

3-(1)-1 高効率散気装置の運転指標の経年変化と課題の評価

計画調整部技術開発課 山下 博史

1 はじめに

メンブレン散気装置は、従来の散気板と比較して吐出する気泡の径が小さいことから酸素移動効率が高く、曝気動力の削減に大きく寄与する技術として期待されている。東京都下水道局でも水処理動力削減を目的として積極的に導入が図られてきた。しかし、曝気における圧力損失が散気板と比較して大きいことから、同じブローヤーに散気板とメンブレン散気装置を共存させる場合には吐出圧調整のため散気板より浅く設置する必要があり、その分酸素移動効率が低下し本来の性能を発揮できない場合や、メンブレン樹脂表面へのスライムの付着等で目詰まりが進行し曝気が困難となるケースもあった。

また、メンブレン自体が高分子材料であり経年使用で劣化が進行するため破損のリスクは散気板より大きく、素材としての寿命も明確ではないことからライフサイクルコストの算出が困難で、装置導入によるコスト効果の評価が困難という側面も持合わせている。

一方、メンブレン散気装置はブローダウンやブローアップというフレキシング操作を行うことで目詰まりを防止すれば経年的な酸素移動効率の低下がほとんど無いと言われており、目詰まりの進行により経年的に酸素移動効率が低下する散気板¹⁾と比較してメリットも大きい。

ここでは、メンブレン散気装置の機能評価と維持管理性向上を目的に調査を行い一定の成果を得たので報告する。

2 調査目的

散気装置を評価する上で重要な運転指標である酸素移動効率、圧力損失といった因子の経年変化を把握し、今までに生じたトラブル等とその対応策を明確にすることで、メンブレン散気装置の維持管理の適正化とメンブレン散気装置の特性に応じた曝気システムの構築を目的とした。

さらにライフサイクルコスト算出の基礎項目であるメンブレン樹脂の寿命に関して、ある程度の目安をつけることによりメンブレン散気装置の導入によるコスト効果を明確にすることを目的とした。

3 調査対象および調査内容

本調査は、最終調査時点で稼動から5年経過したK水再生センター(幅広タイプP型メンブレン散気装置²⁾)と稼動から4年経過したS水再生センター(細長タイプA型メンブレン散気装置³⁾)を対象とした。各センターの反応タンク諸元を表1に示す。

表1 調査対象反応タンクの諸元

		単位	水再生センター	
			K	S
槽形状	長さ	m	73	65
	幅	m	7.0	9.0
	有効水深	m	10.0	11.2
	有効容量	m ³	22,050	13,100
散気水深		m	4.3	3.7

調査内容は以下のとおりである。

- ① 酸素移動効率及び圧力損失の経年変化
- ② 空気倍率からの酸素移動効率の考察
- ③ メンブレン樹脂の物理強度劣化
- ④ 曝気風量と酸素移動効率の関係把握
- ⑤ 微細気泡散気装置の課題と対応策
- ⑥ 導入コスト効果の試算

4 結果および考察

4.1 酸素移動効率及び圧力損失の経年変化

4.1.1 酸素移動効率

K 水再生センターでは平成 13 年 4 月から P 型メンブレン散気装置が稼動し、S 水再生センターでは平成 14 年 4 月から A 型メンブレン散気装置が稼動している。

装置評価のために酸素移動効率に関する調査を平成 14 年 10 月から実施した。その結果を図 1,2 に示す。

ここで、移動効率はオフガス法⁴⁾により測定した。図中の $\eta 1$ は表 1 の散気水深における酸素移動効率を表し、 $\eta 2$ は水深 5m に換算した酸素移動効率を表している。

図 1 より、測定ごとのバラつきは大きい移動効率が経年的に下降している傾向は見られない。バラつきが大きいのは、通気風量等オフガス法の測定条件を毎回の測定ごとに常時一定にすることは困難であるためと考えられる。

通常散気板は目詰まりのため 0.25 ポイント/年の割合で酸素移動効率が低下する傾向がみられる⁵⁾が、メンブレン散気装置の場合はこの傾向は認められなかった。メンブレン散気装置は、散気停止時に散気口が閉まるため、閉塞による移動効率の低下のリスクは散気板よりはるかに小さいと考えられる。

また、A 型メンブレン散気装置が平成 15 年から導入されている S センターにおける酸素移動効率の経年変化を図 2 に示す。ここでもバラつきはあるものの経年的な低下傾向はみられなかった。

期間中の酸素移動効率の平均は、K センターで $\eta 1$ が 19.8%、 $\eta 2$ が 22.1%であった。一方、S 水再生センターでは $\eta 1$ が 20.6%、 $\eta 2$ が 24.1%であった。両者の違いは、散気装置の違いではなく槽形状の違いが大きく影響している⁶⁾。K センターは槽幅が 7m と S センターの 10m と比較して狭く、幅の狭い分滑らかな旋回が困難なため酸素移動効率が低くなったと考えられる。

