

都市代謝基盤の環境調和性の評価に関する研究

THE EVALUATION OF URBAN INFRASTRUCTURE'S ENVIRONMENTALLY SOUND ASSESSMENT

加藤 悟*・盛岡 通**

KATO Satoru*, MORIOKA Tohru**

(全文審査の上、受理。1994年7月25日)

ABSTRACT ; Human activities are consuming great quantities of energy and also wasting lots of resources. It is not sufficient to evaluate only the energy flow in environmentally sound urban infrastructure, and there is a necessity to consider the Life-Cycle Energy Assessment. This research also attempt to evaluate the Land-use planning and Resources Utilization Planning based on the urban infrastructure as the core of urban area.

Energy Analysis of construction materials, the water supply industries and energy supply facilities etc. have been progressing in several streams / trends. Energy Analysis method has been proposed. The Urban-centred Life-Cycle Energy of regional air-conditioning facility has been assessed. The research has also shown the relationship between the Land-use Planning & Resources Utilization Plannig and the urban's environmental loading. The controversy of centred or well-spread urban's facilities has been further discussed.

KEYWORDS ; energy analysis, CO₂ emission, urban infrastructure, co-generating system

1. はじめに

都市での人間活動は、都市基盤の上に成り立っている。都市基盤が都市での生活に必要なものを供給し処理している。人間の活動や物資の輸送もその上に成り立っている。しかしその反面、これらの都市基盤が環境負荷をも発生させ、これは人間にとってマイナスの要因になっている。

道路やエネルギー供給施設、処理施設といった都市代謝基盤は、都市での環境負荷の発生に直接関係するばかりでなく、都市活動を支える骨格であり、都市のスケールを規定する要因になっている。今後、「高密度分散型で自然環境を豊富に有し、資源を循環型に高効率に利用する代謝装置を持つ」ような環境調和型都市を建設するにあたっては、都市基盤に関係する都市代謝系の環境調和性を評価することが重要になる。

2. 都市基盤へのエネルギー分析

日本においてエネルギー・アナリシスは、1987年以降地球温暖化問題の枠組みのなかで再び見直されるようになった。エネルギー・アナリシスは、「一つの財の生産、活動を行うのに、直接および間接に必要なエネルギーを算出し、エネルギー消費という眼からその財の価値を見直す試み¹⁾」と定義される。

このエネルギー・アナリシスを財や活動だけでなく都市基盤にも広げることによって、都市の形成時と使用時に必要なエネルギー量、環境負荷発生量を評価することが可能となる。本研究における都市代謝基盤の環境調和性とは、都市の資本形成段階においても、また都市活動段階においても環境負荷発生量が小さく抑えられることをさす。実際には、環境調和性の評価に関しては①利便性が高いこと、②環境負荷発生量が小

* 東京大学大学院博士後期課程 Graduate student, Dept.of Socio-Technological Research, Tokyo Univ.

** 大阪大学教授 工学部環境工学科 Prof.of Osaka Univ., Dept.of Environmental Engineering

さいこと、③リスクが低いこと、などの評価軸を取り上げるべき²⁾ではあるが、本研究においては、地球温暖化問題に対応してエネルギーの消費に伴う二酸化炭素排出構造に限定する。ここでは、都市基盤のエネルギー分析の手法をまとめ、地域冷暖房システムでケーススタディーを実施した。

3. 都市基盤のエネルギー評価手法

3.1. 産業連関表を用いた分析手法

ある財やシステムのエネルギー消費構造の分析方法には大きく分けて積み上げ法と産業連関分析法の2つの方法がある。積み上げ法は、基盤・装置を構成する機器をさらに財のレベルに分け、財の素材・加工・組立の各プロセスで直接投入されるエネルギーを積算する方法である。産業連関分析法は、産業連関表の逆行列表を用いることによって、ある産業への需要額あたりの究極的に誘発される金額からエネルギー需要量を求める方法である³⁾。

実際には二つの手法の欠点を補うために、手法を組み合わせる場合もある。特に都市基盤のようなシステム性のある対象のエネルギー評価の場合は、産業連関表のような粗い分類だけでは評価できないので、システムを構成する部品を産業連関表の分類に分解して、産業連関分析法で算出したエネルギー集約度（金額1単位あたり究極的に誘発されるエネルギー量）を乗じて、施設の建設時に必要なエネルギー量を算出する方法がある。

