

No.12 -100%バイオ由来ポリエステル(PET)-

調査責任者 一般社団法人日本化学工業協会

概要

本調査では繊維製品の素材である 2 種類のポリエチレンテレフタレート(PET)1kg の差として GHG 排出削減量を評価した。評価対象製品は 100%バイオ由来 PET であり、比較製品は石油由来 PET である。最終製品の製造、流通、使用の各段階は計算対象外とした。ベースケースでの GHG 排出削減量は、1.08kg-CO_{2e}/kg だった。対象範囲の各工程の内、資源採掘～テレフタル酸(TPA)製造工程が最も排出量が高い。本調査の対象外とした繊維の最終製品は多岐に亘るため、製品によりライフサイクル全体での GHG 排出量は変化する。

1. 調査の目的

本調査は、ポリエステル繊維製品の材料である 100%バイオ由来ポリエチレンテレフタレート(PET)を評価対象製品とし、当該製品によって代替される石油由来 PET と比較して CO₂ 排出量の削減効果を評価することを目的とする。

PET は、TPA とエチレングリコール(EG)を原料とし、それらはいずれも従来は石油を精製して製造する。

対象製品である 100%バイオ由来 PET は、原料の TPA 及び EG を石油由来ではなくバイオ由来の粗原料から製造したもので、新規に開発した製品である。原料植物が光合成により大気中の炭素を吸収して成長することから、製品の焼却段階でのバイオ原料由来の炭素排出は相殺されゼロとみなすことができる。

当該樹脂から製造したポリエステル繊維は、一般衣類やユニフォーム等の衣料品、インテリアや寝具等の生活資材、シートベルトや内装材等の自動車資材をはじめ多種多様な商品展開・用途展開が可能であり、商品・用途によりライフサイクル排出量が大きく異なる。一種類の繊維製品ではなく、材料である樹脂段階を選択したのは、繊維製品の基礎となる PET 樹脂の環境負荷を算定することで、多様な繊維製品に算定結果を応用できることが期待されるためである。

LCA 調査※の実施者(調査実施時の所属)

・飯田女子短期大学 助教 仙波壽朗

・工学院大学 教授 稲葉敦

※市場規模予測データは除く。

2. 製品の比較

2.1 比較する製品の記述

本調査では、ポリエステル繊維製品の材料となる二種類の PET 樹脂を比較する。2020 年の世界のポリエステル繊維の需要は約 5,271 万トンと見込まれる。2030 年の需要については、約 7,800 万トンの見込みである(参考文献(1))。本調査の評価対象製品及び比較製品は、当該ポリエステル繊維製品の材料として用いられる。

評価対象製品は、100%バイオ由来 PET 1kg である。PET($(C_{10}H_8O_4)_n$)は TPA($C_8H_6O_4$)と EG($C_2H_6O_2$)を重合して製造するポリエステル的一种である。PET の原料である TPA と EG は、従来、いずれも石油を精製して製造する化学製品である。

本調査の評価対象製品である 100%バイオ由来 PET の原料であるバイオ由来 TPA は、原料であるパラキシレン(PX、 C_8H_{10})から日本国内で生産される。PX は米国のトウモロコシを原料とするエタノール 80%とブラジルのサトウキビを原料とするエタノール 20%から製造される。バイオ由来 EG は、インドでサトウキビ廃糖蜜を原料として製造される。TPA 及び EG から日本国内で PET を重合する。

評価対象製品である 100%バイオ由来 PET と比較製品である石油由来 PET は、同一の製造プロセスを経て重合することができる。物性や用途は全く同等であり、同じ用途、品種、デザインの繊維製品に使用できる。従って、ライフサイクル排出量に影響を及ぼすのは、両者の差異である原料の製造段階である。