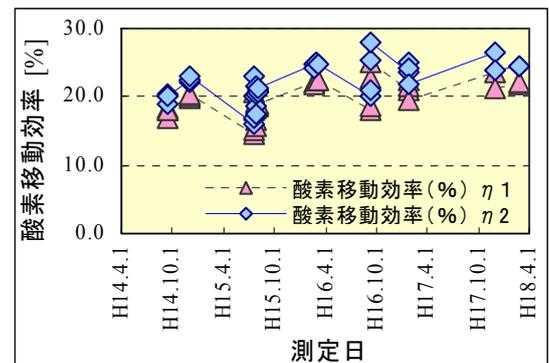


図 1 K 水再生センターにおけるメンブレン散気装置の

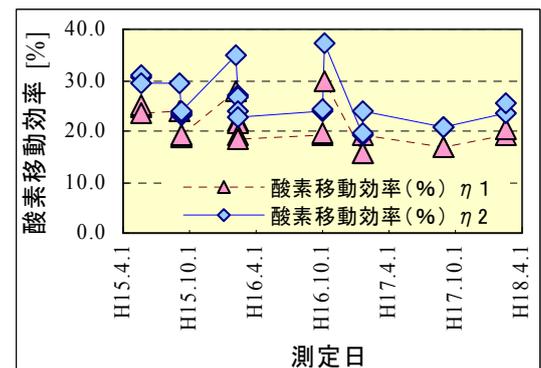


図 2 S 水再生センターにおけるメンブレン散気装置の酸

当局におけるメンブレン散気装置の導入では、同じブロワーに既存の散気板とメンブレン散気装置が接続される場合が多く、吐出圧を調整するためメンブレン散気装置は散気板より 30cm から 50cm 程度浅く設置される。したがって、設置位置が浅い分酸素移動効率が低下し、S センターを例にとると水深 5m に設置すれば装置能力として 24%程度の効率は期待できるはずが、実際は 20%程度の効率となっている。

また、S センターの反応タンクは設計段階で硝化抑制の場合の必要風量を標準散気風量(40Nm³/m²/h)で割り戻して散気装置の枚数を決定しているが、実情は硝化促進型で運転されており、酸素要求量が多い分通気風量が 45~75 Nm³/m²/h と標準風量を超えており、仮に調査時の散気風量を 50 Nm³/m²/h とすれば、硝化に必要な酸素消費量を見込んだ散気装置枚数を設置した場合と比較して酸素移動効率 η₂ は 3%程度低下しているものと考えられる(4.4 章参照)。

4.1.2 圧力損失

メンブレン散気装置の特徴は、散気板に比べて散気における圧力損失が大きいことである。圧力損失が高いということは散気におけるブロワー吐出圧の上昇を招く。

同じブロワーに散気板とメンブレン散気装置が混在し、しかもメンブレン散気装置の比率が散気板に比べて小さい場合には、メンブレン散気装置に必要な吐出圧で散気板にも送風を行うため、全体の散気に関わる動力(風量×吐出圧)がメンブレン散気装置の導入によりかえって動力が上昇する場合も考えられる。

このように散気装置の圧力損失は散気動力に大きく影響するため、目詰まりやメンブレン膜自体の劣化による硬化等の進行で圧力損失が経年的に上昇しないか把握する必要がある。

