
膜分離活性汚泥法による排水の高度処理技術 —膜のファウリング対策および高度処理水質について—

Advanced Wastewater Treatment Technology by Membrane-Separation Activated Sludge Process — For Preventing Fouling of Membrane and Securing Excellent Quality of Treated Water—

斉藤 功(Isao Saito) 福田 一美(Kazuyoshi Fukuda) 野間 秀明(Hideaki Noma)

要旨：

排水の高度処理技術である膜分離活性汚泥法は、膜の目詰まり（ファウリング）対策が重要な課題であり、そのための技術的検討および実験プラントでの評価を行った。曝気による膜の洗浄に加え、薬液による逆洗がファウリング防止に有効であることが判明した。しかし、ファウリングがある程度進行した膜に対しては薬液逆洗の効果は低かった。これらの知見をもとに、1日に1回約10minの水逆洗と、1～4週間に1回約10minの薬液逆洗を運転開始当初から行う膜の洗浄方法を確立した。その結果、約20ヶ月にわたってファウリングを防止することが可能となり、高度処理水質が安定して得られた。

Synopsis：

Membrane-separation activated sludge process is one of the advanced wastewater treatment technologies. A serious problem has been arising due to the fouling of the membrane. A pilot plant experiment was carried out to solve this problem. The results of the investigation showed that in addition to the washing of membrane by aeration, back washing by chemicals was effective in preventing the fouling of membrane. But beyond a certain degree of membrane fouling, back washing was no longer effective. To eliminate this fouling of the membrane, we established an appropriate washing method for the membrane, which consists of back washing by water and that by chemicals. The former operation and the latter were carried out, respectively once a day for about 10 min and once per one to four weeks for a 10 min duration from the beginning of the membrane operation. As a result, stabilized operation with no fouling troubles and providing excellent quality of treated water have been attained over a period of more than 20 months.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

膜分離活性汚泥法による排水の高度処理技術 —膜のファウリング対策および高度処理水質について—*

川崎製鉄技報
32 (2000) 4, 318-322

Advanced Wastewater Treatment Technology by Membrane-Separation Activated Sludge Process —For Preventing Fouling of Membrane and Securing Excellent Quality of Treated Water—



斉藤 功

Isao Saito

環境事業部 環境技術
部 主査(主席掛長)



福田 一美

Kazuyoshi Fukuda

環境事業部 環境技術
部 主査(課長)



野間 秀明

Hideaki Noma

環境事業部 環境技術
部 主査(課長)

要旨

排水の高度処理技術である膜分離活性汚泥法は、膜の目詰まり(ファウリング)対策が重要な課題であり、そのための技術的検討および実験プラントでの評価を行った。曝気による膜の洗浄に加え、薬液による逆洗がファウリング防止に有効であることが判明した。しかし、ファウリングがある程度進行した膜に対しては薬液逆洗の効果は低かった。これらの知見をもとに、1日に1回約10minの水逆洗と、1~4週間に1回約10minの薬液逆洗を運転開始当初から行う膜の洗浄方法を確立した。その結果、約20ヶ月にわたってファウリングを防止することが可能となり、高度処理水質が安定して得られた。

Synopsis:

Membrane-separation activated sludge process is one of the advanced wastewater treatment technologies. A serious problem has been arising due to the fouling of the membrane. A pilot plant experiment was carried out to solve this problem. The results of the investigation showed that in addition to the washing of membrane by aeration, back washing by chemicals was effective in preventing the fouling of membrane. But beyond a certain degree of membrane fouling, back washing was no longer effective. To eliminate this fouling of the membrane, we established an appropriate washing method for the membrane, which consists of back washing by water and that by chemicals. The former operation and the latter were carried out, respectively once a day for about 10 min and once per one to four weeks for a 10 min duration from the beginning of the membrane operation. As a result, stabilized operation with no fouling troubles and providing excellent quality of treated water have been attained over a period of more than 20 months.

