純水製造における 2 段 RO 法の改良

牛越健一・長尾 衛・松本幹治*

神鋼パンテック株式会社 技術開発本部 ☎ 651-22 神戸市西区室谷 1-1-4

*横浜国立大学 工学部物質工学科 ☎ 240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

Improvement of Double-pass Reverse Osmosis System in the Demineralized Water Production

Kenichi Ushikoshi, Mamoru Nagao and Kanji Matsumoto*

Technical Development Group, Shinko Pantec Co., Ltd.,
1-1-4, Murotani, Nishi-Ku, Kobe, 651-22, Japan

*Department of Material Science and Chemical Engineering, Yokohama
National University,
79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240, Japan

The following results were obtained in the experiments to improve the treated water quality at a combination system with two reverse osmosis systems, called "Double-pass Reverse Osmosis System". (1) The installation of degasifier to reduce CO_2 gas in raw water, gave a remarkable improvement of product water. (2) H_2SO_4 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ were used as the alternates of HCl and NaOH , respectively, to reduce pH value for preventing scaling and to convert CO_2 to HCO_3^- or CO_3^{2-} ion. (3) The electrolyzed cathode water was used instead of injecting alkali reagent such as NaOH for CO_2 conversion, and resulted in the reduction of ion increase, which was expected to improve product water quality.

Key words : Double-pass RO/ultrapure water/electrolysis

1. 緒 言

高圧、中圧用の半透膜を用いた逆浸透装置（以下 RO 装置）を複数段用いることにより、海水のように高い塩類濃度の原水より飲料水、工業用水を得ること、またはかん水や排水より良質の工業用水を得ること等は、いくつかの実施例を見ることができる^{1~3)}。

一方、合成複合膜技術の進展により、低圧で高

脱塩率のものが工業的に使用され得るようになってきた。また電子産業の発展に伴い、高度な水質の超純水が求められ、これらの低圧合成膜を用いた RO 装置を 2 段組み合わせ、今までイオン交換法によりようやく得られた $1.0 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の比抵抗値を持つ純水を、膜法のみで得ることのできる 2 段 RO 法が開発され、多用され始めている^{4~7)}。

RO 装置において海水淡水化のような塩類濃度

の高い原水に対し、近年の合成複合膜はおおむね99.5%以上といった高い脱塩率が得られる。しかし市水レベルの塩類濃度の低い原水に対しては、このような高い脱塩率を得ることはできず、100~200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の原水の場合、実質的には処理水水質は5~10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であることがほとんどである。

この原因の1つとして、半透膜がイオン化したものは除去できるのに対し、 CO_2 のようなガス体の物質はほとんど透過してしまうことによる。そこで逆に、イオン化することにより除去できる原理を利用し、溶液のpHを上げ、炭酸ガスを重炭酸イオンまたは炭酸イオンとして解離させ、逆浸透法で除去することが水質を上げるための1つの方法であり、2段RO法のほとんどがこの方法を取っている。

2段RO法は、G. A. Pittner (Arrowhead社/現US Filter社)により1段目と2段目のROの中間にアルカリ剤を注入する方法(本方式をダブルパスRO法と記す)¹⁰⁾が発表されて以来、急速に超純水、ボイラ給水処理等工業用途に応用が広がっている。

ダブルパスRO法による溶解性炭酸ガスの除去は以下の原理による。すなわちダブルパスRO法では炭酸カルシウム等のスケーリングを防止するため、1段目RO処理に入る前にHCl等の酸が原水に注入される。解離した状態のスケール成分やイオン性物質は1段目ROにより阻止される。1段目ROを透過した炭酸ガスは、1段目ROと2段目ROの間に苛性ソーダ等のアルカリ添加により重炭酸または炭酸イオンとされ、2段目ROにより阻止される。これらの酸またはアルカリの注入により増加したCl, Na等のイオンはRO装置において分離除去される。この方法は1段目ROにより硬度成分が除去されているため、スケーリングに配慮することなく2段目ROの入口pHをアルカリ側に自由に設定することができる^{8, 9)}。