3.2. 先行研究の分析手法

これまでにも都市基盤を対象にした研究はなされている。都市・都市基盤を対象になされたエネルギー分析の研究の対象・概要・手法の概要を表1⁴⁾に示した。

都市全体のライフサイクルエネルギーを算出するためには、このような個別の研究の結果を総合する方法も考えられる。まだ研究によって結果にばらつきがあるが、研究の数が増えれば分析結果にもばらつきが少なくなり、分析手法も洗練されてくるだろう。

表1 都市のエネルギー分析のまとめ			
研究者	研究対象	研究項目	研究手法
岡	事務所 住宅	床面積あたりのインシヤルエネルギー消費量	見積表の金額ベースに産業連関表逆行列から求めた原単位をかける
今井	水道事業	取水・導水・浄水・配水システムの建設・運用エネルギー	運用に関しては積み上げ方式、施設に関しては建設費用に産業連関表から原単位をかける
松本	水循環のシステム	水循環のモデルを組み、各種設備や管路を用いて建設・維持管理エネルギー	金額ベースに産業連関表で第二次エネルギー投入率までの原単位をかけ、原料分を控除する
山下	下水廃熱回収	下水廃熱からの熱回収量の見込み	下水の流入温度と環境温度の差と流量から熱量を求め、他の条件からエネルギーを求める
楠田	下水処理場	消化ガスからのエネルギー回収・発酵処理・堆肥化と運搬管理費	全国調査データなどから回収率を用いた
大平	下水処理場	消化ガスと熱エネルギーの処理場内での回収システム	エネルギー収支のモデルを構築し必要エネルギー量などを算出
岡本	都市資本	単位工費あたりの資源消費量エネルギー消費量（建設時）	産業連関表逆行列から資源投入量にエネルギー消費原単位をかける
池田	都市資本	単位金額生産あたりのエネルギー消費量	産業連関表逆行列からエネルギー部門をかけた
内山	発電所	エネルギー収支比 正味エネルギー収支	採掘・輸送の設備、運用エネルギーを積み上げ
森口	都道府県	起源別・消費部門別（製造・民生・運輸）エネルギー消費	おもにエネルギー供給サイドから
盛岡	都道府県	消費部門別（産業・家庭・民生・運輸・廃棄物・変換部門）、起源別エネルギー消費量	産業・運輸は供給サイドから、家庭・民生は需要サイドから、廃棄物は廃棄物回収量から
平松	7大都市	消費部門別（家庭・製造・交通・業務）エネルギー消費	家庭・製造は需要サイドから、交通・業務は残りの部分を按分

3.3. 産業連関分析法適用の問題点

都市基盤の評価を産業連関分析法で行う場合に留意すべき点は、工事費用を的確に産業連関表の分類に分配することにある。工事費用には流通マージンや輸送にかかる費用などが内包されており、さらにそれぞれのエネルギー集中度も異なる。したがって工事価格の細かい内訳を把握するとともに、内包されている複数の産業部門に振り分ける必要性が生じる。構成している財や機器を細かく分類して、産業連関表などから求めることができるエネルギー集中度との整合性をはかる必要がある。

本研究では、建設時にかかる工事費用を一般管理費、経費、材料費、労務費等に細かく分類し、従来の一律に原単位を乗じる方法よりも計算の精度を向上させることを主眼にしている。また、システムを構成する機器レベルに分解することによって、産業連関表では直接に二酸化炭素排出原単位が求められないシステムのエネルギー分析が可能になる。分析対象とした地域冷暖房はこの方法を用いた。

3.4. 地域冷暖房を例とした産業連関分析法

本研究では既存するコージェネレーションシステムを含む地域冷暖房システムを想定し、その建設時からエネルギー供給までのエネルギー分析を産業連関分析法を用いて行った。価格が入力データになるのだが、実際の工事価格は入札等の内部事情によって価格が決定するので、分析では利用できないなどの理由から、システムの容量や仕様をもとに積算資料等を用いて個々の構成機器の標準的な価格を推定し、その価格に産業連関表逆行列表を用いて求めた二酸化炭素排出係数を乗じて、二酸化炭素排出量を算出した(図1)。システム運転時に関しても同様に、必要な費用から求めた(図2)。ここで想定したシステムの主要機器の仕様は表2の通りで、システム全体では、14700 USRT(冷凍トン)である。

