

〈特集〉

LCA に基づいたシステム設計

平尾 雅彦

東京大学 化学システム工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 E-mail: hirao@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp)

概要

ライフサイクルアセスメント (LCA) は、製品やサービスの環境影響を評価するための手法として提案され、多くの製品の LCA 評価結果が報告されている。製品のライフサイクルシステムには製造プロセスや廃棄後の処理プロセスを含むので、製造技術やリサイクルシステムの評価にも利用されてきている。リサイクルは環境負荷を削減するために実施されるシステムであり、その環境影響を評価し、システム設計に活かすことが求められている。本稿では PET ボトルのリサイクルシステムの設計を例として、LCA に基づいたプロセス技術を選択し、環境影響を考慮したシステムを設計する手法を示す。また、システム設計における LCA の利用手順を明確にするためのアクティビティモデルを示す。

キーワード：ライフサイクルアセスメント, システム設計, リサイクルシステム, アクティビティモデル, 静脈系
 原稿受付 2008.12.1 EICA: 13(4) 33-36

1. 緒言

システムの設計においては、Fig. 1 に示す手順に従い、様々な要素技術を組み合わせながら代替案を生成し、モデル化と評価を行いながら目的の機能を満たす最適なシステムを構築する。例えば、化学工学では、化学プロセスのモデル化やシミュレーション、最適化において様々な手法を提供し、化学産業システムを構築してきた。しかしながら、どのような代替案を提示できるか、何を目的関数とするかは、エンジニアや組織の持つ知識やシステムの目的によって決まってくる。

最適化すべき目的関数としては、これまでは経済性のみが重視され、環境問題への対応は規制値の遵守などシステム周辺の制約条件を満たす手法もとられてきたが、地球持続性が重要な課題となり、環境影響を低減すべき目的関数として取り扱う研究事例も多い。しかしながら、Fig. 2 に示すように地球環境問題は多岐にわたり、相互に強く関連している。また、問題を解決する技術も多数開発されている。これら

の関係は多対多であり、相互に複雑な関連をもっているため、技術の適切な選択は重要でありながら困難な課題になってきている。例えば、燃料として石油と石炭からの選択を考えた場合、地球温暖化では石油の方が優れるが、資源枯渇性では石炭の方が優れる。しかし、再生可能資源への転換が図れれば、同時に解決される可能性がある。

このように、原料、製造、リサイクル、廃棄といったシステム要素において環境に着目した新たな技術を代替案として取り上げ、かつ、それを含むシステムを構築し、多様な地球環境への影響を評価することがシステム設計に欠かせなくなっている¹⁾。