こうしていくつかのボイラ給水装置のイオン交換装置はダブルパスRO法に置き換えられ、また10~18 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の水質が求められる超純

水製造装置においても、RO装置の後に設置されてきた再生型混床塔は、ダブルパスRO装置を用いることにより、現地再生を行わない非再生型のカートリッジポリシャを用いることができるようになってきた^{7, 11)}。しかしながら、後続の非再生型イオン交換装置のイオン負荷をできるだけ低下させるために、ダブルパスRO法の改良による水質の向上がさらに求められている。

そこで本研究ではこのダブルパスRO法により得られる水の水質を向上させるために下記の項目について検討を行った。

1. 脱炭酸ガス塔の設置

原水中に溶存する炭酸ガスは1段目のROをほとんど通過する。このため原水の炭酸ガス濃度が高いと2段目RO入口pHをアルカリに調整する際、多量のアルカリ剤と反応し、入口塩濃度を上昇させ処理水質悪化の原因となる。

そのため酸注入によりpHを下げ、炭酸イオン、重炭酸イオンを炭酸ガスに転換して、充填塔に空気を吹き込む方式の脱炭酸ガス塔にかければ、効果的に炭酸ガスを除去できると考えられる。そこで本論文では脱炭酸ガス塔の設置を検討した。

2. pH調整用薬品種

RO膜による分離操作において、一般的に1価のイオンより2価のイオンの方が水和半径が大きく、RO膜により除去されやすい¹³⁾。そこでHClの代わりに H_2SO_4 を、NaOHの代わりに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いることによりRO装置による除去率が向上することが考えられるのでRO膜により除去しやすい薬品を用いた場合の処理水質への影響を検討した。

3. 電解陰極水によるpH調整

CO_2 ガスを解離させるために、1段目RO装置と2段目RO装置の中間に注入されるNaOHの量は、0.6~4.0 mg/l と微量であるが塩類濃度を増加させる。そこで1段目RO透過水を電気分解し、pHを上昇させた陰極水を得ることによりアルカリ剤を添加することなく、2段目RO装置の原水を得ることを考えた。また同項の方法については装置化した場合の適合性についても検討を行った。

Table 1 Specification of test unit and test conditions for electrolysis.

Item	Specifications & conditions
Name of test unit	Test unit for electrolysis
Type	Batch type with separating membrane
Material of electrodes	SUS304
Membrane area	200 cm ² (2 dm ²)
Voltage	30 volts
Distance between electrodes	0.4 cm
Recirculation water flow rate	610 ml/min.
Sample water	Permeate of 1st RO (5.0~8.0 μS/cm)

2. 実験装置と方法

2.1 実験装置

2.1.1 RO 装置

実験に用いた RO 装置は、3本の4"×40" ポリアミド低圧スパイラル膜 (FilmTec FT-30) が取り付けられており、ステンレス製の加圧ポンプ(流量 35 l/h, 吐出圧力 160mAq) により加圧され透過水が得られる。ダブルパス RO の実験を行うためにこの RO 装置を 2 台用いシリーズに連結して使用した。

また RO 装置の運転とインターロックされ、pH 調節計により薬品注入量をコントロールできるパルス・ダイヤフラム型(最大注入量 20 ml/min) の薬品注入装置を設け pH 調節を行った。また薬品注入装置には各々 50 l の注入槽を設け薬品を所定の濃度に溶解した。

使用した HCl, H₂SO₄, NaOH, Ca(OH)₂ 等の薬品は試薬 1 級のものをを用い、注入槽にて Ca(OH)₂ は 0.2% に、その他の薬品は 1.0~4.0% に溶解し使用に供した。

2.1.2 脱炭酸ガス塔

実験装置として原水の pH を下げ炭酸イオン、重炭酸イオンを炭酸ガスに移行させた後、プラスチック系担体を充填した充填塔にブローにて空気を吹き込み、炭酸ガスをストリップする方法を取った。充填塔の寸法は 194 mmDia. × 2,500 mmH で充填層高は 1,700 mmH である。ブロー