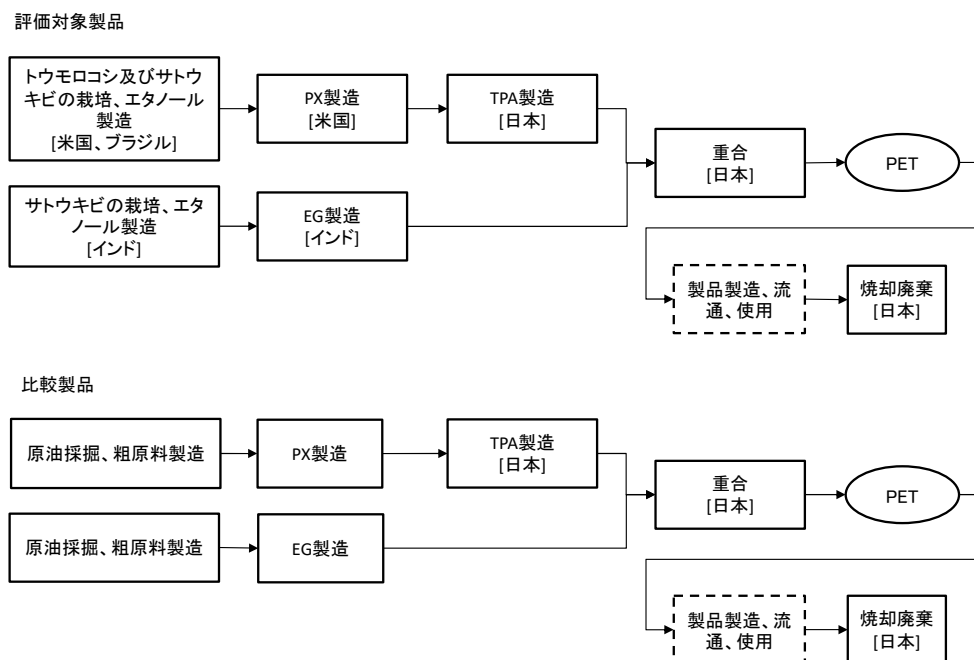


図 12-1. ライフサイクルフロー

3. 機能単位

3.1 機能単位の詳細

評価対象製品及び比較製品の機能は、ポリエステル 100%の繊維製品の材料に必要な物性の提供である。機能単位は、PET 1kg の製造及び焼却処分と設定した。

3.2 品質要件

評価対象製品と比較製品の物性は同等であり、これらの樹脂から製造する繊維及び繊維製品の加工性、耐久性において、同じ機能を発揮することができる。最終製品の消費者は製品のみでは両者を見分けることはできない。

3.3 サービス寿命

本調査において最終製品は様々な形態、製品が考えられるため、最終製品のサービス寿命は具体的に設定していない。また、サービス寿命の長さは GHG 排出量の計算および分析結果に影響を与えない。

3.4 時間的及び地理的基準

本調査は、2011 年～2016 年を基準として実施した。一次データを用いた TPA 製造及び PET 重合工程については、2015 年～2016 年を基準とし、引用文献は 2011 年、2013 年のものを利用した。本調査は、アメリカ、ブラジル、インド及び日本を基準として実施した。評価対象製品の原料製造段階はアメリカ、ブラジル、インド及び日本で行われ、PET 重合工程は日本で行われるものとした(図 12- 1)。2030 年のポリエステル繊維世界需要は 2020 年資料の 2030 年予測値を用いた。CO₂ 排出削減貢献量は 2030 年のフローベースでの値である。

4. システム境界

評価対象製品を使用した最終製品のバリューチェーンは、図 12- 2 の通りである。下記バリューチェーンの内、最終繊維製品の製造、流通、及び使用の各段階は、評価対象製品と比較製品で同一と想定し、本調査から省略した。

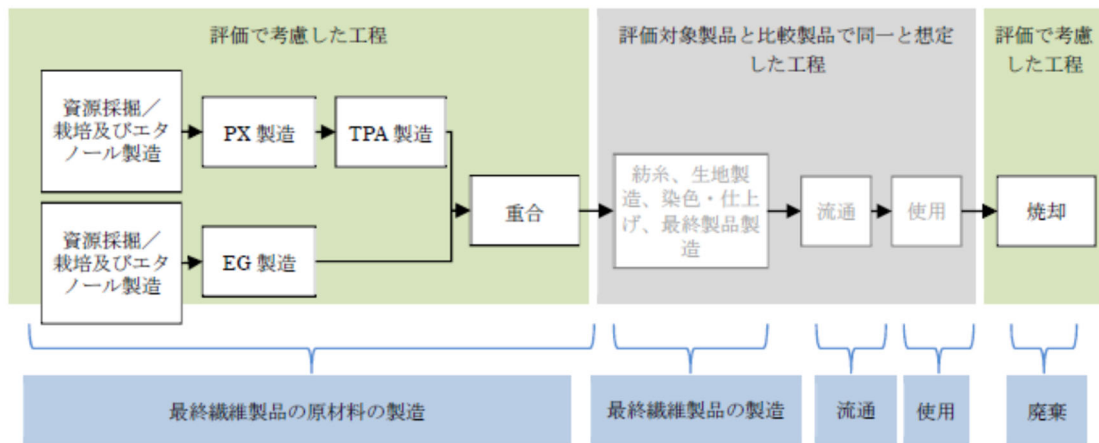


図 12-2. 製品システム

5. 算定方法とデータ

5.1 用いた方法

GHG 排出削減貢献量は、100%バイオ由来 PET と石油由来 PET の差として計算した。

GHG の特性化係数は GWP100 年指数(IPCC2007)を使った。最新の IPCC2013 ではなく IPCC2007 の指数を使った理由は、本研究の基礎となる既存研究(参考文献(2))との一貫性のためである。いずれのシナリオでも同じ特性化係数を使用している。

