

プラスチック廃棄物管理オプションの環境および経済的ライフサイクル分析 レビュー

引用: AIP Conference Proceedings 1779, 140001 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.4965581>
オンライン公開:2016年10月31日

C. A. Bernardo, Carla L. Simoes, Ligia M. Costa Pinto



View Online



Open Access

興味を持つ可能性のある記事

使用済みプラスチックパッケージのリサイクル効率

AIP Conference Proceedings 1914, 170002 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.5016785>

ライフサイクル・コスト・アプローチを用いたエネルギー・システムへの廃棄物のコスト管理:中国からのケーススタディ

Journal of Renewable and Sustainable Energy 8, 025901(2016); <https://doi.org/10.1063/1.4943092>

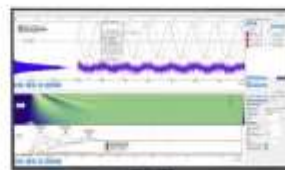
二軸押出機における鋳物廃ポリアミドのリサイクル

AIP Conference Proceedings 1779, 140002 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.4965582>



Challenge us.

What are your needs for periodic signal detection?



Zurich Instruments

プラスチック廃棄物管理オプションの環境および経済的ライフサイクル分析 レビュー

C. A. Bernardo^{1,2, a)}、Carla L. Simioes^{1,2, b)}、Lygia M. Costa Pinto^{3, c)}

IPC, Institute for Polymers and Composites/13N, Minho University, Campus de Azurem, 4800-058 Guimaran
2PIEP, Innovation in Polymer Engineering, Minho University, Campus de Azurem, 4800-058 Guimaranes, ¥

3 NIMA, Department of Economics, Minho University, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, ¥

対応著者: cbernardo@dep.uminho.pt, b) carla.simioes@piep.pt, c) lgiaciapinto.ee
g@gmail.com

抄録。近年、世界的なプラスチック消費量の増加により、プラスチック廃棄物の発生量が増加し、管理の重要性が認識されるようになった。この枠組みにおいて、本研究は、代替プラスチック廃棄物管理システムの環境および経済的影響を評価するために、ライフサイクルアセスメント(LCA)および経済的評価方法論をどのように使用できるかを記述する。プラスチック廃棄物管理システムのLCAIに関する文献は膨大であり、報告された結果は概して一貫しており、リサイクルが地球温暖化係数(GWP)および総合エネルギー利用(TEU)の影響に対して最も低い環境影響を有することを示している。他方、プラスチック廃棄物の経済的評価、すなわち種々の使用済み(EoL)処理を扱った文献はかなり限られている。プラスチック製品のLCAとライフサイクルコスト(LCC)の統合など、他の方法論はほとんど取り上げられていない。いずれにせよ、包括的な結論は、プラスチック材料は、通常、EoLステージを考慮するか否かを問わず、ライフサイクルを通して、従来の材料よりも環境的および経済的利点を有するという点である。

はじめに

過去60年間に、世界のプラスチックの生産と消費は年平均約8%の割合で増加し、2013年には常に最大の2億9,900万トン(1)に達した。歴史的データを単純に外挿することにより、2020年までに生産量が4億2,000万トンを超えると予測できる。この急激な増加は、プラスチック廃棄物の増加につながっている。その結果、過去数年間に、LCA(ライフサイクルアセスメント)(2)および経済分析研究(3、4、5、6)を実施し、種々のプラスチック廃棄物管理オプションの環境および経済的影響を評価した。ライフサイクル・シンキングは、WFD(Waste Framework Directive 2008/98/EC(7))で強調されているように、これらのオプションに対処するための強力なアプローチである。ライフサイクルの観点から考えると、サプライチェーンの上下を見つめるためには、ポリマー開発者、環境管理者、製品設計者が必要である(8)。WFDはまた、[1]予防、[2]再利用の準備、[3]リサイクル(機械的または原料のリサイクル)、[4]他の回収、例えばエネルギー回収、[5]廃棄、という最良の環境成果を達成するために、廃棄物の予防と管理政策に適用されるべき階層も確立している。既存の使用済み処理については、プラスチック廃棄物を再処理し、新製品を作ることに対応するメカニカルリサイクルを行っている。原料リサイクルとは、使用済みプラスチックをより小さな分子に変換し、新しい石油化学製品やポリマーの原料として使用することである。サーマルリサイクルとも呼ばれるエネルギー回収は、プラスチック廃棄物を燃焼させて、熱、蒸気、電気などのエネルギーを発生させるものである。プラスチックは、他の材料に比べて発熱量が高く(主に原油を原料としたもの)、エネルギー源としても便利である。WFDは、EoL処理の階層で最終埋立地をランク付けする。しかし、2012年には、埋立地は依然として欧州連合および世界(1)のプラスチック廃棄物の中で最も大きな割合を占めており、

