

逆浸透（RO）膜による塩水化した 地下水の脱塩技術

先端プロ（宮城県）施設園芸コンソーシアム
未利用エネルギーワーキンググループ

目次

1.	緒言	1
1.1.	背景	1
1.2.	目標	1
2.	逆浸透膜（RO）装置の導入に向けての基礎的技術	2
2.1.	逆浸透膜装置（RO装置）導入に向けて	2
2.2.	逆浸透（Reverse Osmosis）の原理	3
2.3.	RO装置の基本構造	4
2.4.	RO装置の効果	5
2.4.1.	得られるRO水の導電率（EC）	5
2.4.2.	操作圧力とRO水回収率（供給水から何%のRO水が得られるか）	7
2.4.3.	水温と製造量	7
2.5.	RO装置の設置手順	7
2.5.1.	現地圃場の地下水の水質調査	7
2.5.2.	栽培に必要な水量の試算	8
2.5.3.	設置後（初期対応）	8
2.6.	RO膜の薬品洗浄の方法	10
2.7.	RO装置を停止時するときの注意事項	11
2.8.	RO装置の凍結防止対策	12
2.9.	ランニングコスト	12
3.	RO装置導入時の問題点やその解決例 ～実証試験での結果を中心に紹介～	13
3.1.	岩沼実証地における8インチRO試作装置の導入	13
3.1.1.	新井戸からの砂の流入	13
3.1.2.	地下水くみ上げポンプの配管水漏れ（エアかみによる真空破壊）	14
3.1.3.	薬品洗浄の手順	15
3.1.4.	岩沼実証地の地下水の導電率（EC）の変化	17
3.1.5.	運用時のRO水製造量ランニングコスト（詳細）	18
3.2.	仙台実証地の自作RO装置（仙台市若林区）	19
3.2.1.	RO装置の作製	19
3.2.2.	地下水の導電率（EC）の上昇	20
3.2.3.	RO膜の洗浄（鉄・マンガンが含有量が高い場合）	20
3.3.	必要水量の比較的小さい圃場における市販の逆浸透膜装置の利用	21
3.3.1.	市販業務用逆浸透膜装置の概要	21
3.3.2.	導入に適する条件	21
3.3.3.	システムの構成	21
3.3.4.	造水時の動作設定	22
3.3.5.	メンテナンス	24
3.3.6.	造水しない時期の動作設定	27
3.3.7.	費用	28

1. 緒言

1.1. 背景

東日本大震災の津波が浸水した地域では施設園芸の灌水に利用していた地下水が塩水化し、イチゴやキュウリの灌水に用いることができなかった。一部では、上水道(市水)を利用して農業を再開し、遠く離れた水源から真水をトラックで運搬して農業を再開させる方もいた。しかし、圃場に上水道を導入する場合は高額な工事費が掛かること、水道を利用しているところでは高額な水道代が掛かること、真水を運搬する場合は労働力の確保が農業再開の課題となっていた。

また、震災復興の備品として非常用の海水淡水化装置や一般的な水道で利用する逆浸透膜(RO)装置が導入されたが保安フィルターの交換作業や加圧ポンプのオイル交換が頻繁であったり、運転操作方法が確立されていないことからRO膜に流路閉塞が生じたり、冬期にはRO装置が凍結するといった問題があった。そこで逆浸透(RO)膜を利用した地下水の脱塩技術を開発し、津波被災農地での農業再開を支援するため、亘理町、岩沼市、仙台市の実証圃場にて逆浸透膜による地下水脱塩技術の実証研究を行った。

1.2. 目標

農業用逆浸透膜装置を現地導入する際の課題抽出とRO膜のメンテナンス方法を検討し、RO膜モジュールの寿命を12ヶ月以上にする。また脱塩に必要なランニングコストを水道代(市水)の1/2以下とする。

2. 逆浸透膜（RO）装置の導入に向けての基礎的技術

2.1. 逆浸透膜装置（RO 装置）導入に向けて

海水淡水化や製薬、半導体産業等において RO 膜を用いた純水製造（淡水化）技術は確立されている。近年では家庭用の浄水器として RO 装置も販売されている。多くの場合、RO 装置の供給水は水道水あるいは水道水レベルまで高度に処理された地下水であるため、RO 膜に掛かる負荷は少なく高価な RO 膜の寿命を延ばしている。工業分野での水処理技術はスケールメリットが大きく、小規模な装置の導入はイニシャルコストおよびランニングコストが割高となってしまう。

農業では、作物、作期、生育段階および天候で栽培に必要となる水量が変動するため需要期と非需要期で要求される水量が変動する。RO 装置等の水処理装置を導入する際は需要期を想定し機器を選定する必要があり、非需要期には過剰な装置となってしまう。

また、東日本大震災直後に導入された RO 装置の多くは、適切なメンテナンスが行われず RO 膜が詰まったり（＝流路閉塞を起こしたり）、除鉄・除マンガン等の過度の前処理を要求するものが多く、さらには冬期に凍結する装置もあった。RO 装置の導入経費も高価であり、悪いイメージが先行していた。

本実証研究では、導入コストを低減するため、過度の前処理装置を必要としないシステムを基本とした。また、ランニングコストを低減するため、最も高価な RO 膜は薬品洗浄により脱塩能力を回復させた。電気代を低減するため、低圧タイプ RO 膜（供給圧力 0.5 MPa (5 kgf/cm²) 程度）を利用した。さらに、冬期に RO 装置の凍結を防止する運転方法、保管方法の検討を行い長期間安定的に稼働する RO 装置の運転操作方法が明らかとなった。

本書では、RO 装置の原理や基本構造を説明し、導入に向けて検討する項目、RO 膜の薬品洗浄手順等を説明する。

2.2. 逆浸透 (Reverse Osmosis) の原理

半透膜をはさんで水と海水をおくと、海水を薄めるように水は半透膜を通して海水側に入る。海水側の水面は次第に高くなり、平衡状態になる。この圧力差が浸透圧と呼ばれ、海水の場合約 25 気圧 (2.5 MPa) になる (図 2.1)。

海水側に浸透圧以上の圧力をかけると海水から真水を取り出すことができる。真水を製造する能力は、半透膜 (逆浸透膜 : RO 膜) の膜面積、圧力、海水の塩濃度、水温等の影響を受ける。大きい膜面積を得るため工業的には図 2.2 のように、供給水流路材、浸透膜 RO 膜、透過水流路材を渦巻き (スパイラル) 状にまとめてモジュール化されている。

一方から塩水化した供給水を浸透圧よりも大きい圧力で RO 膜に通水すると、一部は RO 膜を透過して透過水流路材を通り中心パイプから透過水 (RO 水) として排出される。

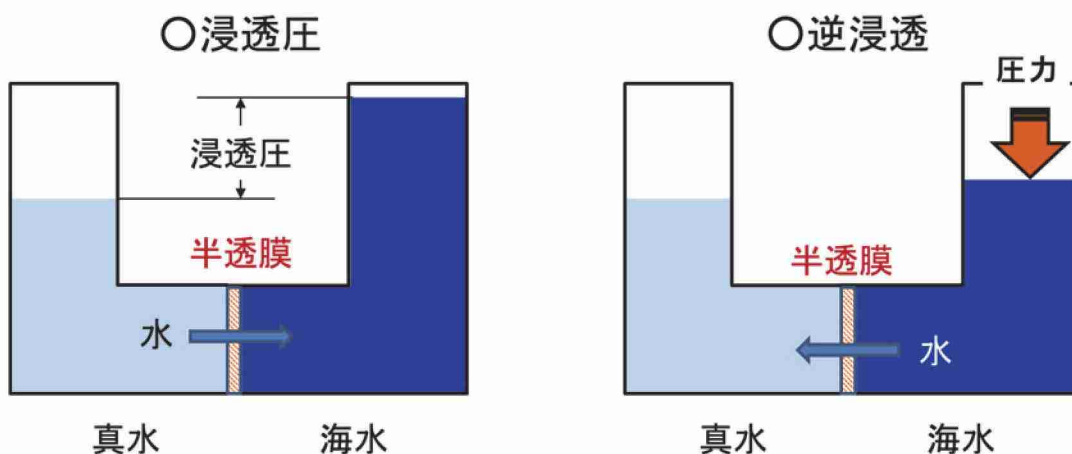


図 2.1 浸透圧と逆浸透による RO 水 (真水) 製造

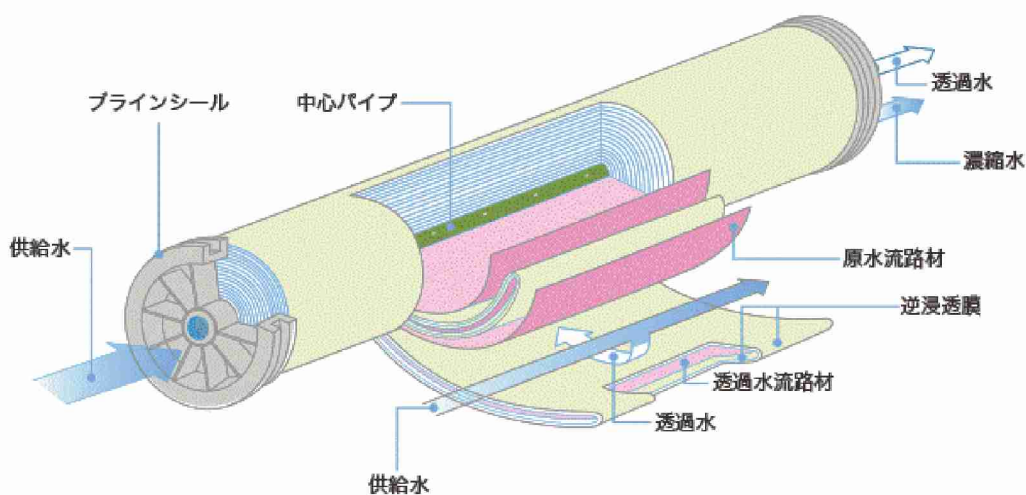


図 2.2 モジュール化された逆浸透膜

(http://www.toray-watertreat.com/service/ser_002_01.html より, accessed2018-02-01)