5.2 配分

一次データを利用したバイオ由来 PX 製造工程では、製品・共製品の重量配分によって環境負荷の配分を行った。

バイオ EG 製造工程の計算では(参考文献(2))、経済価値配分による配分が用いられている。

PX から TPA を製造する工程では、製品である TPA の他に、酸化による熱からユーティリティとしての蒸気が発生している。ここでは配分を用いず、当該蒸気の環境負荷を工程全体の排出量から減算した。

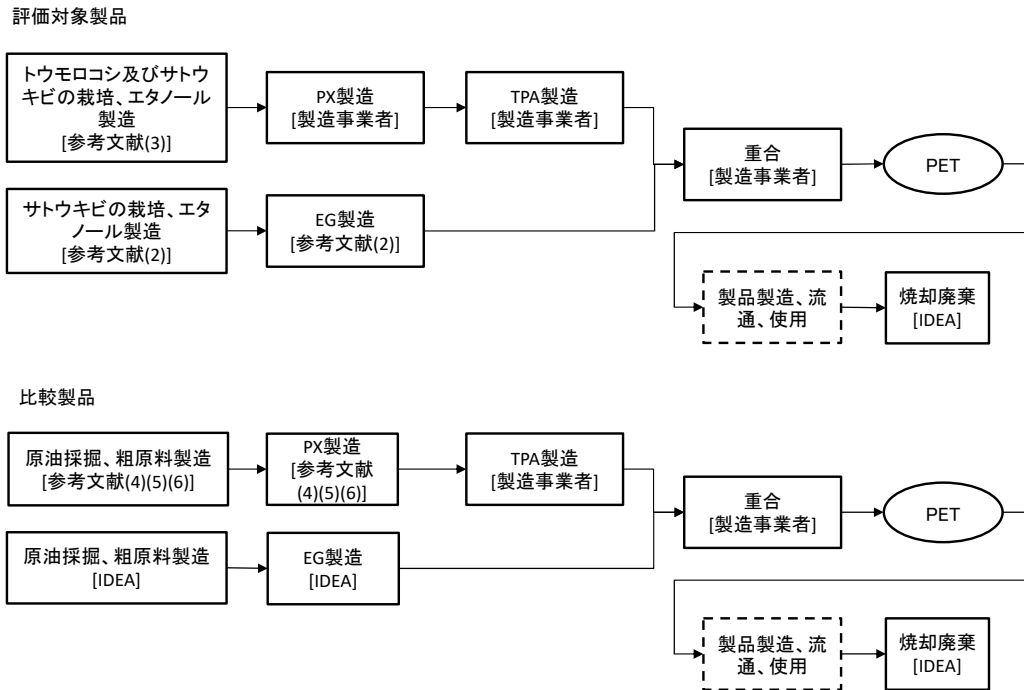
5.3 用いたデータベースとデータ品質

各工程のデータ源は図 12-3 の通りである。製造事業者の一次データを利用している。

石油由来 PX の製造(参考文献(4)~(6))は分解油系 PX と改質油系 PX の両者を混合したデータで、改質油系 PX の比率が高い。

ライフサイクルインベントリのデータは、インベントリデータベース「IDEA」

(Inventory Database for Lifecycle Analysis、産業技術総合研究所及び産業環境管理協会による)バージョン 2 を優先して利用し、引用文献に掲載された情報で補完した。



注：点線は評価を省略したプロセス。

図 12- 3. データ源

5.4 カットオフ

重合工程で使用した触媒、及び TPA 製造工程におけるブロモメタンと重合工程における廃ポリマの排出は、工程のアウトプットの重量の 0.5%未満と僅少なため、評価には算入していない。

6. 結果

6.1 CO₂ 削減貢献量

評価対象製品と比較製品の CO₂ 排出量の各工程での算定結果は表 12- 1 及び図 12- 4 の通り。

評価対象製品は比較製品に比べて、資源～TPA 製造までの負荷が高いものの、原料植物が吸収した CO₂ を廃棄フェーズの焼却で相殺し、排出削減貢献量は 1.08kg-CO_{2e}/kg-PET となった。

本調査の対象範囲では、資源～TPA 製造までの寄与が高く、当該範囲の効率が排出量の主要パラメータとなる。また、各工程における排出の主要因は、エネルギーとして使用する蒸気ならびに電力であった(図 12- 5)。

PX から TPA を製造する工程では、図 12- 5 の 2 番目のグラフの通り、蒸気からの排出がマイナス値になっている。これは、酸化熱により蒸気が発生するため、一般的な同量の蒸気

製造による環境負荷を当該工程の排出量から減算しているためである。

表 12- 1. PET1kg あたり排出削減貢献量(kg-CO_{2e}/kg-PET)

	a. 評価対象製品	b. 比較製品
資源～PX 製造	2.29	0.94
TPA 製造	0.10	0.10
資源～EG 製造	0.37	0.50
重合	0.67	0.67
最終製品製造、流通及び使用	-	-
廃棄	0	2.29
合計	3.42	4.50
削減貢献量 (b-a)	1.08	

