

プラスチックが 気候変動に 与える影響



目次

1. 要旨:プラスチックはほとんどの用途において 代替品よりも温室効果ガス(GHG)の総排出量が 少ない	3
2. 背景:プラスチックに関する議論の一要素としての 気候変動への影響	4
3. 分析手法:製品のライフサイクルおよび 製品使用時の影響を考慮したプラスチックと 代替素材の温室効果ガス(GHG)排出量の比較 プラスチックの全使用領域から分析対象とする 用途を選択 温室効果ガス(GHG)への総寄与量:ライフサイクル アプローチに間接的なバリューチェーンによる影響を 反映 特定の用途における感度分析	5 5 6 10
4. 調査結果の概要:ほぼすべてのケースで、 プラスチックの方が温室効果ガス(GHG)の 総排出量が少ないことが判明	11
5. 分析の抜粋例:清涼飲料水容器、牛乳容器、 建築用断熱材 清涼飲料水容器 牛乳容器 建築用断熱材	14 14 15 17
6. その他の幅広い用途についての分析結果 レジ袋 水分量が多いペットフードの容器 精肉包装 ハンドソープ容器 工業用ドラム 公営用下水道管 住宅用下水道管 家具 ハイブリッド車用燃料タンク 電気自動車用バッテリーパックのトップ用 エンクロージャー Tシャツ カーペット 水飲みコップ	18 18 18 19 19 19 19 20 20 20 20 21 21 21
7. 感度分析により素材におけるグローバルな 温室効果ガス(GHG)削減機会を特定 清涼飲料用容器 牛乳容器 改善の可能性 クリティカルレビューの概要	22 22 24 26 28

日本の皆様へのメッセージ

2019年に日本政府は3R(Reduce/Reuse/Recycle)+Renewableを原則としたプラスチック資源循環戦略を策定¹した。多くの日本企業が環境への負荷軽減を経営指針の一つに取り組んでおり、日々の生活においても紙ストローの採用、レジ袋の有料化など脱プラスチックに向けた取り組みは容易に目に入ってくる。2018年に作成された国連環境計画「Single-use plastics: A roadmap for sustainability」で日本におけるシングルユーズ(1度使用した後にその役目を終える)容器包装の排出量は世界で2番目であったことを踏まえると政府が打ち出した戦略に日本人個人が本腰を据え取り組まないといけないことは明示的である。

北米で作成された [Climate impact of plastic](#) の日本語翻訳作成に至った経緯は、日本における脱プラへの気運の高まりを批判または減速させる事ではない。「プラスチック」という誰にとっても身近である素材を例に挙げた上で、環境への取り組み検討に包括的かつ科学的視点がとても重要であると改めて強調したかったからである。

このレポートが美しい「日本」を次の世代に継承する糧となることを願っている。

2023年3月

マッキンゼー・アンド・カンパニー 東京オフィス
サステナビリティグループ

¹ 境省環境再生・資源循環局総務課リサイクル推進室の「プラスチック資源循環戦略」を参照

プラスチックは、その毒性から海洋汚染への寄与まで、あらゆる面で批判されることが多いが、利用効率を高め、温室効果ガス (GHG) 排出量を削減する上で重要な役割を担っている

Stefan Helmcke,
Thomas Hundertmark,
Chris Musso, Wen Jie
Ong, Jonas Oxgaard,
Jeremy Wallach, 山田
唯人 著

本稿の執筆にあたっては、Mackenzie Donnelly, Wenting Gao, Eric Hannon, Conrado Kurtz, Jeni Sorli, Pieterjan Van Uytvanck, Paige Xu の各位より多大なる協力をいただいた。執筆者一同よりここに感謝の意を表する

1. 要旨: プラスチックはほとんどの用途において代替品よりも温室効果ガス (GHG) の総排出量が少ない

プラスチックは、世界中いたるところで利用されており、海洋汚染への影響やリサイクル性など、しばしば議論の対象となっている。プラスチックは、環境への漏洩、毒性、資源の使用、生産時の温室効果ガス (GHG) 排出、海洋汚染などの観点から批判されることが多いが、実は食品の腐敗防止や温室効果ガス (GHG) 排出量の削減など、利用効率を高める役割を担っている。今後の地球の在り方を考えるにあたり、プラスチックとその代替素材について、科学的根拠に基づいた、よりバランスのとれた検証を行い、最適な決断を行うことが重要である。

素材について最適な選択を行うには、複数の環境要因を考慮する必要がある。本レポートでは、製品のライフサイクル全体(ゆりかごから墓場まで - つまり製品生産またはサービス提供における原料調達から製造、流通、使用、廃棄、リサイクルまですべての各段階において)と製品の使用による影響を含め、プラスチックとその代替素材の総温室効果ガス (GHG) 排出量について検証している。ただし、海洋汚染については考慮しておらず、これについては別途対処する必要がある。本レポートが素材の選択やプラスチックに関する議論の活性化の一助となれば幸いである。

この分析は2020年の米国の現状に基づいているが、他の地域への影響や、2050年の脱炭素化への移行に伴い結果がどのように変化するかを示すために、感度分析を行った。エネルギーミックスやリサイクルなどの使用済み製品の処理方法がそれぞれ異なるため、結果は地域によって異なる。本レポートでは、プラスチックの消費量が最も多く、世界の消費量の約90%を占める5つのセクター(包装、建築・建設、自動車、繊維、耐久消費財)を主軸として調査を実施した。また、分析に際し、プラスチックの比較対象とする素材は、現在一般的かつ大規模に使用されているものを採用し、一般的でないものや新規の素材は対象から除外した。

プラスチック以外の代替素材が大規模に使用されている用途のうち、本レポートで検証したプラスチックは、14の用途のうち13の用途で、代替品と比較して総温室効果ガス (GHG) 排出量が少なかった。製品のライフサイクルと製品の使用時の排出量を考慮すると、プラスチックの温室効果ガス (GHG) 削減率は10~90%に達するものと考えられる。加えて、多くの用途、特に食品包装などにおいては、現在プラスチックに代わるものはほとんどない。つまり、これらの分野での脱炭素化への取り組みにおいて、プラスチックの使用は、短期的には、特に食品の腐敗防止やエネルギー効率の面において最適な選択肢と言える。

しかし、低炭素・高循環型経済(サーキュラーエコノミー)²においては、アルミニウムなどの素材と比較してプラスチックの優位性は低くなる。欧州は既に低炭素・高循環型経済への移行を実現しつつあり、マッキンゼーの最近のレポート「ネットゼロへの移行に向けて: 取るべきリスクと得られるリターン」によれば、2050年までに業界が脱炭素化社会に移行するのに伴い、世界経済全体が欧州同様の方向にシフトする可能性がある³。

最後に、プラスチックの使用に優位性があるといえども、ネットゼロ目標の達成やリサイクル率の改善、環境への漏洩の排除など、環境に関わる施策を継続して行うことの必要性は変わるものではないことを改めて強調したい。

² 循環型経済の詳細については、エレン・マッカーサー財団の「What is a circular economy?」を参照(2022年5月16日にアクセス)

³ マッキンゼー「The net-zero transition: What it would cost, what it could bring (邦題: ネットゼロへの移行に向けて: 取るべきリスクと得られるリターン)」(2022年5月16日にアクセス)

2. 背景: プラスチックに関する議論の1要素としての気候変動への影響

プラスチックは、人類が発明した最も革新的な素材の一つであることは間違いない。低価格でありながら軽量で、耐久性に優れ、カスタマイズも可能である。しかし、海洋汚染、路上へのポイ捨て、化石原料の使用、リサイクルの欠如などプラスチック使用に対する批判は日々高まっており、プラスチックは今や自らの成功の犠牲者であるとも言える。これらは非常に重要な検討事項であり、私たち一人ひとりがこれらの問題に対処する責任を持つ必要がある。しかしながら、プラスチックには、いまだ十分に注目されていない側面があると考えられる。それが、代替素材と比較した場合のプラスチック使用の環境上の優位性、特に温室効果ガス(GHG)排出量との関連性である。

気候変動の最悪な影響を回避するには、産業革命前のレベルから気温上昇を1.5°C以内に抑える必要があり、そのためには人為起源の温室効果ガス(GHG)排出量を大幅に削減する必要がある⁴。そのため、代替素材の選択に関する議論では、バランスのとれた科学的根拠に基づく視点を持ち、温室効果ガス(GHG)排出量も考慮すべき一つの要素として含める必要がある。ただし、これは、廃棄物の漏洩への対処や循環型社会へのシフトの必要性を減じるものではなく、別の観点を提供するものである。

本レポートでは、ライフサイクルアプローチ(原材料の産出から製品の廃棄まで、製品が持つ総合的な影響を評価するためのフレームワーク)を用いて、プラスチックと代替素材の温室効果ガス(GHG)排出量を包括的に評価した。その目的は、分析対象毎にISO⁵に準拠した詳細なライフサイクルアセスメント(LCA)を実施することではなく、包括的、十分、有意義な厳密さで、幅広い用途におけるプラスチックの気候変動への影響を評価することにある。プラスチックの持続可能な利用に関する議論に温室効果ガス(GHG)排出量とライフサイクル分析という観点を加え、今後の議論に役立つテーマや科学に基づく考察を提供することで、このレポートがプラスチックの持続可能性に関して更なる展望をもたらすことを願う。利用シーン毎の複雑性は高く、排出要素、使用済み製品の処理、製品使用による温室効果ガス(GHG)排出など、基礎となる仮定に大きなばらつきがあることは認識している。これを念頭に置いた上で、本レポートは、プラスチックによる気候変動への影響を正確かつ現実的に把握するために最善の努力を尽くした成果である。

今回の調査結果は、すでに刊行されているマッキンゼーのレポート⁶の内容とほぼ一致しているが、次の2点において新たな知見が得られた。

- 多くの主要なプラスチックの利用領域にまたがる代表的な用途について、プラスチックの気候への影響を広範囲にわたり評価。プラスチックの代替素材が金属やガラスなどの非プラスチック素材である14の用途に加え、代替素材がプラスチック混合素材である2つの用途について分析を行った。これらの全用途を合計して、使用される全プラスチックの約90%を網羅していることになる。
- 感度分析により、エネルギーミックス、リサイクル率、輸送燃料の違いによる環境への影響を検証。これらの分析から、この問題の複雑さや、プラスチックと代替素材の関係が今後どのように変化していくかについて把握することが可能となる

⁴ 1.5°Cの地球温暖化: 気候変動の脅威に対する世界規模の対応強化、持続可能な開発、貧困撲滅への取り組みという観点から、産業革命以前の水準より1.5°Cの地球温暖化による影響および関連する地球規模の温室効果ガス(GHG)排出経路に関するIPCC(気候変動に関する政府間パネル)特別報告書、気候変動に関する政府間パネル(2019年)

⁵ 「ISO」は国際標準化機構(International Organization for Standardization)の略。詳しくは、「ISO Standards」(2022年5月16日)を参照