1 はじめに

当社の水処理エンジニアリング事業は、製鉄所での用排水処理設備の計画、設計、建設、運転、維持管理で培った技術と経験をもとに、1970年代後半から始まった¹⁾。当初は、海外での製鉄所建設にともない設置される水処理プラントの建設・運転指導などを中心に手がけてきたが²⁾、近年では国内の公共事業を中心として事業展開を行っている。

具体的には、公共下水分野では雨水・下水ポンプ場設備に始まり、下水処理場の水処理設備、汚泥処理設備を手がけており、沈砂池、沈殿池、生物反応槽、汚泥濃縮槽などの機械設備を中心として多く

の実績を重ねている。農業集落排水分野では回分法、間欠曝気法など、多数の納入実績がある。その他の分野では、一般廃棄物および産業廃棄物埋立処分場の浸出水処理設備、河川や池の浄化設備などで実績を重ねている³⁾。

河川や池の浄化分野では、浮遊ろ材を使用した生物膜ろ過方式の水処理プロセス「リバーフロート®」の開発を行い、1999年に(財)土木研究センター殿により河川の直接浄化システムとして技術審査証明を取得した⁴⁾。下水の高度処理分野では、包括固定化窒素除去プロセス「ベガサス」を日立プラント建設(株)・日本下水道事業団より技術導入し、また膜分離活性汚泥法の開発を行って⁵⁻⁸⁾ 2000年に建設大臣による尿尿浄化槽一般認定を取得した。本稿では、膜分離活性汚泥法による排水の高度処理、とくに目詰まり防止策およびパイロットプラントを用いた運転結果について報告する。

近年、下水道の普及率は年々向上して1998年度末には58%にま

*平成12年8月2日原稿受付

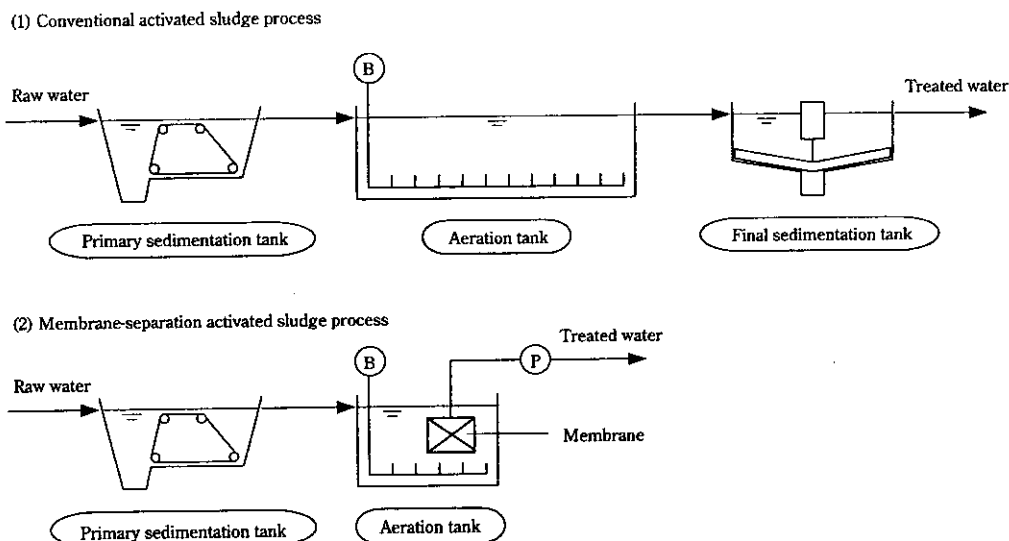


Fig. 1 Process flow diagram

で達したが¹⁰⁾、河川・湖沼・海域における環境基準の達成率は依然として低く、特に閉鎖性水域における富栄養化が問題となっている¹⁰⁾。このような状況下において窒素・リン除去に対応した下水の高度処理化が望まれているが、窒素除去を目的とした循環式硝化脱窒法では標準活性汚泥法の約2倍の生物反応槽容積を必要とし、広大な敷地面積を必要とするという問題がある¹¹⁾。膜分離活性汚泥法は、循環式硝化脱窒法と膜分離法を組み合わせることにより生物反応槽容積を約1/2（すなわち標準活性汚泥法と同程度）にすることができ、さらに最終沈殿池が不要なため省スペース化を実現できる⁷⁾。また、膜分離により高度な処理水質が得られるため、都市中小河川のせせらぎ復活、都市の水需要の増加にともなう下水再利用の必要性に応えることが可能である。

