

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 —供給規模と密度の異なるモデル地区に対する検討—

Life Cycle Assessment of District Heating And Cooling system
using waste heat in sewage

伊藤真知子^{*)} 伊藤武美^{**)} 花木啓祐^{**)} 松尾友矩^{***)}

Machiko Ito Takemi Ito Keisuke Hanaki Tomonori Matsuo

ABSTRACT: This paper deals with the life-cycle-assessment of district heating and cooling system whereby heat-pump is used to recover the thermal energy of sewage water. The amount of CO₂ involved in the construction is much less than that involved in operation. It is the largest for water source heat pumping system, followed by the air source one and the "standard" DHC (with boilers and refrigerating machines). As for the CO₂ during the operation period, merit is recognized more clearly for heat pumping systems than the standard system. The longer the operation period, and the higher the heat requirement, the less the overall LCCO₂.

KEYWORDS: Life-Cycle-assessment, District Heating and Cooling, heat pump

1. はじめに

近年環境問題は、地球規模のオゾン層破壊から都市におけるヒートアイランド現象まで多様化している。都市化の進んだ日本では都市における環境のあり方は特に重要な課題である。都市は人間活動の場であり、高度な社会経済機能をもち様々な利便性を提供する一方で、資源やエネルギーを大量に消費し、大気、水、土壌など周辺環境へ大きな負荷をかけ続けている。この負荷を減少するには、より少ないエネルギーでより高い効果を得られるようなシステムのありかたが模索されなければならないだろう。

下水熱を有効利用する地域冷暖房システムは冷暖房に必要な電力や化石燃料を節約する効果がある。しかし、一方で下水を利用するために追加的な設備や工事が行われなければならない、そのために環境へ負荷がかかる側面もある。従って、真の環境面でのメリットを明らかにするためにはライフサイクルアセスメント (LCA) を行いトータルな環境負荷を評価することが必要である。

2. 下水熱を利用した地域冷暖房のLCCO₂の基本的考え方および計算方法

2.1. 基本的な検討のフレーム

下水熱を利用した地域冷暖房システムに対してLCAを行い地球環境への負荷の面からシステムの評価を行う。モデル地区を設定し、そこに以下に示す3通りの地域冷暖房システムを導入した場合についてCO₂発生量の比較検討を行う。

- ① 冷凍機とボイラーによって熱供給を行う方式 (従来方式と呼ぶ)
- ② 空気熱源のヒートポンプによって熱供給を行う方式 (空気熱源HPと呼ぶ)
- ③ 下水熱を利用し水熱源のヒートポンプによって熱供給を行う方式 (下水熱源HPと呼ぶ。)

対象とするモデル地区は12通り設定し、地区の面積、平均容積率、建物利用用途をそれぞれ数段階設定した。それぞれの地区で上記の3システムを適用した場合についての検討及び3システム間の一般的な比較を行い、各システムの優位性の差が対象地区の特性によってどのように異なるかを明らかにする。また、それぞれのシステムにおける各要素がCO₂発生にどの程度寄与しているかを明らかにする。尚、ライフサイクルアセスメントを行う範囲は冷温熱の製造、供給に直接かかわる部分、つまり供給地区内

* 東京大学工学部都市工学科、現在東京ガス (株)

** 東京大学先端科学技術研究センター

*** 東京大学工学部都市工学科

の事務所ビル等建物の建設や維持管理に伴うCO₂負荷や、これらの建物における冷暖房や給湯以外の活動によるCO₂負荷はLCAの範囲からはずした。

2.2. LCCO₂の解析手法

(1) モデル地区の設定および熱負荷の算定

表1に示す12通りのモデル供給地区を設定した。ピーク熱負荷は、用途別床面積に用途別ピーク熱負荷原単位と負荷係数を乗じて足し合わせることで、年間熱負荷は用途別年間熱負荷原単位を掛けて足し合わせることでそれぞれ計算した。