※ 廃棄段階にはバイオ由来炭素の相殺が含まれる。

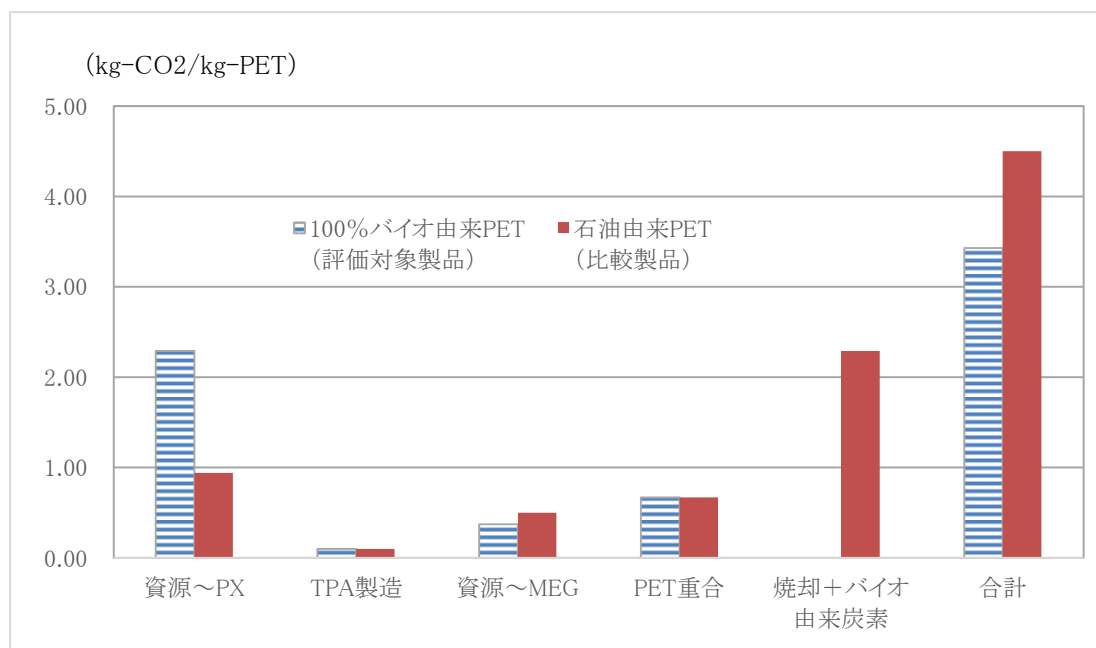


図 12- 4. 評価対象製品及び比較製品の工程別の GHG 排出量(kg-CO_{2e}/kg-PET)

