

地域特性を考慮した地域冷暖房システムのライフサイクル分析

Life Cycle Analysis of the District Heating and Cooling System Reflecting Local Conditions

汐崎 剛* ・ 森口 祐一**
Go SHIOZAKI, Yuichi MORIGUCHI

Abstract: The purpose of this study is to conduct the life cycle assessment of the district heating and cooling system (DHC) with cogeneration system or heat pump system using river water source taking local condition into account. LCE (life cycle energy), $LCCO_2$ (life cycle CO_2), LCCost (life cycle cost) are chosen as indicators, and their inputs to construction and operation of DHC systems are estimated. For this estimation, a new method using the ratio of material energy to processing energy was introduced in this study.

It reveals that about 4~10% of the estimated total LCE and about 5~15% of the $LCCO_2$ are required for the construction of system, but cost of construction stage is 45~65% of LCCost. All of LCE, $LCCO_2$ and LCCost are less as heat supply density is higher. For the area of the same density, LCCost is less as area of system is larger, whereas LCE and $LCCO_2$ are more as area is larger due to the increase of energy for pumping and heat loss. Concerning LCE and $LCCO_2$, it is suggested that the best condition for DHC system is high density of heat supply and compact area.

Key words : Life Cycle Analysis, LCE, $LCCO_2$, District Heating and Cooling

1 はじめに

環境調和型都市を建設する際には、インフラストラクチャーの環境調和性を評価することが重要である。近年その評価手法として、ライフサイクルアセスメントが注目されてきており、この手法を用いて下水道システム¹⁾、都市ニュータウン²⁾、地域冷暖房システム³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾などを対象とした分析が行われてきた。本研究では、特に地域冷暖房システムに着目し、ライフサイクルでの環境負荷を定量的に把握し、環境調和型都市構築における低負荷システムとしての特性を評価することを目的としている。従来の地域冷暖房システムのライフサイクル分析には、伊藤らの研究³⁾、加藤らの研究⁴⁾、佐々木らの研究⁵⁾、日本下水道事業団の研究⁶⁾があるが、これらの研究は、単一プラントの分析や技術比較にとどまっているものもあり、地域性に着目していても運用段階の計算が単純であり、熱供給地区の大きさに依存する熱媒の輸送時における熱損失や配管ポンプ動力などが考慮されていなかった。本研究では、熱供給地区の面積や熱需要、熱供給密度の違いなどに着目し、地区特性による環境負荷の特徴を把握するとともに、省エネルギー技術を熱源機器に導入した場合にライフサイクルでも省エネルギー効果があるかを分析する。環境負荷項目として、資源枯渇と地球温暖化の観点からエネルギーと CO_2 に着目し、システムの実現性の指標としてコストを取り扱い、熱源機器の省エネルギー技術としてコージェネレーションシステムと河川水熱利用ヒートポンプを想定する。

* 京都大学大学院 工学研究科 Graduate student, Faculty of engineering, Kyoto Univ.

** 国立環境研究所 地域環境研究グループ Regional Environment Division, National Institute for Environmental Studies

2 分析の前提と手法

2.1 地域冷暖房システム

地域冷暖房システムとは、一ヶ所または数ヶ所の熱製造プラントで集中的に冷水、温水、蒸気などの熱媒を製造し、地域導管を通して一定地域内の多数の熱需要家建物へ供給し、冷房、暖房、給湯などを行うシステムである。冷熱と温熱をつくる熱源機器には、ボイラや冷凍機が使われるが、本研究ではこれらの機器のほかに、コージェネレーションシステムや河川水利用ヒートポンプを加えたケースを想定した。

2.2 ライフサイクル分析

一般的に、ライフサイクル分析とは、製品や技術システムなどが、その全寿命期間において直接及び間接的に発生させる環境負荷量やコストなどを分析するものである。一方、ライフサイクルアセスメントと呼ばれる場合には、環境負荷項目毎に環境負荷量を算出し、これに重み付けを行って各種負荷項目を単一の数値で総合的に評価し、さらに材料や生産プロセスの代替による改善度評価を行うものである。しかし、異なる負荷項目に重み付けをすることは非常に困難であり、実際にはライフサイクルアセスメントと呼ばれている研究は、本研究でライフサイクル分析と称しているインベントリー分析（ライフサイクルにおいて生じる単一負荷項目毎の負荷発生量の積算）のみを行っている場合が多い。ライフサイクル分析の環境負荷項目は、エネルギー、CO₂、NO_x、BOD などどのような項目でも行うことができる。ライフサイクルのどの段階からどのくらい負荷が生じるかを把握することによって負荷を低減すべき段階がわかり、また、幾つかの技術を比較する上でも、ライフサイクルで評価することによって総合的かつ定量的に比較することができるので、ライフサイクル分析は、インベントリー分析のみでも十分に有用なものである。

ライフサイクル分析の手法には、国や地域などのマクロレベルの分析に適している「産業連関分析法」と、製品や材料などのミクロレベルの分析に適している「積み上げ法」がある¹⁾。産業連関分析法は、対象物の全ての製造過程での環境負荷やコストを産業連関表を用いて算出する方法で、作業量が少なく計算の取りこぼしが少ないが、大まかな分類でしか対象物を取り扱うことができない。積み上げ法は、対象物の製造過程を遡って各工程での素材量、消費燃料など分析対象となるデータを積み上げていく方法で、精度が高いが、作業量が多く、データ入手が困難である。

地域冷暖房システムのように、多数の製品や素材、インフラストラクチャーから構成される技術システムを分析対象とする場合は、積み上げ法によってあるレベルまで構造物を細かく積み上げて計算し、残りの部分を産業連関表から求める「組合せ法」を用いることが有効である⁷⁾。入手データに限りがある場合は、積み上げ法の精度を活かし、産業連関分析法で補完する「組合せ法」が、精度が高いと考えられ、本研究ではこの分析法を用いる。