表1 モデル供給地区および熱供給規模の概要

	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5	モデル6	モデル7	モデル8	モデル9	モデル10	モデル11	モデル12
用途	事務所	事務所	事務所	事務所	事務所	事務所	事務所 ホテル	事務所 ホテル	事務所 ホテル	事務所 ホテル	事務所 ホテル	事務所 ホテル
規模 km ²	0.5x0.5	0.7x0.7	0.5x0.5	0.7x0.7	0.5x0.5	0.7x0.7	0.5x0.5	0.7x0.7	0.5x0.5	0.7x0.7	0.5x0.5	0.7x0.7
容積率	100%	100%	200%	200%	400%	400%	100%	100%	200%	200%	400%	400%
用途別 床面積	事務所 17.5ha	事務所 35ha	事務所 35ha	事務所 70ha	事務所 70ha	事務所 140ha	事務所 12.25ha ホテル 5.25ha	事務所 24.5ha ホテル 10.5ha	事務所 24.5ha ホテル 10.5ha	事務所 49.0ha ホテル 21.0ha	事務所 49.0ha ホテル 21.0ha	事務所 98.0ha ホテル 42.0ha
ピーク 熱負荷	冷熱 1.8 温熱 4.7	冷熱 17.5 温熱 9.5	冷熱 17.5 温熱 9.5	冷熱 35.3 温熱 18.9	冷熱 35.3 温熱 18.9	冷熱 70.6 温熱 37.8	冷熱 9.0 温熱 5.4	冷熱 18.0 温熱 10.7	冷熱 18.0 温熱 10.7	冷熱 36.0 温熱 21.4	冷熱 36.0 温熱 21.4	冷熱 72.1 温熱 42.8
年間 熱負荷	冷熱 6930 温熱 5775	冷熱 13860 温熱 11550	冷熱 13860 温熱 11550	冷熱 27720 温熱 23100	冷熱 27720 温熱 23100	冷熱 55440 温熱 46200	冷熱 9860 温熱 12968	冷熱 19719 温熱 25935	冷熱 19719 温熱 25935	冷熱 39438 温熱 51870	冷熱 39438 温熱 51870	冷熱 78876 温熱 103740

(2) LCCO₂の算出方法

地域冷暖房施設の建設段階と運用段階に対して評価を行った。

プラント建設に伴う負荷：地域冷暖房プラントQの工事金額明細の内容を逐一検討、分類し、各工事項目毎にそれに費やされた資材の量、運搬費、現場経費、労務、試験調整費を積み上げ、これに産業連関表から計算されている、各部門への投入金額千円あたりのCO₂発生量¹⁾（原単位）を乗じて求めた。熱源機器に伴うCO₂発生量：各モデル地区のプラントに設置されるべき熱源機器の組み合わせを従来方式、空気熱源方式、水熱源方式それぞれについて決定し、各熱源機器の重量に各機器を構成する素材別重量割合の既報の値²⁾を乗じて、含まれる素材の重さを計算した。次に、各素材1トン生産あたりCO₂発生量原単位²⁾を乗じて熱源機器の生産に伴うCO₂発生量を算出した。

地域導管に伴うCO₂発生量：プラントQの実績値を基本にして、管の材料生産に伴うCO₂は導管の長さ及び熱負荷の1/2乗に比例、また導管断面積が熱負荷に比例すると仮定して算出した。

取水設備の建設に伴うCO₂：経費を一律6億円³⁾と見なし、この金額に産業連関表による原単位¹⁾を乗じてCO₂発生量を求めた。この場合、部門297「河川、下水道、その他の公共事業」の原単位を用いた。

運用段階におけるCO₂発生量：(1)で求めた年間熱負荷をもとに、この量の冷熱・温熱を発生させるために熱源機器が1年間に消費する電力・燃料の量を、機器の成績係数(COP)で割ることによって計算し、これに1Mcal/hの電力・燃料を“製造”する過程で発生するCO₂の量(原単位)を掛けあわせたものを、運用段階1年あたりのCO₂とした。幕張熱供給プラントの計画に用いられた年間平均システムCOPの値⁴⁾、