2.3. RO装置の基本構造

モジュール化された逆浸透膜（RO膜）に、供給水（地下水）を0.5 MPa(5 kgf/cm²)程度の圧力で供給する加圧ポンプ、圧力調整弁、保安フィルターで構成される。RO膜では一部が透過し真水となり、塩濃度が高くなった供給水は排水される(図2.3)。排水量を減少させるため一部を供給水に戻す機能を持ったものも多い。

補器類としては、供給水やRO水製造量をモニタリングするための流量計、操作圧力をモニタリングするための圧力計などがある。RO膜のスケーリングを防止する目的で、一定時間ごとに排水側の圧力調整弁を解放し、RO膜面の流速を増加させ流路材の堆積物を洗い流すフラッシングを自動で行う制御装置も装備される(図2.4)。RO装置の一例として図2.5に本実証研究で使用した装置を示した。

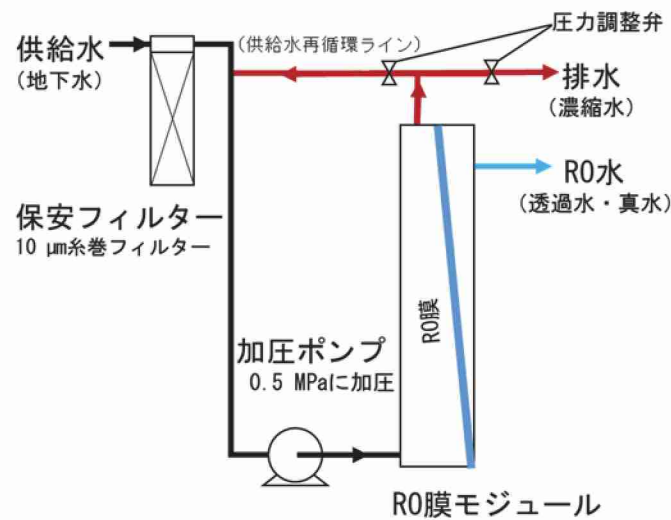


図 2.3 RO装置の基本構造

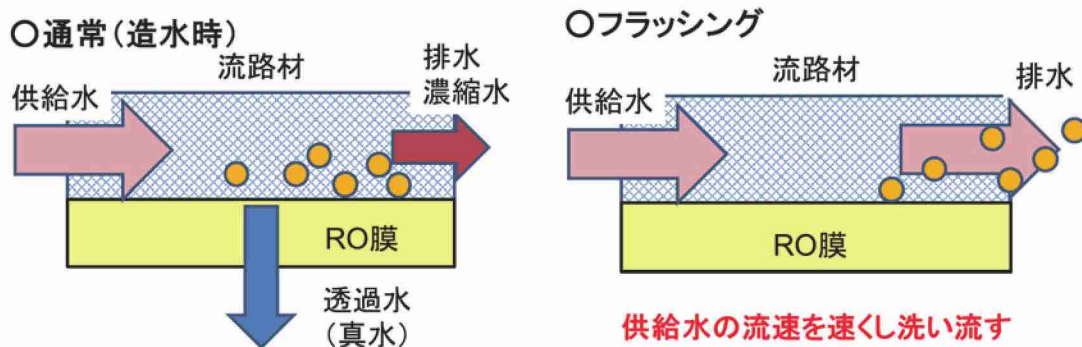


図 2.4 RO膜のフラッシング効果



8 インチ RO 装置 (膜面積 25m²)



可搬型 RO 装置 (膜面積 24 m²)



4 インチ RO 装置 (膜面積 14 m²)



※業務用 RO 装置 (小型水道用)

図 2.5 実証実験に利用した RO 装置

2.4. RO 装置の効果

塩水化した地下水から、RO 装置によって得られる RO 水の状況をモデル試験により検証した。モデル試験には、小型モジュール膜 (DAW TW30-1812-75、膜面積 0.38 m²) を用いて、供給水の塩濃度は食塩で 0-0.5 % で調製し供給圧力 0.5 MPa (5 kgf/cm²) で試験した。なお、RO 水の目標値としては野菜栽培 (土耕) で上限とされている。0.75 mS/cm (dS/m) とした。

参考文献：千葉農試 1999 「野菜の塩分過剰障害」

2.4.1. 得られる RO 水の導電率 (EC)

0.5 % (9.1 mS/cm) の塩濃度の供給水でも脱塩率は 90 % 以上を確保し、0.75 mS/cm 以下の RO 水を得ることができる (図 2.6、2.7)。ただし塩濃度の上昇に伴い RO 水製造量は減少し、EC 5.0 mS/cm で 50 % 程度の RO 水製造量になる (図 2.8)。RO 水の生産性低下は運用時の電気代の増加に繋がるため、現地の地下水の塩濃度の把握は重要である。

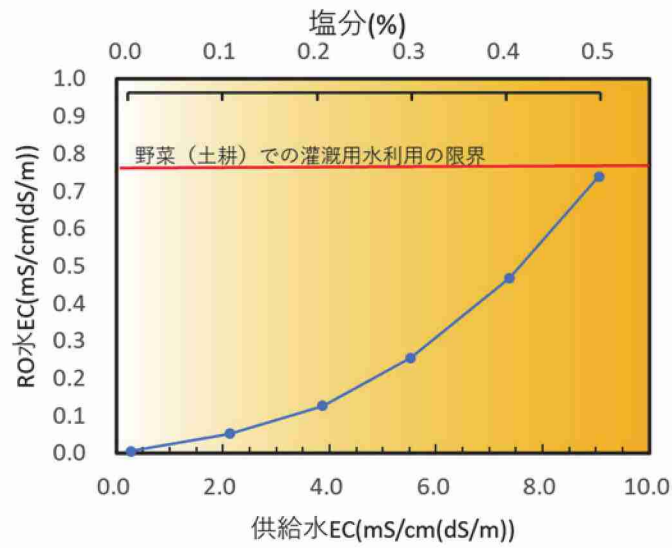


図 2.6 供給水の塩濃度と RO 水の EC の関係 (供給圧力、0.5 MPa)

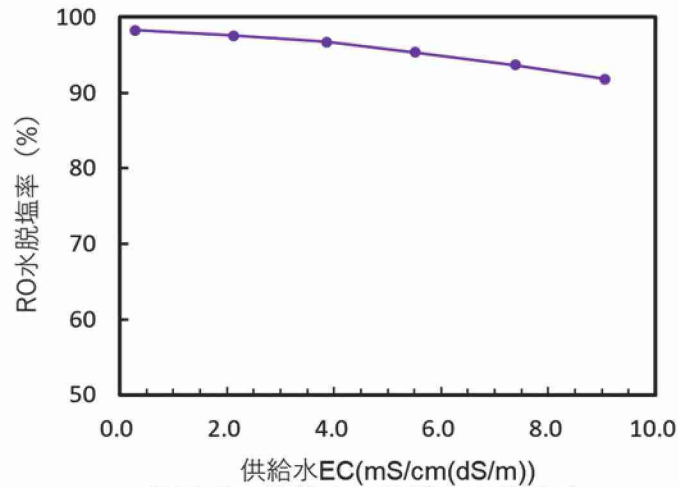


図 2.7 供給水の塩濃度と脱塩率

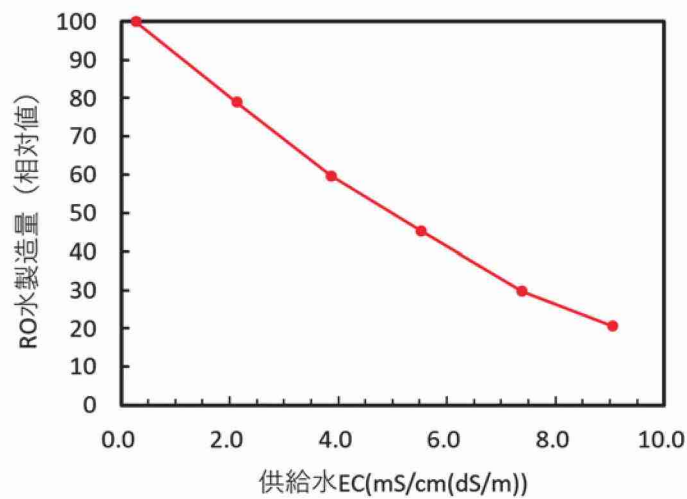


図 2.8 供給水の塩濃度と RO 水製造能

2.4.2. 操作圧力とRO水回収率(供給水から何%のRO水が得られるか)

