

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 実用化研究

1. 研究目的

下水道事業の進捗に伴い、使用するエネルギーは増大し、温室効果ガス排出による地球温暖化が問題となっている。なかでもエネルギー消費に伴う温室効果ガス排出量のうち、電力消費によるものが約64%を占めており（下水道統計平成8年度版）、処理場における省エネルギー対策を主として、事業の実施に伴う温室効果ガスの発生をできる限り抑制していくことが必要とされる。そのひとつとして自然エネルギーの有効利用が挙げられる。

宇ノ気七塚浄化センターは、日本海に面する河北台地砂丘地の一面に位置しており、地理的な条件を生かした風力による自然エネルギーシステムの導入は、維持管理費の低減、地球温暖化防止への寄与、環境にやさ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。

本研究は以上のような状況を踏まえ、当浄化センターに適合した自然エネルギーの導入を積極的に取り組むことにより、商用電力の使用を大幅に削減でき、クリーンなエネルギーを発生させ、充当できる省エネルギー型の特色のある処理システムの構築を目指すものである。

まず、平成10年度に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の共同研究として、宇ノ気七塚浄化センターにおける風況等の自然条件を生かし、自然エネルギーの利活用に取り組み、

省エネルギー型の特色あるシステムについて検討を行った結果、風力発電を導入することにより、維持管理費削減効果、地球温暖化防止効果等が得られるとの成果を得た。

それを受けて平成11年度は、事業効果に基づく適正な発電規模の設定を行い、効率的な運用方法を検討することにより、風力を利用した省エネルギー型下水道システムの仕様を設定するものである。また、風力発電設備を設置することによる周辺環境への影響調査も併せて実施する。

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11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仕様を設定するものであり、研究項目は、以下のとおりである。

- (1) 風力を利用した省エネルギー型下水道システムの仕様の設定
- (2) 導入効果の検討
- (3) 環境影響調査

表-1 研究工程

項目	年 度			
	11	12	13	14
システムの仕様の設定	■			
導入効果の検討		■		
環境影響調査	■			
実施設計・建設			
性能評価			■	■
まとめ				■

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）

3. 研究結果

3.1 下水処理場への風力発電の導入

風力発電出力は、エネルギー源が風であるため、不安定である。下水処理場の電源として風力発電を導入するためには、電力会社の配電線と風力発電の電源をつなぐ系統連系方式を採用する。

本方式の特徴は、不安定な風力発電出力と電力会社の供給電力を連系することにより、対象負荷に常に安定した電力を供給することが可能となることにある。

また、発電出力が対象負荷の容量より大きくなる場合には、電力会社側に余剰電力を供給（逆潮流）することも可能（図-1）であり、風力エネルギーを無駄なく有効活用できる。

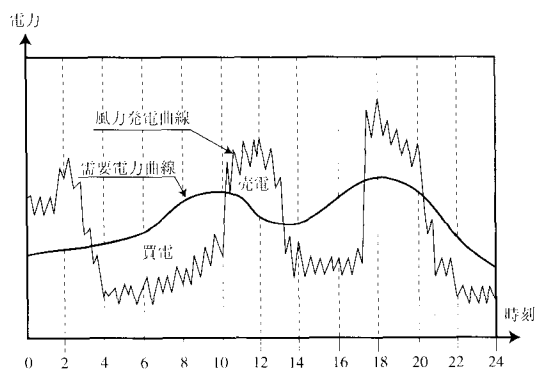


図-1 風力による発生電力と需要電力

そこで、風力発電を下水処理場に導入する場合の概念図を図-2に示す。

風力発電量が不足するときは商用電力により補い、風力発電量に余剰が発生する場合は電力を逆潮流する。

また、系統連系時における留意事項としては、下記事項が挙げられる。

- ・商用電力システムの安全の確保として、電力会社と保護協調を行うこと。
- ・系統電圧降下の防止として、無効電力調整装置（SVC装置）の設置を検討すること。（電力会社との協議による）