2.3 分析の基礎的設定

(1) モデル地区の設定

対象とする供給面積は、5ha、15ha、45haを設定する。道路率を20%とし、敷地率を80%とする。容積率は、33%、100%、300%、900%の4段階を設定している。建物用途は業務施設とし、熱需要原単位は、東京都が平成2年度に行った熱需要の実態調査結果を基に設定し、ピーク熱需要量で、冷熱70kcal/m²・h、暖房給湯53kcal/m²・hとし、年間熱需要量で、冷熱80Mcal/m²・y、暖房給湯35Mcal/m²・yとする⁸⁾。熱需要原単位の参考にした資料では⁸⁾、業務施設は事務所建物を指している。なお、業務施設のピーク熱需要は、商業施設や文化施設、宿泊施設のそれらの平均的な値であり、年間熱需要では他の施設より小さくなるが、本研究では、一般的に地域冷暖房の供給地区では事務所の利用面積が最も多いと考え、商業施設や文化施設を混合して計算せずに一律に業務施設だけで計算した。

上記の熱需要原単位に各モデル地区の延床面積を乗じて、各モデル地区における熱負荷を推計すると、表

1になる。対象施設の設定として、建物用途を業務のみと想定しているため熱需要量は、供給地区内の建物延床面積に比例する。プラント容量は、地区の熱需要に安全率を乗じて算出する。

以後、本論文で使用する各モデルをアルファベットの a、b、c と数字の

5、15、45 を組み合わせて表現する。モデル地区の立体的イメージを図1に示す。アルファベットは熱供給の絶対量を表

しており a はプラント容量 2800RT、b はプラント容量 8400RT、c はプラント容量 25200RT を表している。熱供給量の単位 RT は、冷凍トンと呼ばれ、地域冷暖房システムでは冷熱需要で設備規模が決定される場合が多いので、習慣的に冷凍単位を用いる（1冷凍トン＝3.024Mcal である）。数字は、供給地区面積を表しており、それぞれ 5ha、15ha、45ha とする。プラント容量及び供給地区面積は、それぞれ 3 倍間隔に設定している。供給地区面積や熱供給量が異なっても、熱供給密度（熱供給量/供給地区面積）としては、b5 と c15 や、a5 と b15 と c45、a15 と b45 が同一熱供給密度であり、供給地区面積の違いによる分析や、熱供給量による分析だけでなく、密度の違いによる分析も可能となる。

表 1 各モデルの熱負荷

	地区面積 (ha)	容積率 (%)	延床面積 (㎡)	ピーク熱負荷			年間熱負荷		プラント容量 (RT)	熱供給密度 (kcal/h・㎡)
				冷熱 (Mcal/h)	冷凍容量 (RT)	温熱 (Mcal/h)	冷熱 (Gcal/y)	温熱 (Gcal/y)		
モデルa5	5	300	120000	8400	2778	6360	9600	4200	2800	169
モデルb5	5	900	360000	25200	8333	19080	28800	12600	8400	508
モデルa15	15	100	120000	8400	2778	6360	9600	4200	2800	56
モデルb15	15	300	360000	25200	8333	19080	28800	12600	8400	169
モデルc15	15	900	1080000	75600	25000	57240	86400	37800	25200	508
モデルa45	45	33	120000	8400	2778	6360	9600	4200	2800	19
モデルb45	45	100	360000	25200	8333	19080	28800	12600	8400	56
モデルc45	45	300	1080000	75600	25000	57240	86400	37800	25200	169

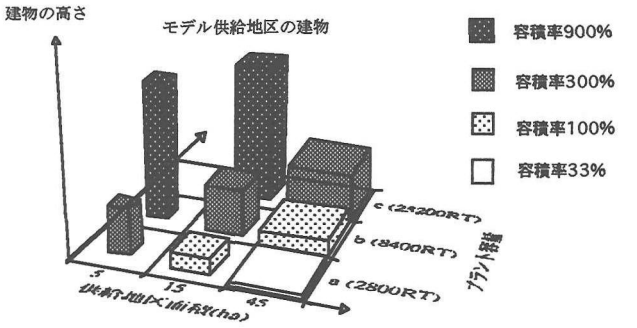


図 1 モデル供給地区のイメージ

(2) 熱源機器構成

前述したように、本研究では地域冷暖房方式 4 ケースを想定し、各ケースについて熱源機器構成を設定する。また、比較のため、地域冷暖房を行わず建物ごと個別に冷暖房を行う個別方式も分析に加えた。各ケースの熱源設備を表 2 に示し、各熱源機器の COP（エネルギー効率）を表 3 に示す。

表 2 熱源方式別の熱源設備(8400RT)

熱源方式	熱源設備	総容量	分割容量	分割台数
個別方式 地域冷暖房を行わない方式	吸収式冷凍機	9240 (RT)	地区面積による	
	蒸気ボイラ	45 (t/h)	地区面積による	
	冷却塔	9240 (RT相当)	地区面積による	
	冷却水ポンプ	160 (㎡/min)	地区面積による	
ケース1 従来方式	吸収式冷凍機	7300 (RT)	1700	4
			500	1
	電動ターボ冷凍機	1100 (RT)		1
	蒸気ボイラ	36 (t/h)	12	3
	冷却塔	8400 (RT相当)	700	12
	冷却水ポンプ	144 (㎡/min)	16	9
ケース2 河川水ヒートポンプを導入した方式	取水ポンプ	60 (㎡/min)	6	10
	吸収式冷凍機	5800 (RT)	1350	4
			400	1
	蒸気ボイラ	28 (t/h)	18	1
			10	1
	水熱源ヒートポンプ	1600 (RT)		1
ケース3 コージェネレーションを導入した方式	配水ポンプ	60 (㎡/min)	6	10
	取水ポンプ	84 (㎡/min)	12	7
	蓄熱槽	7060 (㎡)		1
	吸収式冷凍機	7300 (RT)	1700	4
			500	1
	電動ターボ冷凍機	1100 (RT)		1
ケース4 河川水ヒートポンプとコージェネレーションを導入した方式	蒸気ボイラ	32 (t/h)	12	1
			10	2
	排熱ボイラ	4 (t/h)		1
	ガスタービン	1300 (kW)		1
	冷却塔	8400 (RT相当)	700	12
	冷却水ポンプ	144 (㎡/min)	16	9
ケース5 河川水ヒートポンプとコージェネレーションを導入した方式	取水ポンプ	60 (㎡/min)	6	10
	吸収式冷凍機	5800 (RT)	1350	4
			400	1
	蒸気ボイラ	24 (t/h)	12	2
	排熱ボイラ	4 (t/h)		1
	水熱源ヒートポンプ	1600 (RT)		1
ケース6 河川水ヒートポンプとコージェネレーションを導入した方式	ガスタービン	1300 (kW)		1
	配水ポンプ	60 (㎡/min)	6	10
	取水ポンプ	84 (㎡/min)	12	7
	蓄熱槽	7060 (㎡)		1
	吸収式冷凍機	7300 (RT)	1700	4
			500	1