RO膜への供給圧力とRO水製造量の関係を、供給水量を100%とした際の回収率として示した。なお、結果は塩濃度の最も高い0.5%(0.91 mS/cm)と対照となる水道水のみを示した(図2.9)。操作圧力の上昇に伴い、RO水の回収率は上昇した。

本試験では、回収率が25%を下回っていたが、これはRO膜への供給水量が多かったことが原因である。実際のRO装置では、RO膜は多段で設置されることが多く膜面積に対する供給水量は減少すること、また排水の一部は再循環されることからRO装置全体でのRO水回収率は通常30-50%になる。

2.4.3. 水温と製造量

水温が変化すると、水の粘性は変化する。低温になると粘性は増加し、高温になると粘性は低下する。そのため水温の変化に伴いRO水製造量も影響を受ける(図2.10)。

地下水は一年間ほぼ一定の水温で安定しているがRO膜のカタログ値(室温で測定)に比べて製造能力が低下することもあるため注意を払う必要がある。

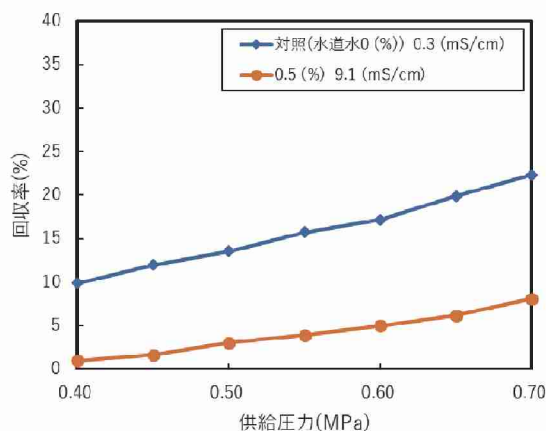


図 2.9 操作圧力と RO 水回収率

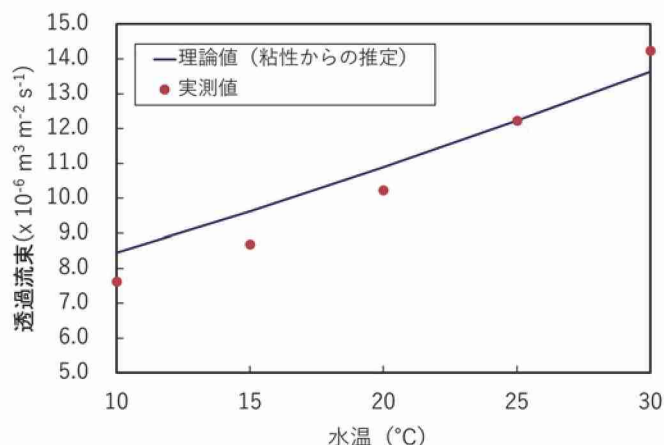


図 2.10 水温と RO 水製造量の関係
透過流束は単位時間および単位面積あたりの RO 水製造量を表す

2.5. RO 装置の設置手順

2.5.1. 現地圃場の地下水の水質調査

2.5.1.1. 電気伝導率(導電率、EC)

地下水の塩濃度を把握するため電気伝導率計により導電率(EC)を調査する。地下水の導電率は一定ではなく変化し、RO装置導入後も電気伝導率計によるモニタリングは

必要となるため、購入することが望ましい。ハンディータイプの安価な電気伝導率計も販売されているが、測定可能な導電率があるため現地圃場用に電気伝導率計を購入する場合は測定範囲に気をつける必要がある。

参考：堀場製作所製 コンパクト電気伝導率計 LAQUAtwin EC-33B
(測定範囲 0~199.9 mS/cm 定価 ¥29,000-)

2.5.1.2. その他成分

地下水の水質分析を実施することで膜の汚れの原因を推定できるため、水質分析することをお勧めする。一般水質分析は水道法に基づく飲用水分析（24項目）であれば一点あたり15,000円程度で実施できる。

鉄分やマンガンは、RO膜を詰まらせる主要な成分である。金気（カナケ）水の場合は注意が必要である。

除鉄・除マンガン装置の導入を考慮する必要があるが導入経費およびランニングコストが余計に掛かることになる。RO膜の薬品洗浄の必要経費と、除鉄・除マンガン装置の導入・運用経費との比較が必要となる。なお、RO膜は塩素に弱いため処理水の残留塩素の除去も必要となる。

2.5.2. 栽培に必要な水量の試算

RO装置で製造されるRO水量は運用に伴い膜の汚れ等により、RO水製造量は低下する。地下水の塩濃度（EC）が低下しない限り、RO水製造量が増加することはない。RO装置の導入を検討する際は、夏期の最も栽培用水を必要とする時期を基本に余力のあるRO装置の選定が必要である。各メーカーからRO装置が販売されているが基本的には4インチ径のモジュール膜、あるいは8インチ径のモジュール膜を用いたRO装置が一般的である。概ね水道水では、4インチ膜2本の場合7m³/d、3本の場合は10m³/d、8インチ膜では1本で20m³/dの製造能力である。現地の地下水の塩濃度を考慮し必要なスペックを決定する。

2.5.3. 設置後（初期対応）

地下水の水質は千差万別で同じ水質の地下水はない。RO装置の洗浄間隔なども導入場所や装置より最適な設定をする必要がある。RO膜の洗浄には、日常的なフラッシングと数ヶ月ごとの薬品洗浄があり、RO膜のフラッシング間隔（数時間ごとに数分）の決定、薬品洗浄の時期など日々の装置チェックが必要である。

RO水製造量やRO膜に掛かる圧力の変化などからRO膜の汚れ具合を推定する。

参考：水質分析会社による水質分析結果の一例



No. HUA0006
 水道法第20条第3項 登録水質検査機関第71号
 株式会社 日吉
 水質検査部門管理者

検査結果判定書

農研機構 食品研究部門 様

依頼日 2018年1月23日 付けて、当社に依頼された水質検査の結果は次の通りです。

採水者	2018年1月22日 14:30 ~		前日; 当日;		試料区分		水温				
	時間	地点	地下水	地表水	項目	基準値	項目	単位			
一般細菌	0	個/ml ≤100	検査結果	0	クロロ酢酸	mg/L ≤0.02	検査結果	—	単位	検査結果	単位
大腸菌	不検出	検出されな いこと	—	—	クロホルム	mg/L ≤0.06	—	—	—	—	—
カドミウム及びその化合物	0.0003未満	mg/L ≤0.003	—	—	ジクロロ酢酸	mg/L ≤0.03	—	—	—	—	—
水銀及びその化合物	—	mg/L ≤0.0005	—	—	ジプロモクロロメタン	mg/L ≤0.1	—	—	—	—	—
セレン及びその化合物	0.001未満	mg/L ≤0.01	—	—	臭素酸	mg/L ≤0.01	—	—	—	—	—
鉛及びその化合物	0.004	mg/L ≤0.01	—	—	トリハロメタン	mg/L ≤0.1	—	—	—	—	—
砒素及びその化合物	0.004	mg/L ≤0.01	—	—	トリクロロ酢酸	mg/L ≤0.03	—	—	—	—	—
六価クロム化合物	0.005未満	mg/L ≤0.05	—	—	プロモジクロロメタン	mg/L ≤0.03	—	—	—	—	—
亜硝酸態窒素	0.03未満	mg/L ≤0.04	—	—	プロモホルム	mg/L ≤0.09	—	—	—	—	—
シアン化合物イオン及び塩化シアン	—	mg/L ≤0.01	—	—	ホルムアルデヒド	mg/L ≤0.08	—	—	—	—	—
亜硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	0.2未満	mg/L ≤10	—	—	亜鉛及びその化合物	mg/L ≤1.0	—	—	—	—	—
フッ素及びその化合物	—	mg/L ≤0.8	—	—	アルミニウム及びその化合物	mg/L ≤0.2	—	—	—	—	—
ホウ素及びその化合物	0.1	mg/L ≤1.0	—	—	鉄及びその化合物	mg/L ≤0.3	—	—	—	—	—
四塩化炭素	—	mg/L ≤0.002	—	—	銅及びその化合物	mg/L ≤1.0	—	—	—	—	—
1,4-ジオキサン	—	mg/L ≤0.05	—	—	錳及びその化合物	mg/L ≤200	—	—	—	—	—
ジクロロメタン	—	mg/L ≤0.04	—	—	マンガン及びその化合物	mg/L ≤0.05	—	—	—	—	—
テトラクロロエチレン	—	mg/L ≤0.02	—	—	塩化物イオン	mg/L ≤200	—	—	—	—	—
トリクロロエチレン	—	mg/L ≤0.01	—	—	カルシウム, マグネシウム等 (硬度)	mg/L ≤300	—	—	—	—	—
ベンゼン	—	mg/L ≤0.01	—	—	蒸発残留物	mg/L ≤500	—	—	—	—	—
塩素酸	—	mg/L ≤0.6	—	—	陰イオン界面活性剤	mg/L ≤0.2	—	—	—	—	—
判定	検査結果において水道法水質基準値に不適合の項目があります。(Xの検査項目)										
特記事項											
検査期日	2018年1月23日	受付日	2018年1月23日	報告日	2018年1月31日	検査区分責任者					

