

京都大学大学院工学研究科
都市環境工学専攻修士論文
Master's Thesis
Department of Environmental Engineering
Graduate School of Engineering
Kyoto University

論文題目 沖縄県糸満市における工業利用に向けた再生水の
適用用途と生産コストの評価

Title Evaluation of applications and costs of reclaimed water
system for industrial use in Itoman City, Okinawa

著者 深川 慎亮

Author Shinsuke Fukagawa

平成 31 年 2 月 February 2019

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 水不足問題	1
1.1.2 下水再利用の特徴	1
1.1.3 再生水生産と膜処理	2
1.1.4 膜処理を用いた再生水の工業利用における課題	2
1.2 研究の目的	2
1.3 論文の構成	3
第2章 工業用水の現状と再生水供給	4
2.1 下水再利用	4
2.1.1 国内外における下水再利用と今後の傾向	4
2.1.2 沖縄県糸満市における再生水の農業利用と今後の展望	4
2.1.3 再生水の工業利用事例	5
2.1.4 再生水の工業利用における課題	5
2.2 下水再利用に用いられる膜処理	7
2.2.1 膜処理の概要	7
2.2.2 膜処理の種類	8
2.2.3 膜処理を活用した再生水利用の事例	8
2.2.4 UF 膜処理	9
2.2.5 RO 膜処理	9
2.2.6 UF 膜処理及び RO 膜処理の運転性に関する先行研究	9
2.3 工業用水の現状	11
2.3.1 工業用水使用量と用途別の回収率の現状	11
2.3.2 沖縄県における工業用水供給の現状と課題	12
2.4 水質基準	14
2.4.1 工業用水基準	14
2.4.2 水道水基準	16
2.4.3 その他の基準	17
2.5 再生水の工業利用における課題	18
2.5.1 沖縄県糸満市における再生水事業の費用評価	18
2.5.2 再生水の費用評価における課題と今後の展望	19
2.6 本章のまとめ	19

第3章 再生水と工業用水の水質比較をもとにした再生水の工業利用の検討	22
3.1 概説	22
3.2 試験方法	22
3.2.1 UF 膜処理の運転条件	22
3.2.2 RO 膜処理の運転条件	24
3.2.3 採水	27
3.2.4 膜処理水の水質測定	28
3.2.4.1 一般水質項目	28
3.2.4.2 有機物質	28
3.2.4.3 無機物質	29
3.2.5 沖縄県糸満市における工業用水の水質調査・分析方法	29
3.2.5.1 工業用水の採水	29
3.2.5.2 工業用水の水質測定	31
3.3 実プラントでの運用を想定した RO 膜処理水の水質の算定	31
3.4 UF 膜処理及び RO 膜処理の運転性評価	33
3.4.1 UF 膜処理の連続運転結果	34
3.4.2 RO 膜処理の連続運転結果	35
3.5 膜処理水と工業用水の水質測定結果	36
3.5.1 膜処理水の水質測定結果	36
3.5.2 工業用水の水質測定結果	40
3.5.3 再生水と工業用水の水質比較	42
3.6 実プラントを想定した RO 膜処理水の水質の算定結果	44
3.7 本章のまとめ	47
 第4章 沖縄県糸満市における工業用水利用状況及び再生水需要の調査	 50
4.1 概説	50
4.2 調査方法	50
4.2.1 アンケート調査対象	50
4.2.2 質問内容	50
4.2.3 アンケート調査の実施方法	52
4.3 調査結果と考察	52
4.3.1 工業用水と水道水の使用量の関係	53
4.3.2 工業用水の独自処理と使用水量・利用用途の関係	56
4.3.3 工業用水の独自処理と重視する水質項目の関係	57
4.3.4 再生水の利用可否及び要求する料金水準	58
4.4 本章のまとめ	61

第5章 費用比較をもとにした再生水生産・供給の実現可能性の検討	63
5.1 概説	63
5.2 本研究における費用算出の前提条件	63
5.2.1 再生水生産における設備配置・運転条件の設定	63
5.3 再生水生産に係る費用の算出方法	65
5.4 各費用項目の費用算出方法	67
5.4.1 建設費	67
5.4.1.1 UF 膜処理	67
5.4.1.2 RO 膜処理	68
5.4.1.3 送水用配管・ポンプ建設費	68
5.4.2 維持管理費	69
5.4.2.1 電力費	69
5.4.2.2 膜交換費	70
5.4.2.3 薬品費	71
5.4.2.4 設備の補修費	71
5.4.2.5 汚泥処分費	71
5.4.2.6 送水費	71
5.5 再生水生産費用の算定結果	72
5.5.1 UF 膜処理・RO 膜処理・送水に係る年間費用算定結果	72
5.5.2 再生水の工業用水への適用可能性の検討	75
5.5.2.1 シナリオ 1	75
5.5.2.2 シナリオ 2	77
5.5.2.3 シナリオ 3	79
5.6 本章のまとめ	80
 第6章 結論と今後の課題	 83
6.1 結論	83
6.2 今後の課題	86
 付録	 87

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 水不足問題

地球上に存在している水の 97.5 %が海水であり、残り 2.5%が淡水である。さらに、その淡水のうち約 70 %が氷河・氷山であり、実際に我々が都市用水や農業用水、工業用水として用いることができる淡水の割合はすべての水のわずか約 0.01 %に過ぎない。この限られた水資源が今後さらに不足・偏在化することが懸念されている。原因は世界的な人口増加や気候変動に伴う異常気象、干ばつ、経済発展による食肉需要の増加や工業化の推進などがある。人 1 人が 1 年間に利用可能な水の量から水の欠乏の程度を表現する指標としてファルケンマークの指標がある。この指標では、1 人当たり $1,700 \text{ m}^3$ を必要な水量の最低ラインと設定し、これを下回る国及び地域を水ストレス状態にあるとする。2008 年時点で水ストレス人口は 46 の国と地域で約 20 億人であり、1997 年のデータと比較するとその人口は 3.6 倍となっている¹⁾。このように今後水不足問題はより深刻化すると考えられるため、水を循環利用し、限られた水資源を有効活用することが求められている。

本研究の適用対象地域である沖縄県は、年間降水量は全国平均と比べて多いものの、山がちで、短い河川であるため、安定した表流水が確保しにくく、とくに沖縄本島南部は高い人口密度により、これまで水資源不足が問題となっていた。県北部のダムの開発が行われた結果、水道水については、給水制限の状態化などの深刻な水不足はほぼ解消できたが、ダム水といった水源には限りがある。一方、沖縄本島では、農業用水の不足が深刻化しているほか、観光や産業振興のための水資源が新たに必要となっている。現在、沖縄県南部の糸満市の工業団地及びその周辺地域では新しく水産市場の建設や工業用の土地活用などが予定されており、工業用水需要の増加が見込まれるため、安定的な非従来型の水源の開発が求められている。

1.1.2 下水再利用の特徴

近年、下水もしくは下水処理水を再利用した下水再生水の利用が注目されている。下水再利用の利点としては、1)水源が安定していること、2)他の供給水源の保全及び環境負荷の低減が可能、3)水利用用途を考慮し処理プロセスを選択することで、再生水の利用者のニーズを満たしつつ、生産費用を削減できるなどが挙げられる。下水は我々が生活する上で必ず排出されるものなので、安定的に供給される水資源ともいえる。そのため、ダム水などの天然の資源と比較して、水供給が気候変動の影響を受けにくいという利点がある。またダム水などの上水水源の代わりに下水を用いることで、限られた水資源を節約すると同時に下水の排出による環境負荷を軽減できる。さらに下水の再利用のプロセスについて利用者が求める再生水の水質に応じた (Fit on Purpose) 処理プロセスを選択することがで

き、例えばトイレ洗浄水などは必ずしも飲用水と同等の水質を必要としないため、浄水処理と比べて水処理を簡略化し、エネルギー・コストを削減できる可能性がある。一方で、より純水に近い水を求める利用者に対しては、膜処理などの高度処理を導入することで、高い付加価値のある水を提供でき、再生水供給者が行う事業の収益性を高めることができる。

1.1.3 再生水生産と膜処理

近年下水再生水の生産プロセスの 1 つとして膜処理が注目されている。膜処理により海水や下水、排水などの非在来水源の活用を効果的に行えるとされている。それは膜処理には(1)溶液中の多成分を同時に除去・濃縮できる、(2)濁質・細菌を完全に除去でき、高度な水質の処理水を得られる、(3)膜処理設備がコンパクトである、(4)無人運転で維持管理が容易であるのような利点があるためである²⁾。また膜処理はこうした非在来水源の活用のみならず、産業分野では食品の製造工程の中でも用いられている。

1.1.4 膜処理を用いた再生水の工業利用における課題

しかし下水を工業用水として利用する際には課題もいくつかある。1 つ目に実際に得られる再生水の水質を把握する必要がある。この再生水の水質は運転条件の変更や膜の配置によって変化するため、実際のプラントの規模で膜処理が用いられる際の再生水の水質を知り、またそれがどの程度変動するかを把握しておく必要がある。2 つ目に再生水利用者が実際にどのような水質の水を求めているのかを把握し、それに合わせた処理システムを構築する必要がある。過剰な処理システムは再生水の供給者に過大な設備投資となり、過小な処理システムは利用者に利用されない、または追加処理設備の導入といった負担を強いることになる。3 つ目に再生水の供給者にとって経済的に持続可能なものである必要がある、いかに再生水生産プロセスから良い水質の水が得られ、再生水を利用することで水不足の問題の解消に寄与するものであったとしても、それが主な供給者となる地方公共団体や公営・民間企業にとって経済的に採算が取れる、または既存の事業よりも経済的であることが可視化または数値化されていない限り、こうした供給者は再生水事業の採用に消極的になる可能性が高い。

1.2 研究の目的

本研究では下水処理水に対し「UF 膜処理+RO 膜処理」を施して得られる再生水を工業利用することを目的としている。そこで以下のことを本研究の目的とした。

① 「UF 膜処理+RO 膜処理」の運転性の評価と処理水の工業用水との水質比較

沖縄県糸満市において下水処理場の二次処理水に対して「UF 膜処理+RO 膜処理」を適用した際の運転性及び最終的に得られる RO 膜処理水の水質について評価した。また沖縄県糸満市西崎町で実際に工業用水を使用している企業で工業用水を採水し、その水質を把握した。最後に RO 膜処理について、複数エレメントを接続し運転を行った際の、

圧力損失及び物質収支を加味した、エレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質を算出し、既存の工業用水と水質の比較を行った。これらの水質の測定・評価・比較を通して、現在同地域で使用されている工業用水の水質を把握し、「UF 膜処理+RO 膜処理」プロセスを通して得られる再生水は工業用水として利用可能かについて検討・評価した。

② 沖縄県糸満市における工業用水利用状況及び再生水需要の調査

再生水の工業利用における処理プロセスや再生水の適用用途を決める際の手掛かりを得るために、沖縄県糸満市西崎町において既存の工業用水の利用に関するアンケート調査を行った。そこで得られた結果について、再生水の工業利用において注視すべき水質項目、再生水の具体的適用用途、再生水に求められる経済性などの観点から分析した。

③ 費用的側面からみた再生水事業の実現可能性の検討

将来的な工業用水の需要増加に対応するため沖縄県糸満市に再生水生産施設を導入し、工業用水を西崎工業団地内外の企業に供給することを想定した場合の年間生産費用を算出し、適用可能なシナリオについて考察した。そこで得られた結果について、(1)将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替するシナリオ 1、(2)将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する(再生水と既存の工業用水を併用する)シナリオ 2、(3)再生水用の配管を新たに建設せずにシナリオ 2 と同様に工業用水の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 3 の 3 つのシナリオについて費用の側面から検討した。さらに上記の①と②を踏まえた上で再生水の工業利用の実現可能性について総合的に評価した。

1.3 論文の構成

本論文は 6 つの章で構成されており、各章の概要については以下の通りである。

第 2 章では再生水利用の現状、水利用に関する水質基準、既存の工業用水の現状等について文献調査を行い、そこから得られた知見について述べた。

第 3 章では再生水と工業用水の水質測定の手法、及び両者の水質の評価・比較について述べた。

第 4 章では沖縄県糸満市の企業に対するアンケート調査の手法・結果について述べた。

第 5 章では再生水の年間生産費用の算出手法・結果について述べ、再生水の工業利用について適用可能なシナリオを 3,4 章の結果も踏まえて考察した。

第 6 章では第 3 章から 5 章で得られた知見をまとめ、今後の課題について述べた。

参考文献

- 1) 小寺正一(2010)：水問題をめぐる世界の現状と課題 I 水の現状 P74-P75
- 2) 大熊那夫紀：膜を利用した排水処理と水の再利用 食品産業と環境問題(「フード・フォーラム・つくば」25 周年記念講演会より) P8

第2章 工業用水の現状と再生水供給

2.1 下水再利用

2.1.1 国内外における下水再利用と今後の傾向

近年下水資源は新たな水資源として注目されている。下水を利用した再生水を利用することで水資源の保護、河川水質の浄化、排水量減少による下水道等の排水処理施設の負担軽減、水不足地域の緩和などのメリットがある。米国内では都市排水の再利用が進んでおり、特にアリゾナ州、カリフォルニア州、フロリダ州、テキサス州では大規模な農業用途、工業用途に利用されている。カリフォルニア州では 2001 年時点で再生水利用量は約 $648 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ であり、その 67%を農業用水および散水用水が占めている¹⁾。工業利用は 2002 年時点で全再生水生産量の 5%ほどと低い値にとどまっている。

一方日本国内では下水再生水は 1978 年の異常渇水を契機に水洗用水として利用されて以来、水洗便所用水、修景用水、河川維持用水、融雪用水、農業用水など様々な用途に再生水が利用されるようになった。しかし、その水量は平成 19 年度時点で約 2.0 億 m^3/year 、その割合は下水処理水量(139.3 億 m^3/year)のわずか 1.5%に過ぎず²⁾、特に工業利用（工業用水道への供給、事業場・工場への直接供給）はそのうちわずか 9.4%であり、現在も多くの水源をダムなどの淡水資源に依存しているため、再生水の工業利用の拡大の余地があるといえる。

このような下水再利用の推進の動きは世界的に広まりつつある。平成 27 年の国連サミットにおいて「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」が採用されたが、その中の「目標 6：きれいな水と衛生」には「再生水の利用促進」が掲げられている。下水再利用が世界的に注目される中、国際標準化機構(ISO)は TC282 において、水の再利用に関する国際規格開発を検討している³⁾。TC282 は SC1：灌漑利用・SC2：都市利用・SC3：再生水のリスクと性能評価・SC4：工業利用の 4 つからなる。日本は SC3 の議長国であり、定量的な指標を規格化することで、日本の水処理系企業の膜処理技術などの水処理分野における技術的優位性を活かした海外展開を加速させたいと考えている。そこで SC3 において水質・除去率・その他リスク関連指標等に関する機能的要件と環境指標・経済性能・信頼性に関する非機能的要件を性能評価企画として提唱した。前者の機能的要件については各国・地域で求められる水質は異なる上、厳格な基準を設けることは再生水の普及を妨げるとして反対の声もあるが、後者の非機能的要件については各国から一定の理解を得られている⁴⁾。いずれにせよ今後は再生水の利用促進において、再生水の水質などの定量的評価や環境指標、LCC などの経済性評価が今後より重要となる傾向にある。

2.1.2 沖縄県糸満市における再生水の農業利用と今後の展望

沖縄県は、年間降水量は約 2040 mm と全国で 8 番目に多いものの、山がちな貯水性の低い地形と高い人口密度により、これまで水資源不足が問題となっていた⁵⁾。県北部のダムの利用により水道水については当面の水道水不足は解消できたが、ダム水といった水源に

は限りがあり、特に沖縄県南部地域では農業用水不足が課題であったため、平成 17 年度の地下ダム建設をはじめとする様々な対策がとられてきた。地下ダムの建設により図 2.1 の青線で示す地域に農業用水供給が行われるようになったが、地下ダムを受益できない地域(緑枠)もあり、そうした地域への農業用水の供給が課題であった。その課題の解決策の 1 つとして平成 26 年度から下水再生水を農業用水として利用する計画(沖縄県再生水等循環利用型農業確率モデル事業)が立ち上がっている。その計画では従来の再生水利用における課題であったコスト高を改善するために、配管経路の見直しがなされるとともに、再生水の生産プロセスについても低コスト化を推進するため、「UF 膜処理+UV 処理」のプロセスについて検討された。上記のプロセスにより再生水の農業用利用が推進されると次に農業用水の需要変動に応じて、農業用再生水が余剰となるとときに再生水を有効活用させることが課題となる。現在沖縄県南部の糸満市の工業団地及びその周辺地域では今後新水産市場建設・工業用の土地活用などが予定されており、今後の工業用水需要増加が見込まれる。そこで農業用水需要が減少する時期においては、現在農業用水として利用されている再生水に対し高度膜処理などの追加処理を行うことで工業用水として再生水を活用できると考えられる。これにより水道及び工業用水の水源である県北部のダムの貯留容量を増加させることができ沖縄県における安定的な水資源の供給に寄与すると考えられる。

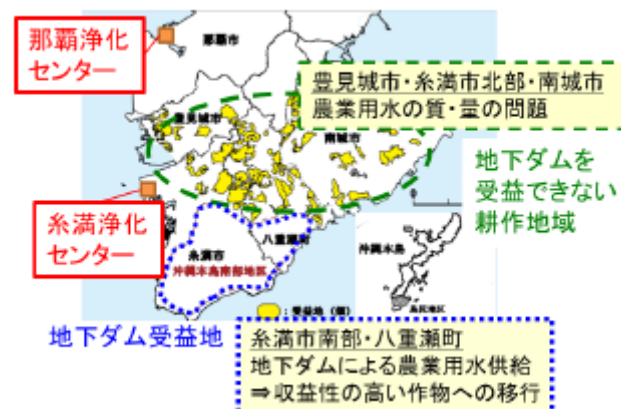


図 2.1：地下ダム建設と受益地域

2.1.3 再生水の工業利用事例

前節 2.1.1 で述べた通り日本国内における再生水の工業利用は全再生水利用量のうちわずか 9.4%であり、全国的にも再生水の工業利用の事例は限られているが、大阪府堺市が下水再生水の複合利用事業の 1 つとして工業利用を行っている。供給する再生水は下水の最終沈殿池越流水に対し繊維ろ過処理した非接触水(33,000 m³/日)とオゾン処理を施した接触水(1,000 m³/日)の 2 種類がある。

2.1.4 再生水の工業利用における課題

前節 2.1.1 で述べた通り日本国内における再生水の工業利用は全再生水利用量のうちわ

ずか 9.4%であり、全国的にも 2.1.4 のような再生水の工業利用の事例は限られている。国土交通省が 2008 年から 2009 年にかけて行った工業用水・農業用水・環境用水・雑用水の供給を行っている下水道管理主体(下水処理場など)286 施設(うち 234 施設)に対するアンケート調査結果⁶⁾によると、工業用途の再生水の供給を行っている施設は 235 施設のうちわずか 18 施設(7.7%)である(表 2.1)。その要因についての集計結果は以下の通りである(表 2.2)。集計結果から①「再生水供給のための追加設備投資をする余裕がない」との回答が 42.3%と最も多く、次いで②「安定供給を保証できない」(36.6%)、③「利用者との間でリスク分担が難しい」(36.6%)、④「衛生面での不安が大きい」(26.8%)、⑤「再生水の用途別に水質基準が定められていない」(26.5%)と続いている。ここで①再生水生産のための設備投資に係る供給者の費用負担が大きいことについては、再生水を安価に供給できるシナリオを提示すること、④衛生面での不安については、再生水の水質測定を通して既存の水源と比較して再生水が水質面で十分代替可能であることを示すこと、⑤用途別の指標となる水質基準が定められていないことについては、工業用水の適用用途・目標とする水質及び適用する処理プロセスが明確になるよう利用者の工業用水用途及び求める水質を提示することで各課題に対して対処できると考えられる。

表 2.1：再生水の供給を行っている施設数とその用途(複数回答)⁶⁾

項目	回答数	%	うち場外供給
工業用水(工業用途)	18	7.7	18
農業用水(農業用途)	25	10.6	25
環境用水(河川維持用水、親水用水、修景用水)	108	46.0	54
雑用水(水洗トイレ用水)	152	64.7	55
延べ回答数	303	128.9	152
母数(N=)	235	100.0	134

表 2.2：下水再生水を工業用に供給する際に障害や問題となる事項(複数回答)⁶⁾

項目	回答数	%
1. 利用者との間でリスク分担が難しい	103	34.6
2. 再生水の用途別に水質基準が定められていない	79	26.5
3. 衛生面での不安が大きい	80	26.8
4. 利用者への安定供給を保証できない	109	36.6
5. 水資源が豊富のため、工業用水や上水より安価に再生水を供給できない	56	18.8
6. 再生水供給のための追加的設備投資を行う財政的余裕がない	126	42.3
7. その他	38	12.8
延べ回答数	591	198.3
無回答	54	18.1
母数(N=)	298	100.0

また再生水供給に係る費用の負担については、以下の図 2.2 のように現在工業用水の供給

を行っている 5 施設中 3 施設が再生水の生産に係る費用から利用地点の配管建設に係る費用までを供給者(下水道管理主体)が負担し、利用者の施設内で必要となる設備のみ利用者負担としている。

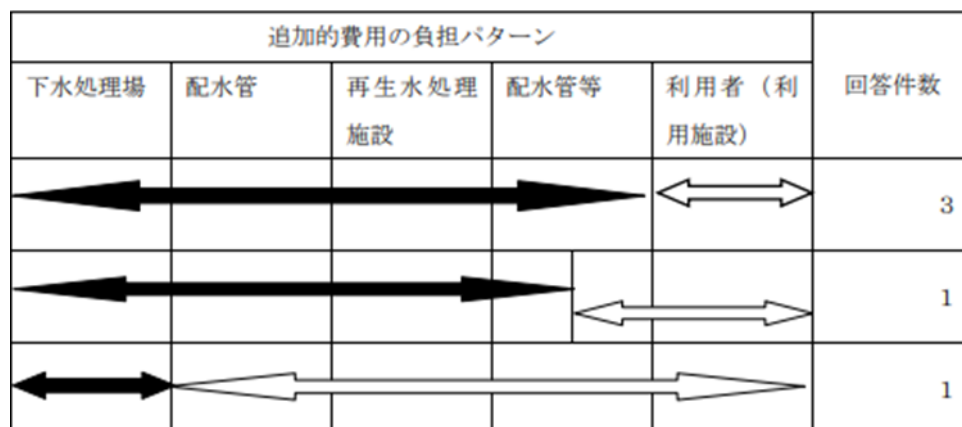


図 2.2：再生水供給に係る追加費用の負担パターン¹⁵⁾

* ：下水道管理主体の負担

* ：工業用水利用者の負担

工業用再生水の料金について、現在工業用再生水を供給している管理主体の 6 割(12 管理主体)が料金徴収をしており、その料金設定の仕方は大きく分けて再生水生産に係る建設費・維持管理費相当額を設定する、再生水の利用インセンティブを確保するため既存の水道料金より安く設定、その他の 3 つがあった(表 2.3)。また料金水準は 5.25 - 150 円/m³ の範囲の回答があった。

表 2.3：工業用再生水の料金設定の根拠(複数回答可)

項目	工業用水	
	回答数	%
1.再生水供給は下水道業務の範囲外であるため、下水道管理主体が整備した施設等の建設コスト及び維持管理コストを利用者から徴収することとした	3	25.0
2. 再生水の利用インセンティブを確保するため、水道料金よりも低価格に抑えた	3	25.0
3. その他	6	50.0
母数 (N=)	12	100.0

2.2 下水再利用に用いられる膜処理

2.2.1 膜処理の概要

膜処理技術は、膜を介して圧力差や濃度差、電位差などの推進力により物質を分離する技術である。

膜による物質の除去プロセスとしては、1)ふるい作用、2)ケーキ層による除去、3)膜への吸

着がある。ふるい作用とは膜の孔径より大きい物質を物理的に除去するものである。ケーキ層による除去とは、ろ過を継続してことで膜表面上に形成されるケーキ層によって物質を捕捉し除去するものである。この作用により膜の孔径よりも小さい物質も除去されうる。膜への吸着は主にろ過の初期に見られる。膜と物質の静電気作用により吸着が起こり、物質が除去されるものである。

膜処理技術は水処理(海水淡水化、浄水処理、下排水処理、下排水再利用)の他にも各種製造業(精製、濃縮、分離、回収、脱水)、医療(血液透析、人工肺)、燃料電池等幅広い分野に応用され、物質の分離・精製技術として不可欠なものとなっている⁷⁾。

2.2.2 膜処理の種類

浄水・排水処理分野において用いられる分離膜には、分離対象が大きい順に、精密ろ過(microfiltration : MF)膜、限外ろ過(ultrafiltration : UF)膜、ナノろ過(nanofiltration : NF)膜、逆浸透(reverse osmosis : RO)膜がある(図 2.3)⁸⁾。

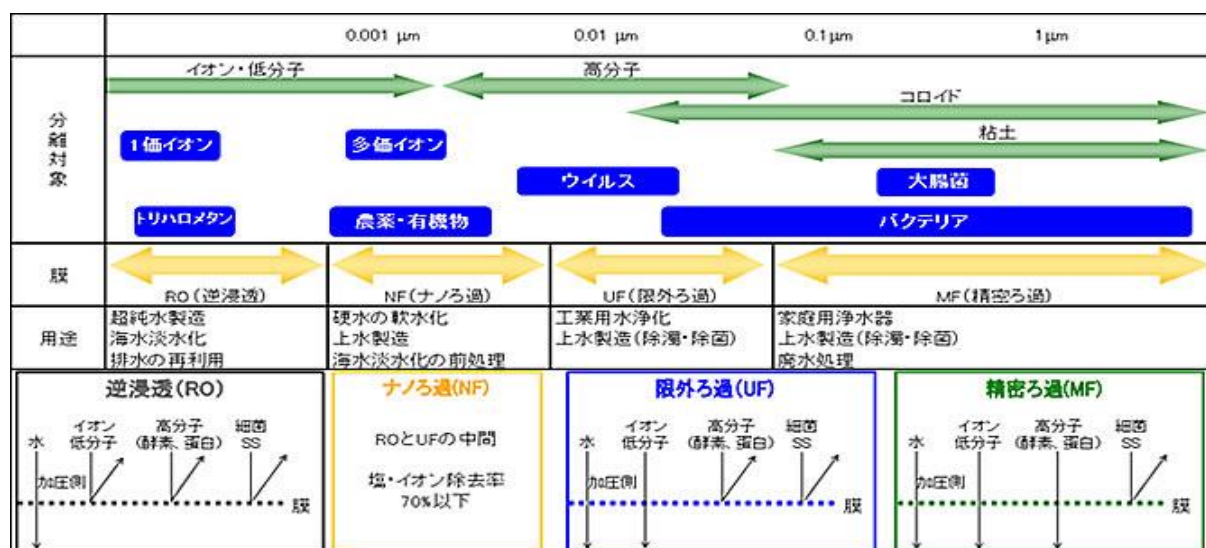


図 2.3 : 膜の種類ごとの分離対象と適用事例⁸⁾

2.2.3 膜処理を活用した再生水利用の事例

世界では 2.3.2 に示した膜を用いて様々な再生水利用が行われている(表 2.4)⁹⁾。また日本国内では、以下の表 2.5 に示す通り、高度処理の一部として膜処理が導入され、親水用水や水洗用水など様々な用途に用いられている¹⁰⁾。

表 2.4 : 膜処理を利用した世界での再生水利用の事例⁹⁾

国名	場所	処理規模(m ³ /day)	稼働年	プロセス
アメリカ	Fountain Valley, CA	220,000	2006	二次処理水→MF膜→RO膜
中国	Ningxia	78,000	2008	二次処理水→MF膜→RO膜
オーストラリア	Luggage Point	66,000	2008	二次処理水→MF膜→RO膜
シンガポール	Changi	228,000	2010	二次処理水→MF膜→RO膜
カタール	Doha	439,000	2011	二次処理水→UF膜→RO膜

表 2.5：膜処理を利用した日本での再生水利用の事例¹⁰⁾

自治体名	施設名	利用目的 施設規模 (膜プロセス構成)	稼働 年度
東京都	落合水再生センター	親水用水 50m ³ /日 (砂ろ過水→凝集→MF 膜→RO 膜)	1993
東京都	芝浦水再生センター	水洗用水 4,300m ³ /日 (生物膜ろ過→オゾン→MF 膜)	2004
大阪市	海老江下水処理場	修景用水 40m ³ /日 (高度処理水→凝集→MF 膜→RO 膜)	1995
神戸市	垂水下水処理場	修景, 洗車用水 50m ³ /日 (砂ろ過水→凝集ろ過→RO 膜)	1993

