

ライフサイクルエネルギー評価の都市開発計画への適用とその課題

EFFECTIVENESS OF LIFE CYCLE ENERGY(LCE) ANALYSIS
FOR URBAN DEVELOPMENT PLANNING

鶴巻 峰夫^{*}・植松 幹夫^{**}・根津浩一郎^{***}

Mineo TSURUMAKI^{*}, Mikio UEMATSU^{**}, Koichiro NEZU^{***}

ABSTRACT; Evaluation of ecological balance of urban metabolism at each stage of its life cycle from the cradle to grave is required in planning an ecologically sound city responsible for the global environment.

Life cycle energy(LCE) analysis is a part of whole process of the life cycle assessment(LCA) evaluation method. LCA has been developed in the US and Europe since the late 60's with the research efforts focussing on mainly industrial products. Studies on standardization of LCA initiated by the International Standard Organization (ISO) in 1993 have accelerated the harmonization of process, production and method recently.

Japan Society of Civil Engineers has organized a working group on LCE of practical use for utilizing urban energy, chaired by Prof. Tohru Morioka of Osaka University, under the Committee on Environmental Systems research. In 1993 it conducted research on the application of LCE in urban development planning. The research topics included research trends on LCE, methods for LCE, procedures in applying LCE to evaluation of urban development, studies on institutionalizing LCE, and policies in developing LCE systems.

KEYWORD; life cycle energy, life cycle assessment, urban development planning, energy saving, environmental load reduction

1. はじめに

都市開発と地球環境の共生を考える場合、地球規模の連鎖の視点と同時に、ライフサイクルにわたっての環境調和性を評価する必要がある。

ライフサイクルエネルギー(LCE)評価はライフサイクルアセスメント(LCA)の中の一つの評価手法である。LCAは1960年代末から欧米などで工業製品を対象にして研究されてきたが、ISO(国際標準化機構)においては1993年からLCAの国際規格化の検討を開始するなど、LCAに対する研究の動きが活発化してきている。

土木学会環境システム委員会未利用エネルギー活用LCE調査研究小委員会(委員長大阪大学盛岡通教授)では、(財)日本地域開発センターからの委託を受け、平成5年度に「未利用エネルギー活用に係わるライフサイクルエネルギー評価」の研究を行い、都市開発へのLCE評価の適用について検討を行った。この中ではLCE評価研究の動向、LCE評価手法、都市開発への適用と課題、LCE評価の制度化の検討と評価手法の開発方針等について研究を行った。

* 八千代エンジニアリング(株) Yachiyo Engineering Co., Ltd. , ** 日本鋼管(株) NKK Corp.

*** 日本環境技研(株) Japan Environment Systems Co., Ltd.

本報告は、上記委託研究を踏まえて未利用エネルギー活用のみでなく、都市開発計画というより大きなテーマへのLCE評価の適用という観点で、委員会に参画した標記のメンバーでとりまとめを行ったものである。

2. LCE/LCAに関する研究動向

LCEまたはLCAの研究及び適用としては米国において1969年にコカコーラ社がMRI (Midwest Research Institute, 現フランクリン研究所) に委託し、飲料容器に関する環境影響をLCAによって検討したものが最初と言われている。その後79年に米国内外の研究者のネットワークとしてSETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) が設立され、LCA研究の一つの拠点となっている。

ヨーロッパにおいては、英国やスウェーデンにおいて米国とは別の流れで70年代初期にLCA研究がなされ、80年代にはスイス生協ミグロスにより運動が有名である。

90年代に入ってから、オランダランデン大学やSETACによってLCAのマニュアル化が試みられるとともに、ISO (国際標準化機構) において、環境管理に関する標準化の一環としてLCAについても討議が開始されている。

これらはいずれは、製品に関してLCA評価を目指した研究である。

わが国においては、LCEの研究として、1979年に科学技術庁によってまとめられた「ライフサイクルエネルギーに関する調査 ―衣・食・住のライフサイクルエネルギー―」が最初の研究成果と言え、その後LCE/LCAのイベントリー手法の標準的手法のひとつとして現在でも参考とされている。環境保全の立場からでは78～80年にかけて東京都公害研究所 (現環境研究所) が、物質循環の合理化という視点で成果をまとめている。その後、80年代後半までは、研究として停滞ぎみであったが、90以降、地球環境問題がクローズアップされるにともない、LCE/LCAの研究が積極的に取組めるようになり、電力中央研究所での発電方式に関するLCAや建築学会での特別研究「建築が地球環境に与える影響」など、系統的に研究がなされるようになっていく。

