

活性汚泥法施設の省エネについて

平成27年 5月15日

公益財団法人 日本下水道新技術機構
資源循環研究部部長 石田 貴



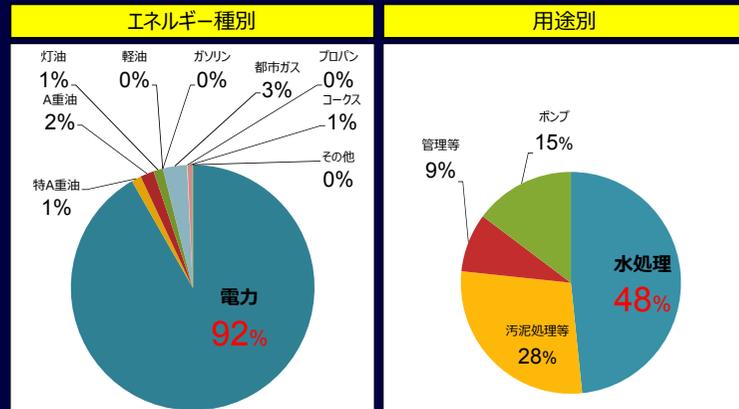
(1) 電力料金

■各電力会社電気料金より運転時間を考慮した料金単価

	単位	北海道 ⁰¹	東北 ⁰²	東京 ⁰³	中部 ⁰⁴	北陸 ⁰⁵	関西 ⁰⁶	中国 ⁰⁷	四国 ⁰⁸	九州 ⁰⁹	沖縄 ¹⁰	単年平均		
基本料金	円/kWh	2019.60	1944.00	1782.00	1830.86	1555.20	1863.00	1701.00	1783.54	2008.80	1981.80	1846.98		
(換算値=基本料金x1236524)	(円/kWh)	2.77	2.66	2.44	2.51	2.13	2.55	2.33	2.44	2.75	2.71	2.53		
電力料金	ピーク時間	円/kWh	—	17.79	18.76	17.07	13.13	18.76	16.49	17.13	16.61	17.22	17.00	
	昼間時間	夏季	円/kWh	—	16.50	18.11	—	12.51	—	13.70	14.84	14.19	14.35	15.09
		その他季	円/kWh	17.93	—	—	14.66	—	11.11	12.62	13.54	13.20	13.66	
	夜間時間	円/kWh	—	14.45	11.12	12.45	13.41	7.70	11.11	9.62	10.82	8.87	12.11	11.17
	年間平均単価	円/kWh	—	16.07	13.22	14.61	14.14	9.48	12.80	11.23	12.31	11.09	12.84	12.78
燃料費調整単価(H27/1)	円/kWh	—	0.63	1.53	2.24	0.33	0.82	1.47	1.33	0.70	1.03	0.87	1.10	
再生可能エネルギー促進課金単価	円/kWh	—	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
小計	円/kWh	—	17.45	15.50	17.60	15.22	11.06	15.02	13.31	13.76	12.87	14.46	14.62	
合計	円/kWh	—	20.22	18.16	20.04	17.73	13.18	17.57	15.64	16.20	15.62	17.17	17.15	

(2) エネルギー消費量の分析

下水処理場で使用されるエネルギーの内訳



平成21年度下水道統計の全国の処理場のエネルギー消費量を原油換算した値から計算

(3) 米国の分析手法

【EPA (アメリカ合衆国環境保護庁)】
規模の異なる施設を含めて
エネルギー使用量に関するパフォーマンスを
スコア化する方法を開発

【上下水道の管理者】
エネルギー使用量等の把握や
他の施設との比較が可能

エネルギー使用量に関するパフォーマンスをスコア化する手法

STEP1: エネルギー使用量を特徴付ける変数を見つけるための多重回帰分析

STEP2: 標準的なエネルギー使用量が算出できるエネルギー使用量の多変数関数式を作成

$$Ln(\text{エネルギー使用量}) = k \cdot Btu/\text{年} + 0.8944 \times Ln(\text{日平均流入水量: MGD}) + 0.4510 \times Ln(\text{流入水のBOD水質: mg/l}) - 0.1943 \times Ln(\text{処理水のBOD水質: mg/l}) - 0.4280 \times (\text{日平均流入水量と設計水量の比率}) - 0.3256 \times (\text{水処理方式が散水床法であれば1, または0}) + 0.1774 \times (\text{栄養塩除去を行ってれば1, または0})$$