2.6. RO 膜の薬品洗浄の方法

RO 水の製造量が減少した際には酸やアルカリにより薬品洗浄を行う。

金属イオン系の汚れはクエン酸や塩酸などの酸により溶解させ洗浄することができる。一方有機物系の汚れは水酸化ナトリウム等のアルカリにより溶解させ洗浄する。

まず、酸やアルカリの洗浄液をタンクに用意する。供給水のバルブを閉め、RO 膜の排水および RO 水排出口を薬液タンクに戻す。水中ポンプ等により保安フィルターと加圧ポンプの間から洗浄液を送水する(図 2.11)。使用した保安フィルターに洗浄液を通水すると、糸巻きフィルターにトラップされた汚れが溶解し RO 膜を詰まらせる可能性があるので薬品洗浄の際は保安フィルターを通さないほうが良い。

洗浄液の濃度はそれぞれ 0.5-1 %とし薬液タンクには 20-40 L の洗浄液を準備する(図 2.12)。最初 30 分間は加圧ポンプも稼働させ強水流で洗浄液を浸透させる。その後 30 分間は加圧ポンプを停止し水中ポンプのみの弱水流で浸透させ、膜の汚れを溶解させる。再度 30 分間加圧ポンプも稼働し高水流で溶解した汚れを洗い流す。最後に薬液を中和し排水する。酸、アルカリの順に薬品洗浄を行い汚れがひどいときには再度、適した薬品洗浄を行う。

クエン酸はホームセンターや薬局で清掃用に販売されているものでもよい。溶液を調製する際はバケツやビーカー等で少量の水でクエン酸を溶解し、全てが溶解した後薬剤タンクにて所定の濃度に合わせる。クエン酸洗浄時の pH は 2 程度となる。

水酸化ナトリウムは「劇物」となるため、購入にあたっては身分証明書や印鑑が必要となり、試薬取扱店や調剤薬局等で購入できる。試薬では液状のものもあるが、粒状のものの方が取扱いは安全かつ容易である。水酸化ナトリウムを溶解する時もバケツ等に少量の水で溶解するが、水酸化ナトリウム溶解時には溶解熱が発生しガスも発生するため風通しのよいところで作業すること。薬剤タンクにて濃度を調製する。水酸化ナトリウム洗浄時の pH は 11 程度となる。

また、鉄やマンガン汚れが激しくクエン酸のみで膜性能が復帰しない場合は、温泉アク洗浄用の洗剤(クエン酸主体の有機酸)を利用することで、RO 膜の性能は回復する。

酸洗浄・・・金属イオン汚れに効果(クエン酸、塩酸)

アルカリ洗浄・・・有機物汚れに効果(水酸化ナトリウム)

(一例)

濃度： 0.5-1.0 %程度

薬洗時間(酸あるいはアルカリ洗浄時の 1 工程)：

30 min(強水流) → 30 min(弱水流) → 30 min(強水流) → 中和

クエン酸(分子量 192)は 3 価、水酸化ナトリウム(分子量 40)は 1 価であるため反応式は下記のとおりとなり、クエン酸:水酸化ナトリウム=1:1.6の質量比で中和する。



(質量比 クエン酸 : 水酸化ナトリウム = 1 : 1.6)

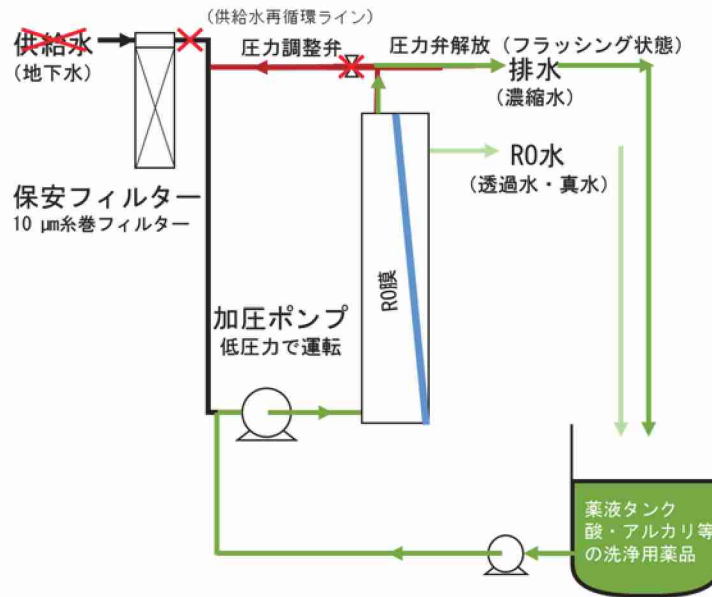
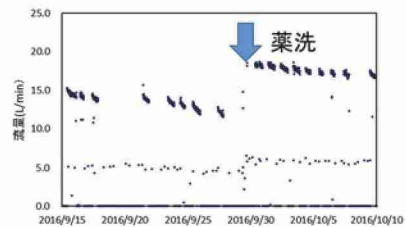
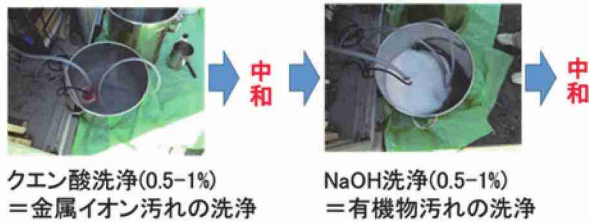


図 2.11 薬品洗浄時の配管の状況

RO膜の薬品洗浄手順



薬品洗浄により真水（RO水）の製造量は回復

図 2.12 薬品洗浄時の状況と RO 水製造量の回復状況

2.7. RO 装置を停止時するときの注意事項

利用を開始した RO 膜は、乾燥を防ぐため水につけておく必要がある。しかし供給水には塩素が含まれないため、RO 装置内に藻類やバクテリアが繁殖する恐れがある。そのため RO 水が必要ないときも 1 日に数回フラッシング運転し RO 装置内の水を新鮮に保つ必要がある。

供給水が確保できない場合は、RO 膜の薬品洗浄をした後、防腐効果のある亜硫酸ナトリウム 1 %水溶液等で装置内の水を置換すると RO 膜の保管は可能である。薬品で置換された RO 膜は冷蔵庫内に保管できればなお良い。

2.8. RO 装置の凍結防止対策

最低気温が氷点下となる東北地方において RO 装置の凍結防止対策は必須である。地下水は冬期でも一定温度であるため、低温時に地下水を通水すると RO 装置は凍結しない。実証実験では 6 時間ごとに 5 分間フラッシング(通水)している RO 装置を、外気温が氷点下になるときは 1 時間ごとに 5 分間フラッシングにすることで、外気温が -8°C 以下となったときにも凍結することなく安定して稼働することを確認した。

また、冬期全く栽培用水を利用しない時期には、抗菌効果があり凍結防止効果も期待でき 20 %エタノールで RO 装置内を置換することで 液体の融点は約 -10°C となり、RO 装置の凍結による破損も無く翌春に問題なく稼働することを確認した(図 2.13)。

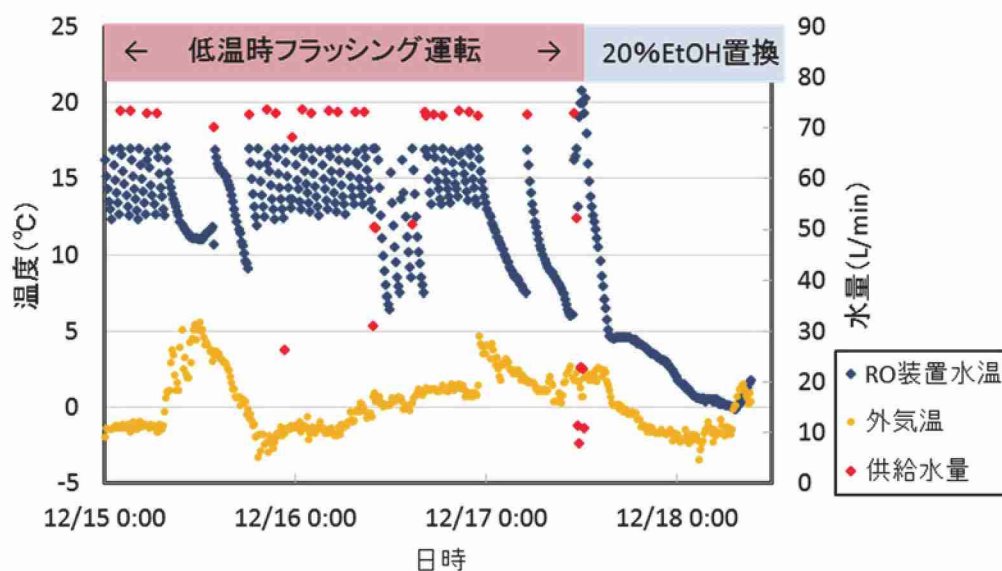


図 2.13 RO 装置の凍結防止運転の状況

2.9. ランニングコスト

岩沼実証地における 8 インチ RO 装置の実績(2016 年)

