

建築物の建設に伴うエネルギー消費に関する 分析手法および削減手法について

EHS&S 研究センター研究主任 兼 環境技術部主任 海 藤 俊 介

Keyword：エネルギー消費，CO₂排出，内包エネルギー，内包CO₂，LCA，積み上げ法，産業連関分析法

1. はじめに

建築・建設産業は、コンクリートや鉄骨などをはじめ、天然資源を大量に消費する産業である。たとえば、砂や砂利、碎石は、世界全体における年間消費量の約40%を、木材のバージン材については25%を建築・建設産業が消費していると言われて^{1, 2)}いる。また、エネルギー消費およびCO₂排出においても建築・建設産業は消費量および排出量が大きい産業である。建築・建設産業のエネルギー消費量は、世界全体における年間エネルギー消費量の40%であるとの報告がある³⁾。このように建築・建設産業は、天然資源の大量消費、エネルギー消費およびCO₂排出の観点から地球環境に大きな影響を与える産業である。

本稿では天然資源消費低減、エネルギー消費およびCO₂排出低減の観点から、建築物の建設段階からさかのぼった建築部材の製造過程や輸送などを含めた建設時までに消費するエネルギー消費に着目し、その分析手法、削減方法について述べる。

建築物の建設に伴うエネルギー消費は、英語圏ではEmbodied Energyと表され、「内包エネルギー」と訳すことができる。以下、建設に伴うエネルギー消費を「内包エネルギー」、建設に伴うCO₂排出を「内包CO₂」と表記する。

2. 内包エネルギーとは

内包エネルギーおよび内包CO₂は、直接・間接的なエネルギー消費およびCO₂排出の総称である（図1）。直接的なエネルギー消費およびCO₂排出とは、建設時に建設現場内で使用する重機や設計業務などにより生じるものを指す。間接的なエネルギー消費およびCO₂排出は、建設現場以外で生じるものを指し、建築部材そのものが最終製品もしくは半製品として工事現場に搬入されるまでに生じるエネルギー消費およびCO₂排出を指している。建築部材として工事現場に至るまでには、原料の採掘や製造工場、運搬などその製造過程にさまざまなエネルギー消費およびCO₂排出があり、間接的なエネルギー消費およびCO₂排出にはこれらが含まれている。

内包エネルギーおよび内包CO₂は、直接・間接的なエネルギー消費およびCO₂排出を指す言葉であるが、その定義の境界（バウンダリー）が異なる場合がある。内包エネルギーおよび内包CO₂は多くの場合、建設段階までのエネルギー消費・CO₂排出であるが、改修、解体時を含む場合がある。改修時は更新する建築部材（設備機器等）の内包エネルギーが含まれ、改修と解体の作業時に作業現場で消費する直接的なエネルギーが含まれることがある。

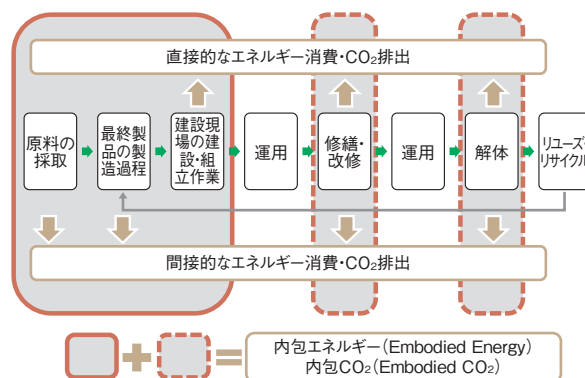


図1 内包エネルギー、内包CO₂の定義

3. 内包エネルギー削減の重要性

建築物の環境負荷を評価する方法として、ライフサイクル評価手法（Life-Cycle Assessment：LCA）がある。建設、運用、修繕・改修、解体といった建築物のライフサイクル全体を通じて環境負荷評価をする手法である。

建築物のライフサイクルにおいて消費されるエネルギー消費量の内、以下のエネルギー消費の割合が大きい。

①建設に伴うエネルギー消費（内包エネルギー）

建設工事時に消費されるエネルギー消費（土工事や組立工事の際に用いる重機のエネルギー消費等）と建築部材の製造過程で消費されるエネルギー消費（原材料の採取や製造エネルギー、運輸エネルギー等）

