

61. 東京都の上下水道におけるLCA(CO₂)削減方策 —節水対策導入効果及び送風機技術の改良によ る効果分析—

相原崇^{1*}・小高巧²・松下潤³

¹ 芝浦工業大学 (〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区大字深作307)

² 高砂熱学工業株式会社 (〒101-8321 東京都千代田区神田駿河台4丁目2番地5)

³ 中央大学研究開発機構 (〒112-0003 東京都文京区春日1-13-27)

* E-mail: me14001@shibaura-it.ac.jp

東京都の上下水道における電力使用量は全体の2%を占める。LCAの視点では、長期的に見ると上下水道共に建設・廃棄段階よりも運転段階の方が大きい。本研究では、第一に水道施設においては東京都が1970年代に導入した節水対策を分析・把握を行い、節水対策効果をふまえた施設・設備容量の削減が行われと仮定し、LCA(CO₂排出量)の削減効果を明らかにした。次に、下水道施設においてはLCA(CO₂排出量)の中で大きな割合を占める送風機に着目し、その技術改良によるLCA削減効果を明らかにした。

以上の結果、①水道施設については、節水対策によるLCA削減効果は22%であった。②下水道施設は節水対策による削減効果は22%であり、送風機技術の改良による削減効果は7%であった。

Key Words : Water Supply and Sewerage Systems, Life Cycle Assessment(LCA), Water Conservation Effect, Blower Improvement Effect

1. はじめに

(1) 研究背景及び目的

現代の日本の課題として、事業の効率化、透明化などに加え、地球環境問題等への対応がある。公共事業でも同じことが言え、いかに効率的で環境負荷の少ない施設であるかが問われている。図-1に東京都電力使用量内訳¹⁾を示す。2010年における東京都の電力使用量内訳において、水道・廃棄物処理は全体の3%の2,529(10⁶kWh/年)を占めており、これは運輸部門の4%に次ぐ大きさである。また、水道・廃棄物処理はその中でも上水・下水・廃棄物処理でそれぞれ1:1:1の割合となっており、上下水道だけで東京都の電力使用量の約2%を担っている。

表-1に東京都浄水場、下水処理場における消費電力内訳²⁾³⁾を示す。平成22年度において水道事業における電力使用量は年間約782 (10⁶kWh)であり、浄水処理工程は全体の31%にあたる。また、下水道事業における電力使用量は年間約914 (10⁶kWh)であり、その中でも送風機の割合は25%と高い。

東京都電力使用量内訳(2010)

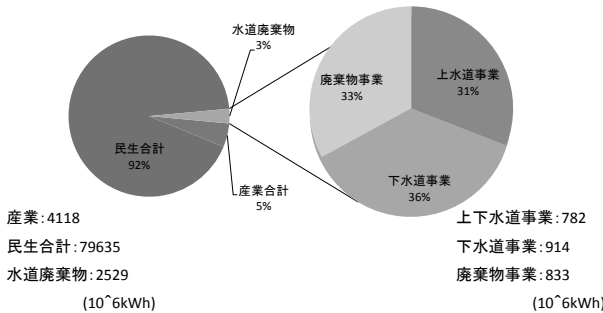


図-1 東京都電力使用量内訳(2010)¹⁾

表-1 東京都浄水場、下水処理場における消費電力内訳²⁾³⁾

浄水処理工程別使用電力(10 ⁶ kWh)		割合(%)	下水処理工程別使用電力(10 ⁶ kWh)		割合(%)	
取水・導水	46.97	6%	水処理	揚水(汚水・雨水)	191.94	21%
				送風機	228.5	25%
浄水処理	261.68	31%	汚泥処理	沈砂池機械・脱臭など	127.96	14%
				諸機械・その他	137.1	15%
送水・配水・給水	472.21	63%		濃縮・脱水	82.26	9%
				焼却	109.68	12%
合計	780.86	100%		諸機械・その他	36.56	4%
			合計	914	100%	

今後の公共施設の維持管理を考えていく上で、節水対策による施設容量の削減、送風機技術の改良及び処理システムの最適化が環境負荷削減に貢献すると考えた。

本研究では、東京都浄水処理施設において節水効果による環境負荷削減、また東京都下水処理施設における節水効果、加えて送風機技術の改良による環境負荷削減についてLCA手法を用いて評価・検証する。

