

# 膜分離技術の農業分野への応用

—施設園芸用原水の水質改善—

大谷 敏郎\*

Application of Membrane Technology in Agricultural Field

—Improvement of Water Quality for Horticulture—

Toshio OHTANI\*

\* Food Engineering Division, National Food Research Institute

## Abstract

Rain, river, ground and tap water resources can be used for agriculture in Japan. Ground water is available in large quantities and low cost. Therefore, it is one of the main source of water for agriculture and horticulture. But in many horticultural area especially close to sea, the salt level of ground water varies widely. Sometimes it exceeds the acceptable maximum for sound plant growth. It is not economically and technically viable to mix ground water with fresh water for the purpose of reducing salt concentration. The author suggests that the membrane separation technology can be applied to control quality of ground water for agriculture.

Information on precious studies related to the application of membrane technology in agriculture, and an general aspects were summarized in the beginning. Subsequently, practical examples of applications of membrane method for desalination of ground water in horticultural filed in Japan. Advantages and disadvantages of application of membrane method in agricultural water quality control were also discussed.

**Key words** : membrane, water resources, water quality, horticulture, hydroponics

## 1. はじめに

水道水は水道法によって厳しく水質が規定されているが、その水質悪化が大きな問題となっている。そのため、水道水質基準の強化、水道用原水の水質基準や一般排水基準の見直しなどが行われ、トリハロメタンの前駆体の濃度規制をはじめ、窒素やリン、農業などによる環境汚染の防止対策も進められている。規制の一方で、新しい浄水システムの開発も進められ、厚生省の国家プロジェクトで膜分離技術を使った新しいシステムやオゾン殺菌法などが研究中である。このように水道の水質は、原水側も浄水側も水質の維持と向上を目指して、様々な対策が施されている。

農業用水の水質は、地下水も含めて年々悪化の一途で

あると言われているが、なかなか実体は明らかではない。農業用水の水質は、水質汚濁に係る環境基準で水素イオン濃度 (pH)、生物化学的酸素要求量 (BOD)、浮遊物質 (SS)、溶存酸素量 (DO) が決められている他、水稲に対する 10 項目からなる基準があるに過ぎない。このため、水質の分析が常時行われることは少なく、問題が生じた場合に対処しているのが現状である。

施設園芸、なかでも養液栽培用の原水は 60% 以上の農家で地下水を使用しており (伊東 正, 1994)、植物の生長に直接影響を与える塩類濃度が重要視されている。最近では、硝酸態窒素やリン酸などの濃度も無視できないが、基本的には塩類の種類と量を制御する必要がある。当初、イオン交換樹脂での塩類除去が試みられたが、処理量が多く樹脂の頻繁な再生が必要なことから実用化

\* 農林水産省食品総合研究所 〒305 つくば市観音台 2-1-2  
キーワード: 膜, 農業用水, 水質改善, 施設園芸, 養液栽培

にはいたらなかった。

膜分離技術は、溶液に圧力を加え、膜を透過させることで溶解成分を水から除去できる技術である。従来からのろ過に比べると、イオンレベルまでの格段に小さな物質まで除去でき、装置の構造も簡単で、複雑な制御も不要である。膜分離技術は、除去できる物質の大きさによって何種類かに分類され、それぞれに農業用水の水質改善に利用できる。(大谷敏郎, 1995 a; 1996 a; 1996 b)

ここでは、他の方法では経済的に実用化が困難な脱塩の問題を中心に、膜分離技術による養液栽培用水の確保と主に地下水の水質改善への適用の可能性を探る。

## 2. 膜分離技術の概要 (大谷敏郎, 1993; 1995 a)

### 2-1. 膜分離技術とは

膜分離技術は、極めて薄い膜に開いた分子レベルの細孔によって、分子や粒子をあたかもふるいのように分離する技術である。

ろ紙やろ布によるろ過、砂ろ過など従来のろ過技術が、概ね粒径  $10\mu\text{m}$  以上の不溶性固体の物質を懸濁液から分離する技術であるのに対し、膜分離技術は、コロイドや高分子、分子などをそれらが溶解している溶媒から分離する。

膜分離技術は、1960年代に海水を淡水化する目的で研究が開始された。当初は、分離の対象は塩類イオンのみであったが、その後高分子物質やコロイド、微生物などに分離対象が広がり、現在では様々な産業で欠かせない単位操作の一つとなっている。