2.2.4 UF 膜処理

UF 膜は 0.1 μm – 2 nm の範囲の粒子や高分子を阻止する分離膜で、MF 膜よりも細かい物質を分離できる。具体的にはたんぱく質・酵素・細菌・コロイド高分子等の除去が可能であり、膜の材質には高分子膜・無機膜がある。日本国内では、浄水場の高度ろ過・純水や超純水の製造等の分野で利用されている。なお、UF 膜は、単独での使用は少なく、RO 膜、MF 膜などとの組み合わせで利用されることが多い¹¹⁾。

2.2.5 RO 膜処理

RO 膜処理は水分子以外のほとんどのイオンや高分子物質を取り除くことができ、膜の破損がない限りウイルスや細菌などを確実に除去できるため、下水の再利用のみならず海水淡水化や超純水の製造に用いられている。膜素材は高分子製が一般的だが、今後は耐熱性、耐薬品性に優れた炭素などの無機材料の製品開発も期待されている¹¹⁾。

2.2.6 UF 膜処理及び RO 膜処理の運転性に関する先行研究

膜処理においては、膜ファウリングの発生により連続運転が困難となることがしばしば課題となる。膜ファウリングとは膜処理において時間の経過とともに付着物質が膜の表面に付着したり、透過流路を閉塞したりする状況のことであり、定期的に洗浄(付着物質をはがす工程)が必要である。膜ファウリングの原因物質としては、炭酸カルシウム・硫酸カルシウム等の無機塩類、シリカ・水酸化鉄等の無機性コロイド、溶解性有機物質、付着性微生物、懸濁物質等があるが、実際には原因物質が多種多様にわたり、ファウリング原因物質を同定することが困難な場合が多い¹²⁾

2.1.2 の沖縄県における再生水利用に関連して科学技術振興機構の CREST プロジェクトの一環として那覇浄化センター・糸満市浄化センター敷地内において UF 膜処理及び RO 膜処理の連続運転に関するパイロットスケールの実証実験が行われた¹³⁾。このうち糸満市

浄化センターで行われた UF 膜処理の運転条件は以下の表 2.6 の通りであり、この時約 2 か月間膜間差圧を 50 kPa 以下を維持したまま連続運転を行うことが可能であったとしている(図 2.4)。

表 2.6 : UF 膜処理の運転条件 ¹³⁾

運転条件	
UF膜	HFU-2008
凝集剤	PAC 50 mg/L
Flux	1.0m/d
ろ過時間	1800秒
逆洗時間	60秒
空洗時間	60秒
定期洗淨	1回/d

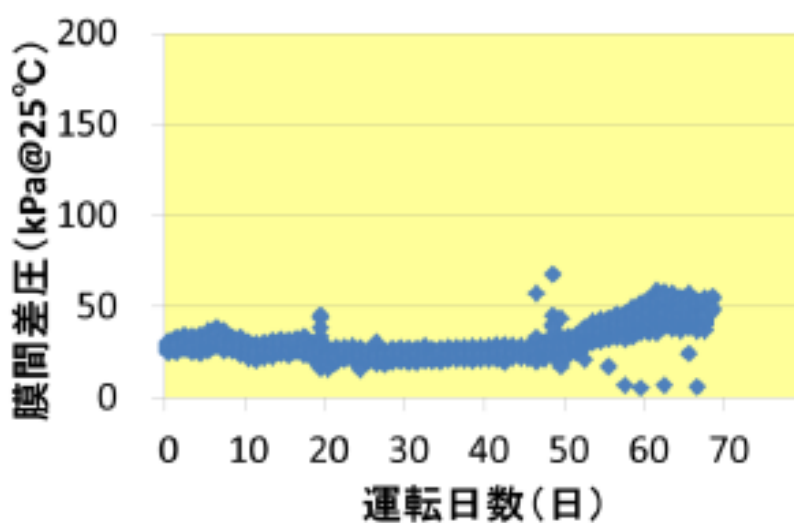


図 2.4 : UF 膜の連続運転結果(糸満市浄化センターパイロットプラント) ¹³⁾

同プロジェクトにおいて RO 膜処理についても那覇浄化センターで連続運転の実証実験が行われた。RO 膜処理の流量を濃縮水の循環率が 75%になるように流量を設定して連続運転を行った結果(表 2.7)、以下の図 2.5 より少なくとも約 23 日間は連続運転が可能であったという結果が得られている ¹⁴⁾。

表 2.7 : RO 膜処理の運転条件 ¹⁴⁾

運転条件		
RO膜		TML10D
設定流量	RO膜補給水	5 L/min
	RO膜供給水	20 L/min
	RO膜透過水	2.5 L/min
	RO膜濃縮循環水	15 L/min
	RO膜濃縮配水	2.5 L/min
	定期洗浄	なし

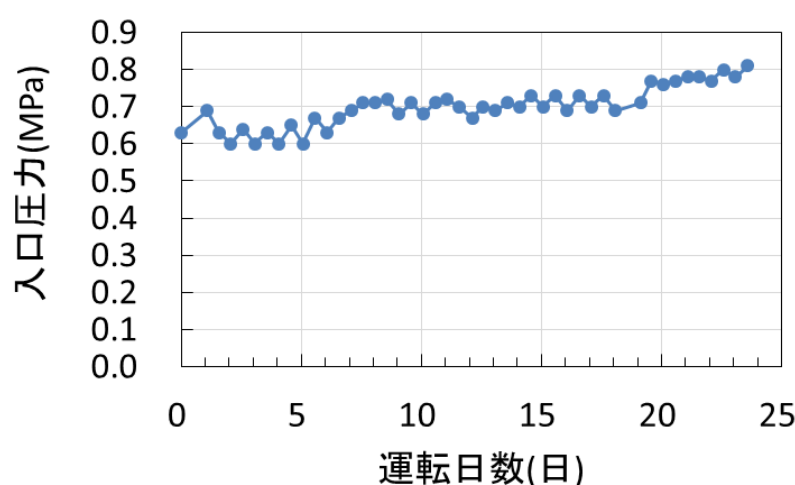


図 2.5 : RO 膜の連続運転結果(糸満市浄化センターパイロットプラント) ¹⁴⁾

なお本研究では再生水の生産プロセスとして比較的長期の連続運転が可能であることが示されたこの「UF 膜処理+RO 膜処理」の処理プロセスを採用し、上記の UF 膜処理及び RO 膜処理の連続運転の結果を再現可能であるかについて検討を行った。

2.3 工業用水の現状

2.3.1 工業用水使用量と用途別の回収率の現状

我が国における工業用水の需要は、淡水使用水量が 118.7 百万 m^3 /日、そのうち新たに工業用水道、地下水、河川水等から事業場・工場へ補給する水量が 26.2 百万 m^3 /日となっている。取水量は日本の総水需要の 14%を占めている。工業用水全体の回収率（工業用水使用水量に対する回収水量の割合）は、昭和 40 年は 36.3%であったが、水使用合理化等により平成 27 年には 77.9%となり、近年はほぼ横ばい状態で推移している ¹⁵⁾。次に製造業全 24 業種(日本標準産業分類の中分類)に分けて淡水ウシ容量の多い上位 11 種の淡水使用量と回収率を以下に示す(表 2.8) ¹⁶⁾。ここから化学工業、鉄鋼業は他業種と比べ全淡水使用量が際立って多くなっている。新水(補給水)の使用量を見ると全淡水使用量第 3 位のパル

プ・紙・紙加工品製造業、6位の食料品・飲料製造業はそれぞれ第1位、第4位となっている。これはパルプ・紙・紙加工品製造業、食料品・飲料製造業は回収利用ができないもしくは難しい原料用水・製品処理・洗浄用水の使用比率が他業種と比較して相対的に高いことが原因として考えられる。これらの業種は工業用水の回収率が低いため、下水再生水の適用の余地があると考えられる。

表 2.8：業種別の淡水使用量と回収率(2013 年度)¹⁶⁾

順位	業種分類	事業所数	淡水使用量(m ³ /日)			回収率(%)
			全淡水計	新水(補給水)	回修水	
1	化学工業	2,107	42,817,695	5,773,852	37,043,843	86.5
2	鉄鋼業	1,217	37,104,820	3,570,894	33,533,926	90.4
3	パルプ・紙・紙加工品製造業	1,467	11,563,905	6,748,419	4,815,486	41.6
4	石油製品・石炭製品製造業	99	7,071,586	835,558	6,236,028	88.2
5	輸送用機械器具製造業	3,519	7,007,973	649,595	6,358,378	90.7
6	食料品・飲料製造業	7,812	4,240,668	3,043,408	1,197,260	28.2
7	繊維工業	1,954	2,876,857	1,469,582	1,407,275	48.9
8	電子部品・デバイス・電子回路製造業	1,827	2,875,365	817,247	2,058,118	71.6
9	プラスチック製品製造業	3,078	2,730,253	869,315	1,860,938	68.2
10	窯業・土石製品製造業	1,420	2,602,276	631,188	1,971,088	75.7
11	非鉄金属製造業	785	2,312,158	628,495	1,683,663	72.8
全製造業に対する割合(%)		58.2	97.4	94.6	98.1	-

2.3.2 沖縄県における工業用水供給の現状と課題

沖縄県糸満市においては沖縄県企業局が製造業をはじめとする様々な産業の企業に対し工業用水を供給する工業用水事業を運営している。現在工業用水事業は名護市から金武湾、中城湾沿岸地域を経由し、糸満工業団地に至る 101 企業(平成 28 年度)に対して工業用水を供給している。

沖縄県において工業用水は製造業の他にも雑用水等にも使用されている。企業の業種別に工業用水の利用状況を見ると(図 2.6)¹⁷⁾、沖縄県では食品・飲料等製造業の工業利用が多いことが分かる。こうした企業では原料・洗浄用途で多くの水を必要とし、そうした用途に工業用水を使用するためには多くの場合工業用水の企業内追加処理が必要となる。

また本研究対象である糸満工業団地においても 28 企業が工業用水を使用している(平成 28 年度)(表 2.9)¹⁸⁾。利用企業は多くが食料品製造業であり、中には企業内で独自処理設備を導入し、食料品の原料や洗浄用に工業用水を使用している企業もある。しかし利用水量が少ないため多額の設備投資ができない、食料品を扱うため工業用水の水質に不安がある等の理由から現在工業用水を使用していない企業も多くある。

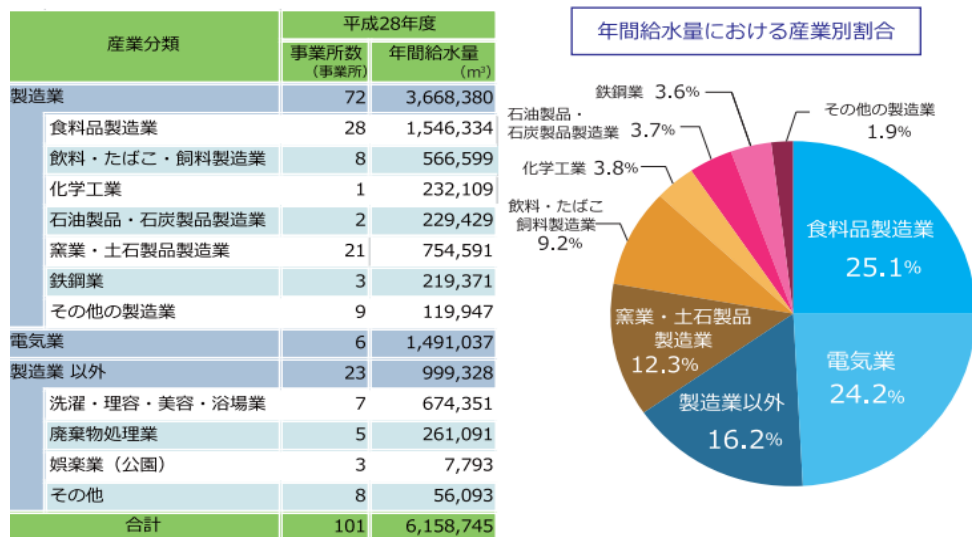


図 2.6 沖縄県内の企業の工業用水利用状況(平成 28 年度)¹⁷⁾

表 2.9：糸満工業団地における工業用水利用状況(平成 28 年度)¹⁸⁾

業種区分	事業所数	工業用水年間使用量	割合 (%)
		(m ³ /年)	
食料品製造業	17	498,641	61.5
窯業・土石製品製造業	2	60,842	7.5
クリーニング業	1	29,212	3.6
自動車整備業	1	7	0.1
保健及び廃棄物処理業	3	25,620	3.2
サービス業	4	196,688	24.3
合計	28	811,010	100

また沖縄県企業局が供給する工業用水の供給価格と供給原価を見ると(図 2.7-2.8)¹⁹⁾、供給価格・供給原価ともに全国平均を上回る状態が続いている。沖縄県の工業用水の供給原価を押し上げる要因は沖縄県企業局によると、沖縄県の地理的要因により大規模ダム開発が困難であり、いくつもの小規模のダムに依存しているため、ダムの維持管理にかかる費用負担が全国と比較して大きくなっていること、水源と利用地が離れていることにより動力費がより多くかかることとされている。

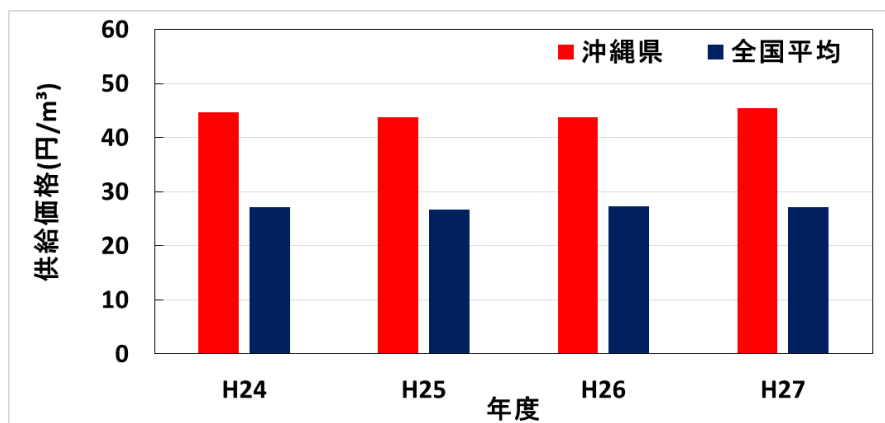


図 2.7：沖縄県と全国の工業用水の供給価格の推移 ¹⁹⁾

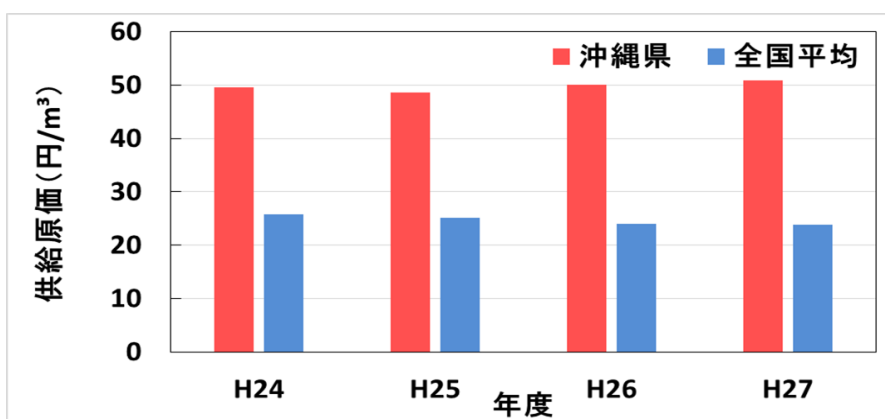


図 2.8：沖縄県と全国の工業用水の供給原価の推移 ¹⁹⁾

2.4 水質基準

2.4.1 工業用水基準

工業用水は用途に応じて必要とされる水質は異なるが、その主な水質上の問題点は装置の腐食、スケールの形成、微生物によるスケーリングなどが挙げられる。US-EPA やカリフォルニア州は様々な工業プロセスに要求される再生水の水質についてまとめている(表 2.10)²⁰⁾。

表 2.10：様々な工業プロセスに要求される再生水の水質(一部抜粋)²⁰⁾

項目	単位	循環のためのボイラ供給水(bar)*1				冷却水			
						一過型		補給水	
		0～10	10～12	48～103	103～344	淡水	汽水	淡水	汽水
シリカ(SiO ₂)	mg/L	30	10	0.1	0.01	50	25	50	25
アルミニウム(Al)	mg/L	5	0.1	0.01	0.01			0.1	
鉄(Fe)	mg/L	1	0.3	0.05	0.01			0.5	
マンガン(Mn)	mg/L	0.3	0.1	0.01				0.5	
銅(Cu)	mg/L	0.5	0.05	0.05	0.01				
カルシウム(Ca)	mg/L		0	0	*2	200	520	50	420
マグネシウム(Mg)	mg/L		0	0	*2				
ナトリウム(Na)	mg/L								
アンモニア(NH ₃)	mg/L	0.1	0.1	0.1	0.07				
重炭酸塩(HCO ₃)	mg/L	170	120	50	*2	600		25	
硫酸塩(SO ₄)	mg/L					680	2700	200	2700
塩素(Cl)	mg/L					600	500		
フッ素(F)	mg/L					600	19000	500	19000
溶解性蒸発残留物	mg/L	700	500	200	0.5	1000	35000	500	350000
浮遊物質(SS)	mg/L	10	5	0	0	5000	2500	100	100
硬度	mg/L(CaCO ₃ 換算)	20	1	0.1	0.07	850	6250	130	6250
アルカリ度	mg/L(CaCO ₃ 換算)	140	100	40	0	500	115	20	115
pH	-	8～10	8～10	8.2～9.2	8.2～9.2	5.0～8.3			
色度	度								
COD	mg/L	5	5	0.5	0	75	75	75	75
溶存酸素(DO)	mg/L	<0.03	<0.03	<0.03	<0.005				
温度	℃	49	49	49	49	38	49	38	49
濁度	NTU	10	5	0.5	0.05	5000	100		

*1：1 bar = 10⁵ Pa

*2：他成分の処理によって左右される。

また、日本では日本工業用水協会が昭和 46 年に工業用水道の供給標準水質(表 2.11)を定めている²¹⁾。さらに別途で各工業用途の水質基準が定められている。ここでは日本冷凍空調工業会が定める冷凍空調機器用水質ガイドライン(表 2.12)²²⁾および JIS が定める貫流ボイラに供給される工業用水の水質(表 2.13)²³⁾を以下に示す。

表 2.11：工業用水道の供給標準水質²¹⁾

項目	単位	標準水質
pH	-	6.5～8.0
濁度	mg/L	20
アルカリ度	mg/L	75
硬度	mg/L	120
蒸発残留物	mg/L	250
塩素イオン	mg/L	80
鉄	mg/L	0.3
マンガン	mg/L	0.2

表 2.12：冷凍空調機器用水質ガイドライン(一部抜粋)²²⁾

項目	単位	冷却水系			冷水系	
		循環式		一過式		
		循環水	補給水	一過水	循環水(20℃以下)	補給水
基準項目	pH(25℃)	-	6.5～8.2	6.0～8.0	6.8～8.0	6.8～8.0
	電気伝導率(25℃)	mS/m	80	30	40	30
	塩化物イオン	mg/L	200	50	50	50
	硫酸イオン	mg/L	200	50	50	50
	酸消費量(pH4.8)	mgCaCO ₃ /L	100	50	50	50
	全硬度	mgCaCO ₃ /L	200	70	70	70
	カルシウム硬度	mgCaCO ₃ /L	150	50	50	50
	イオン状シリカ	mgSiO ₂ /L	50	30	30	30
参考項目	鉄	mg/L	1.0	0.3	1.0	0.3
	銅	mg/L	0.3	0.1	1.0	0.1
	硫化物イオン	mg/L	不検出	不検出	不検出	不検出
	アンモニウムイオン	mg/L	1.0	0.1	1.0	0.1
	残留塩素	mg/L	0.3	0.3	0.3	0.3
	遊離炭酸	mg/L	4.0	4.0	4.0	4.0
	安定度指数	-	6.0～7.0	-	-	-

表 2.13：貫流ボイラ供給水の水質²³⁾

最高使用圧力(MPa)	7.5～10		10～15		15～20		20～	
処理方法	揮発性物質処理	酸素処理	揮発性物質処理	酸素処理	揮発性物質処理	酸素処理	揮発性物質処理	酸素処理
pH(25℃)	8.5～9.6	6.5～9.3	8.5～9.6	6.5～9.3	8.5～9.6	6.5～9.3	9.0～9.7	6.5～9.3
電気伝導率(μS/m)	30以下	20以下	30以下	20以下	30以下	20以下	25以下	20以下
溶存酸素(μgO/L)	7以下	20～200	7以下	20～200	7以下	20～200	7以下	20～200
鉄(μgFe/L)	30以下	20以下	20以下	10以下	20以下	10以下	10以下	10以下
銅(μgCu/L)	10以下	10以下	5以下	10以下	3以下	5以下	2以下	2以下
ヒドラジン(μgN ₂ H ₄ /L)	10以上	-	10以上	-	10以上	-	10以上	-
シリカ(μgSiO ₂ /L)	40以下	20以下	30以下	20以下	20以下	20以下	20以下	20以下

*1：ヒドラジンの濃度は pH が上限を超えない値とするとともに、脱気器出口の溶存酸素濃度に応じて低減させることも可能である。

2.4.2 水道水基準

日本の厚生労働省は水道水基準について、平成 15 年から化学的酸素要求量(COD)に代わり全有機炭素量(TOC)を導入した。また、常に社会的要求や新しい科学的知見を踏まえて適宜基準を改正している。現在は平成 27 年に改正された水道水の水質基準が用いられている(表 2.14)²⁴⁾。

表 2.14：水道水の水質基準項目と基準値(一部抜粋)²⁴⁾

水質基準項目	基準値
一般細菌	1 mLの検水で形成される集落数が100以下
大腸菌	検出されないこと
カドミウム及びその化合物	Cd 0.003 mg/L以下
NO ₂ -N	0.04 mg/L以下
NO ₂ -NおよびNO ₃ -N	10 mg/L以下
総トリハロメタン	0.1 mg/L以下
亜鉛及びその化合物	Zn 1.0 mg/L以下
アルミニウム及びその化合物	Al 0.2 mg/L以下
鉄及びその化合物	Fe 0.3 mg/L以下
銅及びその化合物	Cu 1.0 mg/L以下
ナトリウム及びその化合物	Na 200 mg/L以下
マンガン及びその化合物	Mn 0.05 mg/L以下
塩化物イオン	200 mg/L以下
硬度	300 mg/L以下
蒸発残留物	500 mg/L以下
TOC	3 mg/L以下
pH	5.8～8.6
味	異常でないこと
臭気	異常でないこと
色度	5度以下
濁度	2度以下

2.4.3 その他の基準

国土交通省は水道水以外の様々な都市利用における再生水のガイドラインをまとめている(表 2.15)²⁵⁾。また厚生労働省は食品衛生法により食品の製造に用いる水について厚生省告示第 370 号に「食品製造用水」の規格基準を設けている。この基準は食品・添加物等に適用される(表 2.16)²⁶⁾。

表 2.15：様々な都市利用における再生水のガイドライン²⁵⁾

項目	単位	下記利用例の水質基準			
		トイレ洗浄	道路・路面等の散水	修景用水	親水用水
総大腸菌	個/100 mL	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと
濁度	NTU	2	2	2	2
pH	－	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.6
外観	－	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
色度	度			<40	<10
臭気	－	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
残留塩素	mg/L	0.1(遊離)、0.4(結合)	0.1(遊離)、0.4(結合)	0.1(遊離)、0.4(結合)	0.1(遊離)、0.4(結合)

表 2.16：第 1 食品 B 食品一般の製造、加工及び調理基準（食品製造用水基準）²⁶⁾

検査項目		基準値
1	一般細菌	100以下/mL
2	大腸菌群	検出されない
3	カドミウム	0.01 mg/L以下
4	水銀	0.0005 mg/L以下
5	鉛	0.1 mg/L以下
6	ヒ素	0.05 mg/L以下
7	六価クロム	0.05 mg/L以下
8	シアン	0.01 mg/L以下
9	硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	10 mg/L以下
10	フッ素	0.8 mg/L以下
11	有機リン	0.1 mg/L以下
12	亜鉛	1.0 mg/L以下
13	鉄	0.3 mg/L以下
14	銅	1.0 mg/L以下
15	マンガン	0.3 mg/L以下
16	塩素イオン	200 mg/L以下
17	カルシウム・マグネシウム等(硬度)	300 mg/L以下
18	蒸発残留物	500 mg/L以下
19	陰イオン界面活性剤	0.5 mg/L以下
20	フェノール類	フェノールとして0.005mg/L以下
21	有機物等(過マンガン酸カリウム消費量)	10 mg/L以下
22	pH値	5.8以上8.6以下
23	味	以上でない
24	臭気	以上でない
25	色度	5度以下
26	濁度	2度以下

上記 2.4.1-2.4.3 に示した通り、工業用水の利用において考慮されると想定される基準は多くあるが、現在工業用水の生産において規定されている工業用水基準(表 2.11)は全て利用者の用途及びその基準を加味したものではないため、工業用水の使用用途や原水の性状によっては当てはまらない場合もある。そのため沖縄県糸満市においても沖縄県が供給する工業用水を自社の用途に合わせて独自処理したうえで使用している企業が多くある。そのため本研究において再生水の工業利用推進に向けて再生水が満たすべき水質を把握するためには、水質基準との単純比較では不十分であり、実際に企業が使用している工業用水の水質を知ることが重要である。

2.5 再生水の工業利用における課題

2.5.1 沖縄県糸満市における再生水事業の費用評価

上記 2.2.2 において述べた沖縄県糸満市における再生水の農業用水利用を推進するプロジェクトにおいて最小されている「UF 膜処理+UV 処理」プロセスについて、国土交通省の B-DASH プロジェクトにおいて同プロセスに係る年間費用(建設費+維持管理費)を算出し、従来技術(前塩素添加+凝集+砂ろ過+UV 消毒)との比較が行われた²⁷⁾。同研究を通して、従来技術の凝集沈殿+砂ろ過を UF 膜処理で代替することにより、土木建築費や薬

品使用量(凝集剤)を削減できること、凝集剤を使用しないことで発生汚泥量を低減できその結果汚泥処分費を削減できること、再生水生産に係る年間費用を従来技術に対して約6.2-13.3%削減することができることが示された(表 2.17-2.19)。

表 2.17：ライフサイクルコスト削減率：次亜塩素酸ナトリウム単価 50 円/kg の場合 ²⁷⁾

項目	単位	従来技術	実証技術		従来技術に対する削減率(%)	
			自動調光なし	自動調光あり	自動調光なし	自動調光あり
建設費	百万円/年	79.66	77.05		3.3	
維持管理費	百万円/年	58.75	43.30	42.90	26.3	27.0
LCC	百万円/年	138.41	120.35	119.95	13.0	13.3

表 2.18：ライフサイクルコスト削減率：次亜塩素酸ナトリウム単価 40 円/kg の場合 ²⁷⁾

項目	単位	従来技術	実証技術		従来技術に対する削減率(%)	
			自動調光なし	自動調光あり	自動調光なし	自動調光あり
建設費	百万円/年	79.66	77.05		3.3	
維持管理費	百万円/年	53.49	43.12	42.72	19.4	20.1
LCC	百万円/年	133.15	120.17	119.77	9.7	10.0

表 2.19：ライフサイクルコスト削減率：次亜塩素酸ナトリウム単価 30 円/kg の場合 ²⁷⁾

項目	単位	従来技術	実証技術		従来技術に対する削減率(%)	
			自動調光なし	自動調光あり	自動調光なし	自動調光あり
建設費	百万円/年	79.66	77.05		3.3	
維持管理費	百万円/年	48.23	42.94	42.54	11.0	11.8
LCC	百万円/年	127.89	119.99	119.59	6.2	6.5

2.5.2 再生水の費用評価における課題と今後の展望

再生水の工業利用を考慮すると「UF 膜処理+UV 処理」プロセスのみでは塩分・有機物質・硬度物質の除去が不十分であるため、本研究では工業用水としての求められる水質を達成できると想定される再生水生産プロセスとして「UF 膜処理+RO 膜処理」の検討を行う。そのため、2.5.1 で示した年間費用算出結果とは別に別途年間費用を算出する必要がある。さらに再生水の利用を促進するために再生水の工業利用の実現可能性を評価するには、費用面の単純比較のみならず、実際に求められる工業用水の水質や再生水の実際の利用者の需要を総合的に考慮する必要がある。

2.6 本章のまとめ

本章では下水再利用の現状と再生水の生産プロセス及び今後の課題を把握するために、様々な下水再利用の事例と本研究の対象であり、再生水の生産に活用される膜処理について調査し述べた。