(2) 既存の上下水道のLCAに関する研究

a) 上水道LCAに関する既存研究

水道技術センターの浄水施設を対象としたLCAに関する研究⁴⁾において「凝集沈殿+砂ろ過」、「膜ろ過」、「高度処理」の3方式についてLCA評価が行われている。ここでは、日量2万m³の浄水施設のエネルギー消費やCO₂排出量を事業期間全体で評価した結果、ポンプ動力の他に薬品注入や活性炭更新など浄水処理の運転段階に関する負荷が高いことがわかった。

また、岡田明大の研究⁵⁾によると、アセットマネジメント導入の際にLCA評価をしたところ、適切な予防・更新を行うことで、建設・廃棄段階におけるエネルギー負荷は軽減され、運転段階におけるエネルギー負荷が比較的大きくなることがわかった。運転時の際にエネルギー消費の少ない浄水処理を行うには節水対策が有効なことが判明した。

b) 下水道LCAに関する既存研究

国土技術政策総合研究所のLCAに関する研究⁶⁾をここで示す。同研究では下水道のライフサイクルにわたって発生する環境負荷を定量的に把握し、評価することにより、負荷低減の検討及び改善に活用することを目的としている。まず土木建築・機械・電気⁷⁾の3つの項目からそれぞれ建設・運転・更新・解体廃棄段階に分けて考える。対象期間は土木建築施設50年、機械電気設備6-20年としている。

表-2に下水処理場における各工程の環境負荷の割合を示す。こちらも同様に下水処理にかかる運転段階のエネルギーが全体の8割と非常に大きな割合を占めている。建設または解体廃棄にかかる割合は合わせて2割程度であり、下水処理場で建物が出来てから機械が動いているとき、電力を使用している時に多くのCO₂を排出していることがわかっている。

表-2 上下水道におけるライフサイクルCO₂排出量

	既存研究の浄水場(2008年)			既存研究の下水処理場(2004年)		
	kg-CO ₂ /m ³	kW/m ³	割合	kg-CO ₂ /m ³	kW/m ³	割合
建設	0.0189	0.0669	16.7%	0.0741	0.2426	19.2%
運転	0.0684	0.4212	60.3%	0.3088	1.8187	80.2%
更新	0.0257	0.0388	22.6%	0.0002	0.0008	0.1%
解体	0.0005	0.0017	0.4%	0.0019	0.0053	0.5%
合計	0.1135	0.5288	100%	0.3850	2.0673	100%

※既存研究の浄水場、下水処理場は参考文献4) 6)を参考とした。

2. 研究手法

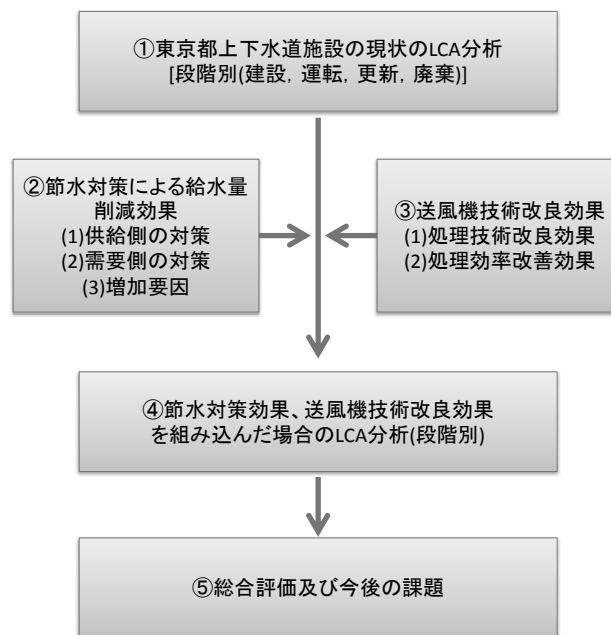


図-2 研究手法フローチャート

図-2に研究手法を示す。

本研究では、第一に、東京都上下水道施設の現状のLCA分析を行う。次に、東京都が導入した節水対策による給水量の削減を需要者側と供給者側の対策に分け、さらに給水量増加要因を分析・把握した。また、送風機の技術改良効果は、処理技術の改良効果・処理効率の改良効果に着目し、分析した。

これらの削減効果を踏まえた上下水道施設のLCA分析を行い、最後に総合評価として今後の課題を示した。

3. 研究結果

(1) 東京都給水量の変遷

東京都における給水量の変遷⁷⁾を図-3に示す。東京都の給水量の変遷をたどると、1978年の都民一人一日当たり428ℓをピークにそれ以降は年々減少している。2007年時点では347ℓであるので30年間の間に81ℓの削減が行われた。これは東京都が過去30年間で様々な節水対策を施してきたからである。