STEP3: 当該処理場の使用量/標準的な予測使用量 すべての処理場について算出

STEP4: 正規分布で正規化し、1点から100点までのスコア化 (100処理場あったとして、その何番目かを示す)

STEP5: 各処理場ごとスコアが得られる。 (100点なら優秀な処理場、50点は平均的な処理場)

(5/18) 下水処理場のエネルギー消費量

(4) 我が国の下水処理場におけるエネルギー消費量の指標化

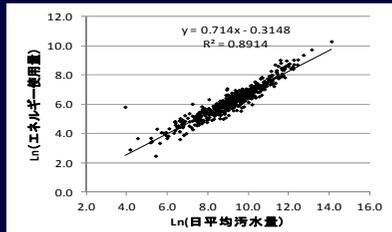
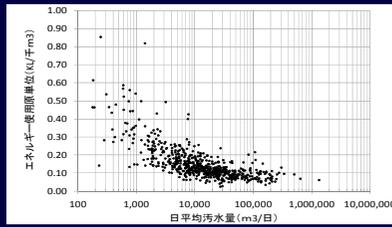
【実態の把握】

処理水量 (m³/日) のエネルギー原単位 (原油換算 kL / m³) はバラつきが大きく、相関係数の高い回帰式を得ることができなかった

両自然対数化

エネルギー使用量、処理水量の両自然対数を用いることにより相関の高い一次回帰式を得ている

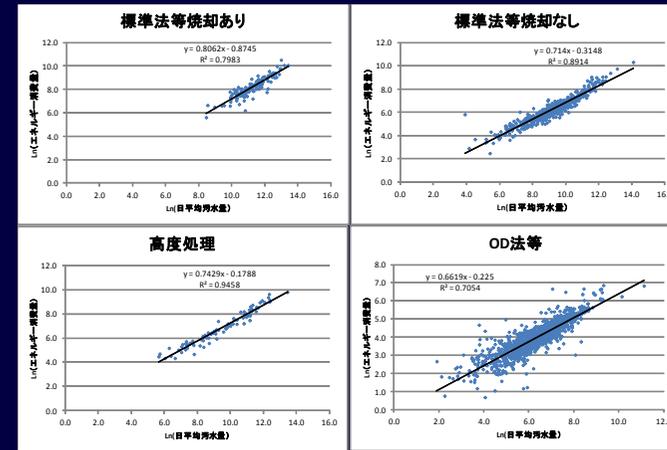
アメリカ合衆国環境保護庁 (EPA) 報告書¹⁾ 参考
1) : Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities



図：日平均汚水量とエネルギー使用量の相関

(6/18) 下水処理場のエネルギー消費量

(4) 我が国の下水処理場におけるエネルギー消費量の指標化



図：処理方式ごとの相関

(7/18) 下水処理場のエネルギー消費量

(4) 我が国の下水処理場におけるエネルギー消費量の指標化

エネルギー使用量を特徴付ける変数を見つけるための多重回帰分析
日本の処理場に当てはめ8つの説明変数候補の回帰分析を行った。

説明変数の候補	標本数	すべてのデータ		日平均汚水量 1000m ³ /日以下を除く		日平均汚水量 10,000m ³ /日以下を除く	
		約2,100処理場	約1,100処理場	約560処理場	約560処理場		
	単位	t値	P値	t値	P値	t値	P値
Ln(日平均汚水量)	Ln(m ³ /日)	88.01	0.0000	71.26	0.0000	47.93	0.0000
合流式であるか	1または0	-2.49	0.0000	-4.57	0.0000	-4.57	0.0000
Ln(流入BOD水質)	Ln(mg/L)	3.90	0.0128	4.55	0.0000	2.98	0.0030
窒素除去目的の高度処理か	1または0	6.35	0.0001	7.21	0.0000	4.56	0.0000
OD法か	1または0	-8.78	0.0000	-4.16	0.0000	-0.50	0.6193
焼却炉の有るか	1または0	11.52	0.0000	11.37	0.0000	10.38	0.0000
消化工程の有るか	1または0	-0.75	0.0000	-1.01	0.3139	-0.61	0.5404
Ln(流入水量/施設能力)	Ln(比率)	-10.92	0.4550	-8.71	0.0000	-4.57	0.0000

