

風力を利用した省エネルギー型 下水道システムに関する研究

1. 研究目的

近年，地球温暖化，NOxの排出とそれによる人間への健康影響等が指摘され，環境への関心が高まりつつある中，公共事業である下水道事業においても「環境に優しい下水道」として，率先して省エネルギー化の推進はもとより，温室効果ガスの削減に努めなければならない情勢にある。

風力は，発電に伴う排出物がなくクリーンで枯渇しない自然エネルギー源であり，環境面から導入する意義は高いと考える。反面，風力発電は風向・風速による影響が大きく，立地条件が重要なポイントとなるエネルギー源でもある。

宇ノ気七塚浄化センター（以下，浄化センター）は，日本海に面する河北台地砂丘の一画で年間を通して風の強い所に位置しており，風力発電システムの導入に適しているといえる。このような自然条件を生かした自然エネルギーを導入することにより，維持管理費の低減，地球温暖化防止への寄与，環境に優しいイメージの創造などの効果が得られるものと考えられる。

本研究は，宇ノ気七塚都市計画下水道施設組合と（財）下水道新技術推進機構とが，当浄化センターに適合した自然エネルギーの利用に積極的に取り組み，商用電力の削減を主体とした省エネルギー型下水道システムの構築を目的とし，平成10～14年度にかけて共同研究を行うものである。

2. 研究内容

2.1 対象技術の概要

風力を利用した省エネルギー型下水道システムは，風力エネルギーを発電機にて電力に変換し，下水処理場での動力源として使用することで，省エネルギー化を図る技術である。

2.2 研究内容

本研究の全体工程を表-1に示す。

平成10年度の主な研究は，風力エネルギーを利用した省エネルギー型下水道システムの基本調査を行った。研究項目は，以下のとおりである。

- (1) 計画地における風力エネルギーの評価
- (2) 風力を利用した省エネルギー型下水道システムの構築
- (3) 事業効果の把握

表-1 全体工程

項 目	年 度				
	10	11	12	13	14
風力エネルギーの評価	—				
基本システムの構築					
課 題 の 検 討		—			
プラントの設計・製作			—		
実 証 実 験				—	
各種性能検討・評価					—
ま と め					—