ここでは、システム設計においてライフサイクル全体をシステム範囲として捉え、環境影響を考慮しながらシステム構築をするための枠組みを議論する。

2. システム評価としての LCA

2.1 評価システム範囲の拡張

プロセスの環境影響は、対象とするプロセスでの資

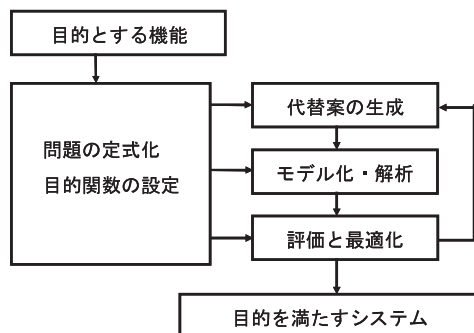


Fig. 1 Flowchart of system design

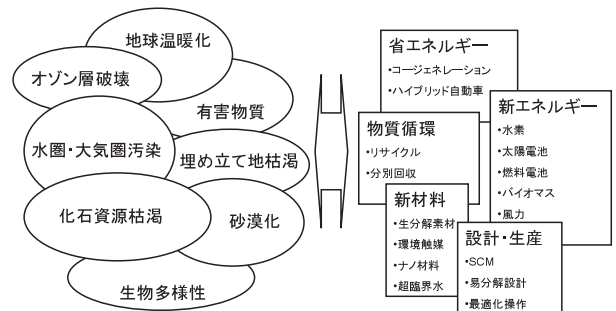


Fig. 2 Complex relation between environmental issues and technologies

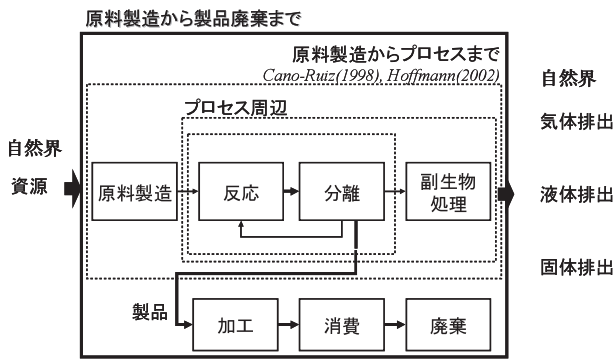


Fig. 3 Various system boundaries for system evaluation

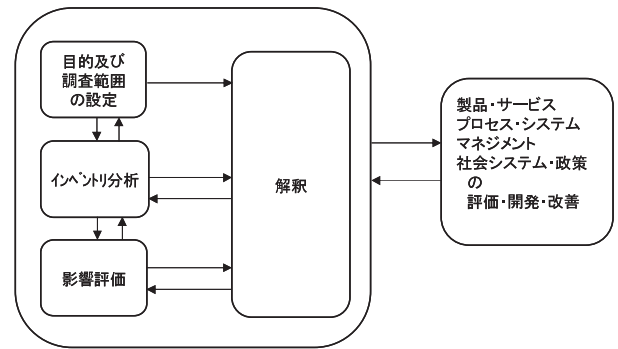


Fig. 4 Procedure to perform LCA

	Process Chemistry I	Process Chemistry II	Conceptual Design I	Conceptual Design II
経済性	原料費	原料費	製造コスト	割引現在価値
プロセス内 "gate-to-gate" コスト/環境影響	Mass Loss Indices	Energy Loss Index		
ライフサイクル 環境影響	原料側累積エネルギー	原料側累積エネルギー	原料側及プロセス 累積エネルギー	(updated)
EHS ハザード	物質 EHS	プロセス EHS	(updated)	(updated)
技術的側面	例: 特許; 禁止物質; 原料供給	例: 触媒性能	例: プロセスの複雑さ	例: 装置の問題

Fig. 5 Process design framework using environmental, health and safety evaluation³⁾

源消費や排出物によるものは当然に考慮しなければならないが、それはプロセス周辺に限られるものではない。Fig. 3 に示すように原料の製造や副生物の処理も含まれるべきであるし、さらにプロセスで製造された製品の廃棄までの製品ライフサイクルも評価の対象にすべきである。汎用樹脂などでは製品ライフサイクルすべてを考慮するのは困難であるが、現状のリサイクル技術との適合性を考慮することは可能であろう。

1.2 多様な評価指標

ライフサイクルからの環境影響を評価する枠組みであるライフサイクルアセスメント (LCA) の手順は、JIS14040 シリーズ²⁾で Fig. 4 のように示されているが、具体的な評価項目が規定されている訳ではなく、実施者が目的の設定段階において、適切な評価項目を検討することになっている。例えば、資源消費削減を目的とするならば石油や石炭の消費量を評価するであろうし、地球温暖化への影響を削減するならば温暖化ガスの排出量を評価するであろう。しかし、これら以外にも Fig. 2 に示したように、オゾン層破壊物質の排出量、酸性物質の排出量、埋め立て廃

棄物量、生物多様性など様々な評価指標が考えられる。LCA では、これらを統合的な指標にすることも可能である。さらに、プロセスの評価においてはプロセス周辺での作業リスクや近隣までを含めた安全性の評価も欠かすことができない。

経済性を含め、異なる多数の指標を同時に考慮することは容易ではないが、多目的意思決定問題として研究が進められている。例えば、Fig. 5 は、

プロセス設計の初期段階をプロセス化学とプロセス概念設計の4ステップに分解し、各々のステップにおいてどのような指標を用いるべきかを整理したものである³⁾。初期段階では様々な代替技術が検討対象となるが、プロセスに関わる情報は具体化されていないので、指標を評価する手法も定性的なものとなり、プロセス設計が進むにつれて定量的な指標を用いることになる。