さらに本研究目的は沖縄県における再生水の工業利用促進に向けて、(1)実際に求められる工業用水の水質や(2)再生水利用者の需要、(3)再生水生産における運転性・処理水の水質・生産に係る年間費用の3点を加味した再生水の工業利用の実現可能性に関する総合的な評価を行うことである。そこで本章では(1)工業用水に求められる水質を把握するために、工業用再生水供給の現状、現在考慮されている様々な水質基準、沖縄県における工業用水供給の現状について述べ、また(2)再生水利用者の需要と再生水の課題について把握するためにさらに(3)の再生水生産におけるの運転性・処理水の水質・生産費用に関する既存の知見と今後の課題を把握するために再生水の運転性・水質及び費用面における再生水の適用可能性の評価に関する先行研究の成果と今後の展望について述べた。

参考文献

- 1) 監訳委員会 浅野孝、大阪市下水道技術協会(2010): 水再生利用学—持続可能社会を支える
水マネジメント 技報堂出版株式会社 第2章 水再利用 P40-P48
- 2) 国土交通省 下水道部: 我が国における下水処理水の再利用状況
<http://gcus.jp/wp/wp-content/uploads/2011/10/456b72c45a220a8393c33b0aefe9946f.pdf>
(最終アクセス日: 2019年1月12日)
- 3) 国土交通省: 海外における再生水利用の目的・契機
<http://www.mlit.go.jp/common/000037276.pdf> (最終アクセス日: 2019年1月12日)
- 4) 日本水工設計 下水道一部計画課 向吉はるか: 水の再利用に関連した国際標準の開発に関する報告
- 5) CREST 報告書: 2.3 消費エネルギー評価 P354
- 6) 国土交通省 下水道部: 下水再生水の利用事例における費用負担状況について<修正版> P3-11
- 7) 岩尾夏樹(2015): 再利用を目的とした分離膜を組み合わせた下水の直接膜ろ過に関する基礎的研究 京都大学大学院工学研究科修士論文 第2章 下水再利用の現状と課題 P8
- 8) 室町ケミカル株式会社: 分離膜の基礎知識
<http://www.muro-chem.co.jp/business/knowledge.html/> (最終アクセス日: 2017年1月11日)
- 9) 下水道膜処理技術会議(2011): 下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン[第2版] 第2章 総論 P23
- 10) 下水道膜処理技術会議(2011): 下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン[第2版] 第2章 総論 P20
- 11) 国立研究開発法人 国立環境研究所: 環境展望台 水処理膜
<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=44> (最終アクセス日: 2019年2月9日)
- 12) 岩尾夏樹(2015): 再利用を目的とした分離膜を組み合わせた下水の直接膜ろ過に関する基礎的研究 京都大学大学院工学研究科修士論文 第2章 下水再利用の現状と課題

題 P10

- 13) CREST 報告書：2.2.3 UF 膜＋UV プロセスの運転性能評価
- 14) Takeuchi H, Yamashita N, Nakada N, Tanaka H, : Removal Characteristics of N-Nitrosamines and Their Precursors by Pilot-Scale Integrated Membrane Systems for Water Reuse International Journal of Environmental Reserch and Public Health, 15, pp.1960-1975, 2018.
- 15) 経済産業省：経済センサスー活動調査 用地・用水編 平成 28 年度
- 16) 経済産業省、工業統計調査：平成 25 年工業統計表「用地・用水編」、平成 27 年 4 月 24 日公表
- 17) 沖縄県企業局：沖縄工業用水道
https://www.eb.pref.okinawa.jp/userfiles/files/page/jigyo/107/H29_kosui_03.pdf
(最終アクセス日：2019 年 1 月 11 日)
- 18) 沖縄県企業局 配水管理課
- 19) 沖縄県企業局：平成 28 年度版 沖縄県企業局経営レポート―第 9 次経営計画―
料金水準及びコストについて判断する指標（工業用水道）P16
- 20) U.S. EPA (1973) : Water Quality Criteria 1972, EPA-R-73-033, Washington, DC.
- 21) 株式会社 東邦微生物病研究所：冷却水・工業用水・ボイラ水の水質検査 工業用水
道の供給標準水質(日本工業用水協会・工業用水水質基準制定委員会(1971))
<http://www.toholab.co.jp/water/archive/2431/> (最終アクセス日：2019 年 1 月 19 日)
- 22) 一般社団法人 日本冷凍空調工業会(1994)：冷凍空調機器用水質ガイドライン 冷却
水・冷水・温水・補給水の水質基準値
- 23) 日本規格協会(1999)：ボイラの給水及びボイラ水の水質 JIS B 8223
- 24) 厚生労働省：水道水質基準について
<http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/index.html/>
(最終アクセス日：2017 年 1 月 19 日)
- 25) 国土交通省都市・地域整備局下水道部 国土交通省国土技術政策総合研究所(2005)
：下水処理水の再利用水質基準等マニュアル 第 3 章 再生水利用に関する技術上の基
準 P12
- 26) 厚生労働省 告示第 370 号：食品、添加物等の規格基準(第 370 号)の第 1 食品 B 食品
一般の製造、加工及び調理基準(第 482 号による改正)
- 27) B-DASH 評価書：第 3 章 ライフサイクルコスト縮減効果 P15

第3章 「UF 膜処理+RO 膜処理」の運転性の検討と工業用水との水質比較

3.1 概説

本研究では糸満市糸満工業団地において比較的需要の多い食品分野での工業用再生水の利用を想定し、下水処理場の最終沈殿池越流水(二次処理水)に対し UF 膜処理及び RO 膜処理を施すプロセスについて、長期運転が可能かについて検討し(運転性の検討)、各膜処理水の水質と工業用水の水質比較(水質の評価)を行った。具体的には二次処理水に対し、はじめに UF 膜処理を施し、その後段で RO 膜処理を行うプロセスについて先行研究に基づいた運転条件を設定し、連続運転が可能かを検討した。また運転中に各膜処理水を採水し、一般水質項目、有機物質および無機物質を測定し、工業用水との水質比較を行った。以下に本研究における膜処理のフロー図を示す(図 3.1)。

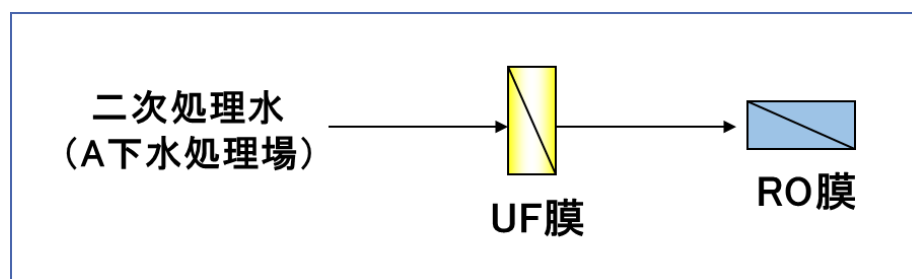


図 3.1 本研究における膜処理のフロー図

さらに膜処理水について、二次処理水から「UF 膜処理+RO 膜処理」を施した再生水を実プラントの規模で生産することを想定し、7 つのエレメントを直列に接続して濃縮水量の供給水量の約 50%となるようにした際の、RO 膜処理水の水質について計算を行った。

また本研究では沖縄県糸満市西崎町で実際に使用されている工業用水を採水し、同様に水質測定を行った。最後に膜処理水の水質と実際に使用されている工業用水の水質を比較し、膜処理水の利用可能用途について考察を行った。

3.2 試験方法

3.2.1 UF 膜処理の運転条件

本研究では沖縄県 A 下水処理場内に膜モジュールを設置し、膜処理運転を行った。装置は UF 膜モジュール、原水槽、排水槽、薬液タンク、ポンプ等で構成され、ベンチスケールでの全量ろ過を連続的に行うことが可能である。UF 膜モジュールは公称孔径 $0.01 \mu\text{m}$ 、公称分画分子量 150 kDa、膜面積 11.5 m^2 の中空糸 PVDF 製 UF 膜(HFU-2008, 東レ株式会社製)である。装置は沖縄県内 A 下水処理場敷地内に設置され(図 3.2)、処理場内の二次処理水を原水として膜処理運転を行った。UF 膜処理のフロー図を以下に示す(図 3.3)。

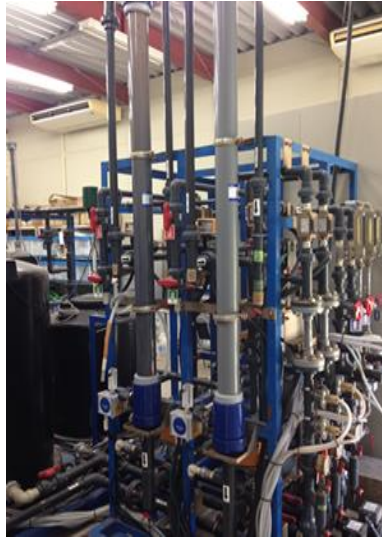


図 3.2 沖縄県内 A 下水処理場に設置された UF 膜装置

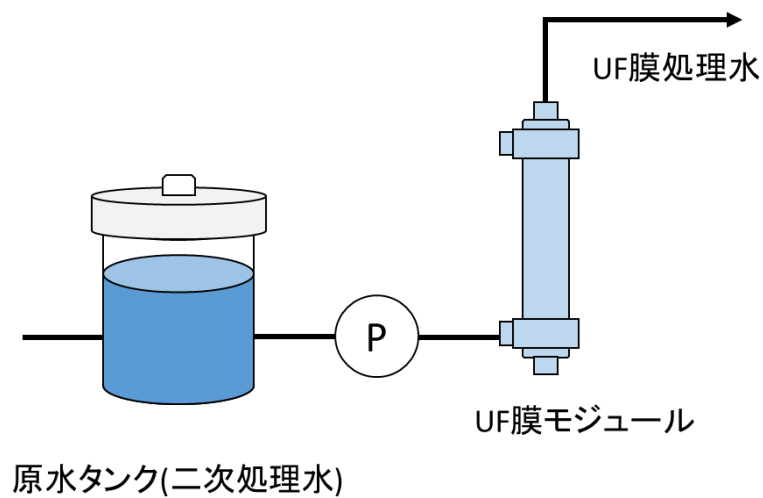


図 3.3 UF 膜処理のフロー図

連続運転及び採水を行った際の UF 膜処理の運転条件は以下の図 3.4 に示す通り、流量 (Flux) 約 1.0 m/d で一定のもとで、60 秒の原水給水、30 分のろ過運転、60 秒の逆流洗浄(逆洗)とエアバブリング洗浄(空洗)、45 秒の排水のサイクル(合計 34.7 分のサイクル)が繰り返される。また、次亜塩素酸ナトリウムの注入や静置、空洗や逆洗、排水、リンス洗浄が組み合わされた薬品洗浄を 1 日に 1 回行った。本研究における運転条件は B-DASH プロジェクトにおける運転条件¹⁾と同様であり、凝集剤(PAC)を添加しない点のみ CREST プロジェクトにおける運転条件²⁾と異なっている。

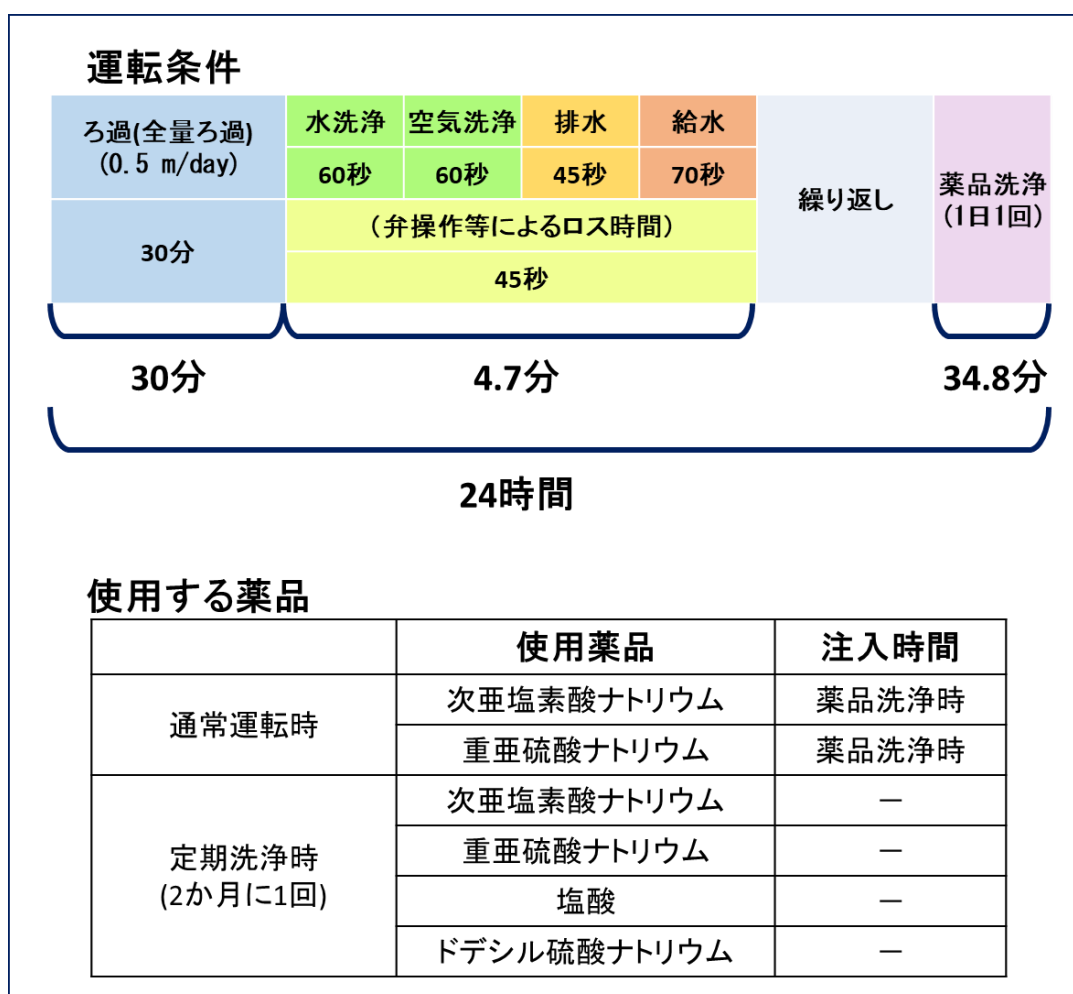


図 3.4 UF 膜処理の運転条件

3.2.2 RO 膜処理の運転条件

本研究では UF 膜の後段に RO 膜モジュールを設置し(図 3.4)、膜処理運転を行った。装置は膜モジュール、UF 膜ろ過水槽、排水槽、薬液タンク、ポンプ等で構成され、パイロットスケールでのクロスフローろ過を連続的に行うことが可能である。RO 膜モジュールには膜面積 8.0 m²の膜エレメントが 1 本ずつ装填されている。RO 膜の NaCl の阻止率は 99.7% であり、架橋芳香族ポリアミド系複合膜(TML10D ; 東レ株式会社製)である³⁾ 本膜は従来の RO 膜と比較して膜ファウリングを抑制でき、また耐久性が高いという特徴がある。



図 3.4 沖縄県内 A 下水処理場に設置された RO 膜装置

連続運転及び採水を行った際の RO 膜処理の運転条件は先行研究^{1),2)}と同様であり、以下の図 3.6 に示す通り、流量(Flux)0.45 m/d で一定のもとでクロスフローろ過が繰り返される。薬品を用いた定期洗浄は通常の運転サイクルに組み込まれていない。また、運転に際して次亜塩素酸ナトリウム、スケール防止剤、殺菌剤（DBNPA）が常時添加され、重亜硫酸ナトリウムが 1 日に計 4 時間添加されている。

運転条件

ろ過(クロスフロー)(0.45 m/day)

24時間連続運転

使用する薬品

	使用薬品	注入時間
通常運転時	次亜塩素酸ナトリウム	常時
	重亜硫酸ナトリウム	4時間/日
	スケール防止剤	常時
	殺菌剤(DBNPA)	1時間/日
定期洗浄時 (1か月に1回)	ドデシル硫酸ナトリウム	—
	塩酸	—
	クエン酸	—
	炭酸水素ナトリウム	—
	ラウリル硫酸ナトリウム	—

図 3.6 RO 膜処理の運転条件

本研究で用いたパイロットスケールの RO 膜モジュールには膜エレメントが各 1 本のみ装填されている。一方、実規模の膜処理施設では膜処理水の回収率を高めるため、複数本の膜エレメントが直列に装填される（図 3.5）。供給水は流入側のリードエレメントから入って各エレメントで透過・濃縮されながら流出側のエンドエレメントに至る。そのためリードエレメントとエンドエレメントの流入水質や透過流束といった運転条件が大きく異なることになり、最も濃縮された水が流入するエンドエレメントにおける膜処理水の水質が最も悪くなる。本研究ではエレメント 1 本のみを使用であるため、これらの現象を想定した実験をすることは難しい。そこで以下の図 3.6 のように先行研究²⁾と同様に濃縮水の循環率が 75 %、90 %となるように各流量を設定し、それぞれの条件で運転・採水を行った。濃縮水の循環率 75%は実プラントにおいて膜処理水の回収率(処理水量/供給水量×100)が 50%になるように設定したものであり、先行研究により連続運転可能な通常運転時のエレメントを想定している。濃縮水の循環率 90%は実プラントにおいて膜処理水の水質が最も悪化するエンドエレメントを想定している。

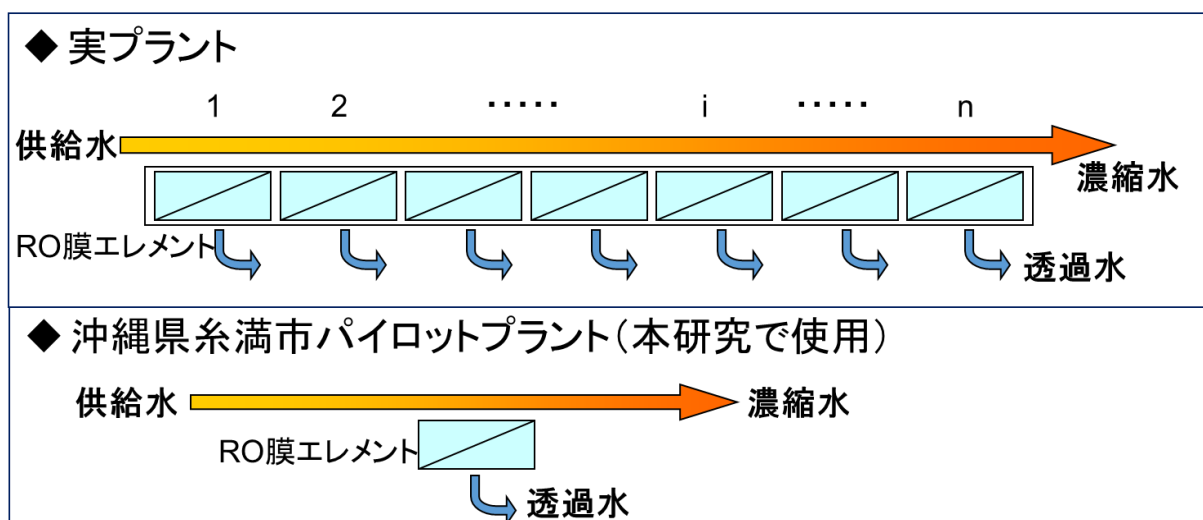


図 3.5 膜処理における供給水の透過・濃縮の流れ

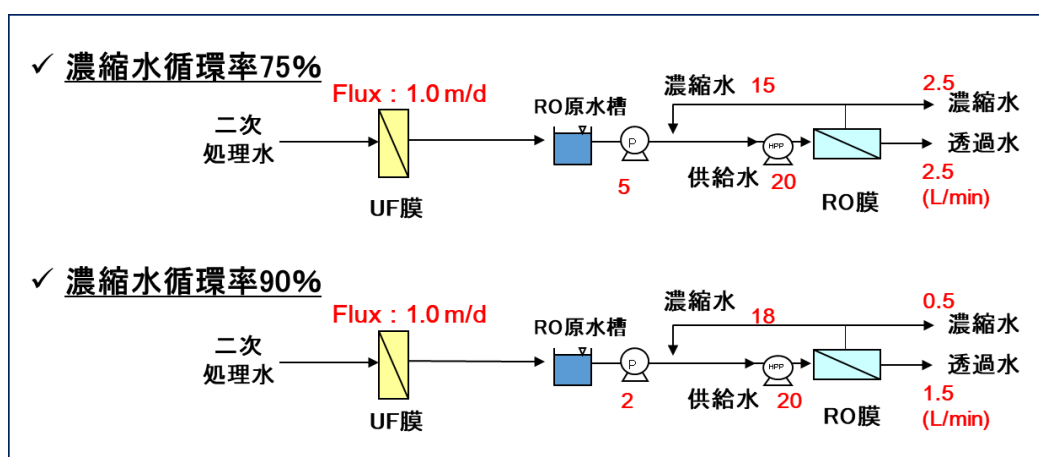


図 3.6 RO 膜装置の流量の設定

最後に本研究で使用した膜の特徴については以下の表に示す(表 3.1)⁴⁾。

表 3.1 本研究で使用した膜の特徴

Membrane	Manufacturer	Model number	Membrane material	Type	Pore size	Molecular weight cut-off	NaCl Rejection
UF	Toray	-	Poly-vinylidene fluoride(PVDF)	hollow fiber	-	150kDa	-
NF	Toray	TM610	Piperazine polyamide	Spyral	-	-	60%
RO	Toray	TML10F	Aromatic composite polyamide	Spyral	-	-	99.7%

3.2.3 採水

以下の図 3.7 に示すように、UF 膜処理供給水（二次処理水）・UF 膜処理水・RO 膜処理供給水・RO 膜処理水・RO 膜処理濃縮水を採水した。

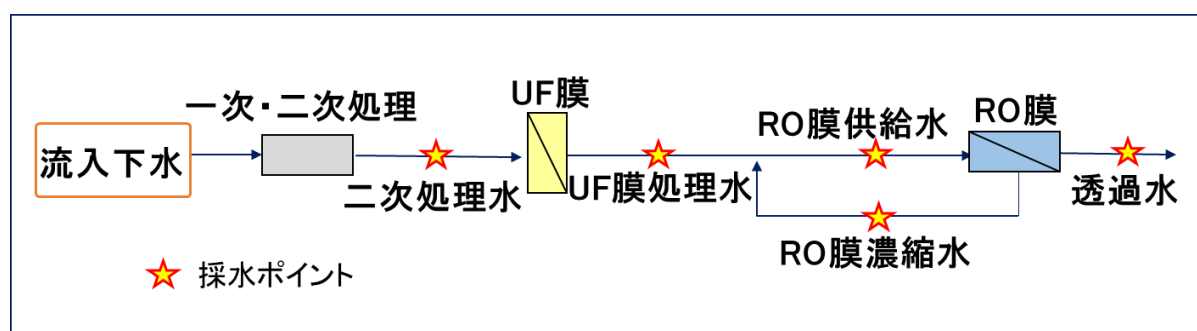


図 3.7 各膜処理における採水ポイント

運転及び採水を行った日時とその時の運転条件(RO 膜濃縮水循環率)を以下の表に示す(表

3.2)。RO 膜処理に関する採水は、運転開始後およそ 1 時間経過した後で行った。

表 3.2 採水日時と運転条件

採水日時		2017年		2018年			
		10月31日	11月2日	3月2日	9月4日	9月5日	10月31日
採水サンプル		原水(二次処理水)・UF膜処理水・RO膜供給水・RO膜処理水・RO膜濃縮水					
RO膜濃縮水循環率(%)		75	75	75	90	90	0
UF膜処理	温度(°C)	-	-	25.4	31.3	31.4	28.1
	膜間差圧(kPa)	-	-	25.2	26.5	25.1	26.1
RO膜処理	温度(°C)	29.7	30.0	25.8	33.3	32.1	27.9
	入口圧力(MPa)	0.78	0.69	0.70	0.52	0.65	0.51
	出口圧力(MPa)	0.77	0.68	0.69	0.51	0.64	0.50
	膜差圧(kPa)	6	5	8	8	7	6

* 2018 年 10 月 30 日の採水は以下の 3.3 のモデル式を用いた RO 膜処理水の水質の算定のために行っている。

* 運転状況を記録できていなかったものは-と表記している。

* 2018 年の 9 月 4 日と 10 月 30 日に RO 膜を新品の膜に交換した後運転・採水を行った。

3.2.4 膜処理水の水質測定

採水した原水および各膜処理水について、以下の項目について測定した。原水と各膜処理水の各項目の測定値から膜による除去率を算出した。なお、本論文では、対象物質の除去率は以下の式より算出した。

$$\text{除去率} = (C_f - C_p) / C_f \times 100 (\%)$$

* C_f : 原水中の対象物質の濃度、 C_p : 膜処理水中の対象物質の濃度

3.2.4.1 一般水質項目

一般水質項目(pH、電気伝導度(EC)、全蒸発残留物(TDS)、濁度、硬度)について、pH は pH メーター(pH LAQUA twin HORIBA 製)、EC および TDS は EC 計(COND LAQUA twin HORIBA 製)を用いて測定した。濁度は濁度計(2100Q Portable Turbidimeter HACH)を用いて測定した。硬度は試料中の Ca、Mg 濃度を炭酸カルシウムの量に換算し算出した。

3.2.4.2 有機物質

全有機炭素量(TOC)、化学的酸素要求量(COD)の測定について、TOC の測定には TOC 計(TOC-300V MITSUBISHI CHEMICAL ANALYTECH 社製)を用いた。COD の測定は下水道試験法 100℃における過マンガン酸カリウムによる酸素要求量の測定法⁵⁾に準拠

した。

3.2.4.3 無機物質

本研究では金属類について、Al、Na、Fe、Ca、Mg、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Mo、Cdを測定した。Al、Na、Fe、Ca、Mgの測定にはICP-AES(IRIS Intrepid Duo Thermo Electron 社製)を、それ以外の金属元素の測定にはICP-MS(Xseries2 Xt ThermoFisher Scientific 社製)を使用した。測定対象の金属の標準溶液の作成には、和光純薬工業株式会社製の多元素混合標準液(Multielement Standard Solution L-I、Multielement Standard Solution W-V)を使用した。また内部標準溶液は和光純薬工業株式会社製の多元素混合標準液(Multielement Standard Solution W-XI)を使用した。試料の酸分解に用いる硝酸は関東化学株式会社製の精密分析用であるUltrapur-100を使用し、超純水で希釈した。なお、本研究を通して使用する超純水は、純水製造装置(Elix UV5、Millipore 社製)と超純水製造装置(Milli-Q Advantage A10、Millipore 社製)を連結して製造したものを使用し、比抵抗値と有機炭素濃度はそれぞれ18.2 MQ・cm、1ppb程度であった。ICP-AES、ICP-MSの分析の前処理としては試料とブランク水(超純水)を0.45 μmのメンブレンフィルターでろ過し、硝酸を0.5 mol/Lになるように加えて酸分解した。これらの試料を検量線の濃度範囲に収まるように希釈した後、内部標準溶液を加えて、それぞれの装置で測定を行った⁶⁾。

その他、塩素イオン(Cl⁻)についてはイオンクロマトグラフ(Ion Chromatography System Thermo Fisher SCIENTIFIC 社製)を用いて測定した。全りん(TP)およびりん酸態りん(PO₄-P)については、下水道試験法に準拠し、ペルオキシ二硫酸カリウムによる分析法で試料を測定した⁷⁾。亜硝酸態窒素(NO₂-N)および硝酸態窒素(NO₃-N)、アンモニア態窒素(NH₃-N)、全窒素(TN)についても同様に下水道試験法に準拠して測定を行った⁸⁾。

3.2.5 沖縄県糸満市における工業用水の水質調査・分析方法

3.2.5.1 工業用水の採水

本研究では、膜処理水と実際に沖縄県で使用されている工業用水の水質を比較するために、沖縄県糸満市西崎町で実際に工業用水を使用している企業で工業用水を採水し、水質測定を行った。

採水箇所を以下の表3.3に示す。なお、工場内独自処理を行っている企業については独自処理後の工業用水を採水した。また工場内独自処理を行っている企業について独自処理の内容を以下の図3.8に示す。

表 3.3 工業用水採水地点

採水地点	採水日	工場内 独自処理	工業用水用途	工業用水 平均使用量 (m ³ /月)
麺類等製造会社	2018年 9月4日	有り	間接使用(茹でる際、冷却用)、 ボイラー水	8,360
水産食品・氷等 製造会社	2018年 9月4日	有り	氷・調味料(原料水)、間接使用 (茹でる際)、設備洗浄、冷却水	11,126
食塩等製造会社	2017年 11月1日	有り	ボイラー洗浄、 その他機具洗浄	2,298
コンクリート 製造会社	2018年 9月4日	無し	コンクリートの原料水、 機械・車両洗浄、散水	2,697
海水浴場	2017年 11月1日	無し	ボートなどの機具洗浄	282
自動車整備会社	2017年 11月1日	無し	車・床洗浄	1

