膜法淡水化技術の現状*

山 辺 武 郎**

1. はじめに
2. 世界および日本における膜法淡水化プラント
3. 日本における電気透析法の開発
4. 電気透析法と逆浸透法との比較
5. 電気透析法
6. 逆浸透法
7. おわりに

1. はじめに

淡水化に用いられております膜法としましては、電気透析法と逆浸透法があります。

電気透析法といいますのは、透析法、すなわち膜をイオンあるいは溶質を透過させる方法の一種でございまして、駆動力として電位差をもってきて、イオンを透過させる方法です。それから逆浸透法は、浸透法、すなわち膜を、溶媒を透過させる方法の一種でございまして、駆動力には圧力差を用いて、淡水化の場合には水を透過させるという方法でございまして。

本日は、膜法淡水化の現状に付いて、お話をいたしますが、両方法はいずれもアメリカ合衆国で発明されたものですが、逆浸透法は、ほとんどアメリカで開発した技術であるのに比べて、電気透析法はほとんど日本で開発した技術である、というのが対照的でございます。従って、逆浸透法の国内開発がいろんな制約を受けているのではないかと、いう懸念を持っています。以上のことから本日は、まず世界及び日本における両方法の現状について説明しました後、主として、電気透析法の日本における開発経路を、私どもの研究をも含めてお話し、それと両方法の比較、さらに電気透析法と逆浸透法について、時間が有れば少しくわしくお話しをしたいと思っています。

本論に入る前に、術語に付いて、これは多分に私の見解でございしますが、述べさせていただきます。塩水とい

う言葉を使いますが、広い意味では saline water, 狭い意味では brackish water, という意味でお話ししたいと思います。

WHO (国際保健機構) では、飲用に供する上限の塩分濃度を 500 ppm としております。したがって、広い意味の塩水は、塩分濃度が 500 ppm 以上の水であります。従って、鹹水を含めた海水と、狭義の塩水を含んでおります。狭い意味での塩水、すなわち狭義の塩水は海水よりも希薄で、500ppm 以上の塩分濃度の水を示しております。それから、鹹水 (ブライン) というのは、法律で塩分 4% 以上の塩水をいいます。ところで最近、狭い意味の塩水を鹹水とっておられる場合がありますが、ここではそれを申しません。一般に塩水といえば、狭い意味の塩水を申します。それから淡水 (fresh water) というのは、上にならいまして、塩分濃度 500 ppm 以下の水をいいます。それから、淡水化といいますのは、海水、塩水から淡水を得ることを申します。それから脱塩、これは deionization と demineralization と二つありますが、水から塩分を除くことであります。したがって、淡水化は脱塩に含まれてまいります。しかし、広義の塩水を用いる場合は、脱塩と淡水化が同じ意味に用いることが多いわけです。

2. 世界および日本における膜法淡水化プラント

2.1 世界の膜法淡水化プラント

次に世界の膜法淡水化プラントについてお話しいたします。

表 1 に上げましたのは、世界の膜法淡水化プラントを、1 日 100 m³ 以上のプラントの数と、能力で示しました。プラントの数は、逆浸透法が 268 で、これが圧倒的に多くて、能力も 170000 m³/日と多くなっております。電気透析法は、プラント数が 75、能力約 100000 m³/日となっております。これらのプラントは、ほとんど塩水を使っております。電気透析法では 1 基平均が 1300 m³/日くらい、逆浸透法だと 1 基平均が 700 m³/日、逆浸透法の方が一般に小型でございまして。逆浸透法については、未だ試験的に設置されているのが多いものですから、しばし

* 日本膜学会創立総会特別講演 (昭和52年12月17日 (土) 於 東京大学工学部)。

** Takeo Yamabe: 神奈川大学工学部

Table 1 世界の膜法淡水化プラント (100m³/日 以上)

プロセス名	プラント数	能力 [×10 ³ .r ³ /日]
電気透析法	75	98
逆浸透法	268	170
電気透析—逆浸透法	27	23
合計	370*	291**

* 比較のため蒸発法について述べると多段フラッシュ法285, 多重効用法254, その他125, 計664である.

** 比較のため蒸発法について述べると, 多段フラッシュ法1,338, 多重効用法299, その他60で, 多段フラッシュ法の能力が圧倒的に多い. 能力を%で示すと蒸発法85.4% (うち多段フラッシュ法67.3%), 膜法14.6% (うち電気透析法4.9%, 逆浸透法8.5%) で, まだまだ膜法の占める地位は能力から見ると低い.