3. プラスチックリサイクルシステムの設計

3.1 PET ボトルケミカルリサイクルシステム⁴⁾

ここでは、LCA を用いたリサイクルシステムの設計例として、使用済み PET ボトルのリサイクルシステムを取り上げる。現実の PET ボトルのリサイクルについては、国や自治体の制度設計や国内外の経済環境など環境影響以外の様々な問題があるが、ここでは、LCA を設計に役立てる例として、国内で技術開発されたケミカルリサイクルを社会に取り入れるケースを考える。

日本国内の PET ボトルは、2007 年において約 60 万トンの需要があり、その 70% 近くが使用後に何ら

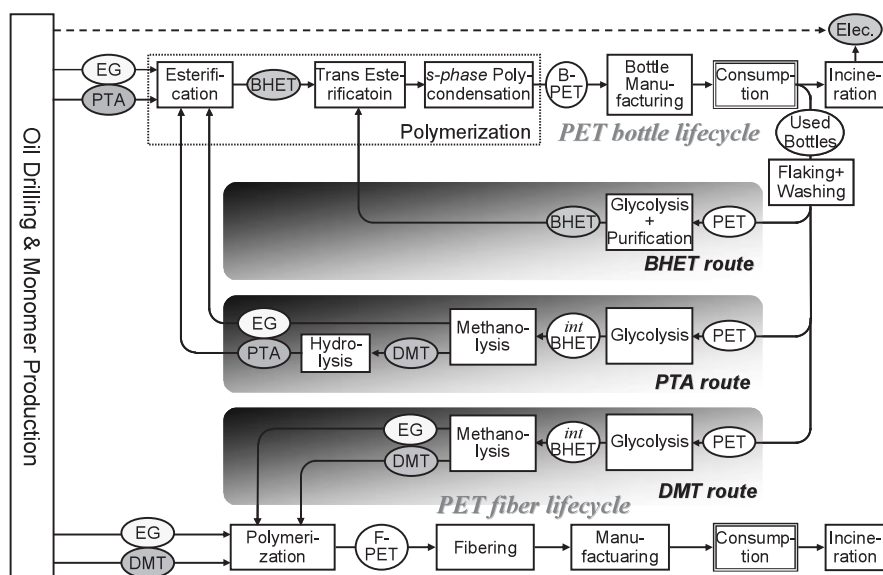


Fig. 6 Life cycle system of PET bottle chemical recycling systems⁴⁾

かのルートで回収，リサイクルされている。多くはマテリアルリサイクルと呼ばれる手法で，繊維やシート製品として再利用されているが，ケミカルリサイクルと呼ばれる化学的に分解，再重合する技術によって飲料ボトルや高品質繊維に再利用することができる。化学分解にもいくつかの技術があり，ここでは分解で生成する分子名称によって DMT ルート，PTA ルート，BHET ルートという 3 つの技術を取り上げる。DMT ルートでは，再重合によって高品質のポリエステル繊維製品となり，PTA と BHET ルートでは，ボトル用樹脂が製造される。

この技術をリサイクルシステムとしたのが Fig. 6 である。ケミカルリサイクルプロセスは化学プロセスであるが，前述の通り，使用済み PET ボトルから製造される製品が異なるため，PET 樹脂全体のリサイクルシステムにも影響を及ぼす。すなわち，リサイクル技術の選択がライフサイクルシステムを選択することにもなるため，LCA による環境影響評価が求められる。

3.2 プロセスシミュレーションによるインベントリデータ

このようなシステムを現状評価として実施する場合は，プロセスに関わるインベントリデータを現実のプロセスについて調査すればよいが，新規システム設計という観点からは，これから実現しようとする技術であるため，インベントリデータをどのように得るかが問題となる。類似するプロセスがあればそのデータを援用する場合もあるし，技術開発の時点で得られているデータを利用する場合もあるだろう。化学プロセスでは，Fig. 3 のプロセス周辺という領域に含まれる分離工程で消費されるエネルギーが大きく，プロセスとして設計されて初めて推定できる。