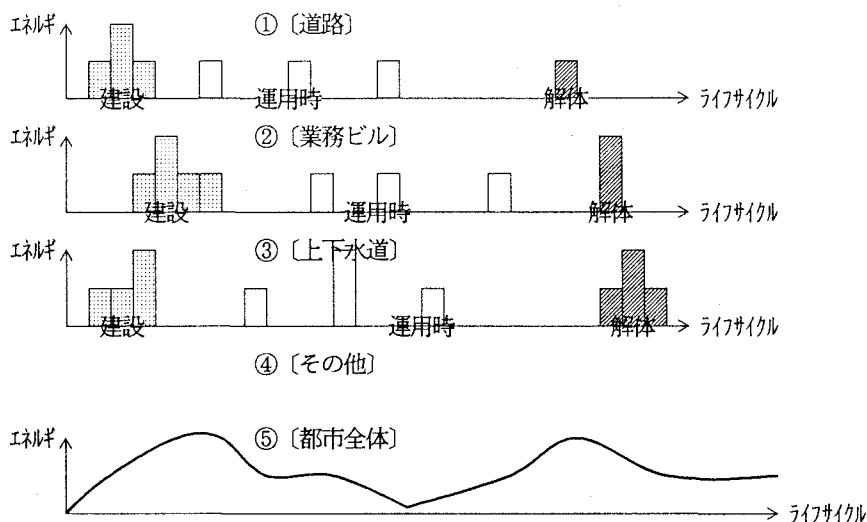
3. 都市開発計画へのエネルギーの評価の適用

都市全体を考える場合は、条件は非常に複雑であるが、都市がひとつの生命体のように誕生から解体 (廃棄) までのライフサイクルにわたって、ある一定量のエネルギーが消費されることになる。この状況を模式的に表現したのが図-1である。

都市を構成する施設や構造物はライフサイクルにわたってそれぞれ独自のエネルギー消費パターンを示し (図-1の①～④)、またそれらを集合させた都市全体のLCEは同図⑤のようなパターンで変化することになる。

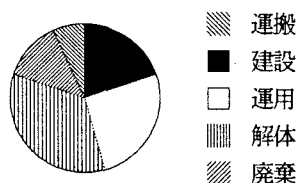
さらにこれを建設、運用、解体ごとの消費エネルギーに分解すると、例えば図-2のようにまとめることができる。このLCEの消費パターンから、当該コミュニティについてをライフサイクルにわたっていかに省エネルギー化を図ることができるか (図るべきか) の戦略が立てられることになる。例えば、ライフサイクルエネルギーの全量のうちで、建設工事によるエネルギーが大部分を占めるようであれば、建設時のエネルギーを削減する方法を採用することにより、効果的な省エネルギー化を達成することが出来る。あるいは、運用時のエネルギーが大部分を占めるような場合は、ビルの省エネルギー推進、消費量の削減、長寿命化等の対策を進めることが計画されよう。

また、都市のLCEは施設毎、材料毎、工種毎に仕分けることによって、さらに詳細な省エネルギーへの対応を検討することができる。



図－１ 都市全体のライフサイクルエネルギーの例

こうして都市全体のLCEが算定されると、都市の構成施設や構造物毎に炭酸ガス排出抑制からみた地球環境保全への貢献度が評価され、建設、運用、補修、廃棄等の計画を立てる際の重要な評価軸が与えられることが分かる。具体的には次のような評価に適用されよう。



図－２ ライフサイクルエネルギー分布の例

(1) LCEは、新たに都市を形成する際の導入施設なり

構造物を、より環境調和性の高いものに計画する時の新しい評価軸となりうる。省エネルギー効果が高いと言われる施設でも、LCEを算定すると決して省エネルギーになりえないものも現れてくることも考えられる。逆に、運用エネルギーが大きくても、建設、廃棄時のエネルギーが少なければ、トータルとしてLCEが減少することも期待される。LCE評価は都市の開発方針、構成要素、開発手法等を再構築し、環境調和性の高い都市を形づくことに適用できる。

(2) 都市を形成する際、エネルギーは必ず消費される。建設後においても、都市の中での産業や人々の活動に伴って必要なエネルギーは消費される。このエネルギー消費に合わせてCO₂やNO_x、SO_x等が排出されるが、これらの排出量を補償する機能、土地利用を、都市の中や外部に設けることが構想される。このミティゲーションの手法を採用する時の評価としても、このLCEは重要な答えを出しうる。たとえば、ライフサイクルにわたってのCO₂発生量が大きいということになれば、CO₂の発生を補償するために必要とされる質、所要面積の緑地の整備や保全が計画されよう。