t 値と |t| が大きいほど影響が大きい。
P 値とは P 値が小さいほどその説明変数を用いたときの危険率が小さい。

(8/18) 下水処理場のエネルギー消費量

(4) 我が国の下水処理場におけるエネルギー消費量の指標化

日平均1,000m³/日を除いたデータの解析では、「合流式である」「流入BOD水質」「OD法である」の |t| はほぼ同じ値であるため、ここで目的変数との相関を見ると、「流入BOD水質」に比べて、「合流式である」「OD法である」は、汚水量との相関性が高いため、変数として採用しない。

表：目的関数との相関係数 (日平均1,000m³/日以下を除いたデータ)

	エネルギー消費量合計	汚水量	合流	流入BOD	高度処理	OD法	焼却有り無し	消化有り無し	流入水量割合
エネルギー消費量合計	0	0.915	0.221	0.02	0.02	0.41	0.30	0.06	0.16
汚水量	0.91	0	0.2920	0.04	0.01	0.42	0.24	0.09	0.24
合流	0.22	0.29	0	0.05	0.00	0.10	0.05	0.02	0.12
流入BOD	0.02	0.04	0.05	0	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01
高度処理	0.02	0.01	0.00	0.00	0	0.03	0.01	0.00	0.00
OD法	0.41	0.42	0.10	0.03	0.03	0	0.06	0.12	0.08
焼却有り無し	0.30	0.24	0.05	0.00	0.01	0.06	0	0.00	0.04
消化有り無し	0.06	0.09	0.02	0.01	0.00	0.12	0.00	0	0.04
流入水量割合	0.16	0.24	0.12	0.01	0.00	0.08	0.04	0.04	0

(9/18) 下水処理場のエネルギー消費量

9

(4) 我が国の下水処理場におけるエネルギー消費量の指標化

> 標準的なエネルギー使用量が算出できるエネルギー使用量の回帰式

【日平均汚水量10,000m³/日以上データのデータを用いて算出した回帰式】

$$\begin{aligned} & \ln(\text{エネルギー使用量: 原油換算 kL/年}) \\ &= -2.0792 \\ & \quad + 0.829833 \times \ln(\text{日平均汚水量: m}^3/\text{日}) \\ & \quad + 0.080753 \times \ln(\text{流入BOD水質: mg/L}) \\ & \quad + 0.258432 \times (\text{高度処理をおこなってれば1, または0}) \\ & \quad + 0.395657 \times (\text{焼却炉があれば1, または0}) \\ & \quad - 0.385930 \times \ln(\text{施設能力に対する流入水量割合}) \end{aligned}$$

重相関係数: 0.936

【日平均汚水量10,000m³/日以上データを用いて水処理施設のみ算出した回帰式】

$$\begin{aligned} & \ln(\text{エネルギー使用量: 原油換算 kL/年}) \\ &= -2.5695 \\ & \quad + 0.909960 \times \ln(\text{日平均汚水量: m}^3/\text{日}) \\ & \quad + 0.000775 \times (\text{流入BOD水質: mg/L}) \\ & \quad + 0.318655 \times (\text{高度処理をおこなってれば1, または0}) \\ & \quad - 0.724120 \times (\text{施設能力に対する流入水量割合}) \end{aligned}$$