冷熱・空気熱源：3.89、温熱・空気熱源：3.38、

冷熱・下水処理水熱源：4.17、温熱・下水処理水熱源：5.04

を用い、また従来方式の場合、ガスボイラーのシステムCOPを0.80、ガス吸収式冷凍機のシステムCOPを1.00とした。一方、エネルギー源別のCO₂排出原単位は、以下の数値を用いた⁵⁾。

電力：0.129kg-C/Mcal ガス：0.058kg-C/Mcal

3. ライフサイクルアセスメントの結果と考察

3.1 建設段階におけるCO₂発生量

(1) 地域冷暖房プラントQにおける実績値からの推定

地域冷暖房プラントQの実際の工事データから費やされた資材などを積み上げ、それに対してCO₂原単位を掛け合わせて求めたCO₂の発生量を、資材や工事種の大項目毎に整理したものを表2に示す。このプラントは都市ガスをエネルギー源として、ボイラーによる温熱供給と冷凍機による冷熱供給を行っている、いわゆる従来型の地域冷暖房施設である。

この表から、資材も含みこのプラントを建設することによって生じたCO₂発生量の約7割はプラント設備工事に伴うもので、そのうち約6割は熱源機器から生じたことがわかる。地域導管に起因するCO₂は全体の1割弱で、一般に地域導管の敷設にかかる費用が全体費用の2～3割を占めると言われていることを考えると、この値はCO₂発生原単位による差を考えても小さいものであると言える。

表2 従来方式の地域冷暖房プラントQの建設段階におけるCO₂発生量総括表 単位kg・C

資材・工事種別	材料合計	搬入・運搬	その他	工事合計	%
建築工事合計	167,751	0	173	167,925	5.68
電気設備工事合計	255,667	1,248	3,905	260,820	8.82
空調換気設備工事合計	140,685	3,138	1,069	144,892	4.90
給排水衛生設備工事計	60,436	1,044	1,196	76,557	2.59
プラント設備工事合計	1,885,530	131,442	31,325	2,048,297	69.28
冷熱源設備	727,724	75,434	3,286	806,443	27.28
温熱源設備	359,813	13,791	1,203	374,807	12.68
ポンプ及び付属機器設備	85,049	7,788	324	93,161	3.15
配管	535,230	34,429	22,492	592,151	20.03
自動制御設備	177,715	0	4,020	181,735	6.15
地域導管工事	216,113	14,831	9,627	240,570	8.14
冷水	125,632	11,406	7,287	144,325	4.88
蒸気	50,147	2,053	1,396	53,596	1.81
凝縮水	19,447	834	555	20,836	0.70
高圧温水	20,886	538	389	21,813	0.74
サブステーション工事	30,727	0	719	31,446	1.06
小計	2,756,909	151,703	48,014	2,956,627	100.0
比率 (%)	93.25	5.13	1.62	100.00	

(2) 熱源機器に伴うCO₂発生量の計算結果

各モデル地区の熱源機器に伴うCO₂発生量は図1のようになる。どのモデル地区でも、下水熱源ヒートポンプと空気熱源ヒートポンプを用いた場合を比較すると、下水熱源機器を使用した場合の方がCO₂発生量が少なくなっている。これは、水の持つ熱的特性が空気に比べて有利であるため下水熱源HPでは設備ををよりコンパクトにできることが理由と考えられる。

(3) 地域導管に伴うCO₂発生量の計算結果

地域導管に伴うCO₂の発生量は、図2に示す通り推定された。従来方式（（蒸気と冷水を供給）とヒートポンプ方式（冷温水を供給）を比較すると、常に従来方式の方がCO₂発生量は少なくなっている。モデル2、4、6、8、10、12におけるCO₂発生量の大きさより、敷設距離の長さが地域導管に伴うCO₂排出量を最も大きく左右していることが理解できる。