(3) 都市の広がりや都市内の人口密度と運輸エネルギーの相関を調べた研究がある。これによると都市の人口密度が高い程（すなわちコンパクトな都市ほど）年間一人当たりのガソリン消費量(CO₂発生量)は明らかに小さくなる。ここでは都市の環境調和性を人口密度とガソリン消費量で評価しているのであるが、LCEを用いて（計画レベルでの）都市間の環境調和性を比較検討することが可能となる。ライフ

サイクルエネルギーを都市の〔単位面積・年当たり〕あるいは〔人口・年当たり〕の値に換算すれば、エネルギー消費量（またはCO₂やNO_x、SO_x発生量）の面からの環境調和性や、適正な都市規模、密度、施設配置などを評価することができる。

結局、都市全体をLCEで評価するということは、都市の省エネルギー性や省エネルギー量を解析すると同時に、都市の開発計画そのものをマクロに評価することになる。ライフサイクルエネルギー評価は都市計画手法の重要な座標軸であるということが言えよう。さらに言及すれば、環境調和性の高い都市の計画、建設を今後全国レベルや自治体レベルで推進していくためには、LCEによる評価を政策面にも反映させるような社会的制度の検討が行われる必要が出てこよう。

4. 都市形成に適用する際の課題

以上のように、LCE評価を都市形成の計画に適用することによって、ライフサイクルにわたっての省エネルギー化を図り、かつ、真の意味での環境調和性を担保させることが可能となるが、具体的に算定作業を行うには解決すべきいくつかの課題が残されている。

(1) ライフサイクルの範囲のとり方

あらたに都市を開発する場合においても、都市を形成する個々の施設や構造物は、建設開始時期と建設期間にずれがある。また個々の施設のライフサイクルは物理的・機械的な寿命によって定まると同時に、機能上の限界に達した時には、解体、廃棄されることになる。また、都市がいったん形成された後も、新たな機能を有する施設が建設され、ある寿命の間運用されて行くことになる。最初に建設された施設についても、解体、廃棄されたあとは、また機能を同じくする新たな施設が繰り返し建設され、運用されてゆく。

このように都市全体を考えた場合は、都市内の施設のライフサイクルが個々に異なり、また繰り返し建設され運用されることを考えると、都市全体のライフサイクルを一義的に定めることは難しくなる。しかも都市が機能的な限界性によって活動を停止するようなことがない限り、都市全体のライフサイクルは半永久的に続くことになる。

都市全体のLCEを評価する意義は、（前節で考察したように）都市の省エネルギー性や省エネルギー量を解析すると同時に、都市の開発計画そのものをマクロに評価することである。そのためには、ビルの法定耐用年数などを都市全体の仮のライフサイクルと定め、その期間中に都市内の全施設についてのLCEを算定するといった解析基準を定めておくということが必要であろう。

また、都市の空間的広がりからみれば、当該の開発地区とそれに関連する地区との連結会計をも準備する必要がある。

(2) リサイクル時のエネルギーの評価

地球上の資源が有限であることを考えると、将来の人類にいかにも多くの資源を残してゆかが今の我々に課された使命である言えよう。石油を代表とするエネルギー資源はもとより、建設用原材料についても、それらの資源消費量を極力低減させリサイクルを促進させるか、中長期的・地球的視野から検討が行われなければならない。

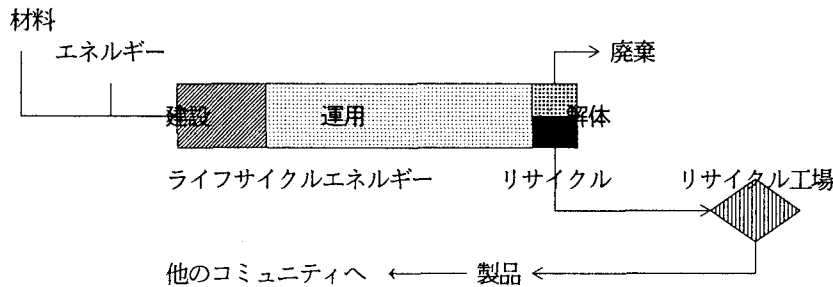
エネルギーについては、省エネルギー化とあわせて熱のカスケード利用の促進が制度と技術の両面から進められているが、その他の資源についても都市レベルでの物質循環が評価の対象となっている。