⁶ Innovations for greenhouse gas reductions: A life cycle quantification of carbon abatement solutions enabled by the chemical industry, International Council of Chemical Associations (ICCA)(2009年)、Bernd Brandt, Roland Fehring, and Harald Pilz著、The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe, Denkstatt (2010年6月)、Rick Lordほか著、Plastics and sustainability: A valuation of environmental benefits, costs and opportunities for continuous improvement, Trucost (2016年7月)、Life cycle impacts of plastic packaging compared to substitutes in the United States and Canada: Theoretical substitution analysis, ranklin Associates (2018年4月)

3. 分析手法: 製品のライフサイクルおよび製品使用時の影響を考慮したプラスチックと代替素材の温室効果ガス (GHG) 排出量の比較

この分析では、プラスチックと代替素材による直接的および間接的温室効果ガス (GHG) 排出量を、プラスチック以外の代替素材による14の用途と、プラスチックを使用した混合代替素材による2つの用途で比較した。これらの用途は、プラスチックを使用しているすべての領域から選択している。

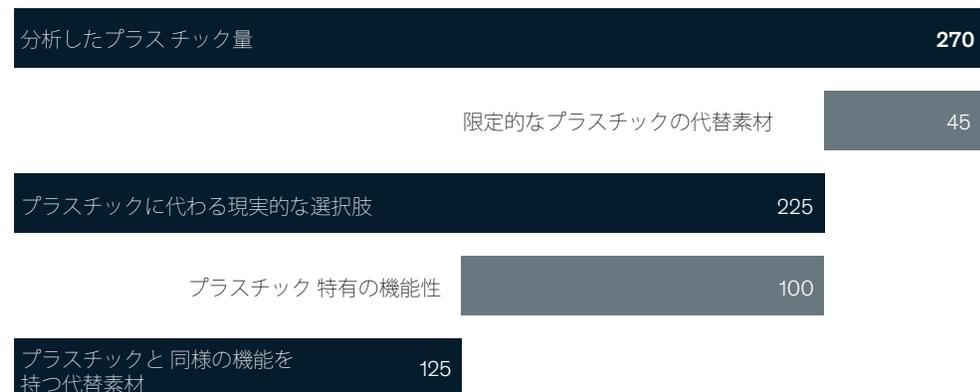
プラスチックの全領域から分析対象とする用途を選択

分析対象とする用途を選択するにあたり、まず世界のプラスチック需要をセクター別に分類した。2020年の世界のプラスチック需要は約295百万メトリックトン (MMT) で、そのうちプラスチック消費量が最も多い上位5つのセクター (包装、建物・建築、耐久消費財、自動車、繊維) が、全体の約90% (270MMT) を占めている (図表1)。この上位5セクターを更に用途別に分類し、各セクターにおける非プラスチック代替素材の普及度を評価した。

図表1

プラスチック消費量が最も多い上位5つのセクターから分析対象とする用途を選択

2020年の世界のプラスチック需要
MMT; 百万メトリックトン



注: 数値は四捨五入のため必ずしも合計とは一致しない
¹ 電気: 6.05MMT、医療: 5.14MMT、製造業: 0.29MMT
 資料: McKinsey Chemical Insights

自動車の内装、キャップやクロージャー、電化製品、電子機器など一部の用途では、現在のところ、プラスチックの代替となる素材はほとんど存在していない。これらのカテゴリーは、プラスチック総量の約45MMTを占めている。残りのカテゴリー、例えば食品用硬質包装材、パイプ、自動車のパワートレインなどについては、プラスチック以外の代替素材使用が存在するため、代表的な用途を1つ以上選び温室効果ガス(GHG)排出量の影響を評価した(図表2)。分析対象とする製品および素材の選択は、現在大規模に使用されている製品の市場シェア(特に米国)を基準とし、一般的でないものや新規の素材は選択肢から除外した。

一部のカテゴリーにおいては、市場シェアの過半数を占める用途が存在する。例えば、建築用断熱材では、ポリウレタンとグラスファイバー(ガラス繊維)が新建築物の約80%を占めていることから、この2つを比較対象とした⁷。また、有力な用途がないカテゴリーについては、例えば非食品用硬質包装材の例としてソーブ詰め替えボトル等、代表的なものを選択した。ソーブボトルは非食品用硬質包装材のカテゴリー全体を代表するものではないが、同分野の一例を示すものと考えられる。自動車分野では、内燃機関(ICE)車(エンジン車)ではなく、ハイブリッド車用燃料タンクで分析を行った。その理由として、ハイブリッド車は今後ICE車以上の成長が見込まれること、またハイブリッド車用燃料タンクはICE車と同規模であることが挙げられる。

この分析では、プラスチックと非プラスチックの両方を対象とした。プラスチックについては、非生物由来の代替素材(鉄、ガラス、アルミニウム、グラスファイバー、銅、コンクリート、ダクタイル鋳鉄など)と、生物由来の代替素材(紙、木材、綿、ウールなど)を比較対象とした。その他の素材は、市場シェアが低い、または信頼性のあるデータが限られていることから比較対象外とした。例えば、レジ袋にはプラスチックと紙のみを選択し、再利用可能なレジ袋は対象外とした。これは、使用量と素材が多岐にわたること、代替素材のライフサイクルに重大な影響を与える再利用に関する信頼性のあるデータが不足しているためである。また、コンポスト(生分解性、堆肥化が可能)および生分解性の代替素材も比較対象外とした。これらは温室効果ガス(GHG)排出量の削減が期待される素材であるものの、現在のプラスチック市場のシェアは1%にも満たないためである(年間約200万トン)⁸。重要なのは、プラスチックが有利となるような素材選択は一切行っていないことである。正確な分析を行うため、分析実施前に、プラスチック使用の現状を総合的に反映できるよう選択を行った。実際のところ、「4. 調査結果の概要」で示しているように、プラスチックの温室効果ガス(GHG)排出量はすべてのカテゴリーで最も少ないわけではない。

最後になるが、プラスチックとプラスチック混合の代替素材が競合する2つの用途、水飲みコップと牛乳容器についても分析を行った。どちらの用途も、プラスチックの代替素材は約80%が紙、20%がプラスチック混合素材である。つまり、プラスチックと非プラスチック素材の単純な比較ではないのである。それでも敢えてこの用途を分析対象としたのは、これらの用途が好例として議論の中で頻りに話題に上がったからであり、これらを除外することで、今後、代替素材を検討する際に重要な観点が抜けてしまうことへの懸念があったためである。

温室効果ガス(GHG)への総寄与量: ライフサイクルアプローチに間接的なバリューチェーンによる影響を反映

ISO規格14040/44⁹に基づき、ライフサイクルアプローチを用いて、代表的なプラスチックの用途とその一般的な代替素材との気候変動への影響を比較・評価した。用途の選定にあたっては、プラスチックの使用領域を網羅するよう配慮した(前項「プラスチックの全領域から分析対象とする用途を選択」を参照)。温室効果ガス(GHG)排出量評価においては、2020年の米国の状況を基準として、西欧や中国など他地域への感度分析を行い、2050年の脱炭素・循環型社会の展望を構築した。米国を基準としたのは、データが入手可能であること、

⁷ Global residential insulation market: Analysis by material (fiberglass, foamed plastic, mineral wool, others), project type, area of building, housing type, by region, by country: Market insights, Covid-19 impact, competition and forecast, Azoth Analytics (2020年10月)

⁸ 「Bioplastics market growth projected at 12% CAGR during the period 2022-2027」Mordor Intelligence (2022年3月22日)

⁹ 「ISO14040: 2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework」国際標準化機構(ISO)(2006年)

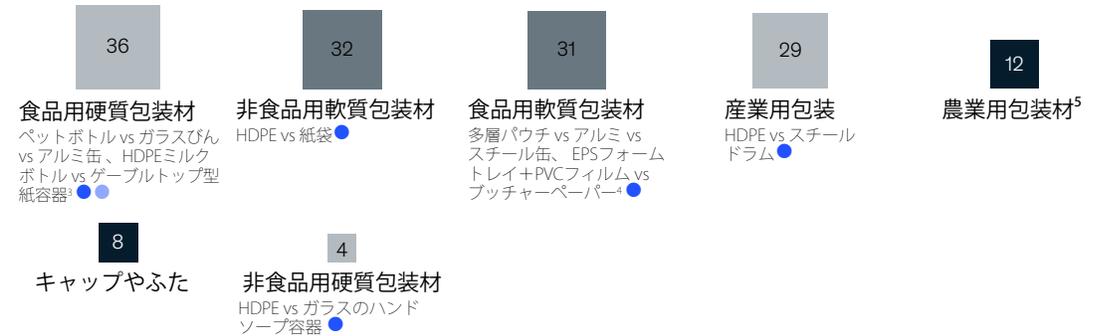
図表2

各カテゴリー内選択した素材に対し詳細な温室効果ガス (GHG) 排出量分析を行った

2020年の世界のプラスチック需要 MMT; 百万メトリックトン

■ プラスチックの代替素材がほとんどない ■ プラスチックの方が性能面で優位 ■ 代替素材が同様の性能を提供
● 温室効果ガス(GHG)分析で選択した用途 ● 2050年また地域別見解に向けて選択された用途 ● プラスチックとプラスチック混合素材の比較

包装 152



建築・建設 48



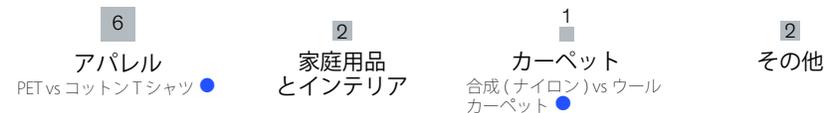
耐久消費財 46



自動車¹ 12



繊維² 11



注：数値は四捨五入のため必ずしも合計とは一致しない
¹ 中型セダン(例：ホンダアコード2018年)をベースにしたプラスチック量の内訳 ² 2010年の市場シェアを使用してプラスチック量の内訳を推定
³ PETはポリエチレンテレフタレート、HDPEは高密度ポリエチレン ⁴ EPSは発泡ポリスチレン、PVCはポリ塩化ビニル
⁵ 包装用フィルム、シート、ラフィア、フィラメント、ファイバーを含む ⁶ PEXは架橋ポリエチレン
⁷ PUはポリウレタン ⁸ 床、固定具、ライナー、フレームを含む ⁹ PPIはポリプロピレン ¹⁰ 冷暖房システムを含む
 資料: A2Mac1、Independent Commodity Intelligence Services (ICIS)、McKinsey Chemical Insights

エネルギーミックスと使用済み製品の処理状況が世界の平均に近いということによるものである¹⁰。ライフサイクルに関するデータソースは米国環境保護庁の廃棄物削減モデル(WARM)¹¹を主とし、ecoinventのデータベースv3.7¹²やその他一般に入手可能なLCA公開データで補完した。また、外部の2人のLCA専門家によるアプローチ、分析、および調査結果の評価により、この分析手法が科学的に健全であること、前提条件とデータソースが堅牢で信頼できるものであることを確認した。