Table 2 日本の電気透析淡水化プラント(I) (生活用水) (100 m³/日 以上)

プラントメーカー	膜メーカー	設置者	設置場所	淡水生産能力 (m ³ /日)	操業開始
神鋼ファウドラ	旭化成	東京都	式根島・東京	200	1970
神鋼ファウドラ	旭化成	東京都	大島(I)・東京	1,000	1972
荏原インフィルコ	徳山曹達	熱海市	初島・熱海・静岡	200	1973
オルガノ	徳山曹達	日本旅行	九十九里浜・千葉	200	1973
神鋼ファウドラ	旭化成	東京都	大島(II)・東京	1,000	1974
旭化成*	旭化成	防府市	野島・防府・山口	120	1974
合計				2,720	

* このプラントの原水は海水, 他はすべて塩水.

Table 3 日本の電気透析淡水化プラント(II)* (工業用水) (100m³/日 以上)

プラントメーカー	膜メーカー	設置者	設置場所	淡水生産能力 (m ³ /日)	操業開始
旭化成	旭化成	旭スイープ	宮崎	300	1971
オルガノ	徳山曹達	新潟共同火力	新潟	1,400	1974
旭硝子	旭硝子	東電・鹿島火力発電	鹿島・茨城	2,000	1975
旭硝子	旭硝子	鹿島南共同発電	鹿島・茨城	12,000	1976
オルガノ	徳山曹達	東新潟火力	新潟	2,000	1976
オルガノ	徳山曹達	鹿島アンモニア	鹿島・茨城	4,300	1976
合計				22,000**	

* プラントの原水はすべて塩水

** 生活用水と工業用水の合計は, 24,720m³/日** Table 4** 日本の逆浸透淡水化プラント(I) (スパイルモジュール*) (100m³/日 以上)

用途	設置者	設置場所	原水	淡水生産能力 (m ³ /日)	操業開始
工業用水	住友金属工業	鹿島・茨城	塩水	14,900	1971**
工業用水	昭和産業	"	"	720	1972
工業用水	鹿島北共同発電	"	"	9,600	1973
工業用水	荒川林産化学工業	"	"	120	1973
工業用水	大日本インキ化学工業	"	"	720	1974
工業用水	鹿島石油	"	"	5,300	1974
工業用水	鐘ヶ淵化学工業	"	"	1,000	1974
合計				32,360***	

* モジュール供給者は栗田工業

** 生産能力は1971年から1975年の間に完成した

*** 工業用水総生産能力は34,870m³/日, 淡水総生産能力は35,370m³/日

Table 5 日本の逆浸透淡水化プラント(II) (ホローファイバーモジュール*) (100m³/日 以上)

用 途	設 置 者	設 置 場 所	原 水	淡水生産能力 (m ³ /日)	操業開始
生 活 用 水	い づ み や	宝 塚・兵 庫	—	100	1973
生 活 用 水	ビバスタ東商	長 崎	塩 水	400	1974
工 業 用 水	テキサス	川 口・埼 玉	—	290	1974
工 業 用 水	インストルメント	熊 本	塩 水	480	1974
工 業 用 水	三 菱 電 機	横 浜・神奈川	—	240	1974
工 業 用 水	日 本 電 機	鹿 島・茨 城	塩 水	1,500	1975
合		計		3,010**	

* モジュール供給者は笹倉機械

** 生活用水は500m³/日、工業用水は2,500m³/日

ば運転が止まったり、止めたり、それから装置が撤去されたりしておりまして、実際にこれが本当に長期間この能力で運転されているかどうか非常に疑問のところもございまして。しかし、この傾向は、電気透析法の方にもありまして、多分に膜法は、そういう意味で、試験的に設置されて、そして後でとりはずされる、あるいは運転しないという例が非常に多いわけでありまして。

2.2 日本の電気透析淡水化プラント

表2に電気透析法による生活用水、これも100m³/日以上のもを上げました。

表3は工業用水の、やはり同じように100m³/日以上のプラントを示しました。

これらの操業開始は、だいたい1970年くらいでして、そして工業用水の方は、この後1976年あたりのものが多いわけでございます。現状はなかなかつかみにくいのですけれども、だいたい生活用水が3000m³/日、工業用水が22000m³/日で合計でだいたい25000m³/日くらいが、現状でございます。

また表2を見ておわかりのように、地方公共団体が設置者の場合が非常に多いわけで、しかも、この4番目の設置者が日本旅行のものを除きますと、みんな島であります。この表で、塩水の濃度は書いてありませんが、旭化成の防府市のプラントは、海水を使ったものでございます。

こういうように、海水に対し電気透析を使って実用化されているのは、これが世界で始めてございまして、その意味でたいへん意義が有ると思われまして。その他のプラントは、島の井戸水に海水がしみ込んでブラックツシュになるつまり塩水になっているので、それを飲料水にもっていくために用いられたものです。ところが、その初めの濃度で設計して、運転を始めますと、井戸水が濁れてきますと、海水が浸透してきまして、濃度が上

がってきます。そのために設計上の能力が出ないという例が非常に多いわけでありまして、今後こういうようなプラントを造る場合には、その点は注意すべきことだと思っております。