モデル1と3、2と4など、同面積（導管敷設距離が同じ）で容積率が2倍（よって熱負荷が2倍）の地区の比較から、熱負荷が増えれば地域導管に伴うCO₂の発生量も増加するが、その増え方は敷設距離による影響と比べれば小さいことがわかる。

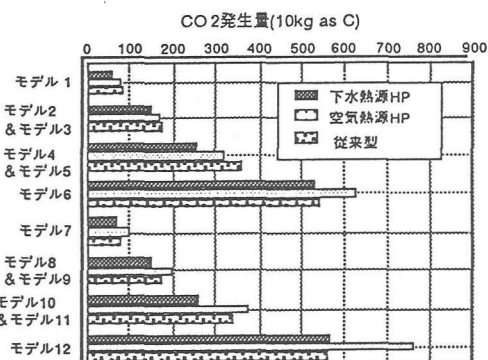


図1. 各モデル地区における熱源機器由来CO₂発生量の比較

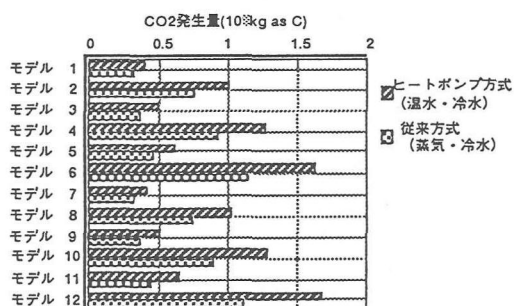
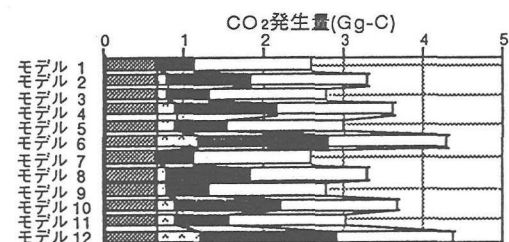
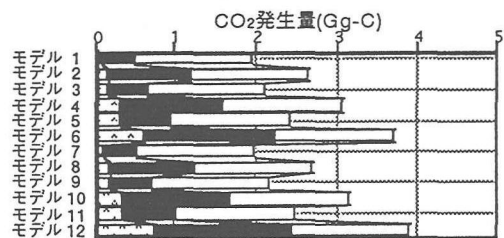