②運用に伴うエネルギー消費

室内環境を維持するための空調・衛生・照明等のエネルギー消費

運用に伴うエネルギー消費は、一般的に建築物の使用

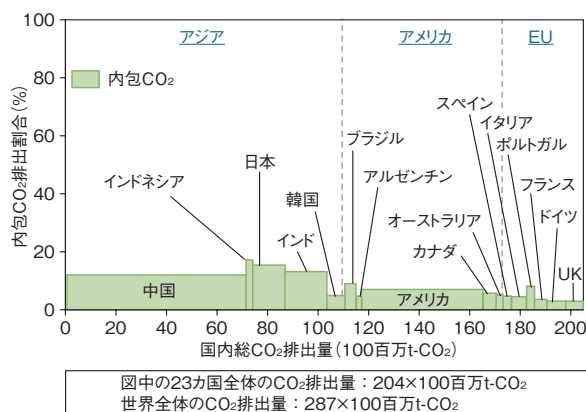


図2 世界各国の国内総 CO₂ 排出量と国内総 CO₂ 排出量に占める建設産業の内包 CO₂ の割合（2006年）^{4）6）}

期間が長い程、ライフサイクルに占めるエネルギー消費の割合が高くなる。しかし、近年の ZEB（Net Zero Energy Building）や節電の取り組みから、省エネ化がますます促進すると考えられる。また、設備機器の高効率化や外皮性能の向上などが今後期待できることから、運用時のエネルギー消費は低減する傾向に向かうと考えられる。したがって、将来的に運用エネルギーの割合が建築物のライフサイクルにおいて相対的に縮小していくことにより、建設に伴うエネルギー消費について現在よりもさらに削減が求められていくと考えられる。

図2は2006年における各国の国内総 CO₂ 排出量とその内包 CO₂ 排出の占める割合を示している。図中の内包 CO₂ は、産業連関分析と呼ばれる分析方法を用いて各国の産業連関表を基に算出したものである。横軸に国内総 CO₂ 排出量、縦軸に国内総 CO₂ 排出量に占める内包 CO₂ 排出の割合を示す。世界でも国内総 CO₂ 排出割合の高い中国、アメリカは国内総 CO₂ 排出を示す横軸が長い。また、縦軸の内包 CO₂ 排出割合が高い国として、中国、日本、インドなどが挙げられる。これらの国は、全産業の中でも建設業の比重が大きい国と言える。特に中国やインドは、急速な経済発展に伴うインフラ整備や建設ラッシュの影響により、建設産業からの CO₂ 排出が国内総排出量に対して相対的に高い割合となっている。このような傾向は中国に限らず、経済成長が著しい発展途上国において顕著である。そのため BRICS（ブラジル、ロシア、インド、中国、南アフリカ）をはじめ、発展途上国では今後さらに経済成長により国内総 CO₂ 排出量のみならず、内包 CO₂ の排出割合も高まると考えられる。

このような背景から、建築産業における内包エネルギーおよび内包 CO₂ 削減の重要性は、今後一層高まると予想される。

4. 分析方法

内包エネルギーおよび内包 CO₂ の分析方法には、大別して積み上げ法と産業連関分析法の2つがある。

4.1 積み上げ法

1) 概要

積み上げ法は、使用する建築部材が製品化されるまでの各プロセスでの物質収支量や環境負荷量を集計する手法である。

建築部材のライフサイクルは、原料採取・資源化、製品化、使用、廃棄等の各ライフサイクル段階に細分化できる。LCA は細分化したライフサイクル段階ごとに物質収支や環境負荷量の計算を行う。ライフサイクル全体のみならず、複数のライフサイクル段階について積み上げ法による計算を行い、ライフサイクルのある部分を対象とした LCA 原単位を作成することもある。

2) 特徴

積み上げ法による分析は、製造の単位プロセスを上流に向かって結合し、ひとまとめにすることから調査範囲を明確にする必要がある。調査範囲の各プロセスにおける投入の物質収支量やエネルギー、環境負荷量をリストアップしたものを集計していることから、集計値の精度は高い。しかし、製品製造に関連する物質は、製品によっては膨大な数に上るためリストアップやデータの入手が困難である場合がある。また、海外生産を対象外にしたり、副原料の流れを追っていないなど他のプロセスのデータとの結合が必要なものも多く、注意を要する。

4.2 産業連関分析法

産業連関分析法は、統計表である「産業連関表」を基に一般的には経済波及効果を分析する際に用いられる手法である。この産業連関分析法を環境分析に応用した分析手法である。