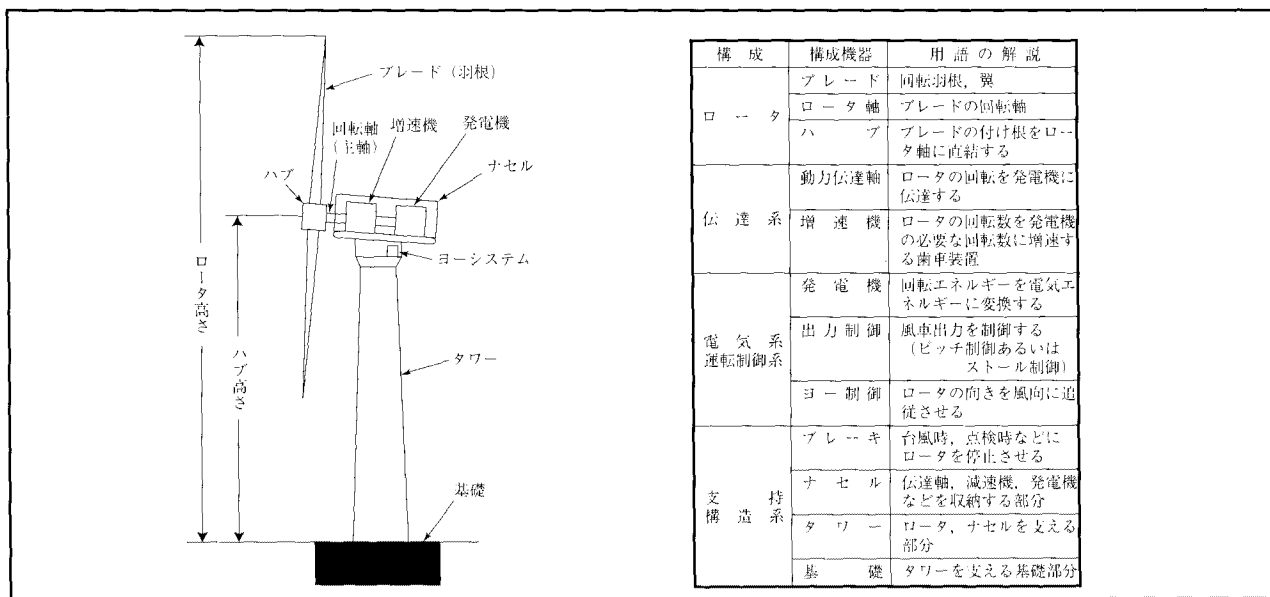


図-1 風力発電構成図

2.3 対象施設概要 (平成9年度末現在)

- 施設名称：宇ノ気七塚浄化センター
- 施設区分：公共下水道
- 排除方式：分流式
- 処理方式：オキシデーションディッチ法
- 計画汚水量：16,830m³ (日平均)
21,150m³ (日最大)
- 処理汚水量：3,180m³ (日平均)
3,859m³ (日最大)

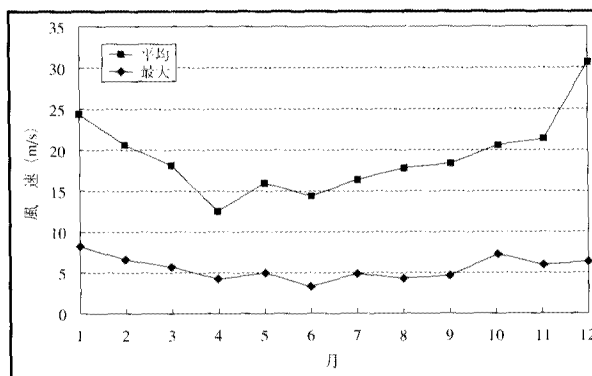


図-2 平成9年における月別平均・最大風速 (地上高さ27m)

3. 研究結果

3.1 計画地における風力エネルギーの評価

平成9年1月から12月まで、浄化センター敷地内において風況調査を行い、風力発電特性を推測し、計画地における風力エネルギー導入の適応性について検討、評価を行った。

(1) 風況特性

風況の測定は、風力発電機のハブの高さで行うことが好ましい。500kW級の発電機の場合は高さ40m程度となるが、今回は周囲の地形、既存施設を考慮し地上高さ27mにて測定した。

① 月別風速

計画地における風速(10分間平均値)を図-2に示す。

年間最大風速は30.5m/s、年平均風速は5.5m/sであった。

金沢気象台の風速調査結果によれば、平成9年の平均風速は過去6年間(平成4~9年)とほぼ同じ

であることから、特異年ではないと判断した。

② 月別の風向出現率と風力エネルギー密度

年間の16方位の風配図と風力エネルギー密度を図-3に示す。風力エネルギー密度は、対象とする地域の風況特性や発電施設の規模・仕様によって変化する風力エネルギー量を示す指標である。

年間を通して、南東(山側)寄りの風は出現率は高いが弱風が多いためエネルギー量としては小さく、一方、西北西(海側)寄りの風は出現率は低いが強風が多いため、エネルギー量としては大きくなる傾向が見られた。

