCA データベース、文献、産業連関表による国の経済データなどに基づいて推定することもできます。他のアプローチとして多くの場合、実際のプロセス固有のデータではなく、エネルギー関連の排出量を計算するプロセスシミュレーションが選択されています。

代替データは、LCA 事例において、調査対象の特定プロセスの代表性の乏しい結論をもたらします。このようなプロセス固有データが十分でないことは、特に試行段階の新しい循環型ソリューションにおいて生じる関連性の高い課題です。このような場合は、LCA 解析の品質を維持するために、データギャップを埋めることを推奨します。

例えば、EU の炭素回収・利用（CCU）に関する LCA ガイドラインでは、データのギャップを適切な代替データで埋めることができること、および「最良のケース」と「最悪のケース」の両方の仮定をテストする後続（subsequent）の「関連性チェック」を推奨しています。

ただし、代替データへの依存は最小限に制限する必要があります。「データ可用性の推進」（原文 42 ページ）で、データ可用性を向上させ、炭素 LCA を強化することの重要性について説明します。

p.41

潜在的な技術向上を考慮

LCA は、新しいソリューションの環境への影響を評価するための強力なツールです。しかし、このような新しい技術（およびその環境フットプリント）は、継続的な研究と潜在的な規模の経済性（利益）により、引き続き進化を続けていくでしょう。一方、従来から存在する技術はすでに広く普及した成熟した技術であり、環境及び規模の経済性による便益を享受しています。

新しい循環型ソリューションと従来型ソリューションを公平に比較するためには、その評価に循環型

プロセスを完全な成熟した技術まで高めることを考慮する必要があります。現在の試行段階の技術を成熟レベルでモデル化するためのアプローチがいくつかあります。

例えば、米国エネルギー省 (US DOE) は、ラボレベルの研究から商業規模に至るまでの成熟度に応じて技術を分類し、スクリーニングレベルの LCA から近似を可能にするプロジェクトレベルの LCA まで、現実世界の状況を反映した LCA に至る各レベルの LCA の期待値を示しています[引用 20]。

同様に、プラスチック生産における代替原料の比較 LCA に関する報告書で、欧州委員会の JRC は、「企業と業界は一般に学習曲線をたどるため、経験 (累積生産) が増加するにつれて効率と生産性が向上する」と述べています。この学習曲線は、プロセスシミュレーション、より高度なプロセスのデータ代表の生成、類似の成熟したプロセスの既存データの使用、または類似のプロセスでの改善を反映した「学習率」の適用によって説明できます。

これらの各アプローチは、見積もりとシミュレーションに基づいているか、検討した技術に正確に対応しない評価を生成するため不確実性と関連付けられます。さらに、LCA 事例全体に一貫して適用されるとは限りません。

多くの LCA 担当者は、算定に潜在的な技術を含めず、むしろ、結果の解釈において説明することを選択します。評価されたソリューションが直面する主な課題と全体的なパフォーマンスを改善するための主要な方策を詳述することが、すべての LCA において重要です。

p.42

LCA をいかに強化するか

LCA では、循環型ソリューションと従来型ソリューションとの比較を可能にする包括的で明確な環境プロファイルが作成されます。一般的な LCA 方法論は、従来型に対応するソリューションと同様に、循環型ソリューションにも適用できます。しかし、LCA 方法論の更なる発展は、その関連性を高め続けることを可能にします。

その他の影響カテゴリー (土地利用や水消費など) を含む LCA 事例により、循環型システムと従来型システムとの間の意思決定に関連する追加の洞察が得られます。また、新しい循環型ソリューションのデータ可用性の向上により、比較評価の堅牢性も向上します。最後に、LCA における共通の標準化された定義と方法論の十分な理解は、どちらもこの領域での将来の活動に重要です。

土地利用、毒性、水消費など、すべての関連する環境への影響を考慮

気候変動に関する循環型ソリューションに期待される便益を数値化するために、LCA 評価がますます

使用されています。また、環境影響の総合的評価のために、土地利用、毒性、水消費などの他の環境への影響も評価する必要があります。本書が紹介している事例は気候変動に焦点を当てていますが、前の章で説明したアプローチは、複数の基準（マルチクライテリア）による事例にも関連しています。

マルチクライテリア・アプローチは、インパクトカテゴリ間のトレードオフの可能性を特定するために推奨されています。新製品内の炭素を再循環させるための循環型ソリューションでは、炭素排出量は削減されますが、その結果、その他の影響が増加する可能性があります。

例えば、バイオ燃料です。エネルギーを生み出し、利用することに関連する GHG 排出量を効果的に削減しますが、その結果、より多くの農業への投入を生じさせることになり、その需要は毒性や土地利用の点から追加の負担が発生する可能性を生みます。これは、木材やトウモロコシなどの再生可能な資源からのオレフィンなど、他のバイオベース製品にも当てはまります[引用 21]。LCA によると、従来型のオレフィン生産に比べてバイオオレフィンの GHG 排出量は大幅に削減されますが、酸性化は農業原料の生産に対してより大幅に増大する可能性があります。その他の影響カテゴリは気候変動と同様に重要であり、バイオベースのオレフィンの製造などのトレードオフを特定する必要があります。これは、政策決定のための最適なガイダンスを提供し、可能であれば、これらのトレードオフに対する対策を立案するのに役立ちます。

データ可用性を促進

LCA 評価は、循環型システムの全体的な環境影響を計算するためのプロセス固有の環境データに依存します。データの完全性と品質は、その評価が確実であることを保証します。ただし、データの欠如は LCA では一般的な課題であり、特に、試行段階の循環型ソリューションではデータがほとんど入手できません。「新しい循環技術」（原文 40 ページ）では、これらのデータギャップと、結果の精度を高めるために LCA で対処できる方法について詳しく説明しています。

最終的には、データが不完全であっても LCA は有用な洞察を提供しますが、その価値は関連データに基づいた評価を行った場合に得られる確実に正確な結果にあります。そのため、化学産業を含むすべての産業分野でデータの可用性を促進することが、LCA の価値をさらに高める鍵となります。これは、現場での LCA 事例調査をさらに進めるために、関係者がデータを共有し、企業のネットワークを活用して、共同データベースを開発することで実現されます。もう 1 つのアプローチは、議論を促進するために特定の LCA を公開することです。

LCA の共通の基準は、前進するための方法を規定

すべての LCA は、前の章で説明した要素についての一連の方法論的決定（グリーンエネルギーの使用の配分や算定など）に依存しています。LCA を実施する担当者は、使用可能な様々な選択肢を検討し、事例の内容に応じて最適な選択を行い、これらについて明確に説明する必要があります。

多くのガイドラインや基準は、LCA の実務者が意思決定をするための支援として、また、様々な事例で得られた結果の一貫性を確保するために策定されてきました。これらのガイドラインは、CCU 技術[引用 8][引用 10]などについて、LCA 専門家を導くため、ある特定の産業界の取組みや、世界鉄鋼協会[引用 22]が鉄鋼産業のために作成したものなどに基づいていることがよくあります。欧州委員会の PEF（製品環境フットプリント）などの業界横断的な取組みも、セクター固有のガイドラインと調和させるために重要です。

既存のガイドラインや基準に基づいて方法論的な決定を行うことで、他のソリューションとの比較が可能となり、意思決定を支援するという点からもより大きな価値を提供できます。これらの基準が適用される一貫性とデータ品質の二つの要素は、LCA そのものを強化し、また、環境評価のための重要なツールとしての LCA の役割を強化するために重要です。

p.43

LCA をより堅牢にする方法について知っておくべきこと

マルチインパクト LCA が重要

循環型ソリューションの環境への影響と潜在的な便益は、気候変動以外にも拡張できます。土地の使用、毒性または水の消費など他の影響も考慮することが大切です。循環型でないシステムについては、マルチインパクト LCA が、様々な環境影響間のトレードオフを特定し、意思決定のためのガイダンスを提供し、これらのトレードオフに対する対策の潜在的な策定に役立ちます。GHG に関する前の章で説明した様々な方法論的な考慮すべき事項は、他の環境影響にも関連します。

新しい循環型プロセスのデータ可用性を促進

LCA 評価は、評価プロセスの重要な部分をプロセス固有のデータに依存しています。これにより、信頼性と全体的な品質が強化されます。そのため、新しい循環型システムのプロセス固有データの可用性を高めることが鍵となります。これは多くの場合、同じセクターの関係者間で共同データベースを開発するか、将来的に他の LCA 事例で使えるようにプロセス固有の LCA データを公開することで実現されます。これらのデータが公開された時点で、既存の LCA 事例を見直して、この新しい情報に照らして結論が有効であることを確認する必要があります。

循環型システムの LCA における共通規格が今後の方向性を規定

各 LCA は、配分の選択やグリーンエネルギーの使用を考慮するなど、一連の方法論的仮定に依存しま

す。LCA は成熟した方法論的分野ですが、循環性の側面に関する追加のガイドラインが継続的に公開され、方法論の選択肢を提供し、複数の事例で比較を可能にします。これらの規格の開発により、事例全体の一貫性が向上し続けます。基準をよく理解し、十分に受け入れ、現場で正しく一貫して使用するための適切なツールとなることが重要です。

この日本語訳については出来る限りオリジナルの英文の原文に忠実で、わかりやすい翻訳に努めましたが、日本語訳の内容に疑問等がある場合には、本資料 1 ページ目に紹介しておりますオリジナルの英文の原文にて、直接、内容をご確認いただくようお願いいたします。また、日本語訳は、原文の本文のみを翻訳しております。図については、基本的に日本語訳を行っていません。

今後の検討課題：

- ・ 炭素貯蔵の概念の整理：①製品への炭素貯蔵（プラスチック）と CCS を同等と見なしていいのか、②炭素貯蔵の時間枠の考え方
- ・ LCA における帰属的（attributional）と結果的（consequential）の概念の明確化
- ・ グリーンエネルギーへの転換がもたらす環境影響

Avoiding greenhouse gas emissions

The essential role of chemicals

Life Cycle Assessment of circular systems

Guide & case studies



International
Council of
Chemical
Associations

**The International Council
of Chemical Associations (ICCA)
is committed to playing
a key role in the systemic
transition to circular economy
as a key component of
sustainability.**



Disclaimer

The case studies included in this report illustrate the application of elements of Life Cycle Assessment (LCA) approaches, in the context of calculating the potential impacts for climate and greenhouse gas (GHG) emissions. The use of the case studies is illustrative only, and does not constitute an endorsement by the International Council of Chemical Associations (ICCA) for any particular product, process, supplier or vendor.

Preamble

The International Council of Chemical Associations (ICCA) is committed to playing a key role in the systemic transition to circular economy as a key component of sustainability.

From the design phase of products to their end-of-life, the chemical industry can offer innovative solutions to the benefit of the sector itself and throughout the value chain, encouraging and supporting downstream industries to become more circular.

As the association of the global chemical industry, ICCA supports the acceleration of the transition towards a more sustainable future thereby taking into account the following principles for a circular economy:

- Environmental and social sustainability need to be assessed when developing circular, viable business solutions.
- The full life cycle of products and processes should be taken into consideration to assess the benefits of innovative solutions
- Increased cooperation among value chain partners will be sought.

This document complements a series of studies by ICCA and its members companies, including a range of case studies and methodological documents, highlighting the importance of Life Cycle Assessments (LCA), especially when it comes to quantifying and reporting on the chemical industry's own footprint (scope 1 emissions), and the enabling role of its products in lowering CO₂ emissions in value chains.

The global chemical industry is committed to ensure that LCA methodology can handle the specifics of circular solutions in a robust way, enabling the comparison of circular solutions with their conventional counterparts. Circular systems enabled by the chemical industry are presented to illustrate how LCA methodologies are used to quantify overall emissions, as well as other impact categories (e.g. water, land, air).

This document explains the importance of using a LCA methodology to characterize the environmental benefits of circular systems, with a focus on greenhouse gases (GHG). This study by the consultant Quantis also underlines the need indeed to ensure that circular systems are beneficial overall, also regarding resource savings, environmental impacts, and societal benefits.

We hope this document will benefit decision makers to better understand LCA studies and use their results to select technologies and projects, and/or to orient policies and strategies.

M. Mensink,
ICCA Council Secretary

Executive summary

4

Part 1: Life Cycle Assessment of circular systems: Setting the scene

6

Executive summary 4

Introduction 8

- The advent of circularity 8
- Role of the chemical industry in circular systems 9
- Circularity as an accelerator to climate change mitigation 9
- Circular systems in this document 10

Measuring environmental impact through Life Cycle Assessment 10

- Life Cycle Assessment (LCA): How does it work? 11
- The key role of LCA in decision-making 12
- The importance of considering all impacts 12

LCA in the context of circularity 13

- Benefits of applying LCA to circular solutions 13
- From linearity to circularity: what to keep in mind 13

Part 2: What, who, when and how?

What?

What is the basis of comparison between circular and conventional systems?	16
Taking into account feedstock characteristics, multiple services and the context	16
Choosing the right unit of comparison between two systems.....	16
Comparability: do the two solutions provide the same service?.....	18
The timeframe of emissions: accounting for carbon flows	20
Accounting for delayed carbon flows.....	20
When is carbon storage considered permanent?.....	22
The specific question of biogenic carbon.....	24

Who?

Who bears the environmental burdens or claims the benefits of circular solutions?	25
Allocation between the co-products of a multifunctional system.....	25
Allocation between two consecutive product life cycles.....	29

When?

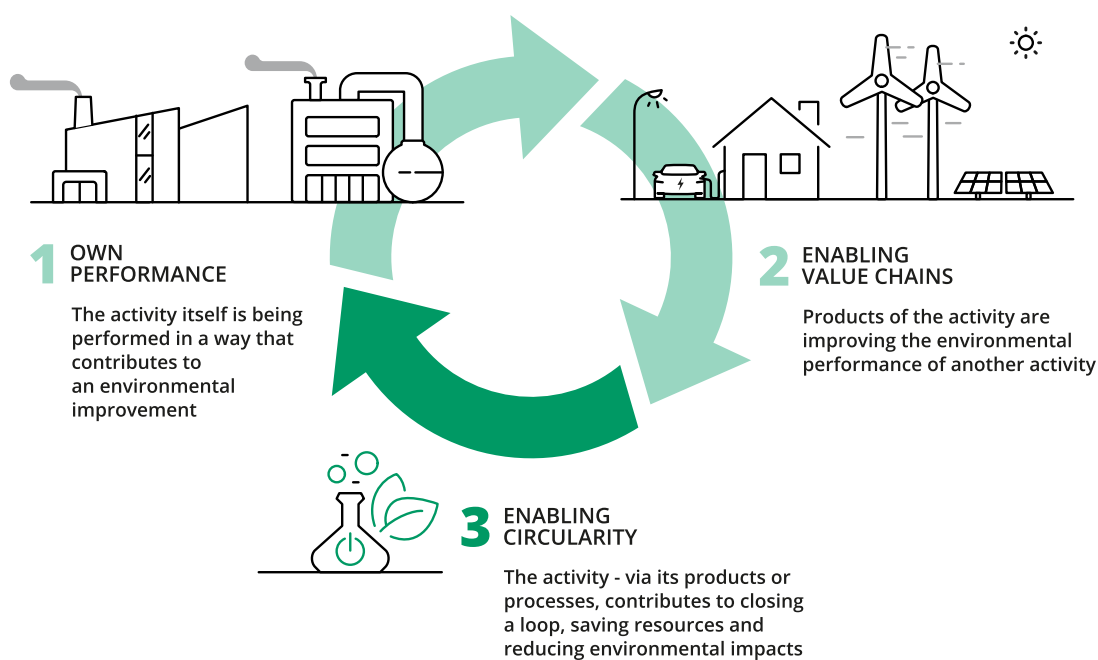
When to account for changes in the context?	36
Evolving supply of green energy	36
Future availability of green energy can modify the environmental benefits of circular solutions.....	36
How do circular solutions benefit from green energy supply.....	38
Variations of feedstock availability and cost	38
Abundance or scarcity of recovered feedstocks influence allocation decisions.....	38
Diminishing economic and environmental returns.....	40
Emerging circular technologies	40
Why scarce data is an issue.....	40
Considering potential technological improvements.....	41

How?

How to reinforce LCA?	42
Considering all relevant environmental impacts: land use, toxicity, water consumption,	42
Promoting data availability.....	42
Common standards in LCA define the way forward.....	42
Bibliography	48

Executive summary

The International Council of Chemical Associations (ICCA) is committed to playing a key role in supporting a circular economy as a key component of sustainability, whereby resources and materials are continuously cycled to eliminate waste while creating value for all. That is the reason ICCA, with the support of the consultant Quantis, has been working on several studies on Life Cycle Assessment which we consider an integral part of going circular.



Environmental impact and progress need to be viewed in a holistic way:
(1) from an industry's own emissions perspective,
(2) for the emissions it enables to avoid in the value chain, and
(3) for circular solutions it takes part in.

The environmental Life Cycle Assessment (LCA) is a widely accepted methodology to quantify the environmental impacts of a product or a technology. It is a holistic approach, covering the entire value chain of a given product and a wide set of environmental issues. Robust data, transparency of the analysis and comparability of results ensure the relevance of LCA as the go-to tool for decision-makers aiming to assess sustainable solutions (aligned with ISO standards).

By focusing on a single environmental issue – climate change – it is possible to understand how LCA methodology can be used to assess circular solutions, ensuring that comparisons between circular and linear solutions are as fair as possible.

This document addresses the key fundamentals when looking at LCA results for circular solutions:

- **The assessment should consider all services provided by each solution** being compared to ensure a fair comparison - especially important for circular solutions that often deliver several services at the same time, such as managing waste and producing new raw materials.
- **Accounting for variations in the type of feedstock and the quality of the output products** delivered by the two solutions enables LCA to make relevant comparisons and not to over- or under-sell one of them. Ultimately, it should aim to be material or technology neutral, wherever possible, especially when the material or technology has no significant impact on the final assessment.
- **Assessing each solution over a long timeframe** may help in accounting for any later environmental impacts such as delayed emissions occurring after temporary carbon storage.
- LCAs have the potential to reflect the environmental benefits and burdens of a solution as a whole. Avoided emissions due to increased circularity most often result from efforts by multiple partners. **Attributing changes in emissions to the complete value chain**, without subdividing between partners, gives a full picture of the benefits of circular solutions. Further methodology development and industry alignment will be required.

- If benefits must be split, or allocated, to enable an individual stakeholder to quantify their own contribution, **allocation approaches should be transparent, fair and justified**.
- As circular solutions develop, LCA results may also reflect **changes in context-dependent elements**, such as the local energy mix, process efficiency, or disposal/end uses options. Such changes may strongly impact the environmental performance of emerging circular solutions, and, to some extent, of conventional solutions as well.
- Future availability of **low-carbon energy** can be taken into account in LCA, especially for circular solutions that save resources but are energy-intensive. However, it must be transparent with the appropriate technology and economic feasibility assessment.
- LCA can also cope with **changes in the availability of recovered waste or by-products**, which may ultimately impact the environmental performance of the system.
- **Novel circular solutions will themselves continue to evolve** as technologies mature and recovery schemes are more widely implemented. Such elements should and can be taken into account in LCA calculations.

Overall, this report shows how LCA methodology can handle the specificities of circular solutions, enabling the comparison of circular solutions with their conventional counterparts. Future developments in LCA can further strengthen the central role it has to play in decision-making: a wider scope in terms of the environmental impacts considered, increasing availability of process-specific data, and a wider adoption of common approaches. This will further increase the robustness of LCA in evaluating circular solutions and their capacity to reduce the impacts of human activities on the environment.