1) 産業連関表の概要

産業連関表とは、一国において一定期間に行われた財・サービスの産業間取引を一つの行列の形に示した統計表のことである（図3）。縦方向には部門ごとに財・サービスの国内生産額とその投入費用構成、つまり生産を行うために投入した費用に関する情報が記述されている。また、横方向には、部門ごとの財・サービスの国内生産額および輸入額がどの部門でどれだけ需要されたか、つまり各産業の販路に関する情報が記述されている。このように産業連関表自体から各産業の生産額や一国経済の

供給部門	需要部門	中間需要	最終需要			輸入	国内生産額
		産業1, 産業2...	消費	投資	輸出		
中間投入	産業1						
	産業2						
	⋮						
付加価値	雇用者所得						
	営業余剰 その他						
国内生産額							

図3 産業連関表の概要

産業構造を読み取ることができる。このように、各産業部門間の Input と Output を整理した表であることから、Input-Output Tables (I-O 表) と呼ばれる。

2) 産業連関分析の計算方法

産業連関分析法による単位生産額当たりの内包エネルギーおよび内包 CO₂ の算出は、それぞれの産業ごとの単位生産額当たりの環境排出（エネルギー、CO₂等）を基に、産業連関分析による波及効果計算を行うことで求められる。計算の際に注意すべき点として、産業連関表の統計精度、産業ごとの単位生産額当たりの環境排出（エネルギー、CO₂等）の見積り方がある。産業連関表の統計精度は、経済波及効果の計算に影響するため、非常に重要である。日本の産業連関表は、世界的に見ても統計精度が高いため計算誤差は小さいと考えられるが、他国の産業連関分析を行う場合には、統計精度について確認する必要がある。

産業ごとの単位生産額当たりの環境排出（エネルギー、CO₂等）の見積り方は、分析者の考え方によりさまざまであることから、計算結果に大きく影響する。見積りの方法は、統計値やデータベースを利用する場合が多い。データベースや各省庁、公的機関から発表されている統計値を使用する場合は、産業連関表の産業分類に対応しているか確認が必要である。なお、日本の産業連関表には付表として物量表が存在し、化石燃料をはじめとする産業別の物量消費量の記載がある。

産業連関分析法は、輸入の取扱い方により計算方法が2つある。国内生産分と輸入分を分けて計算する方法と、輸入分を国内生産分と同一条件のものとして計算する方法である。内包エネルギーの計算においては、国内の生産活動における環境排出であることから、国内分だけを取り出して計算する必要がある。

4.3 分析方法の比較

積み上げ法では最終製品に至るまでの各プロセスにおける原料や燃料等の投入物量を基にエネルギー消費などの環境負荷を積み上げることで計算を行っているため、他の産業にさかのぼった間接的な物量の把握には限界がある。一方、産業連関分析法では、最終製品に至るまでの費用の流れを基に全産業を横断的に網羅し、波及効果を含んだ環境負荷を計算できることから、すべての間接的な影響を把握することが可能である。産業連関分析による内包エネルギーの計算値は、産業部門の全国平均値であり、地域差が表れない。また、日本の産業連関表の産業部門数は約400部門程度であることから、産業連関表の産業分類よりも細かな産業分類に該当する製品の内包エネルギーの計算は難しいというデメリットがある。

表1に内包エネルギーおよび内包 CO₂に関する2種類の分析方法の特徴を示す。

表1 内包エネルギー、内包 CO₂に関する分析方法の特徴

	利点	欠点
積み上げ法	調査範囲内の計算値の精度が高い	・生産に関連するすべての物質のリストアップ、データ入手など作業が煩雑 ・波及効果が含まれない
産業連関分析法	波及効果が考慮される	・細かな商品の種類に対応できない ・国内の平均値であるため地域差が表れない

5. 建築物の内包エネルギーの影響要因

内包エネルギーおよび内包 CO₂に影響する主な要因として、以下の3つが挙げられる。

1) エネルギー構造

図4は、2008年の主要国の発電電力量に占める各電源の割合である。化石燃料への依存率が高い程、エネルギー起源 CO₂排出は増加するため、中国のように石炭の割合の高い国は、原子力発電の割合の高いフランスなどと比較して CO₂排出係数は高い（図4）。

産業別でも、一次エネルギー構成比率の化石燃料依存率によって、CO₂排出量原単位に差が出ると考えられる。図5は、日米の主要産業の一次エネルギー構成比である。日本は、石炭・石油製品の割合が高いのに対して、アメリカは天然ガスの割合が高い傾向にある。天然ガスは、石炭・石油製品と比較した場合に単位発電量当たりの CO₂排出量が小さいことから、産業全体の天然ガスの割合の高いアメリカの方が、日本よりも単位発電量当たりの CO₂排出は小さいと考えられる（表2）。このように一次エネルギー構成比によって、エネルギー消費が同等の場合でも CO₂排出量が異なる特徴がある。