表3で示した脱塩プラントでおわかりのように、現在では、生活用水よりも工業用水の需要が多くなっております。特に鹿島が非常に多いわけでありまして、これは原水が北浦(湖)でございますが、それに海水が逆流して塩分が高くなっているの、それをとるという目的で造られたものです。その大部分は、ボイラー用水として用いられております。これはイオン交換法で、純水をつくるための前処理です。イオン交換法は、塩水そのものでやりますと、非常に高価になりますので、これを淡水まで塩分をおとしてやるわけでありまして、そのために造られたものが大部分でございます。所要電力量は、だいたい1~3KWH/m³くらいで、それからユニットは、だいたい2000m³/日が1ユニットというようになっております。ところが最近、鹿島の方のその北浦の水質が非常によくなりまして、はじめ塩素イオン濃度が600ppmということで設計したのですが、利根川の河口に、河口堰ができて、それによって逆流が防がれて、塩分濃度が今では塩素イオンで40~50ppmくらいになりましたので旭硝子の二つのプラントは完全に止まっております。といいますのは、電気透析法は、薄い水は脱塩できない、すなわち電気透析の機構上それができませんので、現在そのプラントは止まっております。

2.3 日本の逆浸透淡水化プラント

表4,5は逆浸透法について示したもので、今度はモジュール別に分けました。表4は、スパイラルモジュール(酢酸セルローススパイラルモジュール)を用いたプラントです。

表5はホローファイバーモジュール、これは芳香族ポ

リアミドのモジュールを用いたものです。能力は表4は32000 m³/日、表5は3000 m³/日、合計35000 m³/日くらいです。したがって逆浸透の方が能力が大である、ということがわかります。

表5のホローファイバーの方は、3000 m³/日くらいしか出ておりませんが、これは100 m³/日以上プラントをとったものですから少ないわけですが、実際は、例えば小さなプラントがたくさん有りまして、はっきりわかりませんが、だいたいこの倍くらいの能力になっている、という具合にいわれております。しかし特にホローファイバーがそうなのですが、逆浸透膜は、前処理が非常にうるさい、というよりは前処理をやらないとすぐ駄目になってしまいます。そういう欠点、要するにメンテナン스가非常にむずかしい、という点が、未だ逆浸透が完全に利用されない原因だと思えます。

表4は全部が工業用水です。表5もほとんど工業用水でして、その大きな用途は、ボイラー用水、それからもう一つエレクトロニクスの高純度純水の製造、この二つが大きな用途でございます。これは先程電気透析で申し上げましたように、やはり逆浸透で処理した淡水を、イオン交換法で脱塩して用いております。この場合、例えば、水道水のようなものを使って、そしてイオン交換法にすぐにつけないで、逆浸透で塩分を下げて、そして超純水にもっていくということが可能でありまして、特にエレクトロニクスで高純度純水を得る場合には、逆浸透が有利であります。それから、先ほどの鹿島のことで、これもやはり水質が良くなったので、実際には逆浸透をつかわなくてもいいのですけれども、逆浸透の方は電気透析と違って、水の塩分が下がっても運転ができますので、現在は運転をしております。そういう現状ですから、電気透析は止まっておりますが、逆浸透は動いております。それは必ずしも、逆浸透が有利であるから動いているとはいえないと思います。今四つの表で日本の現状をお話し申し上げましたが、もう一つ、今、茅ヶ崎の造水促進センターで海水淡水化の逆浸透法を用いる試験が、小型装置であるが行われております。しかしまだ実用化は将来になるだろうと思われま

3. 日本における電気透析法の開発

3.1 電気透析法の歴史

日本における電気透析法の開発について、私が長い間関係しましたこととございますので、少しくわしく申し上げたいと思います。日本では、電気透析は今非常に安定な技術の一つになっております。それは例えば、強酸

性陽イオン交換膜と強塩基性陰イオン交換膜を用いた電気透析というのは、塩水の濃縮も脱塩もできますが、日本では国情によりまして、最もむづかしい海水の濃縮の研究開発が行われたということが、その遠因になったわけでございます。

日本のソーダ工業というのは、現在、年、約700万トン程度の工業塩を原料として用いておりますが、このような大規模なアルカリ工業を持つ国の中で、原料の工業塩を持たないのは日本だけあります。従って、日本にソーダ工業ができた時から、ソーダ製造会社は工業塩の輸入に頼らないで、無尽蔵と考えられます海水を原料とした工業の確立を、望んでいました。それから、一方では、日本専売公社の方は、専売法による保護の下に、天日製塩法とはいえませんが、日本独得の塩田法によって食料塩の製造を、多くの製塩会社が行っていましたが、あまりにも高価になりますので、新しい方法の出現を期待していました。