表-3に各々の節水対策について節水量を示す。本研究では、東京都が過去30年間に行った節水対策を需要者側と供給者側の対策に分け、削減効果を示した。合わせてその間に起きた都市構造及び家族構造の変化に伴う給水量の増加要因も示す。

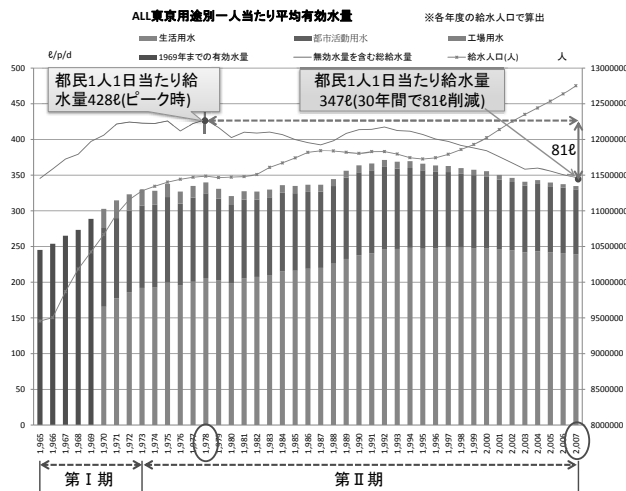


図-3 東京都給水量変遷(1965-2007)⁷⁾

表-3 節水対策別一人一日当たり給水量の増減内訳

	各要因	増減量(L/p/d)	LCA貢献量(L/p/d)
増加要因	都市構造の変化	+22.7	-22.2×100%=-22.2
	家族構造の変化	+66.8	-66.8×100%=-66.8
	小計	+89.5	-89.5
減少要因 (供給者側)	漏水対策	-55.0	55.0×100%=55.5
	不感水の削減	-20.0	20.0×100%=20.0
	(小計)	-75.0	75
減少要因 (需要者側)	節水型トイレの開発・販売	-22.2	22.2×200%=44.4
	節水型洗濯機の普及	-26.4	26.4×130%=34.32
	下水処理の循環利用	-6.7	6.7×0%=0
	雨水の雑用水利用	-0.03	0.03×100%=0.03
	工場用水の節水	-8.0	8.0×0%=0
	広報活動	-32.2	32.2×100%=32.2
	通増料金制度	-32.2	32.2×100%=32.2
	(小計)	-95.6	110.95
	小計	-170.6	96.45
	合計	-81.0	1978年の428ℓより 約22%削減

(2) 節水対策内訳

a) 需要者側の対策

東京都の過去30年間の節水対策の内訳は大きく需要者側と供給者側の対策に分かれる。需要者側の対策として、節水型機器(節水型便器・洗濯機)の開発・販売、延床面積1万㎡以上の新規建築物、開発面積3万㎡以上の開発事業を対象とした循環利用による雑用水利用への協力依頼、雨水利用、工場移転による工業用水道水の減少が挙げられる。

節水型機器の開発・販売において各々の都民一日一人当たりの節水量は節水型便器が22.2ℓ、節水型洗濯機が26.4ℓの計48.6ℓに当たる。循環利用による雑用水利用においては都民一日一人当たり6.7ℓ、雨水利用においては墨田区の例を用いて計算を行ったところ都民一日一人当たり0.03ℓに当たる。工場用水における節水効果は都内の工場の移転促進政策による減少分1ℓと工場内の回収水利用による減少分7ℓの二つから構成され、計8ℓの減少量となった。

また、需要者側の節水行動効果も含まれる。ここでは、水道事業者による広報活動や通増料金制度の導入などが

ある。広報活動においては、東京都の厳しい水需要の説明のパンフレットや教材の作成、節水コマの開発と頒布、節水と呼び掛けるポスターの作成、水道モニター制度などがある。

b) 供給者側の対策

供給者側の対策として、当初30%以上あった漏水の削減と水道検針メーターの不具合による不感水の削減がある。

各々の節水量は、都民一日一人当たり漏水対策は55ℓ、不感水対策は20ℓの効果がある。

c) 給水量の増加

給水量の増加を考慮した場合、主に都市構造の変化と家族構造の変化(核家族化)による水消費のムダとその間に生じたライフスタイルの変化に伴う水消費量の増加があると考えられる。