表 3 各熱源機器の COP

熱源機器	使用エネルギー	COP	備考
吸収式冷凍機	蒸気	1.25 ¹⁾	(ガス換算で1.125)
電動ターボ冷凍機	電気	5.1 ²⁾	
蒸気ボイラ	ガス	0.9 ³⁾	地域冷暖房方式
		0.6 ⁴⁾	個別方式*
河川水ヒートポンプ	電気	3.7 ⁵⁾	冷熱
		4.9 ⁵⁾	温熱
ガスタービン	ガス	0.47 ⁶⁾	(発電効率は0.26)

*部分負荷を考慮している。

- 1) 荏原製作所「エバラ吸収冷凍機」
- 2) 荏原製作所「エバラ新冷媒ターボ冷凍機」
- 3) 兵庫県：平成元年度地域冷暖房モデル導入計画調査、1990
- 4) 東京都環境保全局：地域冷暖房推進に関する指導要綱、1991
- 5) 荏原製作所「エバラ地域冷暖房」
- 6) 民間都市開発推進機構：エコシティ整備のためのケーススタディ

表 2には 8400RT の容量を記載しているが、容量の比率は 2800RT、25200RT でも同様である。各熱源機器の容量の決定の方法は、まず温熱ピーク需要に合わせてボイラ容量を決め、それによって吸収式冷凍機の容量が決まり、残りをターボ冷凍機に割り当て、ヒートポンプなどは、資料を基に機器容量の比率を決定した。同種類の熱源機器も、関連業界からのヒアリングに基づいてモデル地区に適した容量に分割し、カタログより選定した。個別方式のピーク熱需要は地域冷暖房に比べてピークが集中するためプラント容量を地域冷暖房より 1 割大きくする⁸⁾⁹⁾。また、個別方式は地域配管を有していないため地域冷暖房システムに比べて熱損失やポンプ動力が小さくなるが、熱源機器の規模が小さく負荷変動も大きくなるために機器の効率は悪くなると考えられる。蓄熱槽は夜間にヒートポンプで9時間蓄熱し 14 時間放熱できるように、プラント容量 2800RT、8400RT、25200RT でそれぞれ 333RT、1000RT、3000RT の能力を持つように設定し、蓄熱槽内の温度変化を 6℃として蓄熱槽体積を算出した。

(3) 供給熱媒、地域導管の設定

冷熱、温熱を供給している地域冷暖房の地域配管としては、蒸気と冷水の往管、返管の 4 管方式、温水と冷水の往返の 4 管方式、蒸気、温水、冷水の往返の 6 管方式が主流である。これらの熱媒体は熱源機器によって異なり、ボイラがあれば蒸気が熱媒体となり、ヒートポンプがあれば温水が熱媒体となる。本ケースでは、ケース 1、3 が蒸気と冷水の 4 管方式で、ケース 2、4 が蒸気と温水と冷水の 6 管方式となっている。

また、地域配管の敷設方式としては、地域配管の 75%を直埋設方式、25%を専用溝敷設方式と設定する⁸⁾。本研究では、モデル地区を横縦 71m×141m の 1ha のブロックに分け、各ブロックの中央でそのブロックでの熱需要を満たすように熱媒体流量を求めて管径を設定し、配管をめぐらせる。図 2 に導管図を示す。熱媒体の流速は、冷温水で 2.5m/s 以下、蒸気で 25m/s 以下と設定する⁹⁾。以上の条件により算出される本モデル地区での地域導管の管径と長さを例としてケース 2、4 について表 4 に示す。こうした配管の諸元は後に行う配管工事の分析や熱損失量の計算に用いる。

表 4 地域導管の管径と長さ

モデル地区	地域導管	冷水管				温水管				蒸気管			
		管径(m)	長さ(m)	管径(mm)	長さ(mm)	管径(m)	長さ(m)	管径(mm)	長さ(mm)	管径(m)	長さ(m)	管径(mm)	長さ(mm)
モデルa5	318	212	200	200	20	10	500	550					
モデルb5	318	106	350	300	40	20	500	900					
モデルa15	1131	424	125	100	20	10	500	550					
モデルb15	1131	283	150	150	20	10	500	900					
モデルc15	1131	424	250	200	20	10	500	1600					
モデルa45	3394	707	100	100	10	10	500	550					
モデルb45	3394	707	125	100	20	10	500	900					
モデルc45	3394	707	200	200	20	10	500	1600					