重相関係数: 0.903

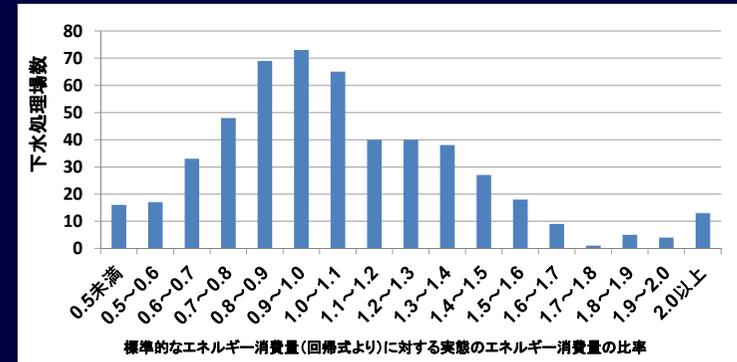
※ 水処理施設で使用されるエネルギーは全て電力なので、換算値1kL/年→4千kWh/年でkWh表示とする。
 ※ 下水道統計(H24)によれば、電力消費量の約8割を1万m³/日以上規模の処理場が占める。

(10/18) 下水処理場のエネルギー消費量

10

(5) 水処理施設のエネルギー消費の分布図(10,000m³/日以上処理場)

0.5未満	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0	1.0~1.1	1.1~1.2	1.2~1.3	1.3~1.4	1.4~1.5	1.5~1.6	1.6~1.7	1.7~1.8	1.8~1.9	1.9~2.0	2.0以上	合計
16	17	33	48	69	73	65	40	40	38	27	18	9	1	5	4	13	516



(11/18) 下水処理場のエネルギー消費量

11

(6) モデル設計による標準法を想定した水処理施設の消費電力量

単位: kWh/年

処理水量(日最大)	1万m ³ /日	4万m ³ /日	10万m ³ /日
最初沈殿池設備	25,274	80,069	93,951
反応タンク設備	9,812	19,623	29,434
最終沈殿池設備	162,326	579,960	1,209,745
送風設備	467,680	1,723,696	4,422,648
脱臭設備	45,990	134,904	367,920
合計	711,082	2,538,252	6,123,698

活性汚泥法等の省エネルギー化技術に関する技術資料-2014年3月-より抜粋

(7) 回帰式とモデル設計の水処理施設の消費電力量の比較

処理水量(日最大)		1万m ³ /日	4万m ³ /日	10万m ³ /日
条件	日平均汚水量[m ³ /日]	8,500	34,000	85,000
	流入BOD水質[mg/L]	190	190	190
	高度処理比率	0	0	0
	施設能力に対する流入水量割合	0.85	0.85	0.85
① 回帰式による消費電力量 [千kWh/年]		722	2,548	5,866
② モデル設計による消費電力量 [千kWh/年]		711	2,538	6,124
①/②		1.02	1.00	0.96

(12/18) 下水処理場のエネルギー消費量

12

【分析事例】α県下水処理場のエネルギー消費

都市	処理場	日平均 (m ³ /日)	BOD (mg/L)	流入量 割合	高度 処理 (N)	焼却	処理場全体 (kL/年)			水処理施設 (千kWh/年)		
							消費	標準	比率	消費	標準	比率
流域	イ	96,400	165	1.10	○	○	5,959	4,967	1.20	9,672	7,404	1.31
	ロ	121,000	164	0.60		○	5,553	4,522	1.23	11,903	9,525	1.25
	ハ	75,300	151	0.67			2,373	2,007	1.18	5,939	5,845	1.02
A市	ニ	118,200	92	0.72		○	3,499	4,503	0.78	5,467	8,135	0.67
B市	ホ	53,900	181	0.68			1,677	1,568	1.07	5,329	4,385	1.22
C市	ヘ	43,100	200	0.51			1,210	1,239	0.98	3,999	4,094	0.98
D市	ト	15,100	130	0.68			699	577	1.21	1,928	1,321	1.46
E市	チ	16,900	195	0.90			590	690	0.85	830	1,312	0.63
F市	リ	28,000	170	0.58			1,062	908	1.17	3,270	2,566	1.27
G市	ヌ	25,400	142	0.52			832	811	1.03	1,601	2,409	0.66
H市	ル	22,000	248	0.52			834	746	1.12	1,511	2,292	0.66