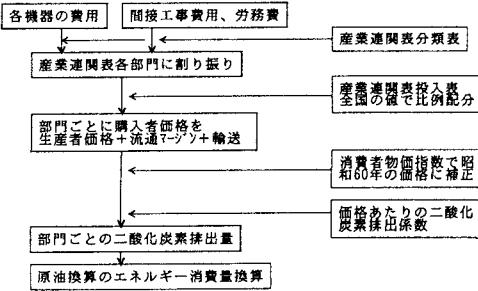


図1 価格から二酸化炭素排出量を算定するフロー

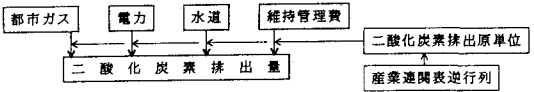


図2 ランニングの二酸化炭素排出量算出方法

システムを建設する企業体が支出する費用のみをカウントし、資源採掘から加工、組立に必要なエネルギーは価格として内包されていると考えた。したがって廃棄物処理にかかるエネルギーは費用として外部化されているので、この方法では計算の範囲から除外されることになる。また、エネルギー原単位は石油等消費構造統計表の値を用い、産業連関分析の二酸化炭素排出原単位は松本ら⁵⁾の研究の値を用いた。また、費用振り分けで用いた費用配分の仮定条件は表3の通りで、この値は地域冷暖房建設の業界での計算の用いられている値の調査結果と建設工事標準歩掛の値から求めている。

表3 費用配分の仮定条件

冷凍トンあたりの地域冷暖房の総額	36万円
一般管理費	工事原価の9.39%
間接工事額	直接工事額の18.55%
経費	直接工事費の7%
機械工事：電気工事：配管工事	6：4：5

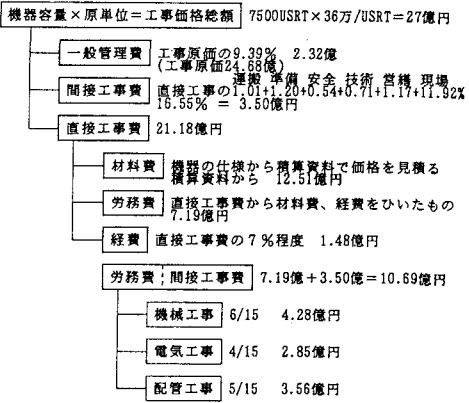


図3 投入費用の部門振り分け法

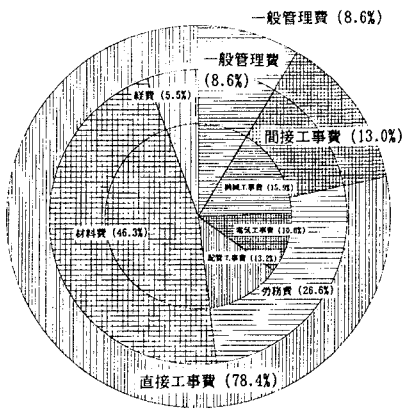
表4 地域冷暖房システムの工事価格と産業連関表の部門対応 (価格単位：千円)

機器種別	種類	台数	価格小計	産業連関表対応
冷凍機	ボイラー	3	453,492	冷凍機
ボイラー	ボイラー	2	135,918	ボイラー
冷凍機	冷凍機	1	90,279	冷凍機
冷凍機	冷凍機	2	64,547	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	14,784	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	41,480	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	41,701	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	2,706	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	1,851	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	180,000	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	14,873	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	38,972	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	58,697	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	8,623	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	100,000	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	18,378	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	4,298	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	12,600	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	427,018	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	356,265	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	231,767	冷凍機
冷凍機	冷凍機	1	148,242	冷凍機
総計金額			2,700,000	

計算においては、まず冷凍機の容量から建設費総額を求め、一般管理費と間接工事費と直接工事費に配分する。直接工事費の中から、経費を仮定条件の割合で引き、さらにシステム構成機器の全費用を材料費として引いた残りを労務費として配分した（図3、図4）。