③ 乱れ強度

各方位の乱れ強度を表-2に示す。乱れ強度は風速の乱れを表し、ロータの耐久性、エネルギー取得量に影響を与えるものである。

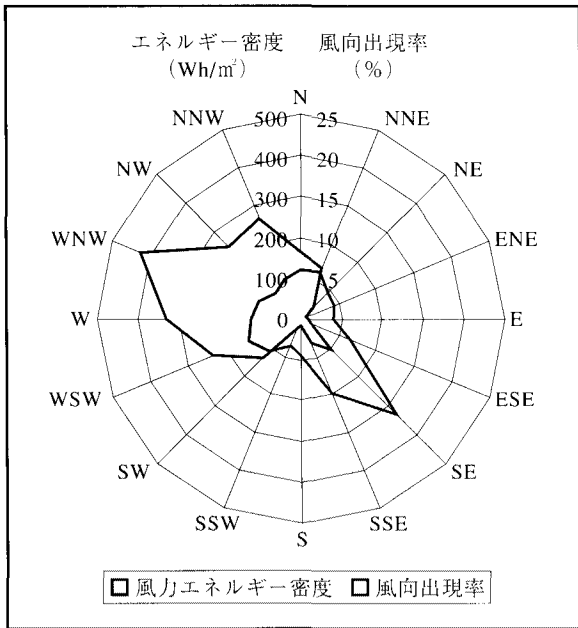


図-3 計画地の年間風配図と風向別エネルギー密度

当浄化センターにおける乱れ強度は、0.15～0.23の範囲にあり平均0.20であった。また、風向出現率の高い南東、南南東の乱れ強度は、比較的低い値であった。

表-2 風向別の乱れ強度

方位	乱れ強度	方位	乱れ強度
北	0.21	南	0.19
北北東	0.19	南南西	0.23
北東	0.19	南西	0.21
東北東	0.22	西南西	0.17
東	0.23	西	0.20
東南東	0.21	西北西	0.20
南東	0.15	北西	0.23
南南東	0.17	北北西	0.20
平均		0.20	
範囲		0.15～0.23	

④ 風速の出現率

風速の出現率の頻度分布を図-4に示す。

最も卓越した風速は5m/sで出現率は17.8%、次いで4m/s, 6m/sであった。

(2) 発電特性

風力発電システムは、一定以上の風速になると発電を開始し、出力が発電機の定格以上になると危険防止のため、ロータの回転を止め発電を停止する。

風力発電を開始する風速をカットイン風速、危険防止のためにロータを止める風速をカットアウト風速

と呼ぶ。これらの風速値は機種によって異なるが、一般に図-5に示すような値が採用されている。

① 発電電力量

計画地における1年間の月別予想発電量を図-6に示す。発電規模は3.2項より500kW、カットイン風速は4m/s、カットアウト風速は25m/sと想定し算出した。発電量は、夏期は少なく冬期に多い傾向が見られ、年間発電量は744,000kWhであった。