都市を形成する個々の施設やインフラが運用に供されたあと廃棄されると、それらの材料や部品の一部はリサイクルされ、再度都市形成の工事等に活用される。もちろん都市形成の最初の時期においても、他でリサイクルされた材料や製品が建設に供されよう。こうして都市の形成時における総エネルギーが

低減されることとなる。

それではこのリサイクルされた材料や部品を、L C E評価の中でどのように算定していったらよいであろうか。

建設材料や製品のリサイクルの流れは一般的に図－3 のようになろう。ライフサイクルエネルギーの算定で検討されなければならない点は、「リサイクル工場（工程）」にて再度製品化される際の所要のエネルギーをいかに見積もるかということと、そのエネルギーをどこのライフサイクルに加算するかということである。この点については、すでに簡便法が個別製品について提案されているが、システムとしての都市施設に積み上げる工夫が必要となっている。

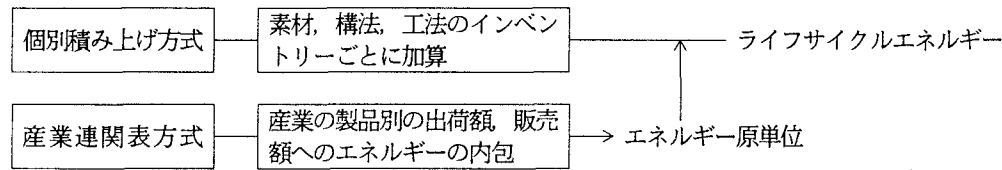


図－3 リサイクルの取扱い

(3) 評価手法の選定

現在考えられる評価手法としては大きく分けて産業連関表方式と積み上げ方式とがある。また、積み上げ方式においても産業連関表から求められたエネルギー原単位を使用することもあるので、実際上は図－4 のように両方式が結合された手法で解析が進められることになる。

しかし、都市全体を対象とする場合と、個別のインフラストラクチャ型熱供給施設のL C Eを算定する場合とでは、自ずと採用する方式が異なてこよう。



図－4 個別積み上げ方式と産業連関方式の結合

一般的には、都市全体を対象とする場合には産業連関表方式が、個別の施設を対象とするのであれば積み上げ方式が適用されると言えようが、それぞれ解決すべき課題がいくつか残されている。両者を結合した上で、解析精度や作業量を勘案のうえ最適な手法を選定・開発することが必要となっている。

(4) 都市の「運用エネルギー」の算定

都市の中では人々が動き、種々の産業が活発に活動している。自動車、地下鉄等の交通・運輸系のエネルギーも大量に消費される。都市を構成す商業・業務施設や住宅等でもそれぞれ電気、ガス、熱エネルギーを消費する。これらの「運用エネルギー」は都市全体のライフサイクルエネルギーを算定する際の主要な消費項目となるので、定量的に算定評価しておく必要がある。

実際に数値を算定する場合、業務・商業・住居系のエネルギーについてはエネルギー消費の原単位を用いることによって、マクロ的に算定することができる。しかしこのエネルギー原単位についても、消費者の嗜好やエネルギー価格の変化によって変動しており、今後ともこの使い方や社会経済パラメータの振幅は、都市の運用エネルギー予測に少なからぬ不確定性を及ぼすだけに幅のある推定が欠かせない。

(5) 二律背反性の比較検討

既に考察したように、LCE評価法は、都市の計画や形成の段階において、その環境調和性を判断するうえでの重要な評価軸となりうるということがわかる。都市およびその構成施設の省エネルギー性を判断するとともに、開発整備の方向付けの役割もはたしうる。

しかし、都市の開発は、このLCE評価の他にも経済性（採算性）、利便性、快適性、安全性等々の評価基準によっても開発方針や内容が検討されることになる。そしてLCEによる評価結果は、短期的視野のなかでは、上記の評価軸と相反する状況も出てこよう。実際はこれらの評価内容とLCE評価の結果との相互の関係から、最適な値（最適計画）が選定されることになるのであろうが、この二律背反性の関係はそれぞれのプロジェクトにおいて総合的に比較検討がされなければならない。

5. 今後のLCE評価手法の開発での適用の考え方

一般的には商品のLCA手法を用いて、ある対象物を評価しようとするときには、

- 1) 製品情報を得ようとする、また公開しようとする場合
- 2) 製品の工程、材料等の改善を図ろうとする場合
- 3) 規制や経済的支援などの政策決定を行おうとする場合

などの目的が考えられてきた。

ここで、調査対象である都市開発計画に関するLCE評価導入という観点で言えば、今後開発していく手法は、主として②の範ちゅうに入るものであり、その結果をもとに将来は③を視野に入れたものであると考えることができる。