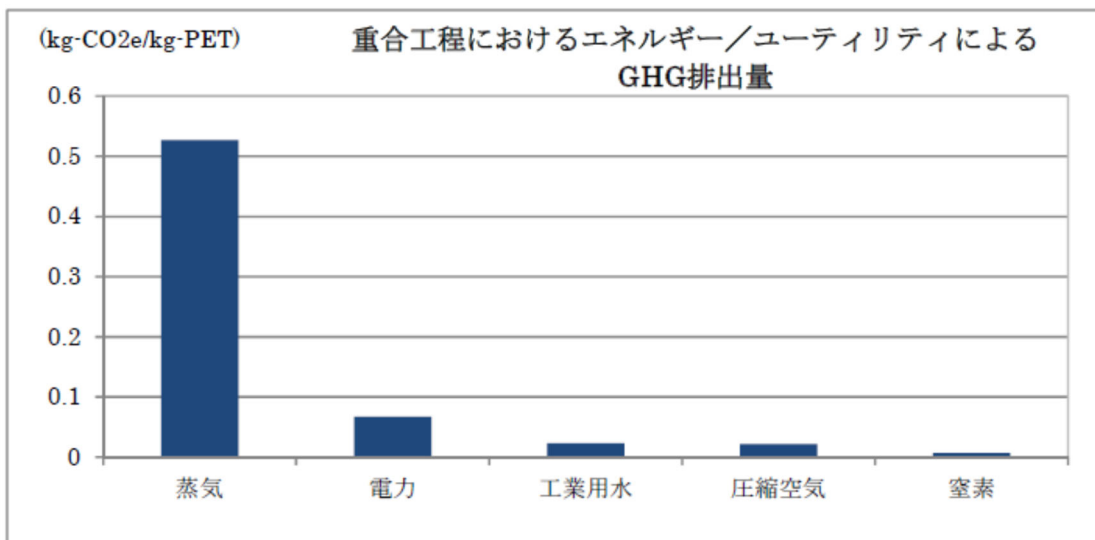
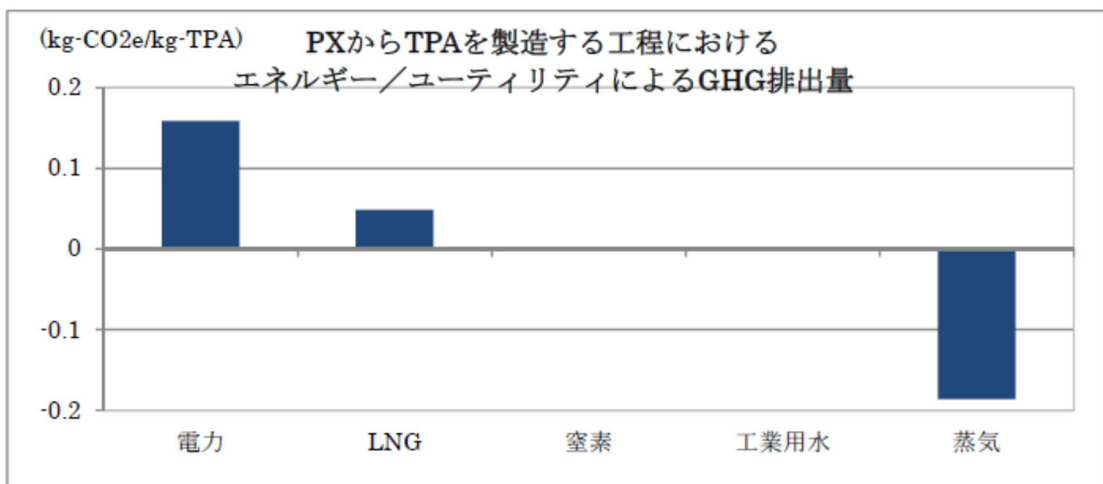
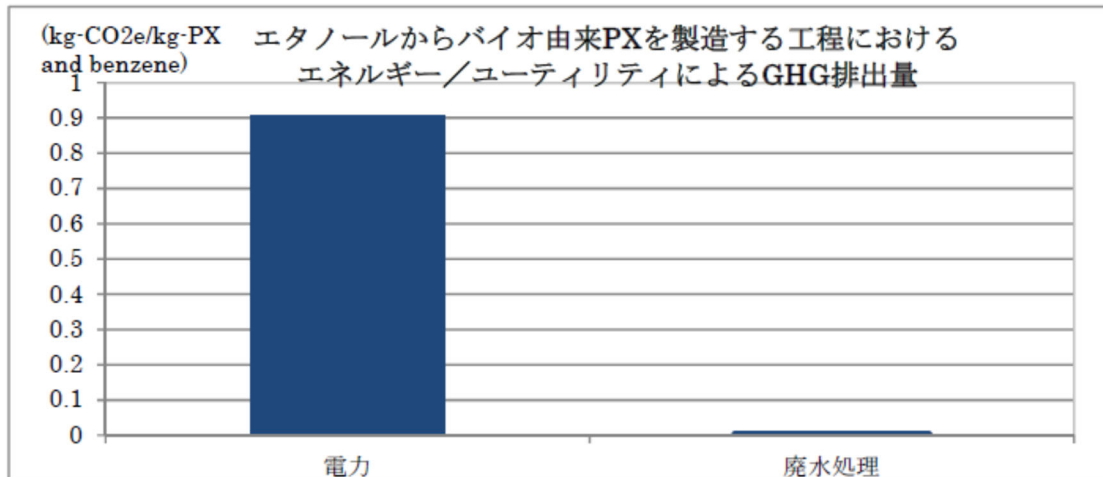


図 12-5. 各工程のエネルギー/ユーティリティによる GHG 排出量

6.2 シナリオ分析

6.2.1 評価対象製品の粗原料である PX は、トウモロコシ 80%とサトウキビ 20%の割合に基づくエタノールを原料とするシナリオを、ベースケースとして算定した。一方、本調査で入手したデータから最も排出量が少なくなる将来シナリオとして、エタノール原料をサトウキビ 100%とした場合の排出削減貢献量を、下記の通り算定した。

表 12- 2. 将来シナリオでの PET1kg あたり削減貢献量(kg-CO₂e/kg-PET)

	a. 将来シナリオ (100%サトウキビ原料エタノールからの PX の場合)	b. 比較製品
資源～PX 製造	0.75	0.94
TPA 製造	0.10	0.10
資源～EG 製造	0.37	0.50
重合	0.67	0.67
最終製品製造、流通及び使用	-	-
廃棄	0.00	2.29
合計	1.88	4.50
削減貢献量 (b-a)	2.62	