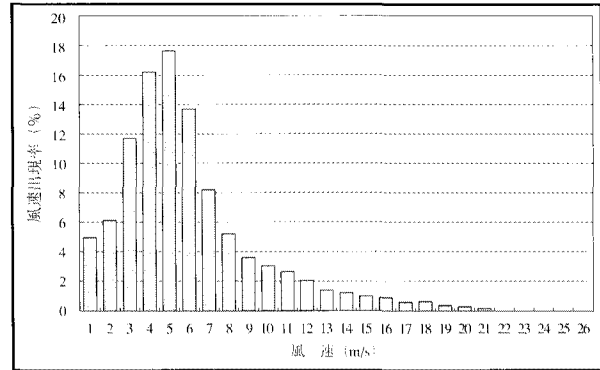


図-4 風速の出現率

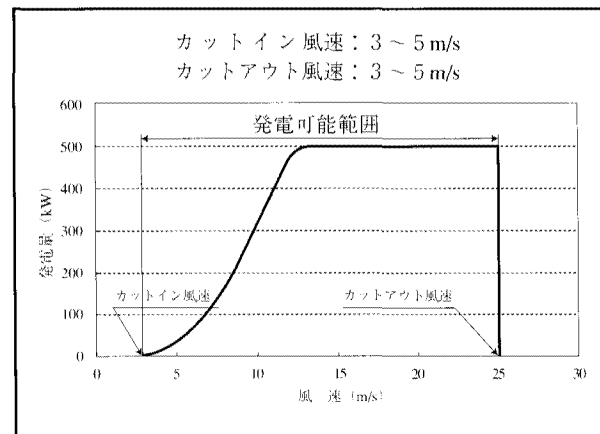


図-5 カットイン・カットアウト風速

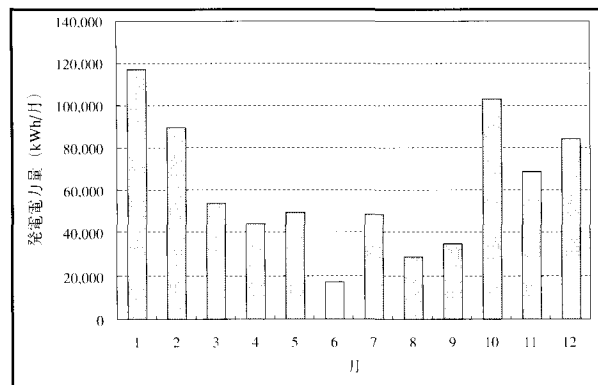


図-6 月別発電電力量

② 設備利用率・稼働率

月別の設備利用率および稼働率を図-7に示す。

設備利用率・稼働率は、風力発電を導入するうえで重要な評価項目であり、それぞれ下式で表され、大きな値を示すほど風力エネルギーの開発に適していると判断できる。

計画地における平均設備利用率は17%、稼働率は61.3%であった。

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{一定期間の発電量}}{\text{定格出力} \times \text{一定期間の時間}} \times 100\%$$

$$\text{設備稼働率} = \frac{\text{一定期間の発電可能時間}}{\text{一定期間の全時間}} \times 100\%$$

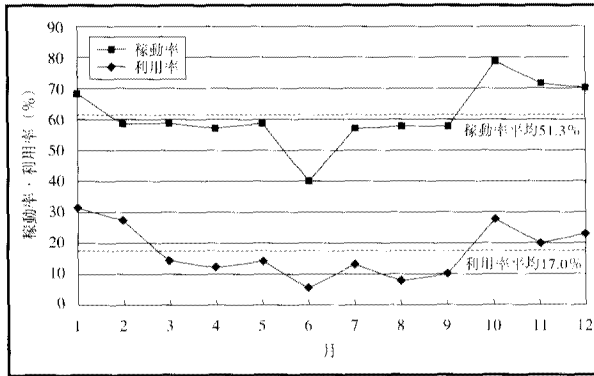


図-7 月別稼働率および設備利用率

(3) 風況と発電特性の評価

① 設備の稼働率および利用率

計画地と全国の風力発電施設の上位14カ所との設備稼働率および利用率の比較を、それぞれ図-8～9に示す。

計画地は稼働率、利用率（いずれも想定値）は、ともに6位であり、全国的に見て高い地域であった。

② 観測結果からの発電特性の評価

平成9年の実測データから求めた発電特性を、風力発電の適地として客観的に判断する基準例として、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が提言している基準との比較を行った。その結果を表-3に示す。