しかし、膜分離活性汚泥法は膜の細孔によりろ過を行っているため、運転にともない膜の目詰まりが進行する。膜の目詰まり対策としてさまざまな方法が試みられているが、その維持管理は非常に複雑となる場合が多い¹²⁻¹⁶⁾。川崎製鉄ではこのような問題点に対して維持管理の容易な膜の目詰まり対策を確立し、長期間にわたり膜のろ過安定性および高度処理水質を得た。

2 膜分離活性汚泥法の概要

2.1 原理

膜分離活性汚泥法は、(1)曝気槽に精密ろ過膜(MF膜)モジュールを浸漬し、(2)吸引ポンプなどにより膜の内側を減圧し、(3)膜ろ過により活性汚泥の固液分離を行って清澄な処理水を得るという排水の処理方法である。Fig. 1に膜分離活性汚泥法および標準活性汚泥法のフローシートを示す。

2.2 特徴

2.2.1 省スペース

膜分離活性汚泥法は、膜ろ過により固液分離を行うために最終沈殿池が不要となる。また、最終沈殿池での重力沈降による固液分離を行わないため、mixed liquor suspended solid (MLSS) 濃度を従来の2~5倍程度まで高めることができ、生物反応槽容積を小さくすることができる。

2.2.2 高度な処理水質

孔径0.1 μ m程度のMF膜により固液分離を行うため、浮遊物質(SS)をほとんど含まない処理水が得られ、その結果生物化学的酸素要求量(BOD)、化学的酸素要求量(COD)、大腸菌群なども高効率で除去できる。滅菌用塩素の使用量を削減でき、SSをほとんど含まないため紫外線滅菌では高い効率を得られる。

2.2.3 窒素・リン除去に有利

窒素除去を目的とした循環式硝化脱窒法では生物反応槽の滞留時間が12~16h必要であるが、膜分離法と組み合わせることにより標準活性汚泥法と同程度の6~8hの滞留時間で窒素を10mg/l以下まで処理できる。既設設備の改造を行う場合は、水槽を増設することなく容易に窒素除去機能を付加できる。

生物反応槽にポリ塩化アルミニウム(PAC)などの凝集剤を添加することで、リンの同時除去を容易に行うことができる。

2.2.4 処理水再利用が容易

処理水はそのまま場内雑用水として利用可能である。また、オゾン処理や活性炭吸着処理を行う場合、砂ろ過などの前処理が不要である。高度な処理水質が得られるため、修景用水(せせらぎ放流、親水公園利用)などへの再利用が容易である。

2.2.5 維持管理が容易

汚泥の沈降性やバルキングの防止を考慮する必要がなく、また汚泥の返送が不要なため、汚泥の管理が容易である。

膜分離活性汚泥法は、従来の生物反応槽、最終沈殿池、凝集沈殿、砂ろ過による処理に相当する水質が単一のシステムで得られるため、運転管理が非常に容易になる。

2.3 膜分離活性汚泥法の課題

膜分離活性汚泥法では膜ろ過により処理水を得るため、運転にともない膜の目詰まり(ファウリング)が避けられないのが現状であり、安定した膜透過流速(フラックス)の維持、膜寿命の延命化などに課題が残っている。ファウリングの進行を抑えるため、膜の下部からの曝気による上昇水流によって膜表面を洗浄する方法、および膜の間欠吸引方法が一般的に採用されている。しかし、これだけではファウリングの進行を完全に抑えることは困難であり、最終的には膜を曝気槽から取り出し、圧力水による洗浄または薬液による浸漬洗浄を行って膜機能を回復させなければならない。だが、この

