

乳業工場の用水、洗浄、排水処理における膜分離技術

森永エンジニアリング(株) 山田 佑一

乳業工場における膜技術の利用の状況は、多岐にわたっており、最近では新製品の開発手段として利用されることが多く、従来のようにチーズホエーの濃縮といったような一般的かつ大量処理への利用から、機能的食品といった特異な物質の分画や除去を行い、かつ少量多品種の製品を作るために利用されることが多い。ここでは、最近われわれが経験したユーティリティーへの利用について、製造用水、CIP洗浄水のリサイクルさらに排水処理への適応例について紹介する。

1. 製造用水における膜利用

食品の製造用水で純水を使用する場合は、従来はイオン交換法が多く採用されてきたが、「膜+ポリリッシャー」法が運転管理、ランニングコスト、得られる水質の良さから適応されることが多くなっている。用途としては、用水の水質そのものが最重要視されるミネラルウォーター、ウーロン茶、紅茶等の抽出用水などとして利用されている。逆浸透膜使用の目的は、塩類の除去や水質調整のためであり、表1に逆浸透膜の処理例と写真1に逆浸透装置を示した。

抽出用水に対する純水の水質の要求純度は、1~10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (マイクロシーメンス)程度でよく、超純水にする必要はない。純度のほかに一般細菌の数値にも注意が必要である。

純水を使用する仕込み時間は連続ではなく、パッチで要求されることが多く、純水装置もパッチ運転になるため、純度の保持と流量の確保が必要とな

る。

純水の製造コスト(ランニングコスト)は100~200円/ m^3 程度で、200ml程度の製品に対するコスト負担はほとんどネグレクトされる数値(0.02~0.04円)である。

(1)「MO逆浸透装置」の特色

ここで紹介する純水製造装置「MO逆浸透装置」は、各工場に納入してきた新しい純水の製造方法で、逆浸透装置の2段処理方式(ダブルパスRO装置)である。

この逆浸透装置の2段処理方式の主な特徴は、①24時間連続運転ができる。②純度も1~2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を保持できる。③メンテナンスがほとんどかからない等、イオン交換法と比較し優れている。RO膜メーカーの供給水条件であるFI(ファーリングインデックス)値は通常3以下になっているが、実際にFI値3での運転は現実的ではなく、CIP洗浄をかなり頻繁に行うことが要求されフリーメンテナンスでなくなることもあり、逆浸透装置の特徴がなくなってしまう。そのためにはFI値を1前後まで処理する必要があり、MF膜またはUF膜が要求される。MF膜またはUF膜は逆洗洗浄できるタイプを選定している。純水の純度を上げるためには1stRO膜処理水の炭酸ガスを抜かねばならない。炭酸ガスを除去する方法として、一般に脱ガス

塔を使用しているが、最近では脱ガス膜を採用することもある。また、透過水を一定量に保持するために、熱交換器により加温する場合もある。

2. CIP洗浄水のリサイクル

乳業工場における用水の使用量は、製品1に対して5~10倍の水を使用している。したがって1日200トンの牛乳を作る工場では、1,000~2,000トンの大量の水を使用している。使用水のうちの約70%が洗浄水であり、用水量の規制や用水コスト、嫌気処理などの省エネルギー型排水処理の導入を考えると、洗浄水の使用量を削減する事が重要課題となりつつある。

洗浄水の大部分は、CIP設備で使用されており、MF、UF、NF、RO膜を利用する事により、MF膜による最終リンス水の回収やNF膜、RO膜による洗剤の回収などの試みが考えられる。

洗浄水を再利用する事により、ヨーロッパ並みの製品1に対して2~3倍程度の水の使用量にまで減らす事を目標としている。

(1)実証プラントの紹介

現在、CIPに使用した水の一部は、回収され初期洗浄水として再利用されているが、大部分は排水されている。そこで積極的なCIPのリンス水の利用を図るためにCIPラインに電気伝導度計

表1 逆浸透膜処理例

項目	[単位]	RO原水	RO処理水
pH		7.6	6.5
濁度		0.8	<0.5
色度		9	<1
電気伝導率	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	320	65
全硬度	[mg/l , CaCO_3]	2	<1
Ca硬度	[mg/l , CaCO_3]	46	16
全鉄	[mg/l]	0.35	<0.05
全マンガン	[mg/l]	<0.05	<0.05
pH4.8酸消費量	[mg/l , CaCO_3]	110	18
塩化物イオン	[mg/l]	33	9
硫酸イオン	[mg/l]	6	<5
シリカ	[mg/l]	47	17