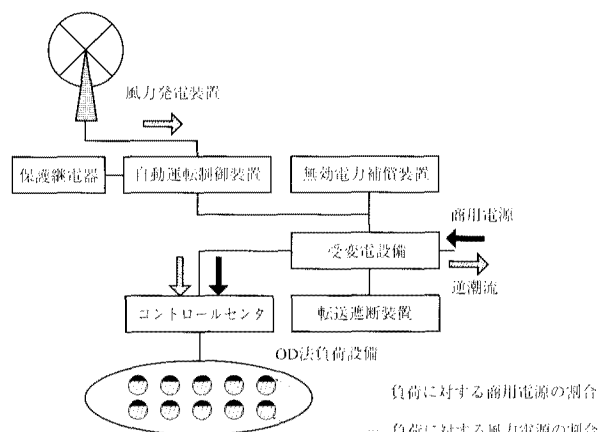


図-2 風力発電導入の概念図

3.2 風力を利用した省エネルギー型下水道システム

3.2.1 発電規模と設置台数の設定

発電規模および台数の設定においては、次の事項を前提とした。

① 高さ制限

航空法において、高さ60mを越える場合は、届出が必要となり、航空障害燈等が別途必要となることから、風力発電装置全体の高さを60m以下とし、ブレードの最大径を47mとする。

② 電力需給のバランス

浄化センター計画の2/4系列完成時および4/4系列完成時の電力受給率（必要電力量における風力発電の占める割合）が100%程度とする。多少越えた場合、売電による収益が風力発電に係わる維持管理費を越えないこととする。

③ B/C比較

種々の発電容量、ブレード径、台数の組合せについて費用便益比(B/C)を検討し、B/Cの高い発電規模と台数を設定する。

以上の前提条件より発電規模の設定は500～

表-2 風力発電設備導入による事業効果（4/4系列時）

	処理場需要電力（4/4） 1,990,000kWh	480kW（ブレード径47m）			600kW（ブレード径42m）			660kW（ブレード径47m）		
		1基	2基	3基	1基	2基	3基	1基	2基	3基
①	発電電力量（MWh/年）	971.7	1,943.4	2,915.1	829.3	1,658.6	2,487.9	1,123.4	2,246.8	3,370.2
②	需要電力量に対する発電電力量の割合（%）	49	98	146	42	83	125	56	113	169
③	商用電力のみの場合の年間経費（千円/年）	19,960	19,960	19,960	19,960	19,960	19,960	19,960	19,960	19,960
④	風力発電設備導入の場合の年間経費（千円/年）	10,873	19,098	28,301	10,752	20,495	28,180	11,352	21,559	29,666
⑤	商用電力削減費（千円/年） （発電電力量金額換算 10.03円/kWh）	9,746	19,492	29,238	8,318	16,636	24,954	11,268	22,535	33,803
⑥	余剰電力料金（千円/年）	—	—	9,278	—	—	4,994	—	2,575	13,843
⑦	風力発電設備導入に係わる維持管理費（千円/年）	960	1,400	3,000	960	3,000	3,000	960	3,000	3,000
⑧	余剰電力料金が維持管理費以内であるかの判断 （⑦>⑥）	○	○		○	○	○	○	○	
⑨	風力発電設備導入による費用便益比 B/C（⑤/④）	0.90	1.02	1.03	0.77	0.81	0.89	0.99	1.05	1.14

注1) ③：北陸電力年間平均電力料金10.03円/kWh（高圧電力A）

注2) ④：耐用年数は、下記として各々減価償却した。

- ・風力発電設備ナセル、ブレード 17年
- ・風力発電設備タワー 35年
- ・電気設備 20年
- ・基礎工事 50年

注3) ⑤：（①-1,990,000kWh）×10.03円

600kW級の風力発電設備が該当し、表-2の電力受給率、B/C等の比較表において、浄化センター計画の全体（4/4系列）完成時において、余剰電力を売電することによって得られる費用が年間の風力発電設備に係わる維持管理費以内であり、かつB/Cが高い規模として、660kW（ブレード径47m）を2基と設定する。なお、2/4系列完成時においては、660kW（ブレード径47m）1基を設定し、段階的導入を図ることとする。