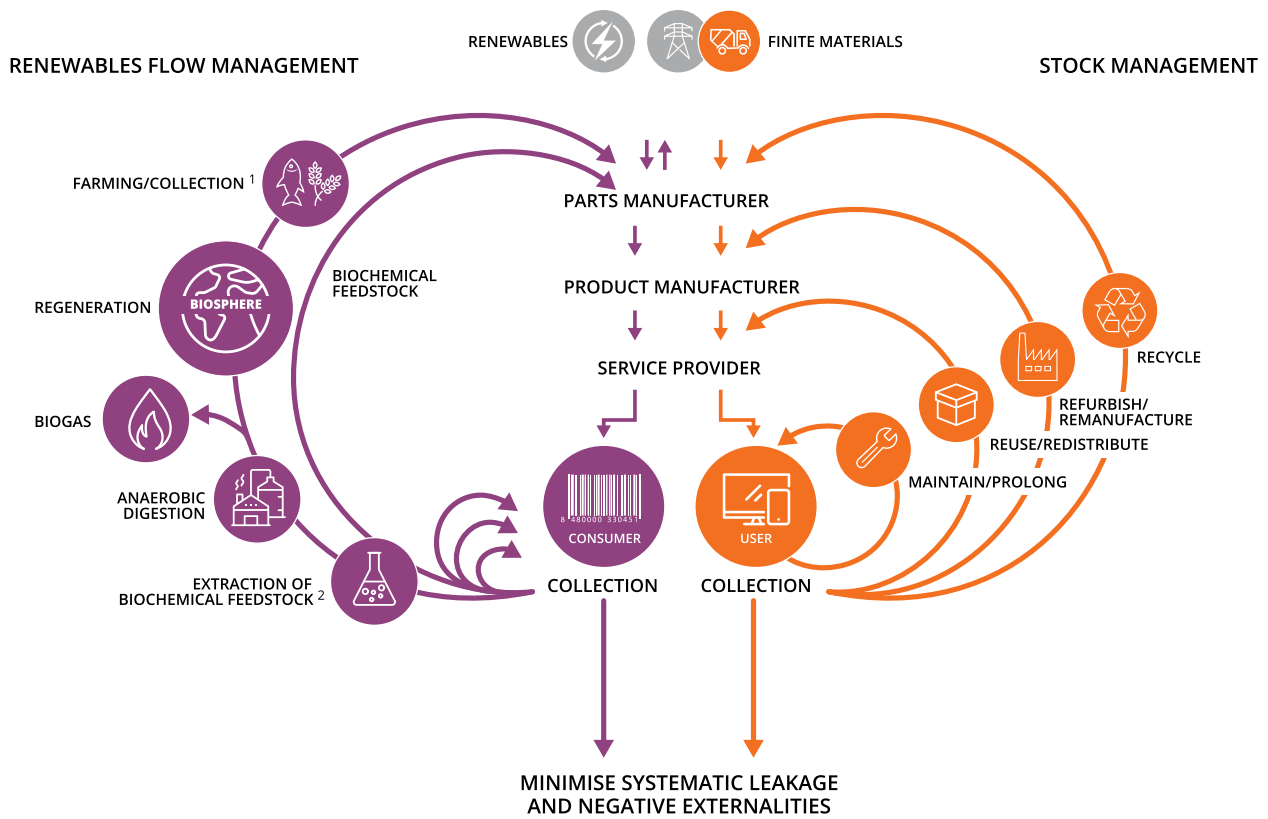
Part 1

Life Cycle Assessment of circular systems: Setting the scene

Introduction

The advent of circularity

Long-term value creation requires new systems that make less use of materials and energy, and enable the restoration of natural capital. In this respect, circular systems can offer attractive alternatives that businesses are already exploring today. The circular economy is one that is “restorative and regenerative by design and aims to keep products, components, and materials at their highest utility and value through cycles”^[1]. Such circular systems often seek to decouple economic development from finite resource consumption.



1. Hunting and fishing
2. Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input

Circular economy - the broader view: the circular economy aims to keep products, components and materials at their highest utility and value for longer times

Role of the chemical industry in circular systems

The chemical industry has a key role to play in circularity. With its capacity to transform molecules, it has the potential to contribute to circular systems in several ways. Recent research points to two main approaches the industry takes in order to transform to a more circular, sustainable model: (1) developing technology and business models to circulate molecules, and (2) enabling the circular economy in downstream industries [2].

Progress towards a circular economy relies on reusing, repurposing, recycling and recovery of value locked in materials traditionally viewed as waste. Initiatives by the chemical industry to foster circular systems in value chains, beyond their own fences, are countless, many of them already at industrial scale, and even a larger number in the development phase. These new technologies are real solutions to the challenges of:

- **Optimization of material use**
 - Optimizing energy consumption through the use of advanced catalysts and synthesis.
 - Recycling material losses or post-consumer waste in order to produce new materials [3]. This has led the chemical industry to recycle polymers from used car parts to make new ones, plastic bottles into phones, or hard to recycle mixed plastic waste to produce high-quality secondary plastic.
 - Reusing materials already present in the system, thus avoiding the production of new materials. Examples include solvent recovery or catalyzer reuse.
 - Chemically treating, purifying and separating waste materials to enable subsequent recycling. Examples include cleaning metals or packaging, and bleaching waste paper products.
- **Utilization of alternative feedstock**
 - Using waste as feedstock (e.g. production of Polyhydroxyalkanoate, a building block of certain bio-plastics).
 - Using bio-based feedstock to develop renewable materials (e.g. cellulosic bioethanol production from wheat/barley straw, chemically-mediated recovery of cellulose from lignin to make bioethanol or production of succinic acid from yeast).
 - Capturing carbon for re-use as feedstock through CCU (Carbon Capture and Usage) technologies. For example, CO₂ recovered from exhaust gases can be used to produce methanol, a key raw material with many applications.

Circularity as an accelerator to climate change mitigation

Chemicals are essential to greenhouse gas (GHG) and energy savings throughout the value chain and society. This comes in addition to what the industries dependent on chemicals can deliver towards carbon neutrality regarding their own process efficiency in terms of GHG emissions. Integration of such enabling roles in policy is gaining pace. In Europe, for example, the framework of the European Union's (EU) Green Deal recognizes that "an economic activity shall be considered to contribute substantially to climate change mitigation" by directly enabling other activities [4].

New circular technologies can bring additional environmental benefits on the product efficiency side, because using fewer primary resources also has the potential to reduce waste volumes and emissions to the environment. One way to look at the benefit of circular systems is through the lens of climate change. Increasing circularity of products, materials and molecules can be one of the approaches to climate change mitigation, because reusing materials allows to conserve the embodied energy and other valuable resources used to manufacture the virgin products.



Reduction of GHG emissions across the value chain, from manufacturing to consumption



Efficient **use of resources**



Regenerative **carbon technology solutions** (natural or CCS)

Three links between circular economy and climate change (adapted from Ellen McArthur Foundation, 2019) [5]

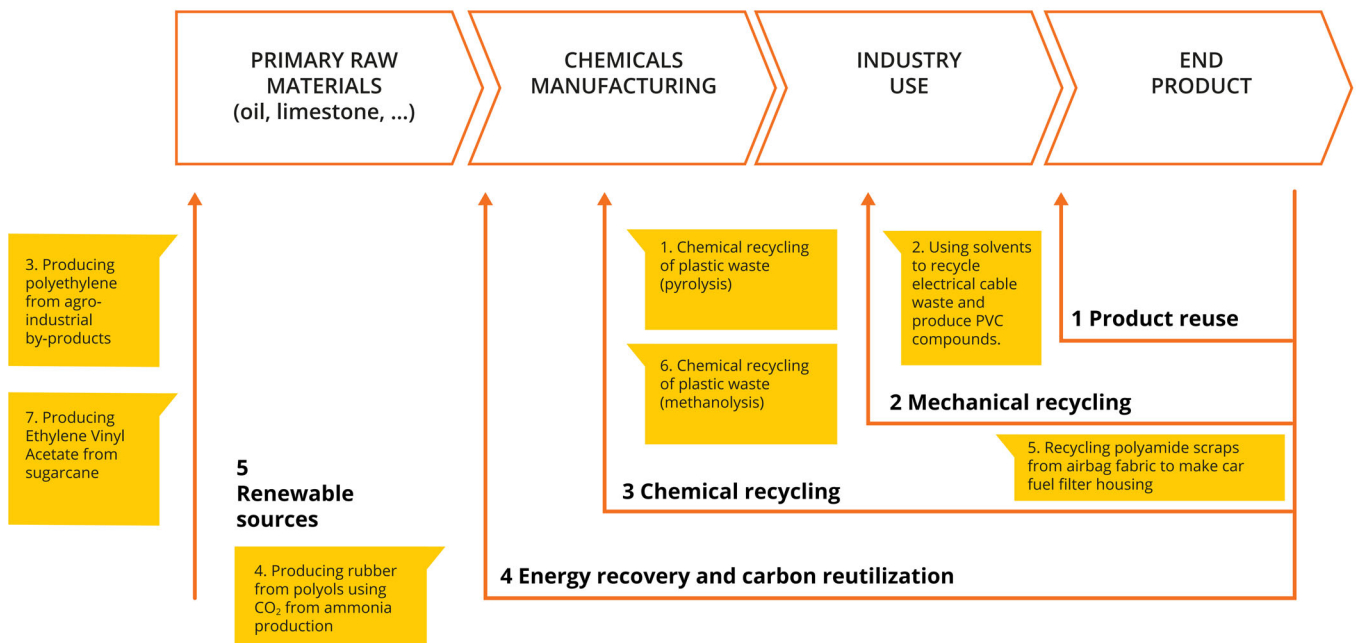
Circular systems in this document

The present document focuses on the accounting of environmental impacts and benefits generated by circular systems. A variety of case studies are briefly presented, each illustrating specific methodological approaches requiring attention in the case of circular systems. They also illustrate the diversity of circular systems and the potential for loops at many steps in the value chain. How questions posed by carbon accounting are solved in the presented examples is potentially valid for all environmental impacts, not just climate change:

1. Chemical recycling of mixed plastic waste by pyrolysis in order to produce virgin-grade polyethylene.
2. Using solvents to mechanically recycle electrical cable waste in order to produce PVC compounds.
3. Producing polyethylene from by-products of agro-industrial processes (waste animal fats from the meat industry and palm oil fatty acids from palm oil refining)
4. Producing rubber from polyols based on CO₂ captured from an ammonia production plant.
5. Recycling polyamide from airbag fabric scraps to make automobile fuel filter housing.
6. Chemical recycling of mixed plastic waste by reforming in order to produce syngas which is further used to produce a variety of plastic resins, fibers and acetyl chemical products.
7. Producing Ethylene Vinyl Acetate from sugarcane.

Measuring environmental impact through Life Cycle Assessment

The environmental Life Cycle Assessment (LCA) is a widely accepted methodology that evaluates and quantifies the environmental impacts of a product. Its holistic nature, which covers the entire value chain of a given product and a wide set of environmental issues, has made it the go-to tool for decision-makers aiming to develop sustainable solutions or looking for an effective communication tool.



The circular cases presented in this document illustrate the diversity of circular systems, with loops at various steps in the value chains

Life Cycle Assessment: How does it work?

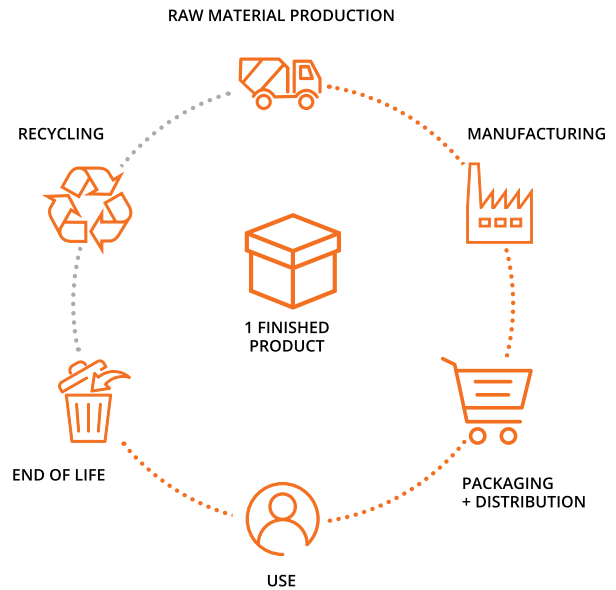
As companies and public authorities seek to ensure that their actions (purchases, investments, processes) are as sustainable as possible, it is necessary to rely on robust metrics to assess the performance of different solutions. The environmental Life Cycle Assessment (LCA) is a widely accepted methodology that evaluates and quantifies the environmental impacts of a product (e.g. climate change, water consumption) across a full product life cycle. It takes into account the consumption of resources (including energy) as well as emissions released to air, water, and soil. Environmental impacts are assessed throughout the life cycle of the product or the performed service, from the extraction of the raw materials necessary for its production all the way to its end-of-life, which LCA practitioners call from “cradle” to “grave”.

The approach used to perform LCA is standardized by ISO 14040 and 14044, which detail the key iterative steps to ensure the quality and robustness of any assessment. More information is provided in ICCA’s executive guide on “How to Know If and When it’s Time to Commission a Life Cycle Assessment” [6].

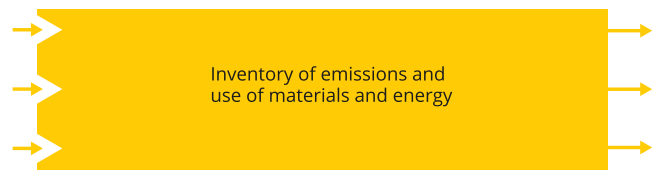
Overall, all practitioners must follow 4 steps:

- **Define the goal & scope** of the study. The goal includes intended audience and applications. Scope definition ensures that the scope of activities and the unit of comparison lead to a fair comparison between systems and reflects correctly the systems’ functions and services to society. The process is iterative and each step provides feedback for other steps of the assessment process.
- **Build the inventory** of emissions throughout all life cycle steps by quantifying the extraction and consumption of resources including energy (i.e. process inputs), as well as products, co-products and waste, and emissions released to air, water, and soil (i.e. process outputs). This step often requires combining data collected from primary sources with existing databases and credible assumptions. Data quality is paramount to guarantee the quality of any LCA and should be carefully considered when reading or carrying out this type of assessment.
- **Assess the contribution** of the system to different potential environmental impacts by using a Life Cycle Impact Assessment (LCIA) methodology. Impacts cover issues related to human health (e.g. toxicity, air pollution), biodiversity (e.g. ecotoxicity, land use), resource depletion (mineral and fossil) as well as more general challenges (e.g. climate change, water depletion).
- **Interpret the results** in order to provide a general overview of the main challenges faced by the assessed solution and detail key levers to improve the overall performance of the solution being examined.

LIFE CYCLE OF A PRODUCT



A. INVENTORY OF EMISSIONS (LIFE CYCLE INVENTORY)



Building the inventory of emissions throughout all life cycle steps by quantifying the extraction and consumption of resources as well as co-products, waste and emissions

B. LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT



The potential environmental impacts are obtained by calculation that “transform” emissions and uses from the inventory into their effects on the environment. The “impact categories” include climate change, human and eco-toxicity, ionizing radiation, and resource base deterioration (e.g. water, non-renewable primary energy resources, land).

The key role of LCA in decision-making

LCA are used to assess the environmental impacts that can be attributed to products and services. As such, LCA results help further improve processes, support policy by showcasing the most efficient solutions, and provide a solid ground for comparison between solutions delivering the same service.

LCA assessments of non-circular and circular systems give companies a better understanding of the main drivers behind the environmental footprint of their products. They are useful to communicate credibly about the environmental performance of any product, and to engage suppliers and customers. LCA can also guide eco-design efforts of a product: it can be used to assess the benefit of potential design changes, such as substituting a material or ingredient, incorporating more recycled content, or altering packaging. Furthermore, if a more sustainable product is designed, the product footprint results can be used to communicate credibly on the improvements, preventing the risk of greenwashing while enhancing transparency and comparability. A report published by the ICCA and the World Business Council of Sustainable Development (WBCSD) provides guidance on how to use LCA to measure, manage and communicate avoided emissions in systems involving chemical products [7].

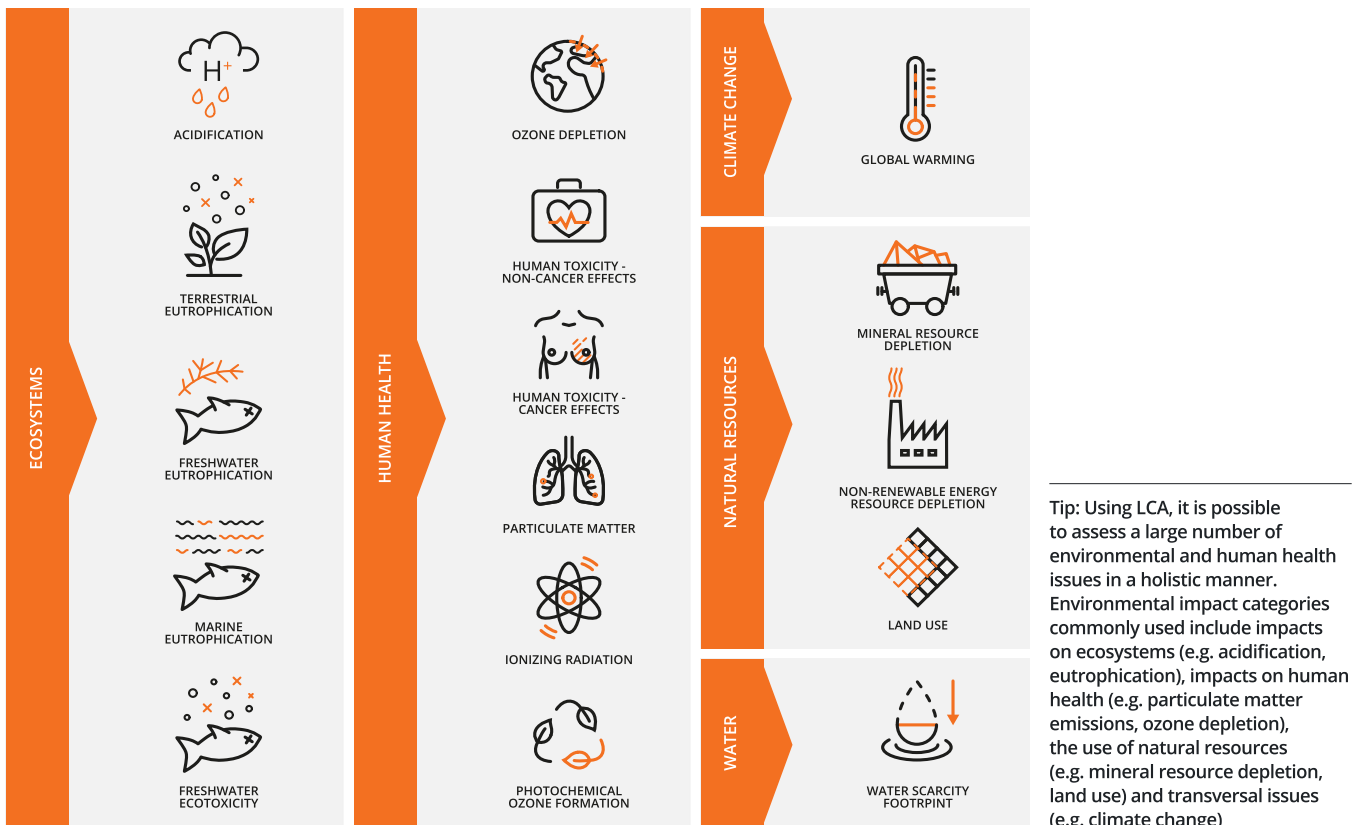
LCA is also gaining visibility in climate policies, since it is the preferred methodology to quantify the overall carbon balance of a system. All of these aspects have made LCA the go-to tool for decision-makers looking to choose solutions based on science.

LCA TIP: Life Cycle Assessments are most often “attributorial”

LCA are usually “attributorial”. They focus on the life cycle impacts that can be “attributed” to the product and compared to those of another product. Sometimes, it is necessary to instead take a “consequential” approach, which integrates the consequences of adopting the product/ service. For example, a consequential LCA of a carpooling service takes into consideration the fact that it causes a change in the market translating to a variation of traveling behaviors, with an overall increase of travelers and a switch to car pooling from other modes of transportation.

The importance of considering all impacts

Every LCA can provide insight into key environmental challenges associated with a product or service, even if the assessment focuses on a single impact category. A multicriteria approach is however recommended to unlock the full potential of LCA, and to check for possible trade-offs with other environmental impacts, for example when assessing solutions aimed at reducing GHG emissions via low-carbon solutions.



An example often highlighted is that of biofuels. While these can effectively reduce the greenhouse gas (GHG) emissions related to energy generation and use, the resulting demand for more agricultural inputs can lead to additional environmental burden for other environmental impact categories. Thus, a multicriteria approach is needed to fully understand the impacts on the environment and to take the appropriate countermeasures to avoid trade-offs.

LCA in the context of circularity

The fundamental principles of LCA apply as easily to circular systems as they do to linear ones: What can be measured, system definition, and in general most methodological approaches keep valid for circular systems. Also, as for linear systems, the GHG emission avoidance enabled by a circular system is equal to the difference between the emissions from the circular system and a reference system over a defined period of time. However, LCA has also been adapted in order to better account for the specificities of circular systems ensuring that comparisons between circular systems and linear ones are as fair as possible.