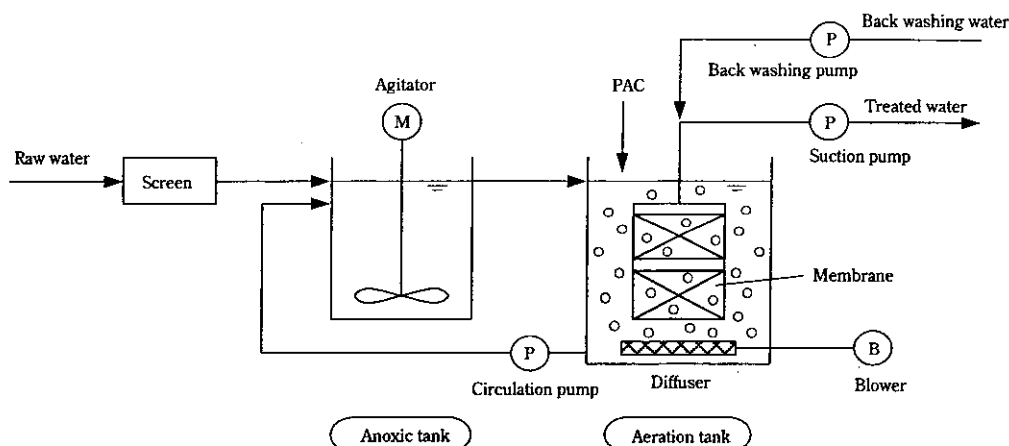


Fig. 2 Process flow diagram of the pilot plant

ような方法では膜の維持管理が非常に複雑となり、特に大規模設備の場合にすべての膜を曝気槽から取り出して洗浄するのは事実上不可能である。

そこで、曝気槽からの膜の取り出しが不要で維持管理の容易なファウリング対策として、膜を曝気槽に浸漬した状態での逆洗による洗浄方法の検討を行った。

3 実験方法

3.1 実験プラント

実験プラントのフローシートダイアグラムを Fig. 2 に示す。実験プラントの原水には当社社宅の生活排水を用いた。生物反応槽は窒素除去を考慮した循環式硝化脱窒法とした。分離膜には孔径 $0.1 \mu\text{m}$ のポリエチレン製中空糸 MF 膜を使用した。膜を曝気槽内に浸漬し、膜の下部に設置した散気装置により槽内の曝気および上昇水流による膜表面の洗浄を行った。膜の二次側を吸引ポンプで吸引して活性汚泥混合液の固液分離を行い、処理水を得た。またリン除去を目的として、硝化槽へ PAC の注入を行った。Table 1 に実験プラントの諸条件を示す。

3.2 膜の逆洗

膜を曝気槽内に浸漬したままの状態で行い、膜のファウリング対策の検討を行った。逆洗は、処理水を得るときとは逆方向に逆洗水をポンプなどにより圧送して膜の内部から外部へ透過させ、膜の細孔および膜表面に付着したファウリング物質を除去するものである。逆洗を行うときには、膜の下部に設置した散気装置による

Table 1 Operation conditions

Item		Condition
Flow rate (m^3/d)		11.5
Hydraulic retention time (h)	Anoxic tank	3
	Aeration tank	4
MLSS concentration (mg/l)	Anoxic tank	4 000
	Aeration tank	5 000
Rate of circulation		4
Membrane surface area (m^2)		48
Membrane operation condition		8 min ON- 2 min OFF
Flux of membrane filtration ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)		0.24
Feeding concentration of PAC ($\text{mg-Al}_2\text{O}_3/\text{l}$)		20

曝気を止めて逆洗を行った。曝気を止めることにより、膜表面へ透過した逆洗水が瞬時に拡散されることなく、膜のファウリング物質に有効に作用する。

逆洗水には、Table 2 に示すように処理水および薬液を用いた。これらの逆洗水は単独で、または各種組み合わせで使用した。

Table 3 に逆洗の種類を示す。Table 2 に示した逆洗水の中で処理水だけを用いて逆洗を行う場合を、水逆洗とした。また、Table 2 に示した処理水および薬液を各種組み合わせで逆洗を行う場合を、薬液逆洗とした。