ここでは、メンブレン散気装置につながるライザー管に圧力計を設置し、圧力損失の経年変化の把握を目的とした調査を実施した。

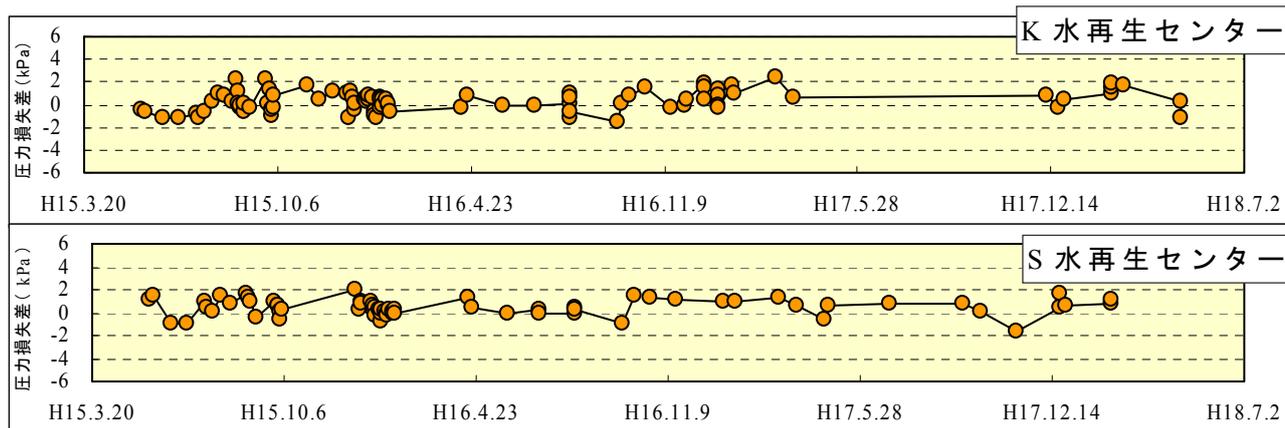


図 3 圧損の経年変化

図 3 に K センターと S センターの圧損の経年変化を示す。図は測定時の圧損から初期圧損を引いたもので、図を見ると分かるように±2 の範囲で変動しており経年的な上昇傾向は見られなかった。

両センターとも 1 日に 1~4 回のブローダウン操作を実施しており、膜表面に繁殖する生物性のスライム⁷⁾による散気孔の閉塞は防止されているものと考えられる。

4.2 空気倍率からの酸素移動効率の考察

実施設の酸素移動効率測定は、通常 Rr 法やオフガス法で測定する。この場合タンク内の DO 変化がないことが測定的前提条件となるが、タンク内は大なり小なり DO 勾配があり、しかも微小時間の送風量も変化が激しいため DO は時々刻々変動しており測定データはバラつきが大きくなる。そこで、メンブレン散気装置の効率を相対的に評価する目的で、実槽で曝気空気量から送風倍率を求め、既設散気装置（散気板）と比較することにより、酸素移動効率を推定した。

K センターと S センターにおける送風倍率の経年変化を図 4、5 に示す。

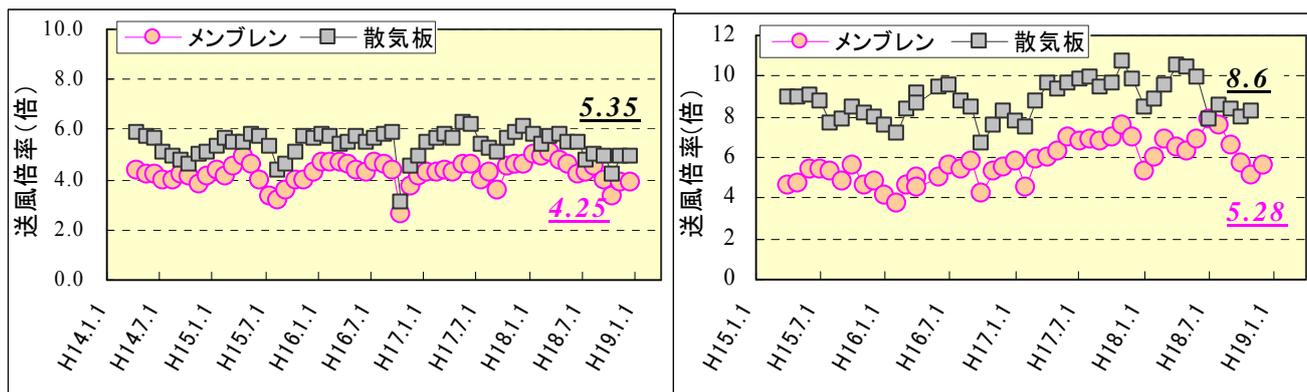


図 4 K センターの送風倍率の経年変化

図 5 S センターの送風倍率の経年変化

図を見ると、どちらのセンターも散気板に比べてメンブレン散気装置の方が送風倍率が低いのは明確で、K センターでは 20% 程度低く、仮に散気板の酸素移動効率を 17% とするとメンブレンの効率は 21.4% 程度と計算された。一方、S センターではメンブレンの方が 39% 程度送風倍率が低く、この結果酸素移動効率は 27.7% と推定された。両センターの推定値もオフガス法の測定値の範囲に入っており、日常の維持管理では、測定器具も多数の測定員もいらない送風倍率を把握することが重要である。

4.3 メンブレン樹脂の物理強度劣化

メンブレン散気装置の散気部分の膜はポリウレタン系の樹脂を多層に重ねたもので、新品のうちには弾性も大きく破損の可能性は低い。しかし、経年使用により樹脂の結合が解離して硬化していくため、一挙に弾性が低下し、通常の曝気に伴う応力でも膜が破損する場合も想定される。

技術開発課のメンブレン散気装置機能調査⁸⁾における試算では、散気板更新時にメンブレン散気装置に交換する場合、酸素移動効率が 22% あれば膜寿命が 8 年以上あれば散気板に交換した場合よりコストメリットを生じる（5 章参照）。このことから、9.5 年現場（米