埋立からの転用を検討する際には、この目的を達成するために必要な補完的処理であるため、リサイクルとエネルギー回収の両方を考慮すべきである。

本研究は、ライフサイクルシンキング、LCA、および経済的評価方法論が、代替プラスチック廃棄物管理システムの環境および経済的影響を評価するためにどのように利用できるかに焦点を当てる。これは、現在の出版物をレビューし、方法論と結果の違いを議論することによって行われる。オゾン層破壊係数、光化学的酸化、富栄養化ポテンシャルなど、様々な環境影響カテゴリーに取り組む、これらのシステムのLCAに関する膨大な文献があると結論付けられた。しかし、地球温暖化ポテンシャル(GWP)とTEU(Total Energy Use)(5.9,10)は、温室効果ガス効果の世界的な認識のために優勢である。他方、プラスチック廃棄物分画のみ、すなわちEoL処理を扱った経済文献は乏しく、経済分析を行うために異なる方法論が用いられている(3,6)。レビューされた研究の中には、財務コストに限られているものもあれば、外部性(外部コスト)を取り入れているものもあるが、いずれも熱可塑性ポリマーのみに焦点を当てている。従って、適切な経済的評価方法を、対応する標準的方法と共に実施し、それをあらゆる種類のプラスチック廃棄物に適用するよう努力すべきである。

方法論

最近発表されたプラスチック廃棄物管理システムのLCAと経済的評価研究をレビューした。これらのすべてが完全なLCA研究ではなく、一部は本質的にエネルギーとCO₂排出量の分析であった。ほぼすべての研究が分析結果を報告しているため、GWPとTEUを環境影響カテゴリーとして選定した。

プラスチック廃棄物の代替EoL処理のLCAと経済的評価

過去15~20年の間に、多くの研究が、ライフサイクルの観点からプラスチック廃棄物管理を分析してきた。表1は、これらの研究で記述されたプラスチック材料と廃棄物方法をまとめたものである。

表1. プラスチック廃棄物のリサイクル(R)、焼却(I)、埋立(L)を比較したLCA研究

参考	材料・用途	GWP	TEU
Arenaら 2003 (11)	PE・PET液容器 ^a	R<L<I	R<I<L
Beigl and Salhofer 2004 (12)	プラスチック包装 ^a	R<I	-
チルトンら 2010 (13)	ペトア	R<I	-
Craighill and Powell 1996(14)	PET、HDPE、PVC ^a	R<L	-
Dodbibaら 2008 (15)	プラスチック(ポリエチレン、ポリエステル、ポリ塩化ビニル) ^a	R<I	-
Eriksson and Finnveden 2009(4)	リサイクル不可能なプラスチック	I<L	-
Erikssonら 2005 (9)	PE ^a	R<I<L<	R<I<L<R
	PE、PP、PS、PET ^a	R<I<L	<I<L<L<
Finnvedenら 2005 (5)	PVC ^a	R≈I<L R	R<I<L
	PE、PP、PS、PET、PVC ^b	I<L<R	I<R<L
Foolmaun and Ramjeeawon 2013(10)	PET	R<L<I	R<I<L
Grantら 2001 (16)	PET、HDPE、PVC ^a	R<L	R<L
Mobergら 2005 (17)	PET プラスチック ^a	R<I<L	R<I<L
Molgaard 1995 (18)	プラスチック ^b	-	R<I<L I<L<R<R
Periginiら 2004 (19)	PE・PET液容器 ^a	R<L<I	<I<L
Periginiら 2005 (20)	PE・PET液容器 ^a	R<L<I	R<I<L
Rajendranら 2013 (21)	プラスチック ^a	R<I	-
米国EPA2006(22)	HDPE、LDPE、PET ^a	R<L<I	R<I<L
Wenischら 2004 (23)	プラスチック ^a	R≈I	-
Wollnyら 2001 (2)	プラスチック包装 ^b	R<L<I	R<I<L
M. Al-Maaded et al 2012(25)	プラスチック(特定されていないもの)	R<L	-
Shonfield 2008 (26)	プラスチック	R<L<I I<L<R	R<I<L