3.3 逆洗条件

Table 4 に逆洗条件を示す。RUN 1 では、通常時は逆洗を行わずに運転を行い、吸引圧力絶対値が 50 kPa を超えた時点で薬液による逆洗を行った。ここで 50 kPa を基準に用いた理由は、 50 kPa を

Table 2 Composition of back washing water

Back washing water	Concentration	Aim of back washing
Treated water	—	Physical washing
NaOH solution	$0.04 \sim 0.4 \text{ w/v\%}$	Decomposition and removal of organic substance
NaClO solution	Available chlorine $0.05 \sim 0.5 \text{ w/v\%}$	Pasteurization of biological organisms
H_2SO_4 solution	$0.05 \sim 0.5 \text{ w/v\%}$	Decomposition and removal of inorganic substance

Table 3 Modes of back washing

Modes of back washing	Back washing water	Frequency	Cycle time
Back washing by water	Treated water	Once a day	About 10 min
Back washing by chemicals	Chemicals listed in Table 2	Once per one week to four weeks	About 10 min

Table 4 Back washing condition

	Back washing condition	Modes of back washing
Run 1	In case of the absolute value of suction pressure exceeds 50 kPa	Back washing by chemicals
Run 2	Full continual irrespective of suction pressure (since starting operation of membrane)	Back washing by water and chemicals

超えると急激に吸引圧力絶対値が上昇するという傾向が事前の調査により判明していたためである。薬液逆洗の頻度は1週間に1回とし、吸引圧力絶対値が30 kPa以下となるまで継続して行った。RUN 2では、運転開始当初から水洗浄および薬液洗浄を行った。逆洗の頻度は、水逆洗は1日に1回、薬液逆洗は1~4週間に1回とし、吸引圧力とは無関係に継続して逆洗を行った。

4 膜の目詰まり防止

RUN 1における膜の吸引圧力絶対値と平均フラックスの経日変化をFig. 3に示す。運転開始後、ファウリングの進行により吸引圧力絶対値は30日間で約10 kPaの割合で増加し、運転開始から90日間で30 kPa増加し、50 kPaを超えた。90日目以降に薬液逆洗を行った結果、吸引圧力絶対値が約20 kPa減少し、薬液逆洗が膜のファウリングからの回復に効果があることが判明した。しかし、130~180日目の期間で薬液逆洗を行わなかったところ、吸引圧力絶対値が急激に上昇して80 kPaを超え、180日目以降に薬液逆洗を再開したが大きな効果は得られなかった。フラックスも減少傾向となり、膜がファウリングにより閉塞した状態となった。

以上の結果より、以下の知見が得られた。

- (1) 薬液逆洗は、膜のファウリングからの回復に効果がある。
 - (2) あるレベルまで吸引圧力絶対値が上昇し、ファウリングが進行した膜に対しては、薬液逆洗の効果は低い。
 - (3) 薬液逆洗の間隔を広げると、効果は低い。
- これらの知見をもとに、Table 4に示したRUN 2の逆洗条件を設定

し、運転開始当初から逆洗を行ってその効果を検証した。

RUN 2における膜の吸引圧力絶対値と平均フラックスの経日変化をFig. 4に示す。1日1回の水逆洗と、1~4週間に1回の薬液逆洗を行うことにより、Fig. 3と比較して吸引圧力絶対値の上昇を大幅に抑えることができた。約600日間(20ヶ月)にわたって吸引圧力絶対値を40 kPa以下に維持することができ、曝気槽からの膜の取り出しを行うことなくファウリングを防止することができた。

曝気槽内の微生物に対する逆洗薬液の影響については、600日間の運転を通じて現れなかった。計算上では、1回の逆洗で使用した薬液がすべて曝気槽で希釈されたと仮定すると、NaOHは $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ 、 H_2SO_4 は $2.5 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ 、NaClOは有効塩素濃度2.5~25 mg/lとなり、ファウリング物質との反応で消費される量を考慮すると、微生物に対する影響は極わずかであると考えられる。