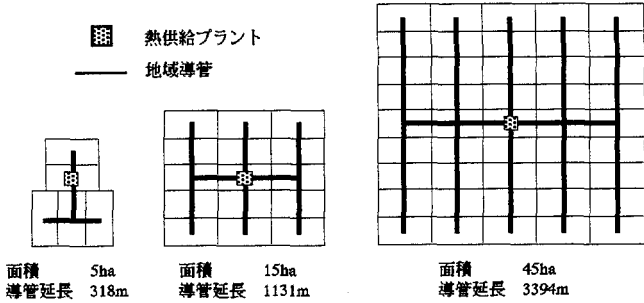


図 2 各モデルの導管図

(4) 計算に使用する原単位

建設段階の算定で必要となる資材や製品、燃料、電力の原単位は、産業連関表の 1990 年度基本表 408 部門の投入係数表を使用し、産業連関分析の(I-A)⁻¹型によって金額ベースで作成した。また、金額ベースの原単位を製品や工事の価格にそのまま乗じると、単価のばらつきによる誤差を生むので、408 部門より詳細な部門別品目別国内生産額表の品目単価を乗じて物量ベースの原単位も作成した。本研究では、できるだけこの物量ベースの原単位を使用する。

都市ガスや電力、軽油などの原単位を表 5 に示す。これらの値は、燃料自身が持つエネルギー及びその燃焼による CO₂ 直接排出量の他、燃料の製造段階で要するエネルギー及びこれにともなう CO₂ 排出量を含めたものである。前者は資料の値¹⁰⁾¹¹⁾を使用し、後者は上記の産業連関分析から求めた。なお、電力については、発電効率だけでなく送電ロスや発電所内電力などを考慮した 1 次エネルギーで評価した。

表 5 燃料原単位

	エネルギー強度	CO ₂ 強度
都市ガス	10758 kcal/m ³	0.6089 kgC/m ³
電力	2607 kcal/kWh	0.1236 kgC/kWh
ガソリン	9777 kcal/l	0.7431 kgC/l
軽油	9985 kcal/l	0.7780 kgC/l

2.4 製品の製造エネルギーの新たな推定法

本研究では、分析方法として「組合せ法」を用いるが、製品の全製造エネルギーの推定において、積み上げ法と産業連関分析法の利点を組合せ、限られたデータを利用してより細かい段階まで積み上げ計算を行うことができる「素材組立比法」を考案し、利用した。これまでの多くの研究では、製品レベルの計算は、産業連関表の値をそのまま使う⁴⁾か、素材構成比をもとに、素材の製造エネルギーの積み上げによっている³⁾⁶⁾。前者では、同一部門の中では価格当たりの原単位が同一なので、地域冷暖房の熱源機器のように、生産規模の小さい割高な機器では過大推計の恐れがある。後者では、機器の物的な構成に基づくより詳細な推計ができるが、素材の製造エネルギーのみでは、素材から部品への加工、部品から製品への組立などの段階で投入されるエネルギーが反映されない。そこで、「素材組立比法」では、素材の製造エネルギーについては後者の考え方をとりながら、産業連関分析法を用いた場合の類似部門における素材エネルギーと組立エネルギーとの比率を用いて、組立エネルギーを推定し、素材データを補完して製品エネルギーを算出する。この分析法は、積み上げ法の精度に近く、限られたデータからの分析では現段階で最も精度の高い分析法であると考えられる。本研究では、熱源機器の分析で、「素材組立比法」を利用する。

素材組立比の算出方法を以下に示す。

ある産業 i の製品の素材組立比 r_i は、次式で定義される。

$$r_i = E_{p,i} / E_{m,i}$$

$E_{p,i}$: ある産業 i の組立エネルギー
 $E_{m,i}$: ある産業 i の素材エネルギー

ある産業 i の製品の製造エネルギー E_i は次式で表される。

$$E_i = E_{m,i} + E_{p,i}$$

$E_{m,i}$: ある産業の素材エネルギー
 $E_{p,i}$: ある産業の組立エネルギー

素材エネルギー $E_{m,i}$ は次式で示される。

$$E_{m,i} = \sum_m b_{m,i} d_m + \sum_m \left(b_{m,i} \left(\sum_e a_{e,m} t_e \right) \right)$$

$E_{m,i}$: ある産業 i の素材エネルギー (Gcal/百万円)
 b : 逆行列係数 d : 直接投入強度 (Gcal/百万円)
 a : 投入係数 t : 総投入強度 (Gcal/百万円)
 m : 素材産業 i : ある製品産業
 e : エネルギー産業

前項は素材部門で消費した燃料の燃焼で生じるエネルギーを表しており、後項は素材部門で消費した燃料を製造するためのエネルギーを表している。

組立エネルギー $E_{p,i}$ は、次式で示される。

$$E_{p,i} = E_{i,i} + E_{t,i} + E_{o,i}$$

- $E_{p,i}$: ある産業 i の組立エネルギー (Gcal/百万円)
- $E_{i,i}$: ある産業 i の自部門エネルギー (Gcal/百万円)
- $E_{t,i}$: ある産業 i の運輸エネルギー (Gcal/百万円)
- $E_{o,i}$: ある産業 i のその他間接エネルギー (Gcal/百万円)

自部門エネルギー $E_{i,i}$ は次式で示される。

$$E_{i,i} = b_{i,i}d_i + b_{i,i}\sum_e a_{e,i}t_e$$

- $E_{i,i}$: ある産業 i の自部門エネルギー (Gcal/百万円)
- b : 逆行列係数
- d : 直接投入強度 (Gcal/百万円)
- a : 投入係数
- t : 総投入強度 (Gcal/百万円)
- i : ある製品産業
- e : エネルギー産業

前項は自部門で消費した燃料の燃焼エネルギーを表しており、後項は自部門で消費した燃料の製造エネルギーを表している。

運輸エネルギー $E_{t,i}$ は次式で示される。

$$E_{t,i} = b_{t,i}d_t$$

- $E_{t,i}$: ある産業 i の運輸エネルギー (Gcal/百万円)
- b : 逆行列係数
- d : 直接投入強度 (Gcal/百万円)
- i : ある製品産業
- t : 運輸産業

その他の間接エネルギー $E_{o,i}$ は次式で表される。

$$E_{o,i} = \sum_j b_{j,i}d_j$$

- $E_{o,i}$: ある産業 i のその他間接エネルギー (Gcal/百万円)
- b : 逆行列係数
- d : 直接投入強度 (Gcal/百万円)
- i : ある製品産業
- j : その他の産業