8 インチ RO 試作装置((有) 東京マシン製作所にて試作、試作費 450 万円)

RO 膜 8 インチモジュール膜 公称膜面積 $35\text{ m}^2 \cdot \cdot \cdot 1$ 本

消費電力 3 kW (井水汲上ポンプ&加圧ポンプ)

RO 水製造量:	1666.4 m^3
稼働時間:	1860.0 h (0.89 m^3/h)
薬品洗浄:	3 回
保安フィルター交換:	3 回
RO 膜:	無交換 (4 年目)

装置の減価償却費を除くランニングコスト

101.1 円/ m^3 -RO 水

3. RO 装置導入時の問題点やその解決例

～実証試験での結果を中心に紹介～

3.1. 岩沼実証地における 8 インチ RO 試作装置の導入

長期間安定的に稼働する RO 装置の開発を目指し、宮城県岩沼市早股松原のキュウリ温室に 8 インチ RO 装置を導入した。導入した RO 装置は 20 m³/d の RO 水製造量を想定した(図 3.1)。



図 3.1 現地に設置した RO 装置（手前）および RO 装置の内部

3.1.1. 新井戸からの砂の流入

新しい井戸では砂の流出が多く落ち着くまでは時間が掛かる。1 日以上汲み上げても砂の流出量が減少しなかったため、砂取り器（特注）を設置した(図 3.2、3.3)。



図 3.2 市販砂取り器と吸管内に堆積した砂



図 3.3 特注の砂取り器、直径 300mm 円筒容器内にストレーナ 3 個を設置
100 メッシュ SUS 製ストレーナは腐食するため年 1 回交換

3.1.2. 地下水くみ上げポンプの配管水漏れ（エアかみによる真空破壊）

地下水くみ上げポンプ（非インバータ）の吸管部分で水漏れ（空気漏れ）が生じていた（図 3.4）。原因はポンプ ON-OFF 時に発生する振動で材質の異なる部分に緩みが生じたようである。接続部が砲金製のバルブソケットに交換したところ当該部分の緩みはなくなった（図 3.5）。



図 3.4 水漏れを起こしたポンプ 1 次側の逆止弁と塩ビ管バルブソケット

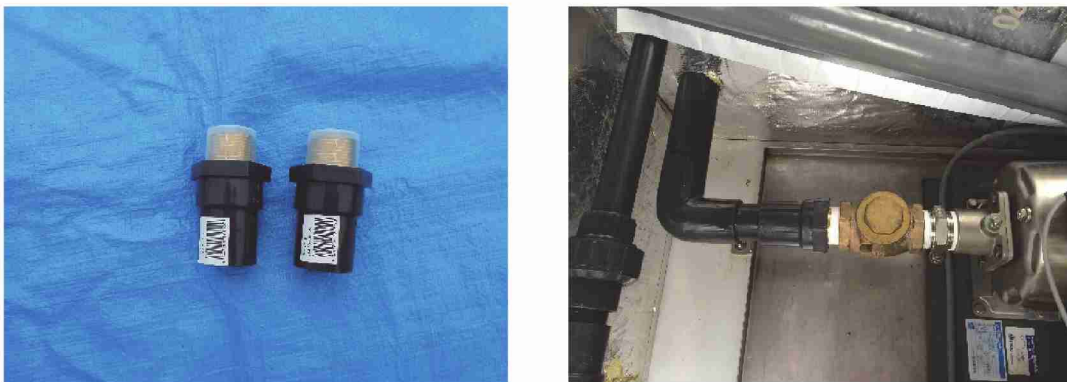
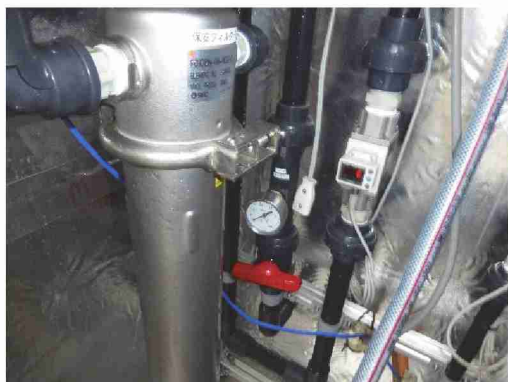


図 3.5 砲金製バルブソケットおよびポンプ 1 次側の配管

3.1.3. 薬品洗浄の手順

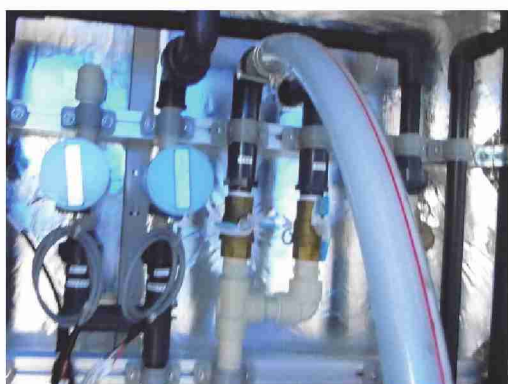
本装置は設計当初から薬品洗浄を前提としたため、保安フィルター後に薬品洗浄給水口および排水取出口、RO 水取出口が設置されている(図 3.6)。



①供給水バルブを閉める



②薬洗用供給水口(左)、RO 水口(左)に配管



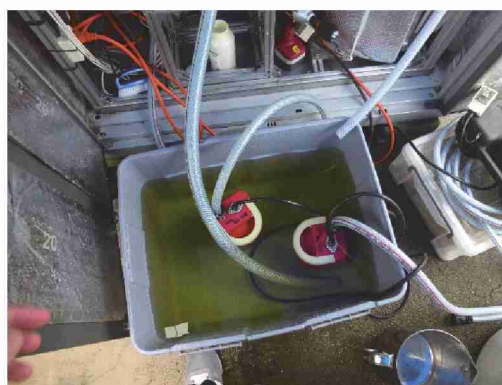
③排水口に配管&バルブを開ける



④給水&RO 水のバルブを開ける



⑤タンクに洗浄液を準備



⑥薬品洗浄開始してしばらくすると汚れが出てくる(クエン酸洗浄)。



⑦アルカリ洗浄



⑧保安フィルターを交換する。



⑨使用前後の保安フィルター
10 μm 糸巻きフィルター 500 円程度/個



⑩RO 装置の圧力および流量を調整
供給水量 45-50 L/min



⑪RO 水製造量(@0.65 MPa) 16.7 L/min



⑫排水量 30-40 L/min に調整

図 3.6 8 インチ RO 装置の薬品洗浄手順の一例

岩沼実証地の地下水はアルカリ洗浄で溶解する有機物系の汚れが多いため、アルカリ洗浄を複数回すると RO 装置の製造能力は初期流量まで回復した(図 3.7)。

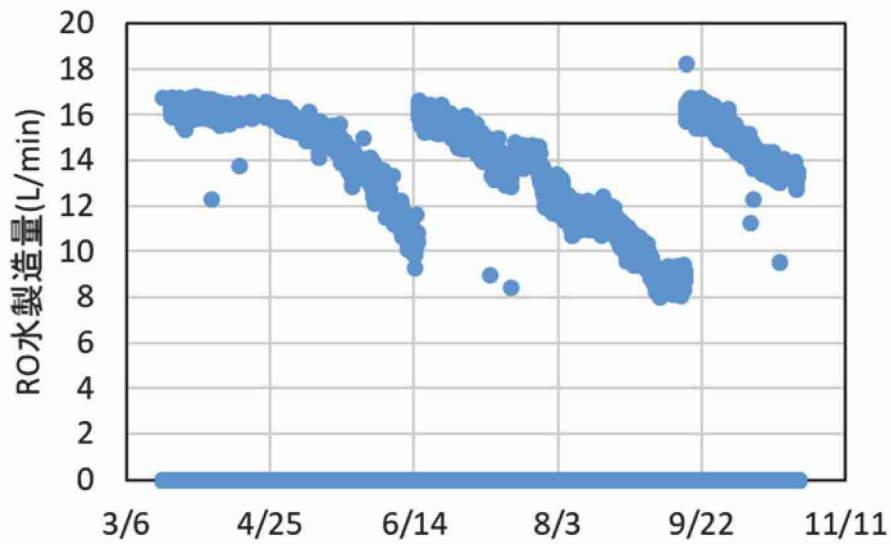


図 3.7 平成 29 年の 8 インチ RO 装置の稼働状況 (RO 水製造量)
 ※薬品洗浄は 3 月、6 月、9 月に実施した

3.1.4. 岩沼実証地の地下水の導電率 (EC) の変化

RO 装置導入時より地下水の導電率 (EC) は低下してきている。ただし栽培用水をたくさん必要とする夏期に導電率 (EC) が高くなる傾向があり RO 装置が必要な状況がもうしばらく続くものと思われる (図 3.8)。