アーは容量 0.65 m³/min, 吐出圧力 200 mmAq の能力を持つものを用いた。

2.1.3 陰極水発生装置

実験装置として隔膜を有するバッチ式実験装置を用いた。Table 1 に実験装置の仕様を、Fig. 2 に実験装置のフローを示す。使用隔膜として下記のものを使用、比較試験を行った。

- a) UF : 限外ろ過膜(分画分子量 20,000, 4 弗化樹脂系膜)
- b) RO : 逆浸透膜(脱塩率 98%, 複合ポリアミド系膜)
- c) MF 1 : 精密ろ過膜(孔径 0.4 μm, 塩素化ポリエチレン系膜)
- d) MF 2 : 精密ろ過膜(孔径 2.5 μm, 塩素化ポリエチレン系膜)
- e) CM : カチオン交換膜(スチレン-DVB 系膜)
- f) BPM : バイポーラ膜(スチレン-DVB 系膜)

隔膜面積は 200 cm², 電極間距離は 0.4 cm, 印加電圧は 30 V, 電極材質は SUS304 である。陽極水, 陰極水, 各々 2 l のタンクを設けている。

2.2 実験方法

2.2.1 脱炭酸ガス塔の設置

Fig. 1 に示すフローによりダブルパス RO 法において脱炭酸ガス塔を設置しない場合と設置した場合について処理水水质に与える影響を検討し

た。

Case a) : (RO+RO) 方式で脱炭酸ガス塔を設置しない場合。

Case b) : (DG+RO+RO) 方式で脱炭酸ガス塔を1段目ROの入口に設置した場合。

Case c) : (RO+DG+RO) 方式で脱炭酸ガス塔を1段目ROの透過水出口に設置した場合。

いずれのケースも、2段目RO入口でNaOHを注入しpHを上げ、残留しているCO₂ガスを重炭酸および炭酸イオンに解離させている。Case b) の場合脱炭酸ガス塔の前でHClを注入しpHを下げ、CO₂を遊離させ除去され易くしている。一方Case c) は、RO透過水pHが低いためHCl注入を行っていない。

RO装置の透過水量、回収率は下記による。

透過水量：1段目 RO 800 l/h 2段目 RO 600 l/h

回収率：1段目 RO 50% 2段目 RO 75%

RW : Raw water

PW : Product water

DG : Degasifier

RO : Reverse osmosis system

Fig. 1 Flow diagram of test units of Double-pass RO System with/without degasifier.

脱炭酸ガス塔の運転条件として通水量は Case b) の場合 800 l/h, Case c) の場合 600 l/h とし、空気吹き込み量はいずれの Case も 0.65 m³/min で行った。

原水として工業用水（地下水）を用いる。工業用水の代表的な水質分析値は Table 3 の Feed water に示す。

2. 2. 2 pH 調整用薬品種

プロセスフローは Fig. 1 Case b) によるものとする。HCl の代わりに H₂SO₄ を、NaOH の代わりに Ca(OH)₂ を用いて pH 調整を行い処理水質を比較する。

原水として市水を用いる。Table 6 の Raw water に市水の分析値例を示す。

2. 2. 3 電解陰極水による pH 調整

2. 1. 3 項に示す実験装置を用い、市水を原水とするダブルパス RO 装置の1段目RO透過水をバッチ処理にて電解を行った。印加電圧は 30 V である。電解に際し各々の電極側でポンプにより 610 ml/min の水量を循環しつつ電解を行い、陰極水の pH が 9.0 となるまでの時間、消費電力等を測定した。陰極水到達 pH を 9.0 としたのは、一般的に2段目RO入口pHを7.5~9.0に設定した時、処理水水質が最良となる経験上の値に基づいている。

実験に用いた1段目RO透過水質をTable 6 の 1st RO outlet (Sample) に示す。

3. 結果と考察

3. 1 脱炭酸ガス塔の設置

Table 2 に脱炭酸ガス塔を設置した場合の実験結果を示す。この表より明らかなように、Case

Table 2 Water quality data of Double-pass RO System with/without degasifier.