Benefits of applying LCA to circular solutions

In the context of climate change, research on circular systems is quickly gaining momentum in industry, academia and policy, leading to a vast number of promising technologies, for example in the fields of CO₂-derived chemicals, chemical recycling, fuels and minerals. LCA and techno-economic assessment (TEA), another assessment methodology that ensures the overall economic viability of a technology, are two essential methodologies for substantiating those technologies and guiding research and development towards commercialization [8].

LCA can be used to compare circular solutions to conventional ones in order to assess the environmental benefits associated with circularity. Because LCA provides a global overview of complex circular systems, it facilitates value chain discussions between stakeholders and helps decision makers identify the key success factors of a circular economy.

From linearity to circularity: what to keep in mind

LCA was developed with linear systems in mind, which is reflected in the nomenclature often used to describe the systems under assessment ("cradle-to-gate" or "cradle-to-grave"). In circular systems, as the mindset is circular ("from cradle to cradle"), the limit between processes which should or shouldn't be included in the assessment is less clear. Furthermore, several other characteristics of circular systems require special attention in LCA, such as the fact that they often provide multiple services (which makes it hard to compare to conventional solutions) or still under development (which hides the full potential of a technology). This mindset has led to some struggles by practitioners to apply LCA to circular systems, raising questions such as:

- How can a circular solution be compared to its traditional counterpart if they do not provide exactly the same service to society?
- How can the benefit of delaying emissions from occurring (for example by avoiding incineration of fossil-based materials which leads to carbon storage in the technosphere) be taken into consideration?
- If a circular system generates a product of interest but also other co-products, how much of the environmental burden should be attributed to the product of interest?
- When a product is recycled, should the environmental impact of recycling be attributed to the new product or the initial product? Should the new product receive credit for avoiding the use of virgin material?
- Can energy-intensive circular solutions use low-carbon energy to reduce their environmental footprint?
- How can LCA take into consideration the effect that changes in feedstock availability and cost could have on existing or innovative processes (e.g. energy consumption increases related to the use of less pure resources)?
- How can expected future increases in efficiency be taken into consideration in an LCA of a circular technology which is not yet at maturity?
- What are the key methodological or data-driven adaptations that are necessary to reinforce LCA and make it easily applicable to circular systems?

LCA has evolved to take into account these circularity questions with significant work underway to refine the use of LCA methodologies in the case of circular systems. Part 2 of this document addresses each of the above topics and aims to give an overview of the work carried out to answer the four main questions raised by LCA and circularity:

- 1. What** is the basis for comparison?
- 2. Who** claims the benefits and burdens of circular systems?
- 3. When** should changes in the context be accounted for?
- 4. How** can the LCA methodologies of circular solutions be further reinforced?

Part 2

What, who, when and how?

LCA is a useful tool to assess the environmental performance of a circular solution in comparison with a conventional counterpart. But to produce relevant results, the comparison must be fair. So it all starts with defining what should be the good basis of comparison. At the same time, life cycle avoided emissions almost always arise from efforts by multiple partners along a value chain, particularly for circular systems. So the question arises: Who bears the environmental burdens and who should claim the benefits of circular solutions? And when to account for changes in the context, as LCA results may be context-dependent: Results will vary depending for instance, on the energy-mix of the country where the circular system is operated. Emerging circular solutions are also particularly likely to be affected by changes as they develop into more mature solutions in the future.

What is the basis of comparison between circular and conventional systems?

Several elements must be kept in mind regarding the goal and scope of the study. For one, it is important that both systems under comparison provide the same function. Because circular solutions provide multiple services to society, they require adaptation of the scope of the study to ensure that all functions are taken into consideration. Furthermore, if the two solutions do not use the same feedstock (e.g. one waste management technology can only take in a subset of the materials taken in by the second technology), this difference should be accounted for in LCA. Quality variations in the output products of both solutions are also important to address.

Another element of a study's goal and scope is the timeframe of emissions considered. Emissions related to the solution under study are quantified over a given period of time, thus including delayed emissions (e.g. those occurring during the product's use phase, or at its end-of-life). Emissions occurring after this period are not accounted for, meaning that any carbon that has not been reemitted is considered permanently stored. The definition of this period's duration can have a significant impact on results.

Taking into account feedstock characteristics, multiple services and the context

Choosing the right unit of comparison between two systems

In order to compare two systems, it is necessary that they are both providing the same function. For example, it makes little sense to compare 1 kg of recycled plastic to 1 kg of recycled glass since, for an application such as making a milk bottle, the amount needed of each material varies. The two solutions must be compared on the basis of the same delivered service(s) – in this case, containing 1 liter of milk.

For this reason, every comparative LCA defines a common unitary service unit for the two systems under study, called the "functional unit". In the above example, the functional unit would be "contain and deliver 1 liter of milk from the milk processing plant to the consumer household". This common unit enables comparison between two different manufacturing technologies, or two different sources of raw material.

The choice of functional unit depends on the goal of the assessment and the subsequent comparison. Is the objective to compare manufacturing processes (e.g. production of fuels from CCU vs from a conventional source) or waste management technologies (e.g. chemical recycling vs incineration of mixed plastic waste)? Different study objectives lead to different ways of defining the functional unit [9].

- In a LCA of the same product manufactured in two different ways (delivering products with the same chemical structure, composition, or characteristics), the functional unit will simply be a unit of manufactured product, reflecting the characteristics of the product. For example, in an LCA of chemically recycled PET (polyethylene terephthalate), the functional unit would be 1 kg of PET (virgin-grade). This means environmental impacts will be quantified for 1 kg of PET (virgin-grade).
- For different products or processes producing similar services: the common functional unit should reflect the service provided. For example, in an LCA of a chemical recycling process using mixed plastic waste as feedstock, the functional unit would be "managing 1 ton of mixed plastic waste".

Very often, circular solutions provide more than one service. In the BASF case study (see page 19), for example, chemical recycling of plastic provides two services: it is useful to manage plastic waste, but it also generates raw materials to make new polymers. To assess these two functions jointly in LCA, the functional unit needs to include both services, such as "producing 1 kg of recycled PET **and** managing X kg of plastic waste". This approach, in which the multiple functions of the system are all included in a single LCA, is called system expansion. It is frequently applied in LCA involving multifunctional solutions. Its advantages and disadvantages as well as potential alternative approaches are presented in the next section and in section "*Allocation between two consecutive product life cycles*" (page 29).

All you need to know on how to choose the right basis of comparison when assessing a circular system

Choosing a common unit of comparison between two systems: the “Functional Unit”

To properly compare two systems with an LCA, they must provide the same services to society. Therefore, comparative LCA studies are based on a common unitary service. For example, if the aim of the study is to compare two waste management technologies, the common unitary service is “manage 1 ton of waste”. In LCA, this unitary service unit is called the “functional unit”. When defining the functional unit in an LCA, it is important to consider all services provided by the solutions under study. This is particularly relevant for circular solutions which often provide multiple services.

Comparing circular systems with different feedstocks, multiple services different contexts...

In comparative LCA involving circular systems, there are three situations requiring particular attention to ensure a fair comparison between the systems under study:

- **When one or both of the systems is multifunctional**, i.e. it provides more than one service to society. For example, chemical recycling is a way of handling plastic waste and producing raw materials for new polymers. In LCA, multifunctionality is dealt with through "system expansion", to ensure that the two compared systems deliver the same services.
- **When the two systems do not utilize the same feedstock**. This situation occurs when comparing two waste management technologies such as, for example, plastics pyrolysis and depolymerization which do not handle the same types of plastic waste. In LCA, comparability between the two technologies is made possible by applying system expansion. In this example, the expanded system includes the alternative end-of-life process (e.g. incineration) for the remaining plastics that cannot be recycled.
- **When the two systems produce materials of varying quality**. For example, chemical recycling may produce virgin-grade recycled plastic, whereas mechanical recycling may produce plastic of lesser quality which cannot be used for all applications. Quality variations are reflected in LCA results when the comparison between two systems is based on product functionality (e.g. low-quality recycled products are needed in larger amounts, as they can be used fewer times). Another approach is to apply a quality factor to the results.

Delayed carbon emissions: accounting for the full value of circular solutions

Many circular solutions avoid immediate emissions when carbon is only temporarily stored in a new product, such as plastic. Over the life cycle of these products, carbon that was initially recycled and stored is reemitted into the atmosphere. These “delayed” emissions are accounted for in LCA.

The value of such circular solutions lies not just in temporary carbon storage, but in the fact that they avoid the use of a conventional virgin raw material (e.g. recycled plastic replaces virgin plastic). Thus, the true value of circular solutions is appreciated through a comparison with their conventional alternatives.

Permanent storage of carbon

Many circular solutions lead to carbon storage within a product, such as a fuel or plastic. Temporary carbon storage leads to delayed emissions, which are accounted for in LCA. In LCA, carbon is considered permanently stored if it has not been reemitted within a certain timeframe, often 100 years.

Biogenic feedstocks

Carbon of biogenic origin is taken up from the atmosphere, bounded in plants and after incineration of bio-based products as end-of-life treatment released to the atmosphere. From a life cycle perspective this is carbon neutral and omitted from carbon accounting, while cradle-to-gate LCA often calculate the reduction of the carbon footprint due to the amount of CO₂ bounded in the bio-based product (as additional information).

The value of such biobased solutions lies not just in temporary carbon storage, but more importantly in the fact that they avoid the use of a conventional virgin raw material. Thus, the true value of bio-based solutions is appreciated through a comparison with their conventional alternatives relying on non-biogenic raw materials.

Comparability: do the two solutions provide the same service?

Three main aspects require specific attention in comparative LCA of circular solutions:

- The multi-functionality of the systems under comparison
- The feedstocks used by each assessed technology
- The variability of material quality between the compared solutions

Managing multi-functionality

Circular solutions are often multifunctional, providing more than one service to society. For example, they provide the service of managing waste or CO₂ emissions, while also generating recycled products reducing the demand for virgin materials. Without including all of these services in the study perimeter, it is impossible to account for any beneficial offsets, leading to unfair comparisons.

For example, an LCA comparing the environmental performance of chemically recycled vs fossil-based PET might use as a common functional unit “producing 1 kg of PET”. However, chemical recycling also ensures that a given amount of plastic waste is managed and leaves the waste stream. In order to fully understand the environmental implications of both solutions, the service of managing waste should also be included in the study, hence in the functional unit (ex. “Produce 1 kg of PET **and** manage X kg of plastic waste”).

LCA TIP: System expansion

In system expansion, the study boundaries are no longer limited to the single product or process of interest, but are expanded to include additional services (e.g. managing waste) in order to build two comparable scenarios. For example, to compare landfilling of plastic waste to chemical recycling, the landfilling scenario should also include the production of virgin plastic to compensate for the amount of recycled plastic which would have been produced in the chemical recycling scenario.

The two comparison scenarios are then defined as follows:

- Scenario A: Produce 1 kg of recycled PET **and** manage X kg of plastic through chemical recycling.
- Scenario B: Produce 1 kg of virgin PET **and** manage X kg of plastic through conventional waste management technologies (e.g. incineration and landfilling).

The scenarios are illustrated in figure 1.

In this example, chemically recycled PET and virgin PET were made comparable by applying the method of system expansion to build two comparison scenarios. System expansion is particularly useful in comparative LCA of circular solutions as they are often multifunctional¹.

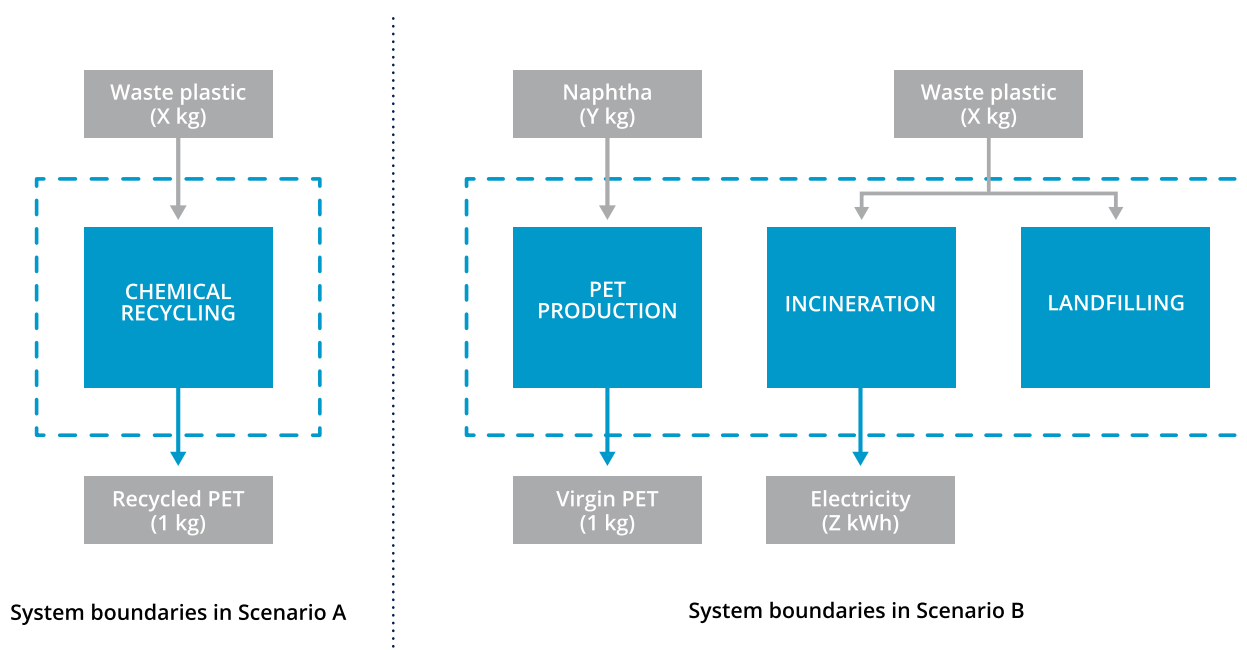


Figure 1: System boundaries in two scenarios for production of PET. Scenario A produces 1 kg of recycled PET. Scenario B produces 1 kg of virgin PET,

1. This approach provides a full comparison of circular systems, however it does not allocate the environmental benefits or burdens of a given process between the different stakeholders or life cycles being assessed. In the case of PET chemical recycling, the share of environmental burdens allotted to the producer of waste versus those allotted to the user of the recycled material are not discussed. Other approaches have been suggested if the goal of the study needs such an allocation; these are discussed in section "Allocation between two consecutive product life cycles" (page 29).

Assessing a multifunctional solution from different angles:

Evaluation of pyrolysis with LCA - 3 studies

This study assesses the environmental performance of plastics chemically recycled with the ChemCycling™ technology. This technology provides two services: plastic waste management, and production of new virgin-grade plastics. In this case, to assess the ChemCycling™ technology according to the multiple functions it provides, the authors chose to carry out three separate LCA each taking a different perspective and each with their own functional unit:

- **The waste perspective:** Comparison of pyrolysis (ChemCycling™) and incineration to treat 1 ton of mixed plastic waste
- **The material perspective:** Comparison of manufacturing 1 ton of plastics based on pyrolysis oil and 1 ton of conventional plastics from primary fossil resources (naphtha)
- **The plastics quality perspective:** Comparison of three end-of-life options: chemical recycling and mechanical recycling, which produce secondary plastics of different qualities, and incineration. Results of this assessment are not shown as they draw on concepts that are presented later in section "Role of the chemical industry in circular systems" (page 9).

These perspectives take into account the fact that ChemCycling™⁽¹⁾ manages plastic end-of-life,⁽²⁾ replaces fossil-based plastics, and⁽³⁾ produces virgin-grade recycled plastic unlike mechanical recycling. The two first assessment angles, i.e. the waste and material perspectives, are typical in LCA of recycling solutions.

From the **waste perspective**, pyrolysis via ChemCycling™ is compared as a waste management technology to incineration with energy recovery. The functional unit is therefore defined as the "management of 1 ton mixed plastic waste".

LCA results, shown on figure 2, indicate that pyrolysis of mixed plastic waste emits 50% less CO₂ than incineration.

From the **material perspective**, plastics produced with ChemCycling™ pyrolysis oil are compared to plastics produced with naphtha from crude oil. The functional unit is the "production of 1 ton of LDPE".

LCA results, shown on figure 3, indicate that CO₂ emissions are saved when manufacturing plastics is based on pyrolysis oil instead of naphtha. It should be noted, however, that the lower emissions in the case of ChemCycling™ result from displacing the incineration of the mixed plastic waste used as a resource in ChemCycling™.

Waste perspective

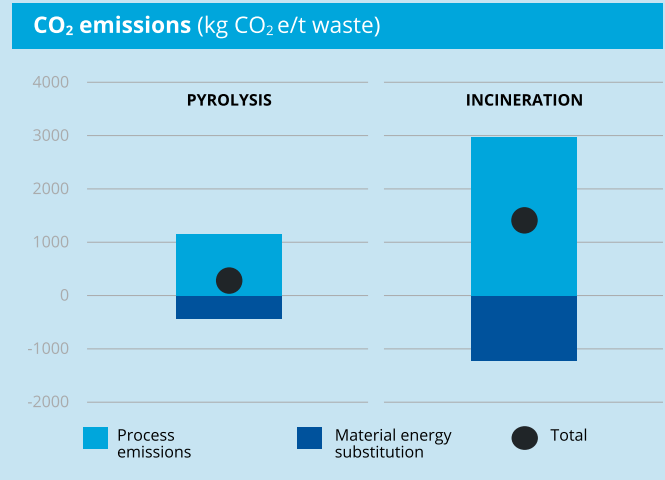


Figure 2: Pyrolysis of 1 ton mixed plastic waste emits 50% less CO₂ than incineration with energy recuperation. Each process generates emissions (in light green) but also leads to material / energy substitution. Pyrolysis is credited for producing pyrolysis oil which substitutes naphtha. Incineration is credited for producing electricity and thermal energy.

Material perspective

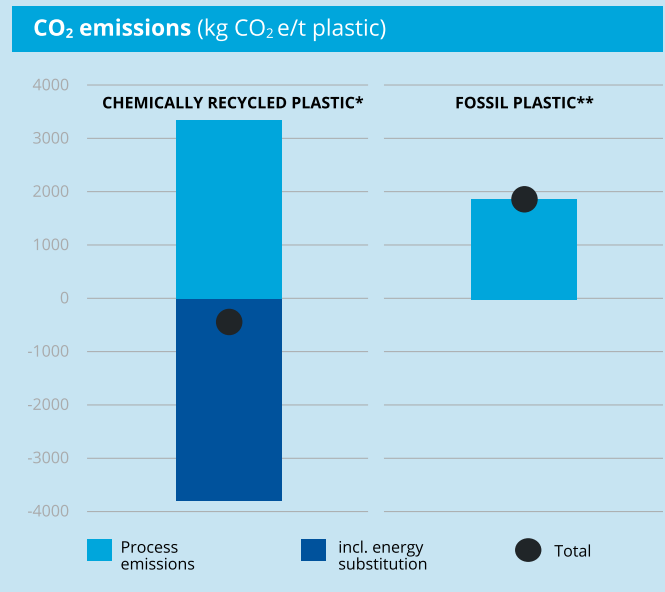


Figure 3: Conventional production of 1 ton low density polyethylene (LDPE) versus 1 ton LDPE from pyrolysis. For the production of 1 ton LDPE via pyrolysis the overall CO₂ emissions are negative. Chemically recycled plastic is credited for displaced incineration emissions, which would have occurred in the reference scenario.



Considering feedstock variability

System expansion is also useful to compare two waste management technologies which use **different feedstock** and thus, do not provide exactly the same service to society.

Consider two plastic waste management technologies with varying capabilities: a chemical recycling technology (technology A), which handles a large variety of plastic waste, and a mechanical recycling technology (technology B), which takes in only a fraction of suitable plastic waste as feedstock. Technology B does not provide the same service to society as technology A, as it does not handle certain types of plastic which are effectively recycled by technology A. To compare A and B on a fair basis, they must take in the same mix of input materials, combining additional technologies if necessary.

In this case, if technology A can recycle 100% of the input mixed plastic waste, technology B may only recycle 75% of the input. Thus, to fulfill the same functional unit ("Managing 1 ton of mixed plastic waste"), the two solutions should be defined as follows²:

- Solution A: chemically recycle 1 ton of mixed plastic waste
- Solution B: mechanically recycle 0.75 ton of mixed plastic waste **and** handle 0.25 ton of non-mechanically recyclable plastics

In this example, comparability between chemical and mechanical recycling is ensured by expanding the system boundaries beyond the recycling process in itself, adding the additional environmental burden of dealing with non-recyclable waste in solution B.