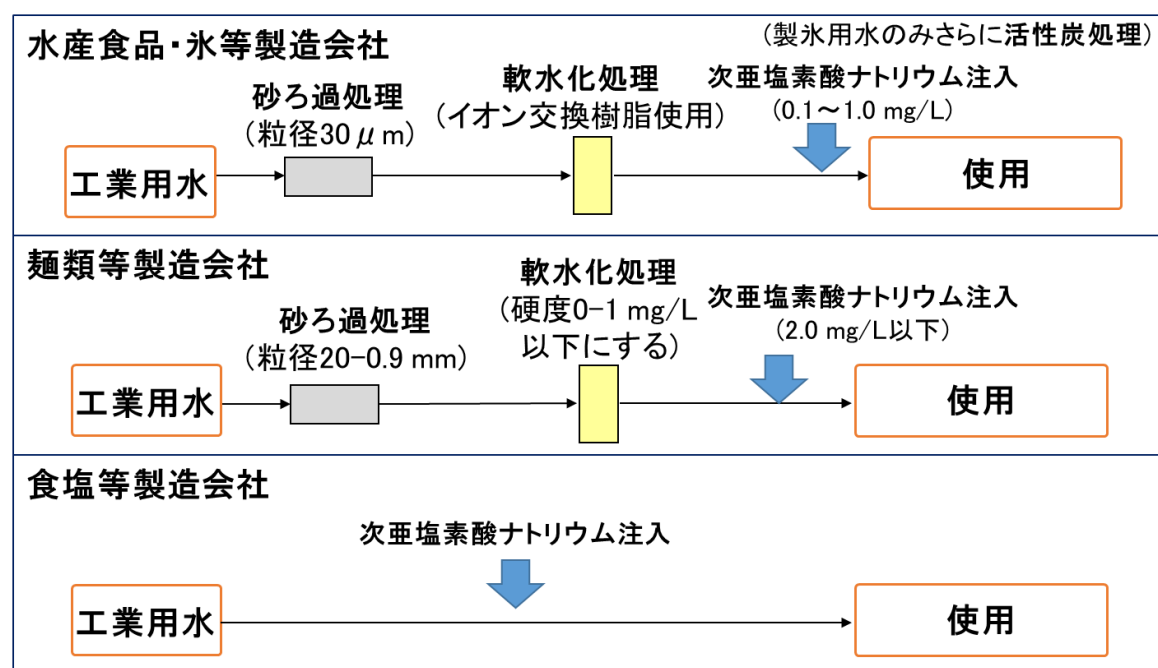


図 3.8 工場内独自処理

3.2.5.2 工業用水の水質測定

採水した工業用水についても膜処理水と同様に 3.2.4 の方法に従い水質測定を行った。

3.3 実プラントでの運用を想定した RO 膜処理水の水質の算定

3.2.2 で述べた通り、本研究で用いる RO 膜はエレメント 1 本のみを使用であるため、実際にプラントでの運用を想定し、エレメントを複数個つなげてろ過を行った場合における膜処理水の水質を実測することは難しい。しかし、溶質の除去率が極めて高い RO 膜処理については、圧力損失及び物質収支を加味することで、エレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質を算出することができる⁹⁾。

まず、1 つのエレメントの長さを L 、1 つのエレメントを m ($m=20$) 個のセクションに分割すると、1 つの区間の長さ Δx は、以下の式で示される(図 3.9)。

$$\Delta x = L/m$$

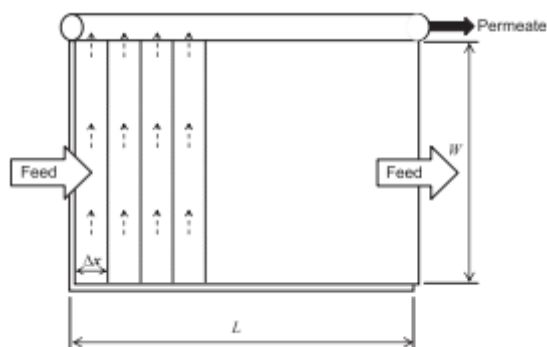


図 3.9 スパイラル型 RO 膜のシート図⁹⁾

なお、本研究で使用した RO 膜のエレメントの仕様は以下のとおりである(図 3.9)¹⁰⁾。

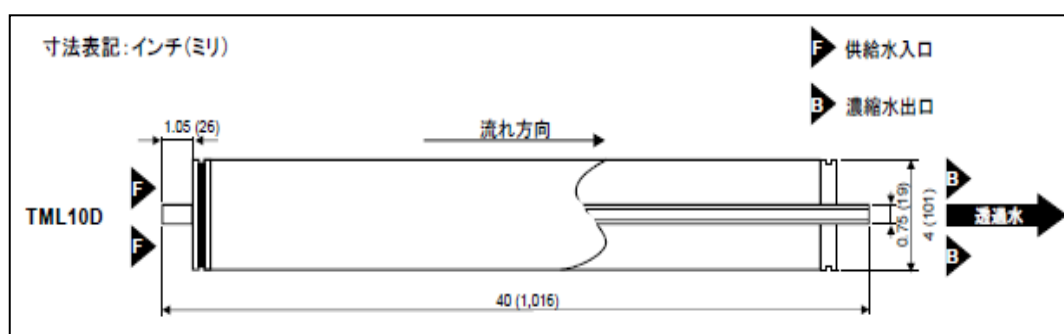


図 3.9 RO 膜エレメントの仕様

また、1 つのエレメントのシートのうち、供給水の流路を確保するためのスペーサーの占有する膜面積分(シートの全面積の約 10 %)はろ過に使用できないため、各区間のシートの

面積 ΔS は、以下の式で示される。

$$\Delta S = 0.9 \times S / m$$

* S : 膜面積

または

$$\Delta S = W \times \Delta x$$

* W : シート幅

また 1 つのエレメントにおける供給水の流路の断面積 ΔS_c は以下の式であらわされる。

$$\Delta S_c = W \times h_b$$

* h_b : チャネルの高さ

ここで i 番目の区間における透過流束 $J_p(i)$ 、1 区間当たりの処理水量 $Q_p(i)$ 、一つのエレメントから得られる処理水量 $Q_{p,t}$ は膜透過の輸送方程式以下のように示すことができる。

$$J_p(i) = L_p \times \{ (P_f(i) - P_p(i)) - \sigma \times \Delta \pi(i) \}$$

$$Q_p(i) = J_p(i) \times \Delta S$$

$$Q_{p,t} = \sum_{i=1}^m Q_p(i)$$

* L_p : 純水の透過係数、 σ : 溶質の反射係数、 P_f : 供給水側にかかる運転圧力、 P_p : 処理水側にかかる運転圧力、 $\Delta \pi$: 単位面積当たりにかかる浸透圧差

反射係数は膜の半透性を表し、 $\sigma = 1$ で完全な半透膜、 $\sigma = 0$ で半透性がない膜（分離が起こらない膜）を表す。本研究では溶質の除去率が高い RO 膜処理を想定しているため、 $\sigma = 1$ と仮定して計算する¹¹⁾。 $\Delta \pi$ については供給水中に含まれる塩濃度をもとに以下の式で算定することができる。

$$\Delta \pi(i) = 1.19 \times (T + 273) \times \sum_1^i m_{salt}(i)$$

* T : 供給水の絶対温度、 m_{salt} : 供給水中の塩のモル濃度

また圧力損失 ΔP は以下の式で示される。

$$\Delta P_f(i) = (f_{fb} \times \rho(i) \times U_b(i)^2 \times \Delta x) / (2 \times d_h)$$

$$U_b(i) = Q_f(i) / \Delta S_c$$

$$\rho(i) = 498.4M + \sqrt{248400 \times M^2 + 752.4 \times M \times \sum C_{salt}}$$

$$M = 1.0069 - 2.757 \times 10^{-4} \times T$$

$$\Delta P_{f,t} = \sum_{i=1}^m \Delta P_f(i)$$

$$d_h = 2h_p$$

* U_b : 平均流速、 f_{fb} : 摩擦係数、 ρ : 供給水の密度、 d_h : 水力直径、 C_{salt} : 塩の濃度

なお、摩擦係数 f_{fb} は RO 膜エレメントの出口側の圧力の実測値と計算値の差異が最小となるようにした。

また、摩擦損失 ΔP と供給水側にかかる圧力 P_f の関係式は以下のとおりであるため、 ΔP の値から各区間にかかる供給水側の圧力を算定する。

$$P_f(i+1) = P_f(i) - \Delta P_f(i)$$

流量 Q については以下の収支式が成り立つ。

$$Q_f(i+1) = Q_f(i) - Q_p(i)$$

最後に物質収支を考慮すると各区間の供給水・処理水中の溶質の濃度 $C_f(i)$ 、 $C_p(i)$ 及び処理水の平均濃度 $C_p(j)$ は以下のように求めることができる。

$$C_p(i) = C_f(i) \times (1 - R_{obs})$$

$$C_f(i+1) = (Q_f(i) \times C_f(i) - Q_p(i) \times C_p(i)) / Q_f(i+1)$$

$$C_p(j) = \sum_{i=1}^m C_p(i) Q_p(i) / \sum_{i=1}^m Q_p(i)$$

* R_{obs} : 各区間の見かけの除去率

なお、本研究では計算の簡略化のため、エレメント内の各区間で生じる濃度分極を無視し、各区間の見かけの除去率は一定(実測値を使用)とみなして計算を行う。

最後にエレメント全体を通していられる処理水中の溶質の平均濃度 $C_p(n)$ は以下の式から求められる。

$$C_p(n) = \sum_{j=1}^n C_p(j) Q_p(j) \div \sum_{j=1}^n Q_p(j)$$

* n : エレメントの数 (本研究では $N = 7$ としている)

本研究では濃縮水循環率 75 % の時の水質測定結果から 1 つ目のエレメントの 1 番目の区間に流入する RO 膜供給水の水質および見かけの除去率 R_{obs} を設定し、上式をもとに算定したエレメント全体の水質と、RO 膜処理水の水質のうち 1 番目のエレメントの水質の実測値を比較した。

3.4 UF 膜処理及び RO 膜処理の運転性評価

本研究では UF 膜処理及び RO 膜処理の運転面での実現可能性を評価するため、本章 3.2.1-3.2.2 で述べた運転条件に従って UF 膜及び RO 膜の連続運転を行った。

連続運転は 2018 年 12 月 11 日から 12 月 20 日の間の約 9 日間行った。UF 膜・RO 膜処理ともに過度な膜間差圧・入口圧力の上昇は装置の安全性に異常をきたす可能性があり、エネルギー的にも非効率なため、限界圧力に達する前に定期洗浄(以下、CIP と呼ぶ。CIP; Cleaning In Place)を行う。UF 膜については、運転期間における膜間差圧の上昇から塩酸と次亜塩素酸ナトリウムを用いた定期洗浄間隔を評価した¹²⁾。CIP 間隔 T_{CIP} の決定は以下の式に従って行う。

$$T_{CIP}(\text{日}) = \frac{P_{\max} - P_0 - \Delta A \times T_{bw} - \Delta B \times T_{TMC}}{\Delta C}$$

* ΔA : 1 サイクル間の膜間差圧上昇度(kPa/min)、 ΔB : 薬品洗浄間の膜間差圧上昇度(kPa/day)、 ΔC : CIP 間の膜間差圧上昇度(kPa/day)、 T_{CIP} : CIP 間隔(日)、 P_{\max} : 膜間差圧の限界値(限界圧力)(kPa)、 P_0 : 初期膜間差圧(kPa)、 T_{bw} : 物理洗浄間隔(分)、 T_{TMC} : 薬品洗浄間隔(日)

具体的には ΔA は各サイクル間のろ過工程の膜間差圧データを直線近似した傾きの平均値として算出し、 ΔB は各サイクルの開始時の膜間差圧を直線近似した傾きとして算出した。 ΔC は直線で直線で近似されるという前提のもと 1 日 1 回の薬品洗浄直後の運転開始時の膜間差圧を直線近似した傾きとして算出した。初期膜間差圧 P_0 は 18 kPa、膜間差圧限界値 P_{\max} は 150 kPa とした。

3.4.1 UF 膜処理の連続運転結果

連続運転を行った結果、運転開始から 8 日目に膜間差圧が急上昇し、運転の継続が困難となった(図 3.10)。膜間差圧の急上昇の原因には(1)供給する二次処理水の水質の悪化や(2)その他機器のトラブルや突発的事象などが考えられる。(1)について、西田ら¹²⁾の UF 膜処理の連続運転の結果によると、降雨により原水中の濁度が 1 日で約 3 NTU から 9 NTU に上昇しても、膜間差圧の上昇は約 80 kPa から 100 kPa に上昇する程度であった。一方で本運転試験の結果を見ると、約 2 時間半で差圧が 40 kPa から 150 kPa に急上昇している。そのため(1)の濁度上昇などの供給する二次処理水の水質悪化が原因とは考えにくいと推察される。そのため連続運転の結果の評価は差圧急上昇部分を除いて行うこととした。そこで式 5.21 を適用すると、CIP 間隔 T_{CIP} は 239 日間となった。そのため本章の 5.4.2.3 の薬品費の計算において設定している UF 膜の洗浄間隔(2 か月)は実現可能である可能性が高いが、連続運転期間が約 8 日間と短いため、今後は長期の連続運転を行い、膜間差圧の上昇傾向を実測し、本研究で定めた CIP 間隔が妥当かどうか検討する必要がある。

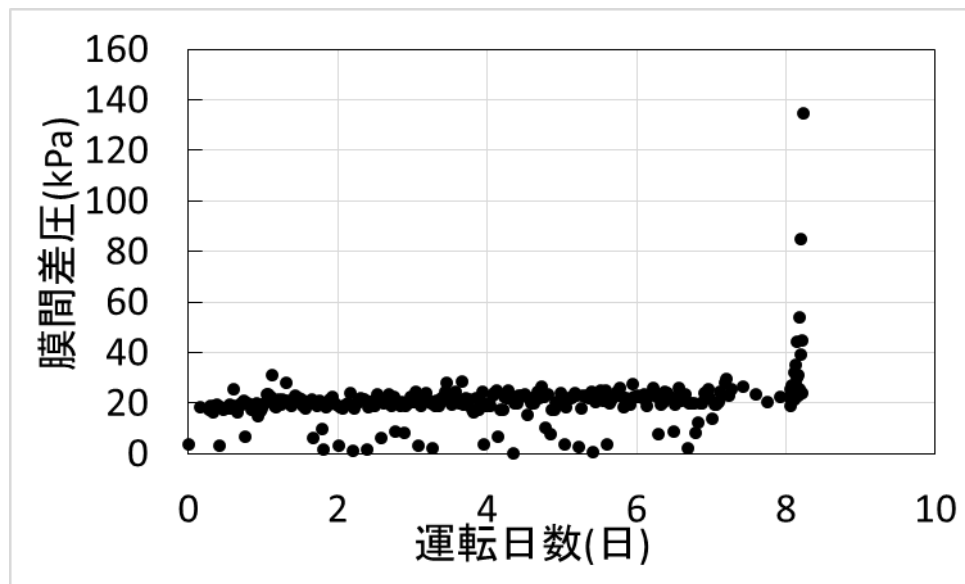


図 3.10 : UF 膜処理運転結果

3.4.2 RO 膜処理の連続運転結果

連続運転を行った結果、RO 膜処理における入口圧力は多少の変動はあるものの、上昇する傾向はみられなかった(図 3.11)。本研究においては前段の UF 膜装置の運転停止に伴って、供給水不足になり RO 膜装置も運転停止したが、同運転条件で連続運転を行った 2 章 2.26 で述べた竹内ら¹³⁾の連続運転結果と比較すると、どちらも運転開始 8 日間で入口圧力の上昇は確認されなかった。竹内らの連続運転は 23 日以上連続運転が可能であったため、本研究における RO 膜の連続運転も 23 日以上連続運転が可能と推察される。しかし本章の 5.4.2.3 の薬品費の計算において設定している RO 膜の洗浄間隔(2 か月)の実現可能性の評価には至らなかったため、さらなる長期の連続運転を行い、定期洗浄間隔を定める必要がある。

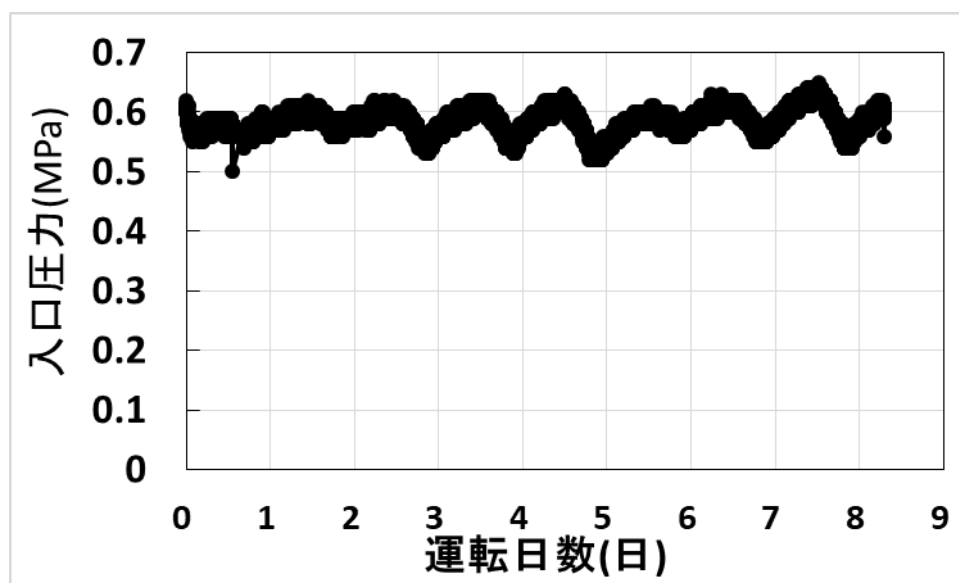


図 3.11 : RO 膜処理運転結果

上記の UF 膜・RO 膜の連続運転結果より、UF 膜については 2 か月間の連続運転が可能であると仮定し、UF 膜の定期洗浄頻度を 2 か月に 1 回とした。RO 膜については本節の結果から 23 日間以上の連続運転については実現可能か確認できなかったため、計算の便宜上 RO 膜の定期洗浄頻度を 1 か月に 1 回として、5 章の再生水生産費用の算出を行うこととした。

3.5 膜処理水と工業用水の水質測定結果

3.5.1 膜処理水の水質測定結果

UF 膜処理供給水（二次処理水）・UF 膜処理水・RO 膜処理供給水・RO 膜処理水・RO 膜処理濃縮水について、3.2.4 の分析方法で一般水質項目、有機物質、無機物質の測定を行った結果を表 3.4-3.5 に示す。表 3.4 と表 3.5 の RO 膜供給水・RO 膜処理水の測定値の標準偏差を見ると、元の原水に含まれる濃度が低い金属類を除き、同じ運転条件下では水質は大きく変動していないことが分かる。

表 3.4 水質測定結果(RO 膜処理における濃縮水循環率 75%) (サンプル数 = 3)
(2017 年 10 月 31 日・2017 年 11 月 2 日・2018 年 3 月 2 日採水)

測定項目	単位	原水(二次処理水)	UF膜処理水	RO膜供給水	RO膜処理水
pH	—	7.2±0.1	7.2±0.1	7.4±0	6.8±0.2
TDS	g/L	0.6±0	0.6±0	0.9±0.1	<0.1
EC	mS/cm	0.9±0	0.9±0	1.5±0	<0.1
濁度	NTU	8.2±5.6	1.1±0.9	0.2±0	<0.1
硬度	mg/L	91.6	91.2	167.0	<0.1
TOC	mg/L	13.2±0.8	11.6±0.9	14.7±0.6	1.1±0.2
COD	mg/L	16.2±7.0	15.3±7.5	17.6±6.6	0.7±0.5
TN	mg/L	16.2±1.3	16.0±0.8	23.6±0.8	0.8±0.4
NO ₃ -N	mg/L	2.0±0.6	1.9±0.6	5.1±2.5	0.1±0.1
NO ₂ -N	mg/L	0.7±0	0.8±0.1	0.7±0.2	<0.1
NH ₃ -N	mg/L	7.5±1.4	7.4±1.4	9.7±0.7	0.6±0.2
TP	mg/L	0.5±0.2	0.4±0.2	0.6±0.3	<0.1
PO ₄ -P	mg/L	0.3±0.2	0.3±0.2	0.5±0.3	<0.1
Cl ⁻	mg/L	—	—	—	—
Na	mg/L	113.3±0.9	114.8±3.3	194.1±5.3	3.2±0.3
Ca	mg/L	21.2±2.0	21.2±2.2	36.1±2.4	<0.1
Mg	mg/L	11.4	11.5	20.5	<0.1
Al	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Fe	mg/L	0.1±0	0.1±0	0.1±0	<0.1
B	mg/L	0.1±0	0.1±0	0.1±0	0.1±0
Cr	μg/L	1.8±0.4	2.0±0.5	3.2±0.6	<0.01
Mn	μg/L	11.3±3.9	16.0±6.6	25.1±9.7	<0.1
Ni	μg/L	1.5±0.2	2.0±0.3	6.6±2.9	<0.1
Cu	μg/L	1.7±0.2	2.5±0.5	2.4±0.3	0.7±0.1
Zn	μg/L	9.2±3.0	6.4±1.0	10.6±0.5	3.2
Mo	μg/L	0.8±0.2	0.9±0.3	2.4±0.9	1.9
Cd	μg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

*濃度(値)は、「平均値±標準偏差」を示している。

*未測定項目は—と表記している。

*標準偏差が 0.1 未満のものは±0 と表記している。

*検出下限値については、COD は 1 mg/L、表の Cr 以下の金属は 0.1 μg/L、それ以外は 0.1 mg/L である。

表 3.5 水質測定結果(RO 膜処理における濃縮水循環率 90%) (サンプル数 = 2)
(2018 年 9 月 4 日・2018 年 9 月 5 日採水)

測定項目	単位	原水(二次処理水)	UF膜処理水	RO膜供給水	RO膜処理水
pH	－	6.3-6.7	6.0-6.8	7.0-7.6	6.1-6.5
TDS	g/L	0.6	0.5-0.6	1.1-1.4	<0.1
EC	mS/cm	0.9	0.9	1.8-2.2	<0.1
濁度	NTU	4.3-5.2	(0.1)	<0.1	<0.1
硬度	mg/L	99.9-103.4	97.1-107.3	283.7-286.3	<0.1
TOC	mg/L	8.7-10.8	8.1-10.2	20.5-21.9	0.5-0.7
COD	mg/L	29-33	20-23	26-41	<1
TN	mg/L	11.8-15.3	12.2-16.7	22.0-25.2	1.7-3.6
NO ₃ -N	mg/L	1.9-4.4	1.5-3.7	3.6-8.6	0.2-0.4
NO ₂ -N	mg/L	0.3-1.1	0.3-1.3	(0.4)	(0.1)
NH ₃ -N	mg/L	6.9-10.1	7.4-9.4	10.3	1.1-2.0
TP	mg/L	0.8-1.3	0.7-1.1	1.5-1.7	<0.1
PO ₄ -P	mg/L	0.7-1.2	0.7-1.1	1.8-2.2	<0.1
Cl ⁻	mg/L	111.0-114.0	109.7-117.7	374.1-380.0	2.8-3.0
Na	mg/L	104.0-107.4	105.0-110.9	299.2-300.0	11.4-12.4
Ca	mg/L	19.7-20.4	19.1-20.5	56.0-57.4	<0.1
Mg	mg/L	12.3-12.7	12.0-13.6	34.7-35.0	<0.1
Al	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Fe	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
B	mg/L	0.1	0.1	0.1	(0.1)
Cr	μg/L	1.9-2.4	1.9-2.4	4.7-5.0	(0.3)
Mn	μg/L	13.4-14.3	18.4-22.5	56.7-56.8	(6.8)
Ni	μg/L	4.2-5.5	9.8-22.8	17.5-21.4	(5.3)
Cu	μg/L	3.7-4.2	0.6-0.8	2.3-3.8	(0.2)
Zn	μg/L	16.2-30.5	8.3-41.6	31.5-37.0	0.6-8.4
Mo	μg/L	0.9-1.1	1.5-1.7	3.5-4.2	0.6-1.5
Cd	μg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

*2つのサンプルのうち1つが検出下限値未満のものは()と表記している。

*検出下限値については、COD は 1 mg/L、表の Cr 以下の金属は 0.1 μg/L、それ以外は 0.1 mg/L である。

次に濃縮水の循環率を変えた時の RO 膜処理水の水質の違いに着目する。RO 膜供給水の測定値を比較すると、以下の図 3.10 より TOC、TP の測定値については、濃縮水の循環率が 90%のときは 75%のときと比べてそれぞれ約 50%、170%増加したが、処理水の測定値はほぼ変わらない結果となった。また、以下の図 3.11 より、Ca、Mg の濃度についても濃縮水の循環率が 90%のときは、75%のときと比べて RO 膜供給水の測定値がそれぞれ約 60%、70%増加したが、処理水の測定値は濃縮水の循環率によらず検出下限値に近い値、もしくは検出下限値未満となった。一方で図 3.10-3.11 より TN、NH₃及び Na については、濃縮水の循環率を高くすると、処理水中に含まれる濃度も高くなる傾向が見られた。

このことから RO 膜処理において、有機物質・リン及び Na 以外の金属類(Ca、Mg)については、供給水の水質が悪化しても処理水は同等の水質を担保できることが示唆される。

処理水中の Na 濃度の変動に関しては、RO 膜の Na の除去率は 99.7%であり、硬度物質の Ca・Mg や有機物質と比較して除去率が低いため、RO 膜供給水中の Na の濃度が 100 mg/L 以上と比較的高くかつ変動する時は、RO 膜処理水の水質もその変動を受けるからだと考えられる。

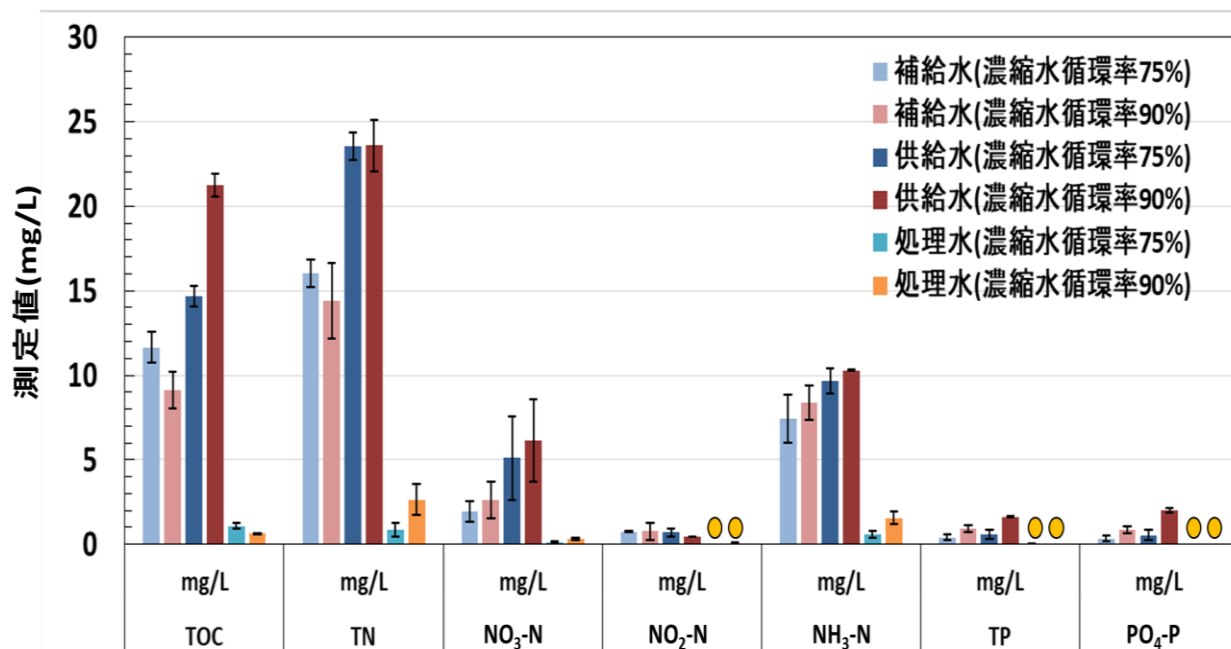


図 3.10 濃縮水の循環率の違いにおける供給水・処理水の水質の違い(有機物・窒素・リン)