流入条件

日平均下水量：25,000m³/日，流入BOD濃度221mg/L，流入水量割合：0.51

【回帰式から求めた標準値】

【実態値】

処理場全体：1,119kL/年
水処理施設：2,543千kWh/年

処理場全体：1,502kL/年
水処理施設：4,013千kWh/年

考察

- 標準値と比較⇒処理場全体の消費エネルギーで**1.34倍**，水処理施設の電力で**1.58倍**
 - 水処理施設の電力消費⇒標準に比べ1,470千kWh/年高い。
単価15円/kWhとした場合，**2,200万円**程度高い。
 - 水処理施設の消費エネルギー⇒処理場全体の**67%**を占めており非常に高い。
 - 水処理施設の電力消費量の標準に対するエネルギー増加分⇒**368kL/年**
(処理場全体の増分の**96%**を占める)
- ☆水処理施設の電力消費量の削減が特に必要

事例①：日平均99,400m³/日(処理能力144,000m³/日)
事例②：日平均92,100m³/日(処理能力110,000m³/日)

事例	送風機制御方式	散気装置型式/水深	送風機型式	必要酸素量あたりの送風機消費電力量 [kWh/tO ₂]
①	従来	散気板(旋回流)/5.0m	多段ターボ	766
	省エネ	DO一定+送風機台数+インバータ+インレットペーン	メンブレン(全面曝気)/5.5 m	磁気浮上単段ターボ (▲27%)
②	従来	風量一定タイマー	散気板(旋回流)/4.3m	片吸込単段増速ターボ
	省エネ	DO一定+流入比率	メンブレン(全面曝気)/4.7 m	磁気浮上単段ターボ (▲30%)

➢ モデル設計では水量・水質を一定として省エネ率を計算しているが、実際の事例では水量・水質の変動があるため、省エネ率が悪くなる。これをカバーするのが制御手法となる。

省エネ度が低い処理場を訪問調査

攪拌動力密度の高い水中攪拌機の電力消費量の影響
水中攪拌機を用いているところが多い。



●水中攪拌機を用いている処理場のエネルギー消費の分析例

- 水中攪拌機を用いている処理場の内、調査した処理場数：14ヶ所
- 標準的なエネルギー消費量に対する実際のエネルギー消費量の平均比率：1.52

標準を超過した電力量に占める攪拌機の割合		攪拌動力密度	
①攪拌機消費電力平均値*	776千kWh/年	水中攪拌機 (機構調査の平均値)	10.8 w/m ³
②消費-標準	1,413千kWh/年	省エネ攪拌機 (審査証明の値)	1.0~3.5 w/m ³
①/②	55%		

※ 攪拌機消費電力(kWh/年)=
総定格容量(kW)×負荷率0.7×24(h)×365(日)

省エネ型攪拌機導入のきっかけが必要

① 高度処理の実施に伴う反応タンク容量の増分

滞留時間	処理法	滞留時間
	A2O法	嫌気2h+無酸素4h+好気7h
循環法	無酸素6h+好気7h	13h

反応タンク容量	規模	標準法	高度処理の実施に伴う増分
	4万m ³ /日	13,200 m ³	6/8×13,200=9,900 m ³
10万m ³ /日	33,600 m ³	6/8×33,600=25,200 m ³	

② 高度処理の実施に伴う反応タンクの攪拌に水中攪拌機を導入した場合に必要な消費電力量の増分

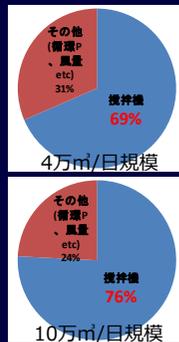
規模	増分
4万m ³ /日	10.8w/m ³ ×9,900m ³ ×0.7×24h×365日×10 ⁻³ =656千kWh/年 (攪拌動力密度)(反応タンク容量増分)(負荷率)
10万m ³ /日	10.8w/m ³ ×25,200m ³ ×0.7×24h×365日×10 ⁻³ =1,669千kWh/年 (攪拌動力密度)(反応タンク容量増分)(負荷率)

