

◆特集：新しい時代に向けた下水道技術◆

LCA手法を用いた汚水処理システムの評価

荒谷裕介* 平出亮輔** 南山瑞彦*** 中島英一郎****

1. はじめに

平成9年12月に開催された「地球温暖化防止京都会議」において、日本は2010年（平成22年）の温室効果ガスの排出量を1990年比で6%削減することとされ、平成11年4月より施行された「地球温暖化対策の推進に関する法律」において、国及び地方自治体は自ら出す温室効果ガスの排出抑制等に関する実行計画を策定し、計画やその実行状況を公表することを義務づけられている。

環境への事業影響評価にあたっては、従来から環境影響評価（Environmental Impact Assessment; 以下、EIA）が制度化されているが、近年、施設の建設、維持管理、さらには廃棄を含めたライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment; 以下、LCA）を用いることが有効な手段であるとして注目を集めている。LCA手法の特徴の一つとして、施設の全ライフサイクルにわたって消費する資源及び排出する環境負荷を定量的、客観的に評価出来ることが挙げられる。LCAは地球環境等広い地域の環境に及ぼす影響に視点を置いている。一方、EIAは事業の実施場所やその付近に及ぼす影響を評価する手法である。両手法を併用することによって、事業実施に伴う環境への影響をより総合的に評価することが可能であると考えられることから、LCAによる評価手法を早急に確立し、実務へ早期に適用することが求められている。

下水道事業をはじめ、汚水処理事業にLCA手法を適用するための調査・研究は、近年、活発に行われており、いくつかの成果が報告されている^{1)~3)}。当研究室においても、下水道の各施設に対するケース・スタディを行い、原単位等下水道事業にLCAを適用するための基礎データを蓄積している。本報では、政策立案段階（マスタープランレベル）における意志決定支援ツールとし

てLCA手法を適用することを想定して、LCAによる汚水処理システム（個別処理・集合処理）の評価を実施した例を報告する。なお、LCA全般の環境影響評価は、「インベントリー分析」と「影響評価」の2段階に大きく分けられるが、ここでは「インベントリー分析」による環境負荷量の定量化にとどめ、CO₂排出量（以下、LC-CO₂）及びエネルギー消費量（以下、LCE）を算定した上で各処理方法に対する評価・比較検討を行った。

2. 調査方法

茨城県内の下水道事業計画区域のうち、市街地からある程度離れたエリアを対象地区として選定し、選定した対象地区に個別処理（合併処理浄化槽を想定）及び集合処理（下水道等を想定）を適用した場合の環境負荷量（LC-CO₂、LCE）を現状並びに全体計画時において算定し、評価・比較検討を行った。

2.1 対象地区の選定

対象地区は、既設下水処理場から約3.8km離れた面積約33ha、人口約300人規模の宅地と畑地が混在した集落である。対象地区を図-1に示す。

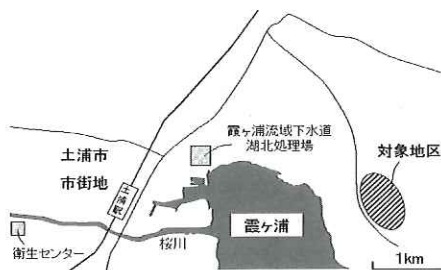


図-1 対象地区

2.2 想定ケース

対象地区において、個別処理と集合処理の2つの異なる方法によって汚水を処理することを想定し、以下の通り、処理水質、汚泥処理方法の違いによりさらに細かく検討することとした。想定したケースを表-1に示す。

表-1 想定ケース

ケース区分	個別処理 (ケース①)		集合処理 (ケース②)		
	浄化槽 (一般型) で処理する場合	浄化槽 (高度処理型) で処理する場合	区域内に処理場を建設して処理する場合		区域外の既設処理場に接続して処理する場合
放流水質	BOD	20mg/ℓ以下 (除去率90%以上)	10mg/ℓ以下	10mg/ℓ以下	10mg/ℓ以下
	SS	-	10mg/ℓ以下	15mg/ℓ以下	15mg/ℓ以下
	T-N	-	10mg/ℓ以下	15mg/ℓ以下	15mg/ℓ以下
	T-P	-	1.0mg/ℓ以下	2.0mg/ℓ以下	0.5mg/ℓ以下
汚泥処理法	区域外へ汚泥を運搬し処理	区域外へ汚泥を運搬し処理	区域内で汚泥を焼却処理	区域外へ汚泥を運搬し処理	区域外の既設処理場で焼却処理
ケースNo	①-1	①-2	②-1	②-2	②-3

