

## 10. 下水道システムのLCA評価に関する調査

下水道処理研究室 室長 中島 英一郎  
主任研究官 川嶋 幸徳  
研究員 平出 亮輔

### 1. はじめに

今日、公共事業の実施にあたっては、事業の効率化、透明性の確保、説明責任の向上、さらには地球環境問題への対応が強く求められている。その中で下水道システムは、生活排水等による汚濁負荷を削減する一方、処理水の放流による汚濁物の排出、処理過程におけるCO<sub>2</sub>など温室効果ガスの排出、電力や燃料の消費、さらには施設の建設時における資源やエネルギーの消費など環境に対し負荷を与える側面も持っている。ライフサイクルアセスメント（LCA）は、もともと製品の製造、流通、使用、廃棄にいたるまでのライフスパンにおける環境負荷を総合的に評価する手法として開発された手法であるが、下水道システムのような社会資本整備においても、施設の建設から運転、廃棄に至るライフスパンにわたって環境負荷を評価する手法として注目されている。本稿では、主として下水道事業の計画・設計段階における事業評価、住民への説明のためのツールとしてLCAを用いることを想定し、そのシステム構築に必要な基礎的データを得るために行った調査結果について報告する。

### 2. 過年度の調査

#### 2.1 下水道システムのLCAに用いる原単位算出手法に関する研究（平成10～12年度）

本研究は、下水道システムの計画・設計段階における代替案を含めたシステムの比較検討、運転管理の改善を含めたシステムの改善に関する比較検討などを行うための評価システムを構築することを目的としたもので、下水道システムの比較検討を可能とするため、資機材や作業毎に、投入される素材、エネルギー等の積み上げを行い、LC・CO<sub>2</sub>およびLC・Energyを算定した。ただし、「実施設計」以前の「計画設計」の段階では積み上げに必要なデータの収集が困難であることから、予め行ったケーススタディーの積み上げ計算の結果を用い、設備単位あるいは処理量当たりの負荷量原単位（二次、三次原単位）を作成し、これを利用するという手法を検討した。また、このような算定事例を積み重ねることで、最終的に計画・設計段階において用いる費用関数と類似した概略評価手法を構築することを目指した。

#### 2.2 積み上げ計算による計算例

表1に、ケーススタディーで対象とした処理区（処理場）の概要を示す。また、図1、図2にケーススタディーにおけるLC・CO<sub>2</sub>の算定結果を示す。なお、計算手順の概略は下記に示すとおりである。

- 1) 管渠工事については、管種・管径・土被り別のモデル設計から計算した単位延長当たりのLC・CO<sub>2</sub>を用いて処理区全体を計算し、これを全体計画流入水量（日最大）で除することにより施設規模当たりの負荷を計算した。
- 2) 処理場土木施設については、工事設計書をもとに算定した現有施設の施設別LC・CO<sub>2</sub>から全体計画に相当する施設のLC・CO<sub>2</sub>を計算し、全体計画流入水量（日最大）で除することにより施設規模当たりの負荷を計算した。
- 3) 処理場建築施設については、工事設計書をもとに算定した現有施設の単位床面積当たりLC・CO<sub>2</sub>を用い、これを類似の施設に適用することで全体計画に相当する施設のLC・CO<sub>2</sub>を計算し、全体計画流入水量（日最大）で除することにより施設規模当たりの負荷を計算した。

- 4) 処理場設備（機械電気）は、現有設備について、その仕様（重量、定格出力）に基づいて算定を行い、現有処理能力（日最大）当たりLC-CO<sub>2</sub>を計算した。なお、運転時LC-CO<sub>2</sub>は、現有施設の計画日平均水量（計画日最大水量×0.75～0.8）に対して計算した年当たりの算定結果を現有処理能力（日最大）で除して現有処理能力当たりに換算したものである。