容器に入れた水と塩類溶液の間に、水分子だけが通過できる半透膜を置くと、水分子が塩類溶液側に移動し、

ある水位差をもって平衡状態になる。これが浸透現象で、水位差すなわち圧力差が塩類溶液の浸透圧である。逆浸透法は、一般に  $30\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  以上の高い圧力で、この浸透圧に逆らって水だけを膜から押し出し、塩類を除去する方法である。このことから逆浸透 (Reverse Osmosis: RO) 法と命名されている。また、逆浸透法に使用できるように工夫した半透膜は逆浸透膜と呼ばれている。

一方、高分子物質を分離の対象とする限外ろ過 (Ultrafiltration: UF) 膜は、膜の細孔径が RO 膜より大きく浸透現象がほとんど観察されない。従って、 $5\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  以下の圧力でも、浸透圧の影響を受けずに膜を通して水だけを高分子溶液中から押し出すことができる。なおこの場合は、厳密には低分子物質を含んだ溶液を押し出していることになる。表-1に、代表的な膜分離技術を示した。

最近、数  $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  から  $15\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  程度の圧力で塩類や有機酸などの低分子物質を効率良く分離するナノろ過 (Nanofiltration: NF) 膜が注目を集めている。NF 膜は、UF 膜と RO 膜の中間の阻止性能を持つ膜で、従来の UF 膜に比べ高い塩類阻止性能を持ち、しかも従来の RO 膜と比べ低い圧力で操作することが可能になった。膜の素材に荷電を持たせたこと、膜のミクロな構造を工夫したことなどの改良で、これらの性能が得られるようになった。膜が荷電を持つので、膜の種類や操作条件によっては、これまではほとんど不可能であった分子量が非常に接近した物質同士の分離が可能な場合もある。(大谷敏郎, 1995 c)

表-1 圧力差による分離法  
Table 1 Pressure driven separation technique

分類	名称	分離媒体, 膜	分離粒子径, 分子量	操作圧力 ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
ろ過	ろ過法 (filtration)	ろ紙, ろ布, ろ過助剤	$10\mu\text{m}$ ~	減圧~2
膜分離	精密ろ過法 (microfiltration)	精密ろ過膜 (メンブレンフィルター)	$0.025\sim 10\mu\text{m}$	減圧~2
	限外ろ過法 (ultrafiltration)	限外ろ過膜	分子量 $1,000\sim 300,000$	減圧~5
	ナノろ過法 (nanofiltration)	ナノろ過膜	$350\sim 1,000$	5~30
	逆浸透法 (reverse osmosis)	逆浸透膜	~350	30~100

## 2-2. 海水やかん水の淡水化

膜分離技術の最大の用途は、飲料用水用の海水やかん水の淡水化分野である。従来の蒸発法（多段フラッシュ法）に比べRO法の造水コストが1/3から1/5になること、膜の耐久性が向上したこと等から、近年はRO法の増加が著しい。現在世界の海水淡水化装置の約1/3がRO法である。膜法では、塩分濃度  $35,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  の海水から一回のROで  $500 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下の淡水を製造することが可能である。最大の装置は、サウジアラビアの一日当たり5万  $7,000 \text{ m}^3$  の造水能力を持つプラントで、わが国でも今年3月から沖縄県で  $4 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  の装置が稼動を開始した。

## 2-3. 他の主な用途

超純水は、その50～55%が半導体製造用、30%が電力分野、5～10%が医薬品用、その他の用途が10～15%となっている。特に、半導体用は通常のろ過装置から始まり、精密ろ過（Microfiltration:MF）、UF、ROと全ての膜分離技術を使用している。わが国においては膜の需要の大半は超純水用といわれている。

上水分野は、最近の水道水に対する安全でおいしい水を求める要求から、膜の利用が検討されており、今後大きな利用分野として期待されている。

ビルから排出される廃水をリサイクルして利用する中水道、下水処理、し尿処理分野でも膜が利用されている。1991年に建設されたし尿処理施設のうち、処理量で約20%が膜法である。

他にも、食品分野での濃縮や分離、家庭用浄水器、医薬品の製造、特殊な例ではメッキ工程での膜による有害物質の回収、電着塗装工程からの塗料の回収、原子力発電所の放射性廃水の処理などで欠くことのできない技術となっている。

表-2に実用装置の稼働例をまとめた。

## 3. 原水の水質改善

### 3-1. 研究例

膜技術を使った農業用水に関する研究例はあまり多くない。

#### (1) 施設園芸用水の脱塩（Schippers, 1981）

オランダのSchippersは、園芸に応用することを前提にした用水の脱塩に関する研究を行っている。オランダの施設園芸で一般的に行われているロックウール栽培では、しばしば用水の塩濃度が高いため、ロックウールに塩類集積が生じ問題となっている。塩濃度の低い水を得る方法には、水道水を使用する方法やため池を作る方法があるが、前者はコストが高すぎることで、後者もオランダの特殊事情で地価が高く、また土地の有効利用という