Item	a) RO+RO	b) DG+RO+RO	c) RO+DG+RO
Max. resistivity at 2nd RO outlet (MΩ·cm)	0.94	1.78	1.81
Injection rate of NaOH (mg/l)	4.0	0.6~1.4	0.6~1.4

DG : Degasifier

RO : Reverse osmosis system

Raw water : Industrial water (well water) Conductivity 370~436 μS/cm

Table 3 Analytical data of Double-pass RO System.

Item	Unit	Feed water	1st RO outlet	2nd RO inlet	2nd RO outlet	SP (%) 1st out /feed	SP (%) 2nd out /in	SP (%) 2nd out /feed	SP (%) 2nd out /feed
Ca		79.3	0.0120	0.0120	0.00240	0.02	20.00	0.003	99.997
Mg	mg/l	26.3	0.0038	0.0038	0.00025	0.01	6.58	0.001	99.999
Na	as	52.6	2.0000	5.7500	0.24000	3.85	4.17	0.464	99.538
K	CaCO ₃	0.8	0.0035	0.0035	0.00038	0.44	10.86	0.048	99.953
TC		158.4	2.0193	5.7693	0.24303	1.27	4.21	0.153	99.847
HCO ₃		47.6	0.8003	4.5503	0.22003	1.68	4.84	0.463	99.537
Cl		45.6	0.4400	0.4400	0.00640	0.96	1.45	0.014	99.986
SO ₄		48.9	0.0590	0.0590	0.01000	0.12	16.95	0.020	99.980
NO ₃	mg/l	16.3	0.7200	0.7200	0.00610	4.42	0.85	0.037	99.963
TAI	as	158.4	2.0193	5.7693	0.24303	1.27	4.17	0.145	99.845
SiO ₂	CaCO ₃	10.8	0.3100	0.3100	0.01200	2.87	3.87	0.111	99.889
CO ₂		2.8	1.5000	0.3003	0.20000				
TA		172	3.8293	6.3796	0.45503				
pH	—	7.59	6.08	7.51	6.17				
Cond.	μS/cm	340	4.8	13.1	0.4				

Note : 1) Abbreviations

SP Salt passage

SR Salt rejection

TC Total cation

TAI Total anion for ion balance

TA Total anion

Cond. Conductivity

2) HCO₃ values are calculated from ion balance.3) CO₂ values are calculated from data of HCO₃ and pH.

4) Resistivity at 2nd RO outlet is 1.7 MΩ·cm by local instrument.

5) Raw water source Industrial water (well water).

a) の脱炭酸ガス塔を設置しない場合は、処理水比抵抗値は他の設置した場合に比べて低い。中間における NaOH 注入率も 4.0 mg/l と、設置した場合に比べて高く、CO₂ ガスを中和するために、より多くの NaOH の注入が必要であり、処理水質に影響を与えていることがわかる。

一方脱炭酸ガス塔を 1 段目 RO の入口に設置した Case b) の場合、比抵抗値は 1.78 MΩ·cm と設置しない場合に比べて高く、NaOH の注入率も 0.6~1.4 mg/l と低く、脱炭酸ガス塔の設置による CO₂ の除去効果が大いことを示している。

また脱炭酸ガス塔を 1 段目 RO の出口に設置した Case c) の場合、比抵抗値は 1.81 MΩ·cm と高くかつ NaOH 注入量も 0.6~1.4 mg/l と低い。

このように脱炭酸ガス塔の設置による CO₂ の除去は、NaOH の注入率を低下させ、処理水質を向上させる効果があることがわかる。また脱炭酸ガス塔の設置位置については、Case b), c) 共に NaOH の注入率は変化なく、比抵抗値もほとんど差のないことがわかる。実装置においては、2 段の RO を 1 台のポンプで加圧する場合、1 段目出口に脱炭酸ガス塔を設置することによる、吹込空気による処理水汚染等を配慮して Case b) の方式を用いることとする。

次に Case b) の方式により処理した場合の水質分析結果を Table 3 に示す。この場合、電気伝導度 340 μS/cm の原水をダブルパス RO 法により処理することにより 0.4 μS/cm (1.7 MΩ·cm) の水質が得られており、各々のイオンも 99.5~99.9% 以上除去されている。

Table 4 Water quality data of Double-pass RO System with HCl/H₂SO₄ injection.