3.2.2. 商用電源停電時における運用

商用電源停電時においては、風力発電機の運転に必要な励磁電力が無くなり、運転不能となる。その際、非常用発電機からの励磁電力の供給を行えば風力発電機の運転が可能であると考えられるが、当浄化センターにおいて計画されているガスタービン発電機（375kVA）では、660kWの風力発電機の運転に必要な励磁電力の供給は行えず、風力発電出力は約25%程度（165kW）となる。

また、0～660kWにも及ぶ可能性のある負荷の急変には、ガスタービン発電機のガバナーの機構が追従できないため、風力発電装置と非常用発電機とを並列運転する場合は、風力発電の出力制御を行う必要がある。以上のことから、商用停電時における非常用発電機との並列運用には留意を要する。

3.2.3. 落雷対策

(1) 風力発電設備の避雷システム

風力発電設備のブレード上端は地上60mにもなる。風力発電設備は開けた場所に設置する事から雷撃の日標物となり易い。特に日本海側では冬季雷が多く、雷撃の回数が増えることが予想される。雷電流を速やかに逃がし、落雷により発生するエネルギーによる温度上昇を防ぐことを目的として、風力発電設備には図-3のような落雷対策が施されている。

その主な特徴は、以下の通りである。

- ① ブレード先端に誘電部を設置し、内部の避雷導線とタワー内避雷導線とを通じ、接地させる。
- ② ブレードは温度上昇に耐える材質（GFRP）を選定。
- ③ 信号線は光ファイバーとし、誘電雷の侵入を防ぐ。

(2) 関連機器の接地

場内の落雷や配電線より侵入するサージに対して、風力発電設備を保護するためには、受電点や連系点に耐雷対策を講じる必要がある。その手法としては、避雷装置の強化や共通接地の採用等があげられる。図-4に共通接地の例として環状接地方式を示す。