国）で使用したメンブレン樹脂の強度試験を実施した⁹⁾。その結果を表 2 に示す。ここで MD（縦）とは散気装置の長手方向で、TD（横）とは MD と直角の方向である。

米国の 9.5 年使用膜は引張試験において約 20% 程度の低下の可能性があるが、引裂

表 2 使用パネルの膜物性試験結果

試験	項目	単位	測定結果			
			未使用	3年使用 (国内)	9.5年使用 (米国)	
引張試験	引張り 強さ	MD(縦)	MPa	19.6	19.5	15.5
		TD(横)				
	伸び	MD(縦)	%	570	580	490
		TD(横)				
引裂き 強さ	MD(縦)	N/mm	76.3	85.1	84.6	
	TD(横)					73.9

き強さはほとんど未使用膜と同強度である。曝気で膜にかかる実際の応力は、0.71MPa程度であることから、9.5年経過した膜でも実用上強度的には問題ないと考えられる。

また、別途 A 型散気装置のメーカーに依頼して行った、膜を 5%、20%硫酸中に浸漬した場合の強度試験では、調査開始前と約一年経過した時の膜の引張強度はほとんど変化がなく、膜素材の化学強度も高いことが分かった¹⁰⁾。

4.4 通気風量（散気面積）と酸素移動効率の関係把握

酸素移動効率は反応タンクに供給した空気中の酸素がどの程度曝気液に溶解したかを表す指標で、曝気液に溶解した酸素量と供給した空気中に含まれる全酸素量の比率で表される。従って、酸素の気液平衡定数に影響の大きな曝気液の水温や供給空気の温度、気泡径、気泡と曝気液の接触時間、曝気液の水質等に大きく左右される変数であり、定数ではない。

単位面積あたりの通気風量も酸素移動効率に影響を与える因子で、散気板では通気風量の増加で酸素移動効率が低下する現象が認められているが、メンブレン散気装置においても同様の傾向があるか調査を実施した。

図 7 は、S センターにおけるメンブレン散気装置単位面積あたりの通過風量と酸素移動効率の関係を表したものである。通気風量が増加すると移動効率が低下する傾向がみられる。清水においても同様の傾向がみられることから、メンブレン散気装置も散気板と同様、酸素移動効率は単位面積あたりの通気量に左右される値であることが分かる。相関式から移動効率を算出すると、A 型装置の設計風量

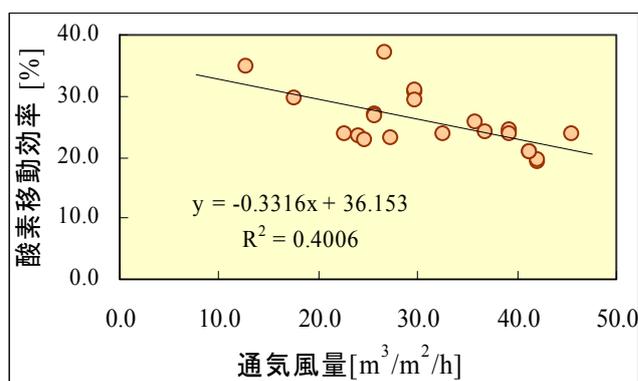


図 7 散気装置通気風量と酸素移動効率

である上限である $43\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ではおよそ 22%程度あるのに対し、下限である $27\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ では約 27%と 5 ポイント以上も高くなる結果となる。このことから、散気装置の枚数を減らせば、インシヤルコストは低下するが、散気装置単位面積あたりの風量が増加するため散気にかかわる動力コストは上昇することになる。一方、枚数を増やせば、インシヤルは増加するが、動力は低下する。このインシヤルと動力のバランスが一番良いポイントを選択して散気装置の枚数を決定する必要がある。

4.5 メンブレン散気装置の課題と対応策

メンブレン散気装置は、発泡面積を十分に確保し設計風量以下で運転すれば、幅が 8m 以上ある槽では 25%以上の酸素移動効率を得ることができ、30%程度は送風動力を削減することが可能となる。

一方、メンブレン散気装置は目詰まりの進行で圧損が上昇し曝気不能となる場合がある。曝気槽でメンブレン外側表面に付着するスライム（マイクロバクテリアム）¹¹⁾については、1 日 1 回以上のブローダウン（あるいはブローアップ）を実施すれば孔の閉塞のリスクはほぼ解消されるが、散気空気に混入した粒子状の物質による内側から

の閉塞はブローダウンのような操作でも解消されない。

Sセンターにおいても調査対象池の1年後にメンブレン散気装置を導入した池において、圧力損失が上昇する現象が見られた。原因の特定は困難であるが、稼動当初にブローダウン操作がうまく行われていなかったこと、メンブレンパネル内部に黒色の煤状の物質が蓄積していたことなど、散気孔の閉塞による可能性も否定できない。