Considering quality variations

Another important element to consider in comparative LCA is **product quality**. Many circular solutions generate products of lesser quality than their virgin counterparts. Mechanical recycling, for example, can lead to degradation of quality because the material structure has been altered (e.g. polymer chains get shorter) or because contaminants accumulate. As a result, mechanically recycled plastics may have to be complemented with virgin material, or they may be of insufficient quality for certain applications.

There are two solutions to address product quality differences in LCA studies:

- **Variations in quality can be accounted for by comparing the products based on their usage.** Take a fictional example of an LCA focusing on milk bottles. Bottle A, a glass bottle, can be used 100 times. Bottle B, a plastic bottle, is of lesser quality and can only be used once. The functional unit will be defined as "containing 1l of milk and delivering it to customers 100 times". For this function to be fulfilled, only one bottle A is necessary against 100 bottles B. Thus, differences in quality are accounted for by defining the functional unit based on the usage of the bottle (i.e. a bottle used X times), rather than just on the object itself (i.e. a bottle).

2. In this example, for simplicity, it is considered that both scenarios lead to the same amount of recycled plastic being produced.

- **A "quality factor" can also be used to account for quality differences between products.** This approach is useful when the usage of the products is not well defined (e.g. recycled plastic material used for a variety of applications). The Circular Footprint Formula, developed by the European Union's Joint Research Center (JRC), allocates burdens and benefits of circular solutions between life cycles (see section "*Allocation between two consecutive product life cycles*" (page 29) for more information). It includes quality ratios, accounting for the quality of both ingoing and outgoing recycled materials. Quality ratios can be based on economic aspects (price ratio of secondary compared to primary materials), or on physical aspects if more relevant. Expert judgement is necessary to ensure that these ratios are applied consistently and lead to a fair comparison.

The timeframe of emissions: accounting for carbon flows

Accounting for delayed carbon flows

Many circular solutions lead to the storage of carbon within a product, therefore preventing its immediate release in the atmosphere. For example, CO₂ released by a power plant can be captured and bound into ethanol fuel through, reducing greenhouse gas (GHG) emissions from the power plant. Another example of carbon recovery and storage is the production of recycled polymers from post-consumer plastics which would otherwise have been incinerated. While incineration generates GHG emissions, recycling plastic avoids these carbon emissions and uses the recovered carbon to make new polymers, binding the carbon in a product.

In both examples, the technologies involved result in a net reduction of immediate GHG emissions. Over time, though, the carbon stored in the products is usually bound to be reemitted soon enough: the ethanol fuel will be combusted, and the plastic product will be discarded and possibly incinerated. In the end, GHG emissions still occur and are only delayed until the products' end-of-life.

However, the circular systems mentioned (i.e. plastic recycling or CCU) generate products which replace another conventional product - in this case, fossil-based plastic or fuel. Thus, the value of circular solutions lies in the emissions avoided by replacing these conventional products. This benefit can be quantified in LCA if circular solutions are compared to equivalent conventional alternatives.

In the example of a CCU-based fuel, the correct comparison between two equivalent systems is shown in figure 6 on page 22. The conventional system consists of the CO₂-emitting factory to which is added a conventional fuel, which also emits CO₂ and other GHG at its end-of-life. In the CCU system, CO₂ is emitted upon burning of the CCU-based fuel. Some emissions also occur during the process itself. LCA serves to accurately assess the environmental performance of the two systems, so long as the assessment compares two equivalent systems and takes into account all emissions involved.

Ensuring comparability through system expansion: case study by Inovyn

(Vinyloop) PVC Recovery Options: Environmental and Economic System Analysis

This LCA study assesses four waste management technologies which handle mixed cable waste, with a specific focus on the PVC fraction. The four PVC waste management technologies considered are implemented in similar countries of Northwestern Europe (Denmark, Germany). They are as follows:

- MVR Hamburg: Waste incineration with energy and metal recovery
- Stigsnaes: Feedstock recycling through a pyrolysis process
- Watech: Feedstock recycling through a process of hydrolysis then pyrolysis
- Vinyloop: Mechanical recycling through the Vinyloop process using solvents

Landfilling is chosen as the reference option.

While the technologies listed above provide the same service in terms of PVC waste management, each of them generates different output products, such as recovered metals and electricity (MVR Hamburg), sodium chloride and metal scrap (Stigsnaes), coke and metal scrap (Watech), or regenerated PVC compounds (Vinyloop).

To enable comparison of these four technologies, system expansion was applied by:

- Listing the output products of each technology
- Defining an overall set of products containing all output products listed
- Extending each technology system by adding the conventional production route for the output products that are not produced by this technology

The resulting solutions are illustrated in figure 4.

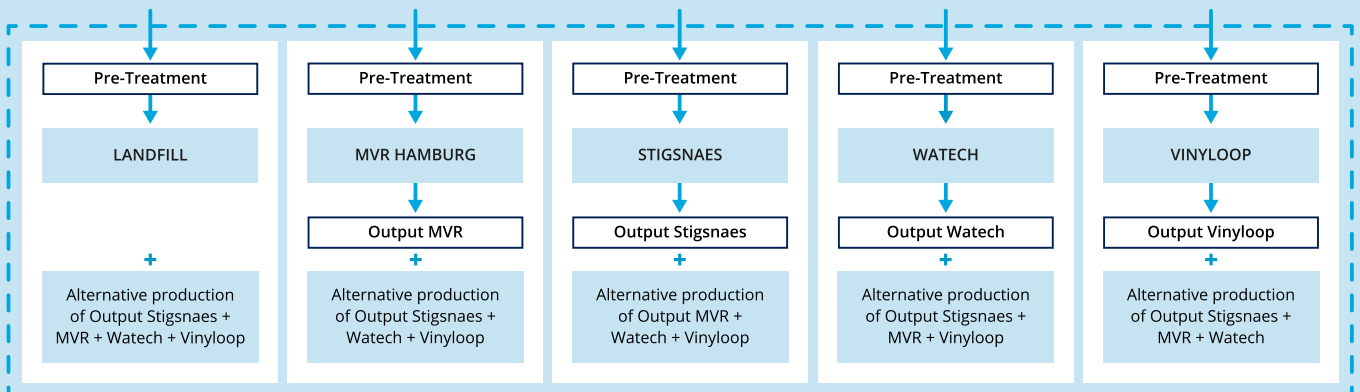


Figure 4: After system expansion, each system includes the output products of the technology under study as well as the other products which are not generated with this technology. For example, the output of the Stigsnaes technology is sodium chloride, an oil fraction, solid residue, polyethylene and metal scrap. However, Stigsnaes does not produce electricity, coke or PVC compounds, which are some of the output products of the other technologies (MVR, Watech and Vinyloop). Expanding the Stigsnaes system entails adding the alternative production of these products to the system.

Thus, the environmental impact of each technology under study is complemented with the impact of generating the products which are not an output of this technology, but which are generated by the other options. This additional burden represents the “environmental opportunity cost” of choosing one particular option, meaning the additional services that are necessary to complement this technology if it is chosen over the others.

The results of the comparative LCA, which are presented in figure 5, clearly demonstrate the importance of system expansion.

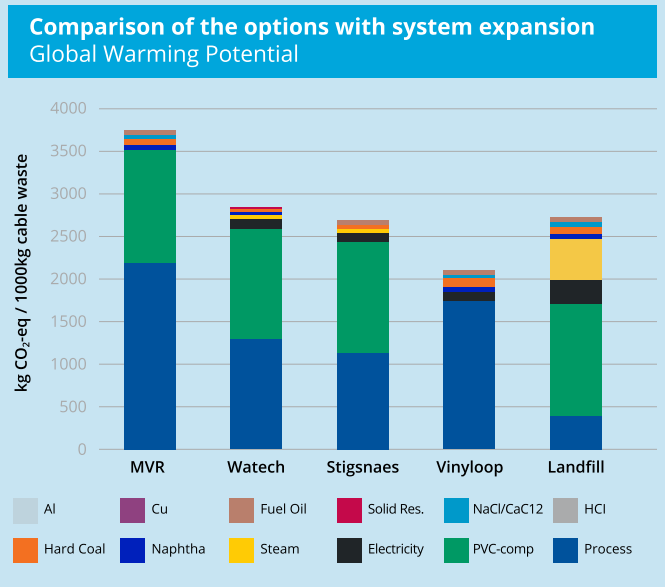


Figure 5: Environmental impact in terms of climate change for five PVC waste management technologies. For each technology, the impact of the process itself is shown in dark blue. LCA results indicate that the Vinyloop process has a relatively high Global Warming Potential and is only second to incineration in terms of impact. However, it generates a PVC compound, thus avoiding the step of PVC compounding which has a high environmental impact. Through system expansion, the study shows that Vinyloop is the best option of the five from a climate change perspective.

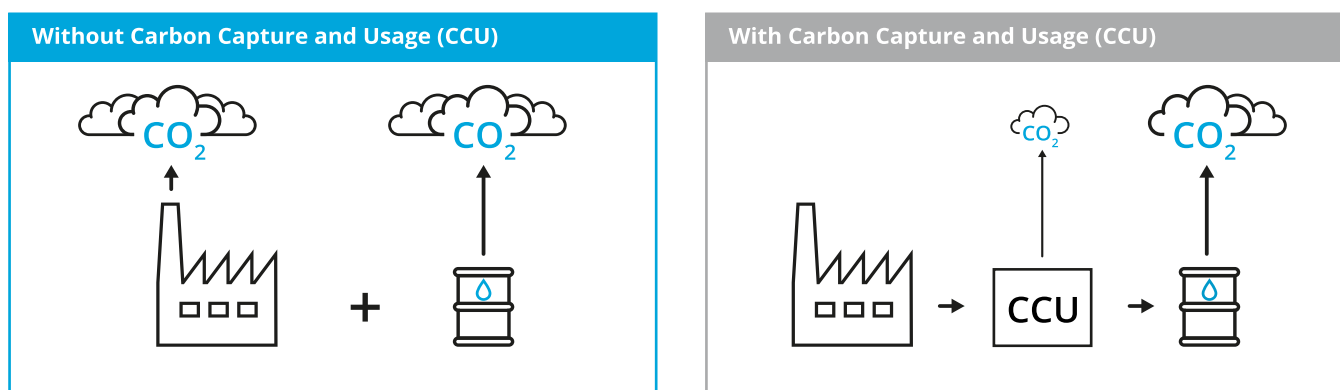


Figure 6: With CCU, CO₂ emitted from a power plant is captured and avoided. It is then bound into a fuel, which will generate GHG emissions when the fuel is combusted. The CCU system is equivalent to a conventional system in which power plant emissions occur directly, and a conventional fuel emits carbon upon combustion as well.

When is carbon storage considered permanent?

Circular solutions such as CCU or plastic recycling avoid emissions to the atmosphere by recovering carbon that is then stored in the products they generate. After these products have been used, the stored carbon is often released back into the atmosphere - CCU-based fuel is burned and a recycled plastic is incinerated. These emissions are accounted for in LCA. Section *"Accounting for delayed carbon flows"* (page 20) covers the topic of delayed emissions and why circular solutions are valuable even if the carbon they store is rapidly reemitted into the atmosphere.

Stored carbon may be released again within a few months to years. However, some products may store carbon for a much longer time period. One commonly cited example is construction: wooden buildings or CO₂-based insulation foam will likely remain in use for a long period after their initial production, not reaching their end-of-life until several decades later.

If carbon emissions do not occur within a certain number of years, this carbon is usually considered as permanently stored. In LCA, it is important to define the point at which carbon is considered as permanently stored. All emissions occurring within this timeframe must be accounted for, and any emissions which might occur later are discounted. The choice of timeframe depends on the objectives of the study. Two approaches, corresponding to two different timeframes, are detailed below.

The 100-year timeframe approach:

LCA usually considers emissions within a 100 year timeframe, including delayed emissions to give a correct picture of all carbon flows absorbed or emitted during a product's life cycle. Any emissions occurring within this time period must be accounted for. Any carbon that has not been emitted after 100 years is considered as permanently stored.

To illustrate, consider two recycling solutions that store the same amount of carbon but in two different products: process 1 generates ethanol and process 2 a plastic polymer for the construction sector. For simplicity, consider that both products are identical in all other aspects, such as electricity use. Both products initially store the same amount of carbon

via recycling and ensure the same net reduction of carbon emissions. However, the two products will not have the same fate. In process 1, the carbon stored in ethanol molecules will be reemitted entirely as CO₂ upon combustion. In process 2, the plastic polymer may remain in the building for longer than 100 years. The long-term effects of both recycling solutions differ and should be accounted for differently.

As demonstrated in this example, a comparison between solutions that lead to delayed emissions must cover the entire life cycle of both products ("cradle-to-grave" approach), to ensure that delayed emissions are accounted for and quantified within a 100-year time frame. At the least, the effect of delayed emissions should be mentioned in order to provide decision-makers with a full understanding of the environmental implications.

The forward-looking approach

As climate change is likely to be an even more significant issue in 100 years, some LCA practitioners take a forward-looking approach of extending the timeframe of emissions beyond 100 years. Recent sources recommend that all emissions from a process should be accounted for if they occur within 500 years [10] or even 10,000 years [11]. For example, some argue that, in the case of CCU, the standard 100-year time period could incentivize medium-term carbon storage solutions, which would lead to emissions at a time when climate change will still be a critical issue for society.

This approach is interesting in the case of CCU as it helps distinguish between solutions that are "quick fixes", and others which offer a solution in the longer term. However, shorter-term solutions are also valuable and should not be discounted. Because CO₂ has a cumulative effect on global warming, storage of any duration is beneficial. The question of temporary carbon storage is particularly relevant in LCA studies involving biogenic carbon. Because the biogenic carbon cycle is a fast cycle (i.e. carbon cycles between plants and the atmosphere quickly), it does not have the same impact on climate change as carbon from fossil sources. For this reason, biogenic carbon is considered separately in LCA (see the following section).

Why (temporary) biogenic carbon storage matters: case study by SABIC

Renewable Polyethylene based on Hydrotreated Vegetable Oil, from waste animal fats or vegetable oil.

The study quantifies the environmental impact of polyethylene produced using hydrotreated vegetable oil (HVO) diesel as a feedstock for steam cracking. HVO is produced from hydro-treating of waste animal fats, a by-product of meat processing, or from hydrotreating of palm oil fatty acids, a by-product of palm oil production.



The carbon that is captured in the final product, i.e. polyethylene, is of biogenic origin rather than fossil origin. This distinction is important in carbon accountancy. In the case of biogenic carbon, CO₂ is removed from the atmosphere. For example, the carbon composing palm oil fatty acids, and ultimately incorporated in the polyethylene, initially comes from the air. In the case of fossil-based polyethylene, on the other hand, there is a net transfer of carbon from fossil storage (crude oil) to the atmosphere at incineration. Figure 7 illustrates the difference between the two systems.

This case study therefore follows accounting guidelines specifically defined for carbon of biogenic origin.

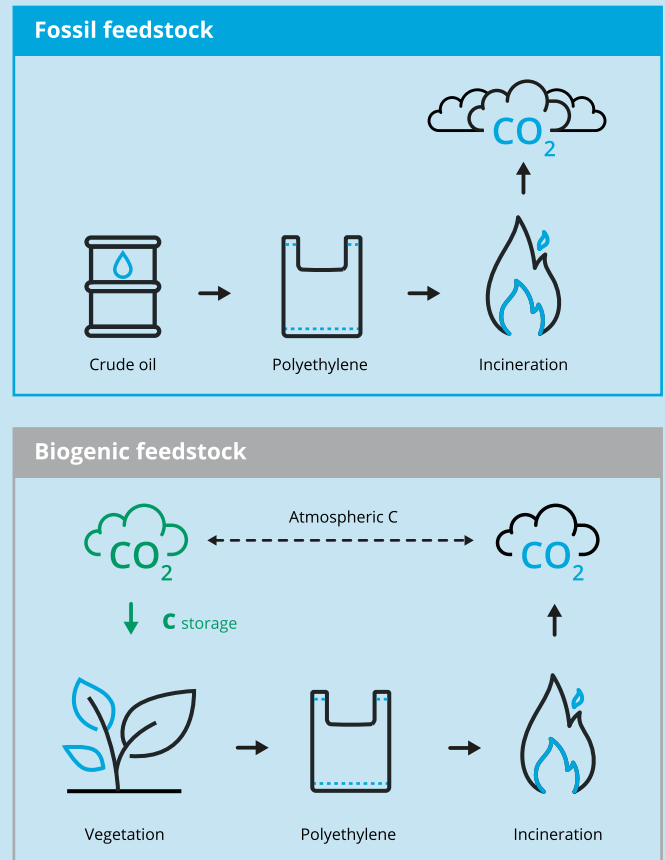


Figure 7: Polyethylene made from fossil feedstock leads to net CO₂ emissions to the atmosphere at the product's end-of-life, when it is incinerated. When biogenic feedstock is used instead, such as palm oil fatty acids, CO₂ emitted upon incineration is considered as taken up again by vegetation.

The specific question of biogenic carbon

General carbon accounting guidelines, such as those of the International Panel on Climate Change (IPCC) [12], and more specific LCA guidelines, such as those of the JRC [10], state that biogenic CO₂ emissions should be omitted from carbon accounting since these emissions are part of the natural cycles on Earth. There is one exception to this general rule, which concerns the small portion of carbon emitted in the form of methane. Indeed, methane contributes twice to climate change, first as methane, and second once it has oxidized into CO₂. Because CO₂ will be captured again by vegetation, this second contribution should be discounted. However, the first contribution must be modelled and accounted for in LCA. For example, in an LCA of a circular solution involving the burning of biofuels, all CO₂ emissions can be discounted, but methane emissions must be accounted for as biogenic methane.

Some LCA practitioners may choose to model biogenic CO₂ flows as well, even though they are not accounted for in the final total. The JRC, for example, recommends that all biogenic carbon flows be modelled, with the impact of biogenic CO₂ being considered as null. The final result is no different than if biogenic CO₂ flows were not modelled at all, however this gives a better picture of overall carbon flows.

While this default approach is widely accepted and used in LCA, it poses two issues that have led to other approaches being developed. First, as shown on figure 8, biogenic carbon has a mitigating effect when it is captured, and a reinforcing effect on climate change when it is released in the atmosphere [13]. So, while the overall climate effect of using biogenic carbon along this cycle is neutral, the effect is not neutral at a given point in time. Second, biogenic carbon may be embedded in permanent products. This carbon storage is not accounted for if biogenic carbon is omitted from the LCA.

Growing awareness of the importance of temporary carbon storage has led to the development of a new dynamic approach that takes into account these issues [14]. While traditional LCA gives an aggregated “snapshot” of emissions without consideration of the time of emissions, dynamic LCA provides a consistent assessment of the impact, through time, of all GHG emissions (positive) and carbon sequestration (negative). For results to be reliable, the timing of every emission must be accounted for in order to quantify temporary storage. So, dynamic LCA is complicated to carry out and it currently remains experimental. However, if it is more widely implemented, it will prove to be a valuable approach for policy makers to gain a better understanding of temporary storage.

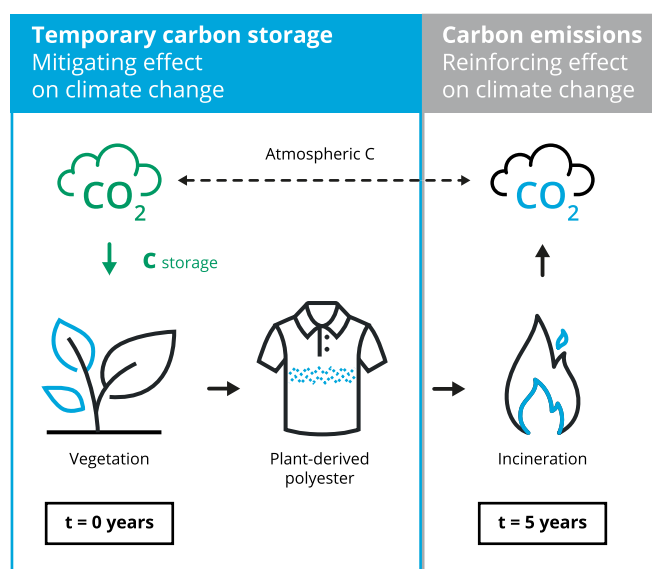


Figure 8: Temporary carbon storage: biogenic carbon has a mitigating effect on climate change when it is captured. This effect ends when it is released in the atmosphere.

Who bears the environmental burdens or claims the benefits of circular solutions?