その主な特徴は、以下の通りである。

- ① 落雷が生じた場合、離れた施設間に電位差が

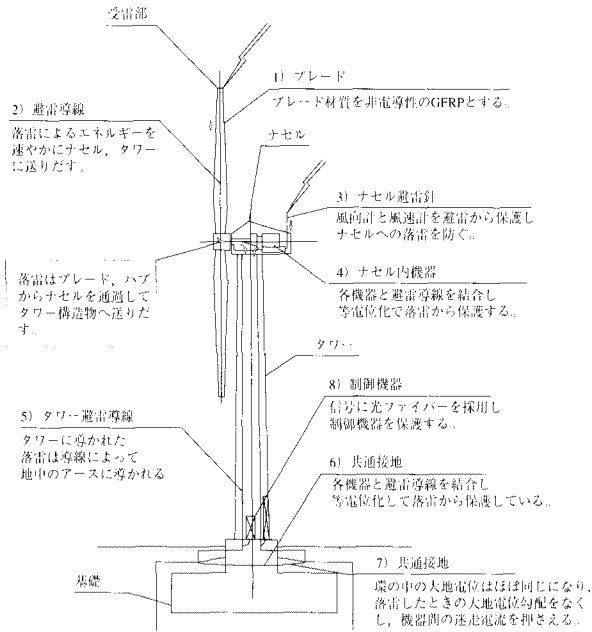


図-3 風力発電設備の避雷対策

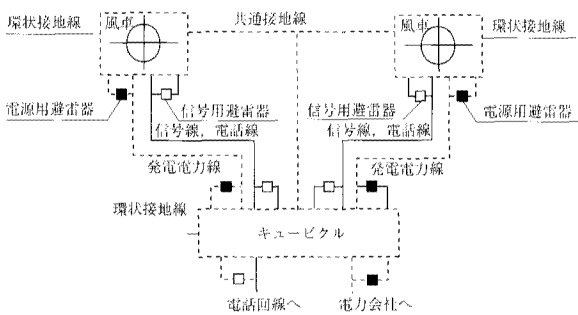


図-4 接地系統図

生じて機器間の絶縁破壊が生じる可能性があるため、電位を均一化する。

- ② 点検作業時の人体に対する保護のため、設備周辺の電位を均一化する。

3.3 導入効果

3.3.1. 商用電力削減効果

下水処理場で使用するエネルギーの大部分は、電力とされており、宇ノ気七塚浄化センターにおいては、図-5に示す年次経過において、処理流量の増加に伴って需要電力量が増加することとなる。そこで、処理場計画の2/4系列完成時に風力発電機1基を導入することにより、需要電力量の約105%を風力発電電力によって賄うことができ、商用電力の大幅な削減が可能となる。

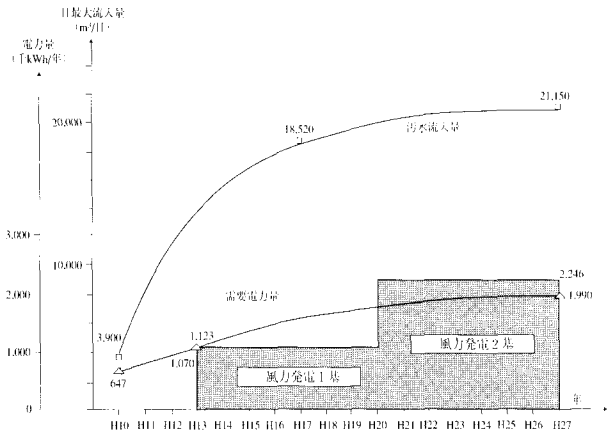


図-5 需要電力と風力による発電量

3.3.2. 地球温暖化防止効果

(1) LCA評価の位置づけ

下水処理場で発生する総温室効果ガスのうち、電力が占める割合は47%（平成8年全国平均）とされており、風力発電を導入し商用電力を削減することにより、大幅な温室効果ガスの削減が可能と考えられる。

ここで、ライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment、製品の原料の採取から製造、使用及び処分に至る生涯（すなわち、ゆりかごから墓場まで）を通しての環境面への潜在的影響を調査するもの）の手法により、本研究で検討している風力発電設備についてCO₂を評価対象としたLCAを行い、需要電力のすべてを商用電源にてまかなう場合と比較し効果を評価した。

(2) 調査範囲の設定

1) 調査対象

660kW級風力発電機本体（受変電設備は除外）

2) 検討方法

① 想定するライフタイムサイクル

初期建設段階：機材の製作、運搬、現地据付を対象とした。

供用段階：耐用年数は17年として、運用に必要な部品の補充、メンテナンスを対象とした。

廃棄段階：本体と基礎を撤去し、電気炉にて再生するとした。

② 炭素原単位

炭素原単位は、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年度調査研究報告書より引用した。

3) 炭素排出量算出条件

- ① CO₂排出調査範囲は、基礎工事、現地組立て工事、供用運転の消耗品、耐用年数後の廃棄までとする。設備は風力発電機本体のみとし、受変電設備は除外する。
- ② 輸送距離はヨーロッパから日本までの22,000kmと輸入港から現地までの100kmとする。
- ③ 風力発電機の年間の発電量は1,123,400kWhとする。
- ④ 法定耐用年数経過後は、基礎は撤去廃棄し、風力発電機本体はスクラップ化して電気炉にて再生する。

(3) CO₂排出量算出結果

660kW級風力発電機の単位発電量に対するCO₂排出量は、

$$95.48 \text{ t-C} / (1,123,400 \text{ kWh/年} \times 17 \text{年}) \times 10^6 \text{ g/t} = 5.0 \text{ g-C/kWh}$$

となる。

(4) LCA評価結果

風力発電によるCO₂排出量は、5.0g-C/kWhと試算された。商用電源はCO₂排出量の多い石油や石炭による火力発電や、比較的少ない原子力発電等によって行われており、1992年における電源構成ではCO₂排出量の平均は128g-C/kWhとされている。