これらの結果より、当浄化センターは、風力発電に十分な適応性を有していると判断できる。

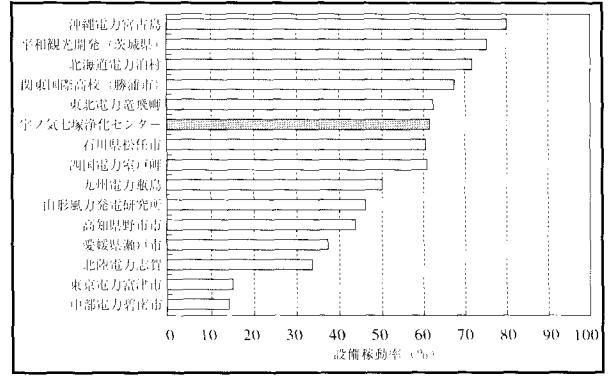


図-8 既存施設との設備稼働率の比較

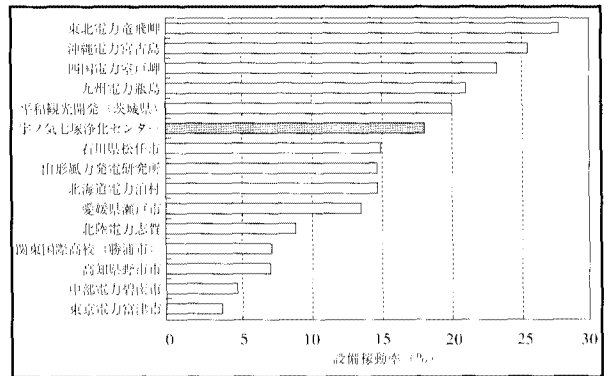


図-9 既存施設との設備利用率の比較

表-3 風況調査結果と評価基準例

評価基準 (注)		計画地の状況	
評価項目	内容		
風力 年間 エネルギー 取得量	年間稼働率	45%以上であることが望ましい。	61.3%
	年間設備 利用率	下記の取得量であることが望ましい。	744,000kWh
		100kW級：140,000kWh/年以上	
		250kW級：370,000kWh/年以上	
	300kW級：440,000kWh/年以上		
	500kW級：740,000kWh/年以上		
年間設備 利用率	17%以上が好ましい。	17%	

(注) 評価基準は「風況精査手法のマニュアル作成調査」(NEDO, 1995年)による。

3.2 風力を利用した省エネルギー型
下水道システムの構築

当浄化センターにおいて元来不安定である風力エネルギーを有効利用するため、設備規模、利用形態等を検討し、省エネルギー型下水道システムの構築を行った。

当浄化センターにおける基本システム構成を、図-10に示す。

(1) 発電規模の想定

発電規模は次の理由により、出力500kW級の発電機を想定した。

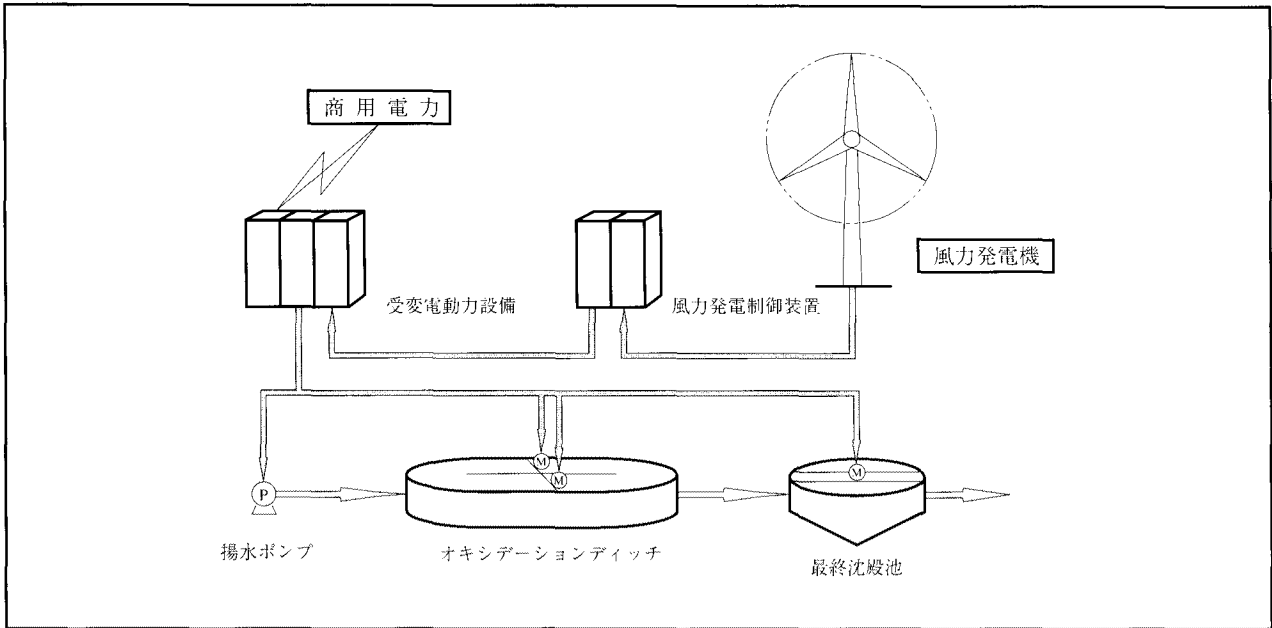


図-10 省エネルギー型下水道システム構成

- ① 自家用電気設備を委託管理する場合、法規制上1,000kWが上限値である。
- ② 風力エネルギーの有効利用の観点から、2/4系列完成時に発電した電力を場内ですべて利用できることとする。