Item	HCl	H ₂ SO ₄
Max. resistivity at 2nd RO outlet (MΩ·cm)	3.86	3.52
pH at DG inlet	5.01	5.07
pH at DG outlet (1st RO inlet)	6.02	6.10
Chemical injection rate (mg/l)	4.9	7.6

Raw water : City water

Conductivity : 153.0 μS/cm

NaOH injection rate : 2.7 mg/l (at pH 7.5)

Ca(OH)₂ injection rate : 2.4 mg/l (at pH 7.5)

Raw water : Industrial water (well water), 352 μS/cm

Fig. 3 Dependency of product water resistivity for the change of 2nd RO inlet pH with NaOH and Ca(OH)₂ injection.

また2段目RO入口の水質分析値より、2段目RO装置の回収率を75%としていることより、2段目RO濃縮水出口水質を同入口水質の4倍に濃縮されているものと考え、炭酸カルシウムの飽和指数を計算するとpH 11となり濃縮水pHが11となってもスケールを発生することはないことがいえる。経験的に濃縮水pHは入口pH+0.5程度と考えられるため、この実験で2段目

Fig. 2 Flow diagram of test unit for electrolysis.

ROに炭酸カルシウムのスケールが発生することはないと考えられる。

3.2 pH調整用薬品種

3.2.1 酸注入

1段目RO入口に設置した脱炭酸ガス塔の前に、HClまたはH₂SO₄を注入した場合のデータをTable 4に示す。HClを注入した場合、原市水にHClを4.9 mg/l注入し、pHが5.01となった原水を脱炭酸ガス塔にかけpH 6.02としROに供給し、処理水比抵抗値として3.86 MΩ·cmを得ている。

H₂SO₄を用いた場合、原市水に7.6 mg/l注入しpH 5.07とした後脱炭酸ガス塔に通水し、pH 6.10となった原水をRO入口水とし、処理水水質として3.52 MΩ·cmを得ている。

この結果においては、HClの方がわずかに良い水質が得られているが、実際は比抵抗値の測定

Table 5 Test results of electrolysis for changing separating membranes.

Name of membrane	Conductivity of sample water ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Current density (mA/dm^2)	Time for reaching to pH 9 (min.)	Sum of energy consumption up to pH 9 (Wh)
UF	5.3~5.7	21	34	0.71
RO	6.5	28	31	0.87
MF 1	7.6	66~75	10~12	0.80
MF 2	7.6	66~73	12~13	0.89
CM	7.0~7.6	75	53	4.0
BPM	7.0~7.6	30~35	>40	0.43

値が $0.5 \sim 1.0 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 程度ばらつくことがあるため、両者に差はほとんどないと見なすことができる。

3. 2. 2 アルカリ注入

1 段目 RO 出口に注入するアルカリ剤として、NaOH を注入した場合と、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を注入した場合の処理水質に与える影響について Fig. 3 に示す。

NaOH を注入した場合も $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を注入した場合も注入後の pH 7.5 で処理水質は最高となり、各々 $1.6 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ および $1.5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ である。またこの時の注入量は各々 $2.7 \text{ mg}/\text{l}$ 、 $2.4 \text{ mg}/\text{l}$ で当量的には ほぼ等しい注入量となっている。

これらの結果から NaOH を注入しても、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を注入しても、処理水質はあまり影響を受けないことが判明した。

3. 3 電解陰極水による pH 調整

3. 3. 1 電解隔膜の選定

Table 5 に各種の隔膜を用いて電解を行い陰極水の pH を 9.0 に上げた時のデータを示す。

このデータより下記のことが判明した。

- ・電流密度は MF 1, MF 2 および CM が高く、UF, RO および BPM は低い。
- ・pH 9.0 に到達する時間は MF 1 および MF 2 が早く、UF, RO は中程度で CM および BPM は遅い。
- ・pH 9.0 に到達するまでの消費電力は BPM が低く、MF 1, MF 2, UF および RO は中