2.2.1 個別処理

処理水質の違いにより2ケース (ケース①-1、ケース①-2) を想定した。

ケース①-1：対象地区内の各戸、事業所等ごとに合併処理浄化槽 (一般型) を設置して個別に処理することとした。汚泥については、汚泥収集運搬車によって各戸の汚泥を収集したうえで対象地区外の汚泥処理施設で処理することとした。

ケース①-2：地区内の各戸、事業所等ごとに合併処理浄化槽 (高度処理型) を設置して個別に処理することとした。汚泥については、ケース①-1と同じ方法で処理することとした。

2.2.2 集合処理

対象地区内に集合処理施設を建設して処理する場合を2ケース (ケース②-1、ケース②-2)、対象地区外の既設下水処理場に接続して処理する場合を1ケース (ケース②-3)、計3ケース想定した。ケース②-1：対象地区内の各戸、事業所等から発生する汚水を管渠で収集し、地区内に集合処理施設 (下水処理場等) を建設して処理することとした。汚泥については、地区内に汚泥焼却施設を建設して処理することとした。

ケース②-2：汚水についてはケース②-1と同じ方法で処理することとした。汚泥については、対象地区外の汚泥処理施設へ運搬して処理することとした。

ケース②-3：対象地区内の各戸、事業所等から発生する汚水を管渠で収集し、対象地区外にある既設下水処理場に接続して処理することとした。汚泥についても、既設下水処理場の焼却施設で処理することとした。

表-2 対象地区の諸元

	単位	T町	対象地区			
		2003.2.1現在	現状	全体計画	増加分	
世帯数	(世帯)	166	72	90	18	
人口	(人)	655	284	352	68	
世帯当たり人口	(人/世帯)	3.95	3.95	3.95	-	
事業所数	(箇所)	-	8	8	0	
浄化槽個数	5人槽	(槽)	-	8	26	18
	7人槽		-	68	68	0
	12人槽		-	1	1	0
	18人槽		-	1	1	0
	21人槽		-	1	1	0
	28人槽		-	1	1	0
汚水量	生活系	(m ³ /日)	-	68	84	16
	事業所系		-	18	25	7
	計		-	86	109	23
地下水	(m ³ /日)	-	13	17	4	
管渠延長	φ100	(m)	-	206	206	0
	φ200		-	4,404	5,795	1,391
	計		-	4,610	6,001	1,391

2.3 対象地区の諸元

対象地区において、現状及び全体計画時における人口、世帯数、浄化槽個数、汚水量及び管渠延長を以下の条件のもとに設定した (表-2)。

(1) ケース① (個別処理) ・ ケース② (集合処理) 共通

- ・ 全体計画時の人口は認可計画書⁴⁾の値を使用した。
- ・ 住宅地図より対象地区の現状における家屋数を把握し、現状の世帯数とした。
- ・ 対象地区のあるT町の現在 (2003.2.1現在) の人口及び世帯数より世帯あたりの人口を算出し、この数値を利用して対象地区の現状人口及び全体計画時世帯数を想定した。
- ・ 住宅地図より対象地区の現状における学校、事務所等の数を把握し、現状及び全体計画時の事業所数とした。

(2) ケース① (個別処理)

- ・ 施設の耐用年数は30年とした。
- ・ 住宅地図より対象地区の現状における各建物の床面積を想定した。
- ・ 床面積から基準⁵⁾を用いて浄化槽の処理対象人員及び人槽を設定した。
- ・ 増加世帯数全てに5人槽が設置されるものとして全体計画時の浄化槽数を設定した。

(3) ケース② (集合処理)