Life cycle avoided emissions almost always arise from efforts by multiple partners along a value chain, particularly for circular systems. Making a system more circular involves multiple changes along the value chain, including raw material suppliers, material manufacturers such as chemical companies, material processors, part-assemblers and users of the technology. So, changes in overall emissions – and in avoided emissions enabled by circular systems – belong to all the players in the system.

For this reason, avoided emissions shall belong to the complete value chain without subdividing between partners. This gives a full picture of environmental benefits which is useful for policy-makers, who need to appreciate the overall benefits and burdens of circular solutions to decide whether to support their development or not.

If necessary, avoided emissions enabled by circular systems as compared to the reference system may then be split, or allocated, along the process and the actors involved. This enables an individual stakeholder to quantify their own impact, avoiding double counting, and act on these emissions. It is especially important for circular solutions where stakeholders have a different leverage on the environmental benefits and burdens of the system as a whole.

Some circular solutions aim to make use of a co-product of an existing process. The process is thus multifunctional and its environmental impacts must be shared between the co-products. Other circular solutions aim to use a material that has reached its end-of-life for its initial application for a new product cycle. The environmental benefits and burdens associated with this circular solution should be appropriately shared between the two consecutive product systems.

Allocation between the co-products of a multifunctional system

Many circular solutions are developed with the aim of turning a co-product of an existing process into a valuable product. In this case, the circular solution is part of a broader, multifunctional system which provides a main product as well as a secondary product obtained through the circular solution. For example, in the case of ethanol production from sugarcane bagasse, the bagasse is a co-product of an existing system that aims primarily to produce sugar. The environmental impact of sugarcane cultivation must be shared between the main product - sugar - and the co-product - sugarcane bagasse (see figure 9, page 27).

To enable evaluation of the circular solution's environmental performance itself, the burdens and benefits of the system as a whole must be shared between the main product and the secondary "circular" product. In LCA, this is referred to as "solving multi-functionality" [15]. Multi-functionality is an issue that is not specific to circular solutions and has been discussed extensively in LCA literature, providing recommended approaches.

Standards and guidelines give the following methods to handle multi-functionality, listed in order of recommendation by ISO 14044 [8]:

- 1 System expansion
- 2 Substitution
- 3 Allocation using underlying physical relationship
- 4 Allocation using another relationship

1. System expansion, to embrace all co-products in a single system

In system expansion, the idea is to assess a system as a whole, considering all the co-products (or functions) it provides, instead of focusing solely on the co-product of interest. The system boundaries are expanded to include the other functions of the product system, and the functional unit is modified to include these additional function(s). The reference system that is used for comparison must deliver equivalent functions. The approach is illustrated by the figure 9 (on page 27).

In the previously-cited example of ethanol production from sugarcane bagasse, the system expansion approach consists in carrying out an LCA of the entire sugar production system, which jointly produces sugar and ethanol. The reference system of comparison is a combination of the two separate systems that are necessary to produce the two products conventionally (e.g. sugar and ethanol). It should be noted that this approach does not yield product-specific results, meaning that the environmental footprint of ethanol alone is not determined.

All you need to know on allocating burdens and benefits

“Allocation” is the answer

There are several approaches to allocate burdens and benefits between co-products of a multi-functional system (e.g. a system producing sugar and ethanol from sugarcane bagasse). They are listed in order of preference according to standards and guidelines:

- In **system expansion**, the system is assessed as a whole (e.g. the system producing both sugar and ethanol), and is compared to a reference system comprising all of the functions of the circular solution (e.g. conventional production of sugar to which is added conventional production of ethanol). This approach avoids potential allocation bias, but does not yield product-specific results. It is generally recommended unless product-specific results are necessary.
- In **substitution**, the circular solution receives credit for the production of the non-relevant pre-existing co-product (e.g. sugar). This approach gives product-specific results, meaning that the impact of the co-product produced by the circular solution alone can be determined. However, the results can be difficult to interpret.
- With the approach of **allocation using a physical relationship**, impacts of the multi-functional system are shared between co-products based on an underlying physical basis (e.g. respective mass or energy content). This approach is appropriate when the two co-products are of the same physical nature (e.g. two monomers produced by a chemical recycling process).
- The approach of **economic allocation** is appropriate when the co-products are of a different nature. The impacts of the multi-functional process are shared between co-products based on their respective economic values. This approach yields product-specific results, though they are subject to change due to price fluctuations of the co-products. Overall, economic allocation reflects the market balance between offer and demand for co-products.

Should the recovered waste itself take benefit of avoided emissions enabled by its recycling?

Many circular solutions aim to use a material that has reached its end-of-life for a new product cycle. They are associated with environmental benefits (i.e. they avoid extracting virgin material) and environmental burdens (i.e. the recycling process generates its own environmental impacts). So, who is accountable for the environmental burdens (emissions) or benefits (credits) of using waste to produce secondary raw materials? The answer depends on the approach that is chosen for end-of-life allocation. This choice can help encourage either the collection and recycling of waste or the use of these secondary raw materials depending on the market need and should therefore depend on the market needs.

Closed-loop systems: a straightforward allocation

Closed-loop systems are a particular example of recycling where a product that has reached its end-of-life is recycled into the same product, with identical properties. The same actors are involved in generating recyclable materials at end-of-life and incorporating these in new products. In such systems, the allocation approach is simplified in that all benefits accrue to the sole stakeholder who both utilizes and generates the recyclable material. In practice, these benefits are directly accounted for by reducing the amount of initial virgin material needed as input in the first product cycle.

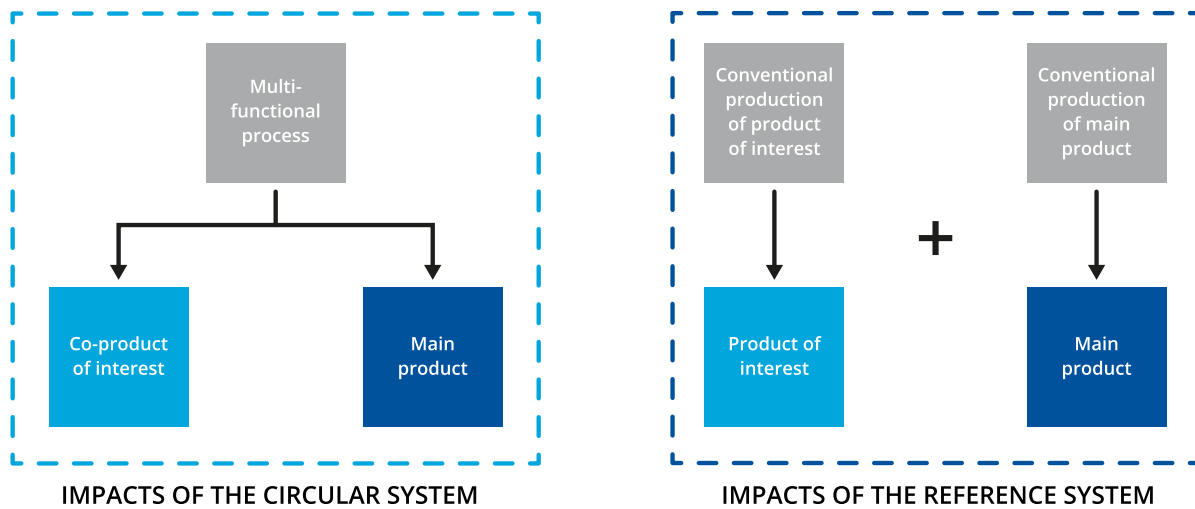


Figure 9: System expansion: The system is expanded and assessed as a whole, including both the co-product of interest (e.g. ethanol) and the main product (e.g. sugar). The reference system is a combination of the conventional production systems for the product of interest (e.g. ethanol) and the main product (e.g. sugar).

2. Substitution, when the output of a circular process substitutes another

Unlike system expansion, substitution does not include additional functions in the assessment. Rather, as shown in figure 10, the circular solution receives credit for the production of the main product (e.g. sugar), representing the environmental burdens avoided by substituting conventional production.

In the example of ethanol production from sugarcane bagasse, the substitution approach implies first to assess the entire system, which produces sugar and ethanol, then to subtract the impact of conventional sugar production. This approach yields a product-specific result: the environmental footprint of ethanol is quantified separately from that of sugar.

Mathematically, substitution is equivalent to system expansion. However, the results and their interpretation differ between both approaches. For example, substitution can lead to negative results (e.g. negative emissions), which gives a false impression that the system is taking up CO₂ and reducing the amount in the atmosphere. Furthermore, credits from substitution may vary significantly depending on the “conventional” production chosen as a reference. As such, practitioners should be mindful about this choice by selecting the most likely solution to be replaced and by considering different scenarios through sensitivity assessments.³ Thus, results obtained through the substitution approach must be interpreted carefully, bearing in mind how they were obtained.

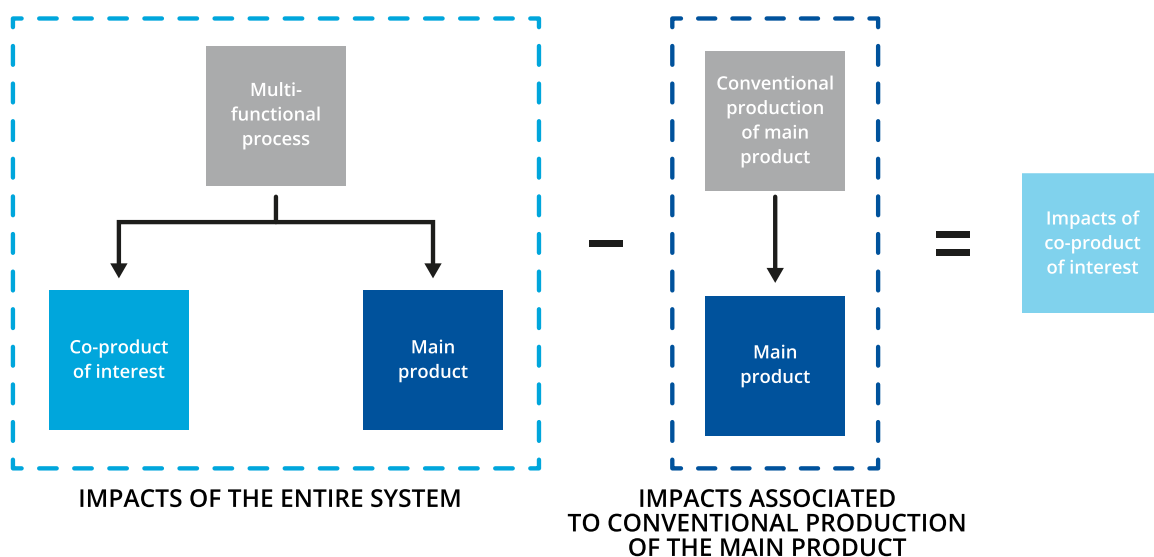


Figure 10: Substitution: The production of the main product (e.g. sugar) is avoided, and the circular solution is credited for the avoided emissions. The result is product-specific: it corresponds to the impact associated solely to the co-product of interest.

3. The method for choosing the reference conventional production can be aligned with approach used to define the baseline scenario for the calculation of avoided emissions, as described in the ICCA guidelines on avoided emissions reporting [6].

Allocation between co-products: case study by RWTH Aachen University

Towards sustainable elastomers from CO₂: Life Cycle Assessment of carbon capture and utilization for rubbers [16]

The question of allocation between co-products is addressed in this LCA of rubbers incorporating CO₂ captured from an ammonia production plant, using the Cardyon® technology developed by Covestro for polyol synthesis. The study compares the environmental impacts of CO₂-based rubber with conventional rubbers which it can substitute, for global warming and several other impact categories.

The system considered in this study is multi-functional: it produces ammonia, CO₂-based rubber, and energy at end-of-life when the rubber is incinerated. According to ISO and other guidelines specific to CCU, system expansion is applied to cope with multi-functionality. The expanded system considered in this LCA therefore provides three functions:

- To produce 1 kg of CO₂-based rubber
- To produce 0.185 kg of ammonia (amount necessary for the co-production of CO₂ when manufacturing a CO₂-based rubber with 30 wt% of CO₂ incorporated in the rubber)
- To incinerate 1 kg of CO₂-based rubber for producing energy.

The conventional system that serves as a comparison fulfills the same function and is the sum of the production of 1kg of conventional rubber, including its incineration at end-of-life for energy generation, and the production of 0.185 kg of ammonia without CO₂ capture.

LCA results indicate that greenhouse gas (GHG) emissions are lower for the CO₂-based system, as shown in figure 11. These reductions result from the overall system and are not product-specific. To obtain results for CO₂-based rubber alone, the authors performed a sensitivity analysis, aiming to estimate which portion of the environmental savings can be allocated to rubber.

To highlight the impact of allocation approaches on product-specific results, two possibilities are considered. First, a worst-case allocation attributes all impacts to CO₂-based rubber, without considering the co-production of ammonia. Second, the best-case allocation uses the substitution approach to introduce a credit for ammonia production.

Figure 12 shows the results of the sensitivity analysis. With the worst-case allocation, emissions due to the production of 1 kg of CO₂-based rubber amount to 4.83 kgCO₂eq. In the best-case allocation scenario, emissions amount to 4.57 kgCO₂eq. Overall, the sensitivity analysis demonstrates that no matter the choice of allocation method, CO₂-based rubbers have a lesser impact on climate change than their conventional counterparts, due to the fact that they have different ingredients and processing routes and that they emit less CO₂ during their incineration for energy production.

CO₂-based rubber compared to conventional HNBR (hydrogenated nitrile butadiene rubber)

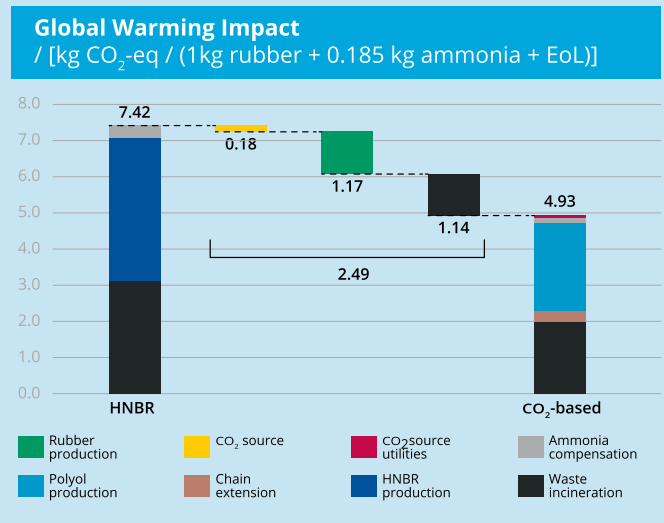


Figure 11: results obtained for CO₂-based rubber compared to one type of conventional rubber, hydrogenated nitrile butadiene rubber (HNBR). The reduction results partly from (1) the capture of CO₂ emitted during ammonia production and its storage in CO₂-based rubber. However, the main reductions stem from (2) changes in the rubber production itself (CO₂-based rubber uses different components), and (3) reduced emissions at incineration (CO₂-based rubber contains less carbon than HNBR, which means that the impact of incineration for energy production is lower).

CO₂-based rubber compared to various conventional rubbers

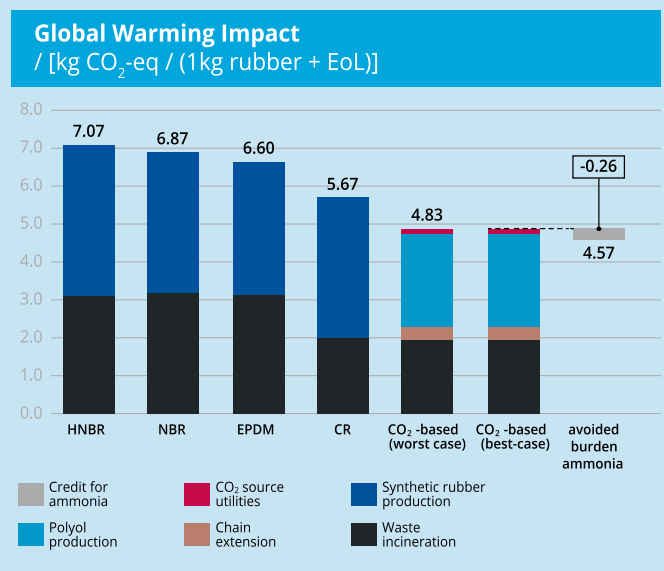


Figure 12: Product specific global warming impacts are shown in kg CO₂-equivalents per 1 kg of rubber and the end-of-life treatment of 1 kg rubber. The following conventional rubbers are shown: HNBR, nitrile butadiene rubber (NBR), ethylene propylene diene monomer rubber (EPDM), chloroprene rubber (CR). For CO₂-based rubbers, environmental impacts were obtained for (i) a worst-case scenario (100% of environmental impacts allocated to the CO₂-based rubbers) and (ii) a best-case scenario (credit for ammonia). The CO₂ source utilities include CO₂ compression and CO₂ transport.

LCA study performed and published by RWTH Aachen University, R. Meys, A. Kätelhön, A. Bardow: Green Chem., 2019, 21, 3334-3342.

www.covestro.com

More on closing the carbon loop: <https://bit.ly/39YWgJT>



3. Allocation based on a physical ratio to distribute the environmental burdens

An alternative to system expansion and substitution is the allocation of environmental impacts of the multi-functional process between co-products or functions. This distribution can be based on a ratio of mass or energy content between the co-products.

Taking the same example of co-production of sugar and ethanol from sugarcane (see page 25), mass or energy allocations can be applied to allocate the impacts of sugarcane production between sugar and bagasse. Mass allocation entails evaluating, for a defined quantity of sugarcane entering the refinery, the weight ratio between the amount of sugar and bagasse produced. For energy allocation, it is the calorific power ratio between sugar and bagasse which will be used to distribute the environmental burdens of sugarcane production between the two co-products.

In this example, however, as is often the case for circular solutions, the co-products are of different physical natures, uses and values: sugar is used for food and bagasse for energy. Thus, while it is possible to base allocation on a physical ratio as described above, this approach makes little sense, and other alternatives should be explored.

Allocation using a physical relationship remains appropriate when the co-products are of the same physical nature (e.g. monomers). In the example of a fictional chemical recycling process regenerating EVA (ethylene vinyl acetate) into ethylene and vinyl-acetate monomers, the ratio between the molecular mass of both monomers can be used to allocate the burdens and benefits of the chemical process.

4. Allocation using another underlying relationship

If a physical ratio is not appropriate, another underlying relationship can be used. The environmental impacts of the multi-functional process are then distributed among its co-products or functions according to adequate attributes of these co-products or functions. Very often, economic value is chosen as the common attribute: the largest portion of the impact is attributed to the co-product or function with the greatest economic value.

Economic allocation can strongly influence the attribution of benefits for circular solutions. Such solutions often use co-products with little economic value, which, as a result of economic allocation, bear only a small portion of the impact of their production. In fact, in many cases, their economic value is so little that they are simply considered burdenless, meaning that the impact of their production is considered to be null.

In the previously cited example of ethanol production from sugarcane bagasse, the market value of the main product (e.g. sugar) is much higher than that of the co-product of interest (e.g. bagasse) which was traditionally considered as unusable waste. Thus, according to economic allocation, only a small share of the impact of sugarcane production must be attributed to bagasse, and consequently to ethanol production.

Economic allocation is a valuable approach as it yields product-specific results which reflect the low or high market demand for co-products that are otherwise considered as waste. However, a change in demand may occur if, for example, the circular solution (e.g. ethanol production from sugarcane bagasse) becomes widely implemented, driving up the demand for the co-product. In this case, previous LCA results based on economic allocation would be outdated and should be revised. This is discussed further in section "*Variations of feedstock availability and cost*" (page 38).

Allocation between two consecutive product life cycles

Many circular solutions aim to reuse a material that has reached its end-of-life in a new product cycle. There are two types of recycling patterns:

- Open-loop recycling, in which material from one product cycle is recycled into another product. Examples include mechanical recycling of PET plastic bottles to make polyester fabric.
- Closed-loop recycling, in which material from a product cycle is recycled into the same product. One example is chemical recycling of PET plastic bottles into new PET bottles.

In both cases, recycling can be beneficial because it avoids the consumption of virgin materials. For example, when waste PET is recycled into polyester clothing, the recycling process itself has an impact on the environment, but at the same time it avoids the environmental cost of producing virgin PET. The environmental benefit of avoided virgin material use and the burden associated with the recycling process must be shared between the first product cycle (e.g. plastic bottles) and the second (e.g. polyester clothing).

Several methods to distribute impacts between life cycles

There are several methods to distribute impacts between life cycles, each yielding different results. They are applicable to both open-loop and closed-loop situations, although a simplified approach may be taken for closed-loop recycling because it involves a single system (i.e. the producer of PET bottle waste would also be the consumer of recycled PET in such a scenario). All approaches provide valuable results and choosing one or the other mainly depends on the economical and policy drivers for the end-of-life process.