表1 ケーススタディー対象処理区（処理場）の概要

	M処理区	S処理区	T処理区	A処理区	F処理区	I処理区
計画処理区域面積 (ha)	216.9	337.0	1,892.0	901.0	1,650.0	2,537.7
計画流入水量 (m <sup>3</sup> /日)	4,050	7,400	35,000	20,500	37,100	66,900
現有処理能力 (m <sup>3</sup> /日)	1,350	1,850	9,920	2,750	4,700	33,450
水処理方式	OD	OD	OD	標準活性汚泥	標準活性汚泥	標準活性汚泥
ばっ気方式	スクロー式	縦軸式	横軸式	攪拌式, 散気板	散気板	攪拌式, 散気板
汚泥濃縮	常圧浮上	重力濃縮	重力濃縮	造粒濃縮	重力濃縮	重力+遠心
嫌気性消化	—	—	—	—	—	有
汚泥脱水	ベルトプレス	遠心脱水	ベルトプレス	ベルトプレス	遠心脱水	ベルトプレス

※ 計画処理区域面積は全体計画値

※ 計画流入水量、現有処理能力は日最大

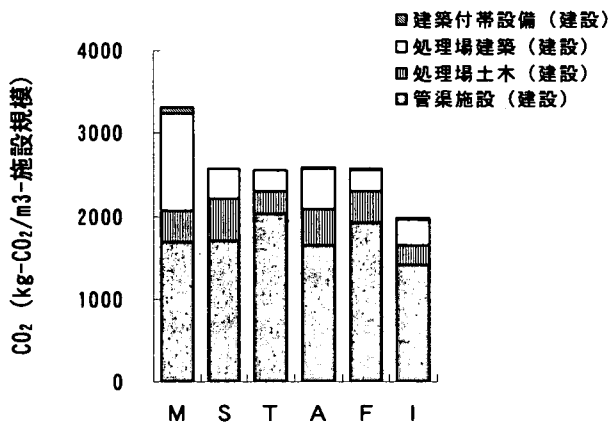


図1 LC-CO<sub>2</sub>の算定結果（土木・建築）

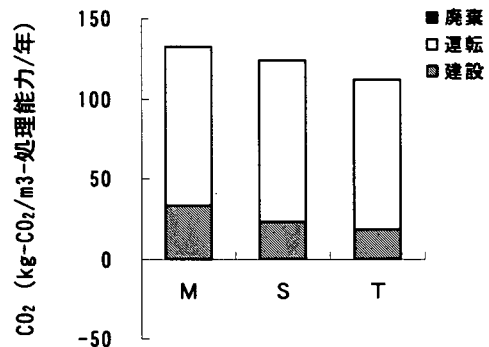


図2 LC-CO<sub>2</sub>の算定結果(OD法、処理場設備)

図3はT処理場における設備の運転段階のLC-CO<sub>2</sub>算定結果を、電力由来とその他に分類して示したものである。これをみると、運転段階のLC-CO<sub>2</sub>は電力由来の割合がほとんどであることがわかる。なお、図2、図3に示す処理場設備の算定結果において、主ポンプ運転時間は「日平均流入水量/ポンプ能力」から計算し、ディッチ攪拌機は100%負荷と50%負荷の運転を交互に行うものとして計算し、回転数制御等による効果は考慮していない。

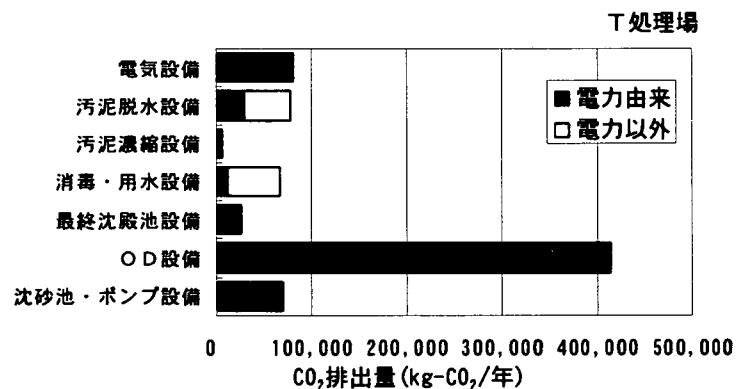


図3 LC-CO<sub>2</sub>の算定結果（処理場設備）

## 2.3 積み上げ計算による原単位算出手法の課題

### (1) 簡略化

ケーススタディーで行った積み上げ計算は、工事に用いる資機材、設備の素材等から積み上げを行うことで、個々の要素やプロセスが負荷全体に占める割合や影響要因を把握することが容易である。下水道事業の

評価にLCAを導入する際の代替案との比較や改善点の検討において、この点は重要である。一方、このような積み上げ計算を実務レベルで行うことは、データ作成の点できわめて困難で、適用に当たっては、その長所を損なわない範囲で積み上げる要素数をまとめるなどの簡略化が必要である。