毎月に余剰電力を発生しない発電機容量は、冬の余剰電力を考慮すれば、**図-11**に示すよう500kW程度が上限であった。

(2) 系統連系

風力発電は安定な電力を得にくいいため、電力会社との供給電力を系統連系させるものとした。

系統連系とは**図-10**に示したように、風力発電の電源と電力会社の電源とを繋ぐ方式である。

これにより、負荷容量に対し風力発電出力が少ない場合、不足電力分は電力会社からの供給分で補い、処理設備の安定した運転が可能となる。

3.3 事業効果

当浄化センターに省エネルギー型下水道システムを導入した場合の事業効果について検討し、評価を行った。

(1) 維持管理費削減効果

省エネルギー型下水道システム（電力供給系統が「風力発電（常用兼非常用）+商用電力（常用併用）」で構成される。）と従来型下水道システム（同「商用電力（常用）+非常用発電機（非常用）」の構成）との年間経費の比較を**表-4**に示す。

省エネルギー型下水道システムは、年間経費は従来型と比較し高くなるが、風力発電を常用で使用することにより、年間744,000kWhの商用電源の削減が可能である。

試算では、減価償却及び維持管理の年間経費は約57万円高くなるが、常用発電による商用電力の削減を省エネルギー効果とすれば、電力削減費を考慮した年間経費では約690万円の経費削減が期待できる。

(2) 地球環境保全効果

環境保護の観点から、クリーンな自然エネルギーである風力発電について、CO₂排出量を対象としたライフサイクルアセスメント（LCA:Life Cycle Assessment）を用い、地球環境保全効果について評価を行った。LCAは、下記条件を基に算出し、浄化センターの使用電力をすべて商用電源でまかなった場合と比較を行った。

① 調査範囲の設定

- ・対象機器：500kW級風力発電機本体
（受変電設備は除外。）

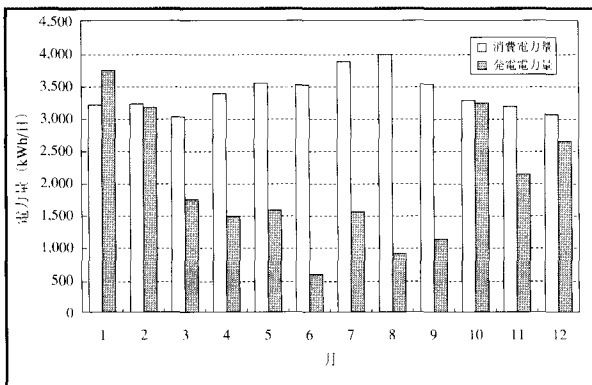


図-11 発電電力と消費電力との関係

表-4 年間経費の比較

No.	項目	単位	商用電力(常用) + 風力発電(常用併用・非常用)	商用電力(常用) + ガスタービン発電(非常用)	備考
①	設備規模	-	500kW	500kW (625kVA)	
②	概算事業費	千円	231,500	177,100	
③	減価償却費	千円/年		15,238	(注1)
④	維持管理費	千円/年		1,389	(注2)
⑤	年間経費	千円/年		16,653	⑤=③+④
⑥	必要電力量	kWh/年	1,250,340	1,250,340	
⑦	発生電力量	kWh/年	744,000	0	
⑧	購入電力量	kWh/年	506,340	1,250,340	
⑨	電力自給率	%	59.5	0.0	⑨=⑦÷⑥ (常用時)
⑩	商用電力料金	千円/年	5,079	12,541	⑩=(⑧-⑦)×10.3 (注3)
⑪	商用電力削減費	千円/年		7,460	⑪=⑦×10.03 (注3)
⑫	電力削減費を考慮した年間経費	千円/年		9,764	⑫=⑤-⑪