* ●は検出下限値未満を示す。

* 補給水は UF 膜処理水を表す。

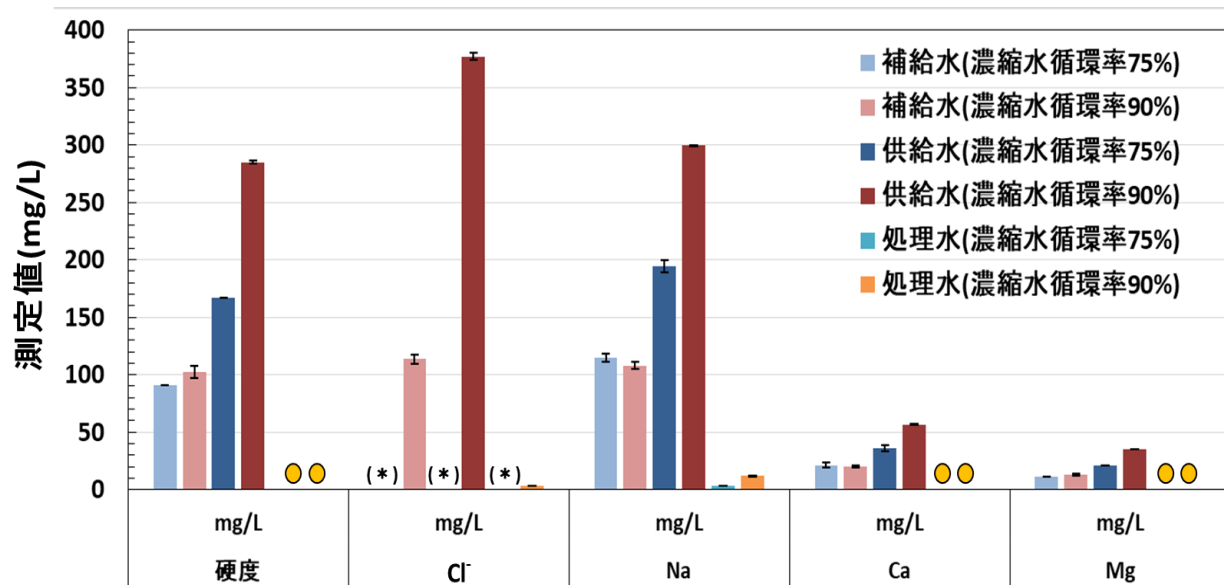


図 3.11 濃縮水の循環率の違いにおける供給水・処理水の水質の違い(塩素イオン・金属類)

- *●は検出下限値未満を示す。
- *(*)は未測定であることを示す。
- *補給水は UF 膜処理水を表す。

3.5.2 工業用水の水質測定結果

3.2.4 で示す工業用水について、3.2.4 の分析方法で一般水質項目、有機物質、無機物質の測定を行った結果を表 3.6 に示す。各企業が使用している工業用水の原水及び工業用水の生産プロセスは同じであるため、ほとんどの水質項目で測定値は大きく変わらないが、「麺類等製造会社」・「水産食品・氷等製造会社」においては硬度物質を取り除く処理を独自に行っているため、硬度物質である Ca・Mg の測定値が 0.1 mg/L もしくはそれ以下となっており、ほかの工業用水の測定値(5.0-6.4 mg/L)と比較して低い値となっている。また Na については 6 つの企業で測定値にバラツキがあるが、これは殺菌目的で添加する次亜塩素酸ナトリウムの添加の有無・添加量や各企業の工業用水の保存状態が関係していると推察される。

表 3.6 工業用水の水質測定結果

測定項目	単位	麵類等 製造会社	水産食品・氷等 製造会社	食塩等 製造会社	コンクリート 製造会社	海水浴場	自動車整備会社
pH	—	7.3	7.1	7.0	6.5	6.8	6.9
TDS	g/L	0.1	0.1	0.1	<0.1	0.1	0.3
EC	mS/cm	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.5
濁度	NTU	<0.1	0.1	<0.1	0.1	0.1	<0.1
硬度	mg/L	<0.2	<0.2	—	25.9	—	—
TOC	mg/L	1.5	1.9	2.2	1.8	1.9	1.2
COD	mg/L	6.0	7.0	4.2	5.0	4.0	4.0
TN	mg/L	0.9	0.7	0.9	0.5	<0.1	<0.1
NO ₃ -N	mg/L	0.5	0.5	0.1	0.5	<0.1	<0.1
NO ₂ -N	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
NH ₃ -N	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	1.3	<0.1	<0.1
TP	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PO ₄ -P	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cl ⁻	mg/L	16.3	17.8	—	16.2	—	—
Na	mg/L	26.5	29.3	11.1	13.6	11.7	57.5
Ca	mg/L	0.1	0.1	6.4	6.2	6.0	5.0
Mg	mg/L	<0.1	<0.1	—	2.6	—	—
Al	mg/L	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Fe	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
B	μg/L	15.6	15.9	14.8	15.4	14.4	23.5
Cr	μg/L	<0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	1.6
Mn	μg/L	<0.1	<0.1	0.9	1.5	0.4	0.9
Ni	μg/L	1.6	0.1	0.7	1.8	0.3	0.3
Cu	μg/L	4.0	1.7	1.8	1.4	0.5	1.7
Zn	μg/L	4.9	0.5	76.3	72.4	1.7	83.1
Mo	μg/L	0.1	0.1	<0.1	0.1	0.5	0.5
Cd	μg/L	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	0.1

* 赤字は独自処理を行っている企業を示す。独自処理は以下の通りである。

(独自処理内容の詳細は図 3.8 参照)

麵類等製造会社：砂ろ過処理→軟水化処理→次亜塩素酸ナトリウム添加

水産食品・氷等製造会社：砂ろ過処理→軟水化処理→次亜塩素酸ナトリウム添加

食塩等製造会社：次亜塩素酸ナトリウム添加

* 独自処理を行っている企業については独自処理後の工業用水を採水している。

* 未測定項目は—と表記している。

* 検出下限値については、COD は 1 mg/L、表の Cr 以下の金属は 0.1 μg/L、それ以外は 0.1 mg/L である。

3.5.3 再生水と工業用水の水質比較

次に再生水(RO膜処理水)と工業用水の水質を比較したものを以下の図3.12-3.13に示す。有機物質含有量の指標であるTOCについては、図3.12のTOCの項目に示す通り濃縮水の循環率の違い、水質の変動、未処理の工業用水の採水地点の違いを考慮しても、測定値は再生水の方が下回るという結果が得られた。TN・NO₂-N・NO₃-N・NH₃-Nについては、再生水の方が測定値が高くなる傾向が見られた。しかし工業用水(未処理)については3社中2社のTN・NO₃-N・NH₃-Nの測定値が検出下限値未満であり、NO₂-Nについては3社とも検出下限値未満であった。残り1社についてもTN値が再生水よりも低いため、下水を水源としている再生水の方が、既存の工業用水と比較してこれらの値が高くなる可能性が高い。

次に金属類については図3.13に着目すると、濃縮水の循環率の違い、日時による水質の変動、未処理の工業用水の採水地点の違いを考慮しても、再生水中に含まれるNa・Ca・Mgの濃度は工業用水を下回る結果となった。Ca・Mgの濃度から算出される硬度についても、再生水は未処理の工業用水の測定値を下回っている。さらに、RO膜処理水と硬度成分を取り除く企業内独自処理を施した工業用水(以下、独自処理工業用水)の水質を比較すると(図3.14)、硬度・Ca・Mgの測定値は、再生水と独自処理工業用水ともに検出下限値未満であり、Ca・Mgの濃度が僅少であるといえる。また再生水中のNaの濃度は独自処理工業用水の濃度を下回っていた。このことから、UF膜処理+RO膜処理を施すことで、独自処理を施した工業用水と同程度まで硬度物質を除去することができ、NaやCl⁻の濃度が独自処理工業用水以下の再生水を得ることができることが示された。

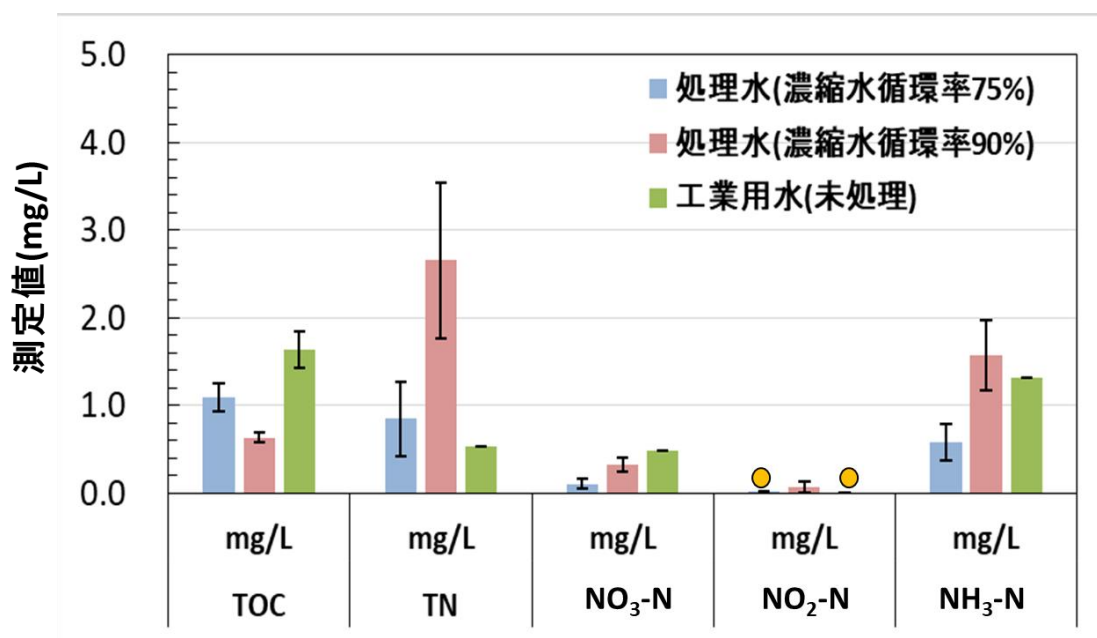


図 3.12 再生水(RO膜処理水)と工業用水の水質の比較 (有機物・窒素・リン)

*●は検出下限値未満を示す。

*工業用水は未処理の企業3社の結果を反映している。

*工業用水のTN・NO₃-N・NH₃-Nの測定値については、3社中2社が検出下限値未満であったため、検出下限値以上であった1社の結果を示している(標準偏差が存在しない)。

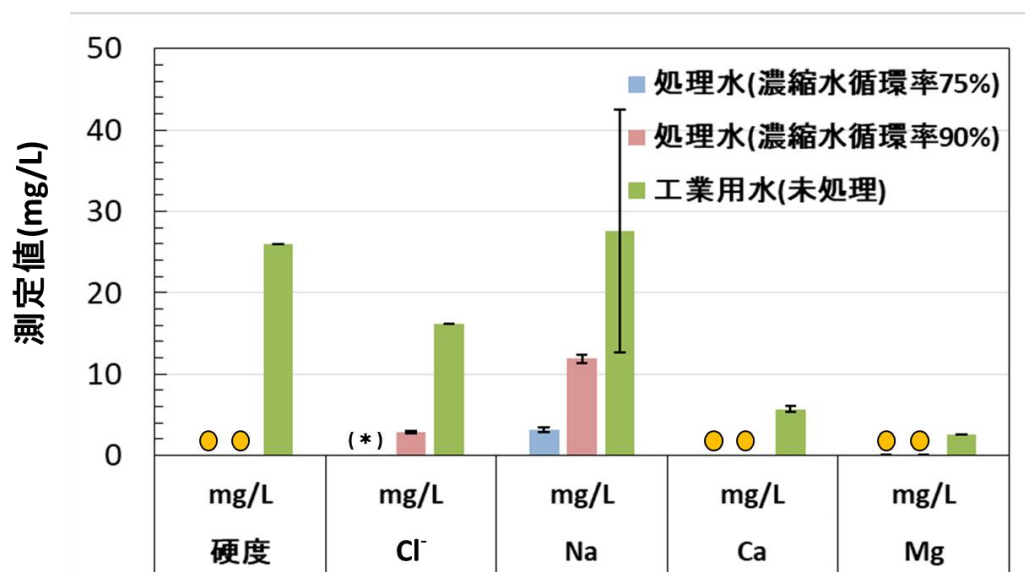


図 3.13 再生水(RO 膜処理水)と工業用水の水質の比較 (塩素イオン・金属類)

*○は検出下限値未満を示す。

()は未測定であることを示す。

*工業用水は未処理の企業 3 社の結果を反映している。

*硬度・Cl⁻・Mg については、1 社のみの測定結果反映しているため、標準偏差が存在しない。

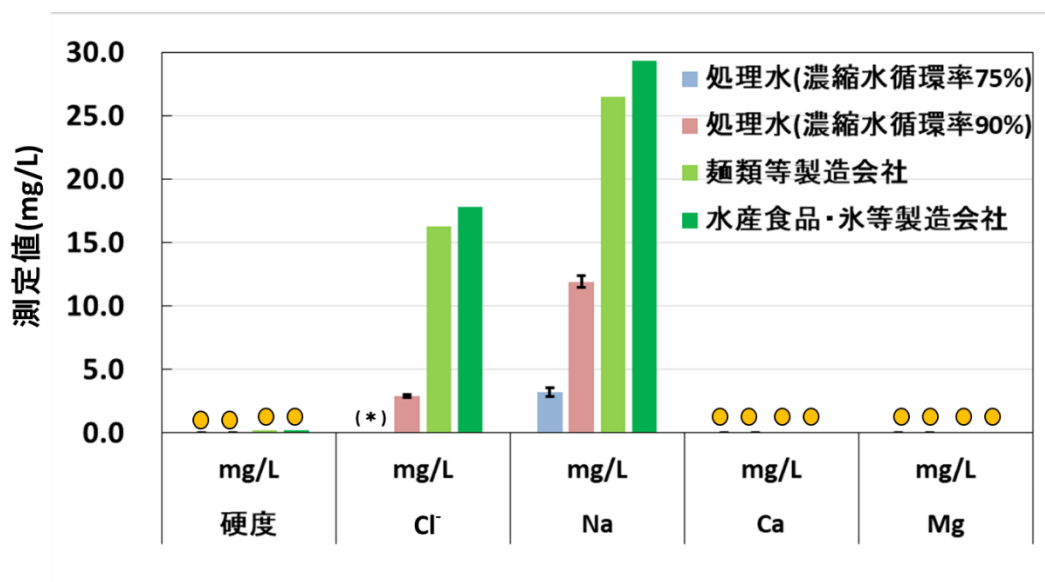


図 3.14 再生水(RO 膜処理水)と独自処理工業用水の水質の比較 (塩素イオン・金属類)

*○は検出下限値未満を示す。

()は未測定であることを示す。

3.6 実プラントでの運用を想定した RO 膜処理水の水質の算定結果

RO 膜処理について 3.3 で示した方法で、複数のエレメントを接続し、運転を行った際の圧力損失及び物質収支を加味することで、エレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質を算出した。

まず水質の算定に当たり、1 つ目のエレメントを想定して濃縮水の循環率を 0% に設定し運転を行った際の以下の表 3.7 の水質測定結果の内、RO 膜供給水の水質をモデル式の入力値として使用した。

表 3.7 RO 膜処理における水質測定結果(濃縮水循環率 0%)

測定項目	単位	RO膜供給水	RO膜処理水
pH	—	7.3	6.6
TDS	g/L	0.7	<0.1
EC	mS/cm	1.1	<0.1
濁度	NTU	0.2	<0.1
硬度	mg/L	100.9	<0.1
TOC	mg/L	10.8	0.6
COD	mg/L	30.0	<1
TN	mg/L	20.1	1.6
NO ₃ -N	mg/L	1.9	0.1
NO ₂ -N	mg/L	<0.1	<0.1
NH ₃ -N	mg/L	14.8	0.4
TP	mg/L	0.4	<0.1
PO ₄ -P	mg/L	0.4	<0.1
Cl ⁻	mg/L	122.4	0.5
Na	mg/L	128.9	2.4
Ca	mg/L	18.6	<0.1
Mg	mg/L	13.2	<0.1
Al	mg/L	<0.1	<0.1
Fe	mg/L	<0.1	<0.1
B	mg/L	0.1	<0.1
Cr	μg/L	2.6	<0.1
Mn	μg/L	12.4	<0.1
Ni	μg/L	1.7	<0.1
Cu	μg/L	1.5	<0.1
Zn	μg/L	9.4	<0.1
Mo	μg/L	1.0	<0.1
Cd	μg/L	<0.1	<0.1

* 検出下限値については、COD は 1 mg/L、表の Cr 以下の金属は 0.1 μg/L、それ以外は 0.1 mg/L である。

3.3 で示したモデル式と表 3.7 の RO 膜供給水の値を用いてエレメントを 7 つ接続し運転を行った際の、圧力損失及び物質収支を加味した、エレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質を以下の表 3.8 に示す。なお 3.3 で示したモデル式は除去率が高いと

いう前提の下で成り立つ式のため、本計算では除去率 99%以上の Cl⁻・Ca・Mg について算出した(RO 膜処理における除去率が約 92-99%の TOC・TN・TP についても参考値として算出・評価する)。ここで算出結果の妥当性を検討するために、1 つ目のエレメントにおける算出結果(理論値)と、1 つ目のエレメントを想定し濃縮水の循環率 0%で運転した際の処理水の水質測定結果(表 3.7 の RO 膜処理水の水質測定結果)を比較すると(図 3.15)、両者の値に大きな差が無いことが示された。

表 3.8 エレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質算定結果

測定項目	単位	RO膜処理水(エレメント全体)
TOC	mg/L	1.01
TN	mg/L	2.95
TP	mg/L	<0.1
Cl ⁻	mg/L	0.88
Na	mg/L	4.53
Ca	mg/L	<0.1
Mg	mg/L	<0.1

* 赤字は参考値として算出したものである。

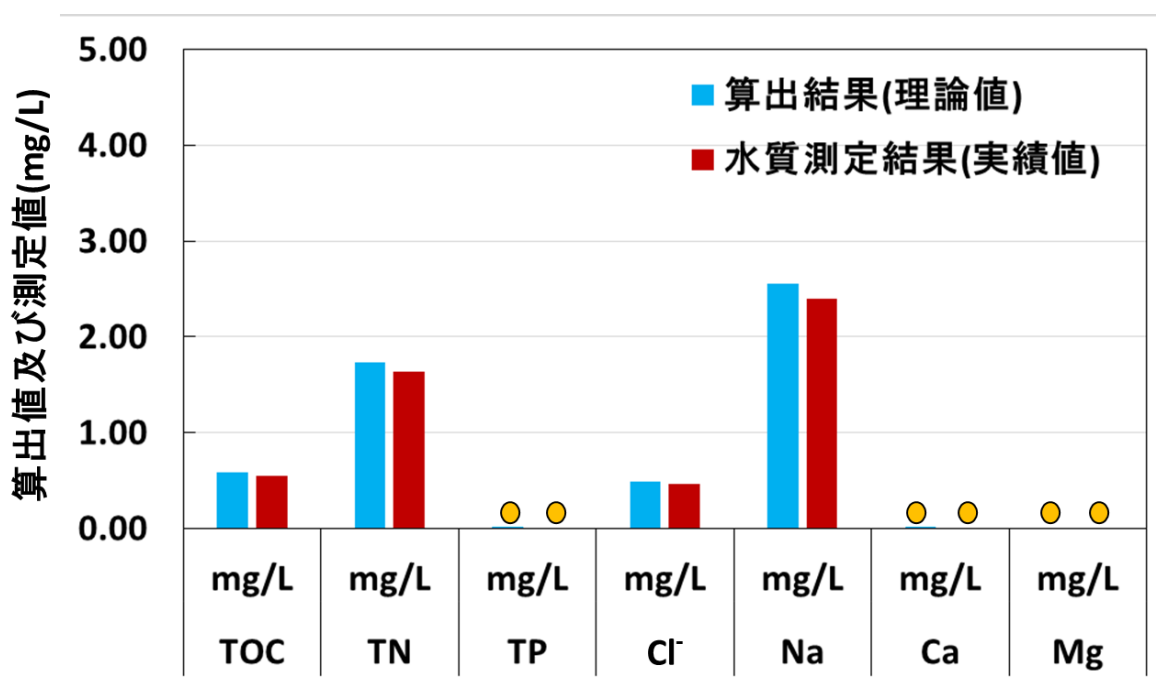


図 3.15 RO 膜処理水の水質における算出した理論値と実績値の比較

* ●は検出下限値未満を示す。

次に図 3.16-3.17 に示す通り表 3.7 に示したエレメント全体の水質の算出結果と、既存の未処理の工業用水及び独自処理を行った工業用水の水質を比較すると、3.4.3 のエレメント 1 つを用いた再生水と工業用水の水質比較を行った場合と同様に、TN 以外の項目で RO 膜エレメント全体を通して得られる処理水の方が、既存の未処理の工業用水よりも濃度が低

い結果となった。また硬度成分を取り除く企業内独自処理を施した独自処理工業用水の水質を比較すると、TOC については、RO 膜処理水は独自処理工業用水と比較して約 30-45% 測定値が下回っていた。硬度物質の $\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ の濃度はどちらも僅少であるといえる。また再生水中の Na の濃度は独自処理工業用水の濃度を下回っていた。このことから実プラントを想定し、7つのエレメントを接続した場合でも、UF 膜処理+RO 膜処理を施すことで、独自処理を施した工業用水と同程度まで硬度物質を除去することができ、有機物質や Na 及び Cl^- の濃度を独自処理工業用水以下まで除去できることが示された。

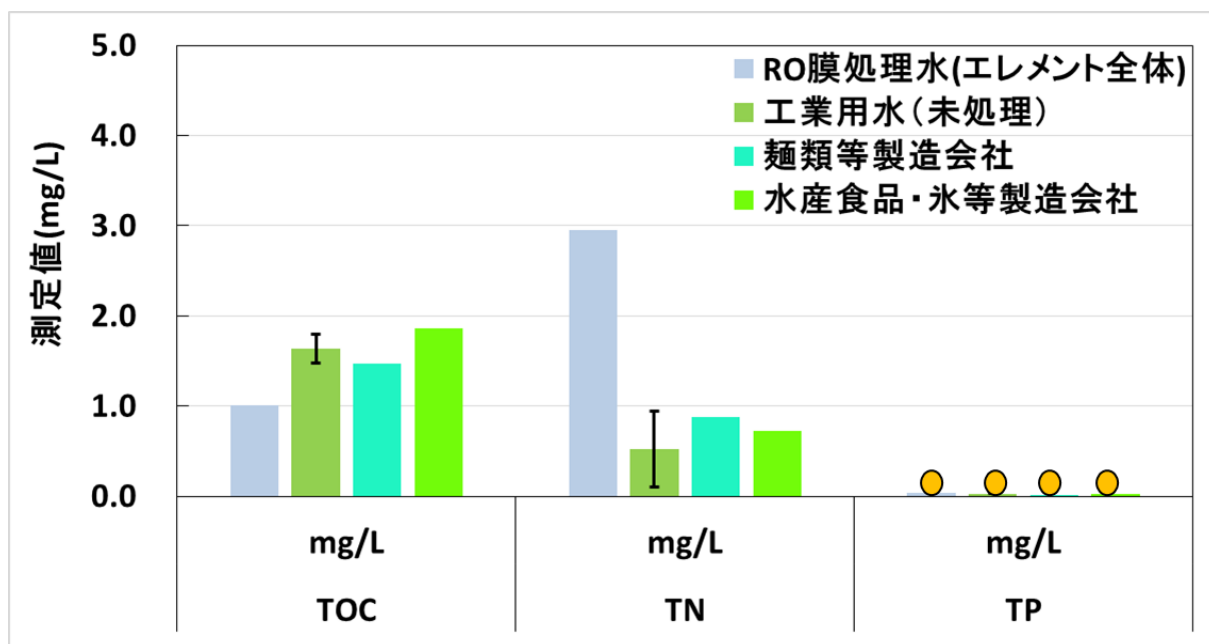


図 3.16 RO 膜処理水(エレメント全体)と工業用水の水質比較 (TOC・TN・TP)

* ●は検出下限値未満を示す。

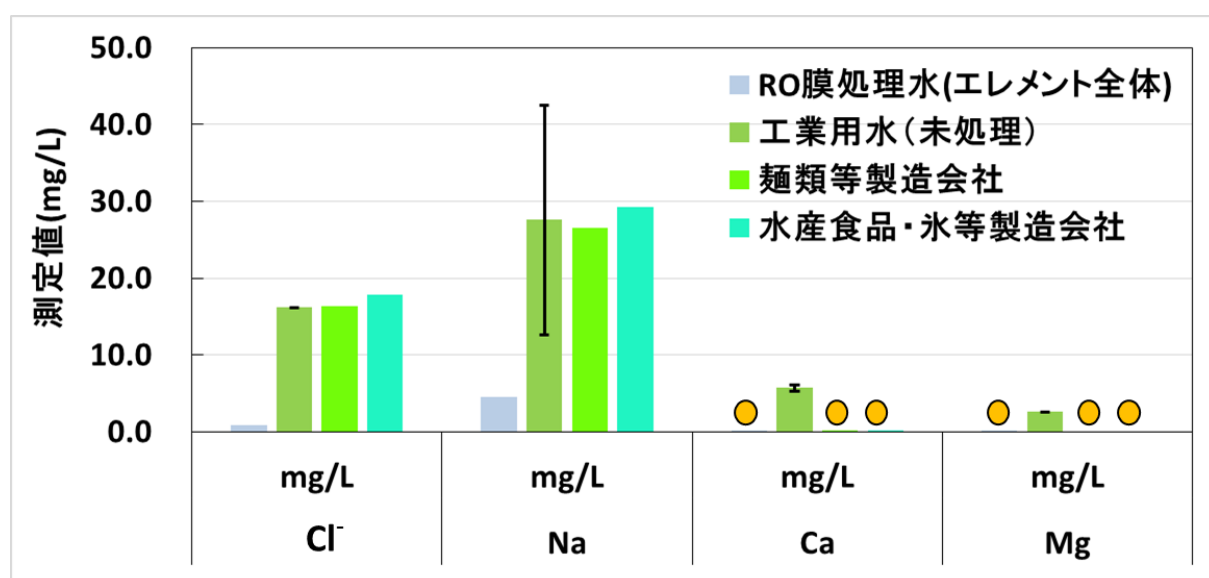


図 3.17 RO 膜処理水(エレメント全体)と工業用水の水質比較 (Cl^- ・ Na ・ Ca ・ Mg)

* ●は検出下限値未満を示す。

3.7 本章のまとめ

本研究では沖縄県糸満市において UF 膜・RO 膜を用いて下水処理場の二次処理水を処理するプロセスについて、再生水の生産費用算出の前提となっている連続運転の実現可能性について検討するために、パイロットスケールで連続運転を行うとともに、最終的に得られる膜処理水の水質の評価を行った。そこで各膜処理水を採水し、一般水質項目、有機物質および無機物質について水質を測定し評価した。また膜処理水と実際に沖縄県で使用されている工業用水の水質を比較するために、沖縄県糸満市西崎町で実際に工業用水を使用している企業で工業用水を採水し、水質測定を行った。最後に溶質の除去率が極めて高い RO 膜処理については、RO 膜処理における除去率が高い項目に限り、複数のエレメントを接続して運転を行った際の、圧力損失及び物質収支を加味したエレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質を算出し、既存の工業用水と水質の比較を行った。以下が本章で得られた知見である。

1. UF 膜処理と RO 膜処理の連続運転の実現可能性の検討については、連続運転期間が約 8 日間であったが、UF 膜処理については CIP 間隔の算定を通して 2 か月間の連続運転が可能である可能性が高いことが示唆された。RO 膜処理についても竹内らの連続運転時と比較して、運転開始から 7 日間の入口圧力の上昇度合いがほぼ同じかそれ以下であったことから、少なくとも 23 日間の連続運転が可能と推察された。今後 RO 膜の定期洗浄間隔を見極めるためにはさらなる長期の連続運転を行い、入口圧力の推移を測定する必要がある。
2. RO 膜処理水の水質測定結果については、濃縮水の循環率を 75%から 90%に増加させ、RO 膜供給水の水質を悪化させた場合、RO 膜供給水の TOC、TP の測定値については、濃縮水の循環率が 90%のときは 75%のときと比べてそれぞれ約 50%、170%増加したが、処理水の測定値はほぼ変わらない結果となった。また Ca、Mg の濃度についても濃縮水の循環率が 90%のときは 75%のときと比べて、RO 膜供給水の測定値がそれぞれ約 60%、70%増加したが、処理水の測定値は濃縮水の循環率によらず検出下限値に近い値、もしくは検出下限値未満となった。窒素類(TN、NH₃)及び Na については濃縮水の循環率を高くすると、処理水中に含まれる濃度も高くなる傾向が見られた。このことから RO 膜処理において、有機物質・リン及び Na 以外の金属類(Ca、Mg)については、供給水の水質が悪化しても処理水は同等の水質を担保できることが示唆された。
3. RO 膜処理水と既存の工業用水の水質比較については、有機物質指標の TOC は濃縮水の循環率の違い、水質の変動、未処理の工業用水の採水地点の違いを考慮しても、測定値は RO 膜処理水の方が既存の未処理の工業用水を下回るという結果が得られた。TN・NO₂-N・NO₃-N・NH₃-N については再生水の方が、測定値が高くなることもあり、下水を水源としている RO 膜処理水の方が既存の工業用水と比較して窒素類の濃度が高くなる可能性が示された。次に金属類については濃縮水の循環率の違い、日時による水質の変動、未処理の工業用水の採水地点の違いを考慮しても、再生水中に含まれ