## (2) 標準化(代表性)

図2、図3に示したように、処理場設備のLC-CO<sub>2</sub>では運転時の割合が大きく、その大部分が電力の使用に伴うものである。ケーススタディーでは、実施設を対象に計算を行ったが、現有施設規模は全体計画規模に対して1/8~1/2と小さく、処理水量と各設備のバランスがとれておらず、やや設備が過大である傾向がある。一般に、下水処理場において、処理水量あたりの電力使用量(電力量原単位)は、施設の規模、設備容量と実処理水量の比(水量負荷率)の影響を受けることが知られており、算定結果をもって同種の施設の代表値とするのは問題がある。このため、実処理場をモデルとして算定を行う場合、計算結果を補正し、同種の施設を代表する値を得る手法を検討する必要がある。

## (3) 総合的評価

下水の高度処理を行う場合や汚泥の有効利用を行う場合、下水道システムにおけるLC-CO<sub>2</sub>は増加する。しかしながら、これらの施設を計画する場合、公共用水域の水質保全、汚泥処分にもなる環境負荷の低減効果等を同時に考慮する必要がある。また、閉鎖性水域の水質保全を目的とした下水の高度処理を計画する場合、下水道以外の汚濁負荷削減対策、例えばノンポイント負荷対策などとの比較を行う必要があり、経済性に加え、水質改善効果とその結果発生するCO<sub>2</sub>などの環境負荷を総合的に評価する手法が必要となる。

## 3. 調査方法

### (1) 積み上げ計算の簡略化

過年度の調査で、管渠工事については整備面積当たり、処理場土木施設工事については施設容量(鉄筋コンクリート数量)、建築施設工事については建物種別および床面積を用いて簡略化できる可能性を示した。

今年度は、処理場設備(機械電気)の積み上げ計算の簡略化を目的に、先に示したケーススタディーの結果を用い、各設備の主機の能力・容量をパラメータとした計算手法の可能性を検討した。

### (2) 積み上げ計算の標準化の検討

供用後間がなく、現有処理能力が全体計画規模に対して最も小さいA処理場を対象に、処理施設のシステムとしての評価を行うための補正の手法を検討した。また、あわせて、T処理場の電力使用量と処理水量の関係の経年変化をもとに、面整備の進展とともに施設規模が拡大するという下水処理施設の特徴を踏まえたLCAのあり方についての検討を行った。

### (3) 高度処理におけるLC-CO<sub>2</sub>の算定

処理水質の異なるシステムの比較を行うための基礎的データを得ることを目的に、高度処理を行っているK処理場においてLC-CO<sub>2</sub>を算定し、標準法およびOD法の計算結果と比較した。

## 4. 調査結果

### 4.1 積み上げ計算の簡略化

#### (1) 電力使用量の構成比

図4は、T処理場の機械電気設備についての積み上げ計算結果をもとに算定した電力量原単位の構成比を設備別、機器(単体)別に示したものである。これをみると、オキシデーションディッチの場合、OD設備(ディッチ攪拌機等)の割合が極めて大きいことがわかる。また、機器別ではディ

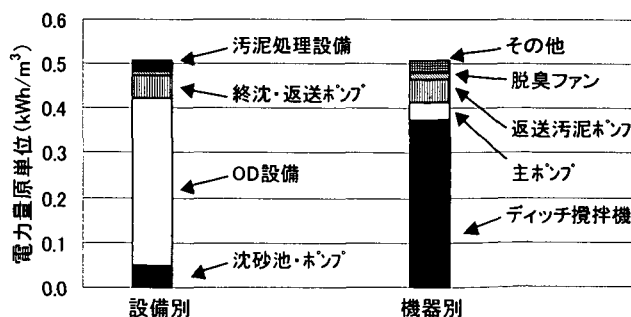


図-4 電力量原単位の構成比(計算値)

ツチ攪拌機（横軸ローター式）の割合が大きく、ディッチ攪拌機、主ポンプ、返送汚泥ポンプおよび脱臭ファンの各単体機器だけで電力量のほとんどを占めている。この傾向は、標準法の処理場を含む他の処理場についても同様であった。このことから、運転時電力由来のLC-CO<sub>2</sub>の算定を行う場合、これら主要機器の電力使用量の算定には高い精度が求められる一方、その他の機器の計算結果が評価に与える影響は小さいことを示している。