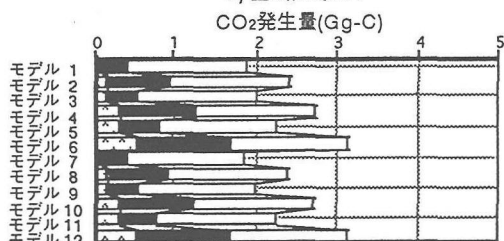
図2. 各モデル地区における地域導管由来のCO₂発生量比較



a) 下水熱源HP



b) 空気熱源HP



c) 従来方式

取水設備 熱源機器 地域導管 その他建設

図3 建設段階における負荷の内訳

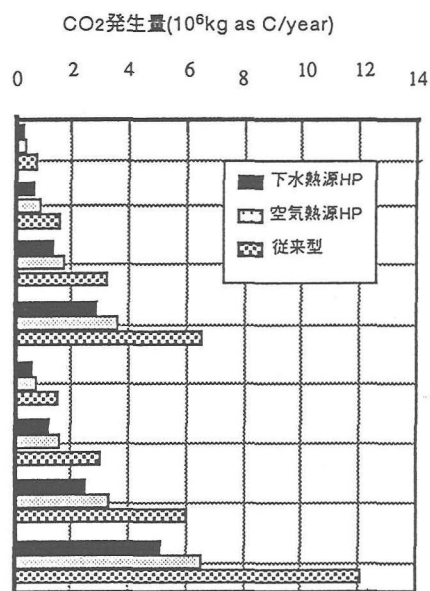


図4 運用段階1年あたりのCO₂発生量

(4) 取水設備に伴うCO₂発生量の計算結果

下水熱を利用したシステムの場合の取水設備の建設に伴うCO₂の量は、 0.66×10^6 kg・C となった。

(5) 建設段階における負荷の内訳

建設段階における負荷の内訳は図3の通りとなった。未利用エネルギーを活用しない場合（空気熱源HP）の方が熱源機器に伴うCO₂負荷は多いが、取水設備が不要となる分、建設段階全体で見ると負荷は少なくなっている。熱負荷が等しく、容積率と規模の異なるモデル2と3、4と5、8と9、10と11を比較すると地区内の熱需要が“狭く濃い”3、5、9、11の方が“広く薄い”2、4、8、10よりそれぞれCO₂の量が少なくなっている。

3.2. 運用段階におけるCO₂の発生量

運用段階1年あたりのCO₂発生量は図4に示す通りとなった。運用段階では従来方式よりもヒートポンプ方式の方が、また同じヒートポンプシステムなら下水熱源を用いた方がCO₂発生量が少なく、そしてその削減効果は熱負荷の大きい地区ほど顕著である。

運用段階に発生するCO₂の量を大きく左右する要因は、プラントで使用する熱源機器の成績係数(COP)であり、CO₂発生量の計算精度を上げるためには、より正確で現実に合ったCOPの値を採用することが必要である。本研究では、COPの値として通常用いられるシステムCOPの値を用いているが、熱源となる大気や未利用エネルギー源の温度をCOP計算に含めると、より精度の高い計算が可能になると考えられ、今後COPと下水温度との関係を明確化することが必要である

3.3 ライフサイクルCO₂に関する考察

(1) ライフサイクルCO₂の内訳

建設に伴うCO₂発生量と運用時のCO₂発生量に基づいてライフサイクルCO₂を求めることができる。5年及び15年の2通りの運用期間を仮定した。換言すれば、これらの年限が経過した段階で地域冷暖房施設が再び建設されるという仮定である。

このようにして求めたライフサイクルCO₂を図5に示す。15年程度というこの種の施設では決して長すぎることはない運用期間を取れば、建設に伴うCO₂発生量はLCCO₂の中でわずかな重みしかもたない。

次に、モデル1のような小規模低密度の地区では運用期間5年のケースに最も端的に出ているように、相対的に建設に伴うCO₂発生の寄与が大きい。逆に高密度のモデル12のような場合には、運用時のCO₂発生が大部分を占める。

熱負荷が等しく供給面積と容積率が異なる（熱負荷密度が異なる）地区同士を比較すると、運用年数が長くなるのに従って、熱負荷密度の高低に関わらずライフサイクルCO₂の量がほぼ同じになる。