面からも望ましくないため、結局地下水の利用か地表の水をリサイクルする必要が生じた。そこで、比較的懸濁物質の少ない地下水と懸濁物質の混入が懸念される地表水の両方を対象に、膜を使った脱塩の実験が行われた。

オランダの地下水をCl濃度  $2,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  前後までをかん水地下水（Brackish groundwater）、それ以上を塩水地下水（Salt groundwater）と分類し、種々のRO膜で実験を行った。施設園芸の主要作物は塩濃度の増加によって、収量が著しく低下する。そこで施設園芸用水の塩濃度を最大NaClとして  $1.5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ （Na <  $35 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , Cl <  $52 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , 電気伝導度換算で  $0.5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ）とした。

その結果、表-3に示すようにはほぼ所定の水質を得ることができた。

なお、同じ論文中にオランダにおける施設園芸でのRO設備が1980年当時ですでに200ヶ所以上あることが紹介されている。最近では水耕栽培農家の約10%にあたる500haでROによる用水の脱塩が行われていると言われている。

#### (2) 農業排水の脱塩（Marinas *et al.*, 1987）

Marinasらは、1985年にカルフォルニア州政府と共同で、農業排水をROで脱塩し再利用することを目的に実験を行った。対象とした農業排水はコロイドや不溶性の懸濁物質を多く含んでいる。そこで、これらの物質が造水能力  $1,440 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  のプラントの長期運転に与える影響を調べるため、 $49 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  の小型装置で膜の耐久性と性能変化を検討した。その結果、1,300時間後でも膜性能にほとんど変化は見られず定期的に運転できた。表-4に1,300時間後の主要な塩類の阻止率を示す。

セレンに関してこの小型装置での実験では十分な阻止率が得られたが、 $1,440 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  の実用規模のシステムでは阻止率が低く水道水の基準をみたくできなかった。

また、膜で脱塩を行う場合、表-4に示したように、脱塩された透過液の他、塩類が濃縮された保持液が排出されるので、その処理方法が問題となる。

#### (3) 灌漑用水の脱塩（Ammerlaan *et al.*, 1992）

アメリカ南西部のコロラド川は、ロッキー山脈に源を発し、カルフォルニア湾までの2,200kmにわたる河川である。途中のアリゾナ州や国境を越えたメキシコには、コロラド川を水源とする灌漑地域がある。この地域は乾燥地帯のため、灌漑用水は植物および地表からの蒸発散で濃縮され、しばしば高い塩濃度になって排出される。

図-1にコロラド川下流域の灌漑用水の循環システムを示した。もともと河川水の塩濃度は  $600 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$

表-2 実用装置の稼働例

Table 2 Practical application of membrane technology

分離法	用途	分野	内容・他
逆浸透法 (RO)	海水淡水化	民生	飲用水, 生活用水
	超純水	原子工業	ウェハーの洗浄, 一次純水
	医療・製薬用水	病院, 製薬工業	バイロジェンフリー水
	果汁の濃縮	食品工業	トマト, リンゴ, ブドウ等
	牛乳の濃縮	"	全成分の濃縮
	放射能除去	原子力発電	金属, イオン性物質の除去
	排水処理	食品, 化学, 鉄鋼	TOC, 無機物質の除去
限外ろ過法 (UF)	電着塗料回収	自動車, 建材	電着塗料の回収, 水の再利用
	酵素精製	製薬, 食品工業	脱塩, 濃縮, 分画
	超純水	電子工業	二次純水
	医療・製薬用水	病院, 製薬工業	バイロジェンフリー水
	油水分離	機械工業	含油排水
	醸造品のオリ引き	食品工業	生酒, ワイン, 醤油
	清澄果汁	"	リンゴ, ミカン, 他
	牛乳の濃縮	"	タンパク質の濃縮
	中水道	建築	ビル雑排水の再利用
	浄水器	民生	家庭用, 業務用
し尿処理	し尿処理場	固液分離	
精密ろ過法 (MF)	医療・製薬用水	病院, 製薬工業	無菌精製水
	除菌・粒子除去	製薬工業	製薬プロセス
	"	食品工業	加工, 用水, ミネラルウォーター
	"	電子工業	電子工業用薬品精製
	超純水	"	二次純水
	清澄果汁	食品工業	ブドウ

表-3 各種用水に対する逆浸透処理の効果

Table 3 Performance of revers osmosis installation processing different water sources