## (2) 主要機器の能力・容量をパラメータとした簡略化の検討

図5は、電力量原単位に占める構成比の大きい汚水ポンプ（立軸斜流ポンプ）について、メーカー仕様から機器の能力・容量と電動機出力および機器重量の関係をもとめた例である。これを見ると、ポンプの能力・容量と電動機出力および機器重量の関係はほぼ比例関係にあり、先に示した機器別構成比の傾向とあわせて、各設備の電力使用量は、主機の能力・容量をパラメータとして表すことが可能と思われる。ただし、一般に機器の能力・容量は、流量等の変動を考慮して決められており、さらに一定の余裕率が考慮されている。このため、流量変動の大きな小規模施設等の場合、電動機出力は日平均流量に対して大きくなる傾向がある点に配慮する必要がある。

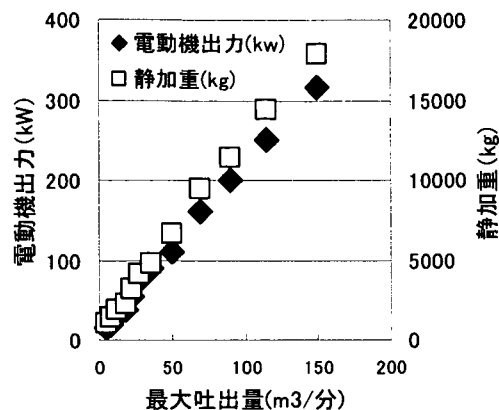


図5 ポンプ能力と電動機出力・機器重量

## 4.2 積み上げ計算の標準化の検討

### (1) A処理場におけるLC-CO<sub>2</sub>算定結果の補正に関する検討

表2は、A処理場を対象に行った標準化の検討における水処理設備（スクリーン・ポンプ設備、脱臭設備を含む）の電力使用量の計算条件を示したものである。このうち、Case1-1および1-2は実績に対する積み上げ計算の再現性を確認するためのもので、Case2-1および2-2は現有施設の処理能力相当の水量が流入した時点想定したものである。

表2 A処理場における電力使用量計算条件

項目	Case1-1	Case1-2	Case2-1	Case2-2
流入水量	1,000m <sup>3</sup> /日 (実績(H12年度))	1,000m <sup>3</sup> /日 (実績(H12年度))	2,200m <sup>3</sup> /日 (計画日平均流量)	2,200 m <sup>3</sup> /日 (計画日平均流量)
主ポンプ運転時間	実績(H12年度)	計算値	設定値(24h)	計算値
返送汚泥ポンプ運転時間	"	"	"	"
送風機運転時間	"	"	"	"
かき寄せ機運転時間	設定値(24h)	設定値(24h)	"	設定値(24h)
水中ばっ気装置運転時間	"	"	"	"
脱臭機運転時間	"	"	"	"

※ ポンプ類運転時間の「計算値」は（水量/ポンプ定格能力）から計算した。

※ 送風機運転時間の「計算値」は、（流入水量×送風倍率/送風機定格能力）から計算した。

表2の条件で計算した電力量と実績（平成12年度）の比較を図6に示す。

下水処理場のポンプ設備や水処理設備は一般に計画時間最大流入量または計画日最大流入量に対応しており、Case1-1と1-2、2-1と2-2の比較では、当然のことながら、ポンプ等の能力から運転時間を計算したCase1-2、2-2の方が小さくなっている。ただし、実際の運転では、回転数制御等による絞り運転で水処理施設への負荷を均等化する操作が行われ、極端に流入水量が少ない場合を除いてほぼ連続運転される。このため、実際の電力使用量はCase1-2、2-2の計算値より大きくなる。一方、Case1-1、2-1の結果は、単純に定格出力での連

続運転を想定したもので、絞り運転による電力量低減効果は考慮されておらず、実際の運転の電力使用量はCase1-1、2-1より小さくなると考えられる。なお、図6に示す実績の電力使用量はCase1-1より大きくなっているが、これは電力量計の設置位置の関係で実績値には脱水設備の電力使用量が含まれていることによる。