1950年にアメリカ合衆国で、イオン交換膜が発明された直後に、これを用いた電気透析で、海水を濃縮する方法が考えられました。したがってソーダ製造業者と、専売公社とは、目的が違っていたわけですね。ソーダ製造会社は工業塩を造りたいし、日本専売公社は食料塩を目的としていたわけですね。ところが、ソーダ製造会社でいろいろ検討した結果、現在でもそうですが、今直ちに工業塩の製造にむかうのは困難だということで、日本専売公社の食料塩の製造に自然に協力する、ということになりました。

約20年努力した結果、非常に優秀なイオン交換膜の製造に成功しまして、最終的には、1973年から7つの製塩会社、新しく建設した海水の電気透析による濃縮装置を用いて、年約120万トン程度の食料塩の製造を行っております。これが基礎になりまして、最近では塩水の脱塩に対しても、いろいろ開発が行われまして、国内と国外の需要に答えられるようになっております。

この間の事情を、もう少し詳しく説明致しますと、まずその海水濃縮による製塩について、第一番目に考えられましたのは、高性能かつ安定なイオン交換膜の製造であります。これはスタートは相当多くのソーダ会社がおやりになったはずなのですが、最後には、旭化成工業と、旭硝子と、徳山曹達と、三者が残りました。その三者のイオン交換膜の製造法は、均質膜を目的としたのは同じでございますが、各々の造り方は違っておりました。しかし最近はどうも同じような構造の膜になっているようであります。膜の基質は、スチレンージビニルベンゼ

ン共重合体でありまして、またどの膜も機械的性質を改良するために、ポリ塩化ビニールのような補強剤を持っています。そしてだいたいその性能は、輸率として、0.5モルのNaCl中で0.9以上、それからいわゆる実効電気抵抗、面積あたりの抵抗でございますが、これが2～3オーム cm²。寿命は約10年。このように非常に優秀な膜を造り上げたわけでありまして。

ところが、それをすぐ海水濃縮にもっていきまると、単に性能の良いイオン交換膜の製造だけでは、解決できない問題があります。それは普通の陽イオン交換膜と陰イオン交換膜で海水を濃縮しますと、約4倍ほどに濃縮した時に、硫酸カルシウムのスケールが、陰イオン交換膜の濃縮側に析出します。これをどうしてよけるかという問題についていろいろな方法が提案されましたが、結局、1価イオンの透過性が2価イオンの透過性に比べて著しく大となるイオン交換膜を製造することに成功して、この問題は解決をみました。現在、この膜は脱塩プラントには使われていませんが、必要とする場合には、使用することが出来ますので、将来、あるいは用いられるかも知れません。

また、もう一つの膜がございます。これは不均質膜でただ、淡水化だけに使われています膜ですが、三菱油化でつくられました。この膜の目的は、高温（少なくとも80°）に耐えるような特徴を持っておりますので、そういうような用途が考えられております。

3.2 電気透析法に関する演者らの研究

次に、私どもの電気透析法の研究のうち、透過性と濃度分極についてお話ししたいと思います。

1) 選択透過性の異常性

まず第1は、イオン交換膜における選択透過性の異常性というものについて検討しました。これはイオン交換膜において、その選択透過性は、イオン交換の分離係数が大で、そしていわゆる移動度比（これは無限希釈溶液中の移動度比です）が、大の場合に、その選択透過性が大ということに一般になっておりますが、私どもはバリウムイオンが、強酸性膜に対して必ずしもそうでないということをいっております。ここで

$$T_{NaBa} = \frac{J_{Ba} \cdot C_{Na}}{J_{Na} \cdot C_{Ba}}$$

J は透過量、 C は濃度であります。 T_{NaBa} は選択透過係数でございますが、バリウムイオンのナトリウムイオンに対する選択透過係数が0.7と1よりも低いということを行っています。これは実際に実験をやってもそうなるのですが、この裏づけとしまして、イオン交換紙つま

りイオン交換樹脂を紙にすいたものを、電気泳動させますと、バリウムイオンがほとんど動かない、そういうことがわかりまして、この事実を確かめております。

2) 陽イオン、陰イオンの選択透過性

第2に陽イオン、陰イオンの一般的な選択透過性でございますが、これは一般によく知られたことでございますので、特に目新しいものではございませんが、普通の陽イオン交換膜ですと、だいたい $K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$ のような選択透過性であります。それから陰イオン交換膜ですと、 $Cl^- > SO_4^{2-}$ のような選択透過性を持っております。特に硫酸イオンは、濃厚溶液では選択透過性は著しく小となります。ここで先ほどお話しした1価イオン選択透過性の膜が、この順番を変えたわけですが、それに付きましては、陽イオンの場合は、 $K^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ という具合に選択透過性がかわります。それから陰イオンの場合は、データを示さないかわりませんが、硫酸イオンが更に通らなくなる。この硫酸イオンとカルシウムイオンが相当選択透過性が小さくなりましたために、海水を濃縮してもスケールが出ない、ということになったわけでありまして。