一般管理費と経費は付加価値部門に相当するとし、これはエネルギー需要非誘発部門であるので、環境負荷発生量をゼロとした。一般管理費とは、工事施工にあたる企業の継続運営に必要な費用を指し、従業員給料手当、調査研究費などである。労務費と間接工事費は主として工事に従事する人件費と工事機械や運搬費、準備費、仮設費を含んでいる。これに対しての二酸化炭素排出原単位は、産業連関表の分類で的確に当てはまる項目はないが、一般的な工事で仮設費が含まれていることを考えると、電力施設建設と下水道等公共施設建設に最も近いと考えられる。産業連関表の部門分類では、資材の投入も含んでいることから、若干二酸化炭素排出量が過大評価されている可能性があるが、分類部門で資材費の構成比率が小さいと考えられ、さらに費用としては二重計算しておらず原単位を援用しているだけであることから、この誤差は比較的小さいと考えられる。これらの価格の産業連関表の分類部門への対応を表4に示した。

こうして求めた価格は購入者価格なので産業連関表より国内における比によって生産者価格、流通マージン、運輸の各価格に分配した。それぞれの部門の価格に産業連関表の逆行列表から求めた原単位を乗じて、環境負荷発生量を算出した。今回は地球温暖化問題を考慮して二酸化炭素排出量に着目して建設にかかるイニシャル分、年間必要なランニング分（エネルギー供給のために必要な分、設備補修に必要な分も含む）をそれぞれ求めた。その計算の結果を図5、表5に示した。



(総額：7500US\$×36万/US\$=27億円)

図4 コージェネレーションシステムの投入費用内訳

表5 年間二酸化炭素排出量

年間二酸化炭素排出量	使用量	原単位	二酸化炭素排出量
投入側			
都市ガス	34953.6 Gcal	0.2141 CO ₂ /Gcal	7483 CO ₂ t
電力	3354 Gcal	0.5202 CO ₂ /Gcal	1745 CO ₂ t
水道	0.1083 100万円	1.9270 CO ₂ /100万円	0 CO ₂ t
維持費	37.8 100万円	3.8610 CO ₂ /100万円	146 CO ₂ t
合計			9374 CO ₂ t

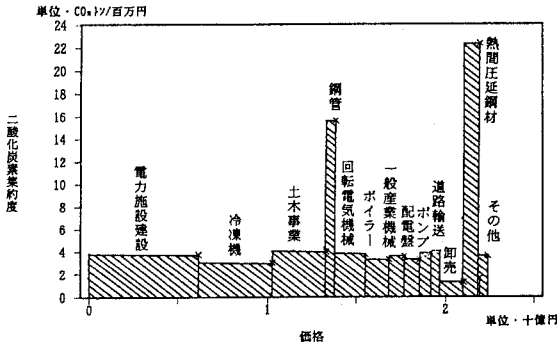


図5 地域冷暖房システムの建設による二酸化炭素排出量

4. ライフサイクルエネルギー分析からの考察

4.1. イニシャルとランニングの二酸化炭素排出量

分析の結果、建設による二酸化炭素排出量は 8274CO₂tであり、運転や補修による年間の二酸化炭素発生量は 9374CO₂tとなり、地域冷暖房システムの建設にはほぼ一年分の二酸化炭素が排出されることがわかった。火力発電所などはシステムが単純なこともあって、1000MW規模の発電所では建設にかかる二酸化炭素排出量は0.08年分程度である。したがって、地域冷暖房は、比較的多くの初期投資が必要であることがわかる。しかし、エネルギー供給施設の場合ランニングでの二酸化炭素発生量が大きいので、運転時の効率がポイントになってくると考えられる。