- ・ 施設の耐用年数は、機械類を15年、土木などその他の施設を50年とした。

表-3 使用原単位

ケース	対象区分			
個別処理	①-1 及び ①-2	浄化槽	製造	人槽ごとの原単位は文献値 ³⁾
			設置	7人槽の文献値 ³⁾ を基に浄化槽容量比で原単位を算出
		運転	計算値(プロウ出力×24時間)の消費電力量を使用 電力量の原単位は文献値 ⁸⁾	
		維持管理	薬品使用量から作成した7人槽の原単位を基に浄化槽容量比で原単位を算出	
集合処理	②-1	水処理施設	建設	ケーススタディにより処理量あたりの原単位を作成
			運転・補修	
			解体・廃棄	
			発生量	対象人口および汚泥発生量原単位から算定 汚泥発生量原単位は文献値 ⁹⁾
		管渠施設	建設	管渠延長あたりの原単位は文献値 ¹⁰⁾
	清掃		文献値 ¹¹⁾	
		汚泥処理施設(焼却)	建設	脱水の原単位は文献値 ¹²⁾
	運転・補修		乾燥・焼却についてはケーススタディによりDSあたりの原単位を作成	
	解体・廃棄		N ₂ Oによる負荷量はCO ₂ に換算 ^{13),14)} することで考慮	
	発生量		除去SS量より算定	
②-2	水処理施設	建設	ケーススタディにより処理量あたりの原単位を作成	
		運転・補修		
		解体・廃棄		
		発生量	対象人口および汚泥発生量原単位から算定 汚泥発生量原単位は文献値 ⁹⁾	
		管渠施設	建設	管渠延長あたりの原単位は文献値 ¹⁰⁾
	清掃		文献値 ¹¹⁾	
		汚泥処理施設(運搬)	建設	ケーススタディにより処理量あたりの原単位を作成
	運転・補修			
	解体・廃棄			
	発生量		「運搬車両の製造+運転による減価償却+燃料(軽油)消費」を考慮して運搬量あたりの原単位を作成	
②-3	水処理施設	建設	ケーススタディにより処理量あたりの原単位を作成	
		運転・補修		
	汚泥処理施設	解体・廃棄		
		清掃	幹線:ケーススタディにより延長あたりの原単位を作成、負荷量は流量比で按分面整備、管渠延長あたりの原単位は文献値 ¹⁰⁾	

- 生活系汚水量は、現状、全体計画時ともに認可計画書⁴⁾の値を使用して算定した。
- 事業系汚水量のうち、全体計画時は認可計画書⁴⁾の値を使用して算定した。
- 事業系汚水量のうち、現状はケース①において想定した床面積及び汚水量原単位⁶⁾から算定した。
- 全体計画時における対象地区内の管渠延長は、認可計画書⁴⁾の値を使用した。
- 現状における対象地区内の管渠総延長は、住宅地図を利用して想定した。現状における管種は全体計画時における管種(φ100、φ200)と変わらないものとした。全体計画において、φ100は圧送管用、φ200は自然流下用として計

画されており、現状から全体計画時に増加する管渠については全てφ200であると仮定した。

- ケース②-3の使用水量については、文献値⁷⁾による不明水率を用いた地下水量を考慮して加算した。

2.4 環境負荷量の定量化

LCAにおける環境負荷量の定量化には、「産業連関分析法」と「積み上げ法」があるが、本報においては両手法を併用することとした。すなわち、建設時に必要な基礎資材(素材や基礎部品等)や運転時に必要なエネルギー等の原単位(一次原単位)を産業連関分析法に基づくデータに依存することとし、これらに建設時の工事数量、運転時の消費資源等乗じることによって、機器や製品或いは処理施設毎といったレベルの原単位(二次原単位)をケース・スタディにより作成するか、若しくは既存の文献値を参照することによって計画・設計段階で使用可能な原単位を整備した(表-3)。そのうえで、各対象地区に想定した個別処理及び集合処理施設の建設・運転・廃棄等ライフサイクル別環境負荷量(LC-CO₂, LCE)の定量化を行った。各ケースにおける検討対象範囲は以下のとおりとした。

(1) ケース①(個別処理)

浄化槽の製造・設置及び運転・維持管理、汚泥処理施設の建設、運転・補修及び解体・廃棄と汚泥処理施設までの汚泥の運搬を対象範囲とした。

(2) ケース②(集合処理)

水処理施設の建設、運転・補修及び解体・廃棄、管渠施設の建設及び清掃、汚泥処理施設の建設、運転・補修及び解体・廃棄を対象範囲とした。ただし、ケース②-2については、さらに汚泥処理施設までの汚泥の運搬を対象範囲とした。