また、他のセンターにおいても急激な圧力損失の上昇が起こったことがあり、Sセンターの場合と同じようにパネル内部に黒色の煤状物質の蓄積が見られた。この煤状物質を化学分析したところ、主成分は高沸点の脂肪族炭化水素および脂環式炭化水素の混合物で比較的鉱油に多く見られる成分であった。一方、散気空気中の粒子状物質を捕捉して分析したところ、主成分はガソリン由来と考えられる比較的低沸点の成分が多く、このセンターが交通量の多い高速道路の真下にあることから、自動車排気ガス中の粒子状物質の影響と考えられた。この粒子状物質とメンブレンパネル中の黒色物質とは成分が異なっており、散気管の内部に付着したタール状の物質が何らかの影響で剥離しメンブレンパネルに到達した可能性も考えられる。

いずれにせよ散気空気中の粒子状物質はメンブレンパネルの目詰まりの原因となる可能性があり、メンブレン散気装置の導入にあたっては、フィルターによる散気空気中の粒子状物質の除去が必要で、さらに送風配管に錆や付着有機物が多く見られる場合には配管の交換も必要となる。また、汚泥処理の臭気などの有機物を多量に含む空気は散気管内部に付着物を増加させる原因ともなるため散気に絶対に使わないなどの注意が必要となる。

ブローダウンを1回/日以上行っても圧力損失が上昇する場合は、ブローダウンの回数を増やしても改善効果はあまり認められない。この場合は、ブローダウンより散気風量を一時的に上げるブローアップの方が改善効果は高い。その場合には、ブロワーの吐出圧にある程度余裕が必要であることから、メンブレン散気装置の圧力損失に対し吐出圧に余裕があまりないブロワーにメンブレン散気装置を接続する場合は、ブロワーの吐出圧を考慮して散気水深を決定する必要がある。また、ブロワー諸元から散気水深をあまりにも浅く設置しなければならない場合には、酸素移動効率が低下するため導入を控えた方が良い場合もあり、導入にあたっては散気システム全体における評価が必要である。

また、当局の多くの導入事例のように、同じブロワーにメンブレンと散気板が接続されている場合には、メンブレンの吐出圧に合わせてブロワーを運転しなければならず、酸素移動効率上昇による動力削減がブロワー圧の上昇による動力上昇に相殺され導入効果があまり認められない場合もある。メンブレン散気装置の導入が進めばこのような問題はいずれ解消されるが、その場合でも散気板を想定した風量と吐出圧のブロワーを使い続けるよりも、メンブレン散気装置の必要風量と圧力損失に適合したブロワーを耐用年数前の既存ブロワーと交換した方が大きな省エネ効果が得られることから慎重な検討が必要である。

さらに、Sセンターのように散気板の系列が圧倒的に多く、しかもメンブレン散気装置を導入した池がブロワーからかなり離れている場合には、メンブレン散気装置と散気板のブロワーを分離し、メンブレン散気装置の必要送風量と吐出圧に見合ったブ

ローの新たに設置すること、最も効率的な水深(5m程度)にメンブレンを設置すること、などが好ましい。

5 導入コスト効果の試算

メンブレン散気装置の酸素移動効率はその発泡原理と溶解平衡に関する理論的考察から考えると、既存散気板より確実に高いといえる。このため、曝気に必要な空気量は散気板の場合より少なく済むことから、エネルギー削減については排出二酸化炭素の削減や処理コストの削減に寄与する技術として注目されている。

しかし、曝気における圧力損失が大きくブローアの吐出圧の上昇につながりその分ブローア動力を上昇させる。従ってエネルギー削減の評価では、風量の減少による効果から吐出圧上昇による動力上昇を差引く必要がある。

さらに、メンブレン散気装置は日本の処理場に導入されてまだ10年程度しか経過していないことから、物理的・性能的耐用年数が必ずしも明確になってはいない。このため、動力削減による経費の縮減と装置の耐用年数で決まる減価償却費の関係から算出される導入のメリットに関する検討がほとんどなされていない。

ここでは、経年的な酸素移動効率の低下や圧力損失の上昇が起きないと仮定し、性能や寿命が確立されている散気板とコスト(イニシャル+ランニング)が同等となるのに必要な耐用年数と酸素移動効率の関係を試算した。

試算に使用した基本的条件は以下のようである。

- ・イニシャルコスト

メンブレン散気装置および散気板の導入実績値を水量10,000m³/日あたりの原単位換算し、散気板に対するメンブレン散気装置のコスト比で検討する。

- ・散気板耐用年数は10年
- ・減価償却費は、 $Y=X/N$
- ・残存価格は、下記の定額法とする。

$$Y_n = X - ((X - 0.1X)/N) \times n$$

$$\text{償却率} = 1/N \text{ 年}$$

ただし、

X：当初取得価格(円)