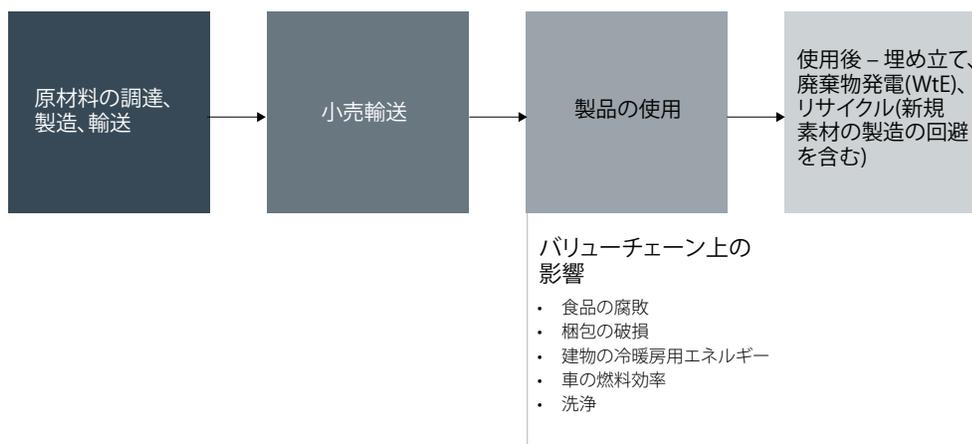
分析手法の詳細は以下の通りである。

- 機能単位: ライフサイクルアセスメントにおいて製品システムの性能を定量化したものである。例えば、飲料容器の機能単位は、飲料の所定量と定義することができる。各用途の製品レベルの比較は、公開されているLCAの機能単位の定義を適用し、製品寿命を考慮して、公平かつ合理的であるよう努めた。例えば、耐用年数5年の高密度ポリエチレン(HDPE)製の工業用ドラムと、耐用年数10年のスチール製ドラムの比較など
- システム境界: この分析では、製品のライフサイクル全体(ゆりかごから墓場まで – つまり製品生産またはサービス提供における原料調達から製造、流通、使用、廃棄、リサイクルまですべての各段階において)の排出量と、製品使用による間接的温室効果ガス(GHG)排出量の両方を考慮して、プラスチックと代替素材の温室効果ガス(GHG)の総寄与量を比較する。本レポートでは、製品のライフサイクル全体をシステム境界とし、以下のフェーズを設定した(図表3)
 - 生産: 資源の採掘、原材料の加工、最終製品の製造、およびすべての輸送ステップを含む
 - 小売輸送: 小売輸送における温室効果ガス(GHG)排出量は、2012年の米国国勢調査コモディティフロー調査¹³から得た製品情報に基づき、平均走行距離と移動手段別の使用燃料を基に算出

図表3

バリューチェーンからの影響を含め、製品のライフサイクル全体を通じた温室効果ガス(GHG)への影響を評価した

製品のライフサイクル



¹⁰World energy outlook 2021、国際エネルギー機関 (IEA)(2021年10月)、What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050、世界銀行グループ(2018年)

¹¹WARMの詳細については米国環境保護庁(EPA)の「Waste Reduction Model(WARM)」を参照(2022年5月16日にアクセス)

¹²ecoinventの詳細については「ecoinvent」を参照(2022年5月16日にアクセス)

¹³詳細については「Transportation—Commodity Flow Survey: United States 2012」、米国国勢調査局、2015年2月を参照

- ・ 製品の使用:特にプラスチックと代替素材との間に大きな違いがある場合には、破損、腐敗、断熱材の改良による冷暖房の必要性、軽量化による燃料効率化など、製品の使用段階における温室効果ガス(GHG)排出量を考慮。このリストはすべてを網羅したものではないが、公正な比較を行うために、製品の使用段階での主要な温室効果ガス(GHG)排出源を含むよう務めた
 - ・ 使用後の処理: 結果的アプローチにより4つの処理経路を特定した。これらの経路を米国でのシェアに見合った割合でモデルに適用
 - 埋め立て:埋立地への輸送、メタン排出、およびメタンのエネルギー回収により回避されたユーティリティ設備からの排出を含む
 - 廃棄物発電(WtE):エネルギー回収を伴う焼却を指し、焼却炉への輸送、燃焼による温室効果ガス(GHG)排出、回避されたユーティリティ設備からの排出、鉄回収のオフセットを含む
 - リサイクル:回収、選別、加工、およびリサイクル原料を使用する製造施設への輸送を含む
 - 再利用:回収、洗浄、再充填施設への輸送を含む
- ー 計算方法:各用途について、以下を基に直接的および間接的な温室効果ガス(GHG)排出量を算出するモデルを構築
- ・ 計算における前提条件
 - 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の特性係数を使用して温室効果ガス(GHG)排出量を二酸化炭素キログラム(kg CO₂e)に換算。100年間の地球温暖化係数(GWP)を用いて温室効果ガス(GHG)の温暖化への影響を測定¹⁴
 - 埋め立て地から発生するメタンや亜酸化窒素(N₂O)、生物起源の炭素のWtE、埋立地貯蔵(カーボンシンク)のセルロースを計算対象とする
 - 生物起源および化石由来製品の貯留炭素、埋立地やWtEからの生物起源のCO₂、および埋立地の化石由来製品の貯留炭素は計算対象外とする
 - ・ 排出量の配分に関する前提条件
 - 副産物の排出量算出は、材料の化学的性質や生産背景に十分に配慮して行うものとする。通常は質量を目安に配分
 - ライフサイクルアプローチにおいて製品をリサイクルした場合は、ライフサイクル終了時の残存量と新規素材生産に係る量を相殺して計算する代替アプローチを採用
- ー データソース: 米国環境保護庁(EPA)のAdvancing sustainable materials managementレポート¹⁵、その他業界レポート、使用済み製品の廃棄構成に関するマッキンゼーのモデルを活用。グリッド炭素排出係数は米国エネルギー情報局のAnnual Energy Outlook¹⁶、EPAのInventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sink(米国温室効果ガス(GHG)排出量と吸収源のインベントリ)¹⁷、およびEmissions & Generation Resource Integrated Database (eGRID)(排出量と生成資源の統合データベース)に基づき算出。更に、国際エネルギー機関(IEA)とマッキンゼー・センター・フォー・フューチャー・モビリティのデータを活用して、地域のエネルギーミックスと、物資輸送における内燃機関(ICE)とバッテリー式電気自動車(BEV)の商用車のミックスを比較・分析

¹⁴L.A. Meyer and R.K. Pachauri (eds.), Climate change 2014: Synthesis report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)(2014年)

¹⁵Advancing sustainable materials management: 2018 tables and figures. 米国環境保護庁(2020年)

¹⁶Annual energy outlook 2022. 米国エネルギー情報局(2022年3月)

¹⁷「Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks」米国環境保護庁(2022年4月14日更新)

- ー バリューチェーンへの間接的な影響: 専門家へのインタビューや業界レポートを活用し、製品の使用段階での二次的な排出(破損、燃料効率、加熱など)を特定。その排出理由ごとに算出方法を開発し、業界の専門家とその妥当性を確認

特定の用途における感度分析

米国における2020年の見解を補強するため、温室効果ガス(GHG)評価を西欧や中国などの他の地域、そして2050年の脱炭素・循環型社会へと拡張する感度分析を、清涼飲料水容器と牛乳容器の2つの例示的用途について実施した。感度分析は、エネルギーミックス、使用後の処理ミックス、BEV対ICEの商用車ミックスの3つの主要因に基づいて実施した。ベースシナリオと最良シナリオのエネルギーミックスは、それぞれIEAの公表政策シナリオ(STEPS)と持続可能な開発シナリオ(SDS)を用いて決定した¹⁸。両ケースとも、製品使用後の処理、BEVとICEの割合はマッキンゼーのモデルや専門家へのインタビューに基づき算出した。

¹⁸詳細については、IEA 世界エネルギーモデル「Stated Policies Scenario(STEPS)」(2021年) および「持続可能な開発シナリオ(SDS)」(2021年)を参照

4. 調査結果の概要: ほぼすべての用途において、プラスチックの方が温室効果ガス (GHG) の総排出量が少ないことが判明

プラスチックと代替素材を比較した14の用途のうち13の用途で、プラスチックの方が温室効果ガス(GHG)排出量が少なかった。更に、プラスチックとプラスチック混合素材を比較した場合においても結果は同様であった。

代替素材と比較してプラスチックの方が温室効果ガス(GHG)排出量が少ない13の用途では、次善の代替素材に比べ温室効果ガス(GHG)排出量が10~90%少ないという結果が得られた(図表4)。これには、車の軽量化による燃料の削減、ポリウレタンで断熱された家屋でのエネルギー使用量の減少、包装紙をプラスチックにすることによる精肉など食品の腐敗の減速など、間接的なバリューチェーン上の影響も含まれる。

図表4

非プラスチックの14の用途について直接排出と間接的バリューチェーン排出の両方を含めて分析した結果、13の用途でプラスチックの方が温室効果ガス (GHG) への影響が小さいことが明らかとなった

比較対象	セクター	用途	米国における温室効果ガス(GHG)排出量の差 %; 2020 ¹		
			プラスチック	次善の選択肢	
プラスチック vs 代替素材	包装	レジ袋	HDPE ³	紙	80
		水分量が多いペットフードの容器	PET/PP ⁴	アルミとスチール	70
		ソフトドリンク容器	PET	アルミ	50
		精肉包装	EPS/PVC ⁵	紙	35
		工業用ドラム	HDPE	スチール	-30
建築・建設	公営下水道管	住宅用下水道管	HDPE	ガラス	15
		建築断熱材	PVC	コンクリート/ダクタイル鉄	35~45
		住宅用下水道管	PEX ⁶	銅	25
耐久消費財	家具	建築断熱材	PU ⁷	グラスファイバー	80
		家具	PP	木	50
自動車	ハイブリッド車用燃料タンク	BEV ² 用バッテリーパックのトップ用エンクロージャー	HDPE	スチール	90
		BEV ² 用バッテリーパックのトップ用エンクロージャー	PP/ グラスファイバー	スチール	10
		カーペット	PET/ナイロン	ウール	80
繊維	Tシャツ	Tシャツ	PET	コットン	15
		牛乳容器	HDPE	紙	-5
プラスチック vs プラスチック混合素材	包装	牛乳容器	HDPE	紙	-5
	耐久消費財	ウォーターカップ	EPS	紙	0

¹排出量には間接的な影響を含む ²バッテリー電気自動車 ³高密度ポリエチレン
⁴PETはポリエチレン・テレフタレート、PPはポリプロピレン ⁵発泡ポリスチレン/ポリ塩化ビニル
⁶架橋ポリエチレン ⁷ポリウレタン

間接的な影響を考慮せずに直接的なライフサイクル排出量(生産、小売輸送、使用済み製品の廃棄)のみで比較した場合でも、プラスチックは14用途中9用途において温室効果ガス(GHG)排出量が最も低いことが分かった。用途にもよるが、これは、一般的に次の2つのいずれかが要因となっている。(1)プラスチックは生産に要するエネルギー消費量が少ない(例: ポリエチレンテレフタレート=ペットボトルとアルミニウムのリサイクル率を比較した場合)(2)プラスチックは重量効率に優れている(例: ペットボトルとガラスを比較した場合)