Choosing an allocation approach: case study by DOMO Chemicals

Comparative Life Cycle Assessment of two polyamide 66-based engineering plastic formulations, one with a primary resin base, and the other with a high-quality recycled resin base (Technyl® 4earth®).



Figure 13: Recovery of high-quality polyamide from the scraps resulting from coated disks used to manufacture car airbags

This LCA study focuses on the Move 4earth® technology owned by DOMO Chemicals which makes it possible to obtain a high-quality recycled polyamide 6.6 from airbag fabric scrap cuttings. This production scrap consists of polyamide 6.6 woven yarn, with a silicone coating that ensures the performance characteristics for the airbags to function safely.

By using an innovative separation technique to remove this coating, the Move 4earth® process enables the recovery of a very high quality polyamide 6.6 polymer, which can then be used as a matrix for the Technyl® 4earth® high-performance recycled polyamide. The LCA study examines the environmental performance of this process to produce recycled polyamide for the manufacture of a thermal engine automobile fuel filter housing, in comparison with its virgin equivalent. The LCA results show that recycled polyamide via the Move 4earth® separation process reduces greenhouse gas (GHG) emissions by 32% compared to virgin primary polyamide.

The comparison is based on the “cradle-to-grave” life cycles of the two versions, with identical specifications of the fuel filter housing (safety margin coefficient, life span, ...).

What proportion of environmental impacts should be allocated to the fabric scraps?

One important question addressed in the study is that of allocation. The environmental impacts of the manufacturing of the primary product (the coated polyamide 6.6) must be appropriately allocated between the airbag discs and the fabric cuttings.

The sensitivity analysis considers three possible allocation approaches:

- 1. The Main approach: cut-off.** The impact of virgin fabric production is entirely allocated to the airbag fabric disc. No burden is allocated to the fabric scrap. This is the approach considered most appropriate in the study.
- 2. Option 1: economic allocation.** The impact of virgin fabric production is allocated between the airbag discs and the scrap cuttings based on their respective economic values.
- 3. Option 2: economic allocation of impacts from both the fabric production AND recycling steps.** The reasoning is that recycling the fabric scrap requires removal of the coating that is necessary for the airbags. As this removal step bears environmental impacts as well, it may be justified to attribute them partly to the airbag discs themselves. This approach takes a broader “system” perspective: it allocates the overall system impacts to both final products, i.e. airbags discs and recycled polyamide.

Note: allocation based on mass is not appropriate in this case. The fabric scraps would bear the same impact per unit of mass as the airbag fabric, which is higher than that of primary polyamide as it includes processes such as spinning, sizing and weaving. These processes are needed to produce airbag fabric but are not necessary for recycled polyamide. Thus, it would not be fair for recycled polyamide to carry those burdens according to mass allocation.

In the main approach, the fabric scraps are considered as waste that is recycled. As explained above in section “*The general allocation approaches for both open-loop or closed-loop systems*” (page 32), cut-off is commonly used in situations where the offer for waste is high while the demand is low. This is slightly different from the examples cited in section “*Allocation between two consecutive product life cycles*” (page 29), in that the fabric cuttings are “new scrap” (the fabric was not previously used).



Nevertheless, this “new scrap” can justifiably be considered as waste rather than a co-product since the Move 4earth® recycling technology was developed well after the airbag fabrication process, integrating all of the constraints due to this existing process without modifying it. Thus, the cut-off approach is appropriate and, in fact, it is the approach followed in the study.

In option 1, the fabric scrap is considered as a co-product of airbag fabric discs rather than as waste. The impacts of fabric production must be shared between the two co-products of the operation of disc cutting based on their respective economic values. As explained in section *“Allocation between the co-products of a multifunctional system”* (page 25), allocation can be carried out either based on a physical relationship (e.g. mass) or based on relative economic values. In this case, the latter option appears justified due to the high value difference between those two co-products. It must be kept in mind that this approach is subject to potential market price variations.

Option 2 is similar to option 1 except that the two co-products considered are the airbag fabric discs and the recycled polyamide (rather than the fabric scraps). This approach considers that the step in which the coating is removed from the polyamide is part of the overall process, encompassing disc cutting and scrap recycling into secondary polyamide 6.6. It reflects the fact that this step of the recycling process is necessary due to the composition of the airbag fabric, which is coated for safety reasons. With this approach, part of the impact of recycling is attributed to the airbag disc itself. Again, allocation is based on relative economic values of the airbag fabric disc and secondary polyamide 6.6, for the same reason as in option 1.

Allocation assumptions influence the calculated environmental benefit of Technyl 4earth

Results show that recycled polyamide 6.6 obtained with the Move 4earth® process is less impactful than primary polyamide 6.6, for all considered impacts and whatever the allocation approach, from cut-off (the main approach) to economic allocation (options 1 and 2).

Figure 14 illustrates results for the climate change impact category. When the cut-off approach is replaced by economic allocation (option 1), the calculated climate impact is slightly higher. Indeed, fabric scraps currently have a low but non-zero economic value on the market. A proportionate share of the burden of polyamide production is allocated to the fabric scraps, as opposed to the cut-off approach in which they are burdenless.

On the other hand, in option 2 in which both the burden of fabric production AND that of recycling are shared between airbag discs and scrap, the calculated climate change impacts decrease compared to option 1. This means that, when the burden of scrap recycling is shared between the scrap itself and the airbag discs, the overall environmental impact of the recycled product is reduced.

Comparing different allocation approaches

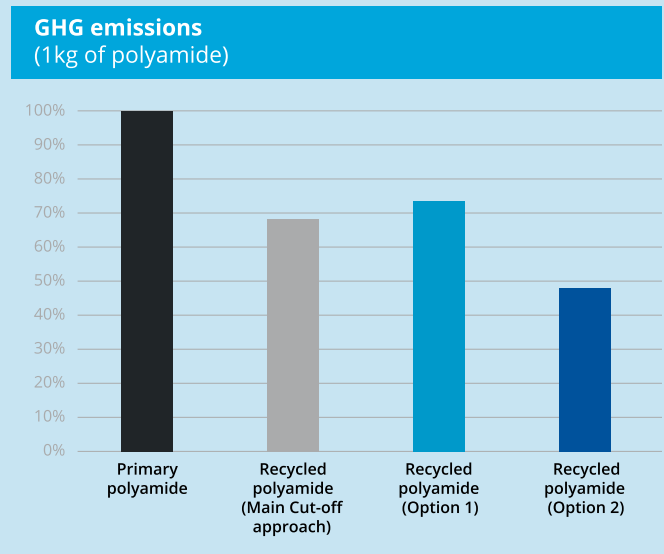


Figure 14: Results of the sensitivity analysis regarding the choice of method for allocating impacts of primary polyamide fabric production between airbag discs (the primary product) and fabric scraps which are recycled using the Move 4earth® technology. The main option is the cut-off approach. The 1st alternative option is an economic allocation between airbag discs and fabric scraps. The 2d alternative option is an economic allocation of the burdens of the fabric AND of recycled, between airbag discs and recycled polyamide.

Justify the allocation

In this case study, the cut-off allocation approach is justified by the fact that the scrap had no economic value before the Move 4earth® process was developed. Furthermore, allocation option 2 suggests even larger avoided emissions, and stems from the idea that the airbag must now bear part of the new environmental costs of reprocessing the scraps. This becomes justified as recycling is increasingly recognized as an integral part of any product system.

This option illustrates how impact allocation decisions depend on the history of the recycling process and how it is seen as coupled or decoupled from the manufacturing of the “primary” product (i.e. the airbag fabric disks).

It is important to note that the degree of interdependence between the primary use and the reuse has a great impact on environmental burden sharing, opening the door for discussions about the economic and environmental value of the recycled product. Furthermore, the economic value of the scrap may increase in time with the increasing demand for this recyclable material, until eventually reaching a stable equilibrium.

The general allocation approaches for both open-loop or closed-loop systems

How benefits and impacts are allocated to successive life cycles is intimately linked to the development of recycling schemes in the market, as it influences and is influenced by market offer and demand. Take the example of a circular solution that produces polyester fabric from mechanically recycled PET bottles. In a sense, the waste PET used as a raw material is “free” of the environmental burdens of the initial raw materials extraction and transformation. However, this waste PET has to be transformed from plastic bottles into new processable material. So, who is accountable for the environmental burdens (emissions) or benefits (credits) of using waste plastic bottles to produce recycled PET? The answer depends on the approach that is chosen for end-of-life allocation, a choice that can be based on the balance between offer and demand for recyclable materials.

- If the offer of recyclable materials (e.g. waste PET) is higher than the demand, it makes sense to favor increased use of recycled materials in products. In this case, the allocation approach should attribute the benefits of recycling to those that **make use** of recycled materials (e.g. the producer of polyester from recycled PET bottles).
- If the demand for recyclable materials is higher than the offer (e.g. waste aluminium), the rationale is to favor the recovery at the primary product’s end-of-life. Here, the preferred allocation approach will attribute the benefits of recycling to those that **generate** recyclable materials (e.g. the aluminium can producer).

These two perspectives have led to the definition of three main approaches to allocating burdens and benefits between life cycles, as depicted in figure 15 [17]:

3 ways to share environmental impacts between the primary and the recycled product

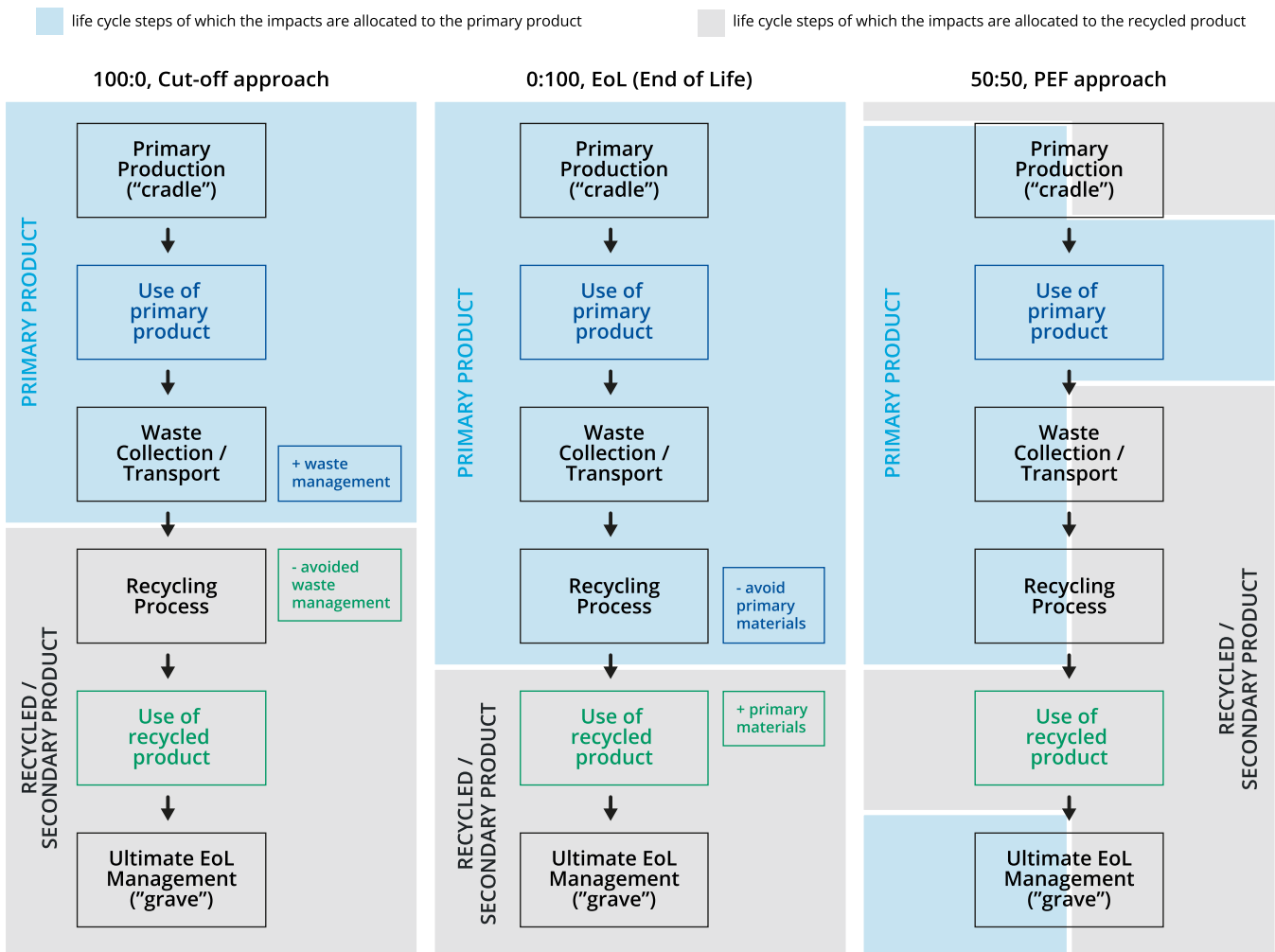


Figure 15: Main approaches to allocate impacts and benefits in LCA between first and next cycles. The 100:0 approach, or cut-off approach, is preferred in situations where demand for the waste material is low compared to the offer. This approach considers that the recycling process uses a burden-free feedstock. The 0:100 approach, or EoL recycling approach, is preferred when the demand for waste material is higher than the offer. This approach attributes all of the benefits of recycling to the primary product system, which generates recycled materials at end-of-life. The second life cycle (in grey) incurs the burden of using a recycled/secondary product instead of burdenless waste. The 50:50, or PEF (Product Environment Footprint) approach, share the impacts and benefits between the primary and secondary product cycles. Adapted from [17].

- The **100:0 approach**, or cut-off approach, is preferred in situations where the demand for waste material is low compared to the offer. This approach considers that the secondary product system (i.e. the circular solution) should not incur an environmental cost for the feedstock which is considered as free of environmental burdens. Thus, the circular solution receives all of the benefits of recycling, whereas none of these benefits are credited to the product system which generated waste materials for recycling. This approach is easy to apply and understand because it naturally follows the technical and business boundaries. In the example of waste PET bottles recycled into polyester clothing, the circular system receives flakes of waste PET from the primary product system. This feedstock is considered burdenless, meaning that the PET flakes have zero associated environmental impacts when they enter the circular system. The primary product system does not receive any credit for generating reusable material, and it is allocated the impact of the flake-generating process.
- The **0:100 approach**, or EoL recycling approach, is preferred when the demand for waste material is higher than the offer. This approach attributes all benefits of recycling to the primary product system, which generates the recycled waste. These benefits are attributed in the form of an environmental credit for having avoided future production of virgin material. The circular solution, which turns the recycled materials into a new product, receives none of the benefits of recycling and incurs the same environmental burden as if it were using virgin materials. If this approach were applied to the example of waste PET bottles recycled into polyester clothing, the primary product system (i.e. PET bottles) would receive an environmental credit equal to the amount of virgin PET production that is avoided due to the use of the recycled product. The secondary product cycle, which uses the recycled PET, would incur the same environmental burdens as if it were virgin PET.
- In the **50:50 approach**, benefits of recycling are shared equally between the primary and the secondary product cycles. The primary product system receives half of the credit for generating recycled material, and the secondary product system incurs only half of the burden for the material it uses.
- Variations on this approach further adjust the sharing of benefits to more precisely reflect market realities. **The Circular Footprint Formula (CFF)**⁴ for example, which was developed as part of the European Commission's Product Environmental Footprint initiative, includes an "A factor" representing the market balance between offer and demand for recyclable materials [18]. In PEF studies, a low A factor (e.g. A = 0.2) is recommended when the offer is low and demand is high. Meanwhile a high A factor (e.g. A = 0.8) is recommended when the offer is high but the demand is low⁵. The CFF also includes quality ratios to address the issue of downcycling, in which the secondary product is of lesser quality than the primary product. These quality ratios are often based on economic aspects (price ratio of secondary compared to primary materials), or on physical aspects if more relevant.

By sharing the benefits of recycling between Life cycles, intermediate approaches offer a balance between promoting recycling and including recycled material in new products. This is especially appropriate for circular solutions for which the market situation is not clear-cut, in which case it is best to favor the entire recycling process rather than a single actor.

The specific case of closed-loop systems

In closed-loop systems, a product that has reached its end-of-life is recycled into the same product, with identical properties. Examples include chemical recycling of PET bottles into new bottles of identical quality, or recycling of aluminium cans into new aluminium cans. In these examples, the production of the primary product uses a portion of recycled material, which is generated again during recycling at end-of-life and then included in an identical secondary product, and so on.

Both approaches are simple to apply. They are convenient for situations in which the market balance between offer and demand for recycled materials is well known, where the choice is obvious between promoting recycled content in products or recovery at end-of-life. However, when that is not the case, an intermediate approach is necessary to share the benefits and burdens of recycling equitably between the life cycle that produces waste and the life cycle that consumes it.

4. The Circular Footprint Formula was developed as part of the European Commission's Product Environmental Footprint initiative, with the aim of standardizing the calculation of environmental burdens and benefits within the production and end-of-life of materials. It is used to model the recycled content of products and the end-of-life of materials, through landfill, incineration and recycling.

5. The A factor allocates burdens and benefits between supplier and user of recycled materials. It is added to the CFF formula to enable reflecting the market realities of user demand and supplier offer of materials. When the A factor is low, meaning that the demand for recycled material is higher than the offer, the impacts and credits of the process are mostly given to the life cycle that produces the material (e.g., metals). On the opposite end of the spectrum, when the recycled material is highly available but demand is low (e.g. EoL tyres), the impacts and credits are mostly allocated to the user of the recycled material. In the case of plastics, the market is considered balanced and a value of 0.5 is recommended by the European Commission.

In such closed-loop systems, the allocation approaches mentioned in section *"The general allocation approaches for both open-loop or closed-loop systems"* (page 32) remain applicable but are not necessary. Because the recyclable material (e.g. PET pellets) is both utilized and generated by the same product system, there is no need to share the burdens and benefits of recycling between multiple stakeholders. In practice, this is done by directly accounting for the reduced amount of virgin material needed as input. The burdens of recycling, which involves collecting waste PET and transforming it into pellets, can be accounted for at end-of-life.

Figure 16 presents a closed-loop system in which a product utilizes a portion of recyclable material (R_1) and, at end-of-life, generates more recyclable material (R_2). In the simplest version of a closed-loop system, $R_1 = R_2$ and the recyclable material stays continuously within the system. The burdens of recycling (E_{recycled}) are included. The benefits of reusing secondary material are accounted for by reducing the amount of virgin material necessary in the product cycle ($1 - R_1$), and thus of the associated burdens (E_V).

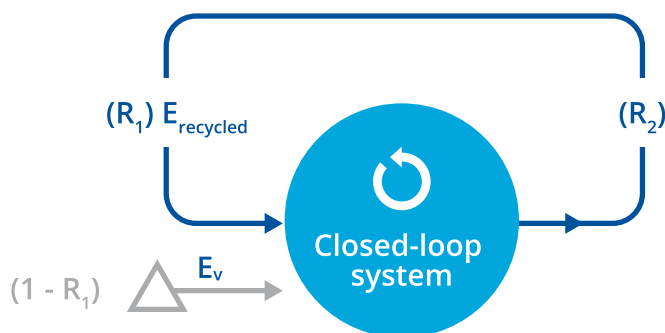


Figure 16: Schematic representation of a closed-loop system in which a product utilizes a portion of recyclable material (R_1) and, at end-of-life, generates more recyclable material (R_2). The benefits of reusing secondary material are accounted for by reducing the amount of virgin material necessary in the product cycle ($1 - R_1$). Source: Quantis (ScoreLCA document).

LCA TIP: Carbon accounting with a Mass Balance chain-of-custody model

Another allocation question arises when a plant produces an end product from a mix of recycled and non-recycled feedstock. Take the example of chemical recycling technologies which, unlike mechanical recycling, generate virgin-grade feedstock which is then used to produce plastic. Producing this plastic would require prohibitively large infrastructure investments if they were to be operated separately from conventional plastic production. For this reason, the chemical recycling technology is simply plugged in to the existing chemical infrastructure.

Because recycled feedstock is mixed with virgin feedstock, it is not possible to analyze the recycled content in the final plastic, as all products stem from a portion of recycled material, but it is possible to track the physical relation of the feedstock and the final product. ISO 22095 further describes the requirements for a mass balance chain-of-custody model.

With mass balance accounting, the recycled feedstock is allocated to different end products according to a set of rules [19]. These products may then claim and market the content as "recycled" or "circular".