3) 弱酸、弱塩基の選択透過性

第3に、私の研究室で研究したイオン交換膜における弱酸、弱塩基の選択透過性の研究でございますが、これは直接、淡水化には関係ございませんが、いろいろな有機電解質の濃縮、脱塩に重要だと思います。この場合の結論は、あるpHで透過性が最大になるということであ

Fig. 1 グリシンのイオン交換膜透過性

原液: 0.05M グリシン, 0.1N 塩化ナトリウム

——強酸性膜 - 強塩基性膜 (0.5A/dm²)

.....弱酸性膜 - 弱塩基性膜 (1.0A/dm²)

○陽極方向への透過

●陰極方向への透過

Fig. 2 定常電流 - 電圧曲線

Fig. 3 多室電気透析槽における i -pH の関係
 0.3N NaCl 溶液, CMG-10 膜
 AMT-10 膜
 流速 2.5×10^{-2} cm/sec

Fig. 4 パルス波

りまして、理論的にも解明しております。

Fig. 1 はグリシンの強酸性膜、強塩基性膜の系統と、弱酸性膜、弱塩基性膜の系統の場合に、一定の電流密度で、透過性をみたわけでした。アミノ酸は、両性電解質ですから、陽極と陰極と両方に進みますが、陽極方向へは陰イオンとして陰極方向へは陽イオンとして挙動します。その結果強酸性、強塩基性の膜としては、図のような挙動を示します。弱酸、弱塩基だと図のようです。いずれも pH のある点で透過性が最大になります。

4) 濃度分極現象

つぎに濃度分極現象のお話を致します。濃度分極現象は、電気透析の操作上、非常に重要な現象でございますので、私どももある時期からこれにとり組んだわけですが、この現象は、ナトリウムイオンは陽イオン交換膜を 0.9 という大きい輸率で動きますが、溶液ではだいたい、NaCl では 0.4 くらいでございます。そういうような状態で電気透析を致しますと、陽イオン交換膜の陽極側ですが、それがイオンが無くなってくるわけです。そのために、分極が電気抵抗などにあらわれたりいたします。さらにひどくなりますと、水に残っている水素イオンと OH イオンが動くようになります。私どもは前者の現象を濃度分極といい、後者を水分解といいまして、区別して考えています。この両者が、どのような挙動をするかということを検討したわけです。

Fig. 2 は NaCl-蔗糖溶液です。蔗糖溶液を使った理由は、Fig. 2 の陽イオン交換膜で電流密度のラインが水平になるということでやったわけなのです。こういう具合に、始めはオームの法則に従ってありますが、ずれてきまして、図のように水平のラインになります。屈曲点が限界電流密度 (i_{lim}) で、これ以上では、一般には電気透析はやらないということになっています。それから陰イオン交換膜ですと、図のようになります。 (i_{lim} が限界電流密度であります。それで、陽イオン交換膜よりは、陰イオン交換膜の方が限界電流密度が大、つまり濃度分極ににくいということになります。これは結局 NaCl の場合は、 Na^+ の輸率が 0.4 で、そして塩素イオンの輸率が 0.6 くらいですから、その輸率の差が、その濃度分極にきいてくるわけです。したがって陽極側の陽イオン交換膜の方が、先に分極が起こるわけです。ところでその濃度分極が起こりますと、すぐ次に続いて水分解という現象が起こる可能性があるわけです。それは多室電気透析槽をくみまして、その希釈側の pH 変化を見るとわかります。Fig. 3 はある一定の流速でもって、陽イオン交換膜、陰イオン交換膜を含む槽を用い 0.3N の NaCl 溶液に対して、pH 変化を見たわけでした。電流密度の増大で pH がまず上がりますのは、陽イオン交換膜が先に濃度分極が起こりまして、陽イオン交換膜の水分解が起こりますと、水素イオンがその液から出て行きますので、アルカリ性になります。次いで、陰イオン交換膜の濃度分極のところにきますと、酸性になります。これは、結論は、陽イオン交換膜よりも陰イオン交換膜の方が、水分解が著しいということを示しております。

Fig. 4 も上の結論の一つの証拠になる実験ですが、先

どのように蔗糖-NaCl,あるいは寒天-NaCl というような, そういう系で致しますと, 電流は Fig. 2 のように水平になるのですが, あるところでそれが破れて, パルス波が出てきます. Fig. 4 に示すように陽イオン交換膜の場合は, こういようにパルス波が大きく出ます. 陰イオン交換膜は, 小さいのが続いて出てまいります. これは何故かといいますと, 陽イオン交換膜の場合は, イオン空乏層が速く出来きますけれども, 比較的水分解が起こりえない安定な空乏層ができるわけです. ところがある電圧まで上がりますと, 突然破れて, この電流が流れること, すなわち水素イオンが動くわけです. ついで, また元にもどりまして, また, ある時間たつとくりかえす. ところが, 陰イオン交換膜は, 濃度分極が始まりまして, 連続的に小さな電流が流れる. これを見ましても, NaCl の場合, 濃度分極は, 陽イオン交換膜が起こりやすいが, 水分解は, 陰イオン交換膜が起こりやすい, ということがわかったわけでございます.