直接投入強度 d_i は、産業 i が単位生産金額当りに直接消費するエネルギー量であり、総投入強度 t_i は、産業 i が単位生産金額当りに直接及び間接的に消費するエネルギー量である。この算出は、1990 年産業連関表 32 部門を用いた。エネルギー部門は「電力」「石油・石炭」「鉱業」とし、素材部門は「繊維」「パルプ」「化学製品」「窯業・土石製品」「鉄鋼」「非鉄金属」とした。上記の式で算出した 6 つの加工産業の素材組立比を表 6 に示す。負荷価値の高い産業ほど、素材エネルギーに比べて組立エネルギーの割合が高いことがわかる。本研究では、熱源機器の製造段階の計算にこの推定法を用いており、熱源機器を「一般機械」部門として、素材組立比 0.436 を使用した。

表 6 素材組立比

	金属製品	一般機械	電気機械	輸送機械	精密機械	その他の製造工業製品	建設
素材組立比	0.296	0.436	0.894	0.664	0.956	1.046	0.578

3 ライフステージごとの分析方法

本研究の分析フローは図 3 になっている。システムのライフサイクルを、建設段階から解体廃棄段階まで取るのがより完全であるが、ここでは、主な環境負荷発生段階である建設と運用について取り扱う。建設段階は、地域導管工事、熱源設備、その他のプラント設備、プラント建屋に分類し、「組合せ法」「素材組立比法」を用いて地域冷暖房システム建設によるエネルギー消費量、CO₂ 発生量、コストを算出する。運用段階は、熱源主機とポンプ、補給水、配管熱損失に分類する。熱供給によって消費される電力や都市ガスの消費量から、エネルギー、CO₂、コストが算出される。

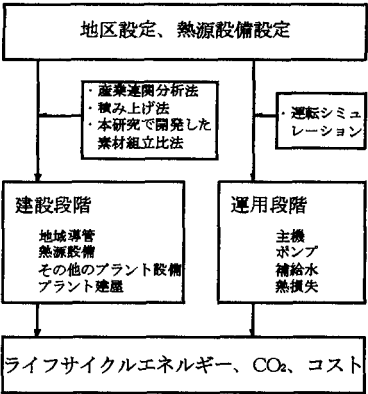


図 3 分析フロー

3.1 建設段階の分析方法

(1) 地域導管

地域導管建設については、施設工事により直接消費する燃料分と資材の製造分、資材や機材の運搬分を積み上げて評価する。各モデル、各ケースにおける配管工事を建設工事標準歩掛¹²⁾や土木工事積算基準マニュアル¹³⁾から設定し、工事の工程毎に細かく分類し、素材量、建設機材使用時間、機材による燃料消費量、作業人員などを積み上げる。コストは、積算資料¹⁴⁾と工事マニュアル¹³⁾を用いて積み上げる。

素材製造によるエネルギー消費量、CO₂ 排出量は産業連関表から算出した単位物量当たりの値を用いて求める。

工事で直接消費する燃料分は、機材使用時間に機材毎の燃費をかけて、燃料消費量を求め、それに燃料の単位物量当たりのエネルギー消費量、CO₂ 排出量を乗じて求める。

運搬による分は、工事費を積算¹³⁾¹⁴⁾し、その中に占める運搬費の割合を産業連関表の類似部門「その他の土木建設」における運搬部門（「道路輸送貨物」「通運」「自家用旅客自動車」「自家用貨物自動車」）の割合として運搬部門の単位金額当たりのエネルギー消費量、CO₂ 排出量の原単位を乗じて算出する。

(2) 熱源設備

プラントのメイン設備である熱源設備は、本研究で開発した素材組立比法を用いて算出する。熱源主機と付随する各種ポンプ、プラント内配管を含めて熱源設備とする。機器の重量はカタログから定め、コストは積算資料から求める。熱源設備の重量をさらに構成素材割合⁶⁾を用いて素材別の重量に分け、それに産業連関表から算出した素材毎の単位重量当たりの製造エネルギー、CO₂ 原単位を乗じて、素材分を算出し、素材と組立の比率から求められる組立分を加算して、全熱源設備の製造エネルギー消費量、CO₂ 排出量を算出する。

(3) その他のプラント設備

熱源設備を除いたその他のプラント設備として、電気設備、衛生設備、空調設備、自動制御設備がある。衛生設備や空調設備、自動制御設備は、プラントの熱源容量に比例すると設定し、既報の研究³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾から各設備毎に単位プラント熱源設備容量当たりの製造エネルギー、CO₂、コストの平均値を求め、それに各モデルのプラント熱源設備容量を乗じて算出した。電気設備に関しては、プラントの電気容量（最大電力量）に比例するとし、衛生設備などと同様にプラント容量当たりの値を求め、それに標準モデル（b15）における従来方式（ケース 1）の熱源設備容量と電気容量を使用して単位電気容量当たりの設備製造エネルギー、CO₂、コストを算出する。

(4) プラント建屋

プラント設備を収納する建物をプラント建屋とする。東京都の統計によるプラント容量とプラント面積の近似曲線⁸⁾から求められるプラント面積を基とし、さらにコージェネレーションシステムや河川水ヒートポ

ンプ、蓄熱槽の必要面積を計算し、それを加算してプラント延床面積とする。プラント延床面積に産業連関表より算出した「非住宅建築（非木造）・鉄骨造（工場・その他）」品目の床面積当たりの製造エネルギー、CO₂、コストを乗じてプラント建屋の製造分を算出する。