4.2. エネルギー供給源代替による評価

コージェネレーションシステムのエネルギー削減効果の評価は、コージェネレーションシステムで供給した熱と電気をそれぞれ個別のシステムで代替した場合と比べて評価する方法がある。対象とした地域冷暖房についてコージェネレーションを個別システムで代替した場合に、条件として商用購入電力を一定値として都市ガス供給量のみの増減で評価すると、エネルギー消費量率は、

$$352 \div 431.1 = 81.7\% \text{ (単位：年間都市ガス使用量、万} \text{m}^3 \text{)}$$

で、この時のエネルギーフローが図6、図7（数値は割合で表示）である。したがって、供給されるエネルギーを個別の供給装置で代替したときに比べ約20%のエネルギー削減効果があることがわかる。先の結果よりイニシャルとランニングの二酸化炭素量はほぼ同じであることから、単純計算ではエネルギー償却期間は約5年であることがわかる。現実の耐用年数が20年程度であることから判断すると、エネルギー供給施設に限れば、資本形成の投資がいかに重要であるかがわかる。

また、耐用年数を考慮した年間の二酸化炭素排出原単位は 198.9gC/kWh（一次エネルギー換算）となり、大規模集中型の火力発電所の二酸化炭素排出原単位⁶⁾（石油火力耐用年数20年:200.3gC/kWh）とあまり変わらないものとなった。これによって、エネルギーの供給形態を工夫することによって都市内の分散型のシステムであっても、大規模集中型のシステムに劣らない性能が得られることがわかった。

これらの評価は、発電所や地域冷暖房の施設の出口でのエネルギー評価になっている。したがって実際には送電、配管でのエネルギー消費量を考慮すべきである。地域冷暖房に関しては地域配管の工事にかかるエネルギーが大きな割合になっていることから、大量のエネルギー需要のあるところに、特に配管ロスの大きい熱需要が大きいところに設置することが重要と思われる。

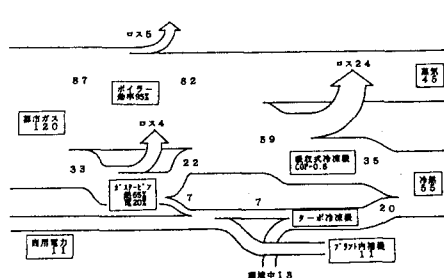


図6 プラント内エネルギーフロー

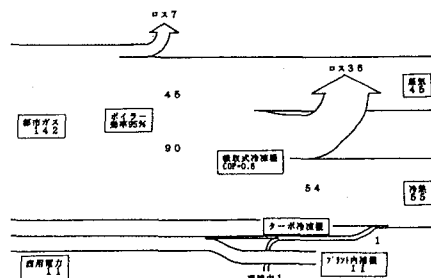


図7 個別システム代替時エネルギーフロー

4.3. 技術革新の環境調和性への影響

現代の技術の進歩は、エネルギー供給施設の効率を向上させるのに寄与している。効果があるといわれている技術革新は、①発電効率の向上、②所内率の低減、③設備利用率の向上、④耐用年数延長、⑤設備物量の削減、⑥素材の原単位の改善、などである⁷⁾。本研究では、他の研究の基礎的データを用いて①発電効率の向上と④耐用年数延長の2つの効果について検討した。

石油火力発電プラントにおける発電機効率は現在39%程度だが、さらに5%向上し44%になると、二酸化炭素排出量は設備に必要なエネルギーも含めたトータルエネルギーで、11.4%も削減されることがわかった。これは、設備建設で排出される二酸化炭素量が運用保守で排出される二酸化炭素量に比べ小さいことが影響している。今後のエネルギー供給装置の技術開発が重要になってくると考えられる。

また、設備の耐用年数が多少伸びてもトータルでの二酸化炭素排出原単位はほとんど変化しないことがわかった。したがって、エネルギー供給施設に関していえば、古いものを長く使い回すよりも新技術を取り入れたものに新規更新していった方がエネルギー消費量的に有利であることがわかった。

5. 都市基盤の評価の意義

都市基盤のエネルギー分析を行うことによって、都市全体の建設から利用にいたるまでのエネルギー消費構造全体を解明することができる。個別の財に関しては、P L C A (Product Life-Cycle Assessment) としてさまざまな分野で分析がすすめられているが、人間活動にサービスを提供し都市での利便性を向上させている都市基盤のエネルギー分析が今後重要になってくる。