バリューチェーンの間接的な影響も大きい。例えば、断熱材とハイブリッド車用燃料タンクでは、間接的な影響は直接的な影響をはるかに上回る。断熱材の場合には、ポリウレタン(プラスチック由来)はグラスファイバーバットよりも断熱性が高いためエネルギーの消費量を抑えることができ、ハイブリッド車用燃料タンクの場合は、プラスチックタンクは軽量であるため車両重量を減らし燃費を向上させることができる。これらの間接的影響は、プラスチックが生産および廃棄処理段階において代替素材よりも多くの温室効果ガス(GHG)排出量を発生させることを相殺するものとなる。しかし、これはすべてに当てはまるものではなく、多くの用途において間接的影響の規模は非常に小さい。例えば、清涼飲料水容器においてアルミ缶やガラス瓶とプラスチックボトルを比較した場合、プラスチックボトルは破損が少ないなどの利点はあるものの、その間接的影響の規模は軽微である。

幅広い用途において、食品包装のプラスチックに代わる大規模に活用できる代替素材は少ない。これは、主にプラスチックを使用することで食品腐敗を減少させることが可能であることが主な要因となっている(図表5)。代表的な20の食品カテゴリーを検証した結果、精肉や冷凍肉など6つのカテゴリーで販売されている製品の90%以上にプラスチック包装が使用されていることが分かった。更に8つのカテゴリーでも、販売される製品の50%以上にプラスチック包装が使用されていることが明らかとなっている。これらは、プラスチック温室効果ガス(GHG)削減への重要だが定量化されていない貢献につながっている。

図表5

食品包装の大半の用途では、プラスチックに代わる有力な代替素材は少ない

プラスチック包装の製品¹

■ 主に軟質プラスチックを使用 ■ 主に硬質プラスチックを使用 ■ 軟質・硬質プラスチックともに一般的 ■ プラスチックはあまり一般的ではない

プラスチックが主流のソリューション				プラスチックの代替素材を使用		
>95%	>90%	>70%	>50%	>30%	>10%	<10%
■ 朝食用 シリアル	■ 冷凍食品	■ 牛乳	■ ジュース	■ アイスクリーム	■ ジャム・スプレッド	■ 漬物製品
■ ヨーグルト	■ パッケージ精肉	■ 食用油	■ 米	■ 炭酸飲料	■ スープ	
■ チーズ		■ チョコレート		■ パスタ		
■ ミネラルウォーター		■ ナッツ・シードミックス				
		■ クッキー				
		■ 袋入りパン				

¹ この比率はプラスチックが包装の構成要素である製品の割合を反映
資料: 米国2021年通年推定売上高(Euromonitor 2021)

温室効果ガス(GHG)排出削減の要因は用途によって異なる。例えば工業用ドラムでは、スチール製の方が耐久性とリサイクル性において勝っており、温室効果ガス(GHG)排出量においてもプラスチック素材と比べ優位にある。スチール製ドラムは、製造段階においてプラスチックよりも多くの温室効果ガス(GHG)を排出するが、耐久年数は2倍でおおよそリサイクルされる。温室効果ガス(GHG)排出量がほぼ同じである場合に重要になってくるのは素材の重量である。清涼飲料水容器と牛乳容器ではプラスチック以外の素材の重量はほぼ同じであるため、原素材・輸送に関わる温室効果ガス(GHG)排出量はほぼ同等になる。また、レジ袋の場合、紙袋はHDPE製ポリ袋よりもかなり重量があるため、製造および輸送段階で生じる温室効果ガス(GHG)排出量ははるかに多くなる。この例を踏まえると、耐久性に優れ、軽量で、リサイクル性が高い素材ほど温室効果ガス(GHG)の総排出量が少なくなることは当然のことかもしれない。しかし、肝要なのは、これらのプラス要素がマイナス要素をどれだけ上回っているかということである。この点については、次のセクションで更に詳しく説明する。

5. 分析の抜粋例: 清涼飲料水容器、牛乳容器、 建築用断熱材

ここでは、3つの用途について、その分析方法の詳細を紹介する。

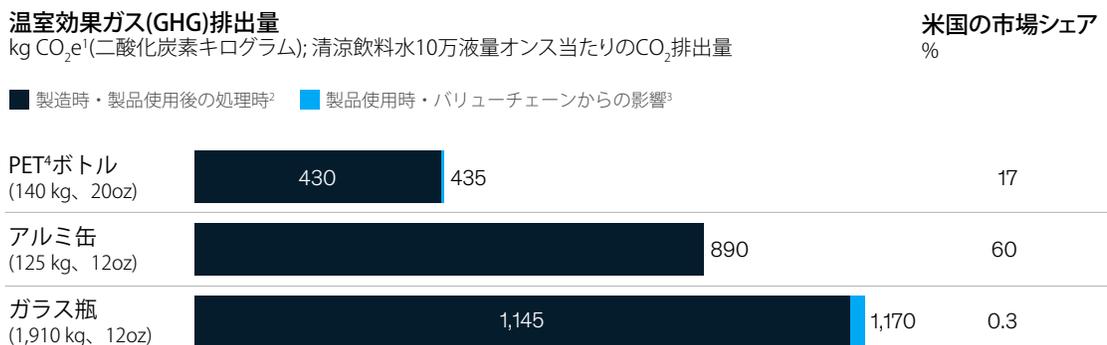
清涼飲料水容器

まずは、多くの人に馴染みのある清涼飲料水容器について詳しく見ていこう。現在の清涼飲料水容器の大半は、ペットボトル、アルミ缶、ガラス瓶のいずれかである。本レポートでは、20オンスのペットボトル、12オンスのアルミ缶、12オンスのガラス瓶における分析を行った。これらは、米国の炭酸清涼飲料の市場でそれぞれ17.0%、60.0%、0.3%を占めている。これらのサイズは、それぞれの素材において最も一般的な飲料容器のサイズを反映しているため、分析対象として選択した。20オンスのペットボトルと12オンスのアルミ缶を比較すると、小さい容器の方が素材対体積比が圧倒的に高いため、ペットボトルが優位となる。つまり、同じ10万液量オンスの清涼飲料水を配送する場合、12オンスのペットボトルの方が20オンスのペットボトルよりも多くのプラスチックを必要とするため、温室効果ガス(GHG)排出量が増加することになる。ここで選択したサイズは消費者がよく購入するサイズを代表するものである。

ペットボトルは軽量で製造に必要なエネルギー量が少ないため、温室効果ガス(GHG)排出量が最も少ない¹⁹。これに対し、アルミ缶の排出量はペットボトルの2倍、ガラス瓶では3倍となる。一方、使用後の処理時にはペットボトルの温室効果ガス(GHG)排出量が最も有利でない(図表6)。ペットボトルは、これらの3つの素材の中でリサイクル率と新規素材の製造回避のクレジットが最も低い。またWtEからの温室効果ガス(GHG)排出量も最も多くなっている(ペットボトルは燃焼時に温室効果ガス(GHG)を排出するが、アルミニウムやガラスは排出しない)。しかし、製造時の温室効果ガス(GHG)排出量は使用後の廃棄処理の際の排出量よりも大きいため、結果としてペットボトルの温室効果ガス(GHG)の影響は最も小さくなる。

図表6

2020年米国の例: 清涼飲料水容器の中で、ペットボトルは、温室効果ガス(GHG)排出量が最も少ない



注: 端数処理のため合計が100にならない場合があ数値は四捨五入のため必ずしも合計とは一致しない
¹ 二酸化炭素換算 ² 原材料の調達、製造および輸送、小売輸送、使用済み廃棄物の処理(埋め立て、WtE、リサイクル、再利用を含む。使用済みリサイクル方式を採用してリサイクルクレジットを割り当て) ³ 腐敗や破損を補うために必要な容器と清涼飲料の追加生産分を計上 ⁴ ポリエチレンテレフタレート
 資料: 米国環境保護庁の廃棄物削減モデル、マッキンゼー分析

¹⁹この結果は公表されている文献とも一致している。「Life cycle inventory of three single-serving soft drink containers」Franklin Associates (2009年8月)を参照

清涼飲料水容器におけるバリューチェーンからの影響は比較的小さい。平均賞味期限は、アルミ缶とガラス瓶が約52週間であるのに対し、ペットボトルは約13週間である。また、ペットボトルはアルミニウムやガラスに比べて劣化率(炭酸ガスの抜け)が若干高い。一方、ガラス瓶はペットボトルやアルミよりも割れやすい。どちらの場合も、ペットボトルやガラス瓶による劣化や破損の増加を補うために、清涼飲料水の生産や容器の製造から追加の温室効果ガス(GHG)排出が発生するが、これは総温室効果ガス(GHG)排出の要因とはならない。

牛乳容器

米国の冷蔵牛乳の容器のほとんどは、HDPE ボトル、ゲートルップ型紙容器(紙80%、低密度ポリエチレン(LDPE)20%)で構成されている。米国では、64オンスの牛乳用HDPE製ボトルの市場シェアが約75%、ゲートルップ型紙容器が約25%を占めている²⁰。この分析は、プラスチックとプラスチック混合素材の比較も実施しており、この点において本レポートの他の多くの分析とは大きく異なる。LDPE層がない紙容器には牛乳を入れることはできない。それ故に、容器全体に占める重量は20%に過ぎないが、LDPEを分析対象とすることは大変重要であると考えられる。

牛乳容器(牛乳瓶を除く)には主に2つの種類がある。一般的なものは前述のゲートルップ型紙容器で、低温殺菌牛乳を保存するもので冷蔵保存が必要である。もう一つは、超高温(UHT)殺菌牛乳を保存する無菌充填(あるいは常温保存可能)紙容器で、こちらは冷蔵を必要としない。米国では、無菌のブリックカートン(箱型紙容器)の市場シェアは0.2%未満である。そのため、市場シェアの高い製品を分析するという一般的なアプローチに沿い、HDPE製ボトルとゲートルップ型紙容器を比較した。常温保存が可能な牛乳容器は、使用前にコールドサプライチェーンや冷蔵の必要性がないため、ゲートルップ型紙容器よりも温室効果ガス(GHG)排出量が大幅に少なくなると予想された。

しかし、分析を行ったところ、ゲートルップ型紙容器の温室効果ガス(GHG)排出量はHDPE製ボトルよりもほんのわずかに低い程度であった(図表7)。ゲートルップ型紙容器の製造段階での温室効果ガス(GHG)排出量はHDPE製ボトルと比べ約三分の一少ないが、使用後の廃棄物処理における排出量ではその差は小さくなる。ゲートルップ型紙容器には埋め立て時にメタンを放出する紙が含まれており、またこの紙は米国ではあまりリサイクルされていない。これに対し、HDPE製ボトルのリサイクル率は高く(約30%)、焼却時の温室効果ガス(GHG)排出量は多いものの、ライフサイクルの最終時点では温室効果ガス(GHG)排出量が少なくなる。

米国におけるゲートルップ型紙容器の温室効果ガス(GHG)排出量はHDPE製ボトルよりもほんのわずかに低い程度であった

²⁰「Packaging in the US」Euromonitor (2021年11月)