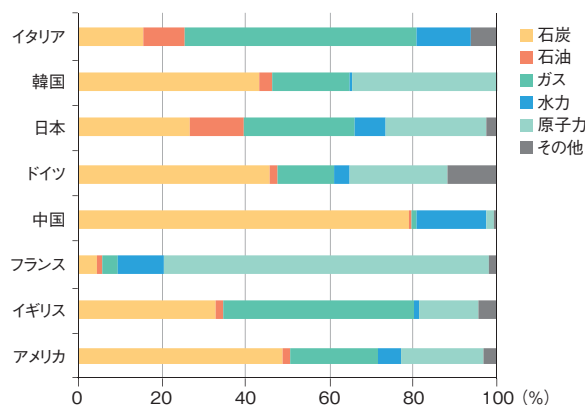


図4 主要国の発電電力量に占める各電源の割合（2008年）⁹⁾

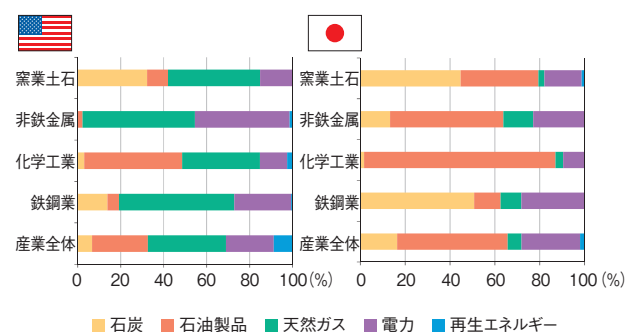


図5 日米の主要産業別一次エネルギー構成比（2002年）⁶⁾

表2 一般的な燃種と単位発熱量，排出係数¹³⁾

No.	燃種	単位	単位発熱量	排出係数
1	一般炭(輸入炭)	kg	26.6 MJ/kg	0.0906 kgCO ₂ /MJ
2	ガソリン	ℓ	34.6 MJ/ℓ	0.0671 kgCO ₂ /MJ
3	灯油	ℓ	36.7 MJ/ℓ	0.0679 kgCO ₂ /MJ
4	軽油	ℓ	38.2 MJ/ℓ	0.0687 kgCO ₂ /MJ
5	A重油	ℓ	39.1 MJ/ℓ	0.0693 kgCO ₂ /MJ
6	B重油	ℓ	41.7 MJ/ℓ	0.0716 kgCO ₂ /MJ
7	液化石油ガス	kg	50.2 MJ/kg	0.0598 kgCO ₂ /MJ
8	都市ガス	Nm ³	41.1 MJ/Nm ³	0.0513 kgCO ₂ /MJ

発熱量には高位発熱量を用いている

2) 建築部材の内包エネルギー原単位

建築部材の単位物量当たりの内包エネルギーは，製造，輸送に伴うエネルギー消費量に影響する。

図6は，世界各国のLCA評価ツールによるコンクリートの内包CO₂の比較である。各国のLCA評価ツールによって内包CO₂の算出条件が異なるが，コンクリートの単位重量当たりの内包CO₂は，0.08～0.15 [kg-CO₂/kg] の範囲にある。日本の内包エネルギー原単位は，比較的lowく，これはコンクリート材料のセメントの生産効率が高いことが一因にあると考えられる。日本のセメント産業は，エネルギー効率が国際的にトップクラスである。

建築部材の内包エネルギーには，輸送に伴うエネルギー消費量が含まれる。輸送エネルギーは，建築産業全体のCO₂排出量の約10～12%という報告がある¹⁰⁾。この値は輸入分を含まない国内分のみ割合であるので，輸入分を考慮するとさらに割合は高まる。

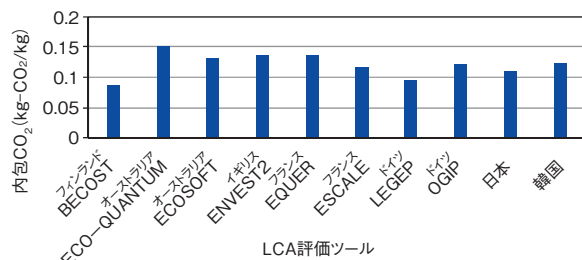


図6 コンクリートの内包CO₂の比較¹¹⁾

3) 建物仕様

建築物における内包エネルギーおよび内包CO₂は，使用部材量，部材種類に大きく影響する。立地や気候などの環境的な要因などから決定される工法や仕上げなどの建物仕様により，使用部材量，部材種類は決定される。