間で CM は非常に大きい。

MF 1, MF 2 が他の膜に比べて電流密度が高く、pH 9.0 に到達する時間の短いことは、電流の流れが水イオンの移動の容易さにも関わっていることを示唆している。実装置に用いるには MF 1 または MF 2 が好ましいことがわかった。

3. 3. 2 水質分析データ

Table 6 に市水を原水とし、ダブルパス RO 装置の 1 段目 RO 透過水をサンプル水として電解した場合の水質分析値を示す。電解は隔膜として MF 1 (孔径 $0.4 \mu\text{m}$ 精密ろ過膜) を用い、前述項 2. 2. 3 に示す条件により行った。

表からわかるように、電解により Ca, Mg, Na 等のカチオンはサンプル水より陰極水 (Cathode water) 側に移動し、一方 Cl , SO_4 , NO_3 等のアニオンは陽極水 (Anode water) 側に移動し陰極水は pH が上昇し、陽極水は pH が低下している。こうして陰極水の全カチオン (TC) は、サンプル水 $2,416.5 \mu\text{g}/\text{l}$ に対して $3,784.2 \text{ mg}/\text{l}$ となっているが、サンプル水に NaOH を注入して pH を上げた場合の全カチオンは $8,367.9 \mu\text{g}/\text{l}$ であり、陰極水は $1/2$ 以下の全カチオン濃度となっておりイオン量の増加が少ない。また全アニオン (TA) は、NaOH を添加したものが $9,063 \mu\text{g}/\text{l}$ に対し陰極水は $7,395 \mu\text{g}/\text{l}$ となっており、全アニオンも陰極水の方が低い値となっている。

このような傾向は電気伝導度の値をみても、NaOH を注入し pH 調整したものが $15.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ であるのに対し、陰極水は $10.7 \mu\text{S}/\text{cm}$ でありイオン量が少ないことを示唆している。

Table 6 Analytical data of the inlet water for 2nd RO unit after NaOH injection and electrolysis.

Item	Unit	Raw water (City water)	1st RO outlet (Sample)	1st RO outlet pH adjusted by NaOH injection	1st RO outlet electrolyzed cathode water	1st RO outlet electrolyzed anode water
Ca	$\mu\text{g/l}$	10,850	64.5	64.5	79.8	52.5
Mg	as	6,437	19.4	19.4	20.2	10.5
Na	CaCO_3	24,416	2,332.6	8,284	3,684.2	972.3
TC		41,703	2,416.5	8,369.9	3,784.2	1,035.3
HCO_3		21,700	2,000	5,880	5,685	0
CO_3		0	0	120	115	0
Cl		15,087	826	826	253.8	1,762.5
SO_4	$\mu\text{g/l}$	22,880	20.8	20.8	10.4	114.4
NO_3	as	3,434	972	972	170.1	1,863.0
TAI	CaCO_3	63,101	3,818.8	7,818.8	6,234.3	3,739.9
SiO_2		6,655	1,244.2	1,244.2	1,160.7	1,244.2
CO_2		7,718	3,632	0	0	
TA		77,474	8,695	9,063	7,395	4,984.1
Fe		10.2	0.076	0.076	5.09	4.85
Mn	$\mu\text{g/l}$	<1	<0.02	<0.02	0.122	0.205
Al		21.0	0.014	0.014	2.98	1.28
pH	—	6.8	6.1	8.7	8.6	4.4
Cond	$\mu\text{S/cm}$	137	7.5	15.1	10.7	21.4

RW : Raw water EL : Electrolyzer
 PW : Product water RO : Reverse osmosis system
 DG : Degasifier

Fig. 4 Flow diagram of test unit of Double-pass RO System with electrolyzer.