給水量の増加量は、都民一人一日当たり都市構造の変化は22.7ℓ、家族構造の変化は66.8ℓと計89.5ℓの増加が考えられる。

(3) 節水対策別LCA分析

表-3 に節水対策別のLCA分析を示す。東京都が過去30年間に行った節水対策は水及びエネルギー消費の削減に貢献していると考えられる。節水対策をLCA分析し、貢献量に換算すると東京都の節水対策は過去30年間で約22%の節水効果が得られる結果となった。なかでも節水対策にかかったエネルギーをLCAの視点から見ると節水型機器の開発・販売による普及の貢献度は高い。

a) 給水量増加要因

給水量の増加要因として都市構造及び家族構造の変化がある。都市構造の変化により郊外から東京への人口流入が多くなり商業地域及び学校等の水消費量の増加が起きた。また、家族構造の変化(核家族化)により水消費のムダとその間に生じたライフスタイルの変化に伴う水消費量の増加があると考えられる。これらの増加要因における水消費量は増加量が直接環境負荷に関わると考えた。

b) 供給者側の対策

供給者側の対策として漏水対策及び不感水の削減がある。本研究では供給者側の対策である漏水対策の削減は配水管の取り替えに伴い発生するエネルギーは初期工事段階で発生し、維持管理に関するエネルギーは大きく変化したと考えるという理由により節水量はそのまま環境負荷削減に貢献すると考えた。また、不感水の削減はメーターの取り替えに伴い発生するエネルギーはライフサイクルで見ると大きく変化したと考えるという理由により同様に節水量はそのまま環境負荷削減に貢献すると考えた。

c) 節水型便器のLCA削減効果

図4に従来型、節水型便器のライフサイクルにおけるCO₂排出量を示す。2011年のTOTOの環境報告書⁸⁾によると、8ℓ洗浄のタイプの節水型便器を製品ライフサイクル10年とした場合、便器1台の製造から使用段階にかかるエネルギーCO₂排出量は999kgとわかった。また、1回あたりの洗浄水量とそれにかかる年間CO₂排出量は1976年の大洗浄水量13ℓのトイレにおいては45kgであり、1998年の大洗浄水量8ℓのトイレにおいては22kgである。これらの数値を元に従来型の大洗浄水量13ℓのトイレにおいてはライフサイクル10年で見たところ商品使用時には年間約1,912kgのCO₂が発生していることが判明した。

d) 節水型洗濯機のLCA削減効果

図5に従来型、節水型洗濯機のライフサイクルにおけるCO₂排出量を示す。東芝環境研究所⁹⁾が洗濯容量6kgの従来型と節水型2種類の全自動洗濯機についてLCA評価を行っている。節水型全自動洗濯機は従来型と比べ節水構造により洗濯1回あたりの平均使用水量が177ℓから92ℓへ削減されている。使用条件を一日一回洗濯し、9年間使用(耐用年数)にしたところ、原材料や製造工程の変更による負荷は節水型の方が各排出量とも13～18%増加しているのに対し、使用段階での負荷は共に約40%削減している。

全ライフサイクルでの排出量は、節水型は従来型に比べてCO₂が27%低減されている。また、使用段階でのCO₂排出量を100とした場合には洗剤、水、電気が各々37%、49%、15%削減され、使用段階全体として約40%のCO₂が低減されたことになる。

e) 下水処理の循環利用

本研究では建築物に下水処理の新規のシステムを取り込む際にかかるエネルギーは非常に大きいと判断した。よって節水効果は都民一人一日当たり6.7ℓであるが、LCAの観点から見た際に貢献量は無しと判断した。

f) 雨水の雑用水利用

雨水の雑用水利用においては墨田区を例に挙げたが、雨水利用の際に使用するシステムが簡易的なものであり、また機械等で特別に処理することがない。維持管理に伴う際に発生するエネルギーはライフサイクルで見ると大きく変化したと考えにくいという理由により節水量はそのまま貢献すると考えた。

g) 工場用水の節水

工場用水の節水は工場における移転促進政策と回収水の利用によるものである。下水処理の循環利用と同様に新規の建築物にシステムを組み込むので必要エネルギーは非常に大きいと判断した。よって、節水効果は都民一人一日当たり8ℓであるが、LCAの観点から見た際には貢献量は無しと判断した。