注1) 減価償却費：残存率10%、利子率3%、耐用年数 風力発電17年、ガスタービン15年

注2) 維持管理費：風力発電：概算事業費の6% ガスタービン：概算事業費の0.7%

注3) 商用電力単価：10.03円/kWh (北陸電力の年間平均)

② 検討方法

i ライフサイクルタイム

- ・初期建設段階：機材の製作、運搬、据付を対象とし、発電機は海外より輸入するものとした。
- ・供用段階：耐用年数を17年とし、メンテナンスを対象とした。
- ・廃棄段階：基礎を撤去廃棄し、本体は電気炉にて再生するものとした。

ii 炭素排出量係数

炭素排出量係数は、土木学会地球環境委員会発行の土木建設業における環境負荷(LCA)検討部会平成6~8年度調査報告書から引用し、資材消費、運搬・施工・供用段階・装置の廃棄に起因する炭素排出量を算出した。炭素排出量係数を表-5に示す。

表-5 炭素排出量係数

材料別	炭素排出量 kg炭素/単位	建設重機作業時間当り	炭素排出量 kg炭素/hr
建設機械類	1.52	掘削(バックホウ)	18.2
汎用機械類	1.21	埋戻(ブルドーザ)	24.8
電力	0.128	鉄筋工	19.7
運輸	0.093	コンクリート工(ポンプ車)	14.7
生コン	84.9	コンクリート工(ミキサー車)	13.8
鋼材	0.411	重量物吊り上げ (トラッククレーン)	18.2
木材(合板)	0.0519	解体工(トラッククレーン)	19.7
プラスチック製品	0.492		

iii 炭素排出量算出条件

風力発電機の年間発電量は、平成9年の推定値744,000kWhとした。

③ 炭素排出量算出

炭素排出量の算出結果を表-6に示す。風力発電の単位発電量に対する炭素排出量は、 $103.2\text{t炭素}/(744,000\text{kWh/年} \times 17\text{年}) = 8.2\text{g炭素/kWh}$ であった。

④ LCAによる評価結果

商用電源の平均的な炭素排出量は、炭素換算で1kWh当たり128g炭素/kWh(1992年電力構成による)とされている。今回、試算では風力発電による炭素排出量が8.2g炭素/kWhであり、商用電源の炭素排出量の約6.4%であった。

当浄化センターでは、2/4系完成時における年間需要電力量は1,517,000kWhと想定される。風力発電を導入した場合としない場合の炭素排出量を比較すると、

i 風力発電を導入しない場合

$$1,517,000\text{kWh/年} \times 128\text{g炭素/kWh} = 194\text{t炭素/年}$$

ii 風力発電を導入した場合の削減量

$$744,000\text{kWh/年} \times (128 - 8.16)\text{g} = 89\text{t炭素/年}$$

となり、風力発電の導入により、商用電源の削減に係わる炭素排出量は年間約89tの削減が期待できる。

表-6 炭素排出量の算出結果

大項目	中項目	中項目	数量	単位	炭素排出量係数 kg炭素/単位	炭素排出量 (t)	
500kW 風力発電機本体 全体重量 (kg) 63,800	ブレード	FRP	6,400	kg	0.492	3.15	
		接続部・ハブ	2,700	kg	1.210	3.27	
	ナセル	主軸・増速機他	8,500	kg	1.210	10.29	
		発電機本体	15,200	kg	1.210	18.39	
	タワー	接続部	3,000	kg	1.210	3.63	
		塔身	28,000	kg	0.411	11.5	
基礎工事	機材輸送	輸送距離 (50km)	647	t・km	0.093	3.01	
	資材	コンクリート	236	m ³	84.900	20.0	
		基礎鉄筋	11,300	kg	0.411	4.64	
		型板	800	kg	0.052	0.04	
	掘削 (1,000m ³)	バックホー0.6m ³	33.3	h	18.200	0.61	
	埋め戻し	ブルドーザ	25.1	hr	24.500	0.61	
	吊り込み	トラッククレーン (鉄筋工)	33.9	hr	19.700	0.67	
		トラッククレーン (型板上)	32.4	hr	14.000	0.45	
		ポンプ車	5.9	hr	14.700	0.09	
		ミキサー車	5.9	hr	13.800	0.08	
据付工事	組立て	トラッククレーン (100t)	10	hr	49.900	0.50	
		トラッククレーン (360t)	10	hr	119.400	1.19	
輸送	風車搬送 (車)	富山新港～七塚 100km	6,380	t・km	0.093	0.59	
	風車搬送 (船) 約70t	欧州～富山新港 燃料13kℓ	13,000	ℓ/片道	0.736	9.57	
小計						92.28	
供用段階	発電	メンテナンス (17年)	部品交換	10	kg/年	1.210	0.21
		オイル補充	15	ℓ/年	0.721	0.18	
小計						0.39	
廃棄段階	基礎	風力発電機 本体	解体 (トラック クレーン)	40	hr	19.7	0.79
			輸送 (50km)	3,190	t・km	0.093	0.30
			再生 (電気炉)	63.8	t	70	4.47
	コンクリート	掘削 (236m ³)	137	hr	17	2.33	
		輸送 (50km)	28,300	t・km	0.093	2.64	
小計						10.53	
合計						103.2	