図7は，国際会議 Green Building Challenge で発表された環境共生建築物の単位面積当たりの内包エネルギーのベンチマーク値である¹²⁾。これらのベンチマーク値は，環境に配慮した先進建物の設計時に用いられた値であり，その地域の平均値が利用されている。アメリカの物件4棟，日本の物件8棟について建設時の内包エネルギーを比較した。アメリカ，日本それぞれ内包エネルギーは，3.8～5.5 (GJ/ m²)，2.5～23.0 (GJ/ m²) の範囲にあ

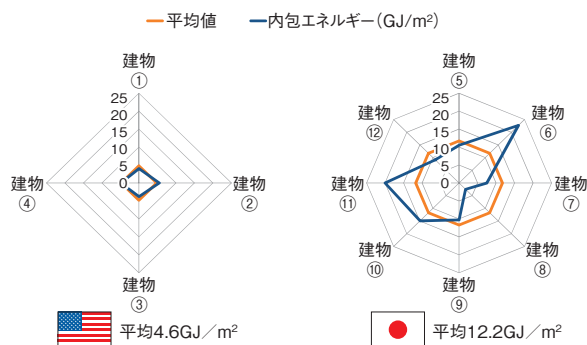


図7 日米における事務所建築の内包エネルギー¹²⁾

る。日本の単位面積当たりの平均内包エネルギーは，アメリカのおよそ2.6倍と大きい。耐震のため構造体の部材量が多いことなどが影響していると考えられる。

6. 内包エネルギー削減に向けて

1) 建築部材の製造・輸送の効率化

現在のエネルギー構造は，日本をはじめとして化石燃料依存率が8割以上と高い割合の国が多い。しかし，今後，再生可能エネルギーの供給割合が高まり，化石燃料依存率が低下することが予想される。化石燃料依存率の低下に伴いCO₂排出係数が低下することで，建築部材の製造におけるCO₂排出の削減や，電気・天然ガス自動車による輸送CO₂排出削減が予想される。

製造工場では，エネルギー変換効率が高いボイラ等の設備更改などで効率化を図ること，輸送の面では，地産地消により輸送距離を短縮することで建築部材の内包エネルギーを削減できる。

2) 設計時のLCA評価

あらかじめ設計段階においてLCA評価を行い，内包エネルギーについて試算することが重要となる。また，スケルトンインフィルのように建築物の耐用年数を長期に設定することで単位年当たりの内包エネルギーおよび内包CO₂を低減することが可能である。ただし，耐用年数を長期とすると，設備更新や改修による内包エネルギーおよび内包CO₂が増加することに注意が必要である。

3) 使用部材量の削減

建築物の内包エネルギーおよび内包CO₂は，使用部材量に正比例する傾向にあることから，可能な限り使用部材量を抑えることが肝要である。具体的な取り組みの一例として，天井を吊天井とせず最低限の仕上げとする，ガラスといったリサイクル可能な材料を使用した内装材の採用が挙げられる。また，内包エネルギーおよび内包CO₂原単位の低い部材を選定することも重要である。

設計段階において室のボリュームを用途に合わせ，適切なサイズとすることも重要である。過度に室を大きくすることは，使用部材量を増加させるだけでなく，運用エネルギー増加にもつながる。

7. おわりに

本稿は、建築物の建設に伴うエネルギー消費の分析および削減に対する取り組みについて紹介した。

内包エネルギーは、製造や輸送エネルギーといったプロセスをさかのぼったエネルギー消費を含むため、運用エネルギーと比べてエネルギー消費量を評価しにくい面がある。しかし、削減の余地が大きいことから今後ますます削減に対する取り組みが進められていくと考える。