From the point of view of the plastics manufacturer, recycled plastics enter the plant as just another raw material, are blended with other raw materials to produce a variety of products, and the amount of products considered as "recycled" or "circular" that leave the manufacturing plant is equal to the amount entering it. **From the point of view of the consumer, one part of the products is marketed as "recycled" or "circular" and the rest is not. "Recycled" or "circular" products may be sold at a premium price to fund the recycling process.**

Allocating environmental benefits when the final product stems from a mix of recycled and non-recycled feedstocks: case study by Eastman Chemical

Carbon footprint of Eastman’s carbon renewal technology, producing syngas from a variety of mixed plastic waste instead of coal: the “mass balance” accounting approach

This LCA nicely illustrates what to do when a mix of recycled and non-recycled feedstocks generates a unique (intermediate) product. The study compares Eastman’s carbon renewal technology (CRT), a commercial molecular recycling technology for mixed waste plastic generating synthesis gas (“syngas”), compared against the conventional production of the same syngas. Syngas, composed of carbon monoxide and hydrogen, is used as a “building block” to produce new plastic resins, fibers and chemical products.

Examples of suitable waste feedstocks for CRT recycling include post-consumer polyester carpet fiber, pre-consumer cross-linked polyethylene scrap, and post-industrial cellulose acetate plastic scrap. As none of these materials are suitable for conventional recycling, they are typically disposed of in landfills. By breaking them down to the molecular level, CRT enables the valorization of these wastes into syngas which is further converted into new plastic materials, with no compromise in quality.

The CRT recycling process, a “reforming” technology, takes place in existing Eastman manufacturing systems producing syngas from coal. CRT allows mixed plastic waste to replace an equivalent amount of coal as a feedstock for syngas production. The mix of plastic feedstock reflects a range of actual sources recycled in 2020. The analysis focuses on the carbon footprint, comparing the production of 1 kilogram of syngas produced via the two different routes. Climate impacts are allocated according to two approaches:

1. Cut-off approach for the recycled feedstock: waste plastic is attributed zero environmental impacts

The waste plastic feedstock is considered burdenless. This cut-off approach is selected because of the low economic value of the considered waste plastics and of the diversity of feedstocks and final products: CRT recycles a diverse mix of waste plastics into a set of plastics and fibers.



2. Mass balance for the produced syngas: part of it is considered as recycled

Capitalizing on existing installations, Eastman’s CRT recycling process occurs in operations already producing syngas from coal. Relying on existing world-scale manufacturing installations avoids the large and inefficient investments that construction of an independent segregated process would require.

The syngas product is an indistinguishable mix of hydrogen and carbon monoxide obtained by reforming mixed feedstock containing recycled plastics and coal. A specific quantity of syngas is allocated as containing recycled content based on the quantity of waste plastic feedstock that is input into the reforming process. This is the “mass balance approach” and, at Eastman, is certified under ISCC PLUS. The same mathematical attribution is also used when calculating the carbon footprint of CRT syngas on the one hand and of conventional syngas on the other hand. The CRT syngas with allocated recycled content is used downstream to produce plastics and fibers with recycled content under the mass balance approach. Figure 17 compares the carbon footprint of syngas based on coal to that of CRT syngas.

CRT recycling leads to a 20% reduction in greenhouse gas (GHG) emissions, taking into account transportation and pre-processing of the waste materials. The reduction grows to 50% when waste feedstocks are considered as stemming from the most advantaged plastics sources within a 500-mile radius from the CRT site.

The actual carbon footprint of the mix of coal-based and CRT-based syngas lies between the two values on figure 17. Mass balance demonstrates the value of further developing CRT, by showing the maximum reductions that could be obtained with this technology.

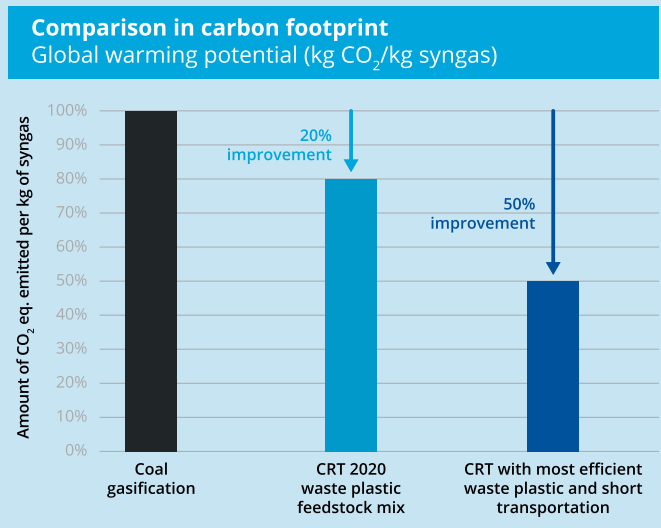


Figure 17: Carbon footprint for syngas from coal compared to recycled feedstocks. These feedstocks correspond to a range of actual waste sources (in light blue) or to a more advantageous scenario in terms of type and location of plastic waste (in dark blue).

www.eastman.com
 More on study:
<https://bit.ly/3t6uqTx>



When to account for changes in the context?

Comparative LCA are used to determine which of two solutions is best from an environmental standpoint. LCA results are however context-dependent, meaning that results would be different if, for instance, the solution were implemented in a country with a different energy mix leading to a lower carbon impact. Emerging circular solutions are particularly likely to be affected by changes in the context as they develop to become mature solutions in the future.

Some key contextual elements to consider are:

- **Green energy:** the environmental impact of energy is lower when it comes from a renewable source. Energy-intensive circular solutions will greatly benefit from cleaner energy and the availability of low-carbon energy is expected to greatly increase in the future, as is the demand.
- **Feedstock availability and cost:** many circular solutions make use of recovered resources that are currently abundant and readily available, such as plastic waste. The development of such solutions leading to a rise in demand, the access to this feedstock may be subject to increasing competition.
- **Emerging technologies:** circular solutions are often based on novel technology clusters that are not yet mature. LCA can be adapted to cope with missing data and potential efficiency improvements of emerging technologies.

In LCA, potential future developments such as those mentioned above are clearly mentioned in the study, as an acknowledgment that environmental impacts may evolve over the years. Some studies go further than a simple mention and carry out sensitivity analyses to study the effect of context variations on LCA results.

Evolving supply of green energy

For the LCA of a process using electricity or heat, the energy source(s) influence the associated emissions. Thus, the energy mix may have a noticeable effect on the environmental impacts of the circular system. Energy from renewable sources in particular (e.g. renewable electricity or biogas), hereafter referred to as "green energy", has a much lower climate impact than most traditional energy sources such as coal or natural gas.

Most often, LCA studies base calculations on the energy mix of the country in which the technology is implemented, which may contain a percentage of green energy. In the specific case of a process using exclusively green energy, the energy mix may be defined as "100% renewable energy" (more on this in section "*How do circular solutions benefit from green energy supply*" (page 38)).

Because the climate impact of green energy is low, increasing availability of green energy may shift LCA results to justify solutions that are energy-intensive. This shift is expected to continue, as many countries have committed to reduce overall greenhouse gas (GHG) emissions by increasing the percentage of green energy in the overall energy mix. At the same time, the demand for green energy is likely to greatly increase in the coming years as entire economies aim to become carbon neutral.

Future availability and demand for green energy are important to consider in LCA of circular solutions. Indeed, they are often based on novel technologies which could take several years before becoming fully implemented and operational, by when the energy mix will have evolved. This leads to a first question on how such potential evolutions can be integrated into LCA, to best orient decision-making.

It also leads to a second question concerning the attribution of emission reductions linked to decarbonizing energy: when a process is based on green energy instead of fossil energy, can it claim emission reductions if it does not actively participate in generating this green energy?

Future availability of green energy can modify the environmental benefits of circular solutions

Prospective LCA of circular solutions is helpful to decide whether to further support their development. The innovative technologies and partnerships involved are expected to continue evolving until they are fully mature and implemented. By that time, the energy mix will potentially include a much larger part of green energy, generating fewer emissions.

While a greener energy mix benefits both circular and non-circular solutions, emission reductions are proportionally larger for solutions requiring large amounts of energy. In CCU, for example, CO₂ can be activated with hydrogen, which itself is energetically costly to produce. If the environmental impact of energy is reduced, so is the impact of hydrogen production and thus of the CCU technology.

As the share of green energy increases in the national mix, reducing its environmental impacts, it also reduces the environmental credits of energy-producing solutions such as incineration. For example, when comparing incineration and chemical recycling as two end-of-life scenarios for plastic, incineration is credited for heat and electricity recuperation. The credit corresponds to avoided impacts of conventional production of heat and electricity, i.e. from the national mix. As the impact of the national mix is reduced, so is the credit attributed to incineration, favoring chemical recycling for plastic end-of-life.

All you need to know on changes in the context

Future availability of green energy can modify the environmental benefits of circular solutions

Circular solutions are often assessed for their environmental performance at an early stage in their development, meaning they may not be fully implemented until several years later. For this reason, comparative LCA of such solutions must examine scenarios of varying green energy availability in the future. For energy-intensive circular solutions, the impact may be large. Often, this potential effect is examined via a sensitivity analysis.

Does a project purchasing green energy create an increase in supply?

At a global level, the development of green energy sources reduces the climate impact of overall energy consumption. However, a system purchasing green energy does not generally lead to an increase in its supply. Thus, LCA of green energy-powered processes often use the national energy mix in the calculations, except if it can be shown that the process in question is directly responsible for the generation of the green energy it uses.

Abundance or scarcity of recovered feedstocks can change in time and influence allocation

Many circular solutions make use of resources that are abundant and have little to no economic value (e.g. by-products of existing processes, or end-of-life waste material). Further development and implementation of these solutions may increase demand for the secondary feedstock they use, which will thus gradually become less abundant and more expensive. As the market for these resources reaches a new equilibrium, allocation approaches must be adapted to reflect this new balance.

Secondary feedstock scarcity: considering longer term scenarios

As the abundant recovered resources which provide the basis for circular solutions become scarce, they also become harder to collect. Circular solutions may thus become less profitable, both economically and environmentally. This can be considered in carbon accounting by using scenarios, or should be addressed at least qualitatively in the interpretation of results.

Future improvement of circular technologies can be simulated or estimated

LCA of novel circular solutions reflect their current level of maturity and environmental efficiency. On the other hand, their conventional counterparts are often fully mature technologies already widely implemented and benefiting from (environmental) economies of scale. Increases in process efficiency of the circular solution is an important topic to consider. To produce a fair comparative assessment, improvement of circular solutions can be simulated or estimated to evaluate their future performance.

New or innovative circular solutions: pay attention to data gaps

LCA methodology relies on a mix of average and process specific data depending on the availability and criticality of these data. Whenever specific data is missing, surrogate data obtained from LCA databases, from the literature or from simulations are used. Data gaps can be particularly frequent when assessing new or innovative technologies such as circular solutions. In such cases (e.g. missing data on the energy consumption of the recycling process or the yield of the process) conclusions should be drawn carefully.

In practice, changes in the energy mix are examined as a “sensitivity analysis”. Some [8] recommend performing a scenario analysis in which several paths are explored to consider the transition of the energy mix, from a status-quo scenario to a fully decarbonized scenario. Another approach is to fully replace the energy mix with a renewable source in the calculations. Both approaches may not accurately forecast the energy mix transition, but provide valuable insights into the degree to which the assessed solution is influenced by a green energy transition.

How do circular solutions benefit from green energy supply

Green energy improves the environmental performance of energy-consuming processes. Circular solutions, which can be energy intensive but use less fossil feedstock, are favored by increasingly available green energy.

While, at a global level, it is clear that the development of green energy leads to fewer emissions from the energy sector, there remains some discussion on how to distribute these emission reductions between certified green energy consumers and those that simply use the national energy mix.

One option is to fully attribute the lower emissions related to green energy to the process which makes use of it. For example, if a chemical recycling process uses 100 kWh of conventional energy, switching to renewable energy leads to a reduction in the process’s energy-related emissions. Such an approach is often used as a sensitivity analysis: LCA of a process is first carried out considering a conventional source of energy, which is then replaced with a renewable source in a sensitivity study. The magnitude of the calculated emissions reduction gives an indication of how dependent the process is on green energy to be more environmentally performant.

Purchasing 100% green energy to power a process does not however increase the overall supply unless a renewable power plant was built specifically for this reason. Rather, it is just diverting green energy from another customer. For this reason, it is often recommended to use the national energy mix in an LCA of a green energy-powered process.

For example, the EU recommendations for LCA for CCU state that “in line with consequential modelling it is thus not acceptable within LCA to allow any additional power consumers including CCU plants to claim renewable electricity from previously existing renewable power installations”. Only in the particular case where green energy is produced specifically for the process under assessment, either on site or through a Power Purchase Agreement, then LCA may consider 100% green electricity. Other standards and norms however, including ISO 14067 for product carbon footprinting, support the use of green energy in LCA in a wider range of situations⁶. Thus, when reading an LCA report, it is important to bear in mind the chosen approach for green energy accounting.

6. See ISO 14067, 14021 and 14026 for further guidance.

It should be noted that, if the objective of the LCA is to compare a circular solution to a conventional equivalent, it is important that the two solutions use the same source of energy to compare them fairly. Indeed, if one solution is considered to be powered with renewable energy, whereas the other uses conventional energy, LCA results will be biased in favor of the first solution. For the comparison to be fair, LCA should consider that both solutions use the same source of energy (e.g. the national electricity grid) in order to truly reflect the comparative environmental performances of both.

Variations of feedstock availability and cost

Abundance or scarcity of recovered feedstocks influence allocation decisions

Many circular solutions make use of resources that are abundant and have little to no monetary value, which are generated as co-products of an existing system (e.g. waste animal fats from meat processing) or as end-of-life product waste (e.g. plastic waste). Because there are few applications for these resources, they are cheap, abundant and, in fact, are a burden to dispose of. These characteristics are currently driving the development of circular solutions.

As these circular technologies evolve toward maturity or new solutions are developed, they will use increasing amounts of the abundant resources mentioned above. Thus, over time, the balance between offer and demand will change, as well as costs. The opposite may also happen, when a scarcely recovered feedstock becomes more abundant as recovery schemes develop. In LCA, these market effects influence results via the allocation decisions.

This is for example true for co-products of a multifunctional system, where burdens and benefits are often allocated based on the relative economic value of the co-products. This approach is called economic allocation and is detailed in section “*Allocation between the co-products of a multifunctional system*” (page 25). Take the example of ethanol produced from sugarcane bagasse, a by-product of sugar production. Bagasse has generally been considered as waste with little economic value. Sugar, on the other hand, is a highly valuable product. For this reason, economic allocation of the impacts of sugarcane cultivation attributes most of those impacts to sugar, and very little to bagasse. If the demand for bagasse increases (for the production of ethanol or any other use), so does the economic value of bagasse. This would lead to a shift in allocation in which a larger part of the impacts of sugarcane production must be attributed to bagasse.

Evolving sources of energy: case study by Braskem

LCA of Green and Fossil Ethylene Vinyl Acetate

This LCA evaluates the environmental impacts of bio-based Ethylene Vinyl Acetate (EVA) ("Green EVA") compared to its conventional, fossil-based production route ("Fossil EVA"), for a range of environmental impacts. EVA is a widely-used polymer-based material made from ethylene and vinyl acetate. This LCA exemplifies how the question of green energy can be addressed in LCA calculations.

In the "Green EVA" scenario, ethylene comes from sugarcane while vinyl acetate is fossil-based. In the "Fossil EVA" scenario, both ethylene and vinyl acetate are obtained from petroleum. The study is a cradle-to-gate assessment, i.e. it does not include the use phase and end-of-life as these phases are identical for Green EVA and Fossil EVA.

The Green EVA solution generates electricity

In the Green EVA scenario, sugarcane is processed into ethanol, and remaining biomass is burned to produce electricity. The Green EVA system is therefore multifunctional, producing ethanol and electricity as a by-product. Multifunctionality is handled via substitution, a variant of system expansion (see section "Allocation between the co-products of a multifunctional system" (page 25)).

The Green EVA scenario receives a credit for substituting 1.5 kWh of electricity - the amount generated by burning biomass residues - from a conventional source. The study assumes that bioelectricity replaces electricity from a thermo-electric power plant powered by natural gas implanted in Brazil, the country in which the study is carried out. While this assumption is realistic for now, as bioelectricity will preferably replace thermal sources, the authors acknowledge that the national electricity mix is undergoing strong changes and that thermal electricity may not be representative in the long run (in Brazil, the grid mix is in already made up in large part of hydroelectricity). For this reason, the authors carried out a **sensitivity analysis** on the conventional electricity source substituted in the Green EVA scenario.

In this analysis, the Fossil EVA scenario remains the same. The Green EVA scenario, however, is modified so that the surplus electricity from bagasse burning substitutes the average grid mix instead of 100% thermal electricity. Results are shown in figure 18.

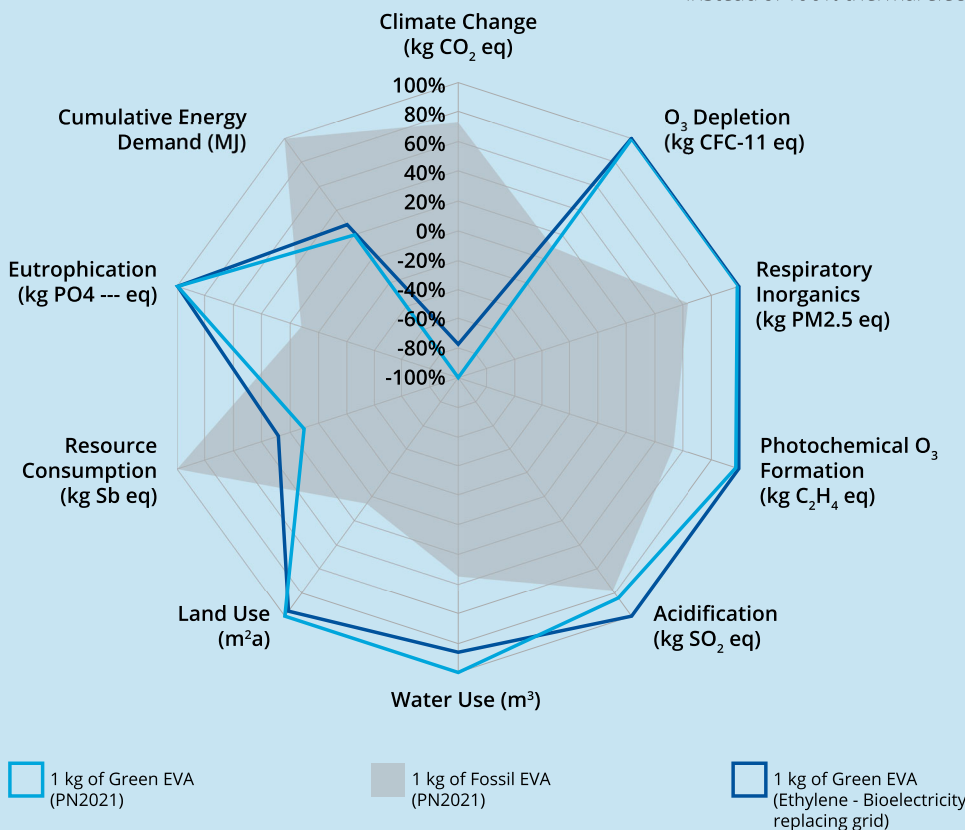


Figure 18: Sensitivity analysis for the replacement of electricity grid mix by the surplus electricity from bagasse burning. The reference scenario, Fossil EVA, remains the same (in grey). The original Green EVA scenario is shown in light blue. The sensitivity analysis, with results shown in dark blue, corresponds to Green EVA production in which surplus electricity from bagasse burning substitutes the average grid mix instead of 100% thermal electricity. Regarding the Climate Change indicator⁷, the Fossil EVA scenario has the largest impact. The sensitivity analysis (in dark blue) leads to a slight increase in emissions compared to the original Green EVA scenario (in light blue). This reflects the fact that, if surplus electricity from Green EVA substitutes the average grid mix, the benefit for the climate is lower than if substituting thermal electricity.