この平均値と比較すると、試算した風力発電のCO₂排出量は、その約4%と非常に小さい。

また、浄化センターの需要電力のすべてを商用電源でまかなう場合と、風力発電を導入した場合のCO₂排出量を比較すると、以下の通りとなり、風力発電機導入による電力使用に係るCO₂排出量は、2/4系列時、4/4系列時ともに96%削減される。その年次経過を図-6に示す。

- ① 風力発電を導入しない場合のCO₂排出量
(2/4系列時)
 $1,070,000 \text{ kWh} \times 128 \text{ g-C/kWh} / 1000 = 136,960 \text{ kg-C}$
(4/4系列時)
 $1,990,000 \text{ kWh} \times 128 \text{ g-C/kWh} / 1000 = 254,720 \text{ kg-C}$
- ② 風力発電機を導入した場合の風力発電機によるCO₂排出量
(2/4系列時)
 $1,123,400 \text{ kWh} \times 5.0 \text{ g-C/kWh} \times 10^{-3} \text{ kg/g} = 5,617 \text{ kg-C}$
(4/4系列時)
 $2,246,800 \text{ kWh/年} \times 5.0 \text{ g-C/kWh} \times 10^{-3} \text{ kg/g} = 11,234 \text{ kg-C}$
- ③ CO₂削減率は以下の通りとなる。
(2/4系列時)
 $(136,960 - 5,617) \text{ kg-C/年} / 136,960 \text{ kg-C/年} \times 100$

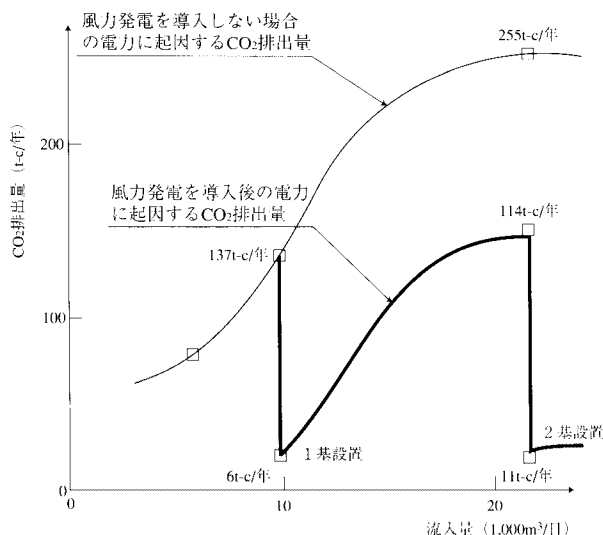


図-6 電力に起因するCO₂排出量

=96%

(4/4系列時)

$(254,720 - 11,234) \text{ kg-C/年} / 254,720 \text{ kg-C/年} \times 100$

=96%

3.3.3. 経済効果

風力発電設備の概算事業費、維持管理費等を求め、年間経費に換算して表-3に示した。風力発電設備を導入することにより2/4系列完成時において、年間1,123,400kWhの商用電源を削減でき、これは金額として年間11,268千円に相当する。

3.4 環境影響調査

3.4.1 調査の目的

風力発電施設は、「環境影響評価法」や「石川県環境影響評価条例」によって、環境影響調査の実施を定められていないが、計画地が「石川県景観条例」における景観形成重要地域の区域内であることから、本施設の建設により周辺環境に及ぼす影響の度合いの調査を行うものである。

3.4.2 調査の内容

(1) 騒音

本施設の稼働に伴う機械騒音や風切り音などの施設騒音について検討する。

(2) 電波障害

本施設はGL+60m程度の高さとなるため、電波障害の影響が考えられる。周辺の電波はTV、移動式電話、漁業無線、自衛隊等が考えられるが、音を伝達するための移動式電話及び漁業無線は影響が軽微と考えられる。また、自衛隊無線は、影響が懸念さ