③ 標準法と高度処理の標準的な消費電力量の増分…回帰式より算出

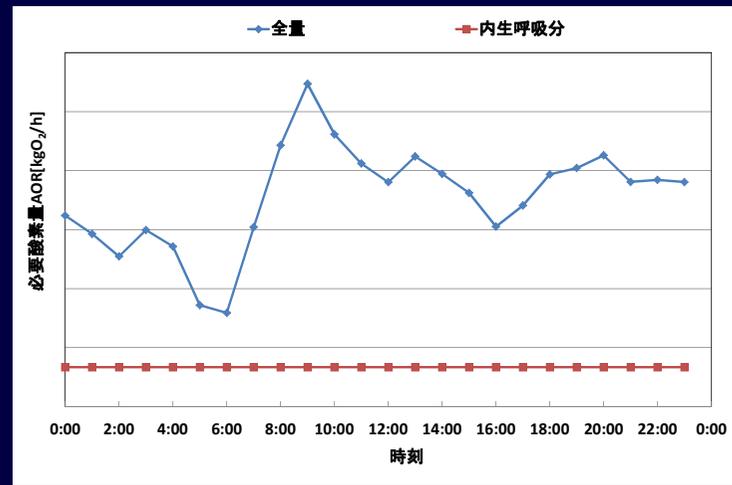
処理規模	標準法	高度処理	増分
4 万m ³ /日	2,548 千kWh/年	3,505 千kWh/年	957 千kWh/年
10 万m ³ /日	5,866 千kWh/年	8,068 千kWh/年	2,202 千kWh/年

高度処理にした場合に
消費電力量が増える分のうち 水中攪拌機が占める割合

規模	② 攪拌に必要な消費電力量の増分 (全頁の計算による)	③ 標準的な消費電力量の増分 (上記の計算による)	②/③
4 万m ³ /日	656 千kWh/年	957 千kWh/年	69%
10 万m ³ /日	1,669 千kWh/年	2,202 千kWh/年	76%



高度処理において、攪拌機の電力消費が大きい



微細気泡型散気筒	120~150(L/min)
微細気泡型散気板	80~120(L/min)
超微細気泡型散気板	10~35(L/枚・min)
メンブレンパネル式散気装置	10~68(Sm ³ /m ² ・h)
メンブレンパイプ式散気装置	2.1~6.4(Sm ³ /m ² ・h)

アンモニア性窒素濃度抑制による曝気風量の最適化システム

研究の背景

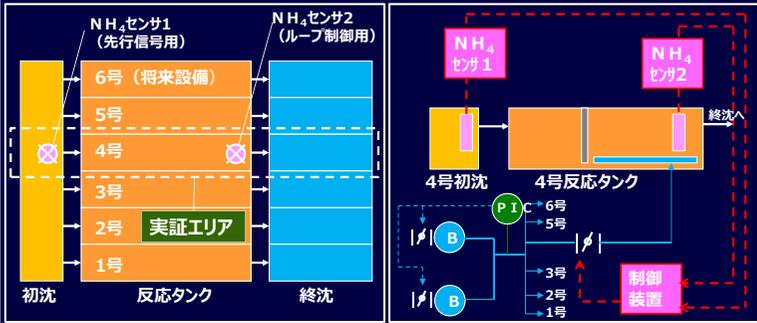
- (1) 下水処理に要する電力の中でも送風機電力の占める割合は非常に大きい。
- (2) 一般的に曝気風量の制御は風量一定制御やDO制御にて行われている。