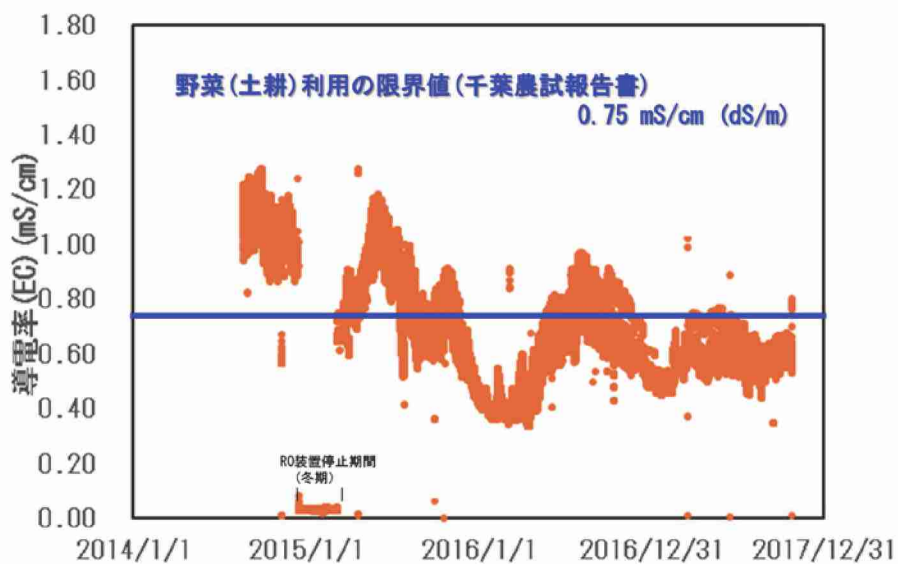


図 3.8 岩沼実証地の地下水の導電率 (EC) の変化

3.1.5. 運用時のRO水製造量ランニングコスト(詳細)

平成26年度は装置の導入時であり、多くのトラブル解決のために時間を要し安定動作できている状況ではなかった。平成27～29年は安定的に稼働しRO装置の減価償却を除くランニングコストは、岩沼市の水道料金265円/m³(口径25mm以下の場合)の1/2以下を達成した(表3.1、3.2)。これは高価な消耗品であるRO膜を交換することなく薬品洗浄で性能を回復させた成果である。

表3.1 実証用RO装置の稼働状況

	H26	H27	H28	H29
RO水製造量(m ³)	576.3	1648.6	1666.4	1465.6
稼働時間(h)	784.2	1934.7	1860.0	1907.2
RO膜交換回数	0	0	0	0
薬品洗浄回数	4	5	3	3
MF膜交換回数	3	5	3	3
砂抜用SUSストレーナ交換回数	1	1	1	1

表3.2 実証用RO装置の経済性評価

	H26	H27	H28	H29
水道代換算 (@265円/m ³ ※岩沼市25A以下)	152,709	436,889	441,588	388,384
電気代(@25円/kWh)	58,813	145,100	139,500	143,040
RO膜(約40万円)	—	—	—	—
膜洗浄用薬剤(NaOH,クエン酸)	18,656	23,320	13,992	13,992
MF膜(糸巻きフィルタ)	9,012	15,020	9,012	9,012
SUSストレーナ(砂抜き用)	6,000	6,000	6,000	6,000
小計	92,481	189,440	168,504	172,044
RO水製造コスト(円/m ³)	160.5	114.9	101.1	117.4
RO装置導入による削減効果	60,229	247,449	273,084	216,340

3. 2. 仙台実証地の自作 RO 装置 (仙台市若林区)

葉菜類の栽培用水を得るため、5 m³/d 規模を想定し RO 装置を自作した。

3. 2. 1. RO 装置の作製

主な機器構成は下記のとおりである (図 3. 9)。

井水汲上ポンプ： 川本 NF2-250SK (浅井戸用 井戸深さ約 5 m)

RO 膜： 東レ TMG10 (4 インチモジュール膜 × 2 本 公称膜面積 計 16 m²)

加圧ポンプ： ニクニ製 SUS 製渦流ポンプ 20NPD04Z

(インバータにより単相 100V を 3 相 200 V に昇圧して利用)

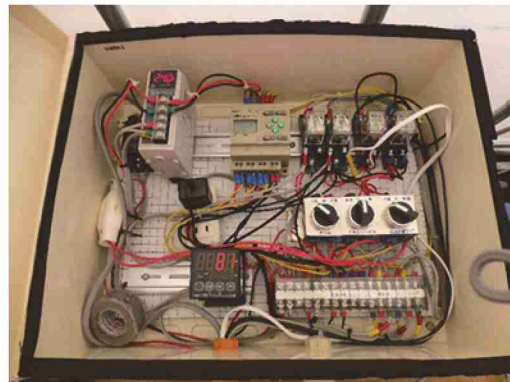
制御装置： オムロン プログラムリレーZEN

膜モジュールは藻類の繁殖を防ぐためアルミテープで遮光した。膜モジュールへの供給流速を得るため RO モジュールは 2 本を直列に接続した。配管は黒色ブレードホース (内径 15 mm φ) を用い、接続には樹脂製のコネクターを利用した。

供給水およびフラッシング用にはスプリングバック式の電動ボール弁を利用し、装置が異常停止した際は給水を停止できるように配慮した。また、低温時には 1 時間間隔でフラッシングする制御装置およびプログラムも組込んだ。



①自作した RO 装置の外観



②制御部



③自作装置を設置した小屋



④RO 水貯水用タンク (6 m³)

図 3. 9 自作 RO 装置の設置状況 (仙台市若林区)

3.2.2. 地下水の導電率 (EC) の上昇

当初、地下水の導電率 (EC) は 3.0 mS/cm (dS/m) であったが、地下水の汲上に伴い導電率は上昇した。5.0 mS/cm 程度まで上昇したため、RO 水製造量は減少した (図 3.10)。

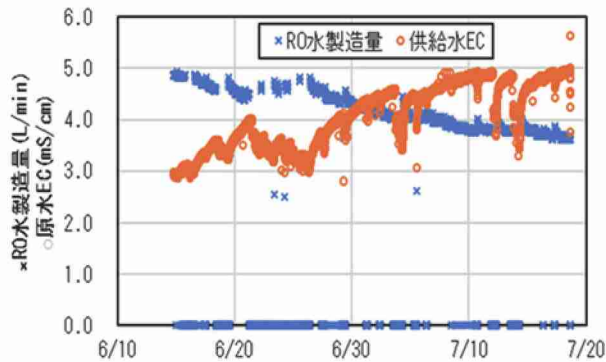


図 3.10 地下水の EC の変化と RO 水製造量の関係

3.2.3. RO 膜の洗浄 (鉄・マンガンが含有量が高い場合)

地下水の鉄やマンガンの含有量が高いと配管や RO 膜内には鉄やマンガンが付着する。クエン酸による酸洗浄で膜の性能が回復しないときは温泉アク除去用の洗剤を用いると金属イオンを溶解させ容易に膜性能が復活する (図 3.11)。



①排水の状況 (金気水)



②温泉アク除去剤 (4 L に 3 g を溶解)



③洗浄前の流量計



④洗浄 (30 分の浸漬) 後の流量計

図 3.11 鉄・マンガン汚れに効果のある洗浄剤

3.3. 必要水量の比較的少ない圃場における市販の逆浸透膜装置の利用

本事業では、宮城県亶理郡亶理町内のイチゴ土耕栽培において、比較的コンパクトな市販の業務用逆浸透膜装置を利用して地下水を脱塩し栽培用水を確保することができた。その実証成果をもとに、逆浸透膜装置の利用について、データを交えてまとめた。

3.3.1. 市販業務用逆浸透膜装置の概要

3.3.1.1. 機種

アクア・カルテック株式会社製 LC900HP/SE

(一般販売品 LC600HP/SE をベースに逆浸透膜フィルター等を増設した特別仕様)

3.3.1.2. 浄水の造水能力

- ・カタログ値：約3 m³/日
- ・EC 約 1.5 dS/m 以下の地下水の場合、得られる浄水は1~2 m³/日程度
(逆浸透膜フィルターが新品の時は多く、造水日数の経過とともに減少する)

3.3.2. 導入に適する条件

- ・上水道が利用できず、栽培用水を地下水で確保する必要がある圃場
- ・地下水のECが約1.5 dS/m以下で、1 m³/日程度の栽培用水が必要な圃場
(例：イチゴ土耕栽培 10 a など)

※ECが約1.5 dS/mより高い (EC 2~3 dS/m程度) 地下水から1 m³/日の浄水を得ようとする場合や、EC 約 1.5 dS/m 以下の地下水から1~2 m³/日より多くの浄水を必要とする場合は、本機種を複数台導入するか、より造水能力の高い機種の導入を検討する。