図表7

プラスチック製の牛乳容器とゲーブルトップ型紙容器の温室効果ガス (GHG) の総排出量と貯蔵寿命はほぼ同じ

温室効果ガス(GHG)排出量

g CO₂e¹; 冷蔵牛乳64液量オンス当たりのCO₂排出量

米国の市場シェア⁴

%

■ 製造時・製品使用後の処理時² ■ 製品使用時・バリューチェーンからの影響³

容器タイプ	GHG排出量 (g CO ₂ e)	米国の市場シェア (%)
HDPE ⁵ ボトル (62g)	160	75
ゲーブルトップ型紙容器 ⁶ (76g)	150	25

¹ 二酸化炭素換算 ² 原材料の調達、製造および輸送、小売輸送、使用済み廃棄物の処理(埋め立て、WtE、リサイクル、再利用)を含む。使用済みリサイクル方式を採用してリサイクルクレジットを割り当て ³ 常温保存可能な「ブリック」カーターの市場シェアは0.2%未満であり、ガラス瓶は0.3%未満(Euromonitor調べ)

⁴ 高密度ポリエチレン ⁵ 常温保存不可、要冷蔵

資料: Carton Council of Canada、ecoinvent、Euromonitor International、Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg、thinkstep、米国環境保護庁の廃棄物削減モデル、Waste and Resources Action Programme (WRAP)

建築用断熱材

建築用断熱材における温室効果ガス(GHG)の影響の評価は、新築の住宅用壁内断熱材を対象として実施した。本調査によれば、米国における市場シェアは地域によって異なるが、平均するとグラスファイバーバットが市場の60~70%を占め、スプレーポリウレタンフォーム(SPF)が20~30%と、2番目に大きなシェアを占めていることが分かった。その他断熱材には、主に連続壁断熱材として使用される発泡ボード(発泡ポリスチレンまたはポリイソシアヌレート)、ミネラルウール、および新築よりもリフォームでよく使用される吹き込み用セルロースなどがある。

ここでは、スプレー・ポリウレタン・フォーム・アライアンス(SPFA)²¹が最近発表した、バージニア州リッチモンドにある2,512平方フィートの2階建て木造家屋の外壁断熱要件を対象としたエネルギーモデリング分析を用いたLCAを基に、分析を行った。この地域を選択した理由は、米国の気候帯の中央値にあるためである(米国本土の国際エネルギー保護コードの気候帯は1から8まであり、リッチモンドはゾーン4にあたる)。リッチモンドの外壁で建築基準法のR-20を満たすためには、360キログラムのグラスファイバーバットと330キログラムのオープンセルSPFが必要となる。

建築用断熱材の温室効果ガス(GHG)の主な排出源は素材の使用段階にある。グラスファイバーは通気性が良いのに対し、SPFは空気を通さない。また、グラスファイバーは、通気性があり熱の移動が大きいため、断熱材の耐用年数75年を通じてより多くの冷暖房が必要となる²²。全体的な結果として、SPFは、製造時の温室効果ガス(GHG)排出量が大きいものの、使用段階での温室効果ガス(GHG)排出量が少ないため、グラスファイバーバットと比較して、断熱材のライフサイクル全体における温室効果ガス(GHG)排出量は約80%低くなる(図表8)。

図表8

スプレーポリウレタンフォームは空気を通さないため、製造時の排出量が多いにもかかわらず、温室効果ガス(GHG)の総排出量は最も少ない



¹ 二酸化炭素換算

² 機能単位は、SPFAの2021年LCA調査に基づき、バージニア州リッチモンドにある2,512平方フィートの2階建ての木造一戸建て住宅の2×6インチの外壁(5.5インチの空洞)に地域基準の準拠に必要な断熱材と定義、屋根裏(R-49)と壁(R-20)、ガス燃焼式暖房・空調、ガス燃焼式給湯機器

³ 原材料の調達、製造および輸送、小売輸送、使用済み廃棄物の処理(埋め立て、WTE、リサイクル、再利用)を含む。使用済みリサイクル方式を採用してリサイクルクレジットを割り当て

⁴ 米国の新築一戸建て住宅の断熱材市場シェア(地域差が大きいため数字は概算): グラスファイバー 60~70%、SPF 20~30%、その他 約10%

資料: Carlisle Company、コロラド州エネルギー省、ecoinvent、米国国立標準技術研究所、Spray Polyurethane Foam Alliance (SPFA)、米国国勢調査局、米国エネルギー情報局、米国環境保護庁の廃棄物削減モデル、マッキンゼー分析

²¹ SPF residential energy modeling analysis, Spray Polyurethane Foam Alliance (SPFA)(2021年2月)

²² 建物の断熱材の耐用年数は、北米製品カテゴリー規則(PCR)に従い75年と想定

6. その他の幅広い用途についての分析結果

清涼飲料水容器、牛乳容器、建築用断熱材に加え、包装セクター5件、建築・建設セクター2件、耐久消費財セクター2件、自動車セクター2件、繊維セクター2件の合計13の用途を分析した。各用途については、それぞれのセクターの中で代表的なものを対象とした。例えば、食品用軟質(フレキシブル)包装材では水分量が多いペットフードや精肉の包装、非耐久消費財では水飲みコップなどが挙げられる。この水飲みコップについては、プラスチックとプラスチック混合素材の比較の更なる例として13の用途の中を含めた。これらの分析では、世界平均に近いと想定される米国の2020年の状況に焦点を当てている。また、使用後の廃棄率は、EPAの Advancing sustainable materials management レポートと専門家へのインタビューにより算出した²³。

レジ袋

レジ袋では、一般的に紙袋の方が容量が約25%大きい²⁴、一般的なHDPE製ポリ袋より6倍近く重い(55g対8g)。その結果、紙袋は原素材の使用量と輸送における温室効果ガス(GHG)排出量が多いため、生産時の温室効果ガス(GHG)排出量はHDPE製ポリ袋の3倍となる。HDPE製ポリ袋と紙袋の温室効果ガス(GHG)排出量の差は、廃棄や使用中の影響(例えば袋の二重使いなど)を考慮すると、更に5倍にまで広がる。WtEよりも埋め立てが一般的である米国では(WtE20%、埋め立て80%)、適切に埋め立てられたHDPE製ポリ袋の方が紙よりも廃棄時の温室効果ガス(GHG)排出量が少ない。紙は埋め立て時に嫌気性分解により大量のメタンを排出するためである。この分析では、廃棄物管理システムが発達し、環境への漏洩を最小限に抑えている米国に焦点を当てているため、レジ袋の廃棄パターンとして不当放棄は考慮していない。しかし、これは廃棄物管理システムが不完全な国には当てはまらず、そのような国では大量の廃棄物の漏洩が海洋汚染の主要な原因の一つとなっている。汚染を最小限に抑えるためには、今後、世界の廃棄物管理の改善および最適化に取り組む必要がある。適切な埋め立て規制による排出削減は、リサイクルによる温室効果ガス(GHG)排出削減(紙袋のリサイクル率は21%、HDPE製ポリ袋は8%)やWtE(紙の燃焼による炭素排出は生物起源と見なす)を上回る規模である。また破損や漏れを補うために、平均してHDPE製ポリ袋の20%と紙袋の50%が袋を二重に重ねて使われており、紙袋のバリューチェーンにおける温室効果ガス(GHG)の排出量が大きくなる要因となっている。

水分量が多いペットフードの容器

水分量が多いペットフードの容器はプラスチックと金属素材が主流である。ポリプロピレン(PP)(75%)、アルミホイル(20%)、ポリエチレンテレフタレート(PET)(5%)で構成されるフレキシブル多層パウチは、米国市場の約30%を占めている。金属缶は、アルミ缶(市場シェア45%)とスチール缶(約15%)に分類される。プラスチックパウチは混合素材でできているためリサイクルができないのに対し、アルミ缶とスチール缶のリサイクル率はそれぞれ約50%、約70%となっている。金属缶はリサイクル率が高い反面、重量が重くなる傾向があるため(アルミ缶はプラスチック多層パウチの1.5倍、スチール缶は5倍の重量)、製造時の温室効果ガス(GHG)排出量は多くなる。その結果、製造時の温室効果ガス(GHG)排出量とリサイクルによる排出削減が相殺され、缶の温室効果ガス(GHG)排出量はプラスチック製多層パウチの3倍となる。

²³詳細については Advancing sustainable materials management: 2018 tables and figures: 米国環境保護庁(2020年)を参照

²⁴Life cycle assessment of supermarket carrier bags: A review of the bags available in 2006: 英国環境庁(2011年)によると、紙製のレジ袋は平均7.43品目、HDPE製レジ袋は5.88品目を持ち運ぶことが可能

精肉包装

米国では、精肉包装には、発泡ポリスチレン (EPS) フォームトレイに硬質ポリ塩化ビニル (PVC) フィルムを貼ったものと、ブッチャーペーパー (厚手の肉用紙) の2種類が最も一般的である。豚肉は牛肉やラム肉よりも温室効果ガス (GHG) 排出量が少なく、鶏肉よりは多いため、食品の腐敗による温室効果ガス (GHG) 排出量を算定するにあたり平均的な例として豚肉を選択した。EPS フォームトレイは、吸収パッドを備えた独立気泡型の容器である。PVC フィルム付きの EPS フォームトレイは、ブッチャーペーパーよりも製造時の温室効果ガス (GHG) 排出量が多いが、ブッチャーペーパーに比べ豚肉の腐敗率が低く (約5対7~10%)、その差を補って余りあるものである。その結果、EPS と PVC の包装材は、ブッチャーペーパーよりも温室効果ガス (GHG) 総排出量が約35% 低くなっている。また、米国では精肉に使用された包装材は埋め立てられることが多いため、紙の嫌気性分解によるメタン放出を考慮すると、プラスチックは紙よりも優位にあると言える。

ハンドソープ容器

ハンドソープ容器を分析した結果、再利用による温室効果ガス (GHG) 排出量の削減効果が明らかになった。詰め替え用 PP パウチからガラス瓶に15~20回詰め替えをすると、HDPE 製ハンドソープボトルを15~20本使用した場合と比べて、温室効果ガス (GHG) 排出量が約25% 削減される。この数値は、詰め替えの際に誤って石けんをこぼしてしまうなど、詰め替え時の石けんの無駄を考慮しても、硬質 HDPE 製ボトルよりも軟質 PP 詰め替えパウチの方が製造時の温室効果ガス (GHG) 排出量が少ないことに起因している。とはいえ、HDPE 製ボトルの再利用は温室効果ガス (GHG) 排出量が最も少なく、ガラス瓶の再利用よりも15% 低い排出量となっている。