	供給液			
	水道水	かん水地下水	塩水地下水	地表水
供給液塩素濃度 (Cl <sup>-</sup> , mg · l <sup>-1</sup> )	160 12	2,200	6,400	290
透過液塩素濃度 (Cl <sup>-</sup> , mg · l <sup>-1</sup> )	12	70	37	20
阻止率 (%)	92.5	96.8	99.4	93.1

と高いが、灌漑地域から排出されるときには 3,000～3,400 mg · l<sup>-1</sup> に濃縮される。アリゾナ州のユマ周辺の Wellton および Mohawk の大渓谷は地下に不透水層があり、灌漑した水は植物および地表から蒸発散した分を除きほとんど全てが灌漑地域から河川に排出される。

これらの水を処理する方法として図-1 の I に示した河川に戻す方法がある。しかし灌漑水量が増加するのに伴い、河川の塩濃度が上昇し、下流の灌漑地域での取水が問題となってきた。特に、最下流の大きな灌漑地域はメキシコに位置し、河川の塩濃度を低く維持せざるを得

表-4 1,300 時間運転後の主要塩類の阻止率  
Table 4 Water analysis and rejection after 1,300 h of operation

物質名 (mg · l <sup>-1</sup> )	供給液	保持液	透過液	阻止率 (%)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4,410	7,820	11	99.8
Cl <sup>-</sup>	1,430	2,480	37	97.4
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	206	336	34	83.5
Ca <sup>2+</sup>	3	4	0	100.0
Mg <sup>2+</sup>	22	32	0	100.0
Na <sup>+</sup>	3,100	5,480	42	98.6
K <sup>+</sup>	15	26	0.2	98.7
CaCO <sub>3</sub>	55	91	4	92.7
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	14	18	10	28.6
SiO <sub>2</sub>	8.0	14	0.0	100.0
Se	0.300	0.524	0.0015	99.6
全不溶性固形分	9,320	16,400	145	98.4
電気伝導度 ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 25°C)	12,400	20,300	228	98.2

水温=24~25°C ; pH=4.7~5.8 ; 回収率=43~44%

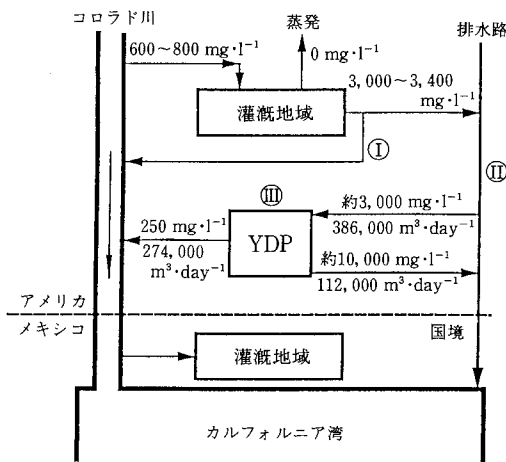


図-1 コロラド川下流ユマ近郊の灌漑用水循環システム

数字は塩濃度 (mg · l<sup>-1</sup>) または流量 (m<sup>3</sup> · day<sup>-1</sup>), YDP は, ユマ脱塩プラント

Fig. 1 Irrigation return water system in the lower Colorado region near Yuma  
YDP=Yuma desalting plant.

ない状況にある。そこで、IIに示したように最終的に全ての灌漑地域からの排水をまとめてカリフォルニア湾に流すことが決められた。しかしこの方法だけでは貴重な用水が大量に失われることになる。そこでIIIに示したユマ周辺で灌漑用水をROによって脱塩し、コロラド川の

塩濃度の低減と水の再利用を実行することになった。この脱塩プラントがYDP (Yuma Desalting Plant) である。

YDPは1992年に本格的操業を開始し、現在30,000haの灌漑地域から排出される塩濃度約3,000 mg · l<sup>-1</sup>のかん水386,000 m<sup>3</sup> · day<sup>-1</sup>を処理し、250 mg · l<sup>-1</sup>の灌漑用水を274,000 m<sup>3</sup> · day<sup>-1</sup>コロラド川へ還元している。灌漑用水の回収率は70~73%で、約10,000 mg · l<sup>-1</sup>に濃縮された塩水がカルフォルニア湾に排出されている。

### 3-2. 施設園芸、特に養液栽培での実用例

銚子から九十九里にかけての海岸地域には、多くの園芸施設がある。農業用水として主に地下水を使用しているが、塩類濃度が高く、また季節によって濃度が大きく変化する。施設園芸の中でも、特に養液栽培ではこれらの原水の影響を受け生育阻害が生じ易く問題になっている。(大谷敏郎, 1995 a ; 1996 b)