これは、当浄化センター全体の電力に係わる炭素排出量の約46%に相当し、地球温暖化防止に寄与できると判断された。

(3) その他の効果

風力発電機は500kW級の場合、ロータ高さが約60mに達し、遠くからでも目を引く構造物である。自然景観との調和を図ることにより、環境に配慮した下水処理としてのイメージ効果、PRのほか、二次的には観光振興、地域の活性化にも寄与できると思われる。

4. まとめ

本研究において得られた成果は、以下のとおりである。

(1) 計画地における風力エネルギーの評価

平成9年の実測データから求めた風況・発電特性より、当該計画地は全国的に見ても風の強い地域であり、既存の風力発電施設と比較しても遜色ないと推測される。また、客観的な判断基準としてNEDOの基準での評価も行ったが、風力開発の可否に関しても基準を満足しており、風力発電に十分な適応性を有していると判断できた。

(2) 風力を利用した省エネルギー型下水道システムの構築

風力発電規模を500kWとし、電力会社との系統連系を行うことで、発生エネルギーのほとんどを当浄化センター内で利用でき、発電量および負荷変動に強く安定した運転が可能であるシステムの構築ができた。

(3) 事業効果

① 維持管理費の削減効果

省エネルギー型下水道システムは、従来型システムと比較した結果、試算では商用電力の削減により、年間約690万円の経費削減が期待できる。

② 地球環境保全効果

省エネルギー型下水道システムは、商用電源の削減に係わる炭素排出量で年間約89tの削減（平成13年）が期待できる。これは、当浄化センター全体の電力に係わる炭素排出量の約46%に相当し、地球温暖化防止に寄与できる。

③ その他の効果

風力発電機は自然景観との調和を図ることにより、環境に配慮した下水処理としてのイメージ効果、PRのほか、二次的には観光振興、地域の活性化にも寄与できると思われる。

5. 今後の予定

平成11年度から14年度の4ヶ年計画で実用化研究を行う予定である。

本年度の基本調査により、実施設計の設計・施工に関わる課題は下記のとおりである。

(1) 基本計画の検討

設備負荷、風況、地形、既存建物、景観等から、発電機規模、発電方式、系統連系方式、設置場所等について総合的に検討を行う。

また、省エネルギーの観点から、余剰電力分については場内で全量使用できるように、効率的な運用方法について検討を行う。

(2) 周辺環境への影響調査

風力発電機の設置に伴い、周辺環境に影響する騒音、電波障害、系統連系による電源系統への影響（電圧降下、電圧変動）等について影響予測を行う。

(3) 実施設計を用いた性能評価および事業効果の確認

実施設計によるデータ収集を行い、発電量・稼働率等の各種特性、および省エネルギー・地球温暖化防止効果等の各種事業効果、周辺環境への影響等について検証し、評価を行う。

●この研究に関する問い合わせは

研究第一部長
研究第一部主任研究員
研究第一研究員

大嶋 吉雄
馬渡 裕二
高嶋 健一