ただし、どのような情報をもとに、どのような結論を導くかという点で考えていくと、都市でのインフラストラクチャの整備に関しては、いくつかの検討段階がある。そのフェイズにより進め方が相違するため、その考え方を以下に述べる。

(1) 都市開発の構想段階

開発対象とする都市規模については例えば東京都臨海副都心地区や横浜市みなとみらい21地区などを念頭に置けば、構想・計画段階においては、新都心に求める機能が現況の市を変の土地利用状況や、地域の社会・経済の状況及び将来予測にもとづいて、開発使用とする都市の規模や土地利用が決定される。この段階で開発される主要施設（オフィスビル、コンベンション・センター、ホテル等）と必要となる都市基盤施設（交通・運輸・通信、供給・処理施設等）に対して計画条件がまとめられ、概略の投資額が算定される。

従来の計画手法において、都市規模の決定は投資とその回収及び利益とった経済的要因により大部分が支配されていた。LCE評価手法を導入することにより、エネルギー消費及びCO₂、SO₂等排出負荷等を用いた環境調和性からの評価が意思決定の基準として与えられようとしている。

この段階では、LCE評価におけるインベントリー手法としては、産業関連分析などマクロ的な解析手法を利用することができる。

(2) 都市基盤施設の計画段階

都市基盤施設の計画段階ではまず、エネルギー消費の最小化という観点での各種の方式のLCE評価が可能である。その例としては、公共輸送システムとして、在来鉄道、新交通システム、自動車等の比

較がなされる。また、廃棄物処理施設や下水道終末処理施設など、排熱利用の可能な施設の積極的地区内誘置や、商用電力利用よりコージェネレーションの選択等の決定がLCE評価で期待できる。

加えて、エネルギー供給施設の検討では地域的に供給するエネルギーとして、7)電力、1)ガス、2)熱(温熱、冷熱)等と個別に供給されるエネルギーとして、3)石油等をどのように組み合わせるかを比較することになるが電力、熱といった二次エネルギーについては、生成にかかわる一次エネルギーの比較検討をも考慮し、地区内のエネルギー消費の最小化にとどまらず、化石燃料等の再生できない資源の保全、原子力利用等環境リスクの増大といったエネルギーの質を評価に入れることも重要になる。

この段階では比較しようとする対象に対し、可能な限り、積上げ方式等の詳細な解析を行い、残りの部分を産業関連方式等のマクロ解析を用いる手法が必要となる。

(3) 各種施設の設計段階

施設の設計段階においては、実際の施設施工に向けた各機器の詳細仕様(能力、材質)及び構造躯体の決定が行われる。

この段階での検討では使用される材料と使用する機器材料の環境調和性の比較検討になる。この検討は、製品のライフサイクルアセスメント(P-LCA)とほぼ同等と考えられる。

6. おわりに

本調査研究は、都市開発計画の手法としてLCE評価を導入するにあたっての効果、課題等を既存の研究文献をもとに考察したものである。

今後は、代表的な都市においてケーススタディを行うなど、情報を整備するとともに手法の確立を目指して研究をすすめる計画である。

なお、本報のとりまとめは筆者が責任を負うものになるが、その際、盛岡 通教授(大阪大学)の御教示を受けたことおよび小委員会での講師及び委員の諸先生の重要な御意見を賜ったことを記して感謝したい。

参考、引用文献

- 1) LCA Source book SPOLD 1993
- 2) 日本におけるLCA研究の現状と将来の課題 平成6年1月 エコマテリアル研究会
- 3) 環境への負荷の評価に関する予備的検討 平成5年3月 環境庁委託調査
- 4) LCA製品の環境ライフサイクルアセスメント サイエンスフォーラム社
- 5) ライフサイクルエネルギーに関する調査研究 ―衣・食・住のライフサイクルエネルギー―
科学技術庁資源調査会編資料第69号〔昭和54年(1979)4月24日〕
- 6) 物質循環の合理化による汚染物質総量の抑制に関する基礎的研究(第3報)
―多資源型消費財のエネルギー使用量に関する調査―東京都公害研究所年報 1980
- 7) 発電プラントのエネルギー収支分析:電力中央研究所研究報告;Y90015 平成3年(1991)11月
- 8) 建築が地球環境に与える影響 1992年3月 (株)日本建築学会
- 9) 未利用エネルギー活用に関する評価研究 平成6年3月 (株)土木学会環境システム委員会
未利用エネルギー活用LCE調査研究小委員会