(a)回避されたバージン材料;(b)バージンポリマー以外の回避された材料、例えば木材由来物又は燃料

表1に報告された結果は一貫しており、すべてではないが、ほとんどの場合、リサイクルがGWPとTEUの両方に与える環境負荷が最も低いことが示されている。少数の相反する結果は、リサイクル材料の種類、リサイクルによって回避される材料の種類、焼却によるエネルギー回収によって回避されるエネルギー源、および特定の埋立地の時間枠などの主要な要因によって説明できる。木材由来の材料をプラスチック材に代替するためにバージンプラスチックの代わりに再生プラスチックを使用するよりも焼却する方が好ましい(5,18,26)。選定効率、採用された技術、回避された製品などの方法論的な仮定は、廃棄物管理システムLCA(27)の全体的な結果を劇的に変えるかもしれない。GWP、TEUともに、プラスチック廃棄物の焼却・埋立に比べ、リサイクル率が低いのが一般的である。従って、再生プラスチックの回避された負荷は、リサイクルを動機づけるのに十分なほど大きい。使用される異なるエネルギー源および発電のための異なる効率もまた、焼却および他のプラスチック廃棄物処理の間の選択に影響し得る(4、28、29)。もう1つ考慮しなければならない要因は、埋立モデルで使用された時間枠である。いくつかの研究では、他の環境影響カテゴリーを評価し、EoL階層でランク付けする。酸性化の可能性、富栄養化の可能性、非生物資源の枯渇は、より頻繁に計算される影響カテゴリーである。全体的には、結果は一貫しており、再資源化が最も環境負荷の少ないカテゴリーであることを示している。スペースの欠如のために、これらの研究は本明細書では言及しない。

廃棄物管理ソリューションの選択を支持する決定に関する文献は膨大であり、経済的側面がその選択の重要な要素であることは明らかである。当初、財務コストの分析に限られていたが、過去20年間の重要なイノベーションは、評価(30、31)に環境コスト(外部性)を組み込むことであった。経済的評価を実施する際には、プラスチック廃棄物管理に伴う費用と収入の両方を考慮する必要がある(32)。一般的には、受け入れた廃棄物の処理のために、廃棄物管理施設の運営者がゲート料金を請求する。ゲート・フィーは、すべての資本コストと運営コストを回収できるレベルに設定されているが、しばしば利益要素も含まれている。リサイクルの場合には、リサイクル材を受け取るための代金が支払われることがあり、マイナスゲート料金とみなすことができる。実際、エネルギー回収を伴うリサイクルや焼却では、原材料やエネルギーの販売から大きな収入を得ることができます(33)。経済文献にはMSW専用の刊行物が多数あるが、プラスチック廃棄物分画のみを扱った出版物は極めて少ない。実際、著者らの知る限りでは、この問題に関する研究はわずか3件しか発表されておらず、その廃棄物と経済的評価方法は表2にまとめられている。

表2. プラスチック廃棄物の代替EoL処理の経済的評価

参考	廃棄物方法	材料	経済分析法
Axion Consulting 2009 (3)	材料回収設備 プラスチック選別設備 再処理設備	混合プラスチック	LCC(外部性を除く)
Erikssonら 2005 (9)	リサイクル 焼却 リサイクル	プラスチック容器	LCC(含む) 外部性)経済分析
Leaら1996 (6)	埋立廃棄物 -エネルギー	破碎廃プラ	(外部性を除く)

これらの研究のうち、2つの(3、9)は、Cirothらによって定義された枠組みにおけるライフサイクルコスト(LCC)研究とみなすことができる。およびSwarrら(34、35)だが、外部性(9)を取り入れているのは1つだけである。最初の研究は、材料回収施設(MRF)と混合プラスチック廃棄物リサイクルのためのプラスチック選別・再処理施設(3)の金融モデル(プライベートコスト)を扱った。金融モデルは、MRFへの投資と、それが提供する混合プラスチックのための統合プラスチック選別・再処理工場への投資から満足のいくリターンを得ることができることを示している。第2の研究は、プラスチック容器の使用済みとの関連におけるLCAと経済的結果の統合を扱った(9)。本研究は、プラスチック容器のマテリアルリサイクルが、経済厚生観点から、焼却に匹敵することを示した(財務コストと環境コストの合計)。一方、同じ用途でプラスチックのリサイクルがバージンプラスチックに置き換わると、エネルギー使用量が少なくなり、環境負荷も小さくなる。第3版では、リサイクルおよび廃棄物エネルギー(WTE)プロセス(6)を用いて、プラスチック廃棄物の分別から得られるエネルギーコストの節減を調査した。省エネルギー効果は、次のように結論づけられている。