工業ドラム

HDPE 製ドラムとスチール製ドラムの相対的な温室効果ガス (GHG) 排出量は、製造時の排出量、耐久性、リサイクル率の違いによって異なる。スチール製ドラム1本当たりの製造時の温室効果ガス (GHG) 排出量は、HDPE 製ドラム1本当たりよりも多い。しかし、機能単位が10年の場合、耐用年数10年のスチール製ドラムは耐用年数5年の HDPE 製ドラムに比べ耐久性が高いため、ドラム缶1本当たりの製造時の温室効果ガス (GHG) 排出量の差は打ち消しとなる。更に、スチール製ドラムは HDPE 製ドラムよりもリサイクル率が高く (スチール製ドラム: 80%、HDPE 製ドラム: 20%)、新規素材生産のオフセットによるクレジットも大きい。へこみ修理などにかかるメンテナンス費用を考慮しても、最終的にはスチール製ドラムに軍配が上がる。10年間にわたり、2本の HDPE 製ドラムの代わりに1本のスチール製ドラムを使用することで、正味約30% の温室効果ガス (GHG) 削減が可能になる。

公営下水道管

下水道管には、大きく分けて重力管 (市場シェアの約90%) と圧送管 (約10%) の2種類がある。重力管には硬質ポリ塩化ビニル (PVC) と鉄筋コンクリート、圧送管には PVC とダクタイル鋳鉄が最も多く使用されている。公平な比較を行うため、最も比較に適したパイプの仕様に基づいて評価を行った²⁵。分析に使用した4つの下水道管はすべて耐用年数を100年と仮定した。いずれの下水道管においても、硬質ポリ塩化ビニル管は、温室効果ガス (GHG) 排出量が最も少ない (鉄筋コンクリートより約45%、ダクタイル鋳鉄より35% 少ない) ことが明らかとなっている。これは、同じ機能をより軽量で実現できることが主な理由である。また、コンクリート管やダクタイル鋳鉄管は、より温室効果ガス (GHG) の負荷を高める輸送や設置工程を必要とする。ダクタイル鋳鉄管のリサイクル率 (約30%) は PVC 管 (約10%) よりも比較的高いということは注目に値する。圧送管のポンプ効率を定量化することはできなかったが、既に温室効果ガス (GHG) 排出量が少ない素材である PVC が優位にあると考えられる。

²⁵15インチの下水道重力本管: PVC (ASTM D3034, SDR26) 対鉄筋コンクリート (ASTM C76, Wall B)、12インチの下水道管: PVC (ASTM D2241, SDR 21) 対ダクタイル鋳鉄 (AWWA C151)

住宅用水道管

住宅用水道管の代表的なものとして、L型銅管と架橋ポリエチレン(PEX)管がある。銅管とPEX管の温室効果ガス(GHG)排出量を比較する際に最も重要なのは、銅の方がプラスチックよりも熱伝導率が高いということである。4人家族で朝晩集中して水を使う2,811平方フィートの住宅では、熱損失の増加による温室効果ガス(GHG)排出量は銅管の方がPEX管よりも約35%高くなると推定される。また、銅管は重量が大きく、製造工程でエネルギーを大量に消費するため、製造時の温室効果ガス(GHG)排出量はPEX管の約2.5倍となる。しかし、製造時の排出量の差は、熱損失量の差に比べれば些細なものであると言える。銅は非常にリサイクル性が高いが、小規模な住宅解体業者は銅管をリサイクル用に分別しないことが多いため、米国のリサイクル率はわずか30%と推定される。対照的に、PEX管はリサイクル性がかかなり低いものの、総合的に評価すると、PEX管の方が銅管よりも温室効果ガス(GHG)排出量が約25%少なくなる。

家具

耐久消費財分析の代表例として家具をモデル化し、機能単位を正方形のテーブル1台と椅子4脚のセットに、耐用年数を10年と定義した。この分析では、ポリプロピレン(PP)、木材、スチールの一般的な3つの家具素材について温室効果ガス(GHG)排出量を評価した。その結果、PPでの排出量が最も少なかった。これは、より少ない材料で同等の性能と機能を提供できるため(木材とスチールはそれぞれ40kg必要とするのに対しPPは約20kg)、原材料の調達、製造、輸送に伴う温室効果ガス(GHG)排出量を削減できることが主な理由である。

ハイブリッド自動車燃料タンク

ハイブリッド車用燃料タンクの場合、温室効果ガス(GHG)排出量のほとんどは使用時に発生する。機能単位を生涯走行距離20万マイルの米国の中型ハイブリッドセダンの燃料タンクと定義し、HDPE製とスチール製の燃料タンクを比較した。HDPE製燃料タンクは、スチール製と比較して、製造時および廃棄時における直接的な温室効果ガス(GHG)への影響は同等であるにもかかわらず、全体として約90%の温室効果ガス(GHG)排出の削減が可能である。これは主に、その軽量化が燃料効率の向上につながるためである。我々の調査によると、燃料タンクを含む自動車用スチール全般のリサイクル率は約95%であるのに対し、HDPE製燃料タンクのリサイクル率は約65%と比較的低くなっている。

電気自動車用バッテリーパックのトップ用エンクロージャー

ハイブリッド車用燃料タンクに加え、電気自動車(BEV)の代表的な用途として、またハイブリッド車用燃料タンクとの比較対象として、バッテリーパックのトップ用エンクロージャーの分析も行った。カテゴリ内で最も一般的な素材はグラスファイバー強化ポリプロピレンとスチールの2種類である。ハイブリッド車用燃料タンクと同様、バッテリーパックの軽量化は使用時の温室効果ガス(GHG)排出削減につながる。しかし、BEVはハイブリッド車よりもエネルギー効率がよく、米国では再生可能エネルギーや原子力エネルギーの割合が比較的高い(総電力構成の約40%)ため、温室効果ガス(GHG)排出における重要性は著しく低下している²⁶。PPやグラスファイバー製のバッテリーエンクロージャーは、生涯走行距離20万マイルの場合、スチール製のものよりも温室効果ガス(GHG)排出量が約10%低くなる。とはいえ、ほとんどのEV車はまだ製品寿命を迎えていないため、リサイクル率は専門家へのインタビューに基づいて推定している。PPやグラスファイバー製のエンクロージャーは、製造時の温室効果ガス(GHG)排出量は少ないが、混合素材を使用しているためリサイクル性が低い。また、プラスチック製バッテリーハウジングのエンクロージャーは軽量であるため、製品サイズを縮小し、製造に伴う排出量を削減する機会にもなり得る²⁷。プラスチック製に比べ、スチール製のエンクロージャーは既存の自動車用スチールのリサイクルフローに組み込むことができるため、約95%という高いリサイクル率が期待される。しかし、重量が大きいため、使用時の電力消費量は多くなる。

²⁶World energy outlook (2021年)

²⁷BEVで以下を実現できれば、BEVの軽量化によりバッテリーサイズの縮小が可能となる:(1)最小走行距離250~300マイルを維持、(2)適正なコストで軽量化を実現、(3)素材の重量を軽減し(少なくとも20~30kg)、現在のBEV重量が次のテスト重量クラスの範囲内にある

Tシャツ

繊維セクターのプラスチック総量11MMTのうち、アパレルが約50%を占めている。ここでは、代表的な用途としてTシャツを取り上げ、PET製品と綿製品での温室効果ガス(GHG)排出量を比較した。全体として、PET製Tシャツは製造時の温室効果ガス(GHG)排出量が少ないため、綿Tシャツに比べ温室効果ガス(GHG)排出量が少ない。綿花は、輪作、肥料や農薬の使用、灌漑など、作物栽培の様々な段階で大量の温室効果ガス(GHG)を排出する。またTシャツのリサイクル率は低く、使用後は廃棄物としてWtEと埋め立てでほぼ均等の割合で処理されている。

カーペット

カーペットはもう一つの主要な繊維カテゴリーであり、繊維プラスチックの総量の約1MMT(または10%)に相当する。カーペット市場の大部分(約85%)は合成カーペット(PET/ナイロン)が占めている。プラスチック以外の代替素材はウールのみで、米国市場のシェアはわずか3~5%で、主に高級カーペットに使用されている。合成カーペットは製造時の温室効果ガス(GHG)排出量が少なく、ウールカーペットと比較して温室効果ガス(GHG)排出量は五分之一である。米国ではカリフォルニア州を中心として、合成カーペットのうち5%程度しかリサイクルされていない。ウールのカーペットはリサイクルできないため、合成カーペットのリサイクルが更に進めば、ウールに対するPET/ナイロンの温室効果ガス(GHG)排出における優位性は高くなる。

水飲みコップ

ここでは3種類のプラスチック製コップ(EPS、PET、PP)の温室効果ガス(GHG)排出量を評価し、それらを紙コップや再使用可能なガラス製コップと比較した結果、EPS製コップが温室効果ガス(GHG)排出量が最も少ないことが分かった。EPS製コップは、重量が小さく生産時の温室効果ガス(GHG)排出量も最も少ないことがその理由である。紙コップも製造時の温室効果ガス(GHG)排出量が少なく、WtEでの温室効果ガス(GHG)排出量も少ないため、EPS製コップと同レベルの温室効果ガス(GHG)排出量となる(紙の燃焼によるCO₂は生物起源と見なし分析からは除外)。紙コップには重量中約5%のLDPEが含まれているため、プラスチック混合素材と見なされることに留意する必要がある。ゲブルトップの牛乳容器と同様に、LDPEを内張りすることにより紙コップは液体を保持することが可能となっている。何度も使用可能なガラス製コップからの温室効果ガス(GHG)排出は、洗浄に使う水の温度(温水あるいは常温)で変動する。1つのガラスコップにつき500回まで再使用が可能で、50個単位で業務用食器洗浄機で温水洗浄すると仮定する。その場合、温水は温室効果ガス(GHG)排出量が比較的多い工業用ガスボイラーを使用するため、常温水を使用する場合と比較して温室効果ガス(GHG)排出量は約5倍になる。常温水で洗浄する再使用可能なガラスコップは、EPSや紙コップよりも温室効果ガス(GHG)排出量は少ない。

7. 感度分析により素材における温室効果ガス (GHG) 削減機会

温室効果ガス (GHG) 排出の評価を西欧や中国などの他の地域へと拡張するために感度分析を実施し、2050年の脱炭素・循環型社会の展望を構築した。この分析では3つの主要な要素に着目している: エネルギーミックス、使用済み廃棄物処理ミックス、プラスチックおよびプラスチック代替素材の輸送に使用されるBEVとICEの商用車のミックスである。エネルギーミックスは製造工程におけるエネルギー使用に影響を及ぼし、BEVとICEの車両ミックスは輸送エネルギーに影響を及ぼす。プロセスにおける非エネルギー排出量 (触媒や水の使用など) は一定であると想定している。この効率的アプローチは、地域別の微妙な差異や2050年の展望について俯瞰的な視点を提供し、分析した各製品について重要な温室効果ガス (GHG) 削減要因を特定するのに役立つ。この分析では、清涼飲料水用容器と牛乳容器に焦点を当てる。