る Na・Ca・Mg の濃度は工業用水を下回る結果となった。さらに RO 膜処理水と硬度成分を取り除く企業内独自処理を施した工業用水(以下、独自処理工業用水)の水質を比較したところ、硬度の測定値は Ca・Mg の濃度についてはどちらも検出下限値未満であった。また RO 膜処理水中の Na の濃度は独自処理工業用水の濃度を下回っていた。このことから UF 膜処理+RO 膜処理を施すことで、独自処理工業用水と同程度まで硬度物質を除去することができ、Na や Cl⁻の濃度が独自処理工業用水以下の再生水を得ることができることが示された。

4. 実プラントを想定し RO 膜エレメントを 7 つ接続した際のエレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質は、エレメント 1 つを用いて再生水と工業用水の水質比較を行った場合と同様に、TN 以外の項目で RO 膜エレメント全体を通して得られる処理水の水質が既存の未処理の工業用水よりも濃度が低い結果が得られた。独自処理工業用水と比較すると、有機物質・Na・Cl⁻及びリンの算出値は独自処理工業用水の測定値を下回っており、硬度物質の Ca・Mg についてはどちらも僅少であった一方で、TN については独自処理工業用水の測定値を上回っていた。このため、実プラントと同様に複数このエレメントを接続した場合においても、UF 膜処理+RO 膜処理を施すことで、独自処理工業用水と同程度まで硬度物質を除去することができ、有機物質・Na・Cl⁻の濃度を独自処理工業用水以下まで除去できることが示された。

参考文献

- 28) B-DASH 評価書：第 2 章 実験計画 P13
- 29) CREST 報告書：2.2.3 UF 膜+UV プロセスの運転性能評価
- 30) 東レ株式会社：低ファウリング、高耐久 RO TMLD TML10D
[https://www.toraywater.com/jp/ro/pdf/TML\(D\).pdf](https://www.toraywater.com/jp/ro/pdf/TML(D).pdf)(最終アクセス日：2019 年 1 月 29 日)
- 31) 黒瀬由花子：NF/RO 膜を用いた下水再生プロセスにおける医薬品類の挙動と濃縮水の活性汚泥への影響 第 3 章
- 32) 社団法人 日本下水道協会：下水試験方法 上巻 1997 年版 P147-P149
- 33) 日本工業標準調査会：JIS K 0102 2010 年改正 P191-P193
<http://kikakurui.com/k0/K0102-2013-01.html> /
(最終アクセス日：2019 年 1 月 25 日)
- 34) 社団法人 日本下水道協会：下水試験方法 上巻 1997 年版
PO₄³⁻：P192-P194、TP：P199-P200
- 35) 社団法人 日本下水道協会：下水試験方法 上巻 1997 年版
NO₂⁻：P167-P169、NO₃⁻：P187-P188、NH₄⁺：P162-P163、TN：P187-P188
- 36) Takahiro Fujioka, Stuart J. Khan, James A. McDonald, Annalie Roux, Yvan Poussade, Jörg E. Drewes, Long D. Nghiem, (2014) : Modelling the rejection of N-nitrosamines by a spiral-wound reverse osmosis system: Mathematical model development and validation. Journal of Membrane Science 212-219
- 37) 東レ株式会社：低ファウリング、高耐久 RO TMLD TML10D
[https://www.toraywater.com/jp/ro/pdf/TML\(D\).pdf](https://www.toraywater.com/jp/ro/pdf/TML(D).pdf)(最終アクセス日：2019 年 1 月 29 日)

- 38) 中尾真一 (2011) : 膜透過現象の定式化と膜および膜分離プロセスの設計技術 日本海水学会誌
P330-332
- 39) 西田佳記 : 下水の再利用を目的とする凝集処理を組み合わせた限外ろ過膜処理によるウイルス除去に関する検討 平成 23 年 2 月 P37-41
- 40) Takeuchi H, Yamashita N, Nakada N, Tanaka H, : Removal Characteristics of N-Nitrosamines and Their Precursors by Pilot-Scale Integrated Membrane Systems for Water Reuse International Journal of Environmental Reserch and Public Health, 15, pp.1960-1975, 2018

第4章 沖縄県糸満市における工業用水利用状況及び再生水需要の調査

4.1 概説

本研究では再生水の工業利用における処理プロセスや再生水の適用用途を決める際の手掛かりを得るために、沖縄県糸満市西崎町において既存の工業用水の利用に関するアンケート調査を行った。そこで得られた結果について(1)工業用水と水道水の使用量の関係、(2)工業用水の独自処理と使用水量・利用用途の関係、(3)工業用水の独自処理と重視する水質項目の関係、(4)再生水の利用可否及び要求する料金水準の4つの観点から分析を行った。

4.2 調査方法

4.2.1 アンケート調査対象

本アンケート調査は沖縄県糸満市西崎町の工業団地内の全企業を対象に実施した(アンケート調査実施直前の移転等により調査をできなかった企業が存在する可能性はある)。対象企業は全て、「工業用水を使用している」または「工業用水を契約して使用することができるが使用していない企業」のどちらかである。調査対象企業を既に工業用水を利用している企業(工業用水利用企業)と現在利用していない企業(工業用水未利用企業)に分け、工業用水利用企業全28社、未利用企業全233社にアンケート用紙を送付した。

4.2.2 質問内容

本アンケート用紙は(1)工業用水利用企業用、(2)工業用水未利用企業用の二種類である。アンケートにおける質問内容は(1)・(2)に共通する質問は、①回答企業の業種・扱っている製品・サービス、②水道水の使用量・使用用途・排水量・現在の水道水の利用するにあたって感じている課題、③企業内の水利用において重視する水質項目、④地下水や雨水などの代替水源の利用の有無とその用途、⑤再生水が供給された際の使用の可否と求める料金水準の大きく分けて5つである。①は企業の業種別にアンケート結果を分析するため、②は現在水道水を使用している企業がどのくらいの水量をどのような用途で使用しており、再生水で水道水を代替できるかを検討するため、③は再生水に求められる水質と再生水の水質面の課題を把握するため、④は地下水や雨水といった再生水の需要を減少させ得る他の水源の利用がされているかを把握するため、⑤は再生水が本当に利用されうるか、また実際に供給する際に求められる料金水準を検討するために質問内容とした。また工業用水利用企業に対しては、工業用再生水の需要量及び求められる水質を把握するために既存の工業用水の使用量と独自処理の有無・目的、工業用水の使用用途に関する質問を質問項目に追加した。工業用水未利用企業に対しては、今後工業用再生水を水道水に代わる水源として利用されうるかを知るために、現在工業用水を使用していない理由を質問項目に追加した。以下に具体的な質問内容を示す(表4.1-4.2)。

またアンケート用紙の質問の回答者に再生水についての理解を促すため、再生水についての説明資料もアンケート用紙と同時に送付した(Appendix 参照)。

表 4.1 工業用水を利用している企業に対する質問事項

テーマ	目的	質問内容
回答企業の基本属性	回答企業の属性把握	●企業の業種、取り扱っている製品・サービス
工業用水利用	工業用水使用量・再生水需要の把握	●1日あたりの工業用水使用量・使用時間
	工業用再生水に求められる水質の把握	●工業用水の企業内独自処理を行っているか (行っていると回答した企業に対して以下の質問を追加) ●独自処理の方法・目的
		●工業用水の利用用途 (独自処理を行っている企業は独自処理後の工業用水と未処理の工業用水それぞれの用途)
		●工業利用にあたって特に重視する水質項目 (以下の中から選択: ①pH・②電気伝導度・③濁度・④有機物質(TOC)・⑤細菌/ウイルス・⑥窒素・⑦リン ・⑧硬度物質(Ca,Mg等)・⑨Cl,Naなどの塩類・⑩その他)
	その他	●企業内で水質のモニタリングを行っているか (行っていると回答した企業に対して以下の質問を追加) ●モニタリングの対象水質項目・許容値範囲
水道水利用	水道水使用量・再生水需要の把握	●1日あたりの水道水使用量・使用時間
	再生水に求められる水質の把握	●水道水の利用用途
	その他	●水道水を利用するにあたっての課題
その他の水利用	工業用再生水の需要減少要因の把握	●井戸水や地下水、雨水などを使用しているか (使用していると回答した企業に対して以下の質問を追加) ●井戸水や地下水、雨水などの利用用途 ●井戸水や地下水、雨水などを使用する際に独自で処理を行っているか (行っていると回答した企業に対してさらに以下の質問を追加) ●独自処理の方法・目的
再生水の利用	再生水の利用可否と 要求する料金水準の把握	●水道水と同程度の水質である再生水が供給されたら利用するか (以下の中から選択: ①水道料金(約200円/㎡)より安ければ利用する ②工業用水料金(約35円/㎡)と同程度であれば利用する ③工業用水料金(約35円/㎡)より安ければ利用する ④利用しない(その理由))

* ●は1つの質問を表している。

表 4.2 工業用水を利用していない企業に対する質問事項

テーマ	目的	質問内容
回答企業の基本属性	回答企業の属性把握	●企業の業種、取り扱っている製品・サービス
工業利用	工業用再生水に求められる水質の把握	●工業利用する水について特に重視する水質項目 (以下の中から選択: ①pH・②電気伝導度・③濁度・④有機物質(TOC)・⑤細菌/ウイルス・⑥窒素・⑦リン ・⑧硬度物質(Ca,Mg等)・⑨Cl,Naなどの塩類・⑩その他)
	水道水から再生水への代替可能性の把握	●現在供給されている工業用水を使用しない理由
水道水利用	水道水使用量・再生水需要の把握	●1日あたりの水道水使用量・使用時間
	再生水に求められる水質の把握	●水道水の利用用途
	その他	●水道水を利用するにあたっての課題
その他の水利用	工業用再生水の需要減少要因の把握	●井戸水や地下水、雨水などを使用しているか (使用していると回答した企業に対して以下の質問を追加) ●井戸水や地下水、雨水などの利用用途 ●井戸水や地下水、雨水などを使用する際に独自で処理を行っているか (行っていると回答した企業に対してさらに以下の質問を追加) ●独自処理の方法・目的
再生水の利用	再生水の利用可否と要求する料金水準の把握	●水道水と同程度の水質である再生水が供給されたら利用するか (以下の中から選択: ①水道料金(約200円/m ³)より安ければ利用する ②工業用水料金(約35円/m ³)と同程度であれば利用する ③工業用水料金(約35円/m ³)より安ければ利用する ④利用しない(その理由))

* ●は1つの質問を表している。

4.2.3 アンケート調査の実施方法

本アンケート調査は工業用水利用企業に対しては7月19日～8月31日、工業用水未利用企業に対しては7月12日～8月31日の期間に実施した。それぞれ調査期間の初日にアンケート用紙及び再生水に関する説明資料を郵送で送付し、調査期間の最終日までに回答・返送してもらう形式で実施した。また本アンケートは無記名方式である。

4.3 調査結果と考察

アンケート調査の回答数は、工業用水利用企業は送付した28社中14社から回答を得た(回答率50%)。工業用水利用企業は送付した233社中83社から回答を得た(回答率35.6%)。回答のあったアンケート用紙の集計においては、次の事項に該当するものは集計対象から除外した。具体的には(1)大部分の質問項目が未回答のもの、(2)回答内容を判別できないものを本アンケートの集計対象から除外した。また本アンケートは無記名方式のため、便宜

上回答企業の識別には回答項目の「具体的取り扱い製品・サービス」を使用した。

本アンケートの結果の集計に関しては、2章で述べた工業用水の利用が現在比較的難しいとされている食品系の利用に焦点を当てて考察するため、回答企業を「食品系」と「非食品系」に分けて集計している。具体的には工業用水利用企業については14社中12社が食品系企業であり、残り2社が非食品系企業である。具体的に扱っている製品サービスについては、5社が鮮魚などの水産物の加工・卸売、2社が牛乳・清涼飲料・種類などの飲料製造、1社が飲食物の提供、4社が惣菜や加工品・調味料の製造、残りの非食品系2社はアスファルト・生コンクリートの製造を行っている。工業用水未利用企業については233社中11社が食品系企業であり、残り72社が非食品系企業である。具体的に扱っている製品サービスについては、食品系企業は3社が水産物の加工・卸売、2社が清涼飲料製造、8社が惣菜や加工品・健康食品の製造であり(業種の重複あり)、非食品系企業は製品製造業や製品販売業、建設業など多種多様である(図4.1)。

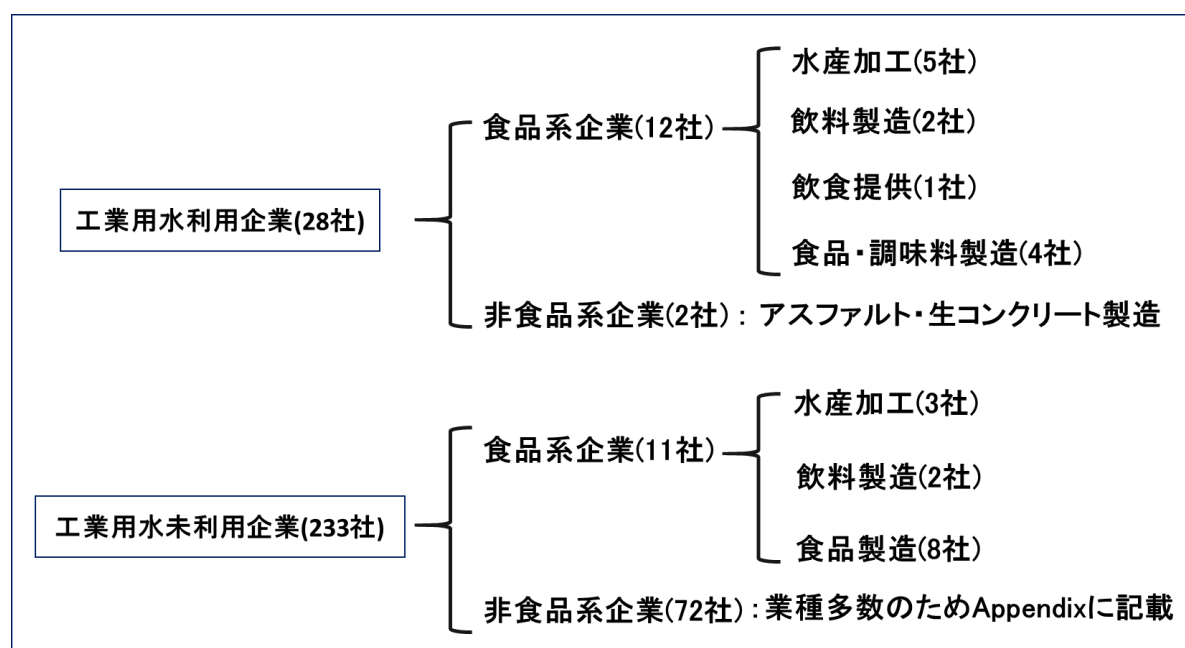


図 4.1 アンケート回答企業の業種

*一部複数サービス提供を行っているため、業種が重複している企業がある。

4.3.1 工業用水と水道水の使用量の関係

はじめに工業用水利用企業の工業用水および水道水の使用量の集計結果をそれぞれ図4.2、図4.3に示す。また工業用水未利用企業の水道水使用量の集計結果を図4.4に示す。工業用水利用企業の工業用水＋水道水の使用量と工業用水未利用企業の水道水使用量を比較

すると、前者の水量が多いことが分かる。具体的には工業用水利用企業で工業用水と水道水の合計使用量が 300 m³/月以上である企業は 14 社中 11 社ある(うち 7 社は 1,000 m³/月以上使用している)が、工業用水未利用企業の水道水使用量が 300 m³/月以上である企業は 83 社中 4 社しかない。これは現在の沖縄県の工業用水単価が 35 円/m³(契約水量超過分は除く)であるのに対し、水道水単価が約 200 円/m³と比較的高額であるため、利用水量が多い企業が使用水量にかかる費用削減のために工業用水を使用していると推察される。

さらに工業用水利用企業における工業用水使用量(図 4.2)と水道水使用量(図 4.3)を比較すると、水道水使用量は工業用水使用量と比較して少量であることが分かる。具体的には、14 社の工業用水使用量の合計値と水道水の合計値を比較すると(どちらかもしくは両方の水量が未回答の企業は除く)、工業用水使用量は 31,040 m³/月であるのに対し、水道水使用量はわずか 2,275 m³/月であり、水道水使用量は工業用水使用量の 10 分の 1 以下であることが分かる。これは工業用水を契約している企業においては製品製造・サービス提供など企業内のできるだけ多くの用途に工業用水を使用し、単価が高い水道水はあまり使用しない実態がうかがえる。

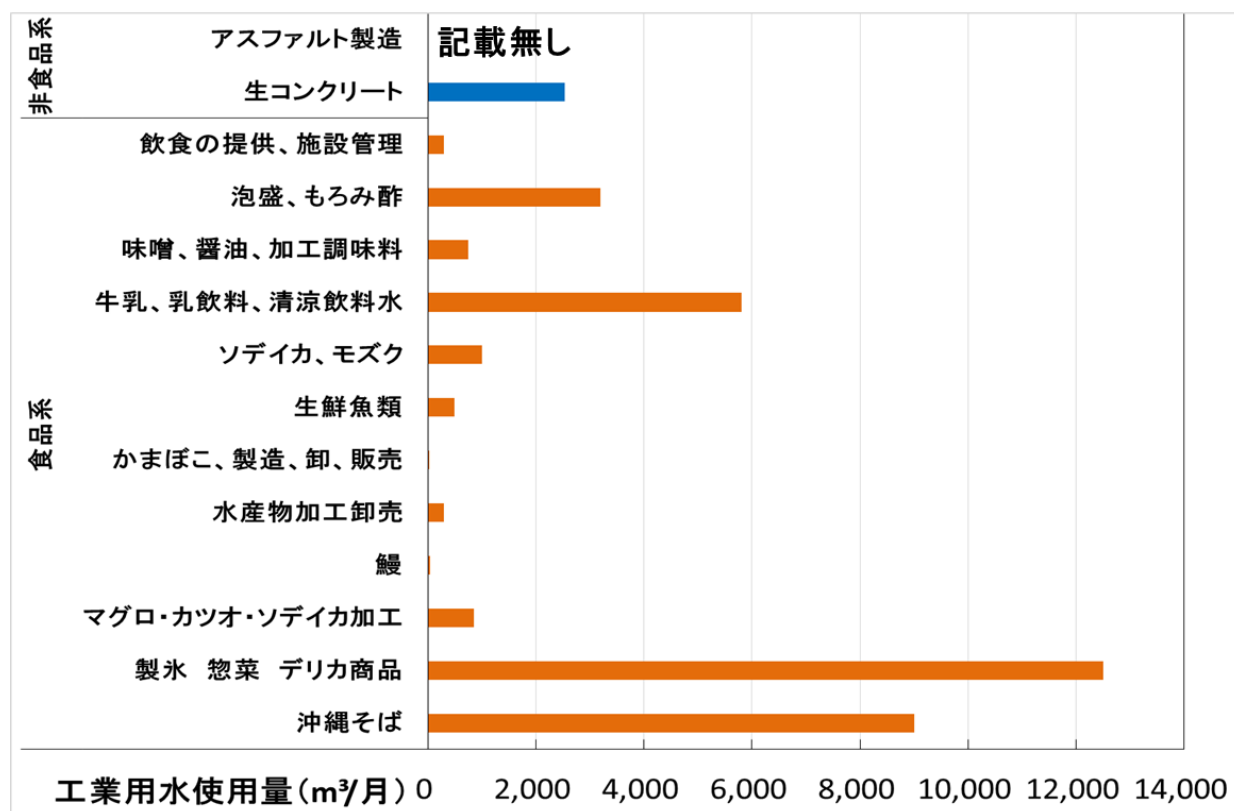


図 4.2 工業用水利用企業の工業用水使用量

*アンケート用紙への回答がないものについては「記載なし」としている。

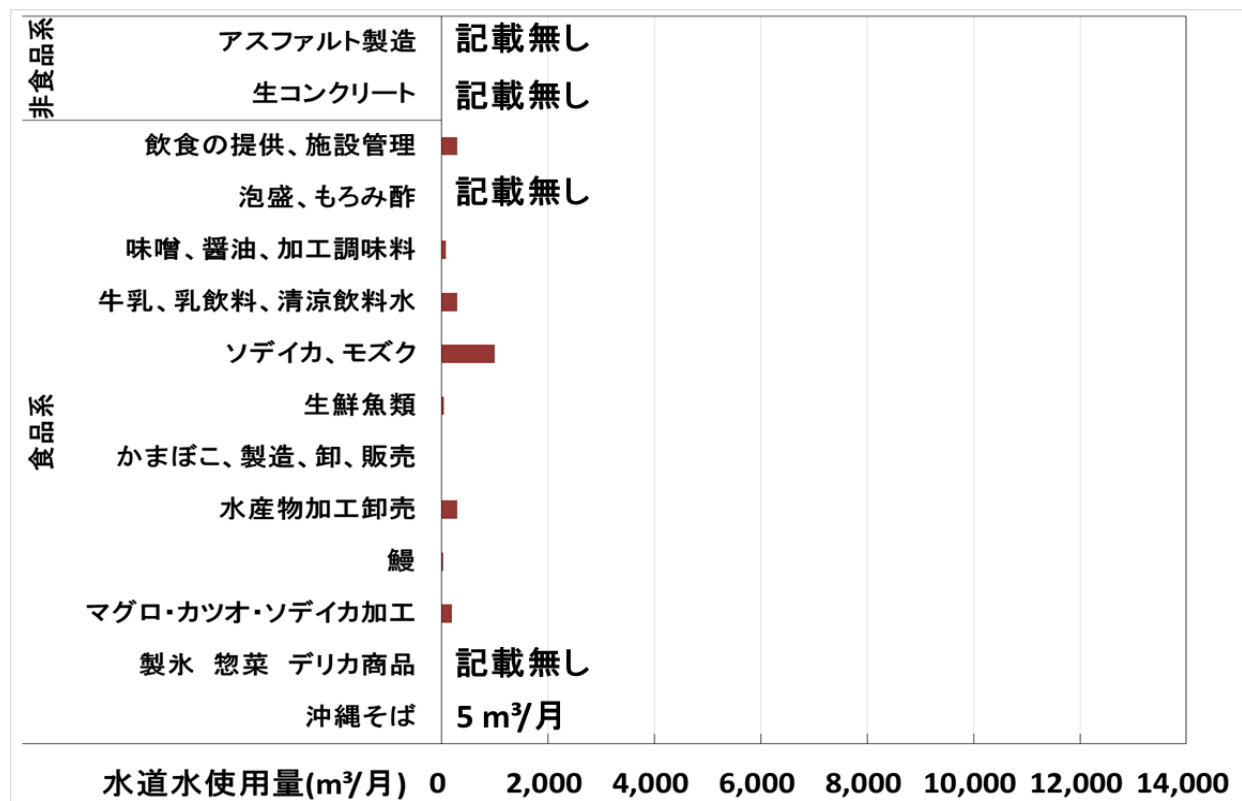


図 4.3 工業用水利用企業の水道水使用量

*アンケート用紙への回答がないものについては「記載なし」としている。

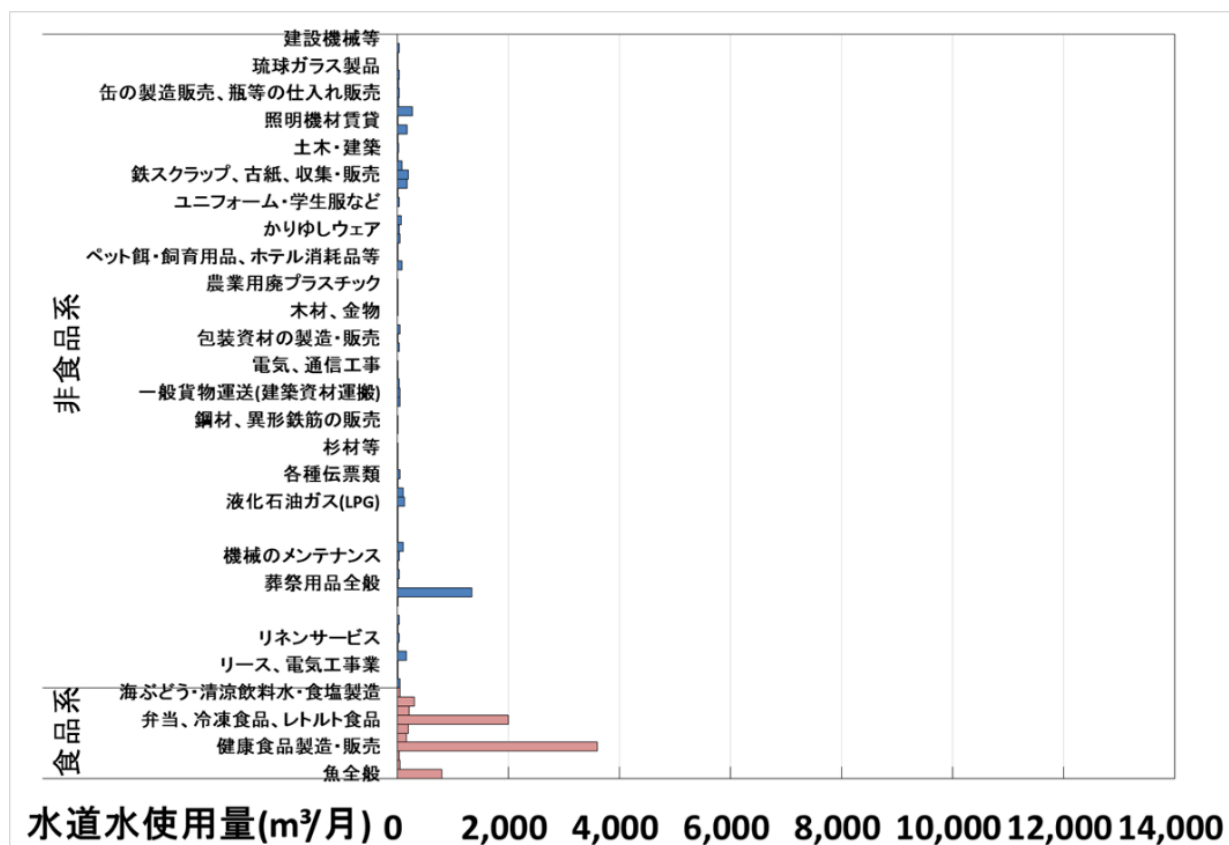


図 4.4 工業用水未利用企業の水道水使用量

4.3.2 工業用水の独自処理と使用水量・利用用途の関係

工業用水利用企業における企業内の独自処理の有無と種類、工業用水の用途を以下の表 4.3 に示す。工業用水利用企業 14 社のうち独自処理を行っている企業は 6 社であり、処理プロセスとしては砂ろ過処理(4 社で使用)、RO 膜処理(1 社で使用)、イオン交換樹脂を用いた軟水化処理(2 社で使用)、次亜塩素酸ナトリウム添加などの殺菌処理(4 社で使用)、活性炭処理(1 社で使用)などの処理を組み合わせを行っている。

はじめに表 4.3 の工業用水使用量と企業内独自処理の有無の関係をみると、企業内で独自処理を行っている企業は、行っていない企業と比較して工業用水使用量が多いことが分かる。例えば食品系企業については、独自処理を行っている企業 6 社のうち 4 社は使用工業用水量が 3000 m³/月以上であるが、独自処理を行っていない企業 6 社については全て工業用水量が 1000 m³/月以下である。これは使用水量が多い企業が水道料金を削減するために、水道水から工業用水に転換し、必要な水質を担保するために独自処理を導入したと推察される。一方で独自処理節の導入・維持管理には多額の費用がかかる。そのため比較的水使用量が少ない企業は「工業用水＋独自処理」への転換による規模の経済の観点からのメリットを得にくいため、工業用水を独自処理して使用するのではなく、水道水を使用していると推察される。

次に独自処理の有無と工業用水の利用用途の関係をみると、企業内の独自処理がされていない工業用水はほとんどが食品・飲料製造に関係しない用途に使用されていることが分

かる。具体的には独自処理の利用用途について回答のあった 8 社のうち水産加工に使用すると回答した 1 社を除き他は全て散水用や清掃用、非食品の原料など食品・飲料の製造に関係しない用途であった。一方で独自処理を行っている企業 6 社中 5 社が食品・飲料製造用に工業用水を使用している。このことから利用者は例えばダム水などを簡易処理した工業用水であっても、独自に自社内で処理を行い、水質を管理することで食品・飲料の製造用にも用いることができると考えていることが示唆される。