3.2 運用段階の分析方法

運用段階は、プラントを1年間運用する際に熱源機器、ポンプ、補給水、配管熱損失から生じる負荷量を算出する。

(1) 熱源機器、補給水、ポンプ

冷温熱需要パターンや熱源機器の稼働優先順位を設定し、機器毎の負荷シミュレーションを行った。シミュレーションは、各月の代表日の24時間熱需要パターンから時間毎に運転する熱源機器を決定し、カタログに記載されている熱源機器のCOP（エネルギー効率）やポンプ効率から都市ガス、電力、補給水の消費量を算出し、それぞれの単位量当たりのエネルギー消費量、CO₂排出量を乗じてプラントの運転による負荷発生量を求め12カ月分を計算する。本来、COPは機器の部分負荷によって変化するものであるが、本ケースでは、プラント内で機器の容量を十分に分割しており部分負荷の影響は小さいとして、COPを変化させるのではなく機器の運転の制御を考慮した。また、河川水の温度も季節毎に変化し、それによってもCOPが変化するとされているが、ここでは考慮していない。コストは、実際の電力会社とガス会社の料金に基づいて計算する。

ポンプの電力消費量は、シミュレーションで求められる流量と圧力損失によって求められる¹⁵⁾が、地域導管の圧力損失は直管部と局部、熱源機器内、需要側設備内に分類され、管内摩擦の公式¹⁵⁾などから算出する。冷温水の流量は、プラントからの往き返り温度差が7℃になるように時間毎に変化させる。

コージェネレーションで発生する電力は、プラント内のみで使用されると仮定し、電動ターボ冷凍機やポンプの動力にあてるとする。プラント内の消費電力がコージェネレーションの発電容量を超えているときにはのみコージェネレーションを運転することとする。

(2) 熱損失

地域配管内の流体温度は、周囲温度との差が大きく、配管延長も長く運転時間も長いので、配管からの年間熱損失は無視できないほど多い。年間熱損失は、地域導管の熱損失と蓄熱槽の熱損失とプラント内熱損失と冷水ポンプからの熱取得から算出される¹⁶⁾。地域導管からの熱損失量は、直埋設部分については保温材や土壌の熱抵抗を考慮した熱伝導式¹⁷⁾から求め、専用溝施設部分については保温材のみの抵抗を考慮した熱伝導式¹⁷⁾から求め、その他の損失量は算定式¹⁶⁾より求める。

4 結果と考察

分析結果は、1年間当たりの単位供給量当たりで表す。システムの耐用年数は12年とする。

まず、標準モデル（b15）におけるケース別の建設段階の内訳を示したものが図4である。省エネルギー技術を導入するほど建設エネルギー、CO₂、コスト共に大きくなることがわかる。個別方式は、熱源設備の割合が高いが地域導管が不要であるのでその分全体として小さくなっている。ケース3（コージェネレーションの導入）は、ケース1（従来方式）よりも熱源設備の中のコージェネレーションの分が大きくなっている。ケース2（河川水熱源ヒートポンプの導入）は、蓄熱槽と河川水熱源ヒートポンプの導入のためにプラント建屋と河川水取水導管の分が大きくなっており、また、ヒートポンプは電気使用量が多いため電気設備も大きくなっている。また、ケース2は温水管も使用しているため地域導管の分も大きくなる。結果としてケース2の方がケース3よりも建設分は大きくなっている。

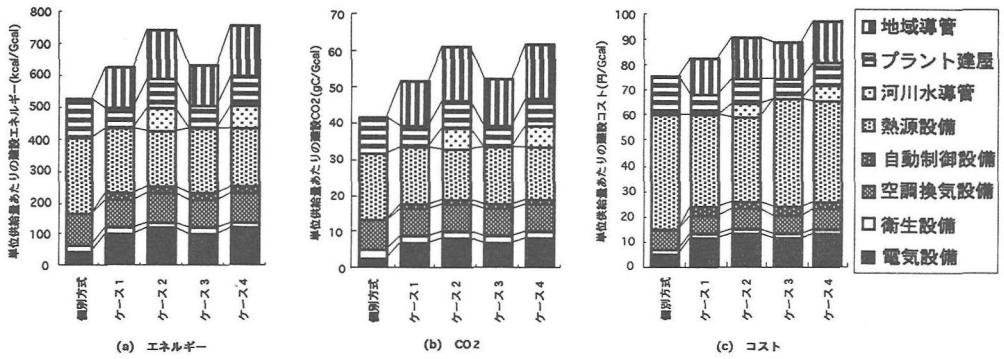


図 4 標準モデル(b15)におけるケース別建設エネルギー、CO₂、コスト

次に、標準モデル (b15) の運用段階の内訳を示したものが図 5である。個別方式は、熱効率が悪いいためエネルギー、CO₂、コストともに最も大きくなっている。省エネルギー技術を導入するほど、運用エネルギーが小さくなる。CO₂ では、ケース 2、4 が良い結果となっている。これは、都市ガスに比べて電力の使用量が多く、電力は都市ガスに比べ単位エネルギー当たりの CO₂ 排出量が小さいためである。コストでも省エネルギー技術の効果がみられる。