※1 廃棄段階にはバイオ由来炭素の相殺が含まれる。

※2 四捨五入の影響で合計値が一致しない箇所がある。

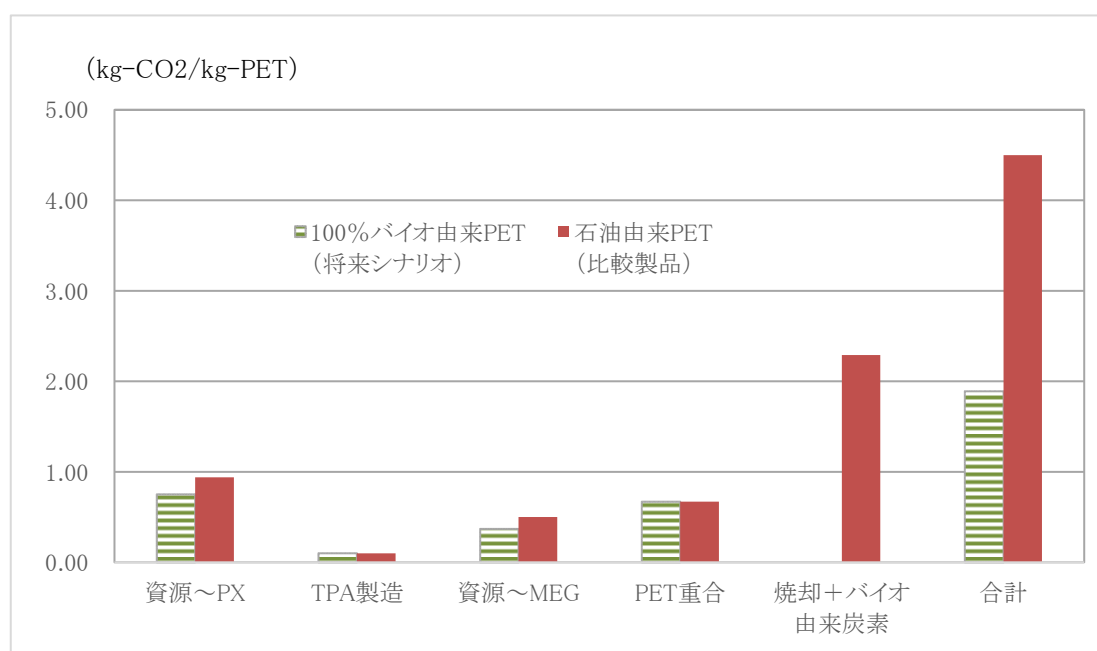


図 12- 6. 将来シナリオでの評価対象製品及び比較製品の工程別の GHG 排出量

6.2.2 当業界の今後の見通しは以下の通りである。2020 年の世界のポリエステル繊維の需要は、約 5,271 万トンと見込まれる。2030 年の需要については、約 7,800 万トンの見込みである(参考文献(1))。

2030 年におけるポリエステル繊維の需要の 1%、すなわち 78 万トンのポリエステル繊維を石油由来 PET から本調査(ベースケース)の 100% バイオ由来 PET に切り替えると想定した場合、フローベースの計算で 84 万トンの GHG 排出削減となる。

2030 年におけるポリエステル繊維の需要の 3%を切り替える場合、約 234 万トンの 100% バイオ由来 PET 繊維が使用され、フローベースの計算で排出削減量は約 253 万トンと試算できる。

6.3 簡易算定の方法論

本調査では、バリューチェーンの段階の内、最終製品の製造、流通、及び使用の各段階について、評価対象製品と比較製品で同一と想定し算定から省略した。本調査で簡易算定を用いた理由は、次の通りである。

- 1) ポリエステル繊維は多種多様な商品展開・用途展開が可能で商品・用途及び使用状況によりライフサイクル排出量が大きく異なるため。
- 2) 繊維製品の基礎となる PET 樹脂の環境負荷を算定することで多様な繊維製品に算定結果を応用できることが期待されるため。

これらの同一プロセスを省略することで生じる調査の限界は、[9. 調査の限界と将来に向けた提言]で後述する。当該排出量の省略により、本調査の結論そのものが変わることはない。

省略された排出量の程度として、下記のような推計が文献にある。これらの参考文献と本調査の結果に基づくと、紡糸、生地製造(製織、製編)、染色仕上げ加工、最終製品製造(縫製等)からの GHG 排出量の合計はポリエステル 1kg あたり約 13~14kg-CO_{2e}、使用(消費者による洗濯等)による排出量は約 10~30 kg-CO_{2e} と試算できる。

- CFP プログラム対象製品「トレーニングシャツ ジャムアップジャケット」の詳細情報(参考文献(7))によれば、ポリエステル 100%のジャケット 1 着(541g)の製造までのカーボンフットプリントは 10.0kg-CO_{2e}(原材料調達段階 8.1kg-CO_{2e}、製品生産段階 1.9kg-CO_{2e})と算定されている。これはジャケット 1kg あたりに換算すると 18.48kg-CO_{2e} の排出量となる。また、使用段階の排出量は、家庭洗濯 100 回(アイロン無)により 2.4kg-CO_{2e}/着、1kg あたりに換算すると 4.4kg-CO_{2e} と算定されている。
- 「繊維製品(衣料品)の LCA 調査報告書」(参考文献(8))では、ポリエステルのブラウス(製品重量 143g、内ポリエステル生地重量 121g、ポリエステル製副資材 22g)1 トンの製造における CO₂ 排出量は、5,507kg-C と算定されている。ポリエステル生地とそれ以外の部品とで環境負荷を重量配分できると想定して生地 1kg あたりに換算すると 17.1kg-