特に分別コストを考慮すると、プラスチック廃棄物のリサイクルは無視できます。プラスチックのリサイクルは、使用済みプラスチック製品の埋め立てに比べてエネルギーを節約すると考えられるが、これは、プロセスのエネルギー節約ではなく、固有のエネルギー含有量によるものである。従って、プラスチック廃棄物からのエネルギーコストの節減は、WTE変換によってのみ達成することができ、しかしながら、他の望ましくない結果を有する可能性がある。

結論

プラスチックは、あらゆる先進社会に広く存在する材料である。それらの利点のために、それらはこれらの社会の生活水準の改善に決定的に貢献した。しかし、すべての良いものには暗い側面がある。プラスチックの場合、この暗い側はEoLである。このように、プラスチック廃棄物の最適管理方法を決定することが極めて重要である。LCAや経済分析などのツールは、その決定を支援するために効果的に使用することができる。プラスチック廃棄物管理のLCAに関する既存の文献は膨大であり、報告された結果は概して一貫しており、リサイクルが最も低いGWPとTEU環境影響を生み出すことを示している。少数の相反する結果は、リサイクル材料の種類、リサイクルによって回避される材料の種類、焼却からのエネルギー回収によって回避されるエネルギー消費、および特定の埋め立て期間などの特定の要因によって説明され得る。いくつかの研究では、酸性化ポテンシャル、富栄養化ポテンシャル、非生物資源の枯渇など、他の環境影響カテゴリーの結果も報告されており、同様の結論に達している。一方、MSWプラスチック画分のみを扱った経済文献は少ない。さらに、経済分析の実施にはいくつかの方法論が用いられ、一部は金融コストに限られており、いくつかの研究は外部性(外部コスト)も含んでいた。このため、プラスチック廃棄物管理システムでは、LCA手法が確立されていると思われるが、経済性評価手法やそれに対応する標準手法の導入にはまだ努力が必要である。それにもかかわらず、本研究は、既存の評価ツールが、廃棄物枠組み指令で義務付けられているように、プラスチック廃棄物の予防と管理の階層を確立するのに効果的に役立つかもしれないという結論を可能にする。

謝辞

Carla L. Simioyesは、Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT)による個人研究助成(SFRH/B D/60852/2009) 著者らは、戦略的プロジェクト-LA 25-2013-2014(PEst-C/CTM/LA0025/2013)を通じたFCTの高分子・複合材料研究所(IPC)への財政的支援を認めている。

参考文献

1. プラスチックヨーロッパ(2015)プラスチック-Facts 2014/15:ヨーロッパの最新のプラスチック生産、需要および廃棄物データの分析。EuPC、ベルギー、ブリュッセル
2. ギネ、J.B.(2002)ライフサイクルアセスメントハンドブック:ISO規格の運用ガイド Kluwer Academic Publishers, Dordrecht(オランダ)
3. Axion Consulting (2009) 英国における混合プラスチックのリサイクルに関する財務評価。英国廃棄物資源行動計画(WRAP)
4. Eriksson, O., Finnveden, G.(2009) 燃料としてのプラスチック廃棄物-CO2中性か否か? エネルギー・環境科学、2, 907-914
5. Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, Å. (2005)固形廃棄物からのエネルギーのライフサイクルアセスメントパート1:一般的な方法論と結果。Journal of Cleaner Production, 13, 213-229.
6. Lea, W.R. (1996) プラスチックの焼却とリサイクルの比較: エネルギーと埋立地コストの削減の比較。J. Journal of Hazardous Materials, 47, 295-302.
7. 欧州議会および理事会(2008)指令2008/98/ECおよび理事会(改正廃棄物枠組み指令)、欧州連合官報L 312/3-30
8. EC共同研究センター(2013)欧州ライフサイクル思考・評価 <http://lct.jrc.ec.europa.eu/>、20/12/13にアクセス。
9. Eriksson, O., Carlsson Reich, M., Frostell, B., Bjorklund, A., Asefa, G., Sundqvist, J.-O., Grana Journal of Cleaner Production, 13, 241-252.