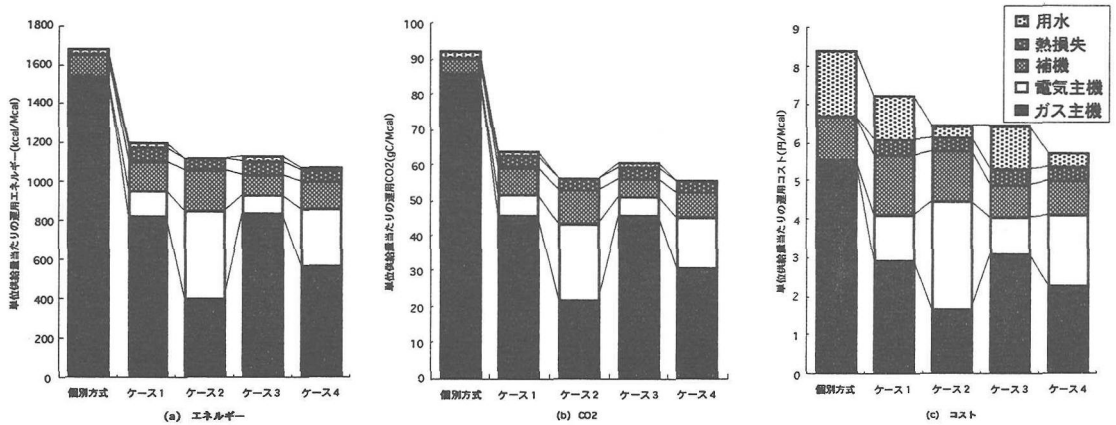


図 5 標準モデル(b15)におけるケース別の運用エネルギー、CO₂、コスト

そして、図 6が標準モデル b15 でのライフサイクル分析結果である。ライフサイクルエネルギーでは運用の割合が 9 割以上を占めている。省エネ技術を導入した方が建設段階のエネルギーが大きくなるがそれ以上に運用段階でのエネルギーが小さくなるため、ライフサイクルでも小さくなり、省エネ技術の導入効果が見られる。ライフサイクル CO₂ では、ライフサイクルエネルギーより建設の割合が大きくなっている。これは、建設工事で使用されるセメントの CO₂ 発生量が高いためと考えられる。エネルギーや CO₂ では、運用段階が大きく運用の改善が環境負荷低減につながる。ライフサイクルコストでは、建設段階の割合が大きくなっており、実際の事業者は、建設コストを抑えようとするため、環境負荷低減へのインセンティブが働きにくいと言える。

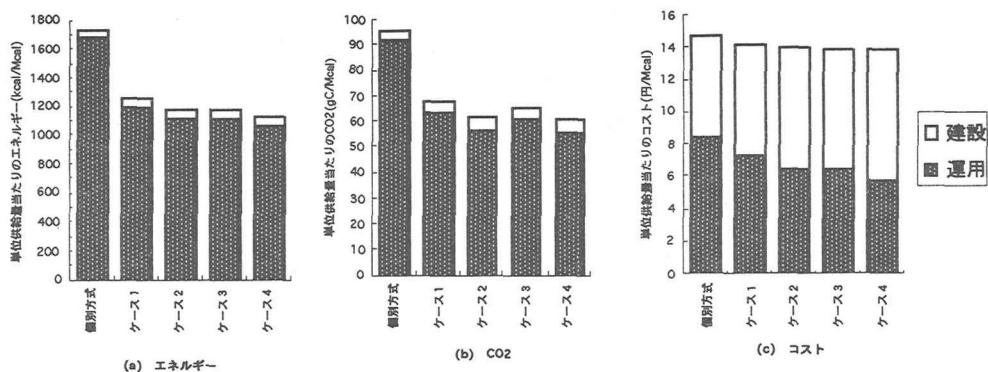


図 6 標準モデル(b15)におけるケース別のライフサイクルエネルギー、CO₂、コスト

次に、地区特性による違いを評価するために、図 7にケース 4 におけるモデル地区別のライフサイクル分析結果を示す。まず、4段階の熱供給密度で比較すると、(a)のライフサイクルエネルギーと(c)のライフサイクルコストのどちらも、熱供給密度が高くなるほど、建設段階と運用段階ともに小さくなっている。これは、熱供給密度が高くなるほど、熱供給量当たりの建設分は小さくなるためであり、また、密度が高くなると単位熱供給量当たりの地区面積も小さくなるため、その分、配管ポンプ動力や熱損失も小さくなる。次に、同一供給密度内（例えば高密度の c15、b5）で比較すると、エネルギーとコストで異なる特性が見られる。ライフサイクルエネルギーでは、熱供給の規模の小さい方（b5）が良い結果となっているが、ライフサイクルコストでは熱供給の規模の大きい方（c15）が良い結果となっている。エネルギーとコストのどちらも、建設段階においては、供給規模（地区面積とプラント容量）が大きくなるほど値は小さくなり、スケールメリットが働いているが、運用段階においては、供給規模が大きくなるほど熱損失やポンプ動力が増加するために値が大きくなり、スケールデメリットが働いていることが分かる。ライフサイクルエネルギーは運用段階の割合が大きいため、スケールデメリットが強く働き、一方、ライフサイクルコストは建設段階の割合が大きいためスケールメリットが強く働く。このため、同一熱供給密度内において、環境面では小規模のものが、コスト面では大規模のものが良い結果となる。

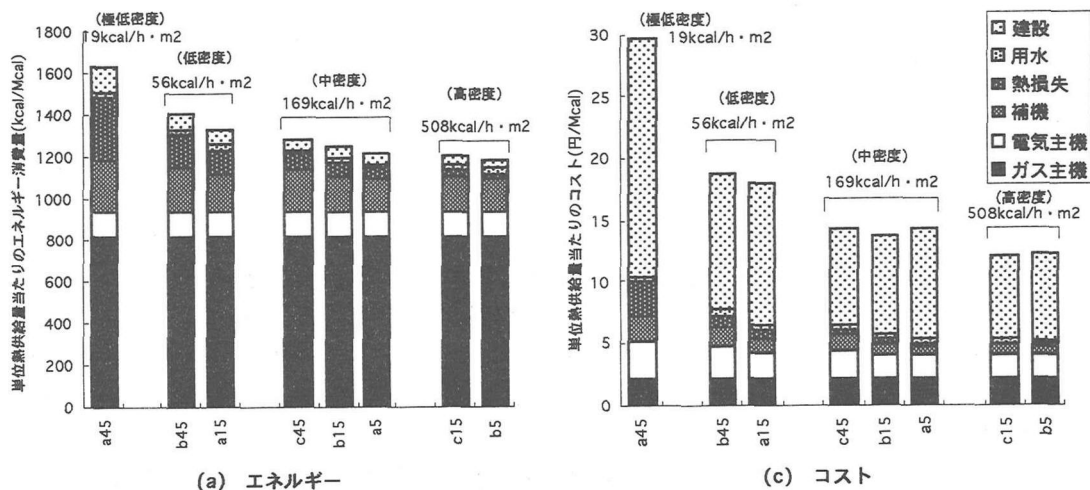


図 7 ケース 4 におけるモデル地区別のライフサイクルエネルギー、コスト

最後に、最も熱供給密度の低い a45 での熱源ケース別ライフサイクル分析結果を図 8 に示す。(a) のライフサイクルエネルギーについては、熱供給密度が低くなると、省エネルギー技術を導入しても効果がないことが分かる。主に熱損失の増大が原因である。(c) のライフサイクルコストでも省エネルギー技術導入は悪影響となっている。熱供給密度が低い場合には、過度の初期投資がライフサイクルで回収できなくなることが示している。