Y_n ：n年目の残存価格(円)

N：耐用年数(年)

n：導入後の経過年数(年)

- ・散気水深：5.0m

散気板、メンブレン散気装置ともに同じ散気水深とする。ただし、両者の圧力損失の差を5kPaとし、これによる消費動力の差を考慮する。

- ・酸素移動効率 E_A (清水、20℃、101.3kPa)

散気板の移動効率は17%とする。

- ・必要風量

槽の構造、水質が同一の条件では下記に示すように「効率の差=風量の差」となる。

G_1 : 散気板必要風量 [m^3/d]

G_2 : メンブレン散気装置必要風量 [m^3/d]

$$G_1 = \frac{SOR \times (273 + T)}{81.7 \times E_A \times 10^{-2}} = \frac{SOR \times (273 + 20)}{81.7 \times 17 \times 10^{-2}}$$

$$G_2 = \frac{SOR \times (273 + T)}{81.7 \times E_A \times 10^{-2}} = \frac{SOR \times (273 + 20)}{81.7 \times E_A \times 10^{-2}}$$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{17}{E_A}$$

・ 所要動力

大気条件や反応タンクの水温等の条件が同じであれば送風機の所要動力は、下記に示すように、風量と圧力損失の積に比例しその差が所要動力の差となる。

① 理論断熱空気動力 LAD[kW]

$$L_{AD} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \times \frac{P_S \times Q_S}{60} \times \left\{ \left(\frac{P_D}{P_S} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\}$$

κ : 空気比熱比 C_P/C_V

P_S : 吸込み空気の絶対圧力 [kPa]

Q_S : ブロワ吸込み空気量

P_D : 吐出空気の絶対圧力 [kPa]

② 所要動力 LS[kW]

$$LS = \frac{L_{AD}}{\eta}$$

η : 全断熱効率 [%]

5.1 試算ケース

比較ケースとして、新設の場合と既設更新の場合を考える。
各方式は以下の考え方とする。

新 設 : 新規にメンブレン散気装置を設置する場合

既設更新 : 既設に散気板が設置されており、耐用年数に達していないものとする。
なお散気板は残存価値が 1 年、3 年及び散気板耐用年数の 1/2 にあたる 5 年である場合を想定する。