写真1

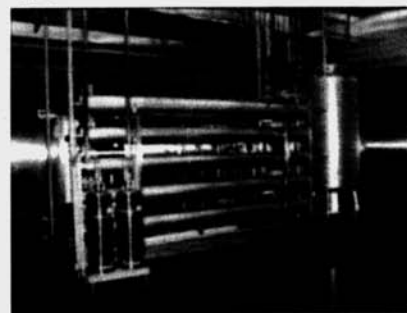
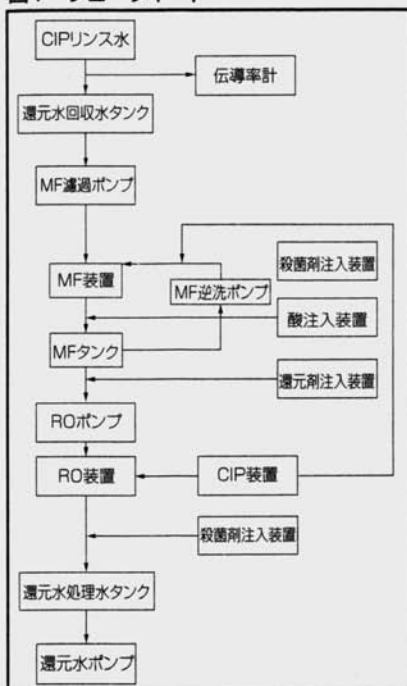


図1 フローチャート



やCOD計を設置し、濃度や成分(特に油分)の時間変化の調査を実施し、データの集積を行なった。その結果、CIPリンス水の水质は比較的不安定な挙動を示すが、ある時間帯の水质は原水並みであることが判明した。

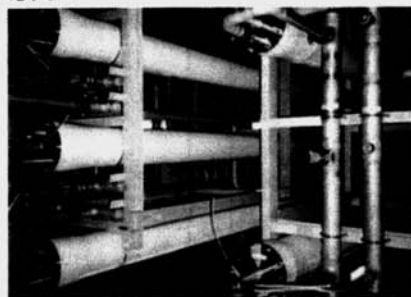
CIPリンス水の特徴は、製品や洗剤の混入にあり、リンス水全体を回収してリサイクルする事は、高度な処理技術と設備コストがかかり、経済性の観点より現実的でない。しかし、ある限られた範囲の水质のリンス水を回収することで処理方法も単純化し、設備コストやランニングコストを適度な数値に下げられる事が明らかとなった。

そこで本プラントにおいては、CIPのリンス水の一部をリサイクルする事とユーティリティ水として利用する事を目的として構成されている。主要なフローシートを図1、装置を写真2に示す。

特定のCIPリンス水のリサイクル方法で、膜技術を利用した前処理と後処理の2ステップシステムである。前処理の膜には洗浄できるMF膜、後処理の膜にはNFまたはRO膜を採用している。

膜処理の特徴としては、①連続処理が可能、②物理的処理のためトラブルが非常に少ない、③除去を目的とした物質は目標どおりに阻止される、④ランニングコストが安価である、⑤設備コストも異常に高価ではない、⑥回収率が高い、⑦2次的な公害問題が発生しない、などが挙げられる。

写真2



実際の運転データの一部を表2に示す。

(2) 今後の課題

実証プラントにおいて2年間に渡りランニングデータを集積しているが、油分による膜のファウリングや、細菌汚染による膜の劣化等の要因を最小限にするための洗浄の条件の調査と長期運転のための膜の寿命についての検証を行なっている。今後は、洗剤の回収等を視野に入れたシステムを導入し、下水道料金の削減、排水処理への負荷の低減、水資源の確保、水质の向上など省資源・省エネルギー化を実現するようにしたい。

3. 膜による乳業排水処理

食品工場等の有機性排水処理システムとして広く採用されている好気性微生物群を用いる活性汚泥法は、最終的に汚泥を自然沈降させて処理水を分離している。このため、基質や季節変動などの環境条件によって活性汚泥の性状が影響を受けやすく、特に管理上問題となる状況としては、汚泥が膨化し沈降しなくなるいわゆるバルキングと称される分離不良を生じる現象があり、高い処理効率を持つものの、運転管理の上で留意点が多い処理方式である。

活性汚泥法の欠点を膜分離技術と組み合わせることで補った処理方式は、①汚泥の沈降性が管理の必要条件にならなくなった。②高汚泥濃度での運転ができ、高負荷にてコンパクトな設備が可能、③運転管理が容易で自動化も可能、④極めて良好な処理水が常時得られる等の特色があり、膜分離活性汚泥処理と称されている。この膜分離方式は表3のように分類される。