RUN 2における定期的な逆洗は、水逆洗が1日に1回の頻度で逆洗時間は約10 min、薬液逆洗は1~4週間に1回の頻度で逆洗時間は約10 minであり、短時間で使用薬品量も少なく、膜を曝気槽から取り出す必要のない維持管理の容易な膜の洗浄方法である。

5 処理水質

RUN 2における原水および処理水の水質分析結果をTable 5に示す。SSは原水が平均137 mg/lであったが、処理水は平均0.1 mg/l、最大0.6 mg/lであった。孔径0.1 μm のMF膜により膜ろ過

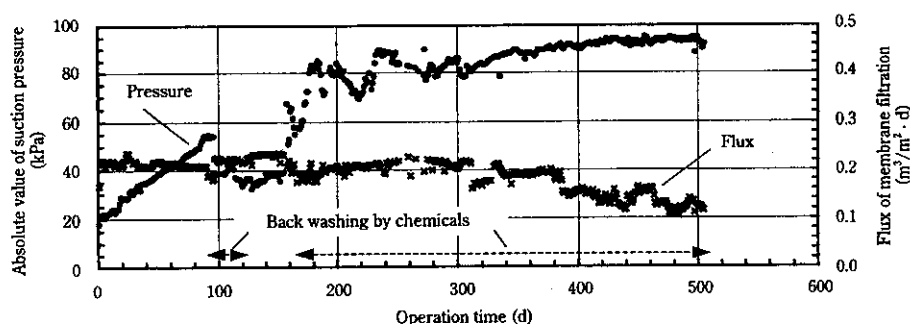


Fig. 3 Variation of pressure and water flux for RUN 1

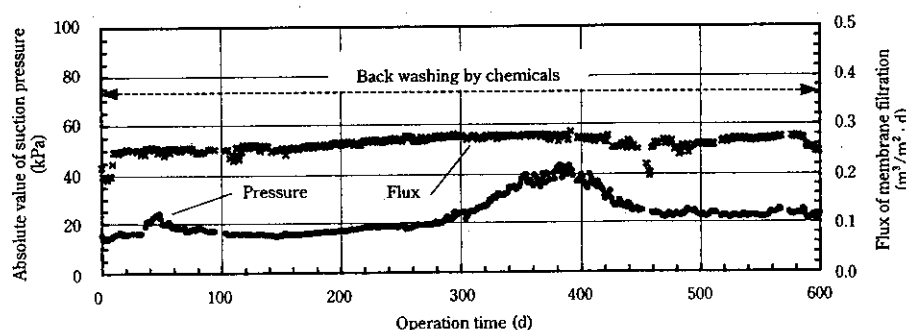


Fig. 4 Variation of pressure and water flux for RUN 2

Table 5 Results of water analysis (mg/l)

Item	Raw water	Treated water
SS	137 (51~450)	0.1 (0.1~0.6)
BOD	255 (176~351)	2.6 (0.2~4.3)
COD	114 (51~176)	6.8 (4.2~9.6)
T-N	44 (29~59)	8.8 (1.7~14)
T-P	6.2 (3.3~9.2)	0.09 (0.01~0.27)

The upper row: average

The lower row: (minimum~maximum)

を行うことによって、SS 1 mg/l 以下の処理水質が達成できた。

BOD は原水が平均 255 mg/l であったが、処理水は平均 2.6 mg/l、最大 4.3 mg/l であった。また、COD は原水が平均 144 mg/l であったが、処理水は平均 6.8 mg/l、最大 9.6 mg/l であった。実験プラントにおける BOD および COD の生物学的処理は良好に行われ、さらに膜ろ過により SS 性の BOD および COD 成分がほとんど除去されたため、BOD 5 mg/l 以下、COD 10 mg/l 以下の処理水質が達成できたといえる。