図 8 に試算手法の全体フローを図 9 に試算結果を示す。

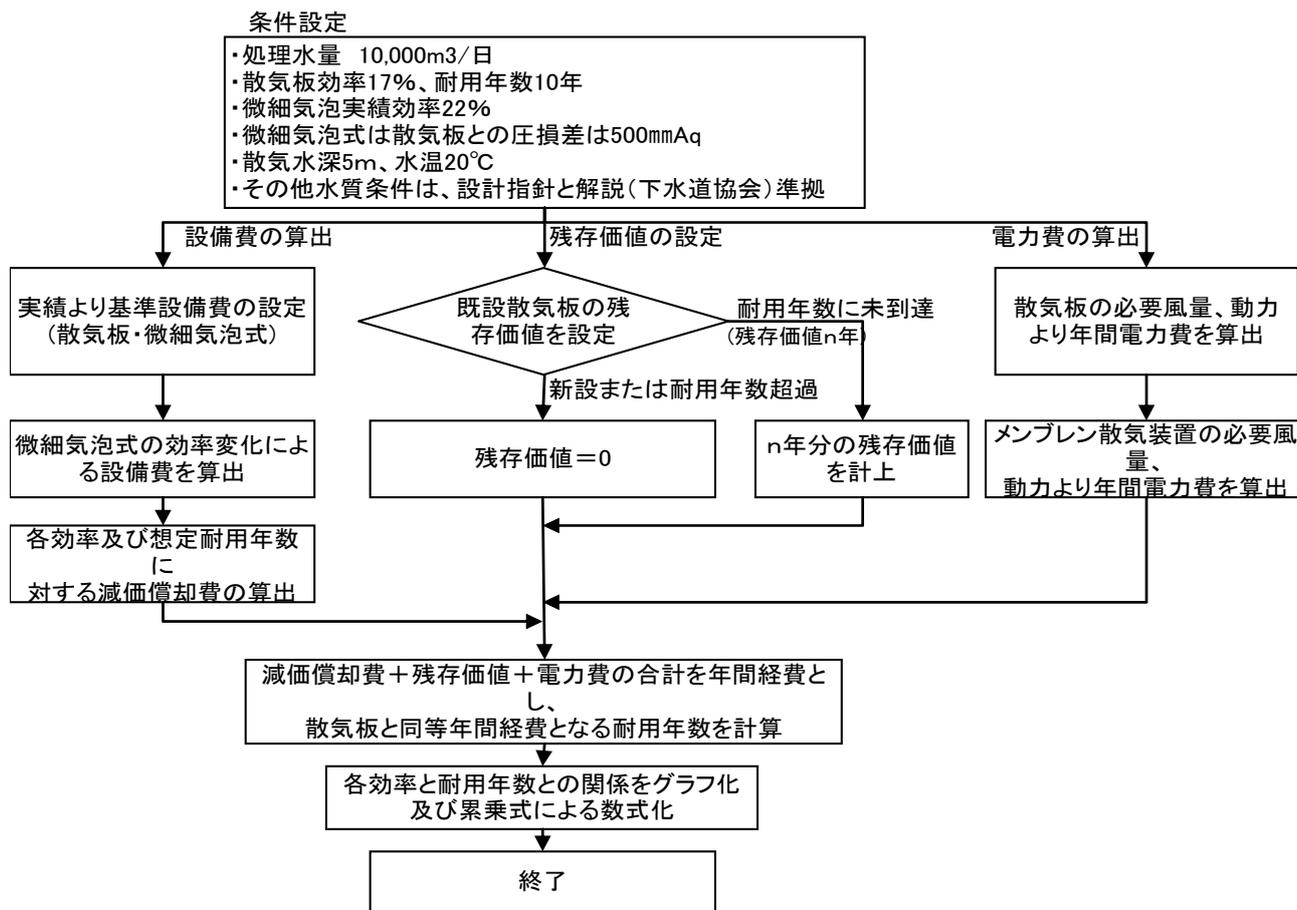


図 8 経済性検討試算フロー

試算結果を図 9 に示す。

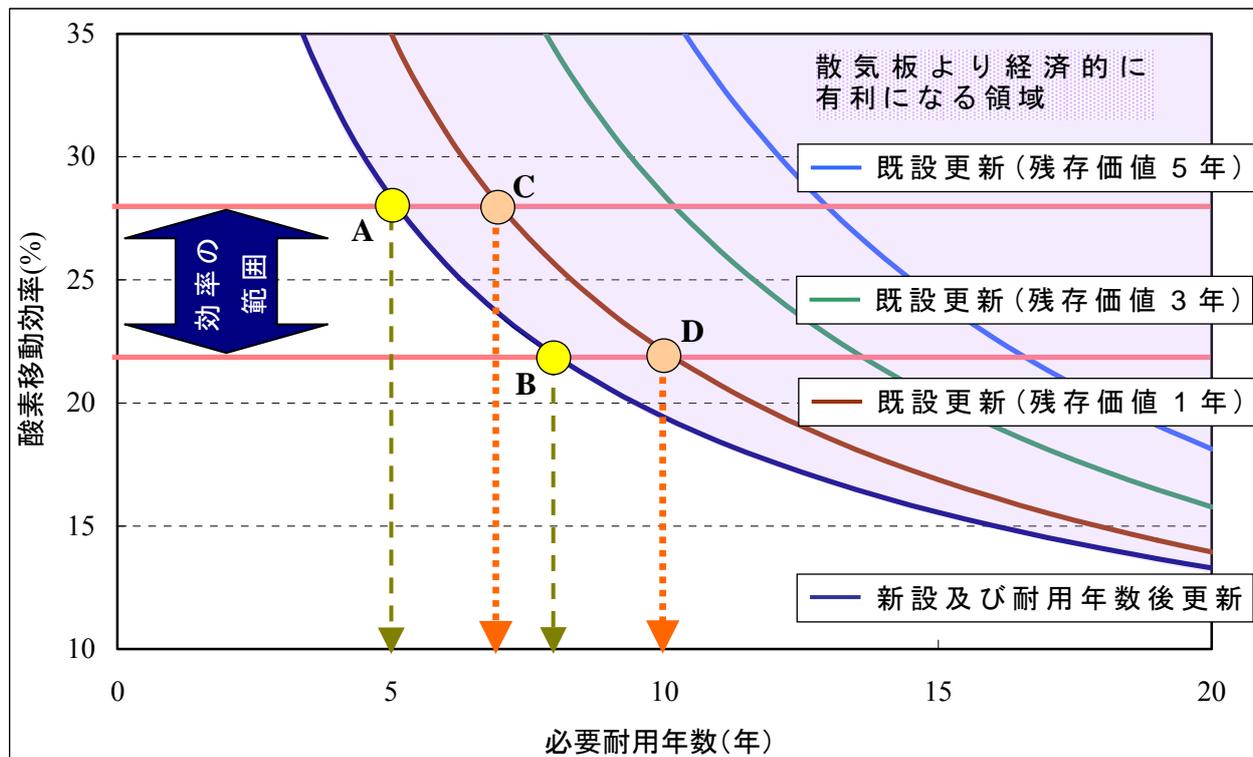


図 9 メンブレン散気装置の経済的効果

図9は散気板と同等のライフサイクルコストとなるために必要な膜分散装置の寿命と酸素移動効率の関係を表し、図中の曲線は左から新設及び耐用年数経過後に更新した場合、耐用年数1年前に更新した場合、耐用年数3年前に更新した場合、耐用年数5年前に更新した場合を表している。