表-5に、海岸から数km以内の地点で実際に養液栽培に利用されている地下水の水質の例を示した。例Aは生食用ホウレン草、Bはバラ、C、Dはミニトマト、Eはミツバを栽培している。B~Dはロックウール栽培である。表中に示したとおり、極端なEの例では、電気伝導度が1.2 mS · cm<sup>-1</sup>もあり、NaやCl濃度も100 mg · l<sup>-1</sup>を越え、通常では全く栽培に適さない。その他の例でも、電気伝導度をはじめ、各イオンの濃度が高く、通常の栽培は困難である。そのため、雨水や水道水混合して塩類濃度を下げたり、肥料成分を工夫して、栽培を行っている。また、塩類濃度の絶対値が高いだけでなく、

季節的な変動や場合によっては1日の中でも変動があり、上記の方法だけでは対処できない場合が多くなっている。

(1) ナノろ過膜の利用

① 用海水質

表-6は、ナノろ過膜を使った地下水の処理の例である。ここで使用した膜は、NaClの阻止率が約90%のナノろ過膜である。装置は、操作圧力が数 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ から7 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ 程度で、造水能力が $5\text{m}^3\cdot\text{day}$ 程度の小型のものである。

Aの例では、原水の塩濃度は電気伝導度で $0.52\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$

表-5 養液栽培に使用している地下水の水質例 ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )

Table 5 Quality of ground water for hydroponics ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )

物質名	例	A	B	C	D	E
$\text{NO}_3^-$		0.6	14	9	8	30
$\text{Ca}^{2+}$		74	48	15	58	85
$\text{Mg}^{2+}$		12	13	7	20	26
$\text{K}^+$		3	4	9	5	31
$\text{Na}^+$		15	16	17	30	118
$\text{Cl}^-$		22	31	22	58	116
$\text{SO}_4^{2-}$		29	108	9	12	51
電気伝導度 ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ , $25^\circ\text{C}$ )		0.52	0.4	0.3	0.6	1.2
pH (-)		8	7.5	7.8	8.1	8.3

$\text{cm}^{-1}$ と高いが、得られる膜の透過液(用水)は $0.01\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ まで下がり、ほとんどの塩類が90%以上阻止されている。一方、Bの例は、硝酸イオン、硫酸イオン、炭酸水素イオンの濃度が高い例である。硫酸イオンと炭酸水素イオンは、それぞれ92%と82%の高い阻止率が得られるが、硝酸イオンは34%程度しか阻止されない。しかし全体では、ほとんどの塩類が阻止され、用水の電気伝導度は $0.01\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下となっている。このように、ここに示した比較的簡単な装置でも、地下水の塩濃度を十分下げることができる。なお、地下水水質にもよるが、維持費は、薬剤による数ヶ月に1回の膜の洗浄費、2から3年に1回の膜の交換費、それにポンプ用の電気料が必要である。膜による造水コストは、インシヤルコストを含めて簡単に試算すると、 $5\text{m}^3\cdot\text{day}$ 程度の装置で、現状では家庭用水道水より少し高目になる。

② 栽培への効果

Aの例では、灌漑循環方式で生食用ホウレン草を栽培している。原水用の井水の組成は季節によって大きく変動し、電気伝導度は $0.4$ から $0.8\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、pHも不安定で、生育が一樣ではなく、根が褐変することも多かった。脱塩装置の導入後は、原水の水質に関してはほとんど心配がなくなったため、現在では液温や室温、日射量など他の環境条件による生育の制御に関心が向くようになってきている。導入当初は、従来の養液組成での栽培に比べpHが変化する場合があり、養液の組成や濃度について肥料メーカーと検討を重ねた。また、少なくとも数ヶ月に一回は、クエン酸と水酸化ナトリウムでの膜の洗浄

表-6 分離膜による地下水の脱塩例

Table 6 Desalination of ground water with membrane technology

物質名	例	A			B		
		供給液 (原水) ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	透過液 (用水) ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	阻止率 (%)	供給液 (原水) ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	透過液 (用水) ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ )	阻止率 (%)
電気伝導度 ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ , $25^\circ\text{C}$ )		0.52	0.01	98	0.4	<0.01	>98
$\text{NO}_3^-$		0.6	0.08	89	14	9.2	34
$\text{Ca}^{2+}$		74	0.2	>99	48	5.7	88
$\text{Mg}^{2+}$		12	0.1	>99	13	1.1	92
$\text{K}^+$		3	0.5	83	4	0.9	78
$\text{Na}^+$		15	1.5	90	16	5.3	67
$\text{Cl}^-$		22	0.5	98	31	13.2	57
$\text{SO}_4^{2-}$		29	0.3	99	108	8.9	92
$\text{HCO}_3^-$		—	—	—	80	14.1	82
pH (-)		8	7	—	7.5	7.6	—