4. 電気透析法と逆浸透法との比較

次に電気透析 (electrodialysis) は, 私どもは ED と略しております. 逆浸透 (reverse-osmosis) は RO と略しております. ED と RO がどうなるか, どう違うか, あるいはどういうことになるかというようなことが, 非常に重要な問題でございますが, 今日未だ結論が出ているわけではございません. それで, 私なりの考えを申し上げます.

ED に対し一番都合のいい原水濃度がございます, ED は 1000~2000 ppm の濃度が最適でございます. これをどっちに離れても, RO の方が有利だというのが, 一つの考えであります. それから海水の場合の RO は, 最近のいわゆる蒸発法に比べて, 対抗できるような有利性があるといわれておりますが, ED は少し電力が余計いります. それから, 特に特徴としまして, ED の場合に, 得られる淡水 (freshwater) がある一定の濃度を必要とします. それは薄くなりますと, その希釈側の液の抵抗が上がりまして, 電気透析がむずかしくなってくる, というわけでございます. したがって, だいたい 200 ppm くらいにおとすのが一番いい, すなわち 1000~2000 ppm から 200 ppm くらいの淡水をとるというのが, ED の最適の条件で, この条件であれば, ED は他のものに比べて劣りはしないわけです.

日本の ED と, 外国の ED と少し条件が違ひまして, 外国ではあまり ED の業績がございません. 業績というよりは, その経験がございません. 日本は 20 年間, 海水

の濃縮で, ED の充分な技術の蓄積がございます. しかも, 日本のイオン交換膜は, 他国の追随を許しません. そういふことで, 今後も ED の技術は, 日本としては淡水化技術として欠くべからざるものであると思われます.

それから, ED と RO のもう一つの差は, ED の方が前処理が非常に楽である. RO は, 相当厳密な前処理が必要である, という点が ED の有利なところであります.

ED の不利なところは, ややエネルギー消費が大いところでありまして, したがって, 海水淡水化は不利といわれております. だが, 他の利点を考えますと, 現在では, 一概に不利とはいえないということもいえます. RO の特徴は, もう何度もいわれているように消費エネルギーが非常に小さい, ということが最大の利点でございます. だが, 欠点としては, 私の見るかぎり, 未だ技術が不安定である, それから, 充分な前処理が必要とする, ということでございます. ただ先ほど鹿島の例を見てもおわかりのように, 原水濃度が非常に変動するような場合には, ED は危くて運転ができない. あるいは, ある場合には, 止めなくてはいけない. RO はそういう心配はないわけです. そういふ点では, RO の方がまあ対応性がある, ということがいえます.

それから, 電気の使い方が, RO は動力に使うわけでありまして, ED は直流で使うわけでございます. 直流で使う場合に, その抵抗が下がれば, 非常に電力が低減できます. 普通の海水を, ED で淡水化しますと, だいたい 15 KWH/m³ くらいの電力が必要です. ところが, 温度が, 例えば 50~60° くらいまでも上がりますと, これがだいたい 8 KWH/m³ まで下がると, これは少し下がりがすぎかも知れませんが, これくらいに下がるといわれております. RO はいつても 7 KWH/m³ くらいのところでできます. この電力の差は, 高温を使えばあまり差がない. しかし, 低温の場合には, 約倍になっているわけで, そういふ意味では, RO の方が海水淡水化の場合には, 有利であるということがいえます.

それから, 膜材料でございますが, ED に関しては, 今のイオン交換膜が, 他のものに置き変わるというようなことはまずないと思います. ただ, RO は, 今でも非常に新しい有望な材料が, 次々報告されておまして, その膜性能試験, あるいは寿命, そういふ点が確立されますと, 今使っております RO の膜が, とって変えられるということもあり得るということが出来ます.