清涼飲料水用容器

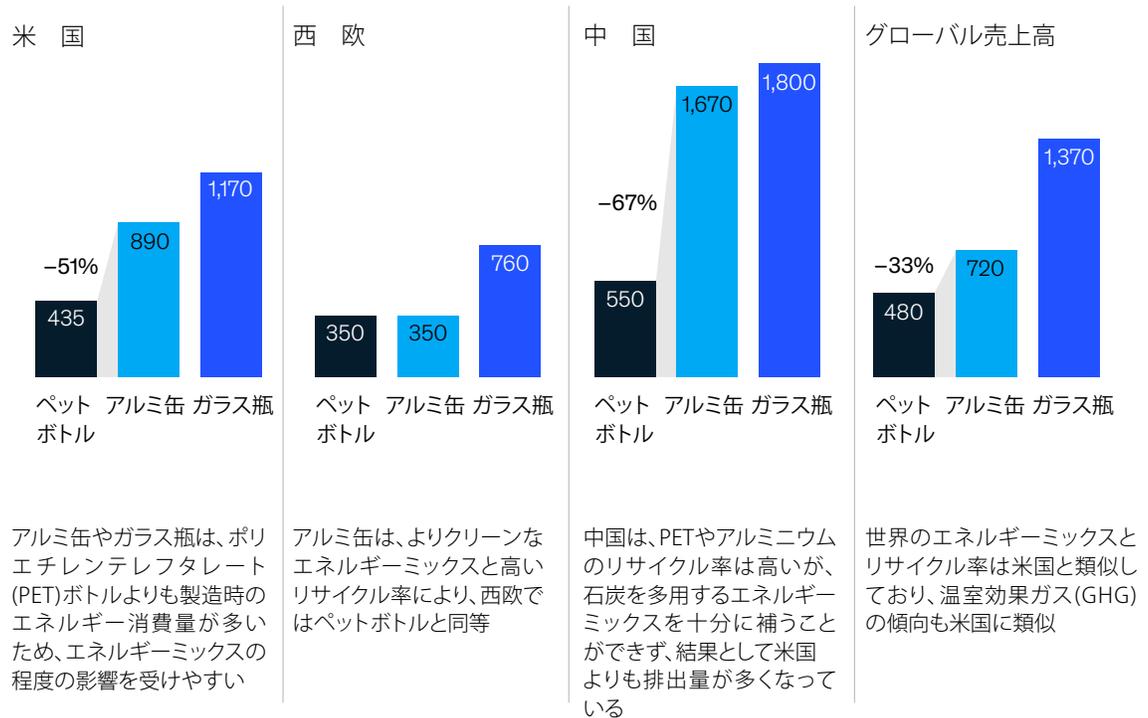
ペットボトル、アルミニウム、ガラスの相対的な温室効果ガス (GHG) 排出における評価は地域によって異なる。米国ではペットボトルの温室効果ガス (GHG) 排出量が最も少ないが、西欧ではペットボトル同様アルミ缶の温室効果ガス (GHG) 排出量も少なく、ガラス瓶はどの地域においても依然として排出量が最も高い (図表9)。西欧でアルミ缶の温室効果ガス (GHG) 排出が最も少ないのは、エネルギーミックスがよりクリーンであり、アルミ

図表9

アルミ缶は西欧ではペットボトルと競合するが、中国では温室効果ガス (GHG) の総排出量が多くなっている

2020年の温室効果ガス (GHG) 排出量

kg CO₂e¹; 清涼飲料水10万液量オンス当たりのCO₂排出量



¹ 二酸化炭素換算
資料: マッキンゼー分析

缶のリサイクル率が高いためである。アルミニウムの生産は、米国と西欧では水力発電の割合が高く、中国では主に石炭に依存している。西欧は、アルミニウム地金の約50%をアイスランド、モザンビーク、ノルウェー、アラブ首長国連邦などから輸入しており、実際の温室効果ガス(GHG)排出量は計算よりも高い可能性がある。一方、中国では石炭のエネルギー比率が高いため、温室効果ガス(GHG)排出総量が最も多くなっている。中国では、ペットボトルやアルミ缶のリサイクル率は高いが、石炭からの温室効果ガス(GHG)排出量を相殺するほどの規模には至っていない。

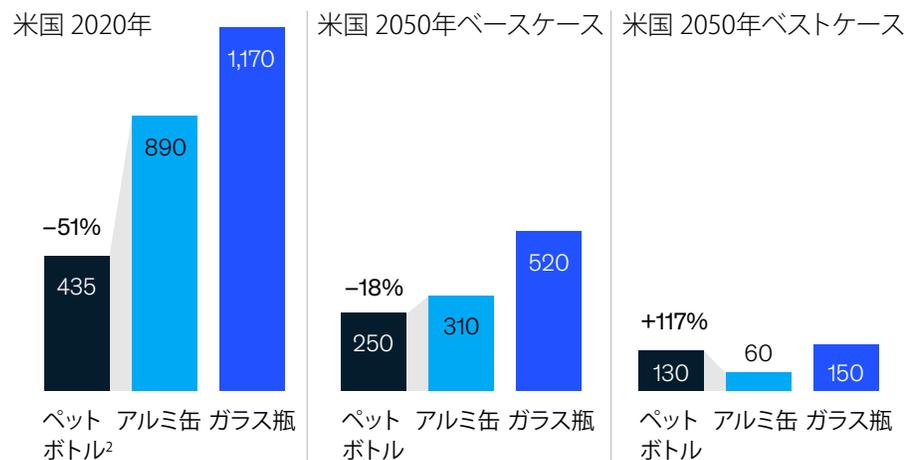
2050年のベースケースでは、よりクリーンなエネルギーミックス、より高いリサイクル率、商用BEVの普及によって、3つの素材の全体的な排出量が削減される。製造過程のエネルギー消費量が多いアルミニウムとガラスは、共に配電網の脱炭素化から他よりも大きな恩恵を得ることになる(図表10)。更に、2050年のペットボトルからの排出量は主にWtEからの温室効果ガス(GHG)排出量に左右される。ペットボトルの製造過程でのエネルギー消費量は少ないため、ペットボトルにおける温室効果ガス(GHG)排出量はアルミニウムやガラスに比べて比較的ゆっくりと減少し、その温室効果ガス(GHG)排出における優位性は失われていく。実際、2050年のベストシナリオ(1.5°Cシナリオ)では、アルミ缶がペットボトルの温室効果ガス(GHG)排出量を下回る。

図表10

アルミニウムとガラスは、配電網の脱炭素化により多大な恩恵を享受することになる

温室効果ガス(GHG)排出量

kg CO₂e¹; 清涼飲料水10万液量オンス当たりのCO₂排出量



¹ 二酸化炭素換算
² ポリエチレン・テレフタレート
 資料: マッキンゼー分析

牛乳容器

調査したすべての地域において、ゲブルトップ型紙容器はHDPE製ボトルよりもリサイクル率が高く、埋め立て処理と比較してWtEの割合が高いため、より温室効果ガス(GHG)排出量が少ない代替素材となっている(図表11)。これは、欧州²⁸、オーストラリア、ニュージーランド²⁹においてゲブルトップ型紙容器がHDPE製ボトルよりも温室効果ガス(GHG)排出量が少ないとする既存の調査結果とも一致している。しかし、エネルギーミックスの影響はHDPE製ボトルとゲブルトップ型紙容器の両方に及んでおり、西欧では米国よりも全体的な温室効果ガス(GHG)排出量が少なく、中国では排出量が多くなっている。ただし、HDPE製の牛乳容器は米国以外ではあまり一般的ではない。

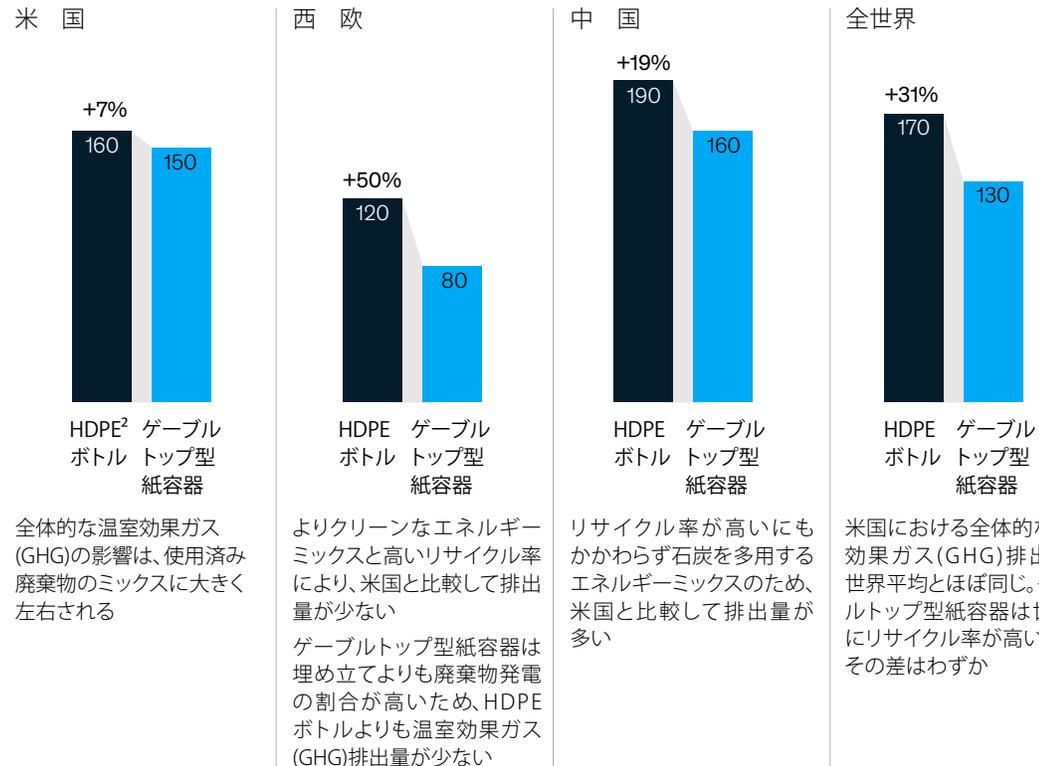
2050年までに米国のエネルギーミックスを脱炭素化することで、両素材の温室効果ガス(GHG)への影響は大幅に低下する。WtE率が全体的に上昇し、ゲブルトップ型紙容器のリサイクル率も大幅に上昇するベースケースでは、紙容器のパフォーマンスがHDPE製ボトルを上回る。最良シナリオ(再生可能エネルギーまたは原子力エネルギーが100%、高いリサイクル率)では、どちらの素材においても温室効果ガス(GHG)排出量は少ないが、HDPE製はリサイクル率が高いため、温室効果ガス(GHG)への影響度はわずかに低くなる(図表12)。

図表11

リサイクル率が高く埋め立てに比べ廃棄物発電(WtE)の割合が高いため、ゲブルトップ型紙容器は西欧や中国でプラスチックボトルに比べ、温室効果ガス(GHG)排出量が少ない

2020年の温室効果ガス(GHG)の影響

g CO₂e¹; 冷蔵牛乳64液量オンス当たりのCO₂排出量



全体的な温室効果ガス(GHG)の影響は、使用済み廃棄物のミックスに大きく左右される

よりクリーンなエネルギーミックスと高いリサイクル率により、米国と比較して排出量が少ない
ゲブルトップ型紙容器は埋め立てよりも廃棄物発電の割合が高いため、HDPEボトルよりも温室効果ガス(GHG)排出量が少ない