10. Foolmaun, R.K., Ramjeeawon, T. (2013) モーリシャスにおける使用済みペットボトルのライフサイクルアセスメントと社会的ライフサイクルアセスメントの比較 The International Journal of Life Cycle Assessment, 18, 155-171.
11. Arena, U., Mastellone, M.L., Perugini, F. (2003) プラスチック包装リサイクルシステムのライフサイクルアセスメント。 The International Journal of Life Cycle Assessment, 8, 92-98.
12. Beigl, P., Salhofer, S. (2004) 共同廃棄物管理システムの生態学的効果とコストの比較。省資源・省資源・リサイクル、41、83-102。
13. Chilton, T., Burnley, S., Nesaratnam, S. (2010) Closed-loop recycle and thermal 資源、保存およびリサイクル、54、1241-1249。
14. Craighill, A., Powell, J.C. (1996) Life Cycle Assessmentおよびリサイクルの経済的評価 省資源・省資源・リサイクル、17、75-96
15. Dodbiba, G., Takahashi, K., Sadaki, J., Fujita, T. (2008) 廃テレビからのプラスチック廃棄物のリサイクル: ライフサイクルアセスメント Journal of Cleaner Production, 16, 458-470.
- 16 Grant, T., James, K.L., Lundie, S., Sonneveld, K.(2001) Report for Life C オーストラリアのビクトリア州エコリサイクル
17. Moberg, Å, Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P. (2005) 固形廃棄物からのエネルギーのライフサイクルアセスメント-パート2 Journal of Cleaner Production, 13, 231-240.
18. Molgaard, C. (1995) 一般廃棄物からのプラスチック処理による環境影響 省資源・省資源・リサイクル、15、51-63
19. Perugini, F., Mastellone, M.L., Arena, U.(2004) PEおよびPETの機械的リサイクルの環境的側面: ライフサイクルアセスメント研究。ゴム・プラスチック・リサイクル技術の進歩、20、69-84
20. Perugini, F., Mastellone, M.L., Arena, U.(2005) プラスチック包装廃棄物管理のための機械的および原料リサイクルオプションのライフサイクルアセスメント。環境の進展、24、137-154。
21. Rajendran, S., Hodzic, A., Scelsi, L., Hayes, S., Soutis, C., Al-Maadeed, M.A. プラスチック、ゴム及び複合材料、42、1-10
22. 環境保護庁(2006)固形廃棄物管理と温室効果ガス:米国の排出と吸収のライフサイクル評価(第3版)。
23. Wenisch, S., Rousseaux, P., Metivier-Pignon, H. (2004) 廃棄物-エネルギーおよびリサイクルに関する技術的および環境的パラメータの分析:家庭廃棄物。 International Journal of Thermal Sciences, 43, 519-529.
24. Wolny, V., Dehoust, G., Fritsche, U., Weinem, P. (2001) プラスチック包装廃棄物管理オプションの比較: Journal of Industrial Ecology, 5, 49-63.
25. Al-Maaded, M., Madi, N. K., Ramazan Kahraman, Hodzic, A., Ozerkan, N. G. Environ (2012)
26. Shonfield, P. (2008) 混合廃プラスチックの管理オプションのLCA。英国廃棄物資源行動計画(WRAP)
27. Rigamonti, L., Grosso, M., Giugliano, M. (2009) Life cycle assessment for separat 廃棄物管理、29、934-944
28. Astrup, T., Fruergaard, T., Christensen, T.H.(2009) Recycling of Plastic: 温 廃棄物管理・調査、27、763-772
29. Turconi,R.,Butera,S.,Boldrin,A.,Grosso,M.,Rigamonti,L.,Astrup,T.(2011)デンマークとイタリアにおける廃棄物焼却のライフサイクル評価 廃棄物管理・研究、29、S78-S90
30. Eshet, T., Ayalon, O., Shechter, M. (2006) 選択された廃棄物管理の外部性の評価: 比較検討と分析。省資源・省エネルギー・リサイクル、46、335-36
31. Rabl, A., Spadaro, J.V., Zoughaib, A.(2008) 固形廃棄物の環境影響とコスト:埋立と焼却の比較。廃棄物管理・調査、26、147-162。
32. Da Cruz, N.F., Simioes, P., Marques, R.C.(2012) 包装廃棄物のリサイクルにおける経済コスト回収:ポルトガルの場合。 Journal of Cleaner Production, 37, 8-18
33. Simyoes, L.C., Costa Pinto, L.M., Bernardo, C.A.(2014) Life Cycle Thinking Approachを用いたHDPE製品 廃棄物管理・調査、32(5)、414-422。
34. Ciroth, A., Huppel, G., Klopfer, W., Rudenauer, I., Steen, B., Swarr, CRC Press, Publishing House Taylor and Francis, SETAC Press, Pensacola, FL.
35. Swarr, T., Hunkeler, D., Klopfer, W., Pesonen, H.L., Ciroth, A., Brent, A., Pagan, R.¥