表 4.3 工業用水を利用している企業の独自処理の有無とその利用用途

回答企業		工業用水 使用量 (m ³ /月)	企業内の独自処理	利用用途	
				独自処理あり	独自処理なし
食品系	製氷 惣菜 デリカ商品	12,500	あり	砂ろ過処理、活性炭処理、軟水処理、次亜塩素酸Na添加	氷・食品製造用水、冷凍機の冷却水
	沖縄そば	9,000		砂ろ過処理、軟水処理、次亜塩素酸Na添加	洗浄水、食品製造用水
	牛乳・乳飲料、清涼飲料水	5,800		砂ろ過処理、RO膜処理	飲料製造用水
	泡盛、もろみ酢	3,200		ろ過処理、殺菌処理	酒・もろみ酢製造用水
	マグロ・カツオ・ソディカ加工	850		工業用水処理機で処理して食用水にする	飲用水・工場洗浄水
	水産物加工卸売	300		ろ過処理、次亜塩素酸Na添加	工場内の機械器具の洗浄水等
	ソディカ、モズク	1,000	なし	-	水産加工用水
	味噌、醤油、加工調味料	750		-	蒸気、工場清掃水
	生鮮魚類	500		-	清掃水
	飲食の提供、施設管理	300		-	散水・トイレ水洗・清掃・洗浄用水
	鰻	40		-	記載なし
	かまぼこ、製造、卸、販売	23		-	記載なし
非食品系	生コンクリート	2,530		-	生コンクリート製造用水
	アスファルト製造	記載なし		-	工事等での利用(非飲用)

* 赤字が独自処理を行っている企業の回答を示している。

* アンケート用紙への回答がないものについては「記載なし」としている。

4.3.3 工業用水の独自処理と重視する水質項目の関係

工業用水利用企業について、特に重視すると回答した項目について以下に示す(表 4.4)。濁度・細菌/ウイルス・硬度物質は食品系の企業の多くが注意を払っていることが分かる。具体的には食品系企業 12 社のうち濁度については 7 社、細菌/ウイルスについては 10 社、硬度物質については 6 社が重視すると回答している。そのため細菌/ウイルスを除去するために多くの食品系の企業が次亜塩素酸ナトリウムの添加または RO 膜処理といった独自処理を行っていると思われる。さらに独自処理を行っている企業の独自処理項目を見ると 6 社中 5 社が軟水処理またはろ過処理を行っており、そのうち 4 社が硬度物質を重視すると回答している。このことから食品・飲料の製造用に工業用水を用いる企業は工業用水に含まれる Ca や Mg などの硬度物質を取り除くために軟水処理や RO 膜処理などの独自処理を行っている可能性が示唆される。

表 4.4 工業用水を利用している企業の独自処理と重視する水質項目

回答企業		企業内の独自処理	pH	EC	濁度	有機物質 (TOC)	細菌/ ウイルス	窒素	リン	硬度物質 (Ca, Mg)	塩類 (Na等)
食品系	製氷 惣菜 デリカ商品	あり	砂ろ過・活性炭・軟水処理、次亜塩素酸Na添加	0	0	0	0	0		0	0
	沖縄そば		砂ろ過・軟水処理、次亜塩素酸Na添加		0		0			0	
	牛乳、乳飲料、清涼飲料水		砂ろ過処理、RO膜処理				0			0	
	泡盛、もろみ酢		ろ過処理、殺菌処理	0	0	0	0	0	0	0	0
	マグロ・カツオ・ソディカ加工		工業用水処理機で処理して食用水にする								
	水産物加工卸売		ろ過処理、次亜塩素酸Na添加	0		0		0	0	0	
	ソディカ、モズク	なし					0				0
	味噌、醤油、加工調味料		0								
	生鮮魚類				0	0	0				
	飲食の提供、施設管理				0		0				
	鰻						0		0		
	かまぼこ、製造、卸、販売		0		0	0	0		0	0	
非食品系	生コンクリート		0		0						
	アスファルト製造										
回答企業数(全14社)			6	1	8	4	10	3	2	6	4

* 赤字が独自処理を行っている企業の回答を示している。

4.3.4 再生水の利用可否及び要求する料金水準

はじめに工業用水利用企業について再生水の利用可否及び求める料金水準についての回答集計結果を以下の表 4.5 に示す。工業用水利用企業についての回答に着目すると 13 社中 9 社が既存の工業用水と同程度それ以下の料金でなら再生水を利用すると回答しており、水道水以下の料金で使用を検討する企業はなかった。これらの企業は既に料金単価が低い工業用水を使用しているため、こうした企業に対し再生水の導入を推進するためにはさらなる再生水供給に係る費用削減が求められることを示唆している。一方で工業用水未利用企業に関しては食品系企業については 11 社全てが、非食品系企業については 70 社中 48 社が水道料金以下でなら再生水の導入を検討すると回答している。これは、工業用水未利用企業は現在工業用水と比較して単価が高い水道水を使用しているため、再生水の導入に際して費用削減効果を得やすいためと考えられる。このことから利用者が再生水に対して要求する料金水準を考慮すると、工業用水利用企業と比較して未利用企業の方が再生水導入を推進し易い可能性が示唆された。しかし一方で工業用水未利用企業のうち、食品系企業が重視する水質項目(表 4.6)を見ると 11 社中 10 社が細菌・ウイルスを重視していることが分かる。このことから求める再生水の水質の観点からは、RO 膜処理などの細菌/ウイルスを完全に除去できる再生水生産プロセスを用いる必要があることが示唆された。

表 4.5 再生水の利用可否と要求する要求水準

再生水の利用可及び求める料金水準	回答企業数(社)			
	工業用水利用企業(計14社)		工業用水未利用企業(計83社)	
	食品系(計12社)	非食品系(計2社)	食品系(計11社)	非食品系(計72社)
水道水単価(約200円/m ³)以下	0	0	7	25
既存の工業用水(約35円/m ³)と同程度	4	0	2	10
既存の工業用水(約35円/m ³)以下	5	0	2	13
再生水を利用しない	2	2	0	22
合計	11	2	11	70

* 食品系の工業用水利用企業に未回答企業が1社ある。

* 非食品系の工業用水未利用企業に未回答企業が2社ある。

表 4.6 工業用水を使用していない食品系企業の重視する水質項目

回答企業	使用水量(m ³)	pH	EC	濁度	有機物質 (TOC)	細菌/ ウイルス	窒素	リン	硬度物質 (Ca, Mg等)	塩類(Na等)
健康食品製造・販売	3600	○		○		○			○	
弁当、冷凍食品、レトルト食品	2000	○		○	○	○	○		○	○
魚全般	800					○				
加工黒糖	300	○				○				
食肉加工	207					○				○
練製品製造業	200	○				○				
惣菜	165				○	○				
海ぶどう・清涼飲料水・食塩製造	50			○	○	○				
青果物、健康補助食品	30									
沖縄そば製造	0.1					○				
ソデイカ・もずく	記載なし	○		○		○				○
回答企業数(全11社)		5	0	4	3	10	1	0	2	3

また表 4.5 を見ると、工業用水未利用企業は 83 社中 22 社(すべて非食品系企業)が再生水を利用しないと回答している。以下の表 4.7 に工業用水未利用企業(食品系・非食品系両方)の再生水利用可否及びその理由を示しているが、その理由については利用しないと回答した 22 社中 16 社が回答しているが、そのうち 13 社が「必要ないから」または「使用水量が少ないから」と回答している(表 4.8)。また「必要ないから」・「使用水量が少ないから」という理由で再生水を使用しないと回答した企業は表 4.7 より水道水使用量が少ない非食品系の企業に偏っていることが分かる。こうした元々必要とする水量が少ない企業に対しては再生水の普及は難しいため、このことから再生水は使用水量が多く、求める料金水準が低い工業用水を使用していない食品系の企業を対象とすること、表 4.6 より多くの企業が細菌/ウイルスや有機物質を重視するため、本研究の膜処理プロセスの中では RO 膜処理まで施した再生水を供給することが望ましいと推察される。

表 4.7 工業用水未利用企業の再生水利用可否

分類	取扱製品・サービス	水道水使用量(m³/月)	再生水の利用可否	再生水を使用しない理由
食品系	健康食品製造・販売	3600	1	
	弁当、冷凍食品、レトルト食品	2000	3	
	魚全般	800	2	
	加工黒糖	300	1	
	食肉加工	207	3	
	練製品製造業	200	1	
	惣菜	165	1	
	海ぶどう・清涼飲料水・食塩製造	50	1	
	青果物、健康補助食品	30	1	
	沖縄そば製造	0.1	3	
非食品系	ソテイカ・もずく	使用水量未記載	2	
	フィルム包材	1335	1	
	飲食業	275	1	
	鉄スクラップ、古紙、収集・販売	200	3	
	コンクリート二次製品	180	4	水道水で十分で、新たな設備を設置した場合、管理等で人員が割かれるから
	お菓子、民芸工芸品、衣類	170	2	
	電気工事業、土木工事業	167	4	使用水量が少ないから
	液化石油ガス(LPG)	130	3	
	印刷用紙・紙器	110	1	
	印刷業	100	2	
	し尿、浄化槽汚泥	85.7	4	無償であれば施設の希釈水として活用してみたい
	詰り学生服の製造	84	1	
	自動車整備	71	2	
	各種伝票類	50	4	
	業種未記載	50	4	必要ないから
	化粧箱	49	1	
	汚水(生活排水・工業排水等)	45	4	場内浄水設備あり必要ないため
	一般貨物運送(建築資材運搬)	45	未記載	
	食材・日用雑貨保管、配送	45	2	
	リネンサービス	40	3	
	障害福祉サービス	40	1	
	資材販売	35	2	
	かりゆしウェア	35	1	
	ユニフォーム・学生服など	35	1	
	清涼飲料水	35	1	
	業種未記載	33	1	
	機械のメンテナンス	30	未記載	
	浄化槽	30	4	
	缶の製造販売、瓶等の仕入れ販売	30	1	
	自動車販売整備・パーツ洗浄等	30	2	
	パンフレット・冊子・伝票	25	1	
	土木・建築	18	4	必要ないから
	自動車部品販売	18	1	
	業種未記載	15	1	
	木材・建築資材	15	1	
	業種未記載	13	3	
	リース、電気工事業	12.3	4	使用水量が少ないから
	建築仕上材販売	12	4	
	ベビー用品	12	4	本部が契約を見直せば検討する
	アルミ	11	1	
	アルミサッシ加工・製作	11	3	
	ガソリン販売	11	4	
	詰り学生服の裁断	11	1	
	事務機器・サービス	10	4	使用水量が少ないから
	杉材等	10	4	安全なことを証明できれば使用を検討する
	LPガス	9.5	1	
	鉄筋	9	1	
	ガラス製品	8	1	
	鋼材、異形鉄筋の販売	7	1	
	農業用廃プラスチック	7	1	
	照明機材賃貸	7	4	使用水量が少ないから
	業種未記載	6	1	
	印刷	6	1	
	空調、換気、ダクト	5	2	
	鉄鋼二次製品	4	1	
	ペット餌・飼育用品、ホテル消耗品等	4	未記載	
	包装資材の製造・販売	3.5	4	使用水量が少ないから
	琉球ガラス製品	3.5	1	
	葬祭用品全般	3	2	
	電気、通信工事	3	4	必要ないから
	木材、金物	3	2	
	業種未記載	2	4	使用水量が少ないから
	木材建具・家具製作	2	4	閉鎖予定のため
	業種未記載	1	4	使用水量が少ないから
	業種未記載		1	
	印刷物		4	必要ないから
	運輸業		2	
	業種未記載		4	雨水があるため必要ないから
	施工管理、設計、埋蔵文化財調査		4	
	タクシー事業		1	
	イベント業		3	
	建設機械等		3	

* 再生水の利用可否は以下の通りである。

- 1：水道料金(約 200 円/m³)より安ければ利用する。
- 2：工業用水料金(約 35 円/m³)と同程度であれば利用する。
- 3：工業用水料金(約 35 円/m³)より安ければ利用する。
- 4：利用しない。

**表 4.8 「再生水を使用しない」と回答した企業(22 社)が再生水を使用しない理由
(16 社が回答)**

再生水を使用しない理由	回答数（社）
必要ないまたは使用水量が少ないため	13
安全性の証明	1
新しい設備の管理に人員が必要だから	1
その他(回答企業特有の事情)	2

4.4 本章のまとめ

再生水の工業利用における処理プロセスや再生水の適用用途を決める際の手掛かりを得るために、沖縄県糸満市西崎町の工業用水利用企業・未利用企業に対しアンケート調査を行った。そこで得られた結果について(1)工業用水と水道水の使用量の関係、(2)工業用水の独自処理と使用水量・利用用途の関係、(3)工業用水の独自処理と重視する水質項目の関係、(4)再生水の利用可否及び要求する料金水準の4つの観点から分析を行った。以下が本章で得られた知見である。

1. 工業用水と水道水の使用量の関係については、工業用水利用企業の「工業用水＋水道水」の使用量と工業用水未利用企業の「水道水」使用量を比較すると、前者の水量が多いという結果が得られた。このことから利用水量が多い企業が使用水量にかかる費用削減のために工業用水を使用しているということが推察された。さらに工業用水利用企業における工業用水使用量と水道水使用量を比較すると、水道水使用量は工業用水使用量と比較して少量であるという結果が得られた。このことから工業用水利用企業はできるだけ多くの用途に工業用水を使用し、単価が高い水道水をあまり使用していない実態がうかがえた。
2. 工業用水の独自処理と使用水量・利用用途の関係については、企業内で工業用水に対し独自処理を行っている企業は、行っていない企業と比較して工業用水使用量が多いという結果が得られた。このことから使用水量が多い企業が水道料金を削減するために、水道水から工業用水に転換し、必要な水質を担保するために独自処理を導入したと推察された。次に独自処理の有無と工業用水の利用用途の関係をみると、企業内の独自処理がされていない工業用水はほとんど食品・飲料製造用に使用されていない一方で、独自処理を行った水は多くが食品・飲料製造用やそれらに関する洗浄用に使用されていた。このことから利用者は工業用水を独自に自社内で処理を行い、水質を管理することで食品・飲料の製造用にも用いることができると考えていることが示唆された。

3. 工業用水の独自処理と重視する水質項目の関係については、食品系の工業用水利用企業の多くが濁度・細菌/ウイルス・硬度物質に対し注意を払っているという結果が得られた。そのため独自処理を行っている食品系の企業の多くが次亜塩素酸ナトリウムの添加または RO 膜処理により、細菌/ウイルスを除去しているという実態がうかがえた。さらに独自処理を行っている企業の多くが工業用水に含まれる Ca や Mg などの硬度物質を取り除くために軟水化処理や RO 膜処理などの独自処理を行っている可能性が示唆された。
4. 再生水の利用可否及び要求する料金水準については、工業用水利用企業は多くの企業が既存の工業用水と同程度それ以下の料金で再生水利用を検討すると回答した。これらの企業は既に料金単価が低い工業用水を使用しているため、こうした企業に対し再生水の導入を推進するためにはさらなる再生水供給に係る費用削減が必要であることが示唆された。一方で工業用水未利用企業に関しては食品系・非食品系に関わらず多くの企業が水道料金以下で再生水の導入を検討すると回答した。このことから利用者が再生水に対して要求する料金水準を考慮すると、工業用水利用企業と比較して未利用企業の方が再生水導入の推進し易い可能性が示唆された。しかし回答者が重視する再生水の水質の観点からは、RO 膜処理などの細菌/ウイルスを完全に除去できる再生水生産プロセスを用いる必要があることが示唆された。また再生水を使用しないと回答した工業用水未利用企業はその多くが必要ないから、または使用水量が少ないからと回答しており、再生水の供給は利用水量が多い企業を対象とすべきであることが示唆された。

第5章 沖縄県糸満市における再生水事業の費用算出及び実現可能性の検討

5.1 概説

本研究では将来的な工業用水の需要増加に対応するため沖縄県糸満市に再生水生産施設を導入し、工業用水を糸満工業団地内の企業に供給することを想定した場合の年間生産費用を算出し、適用可能なシナリオについて考察した。

5.2 本研究における費用算出の前提条件

本研究では「沖縄県糸満市浄化センターの下水二次処理水を原水として再生水を生産し、西崎工業団地にある企業に工業用水として供給する」ことを想定する。前提条件は以下図5.1の通りである。

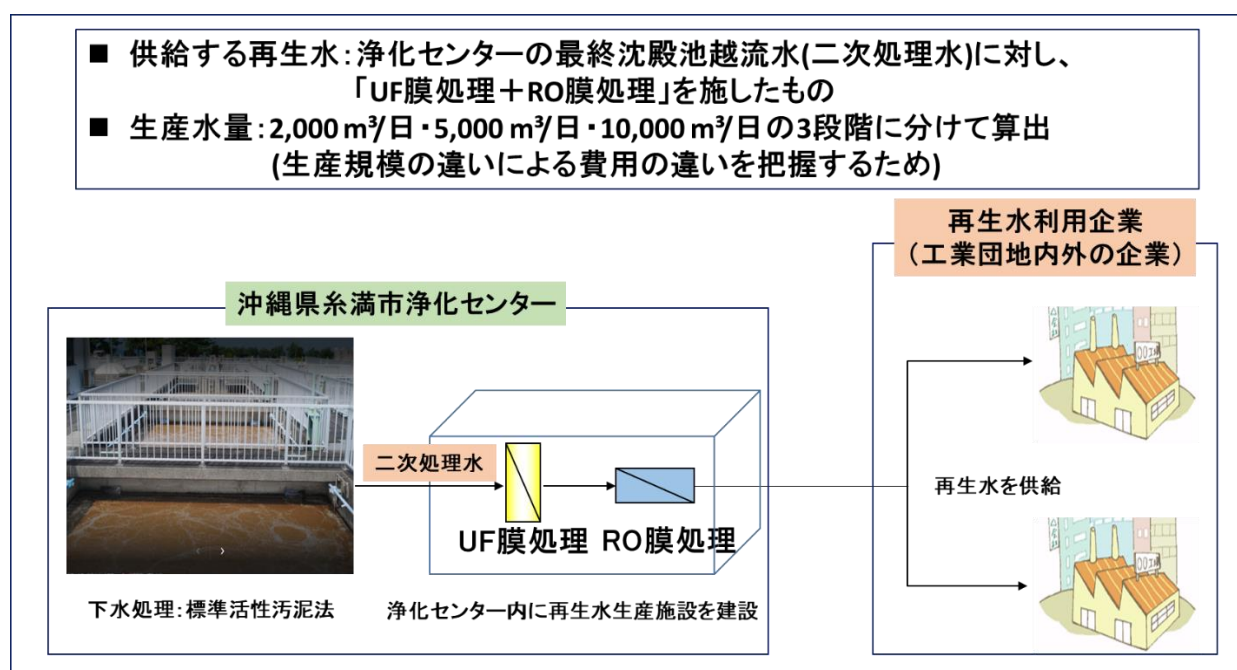


図 5.1：本研究における計算の前提条件

5.2.1 再生水生産における設備配置・運転条件の設定

本章で行う再生水生産費用の算出は、3章 3.2.1-3.2.2 の運転条件において UF 膜・RO 膜を運転することを前提として行った。ただし RO 膜の定期洗浄頻度のみ 3 章 3.4.2 の結果から、定期洗浄頻度を 1 か月に 1 回に変更して費用算出を行った。本章の費用算出で前提としている UF 膜・RO 膜の運転条件を以下の図 5.2-5.3 に示す。また UF 膜・RO 膜の設備配置については、過年度の研究調査^{1),2)}をもとに以下のように定めた(図 5.4-5.5)。

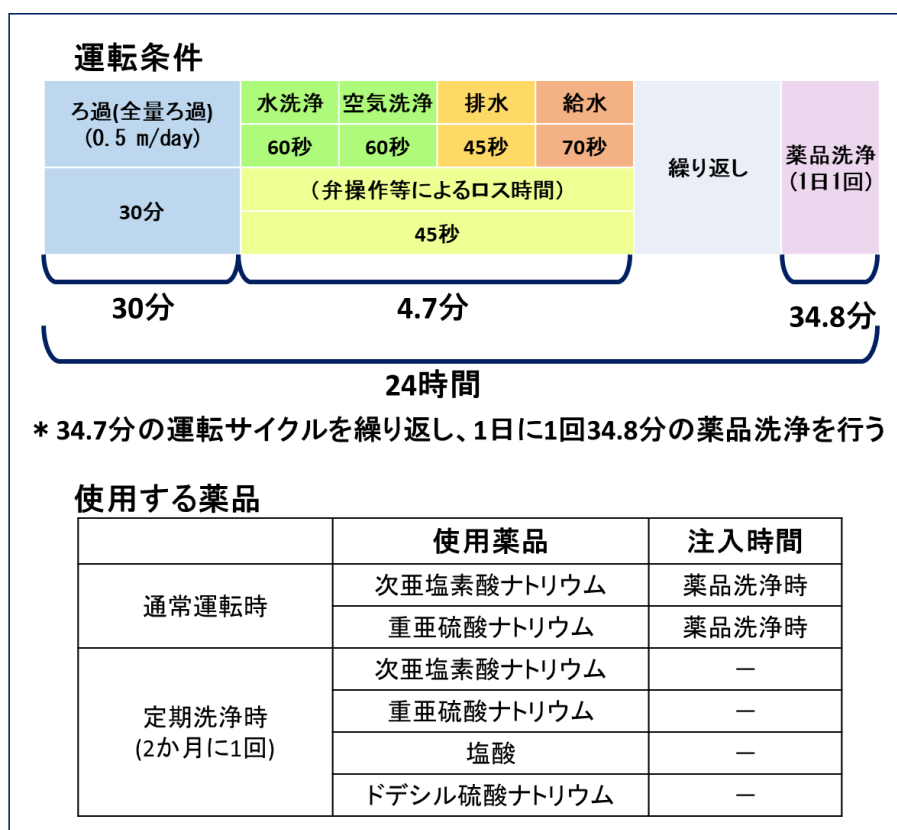


図 5.2 : UF 膜処理の運転条件

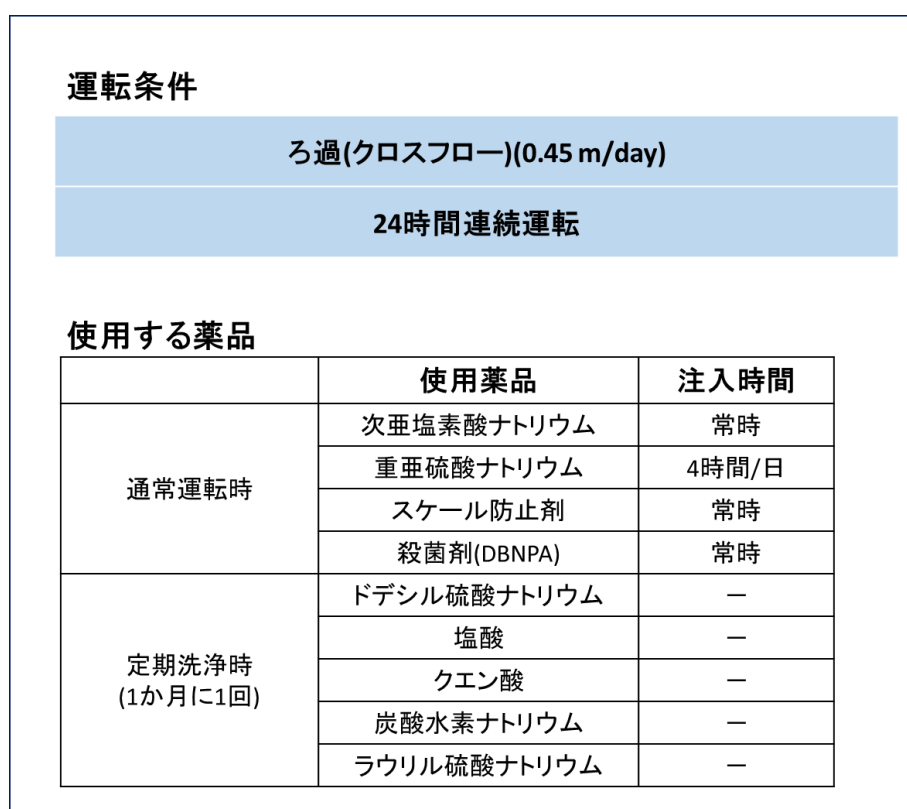


図 5.3 : RO 膜処理の運転条件

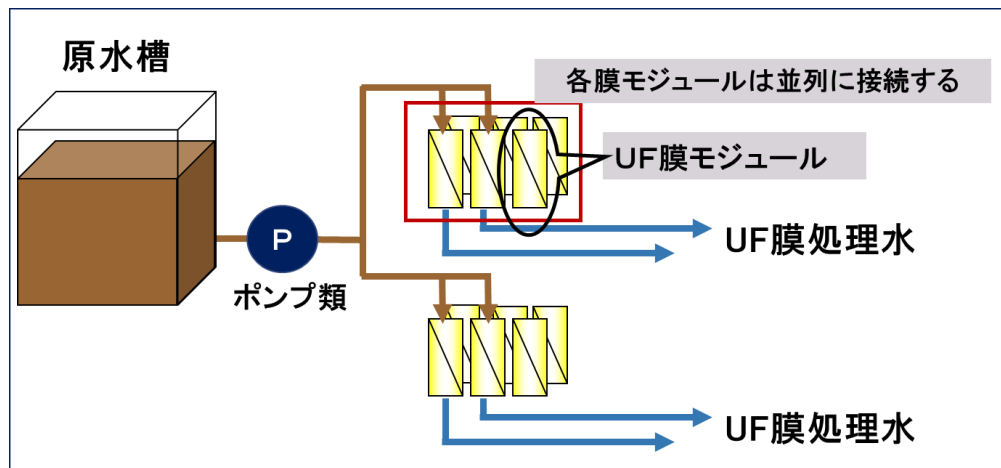


図 5.4 : UF 膜設備の配置

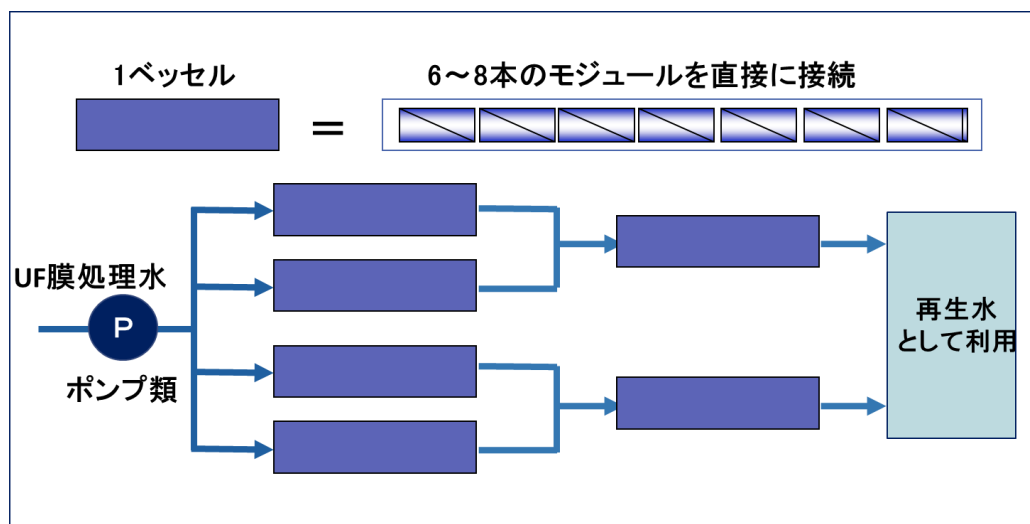


図 5.5 : RO 膜処理の運転条件

5.3 再生水生産に係る費用の算出方法

本研究においては再生水生産に係る費用を大きく分けて建設費と維持管理費に分類し、それぞれの分類の中の各費用項目について費用を算出し合算する。費用は全て1年あたりに係る費用として算出するため、建設時に一時点で費用が発生する建設費については資本コスト(利息)と耐用年数を加味して年間費用に換算した。なお資本コスト率(利子率)は国土技術総合研究所が費用算出に用いている2.3%³⁾を使用した。資本コストと耐用年数を加味した年間費用への換算式は以下の式5.1で表せる⁴⁾。式5.1は、年間費用を発生時の費用に対して設定した利子率と耐用年数で決まる「資本回収係数」に発生時の費用をかけて算出することを意味している。この資本回収係数は現在の支出額を、借入利息等の資金調達に係る費用を含めて、将来に渡って発生する年間の支出額に換算する際に用いる計数である。そのため式5.1で設定する利子率は建設時に係る費用を「誰が」・「どのように調達するか」によって決まる。設備投資を借入・債券発行等のファイナンス手法より行うとしたときは、

ファイナンス主体により信用リスクが異なるため、信用リスクが最も低い国や地方公共団体が設備投資を行うとすると、利子率は低く設定できるが、民間企業が設備投資をするとした際は設定利子率に信用リスク分が付加されるため利子率が高くなる。ここで本研究では、国土術総合研究所が地方公共団体などの公の主体による設備投資について検討して設定した利子率を使用しているが、公の主体による国債・地方債などを用いたファイナンスを前提とした場合、利子率を低く抑えることができる一方で、民間企業が再生水事業を行うことを想定した場合、利子率を2.3%より高く設定する必要がある可能性がある。

$$\text{年間費用(百万円/年)} = \text{発生時の費用(百万円)} \times \frac{\text{利子率} \times (1 + \text{利子率})^{\text{耐用年数}}}{(1 + \text{利子率})^{\text{耐用年数}} - 1} \cdots (\text{式 5.1})$$