これらの結果より、アルカリ剤を注入して pH を上げるのではなく、電解法により陰極水を生成させ pH 調整をすることが、2 段目 RO 入口においてイオン量の増加を押さえ、処理水質の向上に寄与することがわかる。

3. 3. 3 陰極水生成比率

電解法による pH 調整法をプロセスに組み込ん

だ場合のフローは Fig. 4 のようになる。ここで陰極水を生成させる時には、同時に陽極水も発生する。この時陽極水の生成比率を押さえ、陰極水の生成比率を大きくとることが、1 段目 RO 透過水量を減らすことに結びつき、システム設計上好ましいと考えられる。そこで陰極水生成比率を上げることによる諸影響について検討した。

Fig. 5 に陰極水生成比率 ($Q^-/(Q^-+Q^+_{11})$) と pH 9.0 到達時間、電流密度の関係について示す。これより陰極水生成比率を 1.0 とした場合、同比率が 0.5 の時の電流密度は 1.2 倍に増加し、かつ pH 9.0 到達時間は 2.3 倍に延びることがわかる。この結果を用いて次項の膜面積の計算を行い比較検討する。

3. 3. 4 膜面積の計算

本実験により得られた値により実際の装置規模を仮定し、必要膜（電極）面積がどれほどのものとなるかの試算を行った。

$Q^- / (Q^- + Q_1^+)$
 Q^- : Cathode water product flow rate
 Q_1^+ : Anode water product flow rate
Fig. 5 Dependency of time reaching to pH 9 and current density for the ratio of cathode water.

ここで実装置として 2 段目 RO 入口流量 10 m³/h のダブルパス RO 装置を考える。電解法により OH⁻ を 1.0 eq/h 製造することにより pH 9.0 とすることができる水質とすると (NaOH を 4.0 mg/l 注入すると仮定), 次式により膜面積を求めることができる¹²⁾。

$$Q_i = k \cdot \frac{V \cdot S \cdot t}{(\rho_w \cdot d + R_m + R_i)}$$

Q_i : 電解により生成される成分 i (OH⁻) の量 [eq] k : 比例定数 V : 印加電圧 [V]
 S : 電極の表面積 (= 膜面積) [cm²] t : 電解時間 [h] ρ_w : 水の電気抵抗率 [MΩ·cm] d : 電極間距離 [cm] R_m : 隔膜の電気抵抗 [MΩ·cm²] R_i : 成分 i の生成反応の起こし易さを表す電極素材に関連した尺度 [MΩ·cm²]

この式に実験によつて得られた諸値を代入して膜面積を求めると,

$$\begin{aligned}
 S &= 42.9 \text{ m}^2 \text{ (陰極水生成比率 0.5 の場合)} \\
 &= 96.5 \text{ m}^2 \text{ (陰極水生成比率 0.95 の場合)}
 \end{aligned}$$

となる。こうして陰極水生成比率を上げることで、1 段目 RO の必要透過水量は、同比率が 0.5 の時の 20 m³/h に対し、同比率を 0.95 とすることにより 1 段目透過水量は 10.5 m³/h でよいことになる。

また膜面積は、印加電圧、電極間距離等の最適化によりさらに小さなものとして行うことができる。こうして陰極水製造の方法として、膜 (電極) 面積の低減、電流効率の向上等の検討をさらに加えていくことにより、効率的な方法として実用化できると考えられる。

5. 結 言

ダブルパス RO 法における処理水質向上のためのいくつかの方法を検討した。

(1) 脱炭酸ガス塔の設置は、炭酸ガスのストリップングにより、pH を上げて炭酸ガスをイオン化するためのアルカリ剤注入量を減少させ、処理水質向上に大きな効果があった。

(2) 炭酸カルシウムのスケーリングを防止するために注入する酸として HCl および H₂SO₄ を、炭酸ガスをイオン化するために注入するアルカリとして NaOH および Ca(OH)₂ を注入し、処理水質への影響を調べたが、実質的な差は認められなかった。

(3) 炭酸ガスをイオン化するためにアルカリ剤を注入する代わりに、電解により生成する pH の高い陰極水を用いる方法は、原水のイオンの増加を押さえ、処理水質の向上に役立つものと考えられる。