3.3.3. システムの構成

- ・脱塩システムとしては図3.12のようになる。
- ・実証例では、地下4mの井戸から砂ろ過器を通して地下水くみ上ポンプ (川本製作所製 N3-135SHN、現地の都合により2015年10月28日に同社製 NF2-250SKに変更) で逆浸透膜装置に送水した。その際、逆浸透膜装置への送水管に10 μm フィルターを設置し、藻類の発生等を抑制するために黒色フィルム等でフィルターケースを覆った。
- ・装置内では、5 μm フィルター、活性炭フィルター、1 μm フィルターの順に通じ、増圧ポンプを経て最後に並列つなぎの逆浸透膜フィルター3本で浄化され、浄水は貯水槽に送水し、排水は既設のウォーターカーテン用排水路等に排出した。

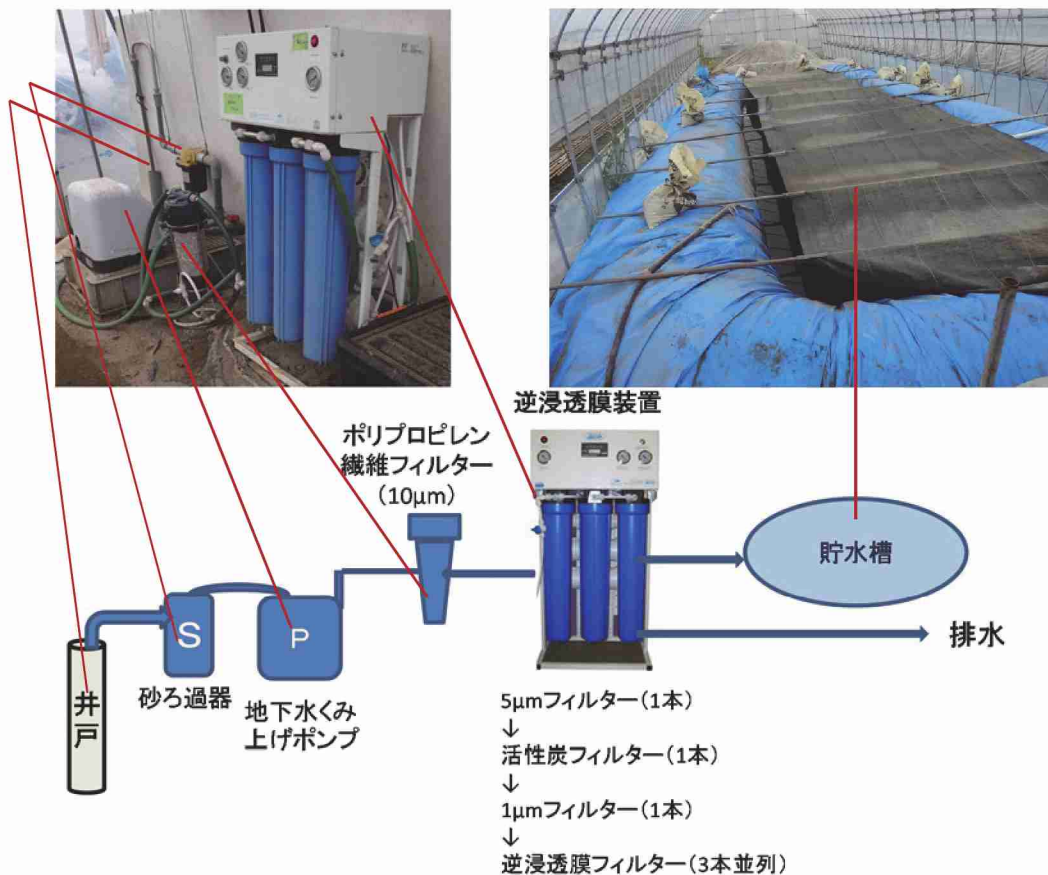


図 3.12 逆浸透膜装置を利用した地下水脱塩システムの概略図および実証地での設置写真

3.3.4. 造水時の動作設定

【手順】

- ・装置前面の圧カつまミで 0.5 MPa (5 kgf/cm²) に合わせる。
- ・電源スイッチは常時 ON にしておき、外付けタイマーで 1 時間 20 分造水、10 分休止の繰り返しを標準とする。休止後の造水運転開始の都度、逆浸透膜フィルターの流路を洗浄するフラッシングが 30 秒間自動で行われる。(1 日に 21 時間 20 分造水、8 分フラッシングとなる。)



①圧カつまミを回し、0.5 MPa (5 kgf/cm²) に合わせる



②外付けタイマーで電源の ON/ OFF を設定する

【実証データ】

- ・実証例では、イチゴの栽培用水を必要とする9月上旬～翌年6月中旬頃の浄水の造水量は、フラッシング処理やフィルター交換を適宜行うことで目標とする1 m³/日以上を確保することができた（図3.13）。
- ・また、本システムの実証試験期間における地下水の水質は、EC 0.53～1.23 dS/m、ナトリウムイオン濃度 70～185 mg/L、塩化物イオン濃度 35～220 mg/L、pH 6.2～7.5であった。この地下水を脱塩処理することにより、浄水の水質は、EC 0.05～0.15 dS/m、ナトリウムイオン濃度 9～33 mg/L、塩化物イオン濃度 2～30 mg/L、pH 5.3～6.3となり、イチゴの栽培用水として問題なく使用することができた（図3.14、表3.3）。

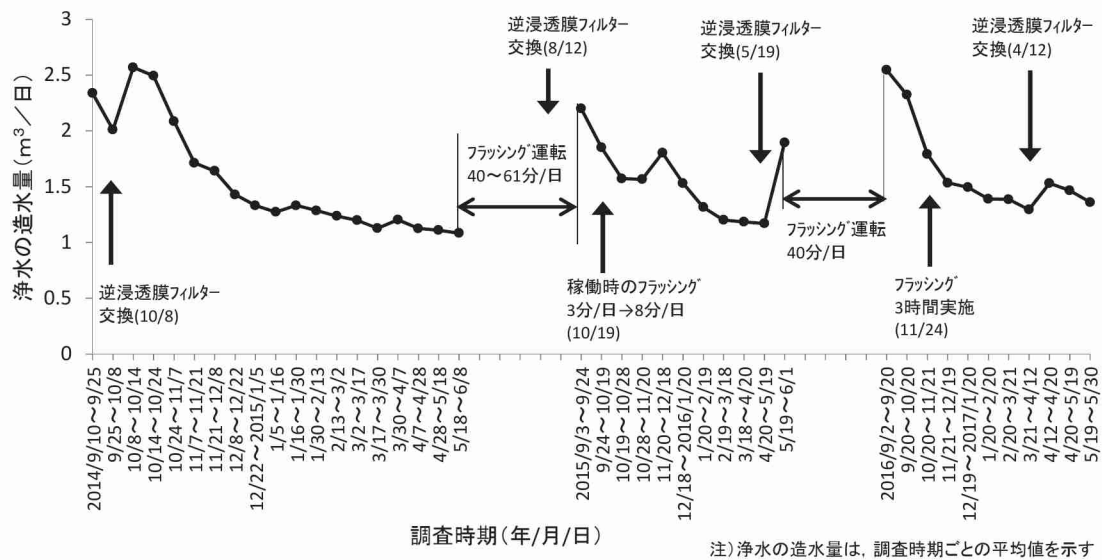


図3.13 市販業務用逆浸透膜装置による浄水の造水量推移

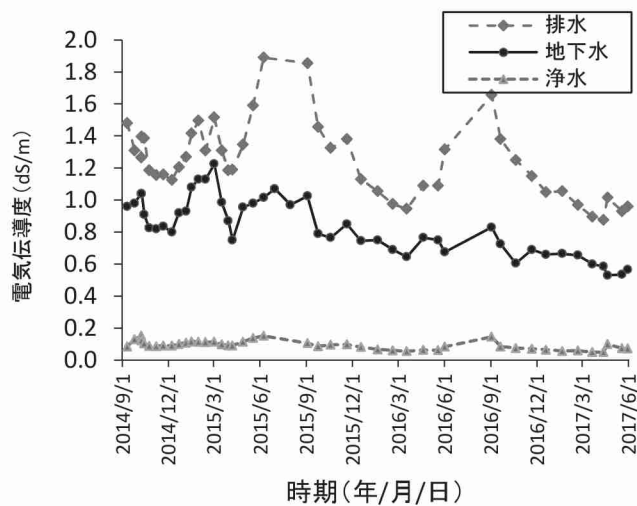


図3.14 地下水、浄水、排水のEC（電気伝導度）の推移

表 3.3 地下水、浄水、排水の水質

	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	pH
地下水	117 (70~185)	111 (35~220)	7.1 (6.2~7.5)
浄水	19 (9~ 33)	11 (2~ 30)	5.9 (5.3~6.3)
排水	170 (110~280)	168 (55~340)	7.4 (6.4~7.8)

注) 数値は調査期間中の平均値を示し、()内は最小値および最大値を示す

3.3.5. メンテナンス

- ・逆浸透膜フィルターは、稼働日数の経過とともに造水量が減少していく。
- ・逆浸透膜フィルターは1年に1回交換する。他のフィルターは、1年に2回程度交換する。
(造水量の減少程度や、フィルターの汚れ具合から交換時期を判断する。)
- ・実証例では、増圧ポンプ1台と給水電磁弁1個を2年に1回程度、動作不良により交換した。