リサイクル率が高いにもかかわらず石炭を多用するエネルギーミックスのため、米国と比較して排出量が多い

米国における全体的な温室効果ガス(GHG)排出量は世界平均とほぼ同じ。ゲブルトップ型紙容器は世界的にリサイクル率が高いため、その差はわずか

¹ 二酸化炭素換算
² 高密度ポリエチレン
資料: マッキンゼー分析

²⁸Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg GmbH(ifeu)による、欧州市場における飲料および液体食品向けのテトラパック紙容器と代替包装システムの比較ライフサイクルアセスメント(2020年3月)

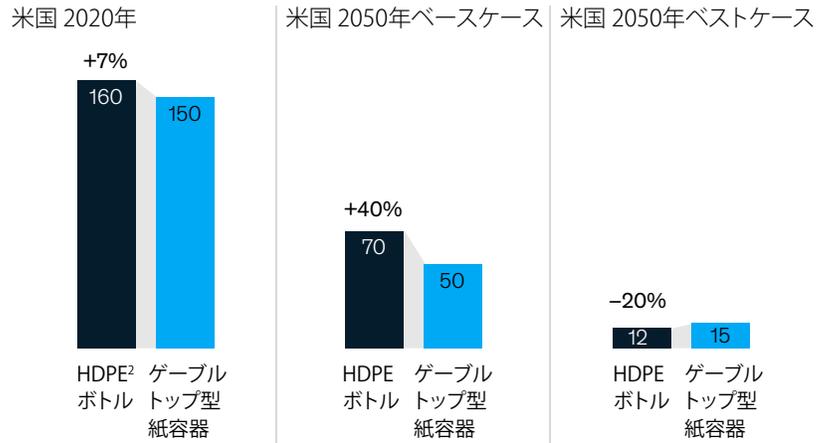
²⁹オーストラリアとニュージーランドにおける飲料および食品包装のLCA. thinkstep-anz(2021年1月)

図表12

脱炭素社会では、HDPE ボトルはリサイクル率が高いため、ゲープルトップ型紙容器よりも若干優位性があると考えられる

温室効果ガス(GHG)の影響

kg CO₂e¹; 清涼飲料水10万液量オンス当たりのCO₂排出量



¹ 二酸化炭素換算
² ポリエチレンテレフタレート
資料: マッキンゼー分析

改善の可能性

(1.5°Cシナリオにあるような)脱炭素・高度循環型社会では、よりクリーンなエネルギーミックス、リサイクル率の向上、商用BEV普及率の向上により、すべての素材の温室効果ガス(GHG)排出量が改善されると考えられる。ただし、温室効果ガス(GHG)削減の程度は素材によって異なる。一般的に、アルミニウムやガラスなど、製造時にエネルギーを大量に消費する素材は、配電網の脱炭素化により大きな改善が望める。また、影響の規模は小さいが、リサイクルにより新規素材の製造を回避することからも恩恵も得られる。埋め立て処理とWtEの比率はプラスチックや紙など炭素を含む素材には大きく影響するが、アルミニウムやスチール、ガラスなどの他の素材への影響はほとんどない。なぜなら、WtEによるプラスチック焼却における温室効果ガス(GHG)排出量が、もし製造されていた場合に製造設備から生じたであろう排出量を上回るためである。したがって、配電網のクリーン化が進むにつれ、ユーティリティ設備から生じる温室効果ガス(GHG)排出量は少なくなるため、プラスチックを埋め立て処理した場合と比較してWtEを選択するメリットはなくなる。紙の場合はその逆で、埋め立てると嫌気性分解によりメタンが排出される(人為起源の温室効果ガス(GHG)と見なされるため、分析対象に含む)一方、紙の焼却によるWtEへの影響はごくわずかである(紙の燃焼によるCO₂排出は生物起源の温室効果ガス(GHG)と見なされるため分析対象から除外される。N₂O排出は人為起源の温室効果ガス(GHG)と見なされるため分析対象とするが、影響はごくわずか)。

2050年のベースシナリオと最良シナリオは2つの潜在的な道筋を示している。前述のように、さまざまな素材における相対的な温室効果ガス(GHG)排出量はエネルギーと使用後の廃棄処理のミックスの影響を受けやすく、適切な条件下であればどの素材でも最小限の温室効果ガス(GHG)排出量を実現できる可能性があることを示唆している(図表13)。この結果を受け、今後数年間で温室効果ガス(GHG)排出量を更に削減するために、どの素材においても採用できる主要なレバーがあることを強調したい。

図表13

プラスチック、金属、ガラス、紙はすべて、ネットゼロの目標達成に向け、更なる温室効果ガス(GHG)排出量削減の可能性を秘めている



プラスチック

- ・ 製造工程の電化と再生可能エネルギーの使用
- ・ 再利用の促進
- ・ WtEの削減(例:リサイクルまたは埋め立てに移行)
- ・ WtEプラントでの炭素回収、貯蔵の実施
- ・ リサイクル率およびリサイクル材の含有率の向上、リサイクル歩留りの改善



金属

- ・ 製造工程での再生可能エネルギーの使用
- ・ リサイクル率およびリサイクル材含有率の向上



ガラス

- ・ 製造工程での再生可能エネルギーの使用
- ・ 再利用の促進
- ・ 再利用工場でのエネルギー効率の高い洗浄の実施
- ・ リサイクル率およびリサイクル材含有率の向上



紙

- ・ 製造工程での再生可能エネルギーの使用
- ・ リサイクル率およびリサイクル材含有率の向上
- ・ 埋立地でのメタン回収とエネルギー回収の実施

資料: McKinsey Chemical Insights

Stefan Helmckeはマッキンゼーのウィーンオフィスのシニアパートナー、**Thomas Hundertmark**はヒューストンオフィスのシニアパートナー、**Chris Musso**はデンバーオフィスのシニアパートナー、**Wen Jie Ong**はシアトルオフィスのコンサルタント、**Jonas Oxgaard**はアソシエイトパートナー、**Jeremy Wallach**はボストンオフィスのパートナー、**山田 唯人**は東京オフィスのパートナーである。

計算のインプットと前提条件を含む添付資料はリクエストに応じて提供することが可能。

クリティカルレビューの概要

本レポートは、著者であるマッキンゼーのStefan Helmcke、Thomas Hundertmark、Chris Musso、Wen Jie Ong、Jonas Oxgaard、Jeremy Wallach、山田 唯人が行ったプラスチックのライフサイクル評価(LCA)に関するMiguel Brandão 博士およびJonathan Cullen 博士による反復的なレビューを反映したものである³⁰。このLCA調査は、16のプラスチック用途について、温室効果ガス(GHG)排出量に限定した間接的な温室効果ガス(GHG)排出を含む、「ゆりかごから墓場まで」の合理化されたLCAで構成されている。更に、その結果について、非プラスチックの代替素材との比較を行った。このレビューは、本レポートは以下に準拠していることを保証するものである。

- LCAを実施するために使用された手法は、科学的・技術的に有効であるが、国際標準化機構(ISO)規格14040、14044、14067、また技術仕様(TS)14071に必ずしも完全に準拠しているわけではない。これは包括的な研究を行うことが本調査の主旨ではないためである³¹
- 使用されたデータは適切であり、研究の目的と範囲と合致している。また、その解釈は特定された制約事項に従うものである
- レポートは透明性があり、内容的に一貫性がある

これらすべては調査の質とその結果と解釈の妥当性を保証するための過程を得て作成された。この評価は調査が終了した後に執筆されたものであり、次の7段階の手順を反映している。

1. レビュー担当者によるレビュー
2. レビュー担当者との会合を実施、同意を反映した評価内容であることに合意
3. レビュー責任者は2ページのレビューステートメントを作成し、具体的なコメントを共有
4. レポートの著者らは、レビュー担当者のコメントに目を通し、レポートを修正し、箇条書きの回答書を作成
5. レビュー責任者は、著者からの箇条書きの回答を読み、追加のコメントを共有
6. レビュー著者らは、レビュー責任者の指摘事項を確認し、改訂したLCAレポートの改訂版と箇条書きの回答書を作成
7. レビュー責任者は、著者が修正した箇条書きの回答書を読み、最終的な承認または変更依頼を実施。

このレポートに関連するレビューは、以下の基準を満たしている。

- 上記のステップ7に準拠し、2022年5月10日に送付されたLCA調査の最終版に付随するものである
- ライフ・サイクル・インベントリ(LCI)モデルおよび個別のデータセットの一般的な評価を含む
- データの適切性と妥当性、計算手順、LCI、影響評価手法、特性係数、算出されたLCIとライフサイクル影響評価(LCIA)の結果、解釈など、LCAのあらゆる側面を網羅している
- これは、LCAのレビューで一般的に使用される基準に照らして調査内容を評価するものである。これらの基準は、LCAの4つの段階(目標と範囲の定義、インベントリ分析、影響評価、解釈)のそれぞれをカバーしている

³⁰Climate impact of plastics, McKinsey (2022年5月10日版)(未公開)

³¹「ISO 14040:2006: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework」International Organization for Standardization (ISO)(2006年)、「ISO 14044:2006: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines」ISO(2006年)、「ISO/TS 14067:2013: Greenhouse Gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication」ISO(2013年)、「ISO/TS 14071:2014: Environmental management – Life cycle assessment – Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006」ISO (2014年)

1. 目標と範囲の定義

本レポートは、明示的には述べられていないが、機能単位、システム境界、LCIA(気候変動の影響カテゴリーへの着目、および生物起源の炭素とメタンの処理方法を含む)、配分ルール、データソース(明確に指定されている)の記述が含まれている。LCA調査において選択された目標については、その検証も妥当性の確認もできないため、このレビューの対象外とする。

2. ライフサイクルのインベントリ

このセクションでは、レビューされたLCA調査におけるデータとモデリングについて説明する。本内容に特化したセクションはないが、主なプロセスは付属資料に数字と共に説明されている。

3. ライフサイクルでの影響評価

優れたLCIAを適用し、気候変動への寄与分析を含む結果を、一般的な注目点として示している。

4. 解釈

この調査には感度分析が含まれている。更に、制約事項も明示している。結果についても分析理由と同様に議論を行っている。導き出された結論は確固たるものであり、以前に報告された分析を土台としている。

結び

プラスチックのLCA調査のレビューにより、適切な分析が行われたことが明らかとなった。導き出された知見は、LCA手法の一貫した科学的な適用により裏付けられている。著者がレビュー担当者から提起されたコメントや懸念に十分に対処していることから、この調査および結果は良質なものであると結論付ける。

Miguel BrandãoはKTH王立工科大学の持続可能な開発、環境科学、および工学(SEED)部門の産業生態学およびライフサイクル評価の准教授を務める。**Jonathan Cullen**はケンブリッジ大学工学部の一部であるResource Efficiency Collectiveのエネルギー、輸送、および都市インフラの准教授を務める。

McKinsey & Company

2022年 7月

Copyright © McKinsey & Company

[McKinsey.com](https://www.mckinsey.com)

 [@McKinsey](https://twitter.com/McKinsey)

 [@McKinsey](https://www.facebook.com/McKinsey)