3. 結果及び考察

表-3に示す原単位を用いて各ケースにおける環境負荷量(LC-CO₂, LCE)を算定した。表-4及び図-2に算定結果を示す。

3.1 個別処理と集合処理の環境負荷量の比較

想定した5つのケースの環境負荷量は、以下の順に大きい結果となった。

LC-CO₂: ①-2>①-1>②-2>②-1>2-③

LCE : ①-2>②-2>①-1>②-1>2-③

概ね集合処理の方が個別処理よりも環境負荷量

表-4 環境負荷量算定結果及び全負荷量に占めるライフサイクル別負荷量の割合

対象区分	ケース	ライフサイクル	LC-CO ₂ (kg-CO ₂ /年)		LCE (MJ/年)		全負荷量に占める割合			
			現状	全体計画	現状	全体計画	LC-CO ₂		LCE	
個別処理	①-1	建設	26,652	31,977	269,426	323,018	37%	37%	22%	22%
		運転・補修	45,049	53,971	936,745	1,120,544	63%	63%	78%	78%
		解体・廃棄	4	5	21	25	0%	0%	0%	0%
	計	71,705	85,953	1,206,192	1,443,588	100%	100%	100%	100%	
	①-2	建設	32,971	39,933	333,356	403,389	38%	38%	23%	23%
		運転・補修	53,052	64,162	1,111,877	1,343,540	62%	62%	77%	77%
解体・廃棄		4	5	21	25	0%	0%	0%	0%	
計	86,027	104,100	1,445,253	1,746,955	100%	100%	100%	100%		
集合処理	②-1	建設	17,450	22,477	255,595	329,387	31%	31%	26%	26%
		運転・補修	39,118	49,626	727,891	923,238	69%	69%	74%	74%
		解体・廃棄	130	165	1,689	2,141	0%	0%	0%	0%
	計	56,698	72,267	985,175	1,254,765	100%	100%	100%	100%	
	②-2	建設	17,649	22,717	257,737	331,953	27%	28%	21%	22%
		運転・補修	46,455	58,458	954,361	1,201,556	72%	72%	79%	78%
		解体・廃棄	129	164	1,684	2,134	0%	0%	0%	0%
	計	64,234	81,338	1,213,782	1,535,644	100%	100%	100%	100%	
	②-3	建設	18,132	22,493	260,632	323,196	38%	37%	40%	39%
運転・補修		29,526	37,613	391,878	499,265	62%	63%	60%	61%	
解体・廃棄		-36	-46	-614	-782	0%	0%	0%	0%	
計	47,622	60,060	651,896	821,680	100%	100%	100%	100%		