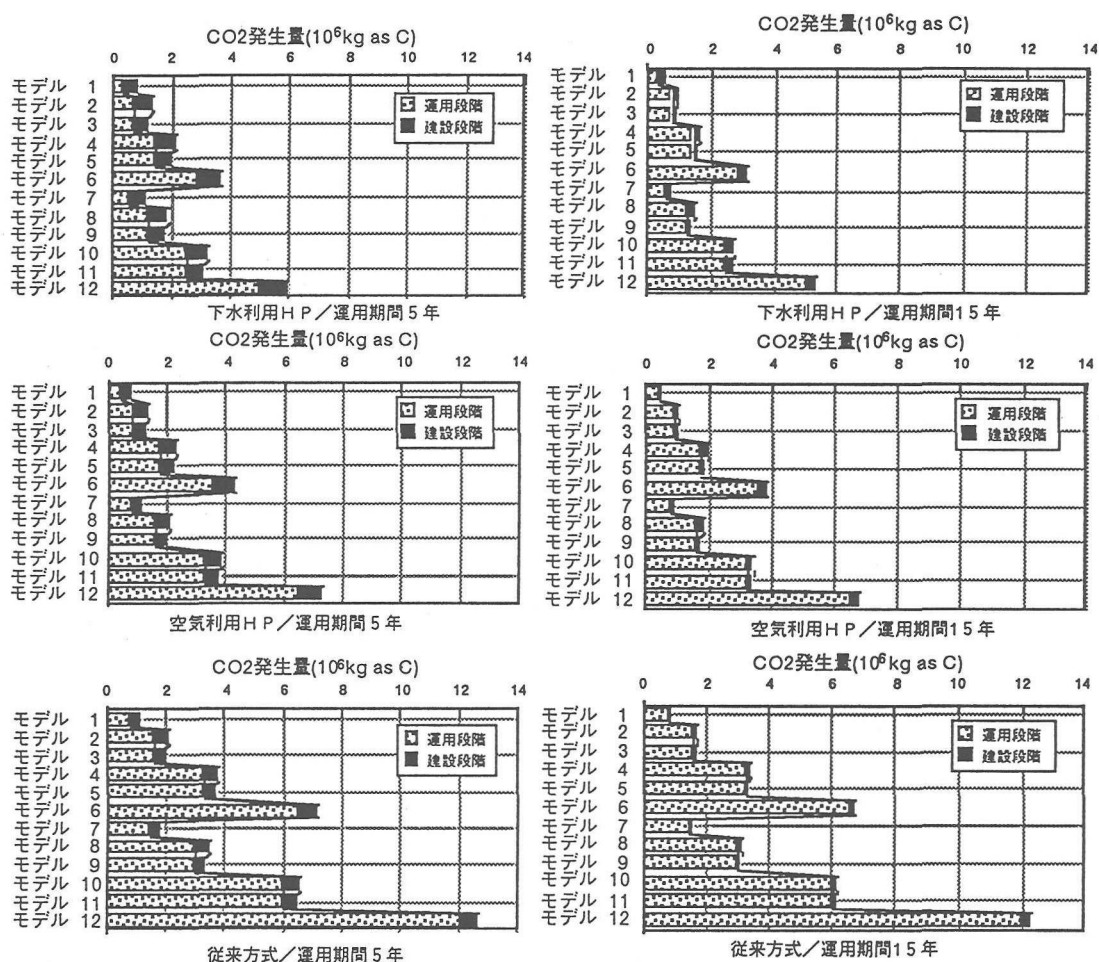


図5 ライフサイクルCO₂の内訳

(2) 単位供給床面積あたりのCO₂発生量

図6に、単位供給面積当たりのライフサイクルCO₂を、運用5、10、15年について求めたものを示した。いずれの場合も、まず従来方式に比べヒートポンプを利用した方式が大幅に有利になっている。ほとんどすべてのケースにおいて、3方式の中で下水熱H P方式がもっともCO₂発生量が小さい。しかし、この下水熱H P方式の有利性が際だつのは特に熱負荷が高いケースで、具体的に言えば、事務所のみでなく事務所とホテルが混在するモデル7～12でメリットが出ている。

単位床面積当たりでLCCO₂を考えると、供給面積が大きい方がLCCO₂の量は少ないという結果になっている。これは、計算方法の設定上、単位面積あたりで見た場合に運用に伴うCO₂の量はどこも同じであるため、供給面積が大きければ大きいほど単位面積当たりの建設に伴うCO₂が少なくなることが理由であり、この程度の面積に供給を行う場合には地域冷暖房システムにスケールメリットがみられる。