制御方法	長所	短所
風量一定	制御が容易	電力量が大
DO制御	好気槽DO値に対応	水質変動への追従が困難 低負荷時の対応が困難



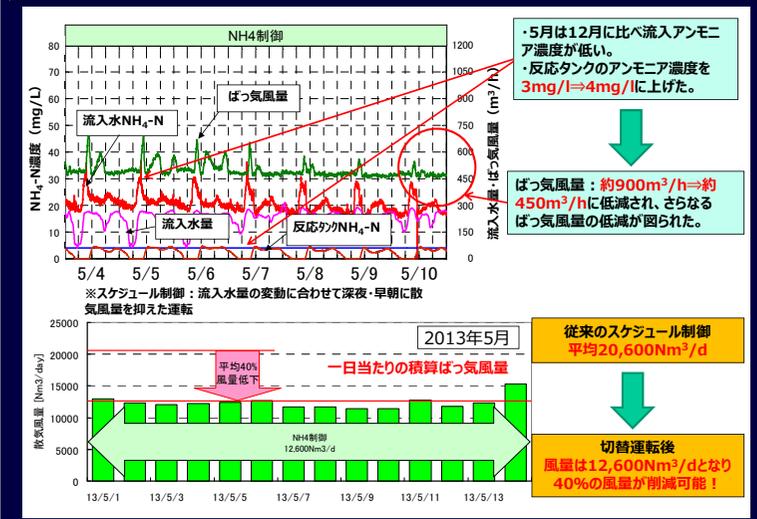
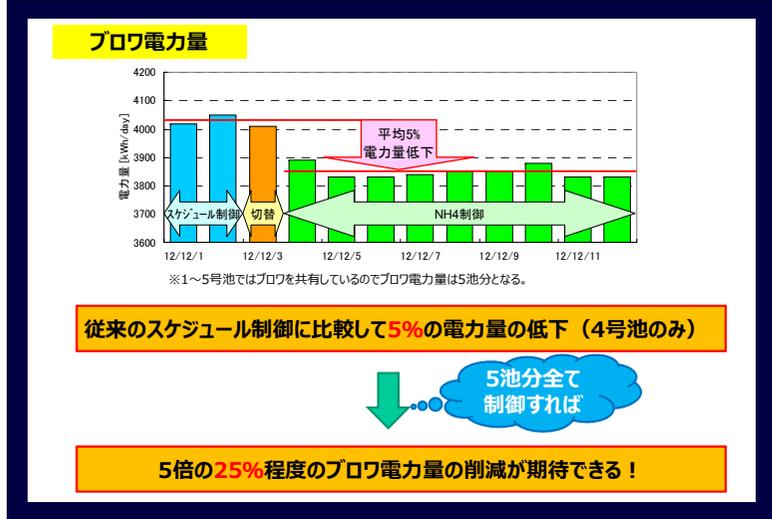
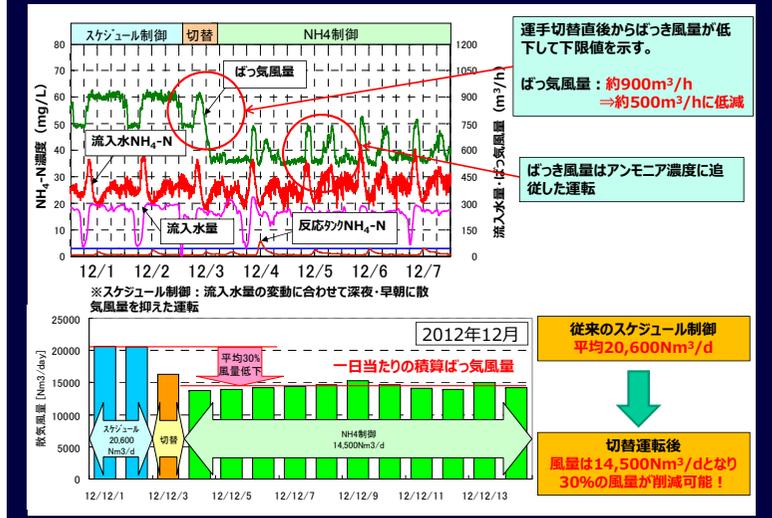
ハード面：効率の良い送風機の導入。
 ソフト面：最適な送風量をコントロールする制御システムの対策。

アンモニア性窒素濃度抑制による曝気風量の最適化システム



➢ 流入汚水や生物反応槽のアンモニア性窒素をアンモニアセンサで連続計測し、それぞれをフィードフォワード信号及びフィードバック信号として送風量をコントロール

- ① 生物反応槽におけるアンモニア性窒素濃度の目標値を設定し、フィードバック制御を行う。
- ② 最初沈殿池のアンモニア性窒素濃度をフィードフォワード信号として付加することで、送風量の補正を行う。



ご静聴ありがとうございます