【フィルター類交換手順】

逆浸透膜装置及び地下水くみ上げポンプの電源は切っておく。

○砂ろ過器のフィルター洗浄



①ケースをはずす

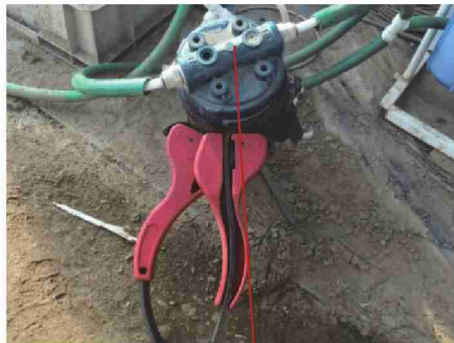


②内部を洗浄して元に戻す

○10 μm フィルターの交換



①エア抜きを回して取り外す



②ベルトレンチ等でフタを開ける



③汚れたフィルターを取り出す



④新品のフィルターを入れて元に戻す

○逆浸透膜装置の各種フィルターの交換



①1 μ m、活性炭、5 μ m フィルターのケースを外す



②外したところ



③汚れたフィルターを取り出す



④逆浸透膜フィルターのケースを外す



⑤ベルトレンチ等でフタを開ける



⑥中の逆浸透膜フィルターの状態



⑦新品に交換し、元に戻す（3本とも）

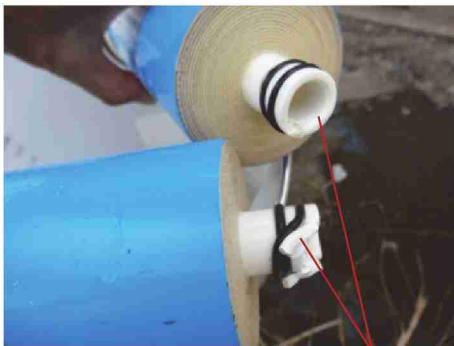


⑧1 μm、活性炭、5 μm フィルターケースに
新品を入れて元に戻す

図 3.15 フィルター類交換手順

<注意>

新品の逆浸透膜フィルターをケースに入れるとき、なるべく真っ直ぐに入れるよう気をつける。ただ、それでもフィルター末端部がケースの奥に入らず、途中で引っかかることが多い。そのときは、固くないもので軽くたたくようにしてゆっくり入れていくとしっかり収まる。無理をして強く入れようとしたり、無理矢理フタを閉めようとする、フィルターとケースの接続末端部が破損してしまうことがある。



破損した逆浸透膜フィルター末端部



破損したフィルターケース
(奥の円形の部分が変形)

○増圧ポンプ、給水電磁弁の交換



①装置上部のカバーを開ける



②増圧ポンプ（3個）

（実証例では左下の1個を、配管と配線を外して交換）



③給水電磁弁

（配管と配線を外して交換）

3.3.6. 造水しない時期の動作設定

・圧カツマミを回して最低に下げ、10分稼働（フラッシング運転）、5時間50分休止の繰り返しを標準とする。フラッシング運転により、逆浸透膜フィルターの乾燥を防ぎ、性能を維持する。

【手順】



①圧カツマミを左に回しきり、最低圧力にする
（0.25 MPa (2.5 kgf/cm²) 程度になる）



②外付けタイマーの設定を変える

<参考：逆浸透膜フィルターの薬品洗浄による造水量回復技術>

・実証試験において、本機種で使用している逆浸透膜フィルターを水中ポンプから直接薬液が送液されるように配管をつなぎ酸アルカリ洗浄することによって造水量が回復することが確認された（図3.16）。



逆浸透膜フィルター内部の流路閉塞の様子



実証試験での薬品洗浄の様子

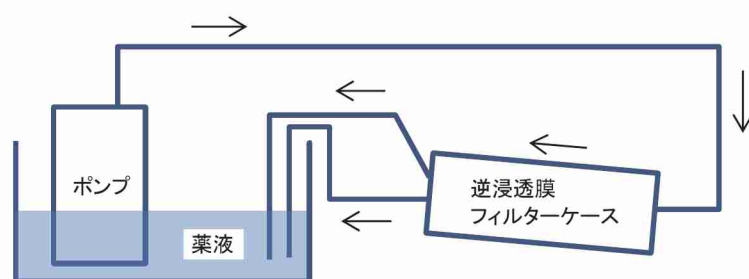


図 3.16 逆浸透膜フィルター薬品洗浄の模式図

3.3.7. 費用

【実証データ】

- ・実証例では、導入費としては装置代、ポンプ代等 655 千円、年間維持費として逆浸透膜フィルターおよびその他フィルター代 113 千円、2年に1回程度の部品費 34 千円となった（表 3.4）。
- ・これらの費用と造水実績をもとにイチゴ栽培用水の造水 1m³にかかる費用を試算すると、電力料金のみでの計算では 58 円、これに物財費を含めて計算すると 564 円となった（表 3.5）。

表 3.4 逆浸透膜装置等一式にかかる物財費の試算

装置導入費 (導入時に発生)			年間維持費 (毎年発生)			その他費用 (2年に1回程度発生 部品交換)		
品名	数量	金額 (千円)	品名	数量	金額 (千円)	品名	数量	金額 (千円)
逆浸透膜装置	1台	540	逆浸透膜	3本×1回	90	装置内給水電磁弁	1個	4
ポンプ	1台	67	5μmフィルター	1本×2回	6	装置内増圧ポンプ	1個	30
ろ過器(砂, 10μmフィルター)	各1台	13	カーボンフィルター	1本×1回	11			
配管類	一式	32	1μmフィルター	1本×1回	3			
タイマー	1個	3	ろ過器10μmフィルター	1本×4回	3			
計		655			113			34

注1)金額は消費税抜き

2)逆浸透膜装置の金額は、実証試験用試作機のコストとした

3)これまでの稼働実績をもとに整理

表 3.5 イチゴ栽培用水にかかる造水逆浸透膜装置等一式の年間費用と造水 1m³にかかる費用試算
(2016~2017 年作)

項目	金額	算出方法
逆浸透膜装置等一式設置費用	94 千円	装置の耐用年数7年で均等割
年間維持費用	113 千円	フィルター類一式の費用
その他費用	17 千円	部品交換2年で34千円を均等割
年間造水運転電力料金	26 千円	2016年9月~2017年5月の消費電力量1392.7kWhをもとに計算
年間フラッシング運転電力料金	1 千円	2016年6月~9月の消費電力量49.4kWhをもとに計算
計	251 千円	
造水 1m ³ にかかる電力料金	58 円	2016年9月~2017年5月の造水量445m ³ をもとに計算
造水 1m ³ にかかる費用	564 円	2016年9月~2017年5月の造水量445m ³ をもとに計算

注1)金額は消費税抜き

2)これまでの稼働実績をもとに試算

おわりに

これまでに農業に導入された膜分離技術の多くのは、分離膜を単純な消耗品と考え適切なメンテナンスをせず、「膜はよく詰まる」、「消耗品代が高い」といった悪いイメージが浸透してしまいました。「膜分離技術」は、食品加工ではよく利用される技術です。加工プロセスに使用した分離膜は適切にメンテナンス（洗浄）され長期間利用されています。食品分野で使用される分離膜が農業分野で使用されるものより詰まり難いということは決してありません。農業分野でも適切にメンテナンスを行えば分離膜の寿命は延びて、ランニングコストは下がると考えています。

大規模な RO 膜を利用した海水淡水化やかん水淡水化は確立された技術として国内外で使用されています。しかしながら、農家の圃場等で使用できる小規模で低コストな RO 装置の運用技術はありませんでした。本実証研究ではこういった小規模な農地で使用する RO 装置の運用技術の研究を行いました。本事業で得られた成果が東日本大震災により太平洋沿岸の多くの地域で津波被害を受けた多くの地域で役立つことを期待しております。

本紙に書ききれなかったことも多く、疑問に思うことも多いと思います。質問等ありましたら下記のアドレスに気兼ねなくご連絡ください。

先端プロ(宮城県)施設園芸コンソーシアム

未利用エネルギーワーキンググループ (逆浸透膜による地下水の脱塩技術担当)

農研機構 農村工学研究部門 石井雅久、奥島里美

農研機構 食品研究部門 萩原昌司

宮城県農業・園芸総合研究所 小池 修、高橋正明、山村真弓、酒井博幸、庄子友夫

E-mail : denki-agri@ml.affrc.go.jp

本研究は食料生産地域再生のための先端技術展開事業(先端プロ)「(個別要素技術型研究、平成 24-26 年度) (網羅型研究、平成 27 年度) 農村地域における未利用エネルギー活用実証研究」、および「(網羅型研究 : 平成 28-29 年度) 施設園芸栽培の省力化・高品質化実証研究」にて実施した。



農研機構 農村工学研究部門、食品研究部門
宮城県農業・園芸総合研究所

本誌に関する技術的な質問は下記へお願いします
E-mail : denki-agri@ml.affrc.go.jp
(2018.02)