(1) 浸漬方式

浸漬型膜分離は、曝気槽に膜モジュールを浸漬して用いる方式で合併浄

表2 多項目水质分析結果

単位	原水	RO処理水
pH	10.1	5.5
電気伝導率 $\mu\text{S}/\text{cm}$	290	20
全硬度 $\text{CaCO}_3\text{-mg/L}$	24	0.1
Ca mg/L	7.0	0.04
Mg mg/L	1.6	<0.01
Na mg/L	48.0	3.3
K mg/L	0.8	0.07
HCO_3 mg/L	—	—
Cl mg/L	4.2	0.1
SO_4 mg/L	11.0	0.7
NO_3 mg/L	35.0	4.9
NO_2 mg/L	<0.03	<0.03
SiO_2 mg/L	6.9	1.1
COD mg/L	1.6	0.3

表3 生物処理と膜を組み合わせた排水処理方式分類

方式	膜形式	膜材質	膜分類
加圧方式	管状膜	有機膜	UF
	平膜	有機膜	UF
	中空糸膜	有機膜	MF、UF
浸漬方式	平膜	有機膜	MF
	中空糸膜	有機膜	MF
	回転平膜	有機膜	UF
	管状膜	セラミック	MF

表4 平膜浸漬膜活性汚泥法乳業工業実施例

水质項目 (単位)	処理成績 (平均)	
	原水	処理水
pH (—)	11.8	7.4
BOD (mg/L)	1210	4
COD (mg/L)	595	20
SS (mg/L)	135	1未満
n-ヘキサン (mg/L)	105	1未満

化槽を中心に研究開発が進められた。膜モジュール下部より通気し上昇するエアバブルにて膜面にせん断力を発生させ、膜表面への汚泥付着を防止する。減圧もしくは重力加圧にてろ過を行うことにより、運転性能、運転管理、洗浄性に優れた膜分離技術として実用化が進められた。

図2に浸漬型排水処理フローを示したが、有機MF膜の中空糸膜とセラミック管状膜は、減圧で吸引ろ過し、回転平膜はUF膜で吸引ろ過、平膜では吸引又は重力ろ過の2方式がある。上記のように排水・用水向の膜利用排水処理技術の開発により、設備コストや運転コストの面でも優位性ある技術として、幅広く採用されるようになってきている。

(2) 浸漬型メンブレンリアクター利用の実例

乳業工場の実施例については表4に処理成績を示す。流入水质はほぼ計画値どおりの値を示しているが、アルカリ洗浄のためpHが平均で11.8と高く、硫酸で中和を行っている。水量は計画通り流入しており、 $1.9\text{kgBOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$

図2 浸漬型排水処理フロー
(吸引型および重力ろ過型処理水の排出方法)

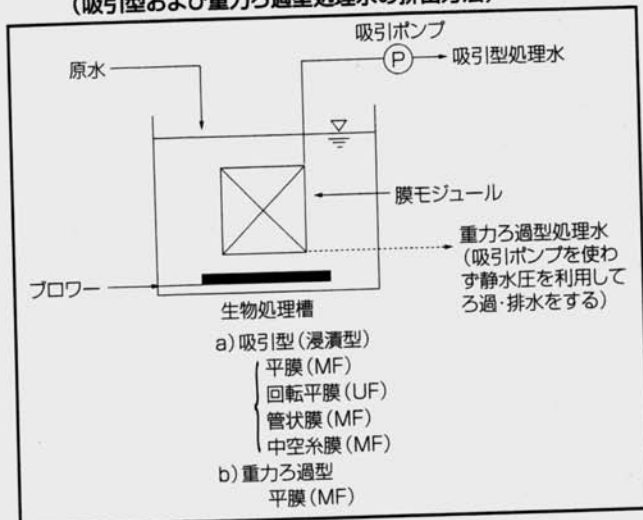
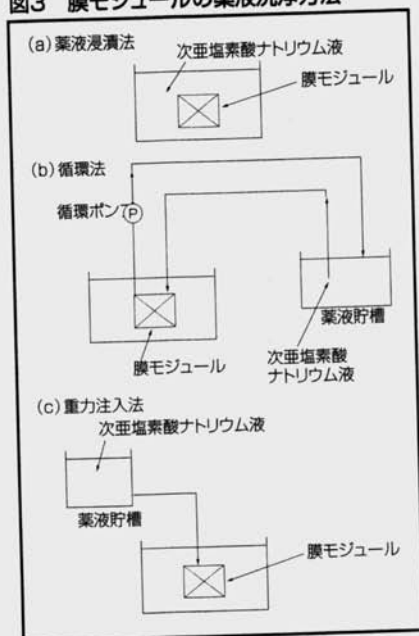