また、Case1-1と2-1、1-2と2-2の比較では、水量の比に対して電力使用量の増加率は小さく、水量当たりに換算した電力量原単位は水量の増加にともない低減している。これは、沈殿池のかき寄せ機や脱臭ファンのように水量に関係なく連続運転される機器が存在し、水量の伸びと電力量が比例しないためである。

ここで示したように、積み上げ計算によりLC-CO<sub>2</sub>を計算する場合、運転条件の影響が大きく、供用後もない施設において現況の運転条件をもとにした計算では、そのシステムの代表値とはかけ離れた結果となる恐れがあることがわかる。

なお、Case2-1と2-2の間にも大きな差が有り、いずれの計算値も類似のシステムの代表値とするには問題があると思われる。これは現有設備の能力（対応する水量）のバランスがとれていないことが一因であり、システムの代表値を得るためには、可能な限りこの影響

を小さくすることが必要で、設備の能力がバランスする規模の仮想施設を想定することでこの影響を小さくすることができるものと思われる。

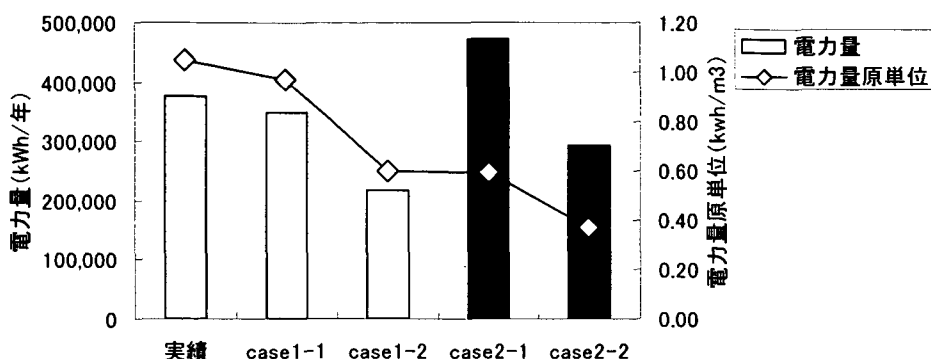


図6 条件設定の違いによる計算結果の比較（A処理場）

## (2) 下水処理施設の特性を踏まえたLCAのあり方についての検討

図7は、T処理場における電力量原単位の経年変化（実測値）を、処理水量および水量負荷率（処理水量/施設能力）とともに示したものである。

このように、下水処理場は面整備の進展とともに流入水量が増加し、それにともなって施設が整備される。また、この間、施設の能力は原則として日平均流入量に対して余裕を持っている。したがって、評価の目的によって時間軸上のどこを評価ポイントとするのか考える必要がある。つまり、システムの比較を行う場合には計画水量流入時点を想定したモデルで評価すべきで、ブロック割など、時間経過を考える場合は、負荷量の推移を考慮する必要がある。

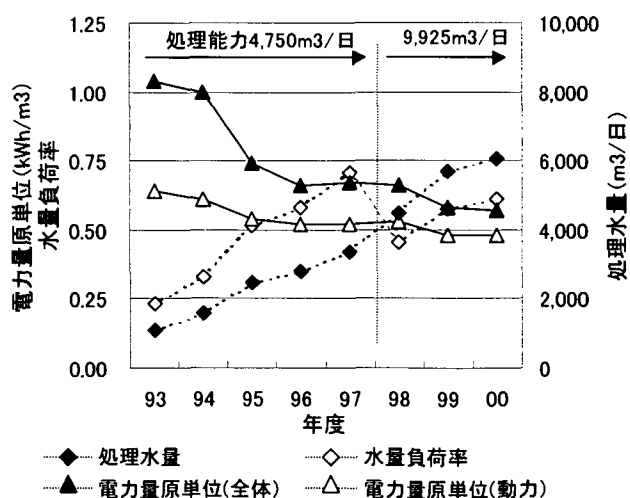


図7 電力量原単位の経年変化（処理水量・水量負荷率との関係）

## 4.3 高度処理におけるLC-CO<sub>2</sub>の算定

### (1) 対象施設の概要

表3に、比較を行った高度処理施設、および標準法、OD法の施設の概要を示す。なお、対象施設は水処理施設に関する機械設備および土木施設とし、環境負荷量の比較は処理水量当たりのLC-CO<sub>2</sub>で行った。