3.3 インベントリ分析結果

詳細は省くが，上記のようなインベントリデータを用い，インベントリ分析を実施した結果を Fig. 7 に示す。システム間比較を目的とした LCA では，基準システムからの変化として結果を示すことが多い。ここでは，使用済み PET ボトルを全量焼却発電するシステムを基準として比較している。この図では，基準システムに比べて二酸化炭素排出が増加するプロセスが正の側に示され，負の側に減少するプロセスが示される。リサイクルプロセスの追加は，二酸化炭素排出を増加させるが，その結果として，石油からの新規 PET 樹脂製造と使用済みボトルの焼却が削減され二酸化炭素排出を削減する。この正負のバランスがシステムの適否を決めていることがわかる。この結果から，いずれのケミカルリサイクルプロセス技術を採用しても焼却発電するよりは二酸化炭素排出を削減できると期待され，中でも BHET ルートでボトルにリサイクルするシステムが最も効果が大きいと推定される。

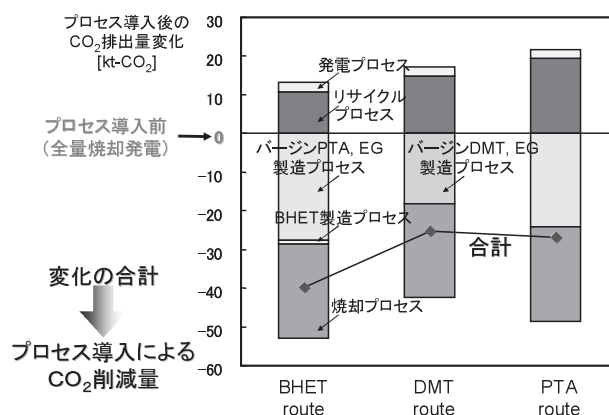


Fig. 7 Result of life cycle inventory analysis of PET bottle chemical recycling systems

我々は，化学プロセスシミュレータというプロセス設計案に対して物質収支やエネルギー収支を計算できるツールを持っているので，これを利用してインベントリデータの推定を試みた。

他の PET ボトルのライフサイクルにおけるインベントリデータは，業界団体による公表データを利用した。また，電力のような汎用的なインベントリデータは，商用の LCA ソフトウェアに収録されていたり，日本では LCA 日本フォーラムによって調査され，データベース化されている⁵⁾。

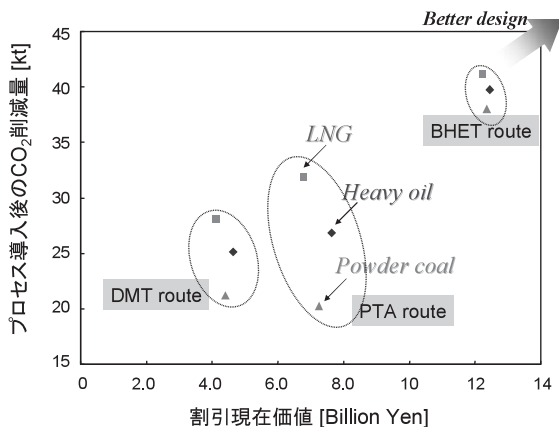


Fig. 8 Multi-objective evaluation of PET bottle chemical recycling systems

Fig. 8 では各プロセスの割引現在価値 (NPV) も合わせて多目的評価した結果を示しており、二酸化炭素削減効果が大きいプロセスは、経済性も高いことが示されている。これらの結果は、限られた情報からプロセス構造を推定し、シミュレーションした結果であるため、これが実際にプロセスで実現される訳ではないが、プロセス開発の初期段階からこのような LCA による技術評価を進めることが、適切なシステム設計につながる。