これらの結果のうち、脱炭酸ガス塔を設置する方法は実装置化は容易である。また陰極水を用いる方法は処理水質の向上のみならず、ハンドリングに注意を要する苛性ソーダのような薬品を必要としなくなることもあり、今後さらに検討され実用化されることが期待される。

文 献

- 1) 山本和良, 斉藤正男: 産業機械, (Sep. 1984) 8-11
- 2) 佐藤常夫, 竹下雅宣: 火力原子力発電, **40** (11) (Nov. 1989) 69-75
- 3) 森川洋, 光上義道, 牛越健一: 火力原子力発電, **39** (2) (Feb. 1988) 41-43
- 4) Vida Allen, Nathan J. Silvestri, Michael Fenton: Ultrapure Water, (Apr. 1995) 22-29
- 5) 牛越健一, 山田章: 工業用水, (376) (Jan. 1990) 37-41
- 6) 池上理一: 電子材料, 1990 年別冊, 130-135
- 7) 古市光春, 矢部江一: 環境衛生工学研究, **6** (3) (1992) 160-165
- 8) Arrowhead Industrial Water Inc. 技術資料
- 9) G. A. Pittner, R. R. Levander, J. F. Bossler: *Ultrapure Water*, **3** (5) (1986) 23-27
- 10) 米国 Patent No. 4, 574, 049
- 11) 宝月章彦, 牛越健一: 電子材料, 1989 年別冊, 118-124
- 12) 綿拔邦彦, 久保田昌治監修: 「新しい水の科学と利用技術」, サイエンスフォーラム (1992) 201
- 13) 大矢晴彦編著: 「逆浸透法・限外濾過法 I 理論, 膜利用技術ハンドブック」, 幸書房 (1971) 24-38
(受付 1997 年 2 月 12 日 掲載決定 4 月 3 日)

—学会だより—

第 15 回関西界面科学セミナー

—コロイド・界面科学の基礎と最新の応用—

主 催: 日本化学会コロイドおよび界面化学部会関西支部・コロイド懇親会

協 賛: 応用物理学会・日本膜学会他

日 時: 7 月 31 日(木) 13 時～ 8 月 1 日(金) 12 時

会 場: パナヒルズ大阪 〒 565 大阪府吹田市青葉丘南 10-1 TEL 06-877-0111
FAX 06-877-0504

第 1 日 (7 月 31 日) 13 時から

1. 両親媒性多糖の構造と機能 (京都大化研 宮本武明) / 2. 電子線結晶学による膜蛋白質の脂質二重膜内での構造 (京都大理生物物理 光岡 薫) / 3. ポリマーバッテリー, 高性能電池設計のための電極/電解質界面反応制御 (松下電産(株)中研究 外郎 正) / 4. 超濃厚系における単分散粒子の合成とサイズ形態制御 (東北大素材工学研 杉本忠夫)

第 2 日 (8 月 1 日) 9 時から

5. 分子レベルから眺めたポリエチレンの結晶化機構とラメラ表面構造 (大阪大院理学研究科 田代孝二) / 6. TiO_2 光触媒薄膜の高構成化 (日本板硝子テクノロジーサーチ(株) 多田弘明) / 7. 耐火被覆用塗料 (被熱発泡型) の話題 (エスケー化研(株) 元木英夫)

参加費: (宿泊・食事・懇親会費・講演要旨集代を含む): 主催・協賛学協会会員 26,000 円, 学校・官公庁会員 16,000 円, 学生 12,000 円, 非会員 35,000 円

参加申込締切: 6 月末日 (定員 (70 名) になり次第締切)

参加申込方法: 葉書に①氏名, ②所属, ③住所 (連絡先・郵便番号), ④電話, FAX 番号, ⑤会員種別, 等を明記のうえ下記宛にお申し込み下さい。後日請求書 (会場案内添付) を送付致しますので折り返し郵便振替にてご送金下さい。

申込先: ☎ 572 大阪府寝屋川市初町 18-8

大阪電気通信大学工学部 日本化学会コロイドおよび界面化学部会 関西支部
室谷正彰 (TEL/FAX (0720) 25-4691, TEL (0720) 24-1131, 内線 2414)