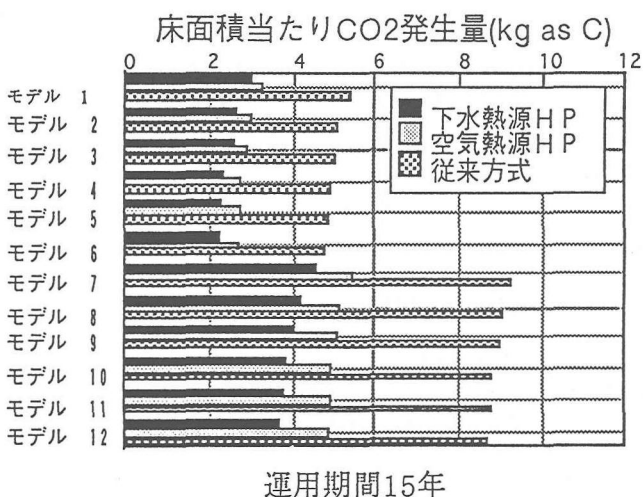
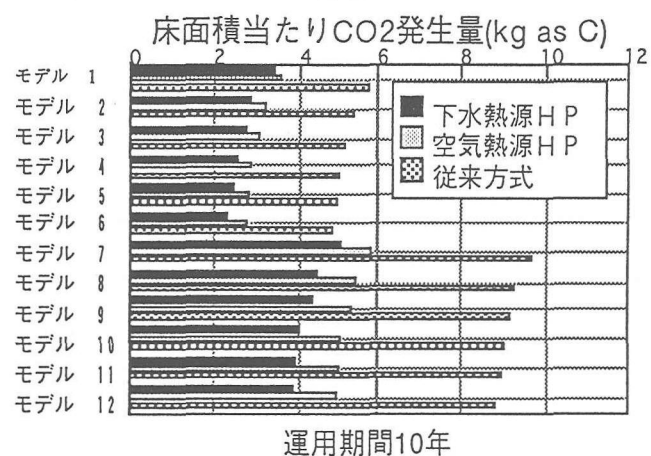
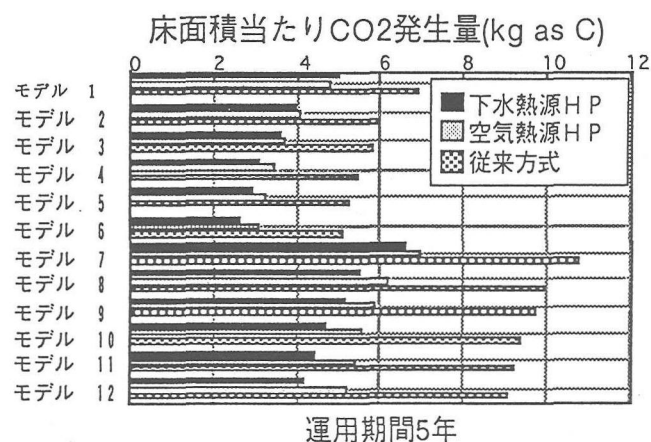


図6 単位供給床面積あたりのCO₂発生量

4.今後の課題

本研究ではデータ入手の制約・困難性から、多くの仮定をおき、架空のモデル地区を設定したうえで計算を試みている。用いた計算方法自体に含まれる限界や、計算の精度に影響があると思われる因子をリストアップする。より精度の高いLCCO₂解析を行うためには、以下の事柄に対する検討が課題となるであろう。

(1) COP

わずかなCOP値変化が最終的なLCCO₂に直接的に影響する。下水水温とCOPの関係、下水を熱源水に利用するがゆえのスクリーン設備などの運転に伴うエネルギー消費量、CO₂発生量を正しく評価する必要がある。

(2) プラント建設

この部分が建設に伴う負荷の中で一番大きな割合を占めるので正しい見積りが必要。

(3) 取水設備

汲み上げる下水の量と取水設備の規模との関係を明らかにすることでより正確なLCCO₂の見積もりが可能になるであろう。

参考文献及び資料

- 1) 松本ら「日本の輸出商品の二酸化炭素集約度から見た炭素税負担移転の先進国・発展途上国間比較」土木学会第1回地球環境シンポジウム 1993
- 2) 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
- 3) (財)新エネルギー財団「最新未利用エネルギー活用マニュアル」
- 4) 下水熱利用促進研究会「未利用エネルギー活用の手引き」1994
- 5) 東京都環境保全局「地域暖冷房推進に関する指導要綱」1991