全窒素 (T-N) は原水が平均 44 mg/l であったが、処理水は平均 8.8 mg/l、最大 14 mg/l であった。膜分離活性汚泥法において MLSS 濃度を 4 000~5 000 mg/l の高濃度にするにより、無酸

素槽滞留時間を 3 h、硝化槽滞留時間を 4 h、生物反応槽滞留時間を標準活性汚泥法と同程度の 7 h とする条件において、T-N を平均で 10 mg/l 以下とすることができた。

全リン (T-P) は原水が平均 6.2 mg/l であったが、処理水は平均 0.09 mg/l、最大 0.27 mg/l であった。膜分離活性汚泥法において凝集剤を添加することにより、T-P 0.5 mg/l 以下の処理水質が達成できた。

このように膜分離活性汚泥法と循環式硝化脱窒法を組み合わせることにより、下水再利用が容易な SS をほとんど含まない高度処理水質が得られた。また、標準活性汚泥法と同程度の滞留時間で富栄養化対策による窒素・リン除去に対応した高度処理水質が得られた。

6 おわりに

- (1) 薬液逆洗は、膜のファウリングからの回復に効果があるが、ファウリングがある程度進行した膜に対しては効果が低い。
- (2) 運転開始当初から定期的に水逆洗および薬液逆洗を行うことにより、約 600 日間 (20 ヶ月) 以上にわたり膜のファウリングを防止することができ、曝気槽から取り出して行う膜の洗浄が不要となり、膜の維持管理が非常に容易なものとなった。
- (3) 膜分離活性汚泥法と循環式硝化脱窒法を組み合わせることにより、生物反応槽滞留時間 7 h の条件において、SS 1 mg/l 以下、BOD 5 mg/l 以下、COD 10 mg/l 以下、T-N 10 mg/l 以下、T-P 0.5 mg/l 以下の高度処理水質が得られた。

参 考 文 献

- 1) 田代雄偉, 岩佐英一, 一宮正俊: 川崎製鉄技報, 27(1995)1, 1-4
- 2) 野間秀明, 宮本康治, 隈崎勝雄: 川崎製鉄技報, 27(1995)1, 47-52
- 3) 山田純夫, 安川 登: 川崎製鉄技報, 32(2000)3, 249-256
- 4) 最新建設技術ガイドブック編集委員会編: 「'99最新建設技術ガイドブック」, (1999), 482-483, [財団法人日本建設情報総合センター]
- 5) 地球を守る環境技術 100 選選定委員会編: 「2000 地球を守る環境技術 100 選 改訂版」, (2000), 208-209, [公害対策技術同友会]
- 6) 濱田康裕, 福田一美, 内野和博: 川崎製鉄技報, 27(1995)1, 53-54
- 7) 内野和博, 福田一美, 斉藤 功: 第 34 回下水道研究発表会講演集, (1997), 575-577
- 8) 内野和博, 福田一美, 斉藤 功: 第 36 回下水道研究発表会講演集, (1999), 622-624
- 9) 建設省都市局下水道部公共下水道課: 下水道協会誌, 36(1999)444, 52-74
- 10) 環境庁編: 「平成 12 年度環境白書総説」, (2000), 244-252, [ぎょうせい]
- 11) 高度処理会議編: 「高度処理設計マニュアル(案)」, (1996), 164-187, [社団法人日本下水道協会]
- 12) 山本 登, 大貫 裕, 綾日出教: 第 29 回下水道研究発表会講演集, (1992), 106-108
- 13) 野村 実, 竹田静雄, 江原康浩, 鬼塚卓也: 第 36 回下水道研究発表会講演集, (1999), 625-627
- 14) 寺本裕宣, 鈴木辰彦, 青井 透: 第 36 回下水道研究発表会講演集, (1999), 631-633
- 15) 小越真佐司, 鈴木 稔: 第 36 回下水道研究発表会講演集, (1999), 634-636
- 16) 碓井次郎, 若山正憲: 第 34 回日本水環境学会年会講演集, (2000), 266