表-3 風力発電の導入による維持管理費等の算出結果

項目・単位	対象		風力発電設備	備考
設備規模		—	660kW	①
概算事業費		千円	173,000	②
減価償却費		千円/年	10,392	③(注1)
維持管理費		千円/年	960	④(注2)
年間経費		千円/年	11,352	⑤=③+④
発生電力量		kWh/年	1,123,400	⑥
商用電力削減費		千円/年	11,268	⑦=⑥×10.03(注3)
電力削減も含めた年間経費		千円/年	84	⑤ ⑦

注1) 減価償却費：残存率10%，利率率3%，耐用年数 風力発電17年
 注2) 維持管理費：点検整備費，消耗部品交換費，保険費の積み上げ
 注3) 商用電源単価：10.03円/kWh（北陸電力の年間平均）

れる区域であれば，国から中継アンテナの設置等の指導があるため，最も影響が大きいと考えられるTV電波について影響を調査する。

(3) 景観

本施設は景観形成重要地域の区域内に立地し，かつ，GL+60m程度の高さとなるため，施設完成後の遠景及び近景について検討する。

3.4.3 調査結果

(1) 騒音

現地調査地点は，風力発電施設直近の敷地境界（地点1），施設の東南東約500m付近（地点2）及び県立河北台商業高等学校付近（地点3）とする。地点2は風力エネルギー密度を考慮した方位の直近の民家付近であり，地点3は浄化センター付近で人が多く集まる場所である。

現況調査の結果，風力発電施設建設予定地周辺の騒音レベルは概ね40～50dB(A)であった。風力発電施設の地表での騒音レベルは約45dB(A)であり，周辺の騒音と変わらないことや，既存施設でも騒音に関する問題は発生していないことから，騒音に関する影響はないと考えられる。

(2) 電波障害

風力発電施設建設予定地周辺では，2カ所のテレビ塔からテレビ電波が発信されている。これらの電波が施設の建設によって遮へいおよび反射の影響が生じる可能性のある区域を設定し，現況のテレビ受信状況を調査した。調査の結果，VHFでは概ね良い受信状況であったが，UHFは一部で「不良」「きわめて不良」という受信状況であった。既存の風力発電施設において電波障害は報告されていないが，本施設の建設に伴って苦情等が寄せられた場合には，本調査結果を判断基準とする。

(3) 景観

現場踏査により，計画地周辺からの眺望地点を抽出し，写真等で記録する。眺望地点は，市街地側3地点（近景，中景，遠景）海岸側1地点とする。写真に風力発電施設2基をはめ込み，景観の変化を確認した。その一例を写真-1に示す。



写真-1 能登有料道路からの眺望予想図

3.5 実証施設の評価案

実施設を評価する際の指標として，評価項目，目標値を設定する。

風力を利用した省エネルギー型下水道システムは自然エネルギーを利用し，商用電源を削減することで維持管理費を削減でき，さらには地球温暖化防止に寄与する効果が得られるものであるという点を重点に評価するものである。

前項までの検討結果より，本システムの機能毎に評価項目を定め，風力発電機1基導入の場合の目標値を設定して表-4に示す。

表-4 実証施設評価項目

機能Ⅰ	機能Ⅱ	評価項目	目標値	評価および測定方法	対応および対策
クリーンエネルギーの活用	所要の発電量が確保できる 年間を通じて安定した電力量が確保できる	年間発電電力量	1,123,400kWh以上	積算発電量の測定	風況調査による発電量予測の整合性
		設備稼働率	60%以上		
		設備利用率	19%以上		
経済性	商用電力量が削減できる	購入電力量削減量	年間11,268千円	10.03円/kWh	
安全性	下水処理に影響を与えない 雷に対して安全	停電+無風状態の時間	1時間未満		
		落雷事故回数	0回		避雷対策
維持管理性	運転操作マニュアルが整備されている	運転操作マニュアル			
環境性	騒音の問題がない	騒音レベル	敷地境界において 昼間65dB以上 夜間60dB以下		
	地球温暖化防止に効果がある	CO ₂ 削減率	年間90%以上		
	電波障害がない	電波障害クレーム件数	0件		