CO₂ の排出量となる。

- 使用段階における洗濯による排出量について、「クリーニングの CO₂ 排出量の算定」(参考文献(9))では、ワイシャツ 1 着(250g)を 1 回洗濯する際の GHG 排出量は、家庭洗濯(洗濯、アイロン掛け、機械乾燥)で 0.098~0.169kg-CO_{2eq}/枚、商業洗濯のランドリー(ドラム式洗濯機による温水洗浄及びプレス)で 0.296kg-CO_{2eq} と試算されている。

7. 貢献の度合い(重要性)

本調査の評価対象製品である 100%バイオ由来 PET は、ポリエステル繊維製品の主原料であり、最終製品の GHG 排出削減効果に基本的に(fundamentally)貢献している。

植物資源から製造する評価対象製品と、石油資源から製造する比較製品の物性、機能は同等である。従って、評価対象製品が原料に植物資源を利用することで、最終製品の品質を変化させることなく最終製品のライフサイクル全体の GHG 排出削減に貢献することができる。

評価対象製品は、原料となる植物が栽培時に CO₂ を吸収することにより、廃棄段階の CO₂ 排出量と同量の CO₂ 排出量を削減している。バイオ由来原料を活用した繊維製品は CO₂ 排出量削減に貢献しているが、CO₂ 排出削減貢献量は化学産業だけに帰属しておらず、バリューチェーン全体に帰属している。

貢献度合い		化学製品と最終製品の関係
○	基本的 (Fundamental)	その化学製品は、最終製品を用いて GHG 削減貢献を可能にする上で重要な要素である。
	必要不可欠 (Extensive)	その化学製品は重要な要素の一部であるとともに、最終製品を用いて GHG 削減貢献を可能にするためにその化学製品の特性・機能が必要不可欠である。
	実質的 (Substantial)	その化学製品は GHG 削減貢献に直接的な貢献をしていないが、最終製品による削減貢献量に影響なく容易に置き換えられるものではない。
	間接貢献 (Minor)	その化学製品は GHG 削減貢献に直接的な貢献をしていないが、基本的又は広範囲に貢献している製品の製造プロセスで用いられている。
	貢献対象外 (Too small to communicate)	その化学製品は、最終製品を用いた GHG 削減貢献量に変化を及ぼさずに置き換えが可能である。

8. 調査の限界と将来に向けた提言

本調査の結果は、繊維最終製品の材料である樹脂の環境負荷低減効果を示したものであり、本調査では評価対象外とした評価対象製品及び比較製品から製造する最終製品の特性(用途、品種、デザイン等)により、ライフサイクル全体の排出量は大きく変動する。最終製品の用途、品種、デザイン等によりライフサイクル全体の排出量が大きく変動する例として、次のような要因が

想定される。

- 紡糸～最終繊維製品の製造段階の範囲において、工程の熱源に使用する燃料の選択の他、使用する染料や加工剤の種類と使用量、機能性加工の有無、工程の収率（ロス率）が、ライフサイクル排出量に影響を与える。
- 最終繊維製品の使用段階において、製品寿命（繊維製品が使用される期間）と洗濯の有無、洗濯の回数、洗濯方法が、ライフサイクル排出量に影響を与える。

本調査は原料に石油を使用しないことによる効果の分析を趣旨としているため輸送の影響は含まれていない。サプライチェーンを確立し輸送を算入した場合、本調査とは異なる計算結果になる可能性がある。また、実際の製品処分方法が本調査のシナリオと異なる場合、削減貢献量や当業界の削減量が変わる可能性がある。今後、バイオ由来原料（TPA、EG）の製造方法に関する新規技術の開発、工程の改善、省エネ化や収率向上の実現により、本調査の結果とは異なる炭素排出が生じる可能性がある。そのような新規技術の開発、工程改善があった場合は、本評価の結果を適用することはできない。

土地利用変化による潜在的な影響について、追加的に、バイオ由来原料に使われるサトウキビ及びトウモロコシの栽培に利用する土地面積を試算した。バイオ由来原料と石油由来原料の比較において、GHG 排出と土地利用との間にトレードオフが生じ得るためである。