5. 電気透析法

5.1 電気透析法の操作

次に電気透析法について、まず操作を申し上げたいと思います。電気透析における透析槽は、一般にしめつけ型というか、フィルタープレスのような型のものが使われまして、陽極側からいいまして、陰イオン交換膜がまざりまして、その次にガasketがあります。そこにスペーサーがありまして、そこが希釈室になっております。その次に、陽イオン交換膜がありまして、それからまた、ガasketがあります。そこに、スペーサーがありまして、濃縮室になっています。そして、また陰イオン交換膜があります。それでしめつける。そういうようなことで、それをずっとくり返すわけでございます。それから、膜の上の方に孔を開けるのですが、その孔の開け方を工夫しまして、希釈室では、希釈液だけが通るような孔を開けておきます。そして濃縮室では、濃縮液だけが通る孔を開けてまして、通路を形成しておきます。それから、原水は、砂をろ過しまして、それから濃縮液および希釈液は両方とも、リサイクルしております。

それで濃度は、始めにだいたい調整しておきまして、濃縮室を通りますと、当然濃度は高くなりますが、それを原水で調整して循環する。そういうように一定の濃度で循環して、そして薄くなった水を淡水としてとる。濃縮液は、一部は棄てますが、一部は電極液にまわす。電極液にもっていく方法は、ちょっと各社で違いますが、例えば旭硝子の例を申し上げますと、電極液はもちろんこれは、電解が起こります。それで陽極に通しますと、塩素もできます。それから酸性になります。陰極室を通しますと(pHは下げておきますが)、少しアルカリ性になります。

それを集めまして、まず亜硫酸ナトリウムを加えて、塩素をとる。それから両極液を加えても中和しませんで、やや酸性になります。それを苛性ソーダで、pHを調整する。そして、一部を廃棄して、一部を循環する。そういうようなことをやります。

したがって、今日の方法では、廃棄物に、酸とアルカリは出ないようにしております。やや濃厚な塩水はできることはありますが、酸やアルカリはでないようにしております。それから、電極の問題でございますが、陰極は、鉄でよろしいですが、陽極は、今、白金メッキしたチタンを使っております。日本はチタンですが、外国ではタンタルを使ったりします。それから、一つの技術でございますが、スケール防止をするために、極性転換というのをやる方法がございます。つまり、ある期間、

陽極を陰極にして、陰極を陽極にする。そうしますと、そのスケールが、これはソフトスケールなのですが、これがつかなくなります。そういうような操作を行う場合には、常に陽極と陰極が入れ変わるわけなのですから、今のように鉄を陰極に使うわけにはいかないので、陽極も陰極も、今の白金メッキしたチタン、またはタンタルを使っております。

5.2 プラントの解説

時間の関係もございまして、いろいろなプラントについて説明をしたいのでございますが、省略させていただきます。これは外国のプラントでございまして、ベンガジ。ご存知でしょうが、リビアのベンガジの電気透析の淡水化プラントについて、ご説明致します。

リビアのベンガジのこのプラントは、1976年、私どもが見学致しました。それで、その結果を報告したいと思います。このプラントは、実は動いておりません。これはベンガジの市の水道局（公共団体です）それが設置者で、19,200 m³/日という世界最大の規模でございまして、イギリスの William Boby という会社が建設したものでございます。陽イオン交換膜が、徳山曹達のもの、陰イオン交換膜が、旭硝子のものというように、非常に変わった注文をした膜でございまして。

これは何故駄目になったかといえますと、原水が非常に硫酸カルシウムが多くて、スケールがでてまいります。そのための前処理が、不十分である。それから、もっと重要な原因としまして、あいう地方では、いわゆる、砂塵、砂嵐といいますが、それが起こりまして、その対策が不十分であったために、透析槽がつまりまして、運転を止めざるを得なかったと担当者がそのように申しております。

原水の塩分濃度は、約 2000 ppm、硬度が約 600 ppm、塩素イオンは約 800 ppm くらいで、淡水は、塩分濃度が 650 ppm くらいにおとす。硬度は 300 ppm くらいに、塩素イオンは 250 ppm くらいにおとす。そういうことで設計したわけでございます。

原水の前処理には、弱酸性の陽イオン交換樹脂を使って、カルシウムイオン、マグネシウムイオンを除きます。そうしますと、水素イオン、炭酸水素イオンが、CO₂になりますので、それを脱気塔で除いてやります。こういうような条件でスタートしたのですが、結局つまってしまいました。

それで、私どもが行った時に、その担当者は、去年ですが、9月ごろから運転するというので、膜やら何やら一さいそろえてやるといっていたわけですが、いまだに

運転したということを聞いておりません。多分未だ運転してないと思います。

6. 逆浸透法

6.1 逆浸透法の発展

次に逆浸透法について申し上げたいと思います。逆浸透法の歴史を簡単に申し上げますと、1953年にフロリダ大学の Reid という人が、淡水化あるいは脱塩に、この逆浸透が使えるということを指摘しました。しかし、その段階では、未だ工業化はしなかったのですが、1960年にカリフォルニア大学の Loeb と Sourirajan, Loeb はいまはイスラエルにいますはずで、Sourirajan はカナダにいます。この二人によって、粉末の酢酸セルロースから、キャスト法で、半透性の、ほとんど半透膜に近いような膜を造りまして、水の透過率もいいということで、実用化されたわけです。実際のキャスト液の組成は、そのカリフォルニア大学にいます Manjikian という人が改良しました。Loeb, Sourirajan は過塩素酸マグネシウムと、アセトンと酢酸セルロースを使ったのですが、Manjikian はホルムアミドとアセトンと酢酸セルロースを使いまして、これが、今スタンダードの組み合わせになっております。