図3 膜モジュールの薬液洗浄方法



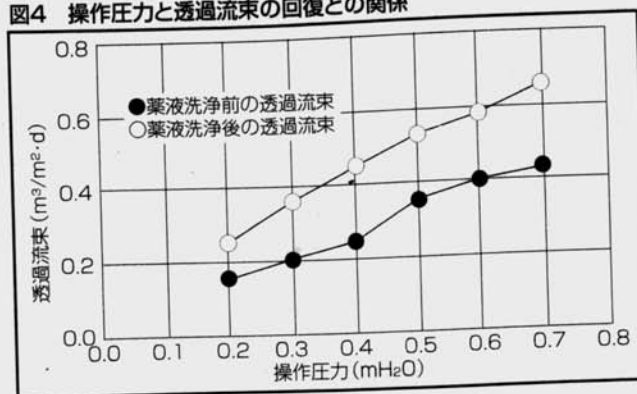
程度のBOD負荷で運転され、MLSSは15,000~20,000mg/L程度で管理されている。処理水はBOD10mg/L以下で良好な処理が行われているが、CODは20mg/Lと高くなっている。これは、コーヒー、紅茶の抽出残渣の流入で生物分解性の低いCOD成分が残存する為である。また大腸菌群数は、5個/mL以下と他の浸漬膜の運転結果と同様膜透過水として低い値であった。

(3) メンブレンバイオリアクター 利用の手引き

① 運転管理方法

浸漬型膜分離活性汚泥処理は、曝気槽中に設置された膜モジュールにて、活性汚泥と処理水とを膜により分離させるため、管理が容易で常時安定した良好な処理水を得ることができる。このため従来の活性汚泥法のように汚

図4 操作圧力と透過流束の回復との関係



泥の沈降性に煩わされることなく容易に管理できる。

ただし、管理上の留意点として①透過流束（ろ過速度）を過剰にしない、②膜透過性能に影響に及ぼす物質（高分子物質、発泡物質、凝集剤、シリコン消泡剤など）の流入を防止する、③活性汚泥の活性低下又は死滅を招く物質の流入を防ぐ、④曝気槽を好気性に保ち汚泥濃度を一定以内に保つなど膜モジュールと活性汚泥の基本的管理事項を注意して守れば極めて容易な運転管理となる。

特に設定水量以上に透過流束を高めることは膜の閉塞を招く大きな原因の一つであり、膜装置の運転を誤らないような装置や計装を考慮すべきであり、これを行えば無人遠隔管理も可能となるシステムである。

② 洗浄

浸漬型膜分離ユニットは、下部より通気することで膜表面への汚泥（有機物）によるファウリングを防止し一定の透過流束を維持している。しかし長期間運転を行うと、膜細孔への有機物や無機物質沈着のため透過流束低下は避けられない。このような場合、処理水量低下や圧力（膜間差圧）が一定以上に増加したことを指標に、定期的に薬品洗浄することで運転性能の確保と膜寿命を長期間保つことができる。

薬剤として、有機物には次亜塩素酸ソーダ、無機物質に対しては蔞酸を用いて、図3(a)~(c)に示した方法で行う。

①薬液浸漬法は膜モジュールを取り出し薬液槽に浸漬して洗浄する方法（図3(a)）、②循環法は膜モジュール

内部に薬液内の薬液をポンプで循環して洗浄する方法（図3(b)）、③重力注入法は膜モジュール内部に薬液貯槽内の薬液を重力で注入し洗浄する方法である（図3(c)）。循環法(b)及び重力注入法(c)は膜モジュールを曝気槽内に設置したまま薬液を注入する方式にて行う。薬液洗浄の実施にて、同一操作圧力で透過流束は50%向上し、透過流束の回復例を図4に示す。

通常運転は自動運転であるが、薬品洗浄については手動操作にて行う場合がほとんどである。洗浄間隔は原水条件、処理状況、運転条件によりかなり異なる。食品工場では1~2ヶ月毎程度に必要な場合もあるが、条件によっては半年~1年に1回程度の洗浄で十分な例も多い。

③ 膜交換

膜を長期間使用すると、薬品洗浄を行っても、一定以上膜性能が回復しなくなり、この場合は膜交換を行うことになる。膜寿命は、運転状態によってかなり左右され、現在までの5年以上交換不要な場合も見られるが、3~5年程度が交換時期と考えられる。

＜引用文献＞

- 1) 大矢晴彦・渡辺敦夫：食品膜技術、p552 (1999)
- 2) 山田佑一・高瀬敏：化学装置No.7、p47 (1989)
- 3) 山田佑一・高瀬敏：ミルク総合事典、山内邦男・横山健吉編（朝倉書店、東京）、p45 (1992)

＜著者略歴＞

山田佑一（やまだ ゆういち）
67年 東北大学工学部化学2学科卒業
同年 森永乳業（株）工務部入社
72年 森永エンジニアリング（株）転籍 環境事業部技術開発部を経てプラント事業部に籍