4. システム設計のためのアクティビティモデル

システム設計においては、様々な設計・評価のツールを利用するが、ツールがあれば適切に評価を実施

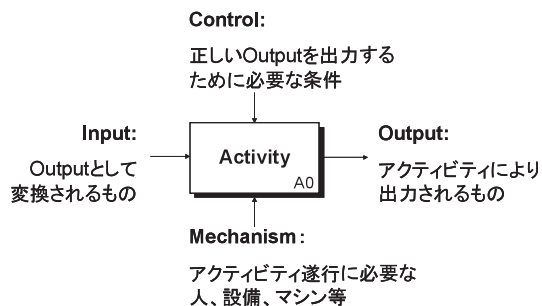


Fig. 9 IDEF0 activity modeling method

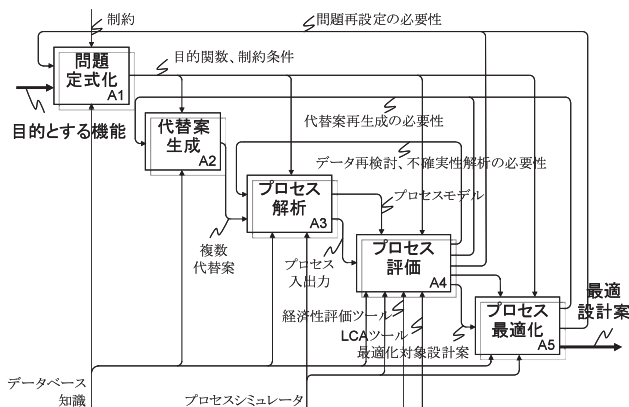


Fig. 10 Activity model for environmentally conscious process design

できるわけではない。LCA で環境影響を考慮しながらシステムを設計する手順を具体的に示すことが重要である。我々は、設計作業における情報の出入りをモデル化する IDEF0 モデリング手法⁶⁾を使ったアクティビティモデルを提案している⁴⁾。Fig. 9 は、IDEF0 モデリング手法である。この手法を用いて環境を考慮したプロセス設計のアクティビティをモデル化したものが Fig. 10 である。これは Fig. 1 を書き換えたモデルと見ることができ、Fig. 1 は単純に手順を示しているのに対し、アクティビティモデルとして必要な作業手順とその実施に伴う制約や要求される情報やツールを具体的に示すことで、実際に環境影響を考慮したプロセス設計が可能になる。さらに、アクティビティモデルを解析することによって、プロセス技術に関わる情報から製品ライフサイクルに関わる情報まで、設計に必要な情報基盤の設計も可能となる。

5. 結 言

LCA に基づいたシステム設計手法を PET ボトルのケミカルリサイクルシステムを例として概説し、この手法を一般的に利用するためのアクティビティモデルを示した。LCA は、環境影響を評価するための手法として確立しているが、これからの技術の評価し、設計に活かすためには、インベントリデータの推定手法や多くの評価指標に基づいた目的関数による意思決定手法が必要となる。今後は、このような実施例を増やすことによって、環境影響を考慮したシステム設計が広い分野で実施されることを期待する。

参 考 文 献

- 1) J. A. Cano-Ruiz and G. J. McRae : Environmentally Conscious Process Design, Annual Rev. of Energy and Environment, Vol. 23, pp. 499-536 (1998)
- 2) ISO 14040, Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework (1997)
- 3) H. Sugiyama, U. Fischer, M. Hirao and K. Hungerbühler : Decision Framework for Chemical Process Design Including Different Stages of Environmental, Health and Safety Assessment, AIChE J, Vol. 54, No. 4, pp. 1037-1053 (2008)
- 4) H. Sugiyama, M. Hirao, R. Mendivil, U. Fischer and K. Hungerbühler : A Hierarchical Methodology for Chemical Process Design Based on Life Cycle Assessment, Trans. IChemE : PartB, Vol. 84, No. B1, pp. 63-74 (2006)
- 5) LCA 日本フォーラム : JLCA — LCA データベース <http://www.jemai.or.jp/lcaforum/index.cfm>
- 6) National Institute of Standards and Technology : Integration Definition for Function Modeling (IDEF0), Federal Information Processing Standards Publication 183, Department of Commerce, Gaithersburg, MD, U. S. (1993)