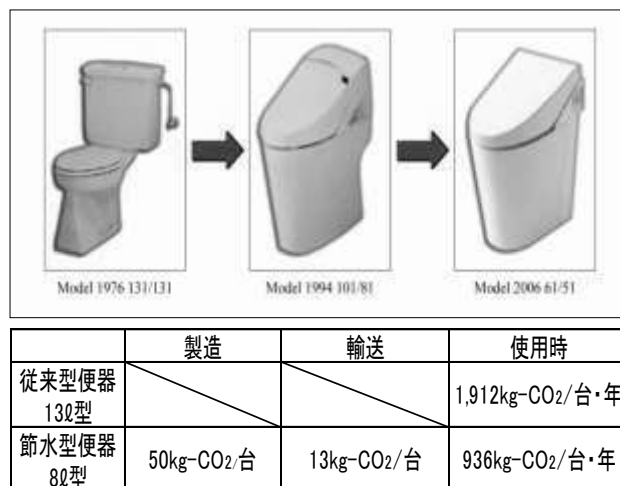


図4 節水型便器のライフサイクルにおけるCO₂排出量⁸⁾

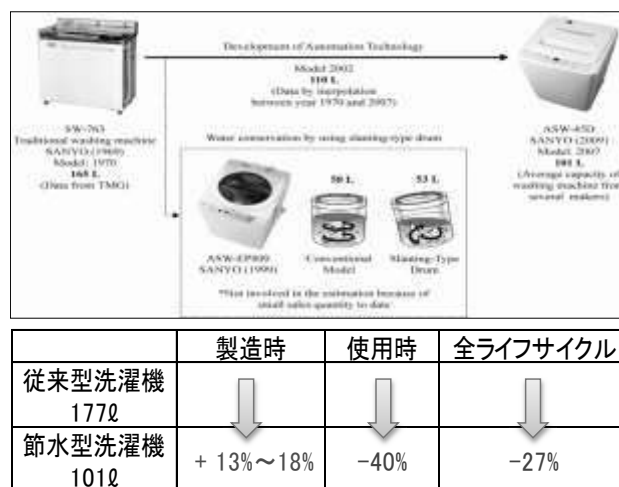


図5 節水型洗濯機のライフサイクルにおけるCO₂排出量⁹⁾

h) 需要者による節水活動効果

需要者による節水活動効果として、節水を呼び掛ける広報活動や増増料金制度がある。これらの新たなシステムや制度などの取り組みは必要なエネルギー負荷が少ないので節水量はそのまま貢献すると考えた。

(4) 節水効果による浄水処理場工程別LCA分析¹⁰⁾

図6に高度浄水処理のフローシートを示す。高度浄水処理は通常の処理ではしきれない物質を除去するために浄水処理の過程で沈澱池と急速ろ過池の間にオゾン処理と生物活性炭吸着処理を組み込んで処理する方法を言う。

a) フロック形成池・沈澱池¹¹⁾

沈澱池は流入した濁質を効果的に沈殿除去し、後続のろ過池にかかる負担を軽減する機能を持つ。沈澱池には主に沈殿、緩衝及び排泥の3つの機能がある。節水対策による処理水量の削減(22%)により凝集池及び沈澱池における表面積の削減が可能となる。また、凝集池においては凝集剤の使用量の削減、沈澱池においては機械攪拌エネルギー及びスラッジ発生量の削減につながる。

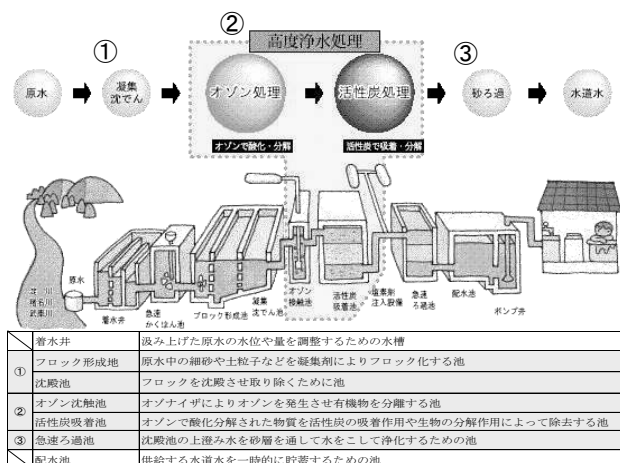
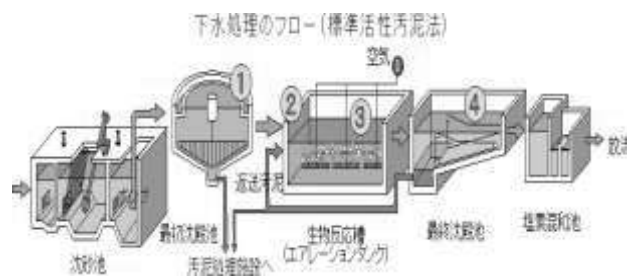