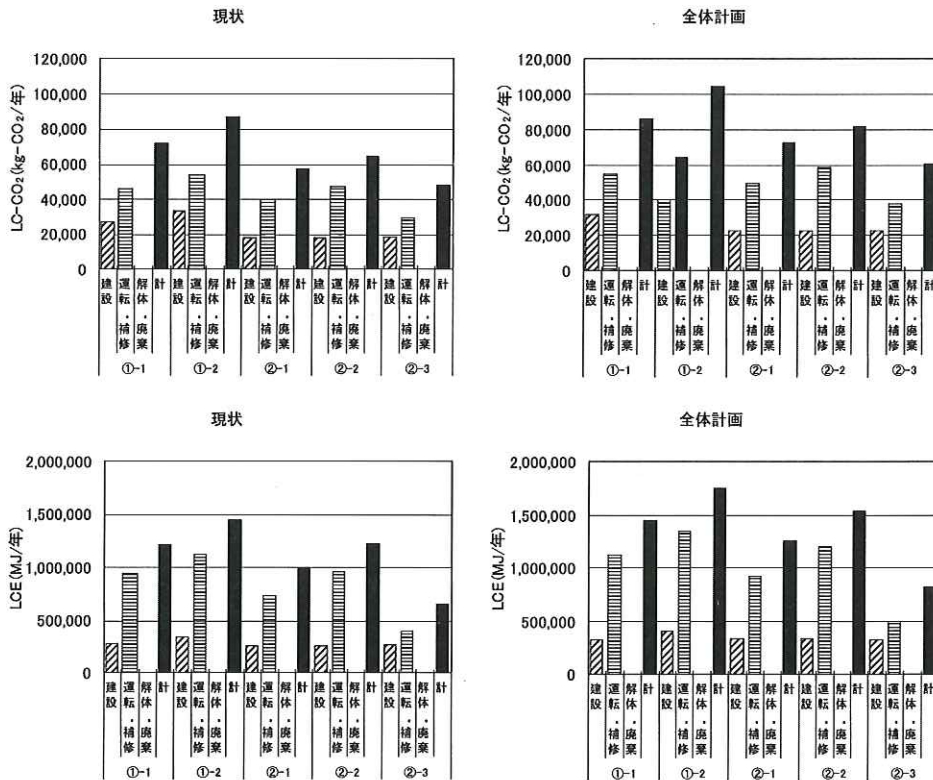


図-2 環境負荷量算定結果

が小さくなった。特に、対象地区外の既設下水処理場に接続して処理する場合（ケース②-3）が最も環境負荷の小さい污水处理システムとなった。

ケース①-1とケース②-2はLC-CO₂とLCEで結果が異なったが、これは一次原単位を用いて負荷量を積み上げた際の僅かな差であると考えられ、

環境に対する負荷としては両ケースともほぼ同程度であったものと考えられる。

全体的な傾向として、全てのケースにおいて建設時よりも運転・補修時においてより大きな環境負荷量が発生した。建設時における環境負荷量は、集合処理において大きな差はみられず、特にLCEについては、ケース①-2が若干高い値を示しているもののその他の4ケースについてはほぼ等しい値を示すこととなった。一方、運転・補修時における環境負荷量の全負荷量に占める割合は、個別処理において62～63% (LC-CO₂)、77～78% (LCE)、集合処理において62～72% (LC-CO₂)、60～79% (LCE) と、共に大きな値となり、運転・補修時における負荷量の傾向がライフサイクル全体における傾向に類似することとなった。

管渠の建設に起因して集合処理の負荷量が増大するとの予想に反して、建設時における負荷量が各ケースにおいて同程度になった。この要因は現時点で不明であり、今後、人口規模や世帯数、既設下水処理場からの距離等の異なる他の対象地区と比較することによってさらに詳細に検討していく必要がある。また、運転・補修時における負荷量がライフサイクル全体の負荷量に対して大きな割合を占めることから、ライフサイクル全体の環境負荷量を低減するためには、各処理方法ともより運転効率を高める必要があると考えられる。

一般的に、個別処理は一世帯あたりの環境負荷量が家屋 (= 世帯) の点在状況に影響されない(ただし、収集を伴う汚泥処理を除く)。一方、集合処理は地区内に整備する管渠にかかる環境負荷量が家屋の点在状況と密接に関係し、家屋数が減少するにつれて一世帯あたりの環境負荷量は大きくなり、集合処理のスケールメリットが低下する。

今回選定した地区においてはケース②-3が最も負荷量の小さいシステムとなったが、人口規模や世帯数によっては結果が異なってくるのが予想されることから、今後は、より人口規模が小さく世帯数の少ない地区における検討が必要になってくるものと思われる。

3.2 個別処理について

建設時、運転・補修時ともにケース①-2(高度処理型浄化槽)の負荷量が大きくなる結果となった。

建設時(製造・設置)については、一般型に比べて高度処理型の槽容量が大きいいため、製造・設置

に関する原単位が大きくなるのが結果に反映されることとなった。

運転・補修時については、一般型に比べて高度処理型の消費電力が大きいことが結果に反映されることとなった。

今回の調査において、一般型及び高度処理型浄化槽(7人槽)の電力消費量を実測し、計算値(=プロア出力×24時間)との比較を行ったが、その差異は概ね10%以下となり、概略の消費電力はプロア出力と稼働時間により算出できることが分かった。

3.3 集合処理について

汚泥をともに焼却処理するケース②-1とケース②-3を比較する。建設時における環境負荷量は両ケースともほぼ同じ値となった。処理場については、処理規模の小さい処理場を建設するよりも処理規模の大きい既設処理場に接続した方がスケールメリットが働く、という点でケース②-3の負荷量が小さくなった。

一方、管渠施設については、対象地区と既設処理場を繋ぐ管(幹線管渠)を考慮する必要がないことから逆にケース②-1の負荷量が小さくなり、結果として、建設時全体ではほぼ同じ負荷量になったものと考えられる。ケース②-3の場合、対象地区が既設処理場から離れるに従って管渠施設の負荷量は増大し、ポンプ場を設置する必要性が生じてくる場合はさらに大きな負荷量となることから、対象地区の位置によっては建設時の負荷量が増加する場合がある。