7. Ten indicators of environmental impact were included in the study. They show that, while Green EVA presents a clear advantage from a climate standpoint, it is more impactful than the conventional alternative for other environmental issues.

www.braskem.com
More on bio-based ethanol:
<https://bit.ly/39Z6bPH>



Market effects can also affect allocation decisions in the case of waste material generated at product end of life. Indeed, the environmental impact of recycling must be shared between two life cycles: that of the product that is generating the waste, and that of the recycled product that is generated from this waste. There are several approaches to allocating between life cycles, which are detailed in section *"Allocation between two consecutive product life cycles"* (page 29). One commonly used approach, the Circular Footprint Formula (CFF), illustrates how the balance between offer and demand for the waste material can affect allocation. In the CFF, the "A factor" is set depending on the market situation. It is closer to 0 when there is high demand for the waste material, as is the case for many metals, and closer to 1 when the demand is low, such as for textiles. As the resources used by a circular solution become less readily available, the A factor must be set closer to 0 to reflect the new balance between offer and demand.

Diminishing economic and environmental returns

As the abundant resources which provide the basis for circular solutions become scarce, they may also become harder to collect. Circular solutions usually start by using feedstock that is easy to obtain, such as large streams of non-mixed industrial plastic waste or CO₂ emissions from ammonia production. As the easily accessible resources are increasingly utilized, other sources may be considered even if less abundant or harder to access. This includes Municipal Solid Waste with decreasing fractions of plastic, or atmospheric CO₂ that is much less concentrated than CO₂ from industrial exhaust.

According to the phenomenon of diminishing economic returns, circular solutions become less economically viable as the resources they are based on become harder and more expensive to obtain. This also holds true from an environmental perspective: while collecting waste PET from a fruit packing house does not require much transportation, sorting or treatment, recovering PET (polyethylene terephthalate) from mixed Municipal Solid Waste is a more complex process both logistically and technically. As the need for transportation, sorting and treatment increases, so does the environmental impact of the circular solution as a whole.

Thus, a balance should be found between maximizing product circularity and the environmental impacts it induces. The optimal degree of recycling is difficult to determine before the equilibrium is reached naturally. The question remains important and can be addressed at least qualitatively in LCA studies.

Emerging circular technologies

Circular solutions are based on novel technologies enabling the (re)use of resources which were not usable previously. Their environmental performance must often be assessed at an early stage of their development, to determine whether it is worthwhile to continue investing in the solution as a replacement for an existing alternative. In particular, LCA can help with the early detection of "environmental hotspots" which could further be improved through additional research and development.

Prospective LCA can guide decision-making, however it requires paying special attention to:

- **Data availability:** for technologies at pilot stage, there can be missing data regarding one or several parts of the process. Such data gaps must be bridged.
- **Future technological improvements:** as technologies evolve from pilot stage to maturity, they become more efficient and their environmental performance can improve. LCA studies must take this into consideration to ensure that a fair comparison with the reference technologies, which may also evolve in time.

Why scarce data is an issue

LCA methodology should rely on process-specific data regarding inputs of water, energy and raw materials in order to ensure the overall robustness of the approach. When some of this data is not yet available for the components of the circular system, LCA relies on surrogate data to fill the gaps. This surrogate data can be obtained from LCA databases, from the literature or it can be estimated based on national economic data in Input-Output tables. Another approach that is often chosen is process simulation, for example to compute energy-related emissions, instead of real process-specific data.

Surrogate data delivers conclusions that are therefore less representative of the specific process under study. It is a particularly relevant issue for novel circular solutions at pilot stage, for which process-specific data is often lacking. In these cases, it is recommended to fill data gaps in order to preserve the quality of the LCA analysis.

For example, the EU Guidelines for LCA of Carbon Capture and Utilization state that data gaps can be filled with an appropriate proxy, and recommend a subsequent "relevance check" in which both a "best case" and a "worst case" assumption are tested.

Nevertheless, reliance on surrogate data should be limited to a minimum. Section *"Promoting data availability"* (page 42) addresses the importance of increasing data availability to reinforce carbon LCA.

Considering potential technological improvements

LCA is a powerful tool to evaluate the environmental impacts of emerging solutions. However, such emerging technologies (and their environmental footprint) are likely to continue evolving as a result of continued research and potential economies of scale. On the other hand, their conventional counterparts are fully mature technologies already widely implemented and benefiting from such (environmental) economies of scale.

To produce a fair comparison between an emerging circular solution and its conventional counterpart, the assessment must take into consideration the scale-up of circular processes until full maturity. Several approaches are available to model current pilot-scale technologies at maturity.

For example, the United States' Department of Energy (US DOE) classifies technologies according to their level of maturity, ranging from lab-level research to commercial scale, and describes the LCA expectations at each level, from a screening-level LCA allowing for approximations, to a project-level LCA reflecting real-world conditions [20].

Likewise, in a report on comparative LCA of alternative feedstock for plastics production, the European Commission's JRC states that "companies and industries generally go through a learning curve, meaning that their efficiency and productivity increase as their experience (i.e. cumulative production) increases." This learning curve can be accounted for through process simulation, generating data representative of a more advanced process; by using existing data from a similar, mature process; or by applying "learning rates", reflecting improvements experienced in similar processes.

These approaches are each associated with some uncertainty as they are either based on estimations and simulations, or they produce an assessment that does not correspond exactly to the considered technology. Furthermore, they are not always applied consistently across LCA studies.

Many LCA practitioners choose not to include potential technological improvements in the calculations, but rather to address them in the interpretation of results, an important section of every LCA detailing the main challenges faced by the assessed solution and the key levers to improve its overall performance.

HOW to reinforce LCA?

LCA produces a holistic and unequivocal environmental profile that enables the comparison of circular solutions with their conventional counterparts. General LCA methodology is applicable to circular solutions just like their conventional counterparts. Nonetheless, further developments can continue to increase its relevance.

LCA studies including other impact categories (e.g. land use or water consumption) will provide additional insights relevant for decision-making between circular and conventional systems. Improved data availability for emerging circular solutions will also increase the robustness of comparative assessments. Lastly, the definition of common standards in LCA and the development of a good understanding of the methodology are both important to align future work in the field.

Considering all relevant environmental impacts: land use, toxicity, water consumption, ...

LCA assessments are increasingly used to quantify the expected benefits of a circular solution on climate change. Other environmental impacts including land use, toxicity or water consumption should also be assessed in order to provide a holistic assessment of environmental impacts. This document and the case studies presented put the focus on climate change, but the approaches described in the previous chapters are also relevant for multi-criteria studies.

A multi-criteria approach is recommended to identify potential trade-offs between impact categories. For circular solutions aiming to re-circulate carbon inside new products, carbon emissions are reduced but other impacts may increase as a result.

One example is that of biofuels. While these can effectively reduce the greenhouse gas (GHG) emissions related to energy generation and use, the resulting demand for more agricultural inputs can lead to additional burdens in terms of toxicity or land use. This holds true for other bio-based products, such as olefins from renewable sources like wood or maize [21]. LCA shows that, while GHG emissions are greatly reduced compared to conventional olefin production, the acidification potential can increase significantly due to agricultural feedstock production. Other impact categories are just as important to consider as climate change, and tradeoffs such as in the production of bio-based olefins must be identified. This is useful to provide the best guidance for decision-making and, when possible, develop countermeasures to these tradeoffs.

Promoting data availability

LCA assessments preferably rely on process-specific environmental data in order to calculate the overall environmental impacts of circular systems. Data completeness and quality ensure that the assessment is robust. However, missing data is a common issue in LCA and particularly for circular solutions still at pilot-scale, for which little data is available. *"Emerging circular technologies"* (page 40) further discusses these data gaps and the methods by which they can be handled in LCA to increase the precision of the results.

Ultimately, although LCA provides useful insights even when data is incomplete, its value lies in the solid and accurate results it can yield when the assessment is based on relevant data. Thus, promoting data availability in all sectors, including the chemical industry, is key to further enhance the value of LCA. This is achieved by developing collaborative databases with a network of member companies in which stakeholders share data to further advance LCA research in the field. Another approach is to carry out specific LCA that are made publicly available to enrich the debate.

Common standards in LCA define the way forward

Every LCA relies on a set of methodological decisions regarding the aspects discussed in the previous chapters, such as allocation or accounting for the use of green energy. LCA practitioners must examine the various options available and make the best choice according to the context of the study, and be explicit about them.

Many guidelines and standards have been developed to assist LCA practitioners in their decision making, and to ensure consistency in the results obtained across different studies. These guidelines often stem from initiatives a specific industry sectors to guide LCA practitioners, such as CCU technologies [8] [10], or those written by the World Steel Association for the steel industry [22]. Cross-industry work, such as the PEF (Product Environmental Footprint) of the European Commission, is also important to harmonize such sector-specific guidelines.

Basing methodological decisions on existing guidelines and standards leads to results that are comparable with other solutions, providing far more value in terms of decision-making support. The consistency with which these standards are applied and the quality of data are two key elements that reinforce LCA and strengthen its role as the essential tool for environmental assessments.

All you need to know on how to make LCA more robust

Multi-impact LCA are key

The environmental impacts - and potential benefits - of circular solutions extend beyond climate change. Other impacts, such as land use, toxicity or water consumption, are also important to consider. As for non-circular systems, multi-impact LCA can help identify tradeoffs between the different environmental impacts, providing guidance for decision-making and to potentially develop countermeasures to these tradeoffs. All methodological considerations addressed in the previous chapters for greenhouse gases (GHG) are also relevant for other environmental impacts.

Promoting data availability for new circular processes

LCA assessments preferably rely on process-specific data for critical parts of the assessed process. This reinforces credibility and overall quality. Thus, increasing availability of process-specific data for emerging circular systems will be key. This is often achieved by developing collaborative databases between stakeholders of a same sector, or by making process-specific LCA data publicly available for use in other studies in the future. As these data become publicly available, existing LCA studies should be reviewed to ensure that the conclusions are still valid in light of this new information.

Common standards in LCA of circular systems define the way forward

Every LCA relies on a series of methodological assumptions, such as allocation choices or accounting for the use of green energy. While LCA is a mature methodological field, additional guidelines on aspects linked to circularity are continuously published, to guide methodological choices and enable comparability across studies. The development of these standards will continue to enhance consistency across studies. It is crucial that standards be well understood, well received and come with the appropriate tools to be used correctly and consistently in the field.

About ICCA

The International Council of Chemical Associations (ICCA) is the worldwide voice of the chemical industry, representing chemical manufacturers and producers all over the world.

Responding to the need for a global presence, ICCA was created in 1989 to coordinate the work of chemical companies and associations on issues and programs of international interest. It comprises trade associations and companies involved in all aspects of the chemical industry.

ICCA is a chemical industry sector with a turnover of more than 3,600 billion euros. ICCA members (incl. observers & Responsible Care members) account for more than 90 percent of global chemical sales. ICCA promotes and co-ordinates Responsible Care® and other voluntary chemical industry initiatives.

ICCA has a central role in the exchange of information within the international industry, and in the development of position statements on matters of policy. It is also the main channel of communication between the industry and various international organizations that are concerned with health, environment and trade-related issues, including the United Nations Environment Programme (UNEP), the World Trade Organization (WTO) and the Organisation for Economic Co-operation & Development (OECD).

Related ICCA documents

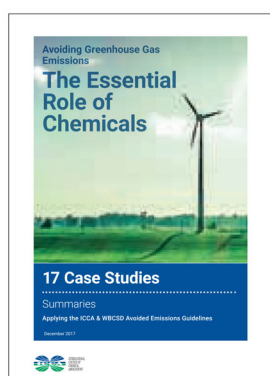
This document on **LIFE CYCLE ASSESSMENTS APPLIED TO CIRCULAR SYSTEMS** is the latest of a series of studies on the quantification, with a life cycle perspective, of greenhouse gas (GHG) emissions savings enabled by products of the chemical industry:



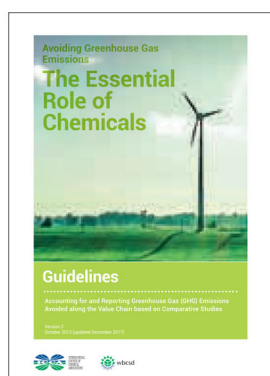
ENABLING THE FUTURE: CHEMISTRY INNOVATIONS FOR A LOW-CARBON SOCIETY (2019): Commissioned to KPMG and for, the study reveals that 450 generic technologies are enablers of GHG savings, of which 137 are highly feasible. The 17 innovative solutions featured in the report could develop emission reductions of about 5-10 Gigaton by 2050 – which is about one quarter of the total world emissions today. These solutions will require robust transformation of entire sectors, such as power generation and storage, industry and production, mobility and transportation, nutrition and agriculture, and building and housing.



AVOIDING GREENHOUSE GAS EMISSIONS: THE ESSENTIAL ROLE OF CHEMICALS. QUANTIFYING THE GLOBAL POTENTIAL (2017): Commissioned to Ecofys, the report illustrates how efficient processes and chemical industry solutions can contribute to GHG savings. ICCA estimates that by 2030, light materials for transportation, efficient buildings and lighting, electric cars, wind and solar power and improved tires, at global scale, have the potential to avoid 2.5 Gigatons of GHG emissions globally every year.



AVOIDING GREENHOUSE GAS EMISSIONS: THE ESSENTIAL ROLE OF CHEMICALS - 17 CASE STUDIES (2017): Commissioned to Quantis, this report assembles 17 examples of Life Cycle Assessment case studies. The purpose is twofold: to motivate all stakeholders to discuss climate change using robust studies, taking the full life cycles into account, and to encourage all chemical companies to generate high quality assessments.



AVOIDING GREENHOUSE GAS EMISSIONS: THE ESSENTIAL ROLE OF CHEMICALS – GUIDELINES (UPDATED IN 2017): Prepared jointly with the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) the guidelines define how to measure avoided GHG emissions via LCA methodologies applied to entire value chains.

The case studies

BASF	19
Evaluation of pyrolysis with Life Cycle Assessment – 3 case studies	
Inovyn	21
PVC Recovery Options: Environmental and Economic System Analysis	
Sabir	23
Renewable Polyethylene based on Hydrotreated Vegetable Oil from waste animal fats or vegetable oil	
Covestro	28
Towards sustainable elastomers from CO ₂ : Life Cycle Assessment of carbon capture and utilization for rubbers	
Domo Chemicals	30
Comparative Life Cycle Assessment of two polyamide 66-based engineering plastic formulations	
Eastman	35
LCA carbon footprint summary report for Eastman carbon renewal technology	
Braskem	39
I'm green™ bio-based EVA: Life Cycle Assessment of Green and Fossil Ethylene Vinyl Acetate	

Acknowledgments



This document was prepared with the help of **Julia Merriman** and **Marcial Vargas-Gonzales** of Quantis, the consultancy firm specialized in sustainability and Life Cycle Assessment. The case studies illustrating the LCA approaches were offered by seven companies: BASF, Braskem, Covestro, Domo Chemicals, Eastman Chemical, Inovyn and Sabic.

ICCA would also like to thank the Energy & Climate Change Leadership Group (E&CC LG), under the chairmanship of **Nobuyuki Kawashima** (Mitsui Chemicals) and **Masamichi Yagishita** (Showa Denko), the members of E&CC LG's cLCA Task Force and the representatives of chemical federations: **Ann Dierckx**, **Charles-Henri Robert**, **Irene van Luijken** and **Sophie Wilmet** (CEFIC), **Claus Beckmann** (BASF), **Guy-Noël Sauvion** (Solvay), **Hiroyuki Fujii** (Mitsubishi Chemical), **Marvin Hill** (ExxonMobil), **Osamu Mito** (Toray Industries), **Reiko Nonaka** (JCIA), **Yuki Hamilton Onda Kabe** (Braskem), and **Pierre Coërs** (Solvay) as project leader.

The technical content of the document has been elaborated and checked in close consultation with the cLCA Task Force complemented with company experts: **Claus Beckmann** (BASF), **Thomas Delfosse** (ExxonMobil), **Christoph Balzer** (Shell), **Birgit Himmelreich** (Covestro), and **Jean-François Viot** (Solvay).

Publisher

International Council of
Chemical Associations (ICCA)
Brussels, Belgium
www.icca-chem.org

Design

Landmarks
Brussels, Belgium
info@landmarks.be

Content Support

Quantis
Paris, France
info.france@quantis-intl.com

Bibliography

- [1] Ellen MacArthur Foundation, «Towards a Circular Economy: Business rationale for an accelerated transition,» 2016.
- [2] Accenture, "Taking the European Chemical Industry into the Circular Economy," 2017. [Online]. Available: https://www.accenture.com/_acnmedia/pdf-45/accenture-cefic-report-exec-summary.pdf
- [3] H. H. Khoo, «LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore,» *Institute of Chemical and Engineering Sciences*, vol. 145, pp. 67-77, 2019.
- [4] EU Technical Expert Group on Sustainable Finance, 2020. [En ligne]. Available: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/sustainable-finance-teg-final-report-eu-taxonomy_en.
- [5] Ellen MacArthur Foundation, «Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change,» 2019.
- [6] ICCA, [Online]. Available: <https://icca-chem.org/wp-content/uploads/2020/05/How-to-Know-If-and-When-Its-Time-to-Commission-a-Life-Cycle-Assessment.pdf>
- [7] ICCA (International Council of Chemistry Associations) and WBCSD (World Business Council For Sustainable Development), «Addressing the Avoided Emissions Challenge: Guidelines from the chemical industry for accounting for and reporting greenhouse gas (GHG) emissions avoided along the value chain based on comparative studies,» 2017. [En ligne]. Available: https://icca-chem.org/wp-content/uploads/2020/05/ICCA-2017_Addressing_guidelines_WEB.pdf
- [8] A. Zimmermann, L. J. Müller, A. Marxen, K. Armstrong, G. Buchner, J. Wunderlich, A. Kätelhön, M. Bachmann, A. Sternberg, S. Michailos, H. Naims, P. Styring, R. Schomäcker and A. Bardow, "Techno-Economic Assessment & Life-Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization," 2018.
- [9] S. LCA, «Economie circulaire: Concepts et Méthodes d'évaluation,» 2015.
- [10] A. Ramirez Ramirez, A. E. Khamlichi, G. Markowz, N. Rettenmaier, M. Baitz, G. Jungmeier et T. Bradley, «LCA4CCU - Guidelines for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilisation,» eport initiated and financially supported by the European Commission Directorate-General for Energy, 2020.
- [11] N. S., S. T., B. C., G.-G. P., G. J., K. A., S.-M. E., T. D., P. R. et M. L., «Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Alternative Feedstock for Plastics Production,» European Commission's Joint Research Center, 2020.
- [12] International Panel on Climate Change (IPCC), «Chapter 1. General Guidance and Reporting,» 2006.
- [13] M. Erlandsson et L. Zetterberg, «Accounting of Biogenic Carbon in Attributional LCA—Including Temporary Storage,» IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., Stockholm, Sweden, 2017.
- [14] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes et R. Samson, «Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments,» *Environmental Science & Technology*, vol. 44, n° %18, pp. 3169-3174, 2010.
- [15] L. J. Müller, A. Kätelhön, M. Bachmann, A. Zimmermann, A. Sternberg et A. Bardow, «A Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization,» *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, p. 15, 2020.
- [16] R. Meys, A. Kätelhön et A. Bardow, «Towards sustainable elastomers from CO₂: Life Cycle Assessment of carbon capture and utilization for rubbers,» *Green Chemistry*, n° %112, 2019.
- [17] B. Corona, L. Shen, D. Reike, J. Rosales Carreón et E. Worrell, «Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics,» *Resources Conservation and Recycling*, vol. 151, 2019.
- [18] S. Manfredi, K. Allacker, K. Chomkamsri, N. Pelletier et M. d. S. D., «Product Environmental Footprint (PEF) Guide,» European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 2012.
- [19] E. M. Foundation, «Enabling a circular economy for chemicals with the mass balance approach,» 2019. [En ligne]. Available: https://www.dsm.com/content/dam/dsm/corporate/en_US/documents/ellen-macarthur-foundation-mass-balance-white-paper.pdf [Accès le 2021].
- [20] T. J. Skone, M. Mutchek, M. Krynock, G. Cooney, A. Pegallapati, S. Rai, J. Chou, D. Carlson, M. Jamieson, A. Venkatesh, J. Littlefield, G. G. Zaines, S. Roman-White et E. Dale, «Carbon Dioxide Utilization Life Cycle Analysis Guidance for the U.S. DOE Office of Fossil Energy,» National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, 2019.
- [21] F. Keller, Roh Pin Lee et B. Meyer, «Life Cycle Assessment of global warming potential, resource depletion and acidification potential of fossil, renewable and secondary feedstock for olefin production in Germany,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 250, 2019.
- [22] World Steel Association, «Life Cycle Inventory Methodology Report,» 2017. [En ligne]. Available: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:6eefabf4-f562-4868-b919-f232280fd8b9/LCI+methodology+report_2017_vfinal.pdf [Accès le 2021].