図6 高度浄水処理フローシート¹⁰⁾



沈砂池	下水中に含まれる砂や土粒子を沈殿させ、除去するための池
①初期沈殿池	下水中の粗大な汚物を沈殿させ除去するための池
②返送汚泥	生物反応槽中で増殖した汚泥（好機性微生物の集合体）を最終沈殿池で沈殿させた後に生物反応槽に戻す汚泥のこと
③生物反応槽	下水中の溶解・浮遊性有機物を培養した好機性微生物の餌とすることで水と炭酸ガス等に酸化分解する反応槽のこと。活性汚泥法と呼ばれ、比較的低コストでかなり高度な浄化を行うことができる
④最終沈殿池	生物反応槽中の下水と活性汚泥の混合液を沈殿させ、汚泥を除去するための池

図7 標準活性汚泥法フローシート¹²⁾

b) オゾン処理設備

オゾン処理設備は沈殿水処理を組み込むことで有機物の低減を図るために用いられる。オゾン処理設備はオゾンの接触池と排オゾン処理設備を必要とする。同様の処理水量の削減により、オゾン処理設備においてはオゾン処理の際の接触槽の表面積の削減が可能となる。また、オゾン注入量及び機械の運転時間が減少する。排オゾン処理設備については活性炭吸着槽の表面積の縮減が可能となり、さらに活性炭の更新量及び機械運転時間が削減する。

c) 急速ろ過池

急速ろ過池は沈殿池で取り除くことができなかった細かいフロックの汚れをろ過して取り除き汚濁物質の最終除去をする施設である。こちらも同様の処理水量の削減により、ろ過池の表面積の削減が可能である。また、ろ過後における洗浄工程において洗浄水の減少及び洗浄機器の維持・管理エネルギーの削減が期待できる。

(5) 節水効果による下水処理場工程別LCA分析¹²⁾

図-7は標準活性汚泥法のフローシートである。活性汚泥法は一般的に汚泥を用いて汚水を浄化する処理方法である。

a) 最初沈殿池¹³⁾

最初沈殿池は下水中の汚泥を沈殿させる機能を持つ施設である。節水対策による処理水量の削減(22%)により、池自体の表面積を建設段階で削減可能と思われる。なお、有効水深、沈殿時間は変動出来ない。

b) 生物反応槽

生物反応槽とは、下水中の有機物を微生物の餌とさせることで処理水を浄化する施設である。同様の処理水量の削減により、タンク自体の縦幅を建設段階で削減可能である。なお、有効水深、エアレーション時間、横幅は変動出来ない。

c) 最終沈殿池

最終沈殿池とは、生物反応槽中の下水と活性汚泥の混合液を沈殿池させ汚泥を処理する施設である。ここは構造上ほぼ最初沈殿池に似ているため同じことが言える。こちらも同様の処理水量の削減により、池自体の表面積を建設段階で削減可能と思われる。なお、有効水深、沈殿時間は変動出来ない。

d) 送風機の改良におけるLCA

送風機とは、水中の微生物が生きていくために必要な空気を送り込むための機械で、その工程は生物反応槽で行われている。送風機の消費電力が大きいことは上記に記した通りである。そのため、同装置の機械的な改良は日々進んでいる。

表4は送風機メーカーA社の実際導入されてきた送風機の30年前のものと最新技術との比較である。30年前使用されていた送風機では仮に70%の風力で使用したとして年間に1,581,970 (kW・h)かかっていた。しかし、最新の省エネモデルは同じ条件だと年間で1,481,158(kW・h)である。削減量は年間で99,623(kW・h)となり、30年前の送風機に比べ、7%の削減となっている。