注1) 設備稼働率 = (一定期間の発電時間 / 一定期間の時間) × 100 : 平成9年の風況調査結果より61.3%
 注2) 設備利用率 = (一定期間の発電量 / (定格出力 × 一定期間の時間)) × 100
 = [1,123,400 / (660kW × 8760h)] × 100 = 19%

4. まとめ

平成11年度は実用化研究として、風力発電により発生する電力を、効率良く浄化センターに取り込むことができ、事業効果のある適正な発電規模の設定を行い、風力を利用した省エネルギー型下水道システムの仕様を設定したものである。また、風力発電設備を設置することによる周辺環境への影響調査についても実施した。

研究成果は次のとおりである。

(1) 風力を利用した省エネルギー型下水道システムの仕様の設定

① 発電規模と設置台数の設定

浄化センターが4/4系列完成時において、定格出力660kW、ブレード径47mの風力発電装置を2基と設定した。

浄化センター2/4系列完成時においては、1基を設定し、段階的導入を図るものとした。

② 系統連系方式

風力発電エネルギーを有効活用する形態として、電力会社の供給電力（商用電力）と風力発電電力とを連系する「系統連系方式」を行うこととした。

また、系統連系時における留意事項として、下記事項を挙げた。

- ・商用電力システムの安全の確保として、電力会社と保護協調を行うこと。

- ・系統電圧降下の防止として、無効電力調整装置（SVC装置）の設置を検討すること。（電力会社との協議による）

③ 商用電源停電時における運用

商用電源停電時において非常用発電機との並列運用する際には、必要とする励磁電力の供給を十分に受けることができないことから、留意を要する。

④ 落雷対策

落雷対策としては、いかに速く雷電流を逃がし、落雷により発生するエネルギーによる温度上昇を防ぐかを考慮し、風力発電装置自体に避雷対策を施すことと、場内の落雷や配電線より侵入するサージに対しても、風力発電装置を保護するために、避雷装置の強化や共通接地の採用等を挙げた。

(2) 導入効果

① 商用電力削減効果

浄化センター2/4系列完成時に風力発電装置1基を導入することにより、年間で需要電力量の約105%を風力発電電力によって賄うことができ、商用電力の大幅な削減が可能となる。

② 地球温暖化防止効果

CO₂を評価対象としたLCAを行った結果、2/4系列完成時において風力発電の導入により、CO₂排出量は96%の削減が可能となる。

③ 経済効果

商用電力の削減により、2/4系列完成時にお

いて、年間11,268千円の維持管理費の削減が期待できる。

(3) 環境影響調査

① 騒音

風力発電設備建設予定地周辺の騒音レベルは概ね40～50dB (A)であることが分かった。風力発電設備の地表での騒音レベルは約45dB (A)であり、騒音に関する影響は生じないと考えられる。

② 電波障害

風力発電設備建設予定地周辺のテレビ電波が遮へい及び反射の影響を受ける可能性がある区域を予測し、現況の受信状況を確認した。風力発電設備設置後に、電波障害が発生した際の判断基準とする。

③ 景観

風力発電設備建設予定地周辺に眺望地点を設

定し、合成写真を作成し、景観の変化を確認した。周囲の景観を大きく損ねるものではないと考えられる。

5 今後の予定

今後の本実用化研究においては、まず、平成12年度に実施設の建設・試運転が行われ（宇ノ気七塚都市計画下水道施設組合による）、その設計に対して技術的な助言を行うものである。平成13～14年度においては、性能評価として、実施設の運転からのデータ採取、風況調査を行い、設定した仕様に対し評価案に基づき検証・評価を行うものである。

また、周辺環境への影響についての確認も随時行うものである。

●この研究に関する問い合わせは 研究第一部長 江藤 隆
研究第一部総括主任研究員 西村 孝彦
研究第一部研究員 川崎 貴義