残存期間が長いほど膜分散装置のイニシャルコストに残存価値が上乗せされるので、より長寿命か酸素移動効率が高くないと散気板と同等の経費とならないことが分かる。

図中の二本の横線は、これまでの反応タンク実測値から想定される膜分散装置の実質的な酸素移動効率の範囲を示している。

新設の場合や耐用年数を越えた散気板の更新では、移動効率が28%を確保できれば図中のA点の寿命である5年で散気板のコストと同等となり、それ以上の寿命であればコストメリットを生じることになる。同様に22%の場合には図中のB点である8年程度の寿命が必要となる。

一方、残存価値を残した状態で前倒しの更新を行う場合コストメリットを確保するためには、より長寿命であることが必要となる。例えば、1年の前倒しでは28%の効率であっても7年以上(C点)の、22%であれば10年以上(D点)の寿命が必要となる。

膜分散装置の国内における稼働実績で最長は9年を経過していることや海外での実績から、装置の寿命は8年程度以上であると考えられる。従って、新設か耐用年数後の更新ではコストメリットは確保できる。さらに、移動効率の最低ラインである22%は、主に槽幅が7mと狭い反応タンクの実績値で槽幅が8m以上の反応タンクで設計風量程度の曝気であれば24%程度以上の移動効率は確保可能と考えられるためコストメリットが大きくなる。

ただし、4.1.2にも記述したとおり同じブローに散気板と膜分散装置が繋がっており、しかも散気板の比率が多い場合には、ブローの吐出圧が膜分散装置に合せて高くなるため、既存の散気板の系列の動力が上昇するため膜分散装置の風量削減効果を相殺し反って動力が上昇してしまう場合もある。膜分散装置の導入にあたっては、風量計算に加えて圧力損失の効果も慎重に検討し、計画的な導入が必要である。

6 まとめ

- ・ オフガス法で測定した酸素移動効率の経年変化は、バラつきはあるものの経年的な低下は見られなかった。また空気倍率から推定した移動効率もほぼオフガス法のレベルで低下傾向は認められなかった。
- ・ 圧力損失は送風量により増減するが、送風量で除した圧力損失は一定の範囲内で上昇は認められず、4～5年の使用では顕著な目詰まりや膜の劣化(硬化)は生じていなかった。
- ・ 酸素移動効率と単位面積あたりの通気風量の間には負の相関が認められた。散気装置数の増加は単位面積風量の低減につながり移動効率の上昇に寄与するが、イニシャルコストの上昇を招く。イニシャルと動力のバランスが一番良いポイントを選択して散気装置の枚数を決定する必要がある。

- ・ 9.5 年使用したメンブレン装置の膜強度は引張強度で 2 割程度低下していたが、曝気にかかわる応力は強度の 1/20 程度であり、この段階では使用に問題がない。
- ・ メンブレン散気装置の経済的導入効果の試算では、新設及び耐用年数後更新では酸素移動効率が 22% 程度でも装置寿命が 8 年以上であればコストメリットを生じる結果であった。ただし、この試算は散気板とメンブレン散気装置が混在し共通のブロワーで散記している場合を想定していない。このような場合には、散気板の系列における動力上昇で試算より長い寿命が必要となる。その程度は散気板とメンブレン散気装置の比率によって異なる。

謝辞

本研究は、三機工業株式会社、月島機械株式会社、株式会社 NGK 水環境システムズの多大な協力の下実施した。関係各位に深く感謝する。

< 参考文献 >

- 1),5) 東京都下水道局 施設管理部(1999) 区部処理場 酸素移動効率調査報告書
- 2),3) (財)下水道新技術推進機構(2005) メンブレンパネル式散気装置技術マニュアル, PP6
- 4) 東京都下水道局 計画調整部(2004) 高効率散気装置の開発に関する調査委託報告書, 資料編 2
- 6) (財)下水道新技術推進機構(2005) メンブレンパネル式散気装置技術マニュアル, PP27
- 7) 東京都下水道局 計画調整部(2004) 高効率散気装置の開発に関する調査委託報告書, PP6-57~6-66
- 8) 東京都下水道局 計画調整部(2004) 高効率散気装置の開発に関する調査委託報告書, PP6-40~6-44
- 9) 月島機械株式会社 技術資料
- 10) 三機工業株式会社 技術資料