表3 ケーススタディー対象処理場の概要

	K 処理場	I 処理場	T 処理場
処 理 方 式	循環式硝化脱窒法、嫌気無酸素好気法 同時凝集法	標準活性汚泥法	OD法
計画処理水質 (mg/L)	BOD 5mg/L, COD10mg/L, SS 6mg/L, T-N10mg/L, T-P0.5mg/L	BOD20mg/L SS 30mg/L	BOD20mg/L SS 30mg/L
計画流入水量 (m3/日)	75,000	66,900	35,000
現有処理能力 (m3/日)	52,500	44,810	9,920
処 理 水 量 (m3/日)	35,520	20,750	6,060

(2) 計算結果

図8は、各処理方式の建設段階から運転、廃棄に至るまでの各段階におけるLC-CO<sub>2</sub>の比率を示したものである。

これをみると、各方式とも建設と運転で大部分を占めており、特に高度処理を行っているK処理場において運転時の割合が大きい。また、図9は各処理場の処理水量当たりLC-CO<sub>2</sub>を比較したもので、標準法のI処理場と比較してK処理場は1.33倍、OD法のT処理場は1.49倍となった。

この段階ではまだ先に示した「標準化」を行っておらず、この差を高度処理を行っていることに起因するものとするには十分な解析が出来ていないが、この差の内容を精査し、処理水質の違いに相当する負荷量の差と水環境改善効果を関連づけて評価していくことが今後の課題である。

5. おわりに

今年度は、過年度のケーススタディーの結果をもとに、処理場設備のLC-CO<sub>2</sub>の算定方法を簡略化する手法について検討し、ポンプ、送風機、ファン等の主要設備の運転時における電力由来の負荷について、これら設備の主機の能力・容量をパラメータとする簡略化の可能性を示した。また、実施設のケーススタディーから類似施設の代表値を得るための「標準化」の手法について検討し、ポンプ、送風機、ファン等の運転条件の設定の影響が大きいため、各設備のバランスがとれた仮想施設について算定することが望ましいことを示した。さらに、総合的な評価を行うための基礎的検討として、高度処理を行っている施設と標準法、OD法の施設のLC-CO<sub>2</sub>を比較した。今後は、これらの結果をもとに、高度処理、汚泥有効利用設備に関する総合的LC-CO<sub>2</sub>の手法の確立に向けた検討を行う予定である。

なお、過年度調査の一部は、日本下水道事業団、(社)日本下水道施設業協会、(社)全国上下水道コンサルタント協会との共同研究で行ったものである。

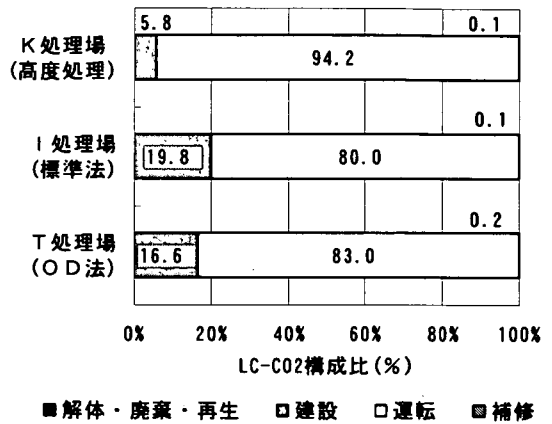


図8 処理方式の異なる処理場における LC-CO<sub>2</sub>の比較

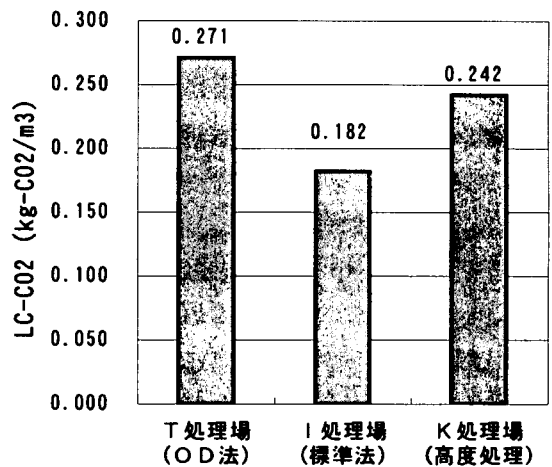


図9 処理方式の異なる処理場における 処理水量当たり LC-CO<sub>2</sub>の比較