〔謝辞〕

本稿を作成するにあたり、岡建雄 宇都宮大学名誉教授より助言を賜った。ここに感謝の意を表す。

〔参考文献〕

- 1) Horvath: Construction Materials and The Environment, Annual Review of Energy and The Environment 29, pp. 181 ~204, 2004
- 2) G. Ding: The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities, Ph.D. Thesis, University of technology, Sydney, Australia, 2004
- 3) L. Price, S. de la Rue du Can, J. Sinton, E. Worrell, Z. Nan, J. Sathaye and M. Levine: Sectoral Trends in Global Energy Use and Greenhouse Gas Emissions, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006
- 4) International Energy Agency, IEA: Energy statistics of OECD countries 2002-2003, 2005
- 5) International Energy Agency, IEA: Energy Balances of OECD countries 2000-2001, 2003
- 6) International Energy Agency, IEA: Energy Balances of OECD countries 2001-2002, 2004
- 7) 赤井誠, 石谷久: ISO14040/JIS Q 14040 ライフサイクルアセスメント—原則及び枠組み, 産業環境管理協会, 1999
- 8) 穴戸駿太郎: 産業連関分析ハンドブック, 東洋経済新報社, 2010
- 9) International Energy Agency, IEA: Energy Balances of OECD countries 2007-2008, 2010
- 10) 芦村昌士ら: 2005年産業連関表による建設に伴う CO₂ 排出量原単位の作成と流通マージンの分析に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 75 (653), pp.653~659, 2010
- 11) Daniel Kellenberger EMPA Dübendorf Technology and Society Laboratory LCA Group12, SETAC Europe LCA Case Studies Symposium 10/11, 2005
- 12) 川津行弘ほか: 建築物の建設に伴うエネルギー消費量, CO₂排出量における投入材料の変遷に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 73 (629), pp.931~938, 2008
- 13) 環境省地球環境局: 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン (試案 ver1.5), 2003, <https://www.evernote.com/shard/s42/res/87d2b992-baa6-4454-afab-8ede535a3aed/ghg-japanese.pdf>



かいどう しもんすけ
海藤 俊介

EHS&S 研究センター研究主任 兼 環境技術部主任
環境・エネルギー等のコンサルティングに従事
工学博士

Synopsis

Regarding Methods of Analysis of Energy Consumed During the Construction of Buildings and Reductive Techniques

Shunsuke KAIDO

Energy consumed during construction (embodied energy) and energy consumed in the process of operation account for a significant proportion of the energy consumed throughout the life cycle of a building.

Undertakings in recent years such as ZEB (Net Zero Energy Building) and power conservation will almost certainly further promote energy conservation and it is anticipated that the ratio of energy expended on operation will decrease relative to the building life cycle in the future. It can, therefore, be surmised that there will be a growing demand for ever greater reductions from present levels in the amount of energy consumed by construction.

From the perspectives of reduction in the consumption of natural resources, energy consumption and reductions of CO₂ emissions, this paper focuses on energy consumed up to the point at which construction commences traced back from the building construction phase through stages including building materials manufacturing processes and transportation and introduces energy-consumption analytical and reductive techniques.

Techniques for the analysis of energy consumed during the construction of a building (embodied energy) can be broadly divided into the build-up method and the inter-industry relations analysis method. Boundary conditions applied to calculations differ depending on the method used and require caution when conducting analysis.

The following are conceivable methods for the reduction of energy consumed during construction (embodied energy) :

(1) Improved Efficiency in the Manufacture and Transportation of Construction Materials

It is anticipated that the ratio of reusable energy supply will grow in the future while the ratio of fossil-fuel dependence will decrease. As the ratio of fossil fuel dependence falls, so too will the CO₂ emission factor, leading to expectations of benefits such as reduction in CO₂ emissions produced during the manufacture of construction materials and further reductions arising from the use of electric and natural gas vehicles for transportation.

Improving efficiency by the use of equipment in manufacturing plants such as boilers with high-energy-conversion efficiency and promoting local production and consumption to reduce the distances over which construction materials are transported will enable reductions in both embodied energy and CO₂ levels.

(2) LCA Evaluation at the Design Stage

It is important that LCA evaluation be conducted and preliminary calculations of embodied energy be performed at the design stage. In addition, setting a long useful life of the buildings by employing the skeleton-infill method, for example, makes it possible to reduce annual embodied energy and CO₂ levels.

(3) Reduction in Materials Used

Since the embodied energy and CO₂ levels of a building tend to increase in proportion to the amount of material used, it is essential to reduce the amount of such material as far as possible. Moreover, it is also important to select materials with low rates of embodied energy and CO₂ intensity.

Embodied energy includes energy consumed during earlier processes such as manufacturing and transportation, and this makes it difficult to assess energy consumption volumes compared to operating energy. However, it is likely that the sizeable potential for reduction will drive future undertakings to decrease embodied energy to a greater extent than ever before.