表4 送風機の年間電力使用量及びCO₂排出量の改良比較

	30年前の従来仕様送風機	最新型高効率送風機
年間運転時間(h)	8760(24h*365d)	
対仕様風量比(%)	70%	
年間電力(kW・h)	1,581,970	1,481,158
年間電力削減量(kW・h)	-	100,812
年間CO ₂ 排出量(kg)	672,337	629,492
年間CO ₂ 削減量	-	42,845

e) ばっきシステムの最適化¹⁴⁾

芝浦水再生センターでは、送風機から散気装置までばっきシステム全体での省エネルギー化を推進している。同センターでは、送風機使用電力の削減を目的に、大型

送風機で複数の系列に同時に送風する従来のばっ気システムを見直し、小型送風機を各反応槽に配置することでシステム全体の最適化を行った。

同センターでは、本系、西系、東系の3つの水処理系列が存在し、集約した大型送風機で3つの水処理系列に送風していた。そのため、高効率型散気装置と従来型散気装置が混在しているため、高効率型に合わせた高い送風圧力を設定しなければならず、複数の反応槽に同じ送風圧力で送風するシステムによる電力ロスが発生していた。また、日変動が約3倍となる受水量への対応において、きめ細かな送風制御ができない等の問題が生じていた。よって、高効率型散気装置と送風機の最適な組み合わせなど、システム全体の最適化、反応槽の近くに最適な規模と台数の送風機を配置し、水量変動に対してきめ細かな対応を可能とした。これらにより、送風機全体にかかる電力使用量は同センター全体比率の約3.5%削減が予測されている。

4. まとめと今後の課題

(1) まとめ

東京都が過去30年間に行った節水対策をLCAで評価すると約22%の節水効果が得られると分かった。中でも節水型便器・洗濯機の開発・普及の貢献度は高い。また、上下水道ともに節水効果により土木構造物の施設容量及び機械等の運転エネルギーが約22%削減できる。さらに送風機は機械的性能の改良により電力使用量を7%削減できることがわかった。

(2) 今後の課題

今後の課題として、節水対策に関するLCA評価は下水処理の循環利用、工場用水における節水についてLCA評価を行い具体的な数字を出す必要がある。また、本研究では節水により約22%の水がなくなったとして、各施設、各工程において直接に22%効いているという過程で考えている。よって、上下水道ともに今後は詳細なLCA評価が必要である。さらに、送風機に関しては、運転時のみのデータのみ開示されたため、製造・廃棄過程

を含めたLCAを考察する必要がある。

今後、上下水道施設は大量更新の時期を迎えると考えられる。本研究では、節水対策を踏まえた上下水道施設の計画設計を考え、施設・設備容量の縮減、処理効率の最適化などに着目し、調査を進めていきたい。

謝辞：本研究を進めるに当たり、皆様のご協力に格別の感謝の御礼を申し上げます。特にヒアリングに快く協力してくださった東京都下水道局計画調整部の方々及び墨田区環境保全課の方々には、お忙しい中、丁寧に対応していただきましたことを心よりお礼申し上げます。

5. 参考文献

- 1) 経済産業省:都道府県別エネルギー消費統計(2010)
- 2) 東京都水道局 環境報告書(2012)
- 3) 東京都下水道局 環境報告書(2012)
- 4) 渡部英, 滝沢智, 藤原正弘: 浄水施設を対象としたLCAに関する研究, Journal of EICA 2009.3, p44-47
- 5) 岡田明大: LCAによる東京都の浄水場施設におけるアセットマネジメント手法の評価, 芝浦工業大学 修士論文(2012)
- 6) 国土技術政策総合研究所: 下水道におけるLCA適用の考え方(2010)
- 7) Nafisah.A.R, Akihiro Okada: Assessment on Total Water Resources Management(TWRM) For Selangor, Malaysia with Emphasis on Rainwater Harvesting in the Basic of Lessons Learned from Tokyo's TWRM, Journal of Japan Society Shimanto Policy and Integrated River Basin Management, 2011. p51-60
- 8) TOTO 2013年環境報告書
- 9) 竹山典男, 加賀見英世: 洗濯機を事例とした簡易法LCA, LCA日本フォーラムニュース 1996, p9-10
- 10) 兵庫県伊丹市上下水道局HP(2013)
- 11) 日本水道協会 水道施設設計指針・解説(1998)
- 12) 東京都下水道局HP(2013)
- 13) 日本下水道協会 下水道施設計画・設計指針と解説(2013)
- 14) 芝浦水再生センター, 鈴木不二夫: 芝浦水再生センターにおける小型個別送風機の導入について, 下水道設備研究発表会, 2010, p99-106