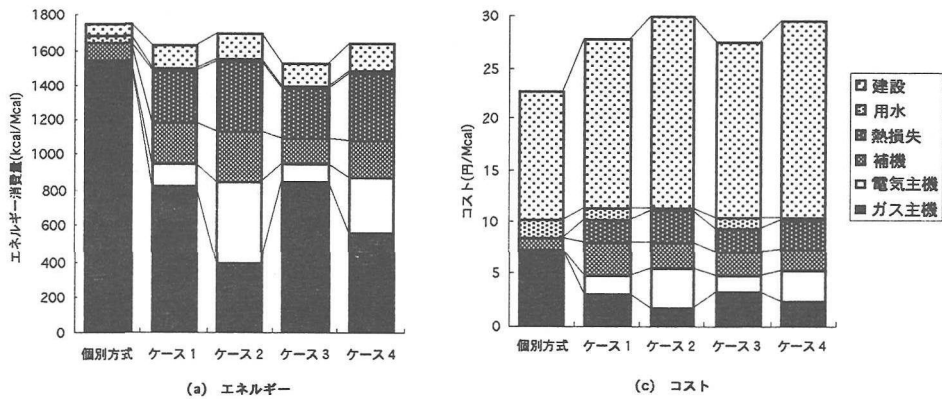


図 8 低供給密度(a45)におけるケース別のライフサイクルエネルギー、コスト

5 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 地域冷暖房システムの運用段階がライフサイクルに占める比率は、システムのライフタイムを 12 年とした場合、エネルギーで 89.9~96.3%、CO₂ で 84.5~94.6%となる。運用段階の割合が大きく、環境負荷低減には運転段階での消費エネルギーの削減が重要となる。しかし、コストでは運用段階の割合は 35.3~55.3%とエネルギーや CO₂ に比べて小さいため実際には環境負荷低減へのインセンティブが働きにくい。
- 2) 地域冷暖房システムの導入や地域冷暖房の熱源機器としての省エネルギー技術の導入は、ライフサイクル分析でも効果が見られる。しかし、熱供給密度が低くなるほど、その効果は薄れ、従来型技術より環境負荷やコストが大きくなるケースも見られる。
- 3) 地域冷暖房システムでは、熱供給密度が高いほど、環境面コスト面ともに好結果となる。また、コスト面ではスケールメリットが働くが、環境面ではスケールデメリットが働く。結果として「高密度かつコンパクトな地域冷暖房システム」が望ましいと言える。しかし、規模を小さくしていくにつれ、部分負荷による熱源機器効率の悪化が増大するため、個別方式レベルの規模に行き着く前に ライフサイクル分析値が最小となる最適点が存在すると考えられる。

本研究では、供給地区面積を 5ha~45ha の範囲に設定したため、個別方式から 5ha 規模の間の最適規模を特定できなかったが、今後は、より細かく地区面積を設定する必要があるであろう。また、本研究のモデルの熱源機器の分割台数は十分多くプラント規模も大きいため、熱源機器の部分負荷による COP の変化はシステム全体の計算結果に与える影響が小さいとして考慮しなかった。しかし、ライフサイクルに定める運用段階の割合が大きいことから、今後は、河川水の温度変化による COP の変化とともに、部分負荷の COP の影響も十分検討していくことが望まれる。

本研究を行う機会を与えて下さった京都大学の住友恒教授、内藤正明教授に厚く御礼申し上げます。また、資料を提供して下さいました大阪ガス(株)様、(株)荏原製作所様に深謝いたします。

参考文献

- 1) 井村・森下・池田・銭谷・楠田：下水道システムのライフサイクルアセスメントに関する研究, 環境システム研究, vol.23, 1995
- 2) 伊藤・花木・谷口・有浦：ニュータウン建設にともなう二酸化炭素排出量に関する研究, 環境システム研究, vol.23, 1995
- 3) 伊藤・伊藤・花木・松尾：下水を用いた地域冷暖房施設のライフサイクルアセスメント, 環境システム研究, vol.23, pp.241-247, 1995
- 4) 加藤・盛岡：都市代謝基盤の環境調和性の評価に関する研究, 環境システム研究, vol.22, pp.237-242, 1994
- 5) 佐々木・林・山口・金田：地域エネルギー利用システムのライフサイクル評価に関する研究, 日本建築学会講演梗概集, pp.701-702, 1995
- 6) 日本下水道事業団報告書：下水処理場におけるエネルギーの効率的利用に関する調査, 1994
- 7) 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：未利用エネルギー活用に関わるライフサイクルエネルギー評価研究報告書、1994
- 8) 東京都：地域冷暖房モデル導入計画作成調査報告書, 1991
- 9) 大阪市：平成3年度地域冷暖房モデル導入計画作成調査, 1992
- 10) 日本国政府：「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく日本国報告書, 1994
- 11) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：総合エネルギー統計 平成4年度版, 1992
- 12) 建設物価調査会積算委員会：建設工事標準歩掛, 建設物価調査会, 1982
- 13) 建設大臣官房技術調査室監修：土木工事積算基準マニュアル, 建設物価調査会, 1994
- 14) 経済調査会：積算資料 1995 11月号, 1995
- 15) 丹保憲仁：上水道 新体系土木工学, 技術堂出版, 1982
- 16) 東京都環境保全局：地域冷暖房推進に関する指導要綱, 1991
- 17) 日本地域冷暖房協会：地域冷暖房技術手引書, 1992