6.2 逆浸透法の実用化の現状

今度は少し実用化のお話を申し上げたいと思います。先ほどスパイラルモジュールとホローファイバーモジュールとを申し上げました。ここでお話するのはスパイラルモジュールで、栗田工業の装置でございます。モジュールは輸入しております。Fig. 5 は今のところ世界最大の装置といわれておりますもので、栗田工業が、鹿島の住友金属工業に設置したものです。初めは 14900 m³/日ではなかったのですが、これは段々増やしていったわけですが、1971年に初めて造った時に、栗田工業の方で前処理を非常に慎重にやったわけです。これを非常に完全にやったために、今日でも運転が続いているということでそのフローシートをここに上げておきました。まず前処理のフローシートを申し上げます。まず加熱をしまして、次亜塩素酸ナトリウムで塩素滅菌、それから、電解アルミニウムで凝集、沈澱をやる。それから、動力式二層ろ過器、続いて水槽で、今度は pH コントロールをやりまして、精密ろ過をした後加圧をやる。これだけの前処理をやりまして、そして三段で脱塩して各段で淡水をとります。一方各段で濃縮液がでますが、それをもう一度戻します。そういうことをくり返して利用率を上げます。この方法で、今日でも動いており

Fig. 5 逆浸透装置のフローシート(塩水)

ます。ただし、今日では、先ほど申しましたように、鹿島の水は非常に塩分が下がっておりますので、一段しか使っていないと思います。それから、何機がございましたが、半分以上止まっております。つまり、それくらいの能力である、というようなことになっています。

6.3 新しい逆浸透膜の開発と海水淡水化の試験

時間もあまりありませんが、新しい逆浸透膜の開発というのは、主として海水淡水化に利用する膜が目的で、方々で造られております。東レでカルボキシル基を持つ芳香族アミドが造られていますし、それから、帝人では、ベンゾイミダゾロン環を含むポリマーから、逆浸透膜を造っておられます。それから UOP の ROGA Division でいろいろな膜が造られています。今造っています海水淡水化用の複合膜は、硝酸セルロースと酢酸セルロースの混合膜で、その上にトリ酢酸セルロースの膜をつけたものです。ROGA Division のいい膜は、たいてい複合膜でして、今のようには、二つの膜をくっつけます。ポリ尿素複合膜として NS 100、ポリアミド複合膜として PA 300 というのが代表的な膜であります。この膜の説明は、時間がございませんから省略させていただきます。

ホローファイバーの方で海水淡水化に今適用されておりますのは、Du Pont で造られた Permasep の B10、これは芳香族のポリアミドでございます。それから、Dow Chemical で、トリ酢酸セルロースのホローファイ

バーが造られております。こういうのは、いずれも海水淡水化用の膜として、今試験がされているところでございます。

日本では、造水促進センターの茅ヶ崎試験所で、こういうようなもの、UOP では最後に申し上げた膜ではないのですが、その前のスパイラル型の酢酸セルロース系の膜、それから Du Pont の Permasep B 10、それから Dow Chemical のもの、そういうものを使って試験をしております。それから、今申し上げたのは、皆一段脱塩でございますが、二段脱塩は東レのモジュールで、栗田工業がしております。それから、チューブラー型、これは一般にはあまり使われてないのですが、前処理が楽であるということで、日東電工のモジュールを使って、神戸製鋼が試験しております。

7. おわりに

時間がまいりましたので、これで終わりたいと思いますが、最後に本日は膜法の淡水化の現状を、お話し申し上げましたが、これは単に淡水化、つまり水を淡水として塩水から造るだけではなくて、水の再利用の場合の脱塩について、やはり膜法が重要なポイントを持っていると思います。その辺については、今試験中でございますが、今日は申し上げませんでした。以上でございます。

日本膜学会 昭和54年度事業計画

(昭和54年1月1日～昭和54年12月31日)

I 第2回定期総会の開催	月8日の予定)
昭和54年5月18日学士会館(東京・神田一つ橋)において開催する。	IV 雑誌「膜」の刊行
II 第1回年会の開催	第4巻を奇数月に発行する。なおこのために編集委員会を6回開催する。
昭和54年5月18、19日の両日にわたり、学士会館(東京・神田一つ橋)において開催する。	V その他
III 膜研究会の開催	(1) 役員会は、理事会2回、評議員会1回を予定する。
4回開催する。(2月17日、6月23日、8月25日、12月8日)	(2) 第1回年会の際に懇親会を行う。