地球規模の環境問題に対応して環境調和型の都市建設を進めていく上で、都市のエネルギー消費に大きく関与する都市基盤が環境調和性を持つことは重要なこととして理解される。本研究でケーススタディーの対象とした地域冷暖房はコンパクトシティの核となる施設として注目されているが、大規模発電プラントと比べ発電効率だけで比較すると低くなるが、熱供給も考慮すると効率はあまり変わらないものとなった。ライフサイクルエネルギー分析の結果によると、地域冷暖房では、建設に投入されるエネルギーは大規模発電所に比べて多く必要であるが、施設建設に必要なエネルギーと年間の施設運転に必要なエネルギーはほぼ同じで、耐用年数20年程度という点を考慮すると、地域冷暖房のライフサイクルエネルギー全体のなかでは施設建設に必要なエネルギーはわずかである。エネルギー供給施設に関しては、運用エネルギーを削減することが重要である。熱需要密度が高い地域には、多少初期投入エネルギーが高くても地域冷暖房のような、電力も供給する環境調和型の都市基盤整備を進めることが重要になってくる。

6. おわりに

環境調和型の都市を形成するための評価体系は、都市建設にかかるイニシャル部分も考慮することが重要であることを述べてきた。これらの評価体系の作成は、環境評価が単一な評価の寄せ集めではなく、総合的な評価であることを考慮した。本研究においてはエネルギーの消費量というただ一断面をとらえるにとどまっているが、イニシャルとランニングでの両面での総合評価の手法を提案した。これによって、

- ①地域（都市）でのエネルギー消費構造の把握をし、
- ②現状において無駄なエネルギーの消費が行われていないか自立的に評価し、
- ③今後都市計画において環境負荷の排出程度を予見的に評価し、
- ④エネルギーをカスケード利用する可能性を検討すること

が可能になる。都市基盤は社会や経済に与える影響も大きく、今後の都市での活動の持続のためにはインフラチェンジが重要な役割を果たすともいわれている。インフラチェンジによって今後形成される都市基盤が環境調和性を持っているかを評価することが今後重要な課題となるだろう。

<参考文献>

- 1) 茅場一(1980)『エネルギー・アナリシス』, 電力新報社, 294pp.
- 2) 盛岡通(1993)エコ商品の市民団体による連携型評価システム, 環境システム研究21, p156-163.
- 3) 井村秀文(1993)地球規模の環境インパクト定量化手法, 環境科学会1993, p178-179.
- 4) 岡建雄ら(1992)産業連関表による建築物の評価, 日本建築学会計画系論文報告集431, p31-38.
今井茂樹ら(1993)水道事業におけるエネルギー消費の分析, 水道協会雑誌62-4, p40-49.
松本重行ら(1993)エネルギーアナリシスによる水循環システムの評価, 環境システム研究21, p.355-363.
山下孝光(1991)都市における下水廃熱の利用可能性に関する研究, 環境システム研究19, p76-82.
楠田哲也(1992)エネルギーと経済費用見積による下水道の評価, 環境システム研究20, p270-279.
大平晋ら(1993)下水処理場のエネルギー解析に関する研究, 環境システム研究21, p364-374.
岡本秀靖(1993)土木工事における炭素排出量の推定, 第1回地球環境シンポジウム講演集, p93-98.
池田秀昭ら(1993)社会資本整備に伴う環境インパクトの定量化に関する研究, 環境システム研究21, p192-199.
内山洋司ら(1991)発電プラントのエネルギー収支分析, 電力中央研究所報告Y90015, 75pp.
森口祐一ら(1992)わが国の部門別、起源別、地域別CO₂排出量の推計, 環境衛生工学研究6-3, p92-97.
盛岡通ら(1993)地球温暖化防止施策検討のための都道府県単位の二酸化炭素排出構造の試算, 環境システム研究21, p180-185.
平松直人ら(1992)エネルギー消費の大都市間比較, 環境システム研究20, p252-261.
- 5) 松本泰明ら(1993)日本の輸出品の二酸化炭素集約度からみた炭素税負担移転の先進国・発展途上国間比較, 地球環境シンポジウム1, p112-117.
- 6) 内山洋司ら(1992)発電プラントの温暖化影響分析, 電力中央研究所報告Y91005, 49pp.
- 7) 環境庁企画調整局(1992)地球温暖化対策ハンドブック<5 エネルギー編>, 第一法規, 187pp.