運転・補修時においては、ケース②-3の負荷量がケース②-1、ケース②-2に比べて小さくなった。処理場を建設する場合と同様、処理規模の違いによるスケールメリットが反映された結果であると考えられる。対象区域の人口が減少する場合、処理量の少なさに起因する処理効率の低下等によりケース②-3の負荷量が増加するものと予想される。

4. 結論

本調査は、下水道事業におけるLCA評価手法を確立し、その手法を実務に適用することを最終目標としており、実務に適用可能なマニュアルを作成する予定である。今回は、政策決定段階におけるLCA手法の適用例として、異なる汚水処理

方法による環境負荷量の違いをある区域を対象として評価・比較検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・今回選定した対象地区においては、個別処理よりも集合処理の方が環境負荷量が少なく、また、集合処理においても処理規模の大きな既設下水処理場へ接続して処理するケースが環境負荷量を低減するうえで最も有利であることが分かった。
- ・全てのケースにおいて、ライフサイクルのうち建設時よりも運転・補修時において環境負荷量がより大きくなった。環境負荷量全体に占める運転・補修時の負荷量の割合は個別処理において62～63% (LC-CO₂)、77～78% (LCE)、集合処理において62～72% (LC-CO₂)、60～79% (LCE) であった。
- ・ライフサイクル全体の環境負荷量を低減するためには、各処理方法とも運転効率を高める必要がある。
- ・個別処理については、建設時、運転・補修時ともに高度処理型浄化槽の環境負荷量が大きくなった。
- ・集合処理については、今回選定した区域においては、既設処理場へ接続する場合の方が環境負荷量が小さくなる結果となったが、対象区域の既設処理場からの位置、区域内の人口規模によっては処理場を建設する場合の方が負荷量が小さくなる可能性がある。

謝辞

本調査を行うにあたって、土浦市下水道建設課には下水道全般の資料を、茨城県農林水産部畜産課及び横浜市下水道局には污泥処理施設に関する

資料を、土浦市耕地課には農業集落排水処理施設に関する資料を、また、土浦市環境衛生課には浄化槽関係の資料をそれぞれ提供していただいた。ご協力いただいた皆様に謝辞を表します。

参考文献

- 1) 井村秀文、銭谷賢治、中嶋芳紀、森下兼年、池田秀昭：下水道システムのライフサイクルアセスメント：LCE及びLC-CO₂による評価、土木学会論文集、No.552/VII-1, 75-84, 1996.11
- 2) 霧巻峰夫、野池達也：LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究、土木学会論文集、No.643/VII-14, 11-20, 2000.2
- 3) (財)日本環境整備教育センター：浄化槽のライフサイクルアセスメントに関する調査報告書 平成14年3月
- 4) 茨城県：霞ヶ浦湖北流域下水道事業計画変更認可申請書、平成12年12月
- 5) 日本工業規格：建築物の用途別によるし尿浄化槽の処理対象人員算定基準 (JIS A 3302-2000)、2000年3月17日
- 6) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧 (第12版)、1995年
- 7) (社)日本下水道協会：平成12年度版下水道統計 財政編 第57号の2
- 8) 日本建築学会：建物のLCA指針 (案)、1998.11
- 9) (社)全国都市清掃会議：污泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領、p.41、平成13年8月
- 10) 建設省土木研究所、(社)日本上下水道コンサルタント協会：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12年3月
- 11) 井村秀文：建設のLCA、オーム社
- 12) 霧巻峰夫：環境調和性を考慮した排水処理システムの評価手法に関する研究、1998年
- 13) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水道施設を活用したCH₄、N₂Oの排出抑制中核技術の汎用化と普及に関する研究、平成13年度下水道関係調査研究年次報告書集
- 14) (社)日本下水道協会：下水道における地球温暖化防止実行計画策定の手引き、平成11年8月

荒谷裕介*



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室研究官
Yusuke ARATANI

平出亮輔**



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室研究官
Ryosuke HIRAIDE

南山瑞彦***



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室長
Mizuhiko MINAMIYAMA

中島英一郎****



都市再生機構業務企画部事業監理室長
(前 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室長)
Hideichiro NAKAJIMA