が必要である。

Bの例は、バラのロックウール栽培である。従来は、高塩濃度の地下水に対して、雨水や水道水を混合して対処していたが、塩濃度の変動が大きく、肥料組成のコントロールだけでは、生育を一定にするのが困難であった。また、ロックウール内への塩類集積も問題であった。しかし、ナノろ過装置の導入で、塩濃度の変動が少なくなり生育が安定し、また塩濃度自体も低くなったことから塩類集積の問題も大幅に改善された。水質に関しては、逆浸透装置の故障時の電気伝導度が $0.1 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ を超した際に生育異常を観察している。膜は、3日に1回の水による自動洗浄と半年に1回程度のアルカリ洗浄で十分性能を維持している。

いずれの例でも実際に使用している栽培者は、水質の安定化により生産や品質が安定し非常に満足している。

#### (2) 海水淡水化用逆浸透膜の利用

上記のナノろ過膜の他、通常は操作圧力の高い海水淡水化用の逆浸透膜を使用して、経済的に地下水を脱塩しているミニトマトのロックウール栽培の例もある。

原水の水質は、表-5中のDに示した通常で電気伝導度が $0.6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ の用水であるが、水質の変動幅が大きく電気伝導度で $1.0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 程度になることもある。ここで使用している膜は、海水淡水化用の膜で、世界市場を3分している膜の一つである。通常は大規模な設備で使用する膜のうち、最も小さい膜を使い、動力噴霧機用のプランジャーポンプをモーターで駆動して圧力を加えている。操作圧力は $20 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ で、1日当たり最大 $12 \text{ m}^3$ の脱塩水を作ることができる。脱塩性能は、原水が $1.0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ の時、脱塩水は、初期で $0.03 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 程度になる。約300日の稼働で脱塩水の電気伝導度が $0.3 \sim 0.4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ になると膜を交換する。実際は年100日の稼働であるので、約3年間使用できる。

この最大の特徴は、膜をまったく洗浄をしないことである。そのため、使い捨ての前処理フィルターを2個装着し頻りに交換すること、膜に加える圧力を通常の1/2程度にすること、水の回収率（原水の全処理量に対する脱塩水の割合）を30%程度と非常に低くすることなどによって、膜に対する負荷を軽減している。ここでの膜は塩素イオンに対する耐性が低く $1.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下での使用が推奨されているので、原水の塩素濃度が低ければ、さらに膜性能の低下は大幅に遅くなるものと思われる。また、装置は安価な部品を組み合わせ、高圧配管も含めてほとんどを自作している。これらのことから、洗浄操作が必要なく、メンテナンスも容易で、非常に経済的な脱塩装置が実現できている。

### 3-3. 水質改善と膜分離技術（大谷敏郎, 1996 b）

#### (1) 問題点

一般に、膜分離技術による農業用水の確保と水質改善を考えた場合、原水の水質および目的とする用水量と質によって様々な問題がある。

##### ① 海水淡水化

海水淡水化は、もともと飲料水の製造を目的としており、さらに実用化が中東地区で始まったこともあり、造水コストは $1 \text{ m}^3$ 当たり450~600円（上水用の試算、わが国の例）とかなり高価である。沖縄県の例では、各種の補助金で造水コストは前述の値の約1/3にまで圧縮しているが、それでも通常の水道原水に比べ割高となっている。従って、水の使用量や原価は、 $\text{m}^3$ 単位で厳密に算出することになる。

一方、通常は農業用水の用水計画では、各種の条件を考慮に入れた上で、1日あたりの用水量をmmで算出し、対象となる地域の面積を乗じて総用水量を算出する。 $1 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ で $1,000 \text{ ha}$ の地域に水を供給する場合を想定すると、 $10,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の供給量となり、全量を海水淡水化で補えば、日本でも有数の海水淡水化プラントとなる。

さらに、装置を渇水対策用だけで設計すると、長期間の運転休止期間が生じ、運転停止に伴う装置や膜の適性な保存が必要になる。装置自体は連続運転が最も効率が高いので、長期間の停止は効率の面からもマイナスである。また、装置は運転を続ける限り、膜の交換、洗浄剤、前処理剤、電気料などの維持費が必要になる。これらの装置に関する諸問題は、以下に挙げるいずれの原水でも共通である。