TPA 製造にかかる土地面積は、サトウキビ及びトウモロコシの単位面積あたり年間収量から計算できる。ブラジルにおける 1 ヘクタールあたりサトウキビの年間収量は 75 トンで、サトウキビ 1kg からのエタノールの収量は 0.072kg である(参考文献(3))。米国における 1 ヘクタールあたりトウモロコシの年間収量は 9.92 トンで、コーン 1kg からのエタノールの収量は 0.33kg である(参考文献(3))。EG については、インドにおける 1 ヘクタールあたりサトウキビ廃糖蜜の収量は 2.22 トンと想定した(参考文献(10))。インドにおけるサトウキビ栽培の情報を参考文献(2)から入手できなかったため、EG のためのサトウキビ生産の土地利用は、他の入手可能な参考文献に拠った(参考文献(10))。

上記の試算に基づき、1kg の PET のバイオ由来原料を製造するために、ベースケースでは 15.1 m²、将来シナリオでは 13.2 m² の農地が利用されることとなる。また、生物多様性や水消費といったその他の環境影響とのトレードオフは、本調査では必要な関連情報がなく評価していないが、バイオ由来原料の生産においては生じる可能性がある。そのような潜在的なトレードオフにより、評価対象製品は、比較対象よりも環境負荷が高くなる可能性がある。

9. 結論

評価対象製品は比較対象に比べて、GHG 排出削減貢献量は PET1kg あたり 1.08kg-CO_{2eq} となり、2030 年におけるポリエステル繊維の需要の 1%、すなわち 70 万トンのポリエステル繊維を石油由来 PET から本調査（ベースケース）の 100% バイオ由来 PET に切り替えると想定した場合、フローベースの計算で 76 万トンの GHG 排出削減となる。

2030 年におけるポリエステル繊維の需要の 3%を切り替える場合、210 万トンの 100% バイオ由来 PET 繊維が使用され、フローベースの計算で排出削減量は 227 万トンとなる。

この削減量には、原料となる植物による炭素の吸収が寄与している。特に、PET の炭素の 80%を構成する TPA、及び TPA の原料の PX 製造の排出量低減努力が、評価対象製品の排出削減に大きく影響する。

評価対象製品から製造する繊維は非常に多様な商品展開・用途展開があり、これら用途及び最終製品の使用方法によって、調査対象の範囲外の排出量、ひいてはライフサイクル全体の排出量が異なる。

10. 参考文献

- (1) Wood Mackenzie 、Fibres Global Supply Demand Report (2020)
- (2)Yagihashi et al. (2012) 「バイオマス由来ポリエチレンテフタートの LCA」第 7 回 日本 LCA 学会 研究発表会 講演要旨集 https://www.jstage.jst.go.jp/article/ilcaj/2011/0/2011_0_22/_pdf
- (3)U.S. Department of Energy Office of Science (2009, 2013). GREET (The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation)
<https://greet.es.anl.gov/>
- (4)Suding, P. (2013). Chemical Plant GHG Emissions. Interamerican Developmental Bank Technical Note No. IDB-TN-618 [https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6028/Chemical % 20Plants % 20GHG % 20Emissions % 3A % 20A % 20Guidance % 20Note % 20to % 20Reconciling % 20the % 20Financing % 20of % 20Chemical % 20Plants % 20with % 20Climate % 20Change%20Objectives%20.pdf?sequence=1](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6028/Chemical%20Plants%20GHG%20Emissions%203A%2020A%20Guidance%20Note%20to%20Reconciling%20the%20Financing%20of%20Chemical%20Plants%20with%20Climate%20Change%20Objectives%20.pdf?sequence=1)
- (5)U.S. Life Cycle Inventory Database. (2012). National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- (6)Plastics Europe (2013) Benzene, Toluene, and Xylene (Automatics, BTX) Eco- profile
[http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml- data/external_docs/PlasticsEurope % 20Eco-profile%20BTX%202013-02.pdf](http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml- data/external_docs/PlasticsEurope%20Eco-profile%20BTX%202013-02.pdf)
- (7)ASICS, 学校体育衣料「トレーニングシャツ」 ジャムアップジャケット, 一般社団法人産業環境管理協会 カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム, 検証番号:CR-AO04-13001,
https://www.cfp-japan.jp/common/pdf_permission/000841/CR-AO04-13001.pdf
- (8)経済産業省製造産業局 繊維課(2009)「繊維製品(衣料品)のLCA調査報告書」
<http://www.meti.go.jp/policy/fiber/downloadfiles/LCA-hontai.pdf>
- (9)Yamaguchi et al. (2010). 「クリーニングの CO2 排出量の算定」日本 LCA 学会誌, vol.6 no.3, 209-216
https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/6/3/6_209/_pdf
- (10)Statistics by Indian Sugar Mills Association (ISMA)
<http://www.indiansugar.com/Statics.aspx>

※著作権の帰属について

本著作物の著作権は著作者に帰属し、著作物の一部または全部を無断で複写・複製・転載することを禁じる。なお本著作物の著作者は一般社団法人日本化学工業協会とする。