##### ② かん水の淡水化

原水をかん水井戸とした場合、塩濃度が低く浸透圧が高くないので、操作圧力を低く設定でき、前述のNF膜を用いての脱塩が可能になる。かん水にも、海岸近くで全体の塩濃度が高い場合、内陸部でも地質によっては塩濃度全体が高い場合や特定の塩濃度だけが高い場合などが考えられる。水道水の場合、これらのかん水井戸の原水はいずれも、主要な塩濃度だけではなく、地質からの重金属の溶出や有機物質の汚染を警戒して、十分に検討の上で、原水として採用する。かん水井戸が利用できる場合でも、塩濃度は高いが組成が常時安定している海水を原水として採用することが多い。

##### ③ 既存農業用水の水質改善

既存の農業用水の水質改善は、現在上水分野で研究が進められている膜による浄水法と対応する。上水の場合、原水は河川水で、分離の目的はトリハロメタンの前駆体である低分子量の有機物質である。農業用水の場合

も、原水は河川水である。分離の目的は、従来法では除去が困難で、しかも除去が不可欠な生育の障害になる金属イオンや農薬などであり、それぞれの場合にに応じた特定の物質が対象となる。この場合は、目的物質の完全な除去が要求される。RO膜であれば、完全な除去が可能で、しかも全体の塩濃度が低いので、余り高い圧力も必要ではないが、いわゆる純水に近い水を製造することになる。目的とする物質によっては、NF膜で比較的簡便に除去が可能である。しかし、NF膜については、農薬や有機酸などの有機物質についての阻止性能の検討や阻止メカニズムについてほとんど検討が行われていない。いずれにしても、高度な分離になるので、物質の特定と除去の必要性を十分に検討する必要がある。

#### ④ ため池、雨水の水質改善

ため池については、既存の手法では除去できない塩類や有機物質、金属イオンなどについて、既存の農業用水の場合と同様に完全な除去が求められる。いわゆる窒素やリンの除去に膜分離を使用することは不可能ではないが、今のところ全く経済性に合わない。

各農家で雨水をためて使用する場合には、雨水に含まれる硫酸イオンなどの微量イオンと雨水を集水する際に混入する微量イオンが分離の対象となる。例えば、亜鉛メッキの鉄骨の温室の屋根から集水した雨水に含まれる亜鉛イオンで、植物が生育障害を起こす場合もある。

③、④の場合も、有害物質が含まれず、単に塩濃度が高い場合には、②と同様な取扱いができる。

#### (2) 有利な点

##### ① 水質の許容範囲が広い

水道水に比べ、要求水質の範囲が広いのが最大の利点である。最初に述べたように、厳密な農業用水の基準がほとんどなく、問題が起きた時点で分析と対策を行っているとはいえ、水道水の基準に比べ、通常の土耕の場合植物体の水質許容範囲ははるかに大きいものと考えられる。このことは、多少の水質変化があっても、植物体や土壌がバッファ効果で変動を吸収できることを意味し、長期間使用して脱塩性能が低下するまで膜を使用することが可能になる。またある程度の原水水質の変動には装置側で対処しなくて良いことになり、コスト低減に寄与できる。

養液栽培の場合、土壌のバッファ効果が期待できず、水質の変動に植物体が対応しにくい。それでも前述のバラのロックウール栽培の例では、おおむねNaなら数 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下、Caなら40 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下、Mgなら20 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であれば、養液側の組成を変換することでなんとか対処できる。逆に言えば、原水の塩濃度が高くてこの程度まで脱塩できれば十分ということになる。

#### ② 小型の装置でも対応できる

養液栽培の場合、用水のロスが少ないので小型の脱塩装置で対応できる。例えば、前述のミニトマトのロックウール栽培の場合、1,650 $\text{m}^2$  (500坪)の温室で、12 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の装置を年間100日稼働させることで用水を賄うことができる。また、生食ホウレン草栽培の例では、1,320 $\text{m}^2$  (400坪)の温室で、5 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の脱塩水を毎日利用している。バラのロックウール栽培では、330 $\text{m}^2$  (100坪)の温室で、1 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ の装置で年間約100 $\text{m}^3$ の脱塩水を使用している。このような規模の温室では、湛液式でもロックウール栽培でも、概ね数 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ から10 $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ 規模の小型のRO装置で十分である。価格は、規模と自動化の程度にもよるが、100万円程度である。従って、十分個人の生産者でも設置が可能と考えられる。

なお、土耕栽培でも、適切な灌水方法を取り、水を節約すれば小型の装置の利用も可能であろう。

## 5. 今後の展開

施設栽培の環境に関する研究は、これまで自然の不安定な環境条件を一つ一つ制御する方向で進んできた。多くの研究は、温度、湿度、光の条件、ガス濃度等を制御の対象とし、最近では完全制御型のいわゆる植物工場まで開発されている。

しかし、生育に直接関係する環境要因で唯一検討が進んでいなかったのが用水の質の問題である。実質上、地下水を用水として利用する場合が多く、この質が生産を左右する。施設栽培における最後に残された自然との接点と言えよう。

施設園芸、特に養液栽培へ膜技術の応用を考えた場合、現時点で技術的にはほぼ確立されており、実際的な検討を積み重ねることで、実用化に結びつくと考えられる膜分離技術の応用分野は、MF膜による養液の除菌とNF膜やRO膜による地下水の脱塩である。

膜分離技術を使った農業用水の確保や水質の改善では、造水コストが高いこと、農業側で必要と見積もる水の量が多すぎることなどが大きな問題であった。しかしながら、高性能な分離膜が開発され効率的に造水が可能になったことや、浄水分野への応用がはじまり膜と膜装置の価格が大幅に低下することが予想されていることなどから、今後造水コストは大きく下がるものと考えられる。また、用水量も灌漑方法の工夫などによって、より少なくすることが可能であろう。特に施設園芸の場合、精密な灌水が可能であり用水の使用量を抑えることができ、さらに、用水の水質も重要視されることから、膜分離技術の応用が期待できる。わが国における膜分離技術



の農業分野への応用は、まず施設園芸、中でも養液栽培の分野で信頼性と経済性が高く比較的小型の農業用膜分離装置が開発されることで、大きく広がるものと期待できる。

一方、用水量自体を減らすには、灌漑方式の見直しその他、今後用水のリサイクルが積極的に検討されるべきである。(大谷敏郎, 1995 b; Ohtani *et al.*, 1996 c) すなわち現状の上耕栽培では、用水の地下への流失は避けられず、またそれに伴う肥料成分などの汚染が問題となっている。地下水や暗渠によって集めた排水から生育阻害物質や過剰な成分を分離した上で、再利用することも膜分離技術により可能となろう。施設園芸では、このような用水のリサイクルは比較的規模が小さく実現可能と考えられ、用水の確保の面からも環境汚染の防止の面からも検討されるべき問題である。大規模な施設園芸の場合、さらに施設の屋根から集水する雨水の利用も、用水量の確保はもちろん、上質の用水を確保する意味からも、積極的な利用を検討する必要がある。施設園芸では地下水、リサイクル水および雨水の総合的な利用が、質の問題も含めて検討されるべきである。これらの検討、特にリサイクルの問題は、いずれ施設園芸分野だけではなく、広く農業全体の水利用の中で考えてゆくべき問題と確信している。

膜分離技術は、他にも気体を分離対象にするガス分離膜や非常に強固な無機材質膜などが研究されており、一部で実用化が始まっている。農業分野での広範囲な膜分離技術の展開を期待したい。

## 引用文献

- Ammerlaan, A.C.F. and Moody, C.D. (1992) : Yuma desalting plant. Membrane degradation during test operations, *Desalination*, **88**, 33-49.
- 伊東 正 (1994) : 養液栽培技術の特徴, 施設園芸ハンドブック, 437, (社)日本施設園芸協会, 東京.
- Marinas, B.J. and Selleck, R.E. (1987) : Desalination of agricultural drainage return water. Part II : Analysis of the performance of a 13,000 GDP RO unit, *Desalination*, **61**, 263-274.
- 大谷敏郎 (1993) : 膜分離技術の現状, 関東の農業気象, **19**, 9~21.
- 大谷敏郎, 佐瀬勘紀, 豊田裕道 (1995 a) : 園芸施設の動向と環境問題 (Ⅲ) —膜分離技術の施設園芸への適用—, *農業施設*, **26**, 21~27.
- 大谷敏郎 (1995 b) : 養液やかんがい水のリサイクル化と膜技術の可能性, *研究ジャーナル*, **18**, 25~31.
- 大谷敏郎, 鍋谷浩志 (1995 c) : 多彩な用途に対応するナノ分離膜の新展開, *化学装置*, **37**, 46-51.
- 大谷敏郎 (1996 a) : 膜分離技術による農業用水の確保と水質改善 (1), *農業および園芸*, **71**, 1105~1109.
- 大谷敏郎 (1996 b) : 膜分離技術による農業用水の確保と水質改善 (2), *農業および園芸*, **72**, 1219~1222.
- Ohtani, T., Sase, S. and Okushima, L. (1996 c) : The control of chemical components of the nutrient solution in hydroponics with nanofiltration membrane, *Acta Horticulturae*, **440**, 217-222.
- Schippers, J.C. (1981) : Desalination by reverse osmosis in horticulture, *Acta Horticulturae*, **119**, 37-51.

受稿年月日：1997年1月17日

受理年月日：1997年3月20日