また式 5.1 に適用する耐用年数は以下の表 5.1 に示す通り、土木・建築費は耐用年数 50 年、機械設備費及び電気設備費は耐用年数 15 年とした。

表 5.1：設定耐用年数

費用項目	単位	耐用年数
土木・建築物	年	50
機械・電気設備		15

最後に費用算出の流れを以下の図 5.6 に示す。

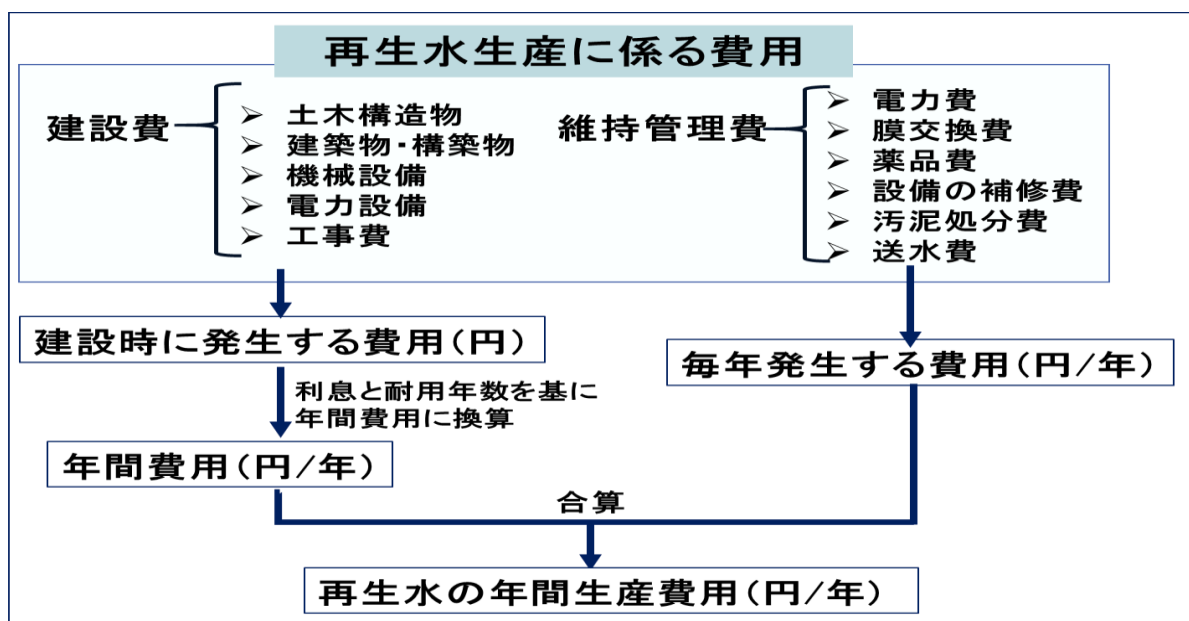


図 5.6：再生水に係る費用算出の流れ

5.4 各費用項目の費用算出方法

5.4.1 建設費

本研究では UF 膜処理設備と RO 膜処理設備に分けて建設費を算出した。各膜処理設備について処理水量ごとに以下の表 5.2 に示す費用関数を用いて建設費を算出した^{5), 6)}。なお、表の費用関数には、設備そのものの費用に加えて人件費（工事費・据え付け費等）を含んでいる。費用関数の算定条件を以下の表 5.3 に示す^{5), 6)}。また、膜処理設備とは別に再生水を利用地に送る送水管の建設費については別に算出した。

表 5.2：再生処理費用関数^{5), 6)}

項目			建設費費用関数(百万円)
A	UF膜処理	土木・建築	$5.236 \times Q_d^{0.426}$
B		機械設備	$1.209 \times Q_d^{0.708}$
C		電気設備	$3.276 \times Q_d^{0.392}$
D	凝集剤添加＋砂ろ過		$6.4927 \times Q_d^{0.5042}$
E	凝集剤添加＋砂ろ過＋RO膜処理		$13.101 \times Q_d^{0.5460}$

* Qd: 日最大生産水量(m³/日)

表 5.3：各費用関数の算定条件^{5), 6)}

処理プロセス	算定条件	
UF膜処理	土木費	土木費は設備配置図より躯体空容量を求め、そこに30千円/m ³ をかけて算出
	建築費	建築費は設備配置図より床面積を求め、そこに250千円/m ² をかけて算出
	関数算出方法	生産水量2000, 5000, 10000, 20000 m ³ /日の4規模のモデル設計を行い、費用関数を算出
凝集剤添加	凝集剤	注入率 5mg/L
	関数算出方法	生産水量2000, 5000, 10000, 20000 m ³ /日の4規模のモデル設計を行い、費用関数を算出
砂ろ過	ろ過	ろ過速度300 m/d
	関数算出方法	生産水量2000, 5000, 10000, 20000 m ³ /日の4規模のモデル設計を行い、費用関数を算出
RO膜処理	使用するRO膜	スパイラル型を使用
	土木費	UF膜処理の土木費・建築費と同様
	建築費	
	関数算出方法	生産水量1000, 5000 m ³ /日の2規模のモデル設計を行い、費用関数を算出

5.4.1.1 UF 膜処理

UF 膜処理に係る建設費は表 5.2 の費用関数 A・B・C を用いて算出した。なお、費用関数には本検討には含まない UV 処理に関する費用も含むため、土木・建築費については UV 処理装置に係る「専有面積・体積」分の比率を割引いて土木・建築費を算出した。機械・

電気設備費については費用関数を用いた算定値から UV 処理装置に係る「設備費＋工事費」分の比率を割引いて、UF 膜処理に係る機械・電気設備費を算出した。算出した土木・建築費及び機械電気設備費それぞれを、式 5.1 を用いて年間費用に換算した。換算は表 5.1 に示す通り、土木・建築費については耐用年数 50 年、機械設備費及び電気設備費については耐用年数 15 年として行った。

5.4.1.2 RO 膜処理

RO 膜処理に係る建設費は表の費用関数 $D \cdot E$ を用いて算出した。算定式は以下の式 5.2 である。算出した RO 膜処理建設費を土木・建築費と機械設備費に分割し、それぞれ式 5.1 を用いて年間費用に換算した。なお、実際の設備設計においては、薬品貯留タンクを UF 膜処理設備と RO 膜処理設備で共用するなどが想定されるが、多くの設備は別々に使用するため、本計算では設備の共用による影響は考慮していない。換算は表 5.1 に示す通り、土木・建築費については耐用年数 50 年、機械設備費及び電気設備費については耐用年数 15 年として行った。

$$\text{RO 膜処理建設費(百万円)} = 13.101Q_d^{0.5460} - 6.4927Q_d^{0.5042} \cdot \cdot \cdot (\text{式 5.2})$$

5.4.1.3 送水用配管・ポンプ建設費

送水用配管の建設費については、まず送水管の延長距離を算定した。本研究では沖縄県糸満市西崎工業団地での再生水生産・供給を検討しているため、以下の図 5.7 に示すように管路を建設することを想定した。

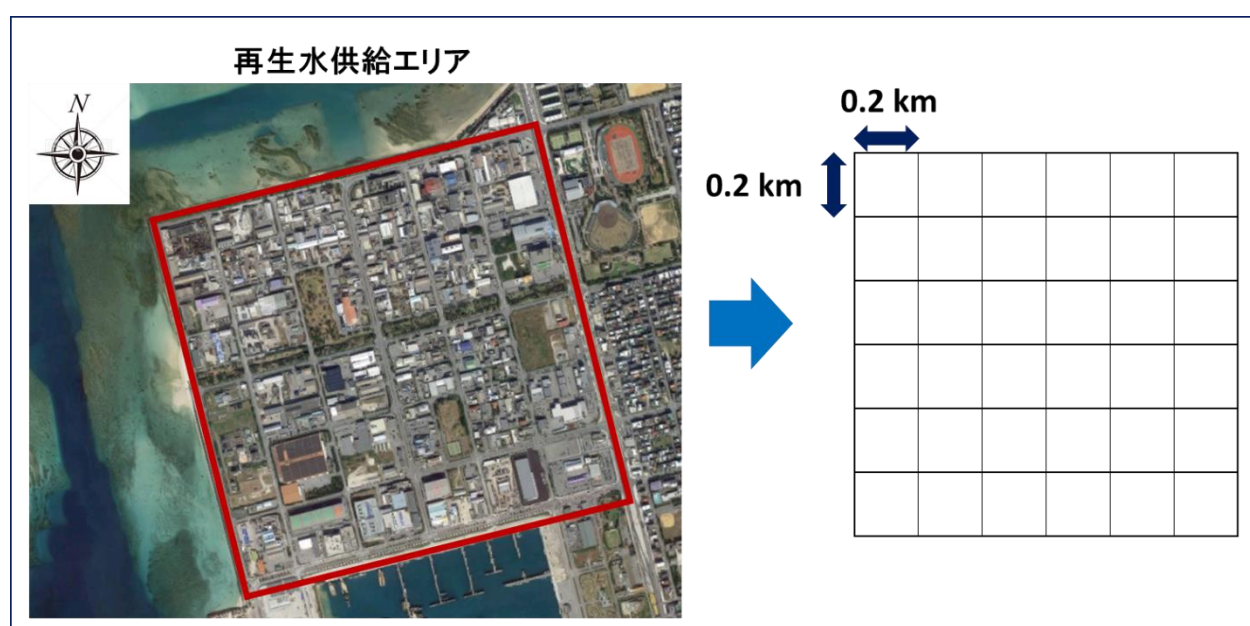


図 5.7：再生水の供給エリアと送水管距離の算定

図 5.7 より送水管延長距離は 14.4 km と設定した。

次に開削工事一式に係る費用関数(ポリエチレン管、車道、昼間施工を想定) (式 5.3-5.4)をもとに算出した⁷⁾。その後算出した建設費を、式 5.1 を用いて年間費用に換算した。

$$P_{\text{pipe}}(\text{千円/m}) = 0.2252D_p + 24.5870 \quad \dots (式 5.3)$$

$$\text{送水管建設費(千円/m)} = P_{\text{pipe}} \times L_{\text{pipe}} \quad \dots (式 5.4)$$

* P_{pipe} : 送水管単価(千円/m)、 D_p : 送水管径(mm)、 L_{pipe} : 送水管延長距離(m)

なお、 D_p については送水時の流束が 1.0-1.5 m/秒となる管径を想定した。

$$D_p(\text{mm}) = 350 \quad \dots (式 5.5)$$

送水用ポンプ建設費については、日最大生産水量を 24 時間で平均的に送水するものとして以下の式 5.6-5.9 を用いて算出した⁸⁾。なお費用関数には設備そのものの費用に加えて人件費(工事費等)を含んでいる。

$$Q_{\text{pump}}(\text{m}^3/\text{分}) = Q_d / 1440 \quad \dots (式 5.6)$$

$$\text{土木建設費(百万円)} = 0.0056Q_{\text{pump}} + 119.1249 \quad \dots (式 5.7)$$

$$\text{機械建設費(百万円)} = 0.0034 Q_{\text{pump}} + 25.8517 \quad \dots (式 5.8)$$

$$\text{電気建設費(百万円)} = 0.0019 Q_{\text{pump}} + 78.1407 \quad \dots (式 5.9)$$

Q_{pump} : 必要ポンプ能力($\text{m}^3/\text{分}$)、 Q_d : 日最大生産水量($\text{m}^3/\text{日}$)

5.4.2 維持管理費

維持管理費は電力費、膜交換費、薬品費、設備の補修費、汚泥処分費、送水費、の 6 つの項目に分けて算出した。

5.4.2.1 電力費

電力費は以下の式に従って算出される。

$$\text{電力費(円/年)} = \text{変動費(円/年)} + \text{固定費(円/年)} \quad \dots (式 5.10)$$

$$\text{固定費(円/年)} = \text{定格出力(kW)} \times \text{基本料金(円/年} \cdot \text{kW)} \quad \dots (式 5.11)$$

$$\text{変動費(円/年)} = \text{消費電力量(kWh/年)} \times \text{電気料金単価(円/kWh)} \quad \dots (式 5.12)$$

$$\text{消費電力量(kWh/年)} = \text{定格出力(kW)} \times \text{稼働時間(h/年)} \quad \dots (式 5.13)$$

式 5.13 に適用する稼働時間は図 5.3 及び図 5.5 より UF 膜処理の稼働時間は 23.5 (h/日)、RO 膜処理の稼働時間は 24 (h/日)とした。

式 5.12 に適用する定格出力を算定には以下の式 5.14 を用いる。

$$P(\text{kW}) = A \gamma QH / (\eta \times 6.12) \quad \dots (式 5.14)$$

*P：定格出力(kW)、 γ ：揚液の単位体積重量(kg/L)、Q：揚水量($\text{m}^3/\text{分}$)、H：全揚程(m)、 η ：ポンプ効率（メーカー、機種等により異なる）、A：ポンプの余裕率

なお、本計算では $\gamma \cdot \eta \cdot A$ について以下の数値を使用した。

γ (kg/L) = 1.0（純水と同様と仮定）

η = 0.70（ポンプ効率図より推定）

A = 1.25（ポンプの負荷率が 80%になるように設定）

本研究では沖縄県糸満市での再生水生産を検討しているため、式 5.10-13 を用いて電力費を算定するにあたりを算定するにあたり、沖縄電力の業務用電力プランを使用した(表 5.4)⁹⁾。

表 5.4：各費用関数の算定条件⁹⁾

形態		単位	単価(円)
基本料金		1kW	1587.6
従量単価	夏期(7/1-9/30)	1kWh	14.94
	その他の季		13.65

5.4.2.2 膜交換費

膜交換費は以下の式 5.15-5.16 に従って算出される。費用算定に用いる耐用年数は、膜メーカーの推奨値を使用し、UF 膜は 7 年、RO 膜は 5 年とする。

膜交換費(円/年) = UF 膜の膜交換費(円/年) + RO 膜の膜交換費(円/年)・・・(式 5.15)

UF 膜・RO 膜の膜交換費(円/年) = 膜購入費用(円) / 耐用年数(年)・・・(式 5.16)

ここで膜購入費用は以下表 5.5¹⁰⁾の単価と式 5.17 をもとに算出する。

表 5.5：各費用関数の算定条件¹⁰⁾

タイプ	用途	膜価格(円/ $\text{m}^3 \cdot \text{日}$)
UF膜	浄水場	900~5,000
RO膜	低圧(工業脱塩用)	約2,000

膜購入費用(円) = 膜価格(円/ $\text{m}^3 \cdot \text{日}$) \times 日生産水量($\text{m}^3/\text{日}$)・・・(式 5.17)

なお本計算においては、UF 膜価格 = 2,000(円/ $\text{m}^3 \cdot \text{日}$)、RO 膜価格 = 2,000(円/ $\text{m}^3 \cdot \text{日}$) と

して膜購入費用を算定した。

5.4.2.3 薬品費

以下の式 5.18 に従って薬品費を算出した。薬品は図 5.3 及び図 5.5 に示す薬品について、通常洗浄と定期洗浄(UF 膜処理・RO 膜処理ともに 2 か月に 1 回行う)に分けてそれぞれ薬品使用量を計算し、薬品費を算出した。

$$\text{薬品費(円/年)} = \text{薬品単価(円/kg)} \times \text{薬品使用量(kg/年)} \cdots (\text{式 5.18})$$

薬品の使用量について、UF 膜処理は先行研究における実測値¹¹⁾を用いた。RO 膜処理は薬品注入濃度と単位時間当たりの膜処理流量から理論的消費量を算出し用いた。

5.4.2.4 設備の補修費

補修費は式 5.19 に示す通り、定期的なモジュールや部品の交換を行う膜処理設備以外の機械・電気設備について、初期導入費用(工事費除く)の 3%を補修費とした¹²⁾。

$$\text{補修費(円)} = \text{膜処理設備以外の機器の初期導入費用(工事費除く)(円)} \times 3(\%) \cdots (\text{式 5.19})$$

5.4.2.5 汚泥処分費

汚泥処分費は以下の表 5.6 で示す算定条件¹³⁾を想定し、表 5.7 の費用関数¹³⁾を用いて算出した。

表 5.6：各費用関数の算定条件¹³⁾

項目	設定値
流入SS濃度(mg/L)	3
埋立処分単価(円/1,000 kg)	16,000
脱水汚泥含水率(%)	80

表 5.7：汚泥の濃縮・脱水に関する費用関数¹³⁾

項目	単位	費用関数	設定値
汚泥濃縮費	百万円/年	$0.030 \times Q_d^{0.628}$	Qd: 濃度1%の汚泥発生量(m ³ /日)
汚泥脱水費		$0.039 \times Q_y^{0.596}$	Qy: 濃度1%の汚泥発生量(m ³ /年)

5.4.2.6 送水費

送水費主に送水ポンプの稼働に係る電力費やメンテナンス費からなる。5.4.1.3 の送水ポ

ンプ建設費の算定時と同様に日最大生産水量を 24 時間で平均的に送水するものとして以下の式 5.20 を用いて算出した¹⁴⁾。

$$\text{維持管理費(百万円/年)} = 1.00Q_{\text{pump}}^{0.69} \times (109.9 / 78.1) \cdots (\text{式 5.20})$$

Q_{pump} : 必要ポンプ能力($\text{m}^3/\text{分}$)

5.5 再生水生産費用の算定結果

5.5.1 UF 膜処理・RO 膜処理・送水に係る年間費用算定結果

5.2 の想定シナリオに則り 5.3 の算定方法をもとに、UF 膜処理・RO 膜処理それぞれの年間費用を算定した結果を以下の表 5.8 及び表 5.9 に示す。また送水に係る配管建設費・維持管理費を表 5.10 に示す。表 5.8 及び表 5.9 の建設費年額と維持管理費を見ると UF 膜処理・RO 膜処理双方とも、建設費の年額に割り戻した額（想定生産水量 $10,000 \text{ m}^3/\text{日}$ のとき、UF 膜処理：57.36 百万円/年、RO 膜処理：88.94 百万円/年）が維持管理費（UF 膜処理：29.20 百万円/年、RO 膜処理：50.44 百万円/年）を大きく上回っている(図 5.8)。これは建設費の内訳については、膜処理に関する機械・電気設備の費用が多くかかっていることが分かる。維持管理費については図 5.9-5.10 より、想定生産水量 $10,000 \text{ m}^3/\text{日}$ のとき、UF 膜処理・RO 膜処理とも補修費・電力費が比較的大きな割合を占めており、この傾向は他の想定生産水量の場合も同様である (UF 膜処理については補修費と電力費合わせて維持管理費全体の約 73-76%、RO 膜処理については補修費と電力費合わせて維持管理費全体の約 73-80%を占めている)。しかし補修費については将来事象の補修費を過去の補修実績から補修費計上割合を 3%として計算しているため、実際にかかる補修費は大きくずれる可能性もある。また UF 膜処理・RO 膜処理にかかる電力費を比較すると、RO 膜処理の方が大きく上回っていることが分かる。これは RO 膜処理の方が運転時に高い圧力をかけるためであると考えられる。ここで UF 膜処理については実証プラントにおける消費電力量の実績値¹⁵⁾と、5.3.2.1 で算出した消費電力量を比較したところ、実績値は $0.144\text{-}0.158 \text{ kWh}/\text{m}^3$ であったのに対し、本研究における消費電力量は $0.122 \text{ kWh}/\text{m}^3$ であり大きな乖離は見られなかった。消費電力量の差は 5.3.2.1 で設定したメーカー特有のポンプ効率の値に起因する可能性がある。表 5.10 より、送水費についても建設費が大きな割合を占めている。このため再生水を広範囲に供給する際には配管の建設費が大きな費用負担となる可能性がある。

表 5.8 : UF 膜処理の年間費用算定結果

項目	単位	想定生産水量(m³)		
		2,000	5,000	10,000
建設費(内訳は下記2項目)	百万円/年	20.80	36.85	57.36
・土木建築費		2.21	3.26	4.38
・機械電気設備費		18.59	33.59	52.98
維持管理費(内訳は下記5項目)		8.45	16.93	29.20
・電力費		1.44	3.60	7.19
・薬品費		0.19	0.48	0.97
・污泥処分費		1.29	2.37	3.81
・UF膜交換費		0.57	1.43	2.86
・補修費		4.96	9.05	14.37
合計		29.25	53.78	86.56

表 5.9 : RO 膜処理の年間費用算定結果

項目	単位	想定生産水量(m³)		
		2,000	5,000	10,000
建設費(内訳は下記2項目)	百万円/年	33.92	58.85	88.94
・土木建築費		2.21	3.26	4.38
・機械電気設備費		31.71	55.59	84.56
維持管理費(内訳は下記4項目)		13.19	28.01	50.44
・電力費		4.02	10.05	20.10
・薬品費		1.85	4.61	9.23
・RO膜交換費		0.80	2.00	4.00
・補修費		6.52	11.34	17.11
合計		40.44	70.19	106.05

表 5.10 : 送水に係る配管建設費年額・維持管理費の算定結果

項目	単位	想定生産水量(m³)		
		2,000	5,000	10,000
配管・ポンプ建設費	百万円/年	36.50	54.81	68.85
維持管理費		1.77	3.32	5.36
合計		38.27	58.13	74.21

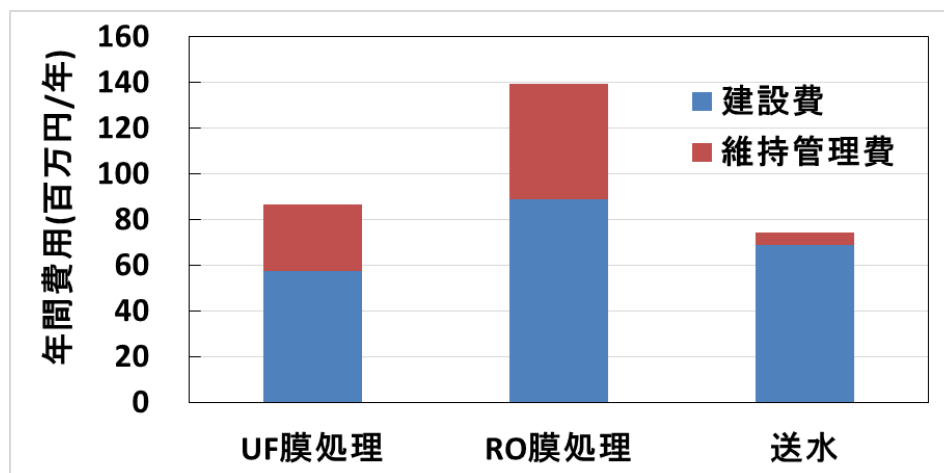


図 5.8 : UF 膜処理・RO 膜処理・送水の年間費用(想定生産水量 10,000 m³/日の場合)

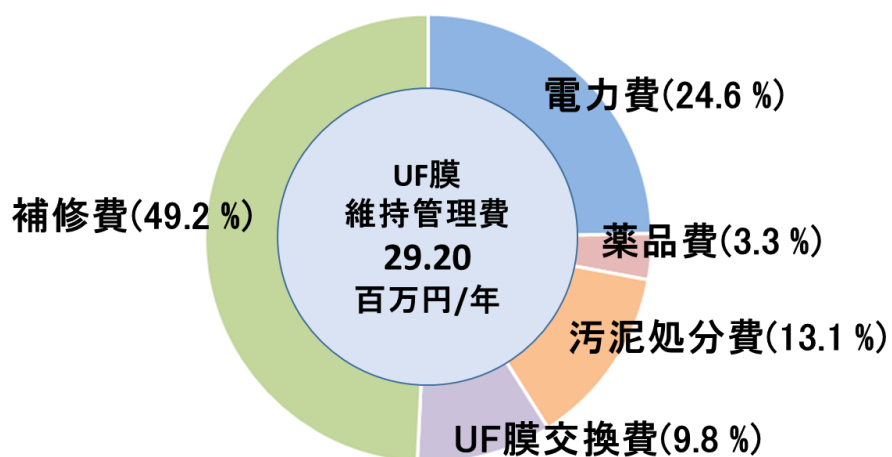


図 5.9 : UF 膜処理に係る維持管理費の内訳(想定生産水量 10,000 m³/日の場合)

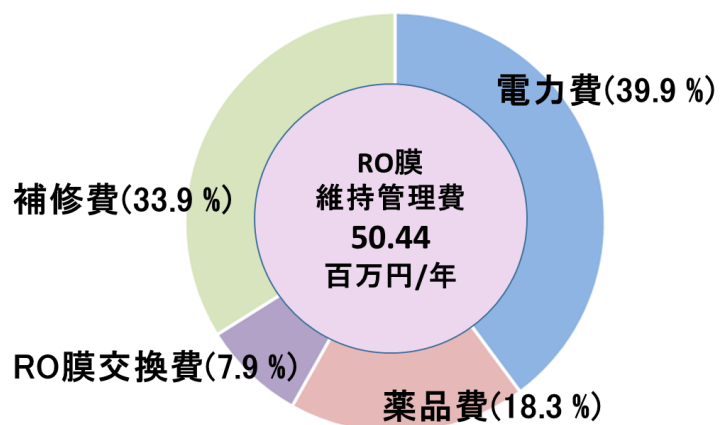


図 5.10 : RO 膜処理に係る維持管理費の内訳(想定生産水量 10,000 m³/日の場合)

再生水設備導入による工業用水供給を行う場合、再生水については表 5.8-5.10 に示す各膜処理と送水費の建設費と維持管理費の合計を合算し、単位水量あたりに換算したものを以下の表 5.11 に示す。表 5.11 より単位水量あたりの再生水生産費用は想定生産水量が多いほど低くなる傾向が見られた。例えば想定生産水量が 10,000 m³の場合は、2,000 m³の場合と比較して単位水量あたりの再生水の生産費用を約 48%低く抑えることができる。これは建物の建設やポンプ設備の導入に係る費用について規模の経済の効果が働くためであると考えられる。

表 5.11：想定生産水量ごとの再生水生産費用

項目	単位	想定生産水量(m ³)		
		2,000	5,000	10,000
UF膜処理(建設費＋維持管理費).....	百万円/年	29.25	53.78	86.56
RO膜処理(建設費＋維持管理費).....		47.16	86.98	139.63
送水費(配管・ポンプ建設費＋維持管理費)		38.27	58.13	74.21
合計		114.68	198.90	300.40
単位水量あたりの生産費用	円/m ³	157.1	109.0	82.3

5.5.2 再生水の工業用水への適用可能性の検討

5.5.1 の結果から再生水を糸満工業団地に導入可能かを検討する。現在沖縄県では沖縄県企業局が工業用水の供給を行っているが、水源となる県北部のダム水の使用可能量は限られており、短期間で工業用水の供給水量を大幅に増やすことは難しい。一方で糸満工業団地では 4 章で行ったアンケート調査結果より、複数の工業用水利用企業から工業用水の契約水量を増やしたいという要望が出ている。更に同工業団地及びその周辺地域では今後新水産市場建設・工業用の土地活用などが予定されており、今後の工業用水需要増加が見込まれる。そこでこれらを踏まえて以下の 3 つの再生水適用シナリオについて検討する。

シナリオ 1：将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替する。

シナリオ 2：将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する。

(再生水と既存の工業用水を併用する)

シナリオ 3：再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水の需要増加分に対して再生水を供給する。

(シナリオ 2 と同様に再生水と既存の工業用水を併用する)

5.5.2.1 シナリオ 1

まずシナリオ 1(図 5.11)の場合、既存の工業用水と再生水の供給原価を比較する(図 5.12)。平成 28 年度の沖縄県企業局の経営レポート¹⁶⁾によると。現在の沖縄県の工業用水の供給原価は 1 m³あたり 50.48 円となっている。再生水の供給原価は表 5.11 より規模の経済により最も供給原価を抑えることができる 10,000 m³/日生産する場合においても 82.3 円/m³で

ある。供給水量を増やすことで、さらに再生水の供給原価を下げることも可能かもしれないが、現在糸満市西崎工業団地に供給されている工業用水量は平均 2,223 m³/日であり、工業用水需要が 10,000 m³/日以上に短期間で増加することは考えにくいため現実的ではない。そのため、供給原価の比較の観点からは、既存の工業用水を再生水で完全に代替することは難しいと推察される。

しかし、供給水の水質の観点からは、4 章 4.3.3 で既に述べた通り、現在糸満市西崎町で工業用水を使用している多くの食品系企業は、Ca や Mg などの硬度物質を取り除くために自社内で独自処理を行っている可能性が高い。今後、こうした硬度物質を除いた水を必要とする食品系企業による工業用水の需要が増加するとした場合、再生水中には硬度物質がほとんど含まれていないため(3 章 3.4.3 及び 3.5 の結果より)、企業内での追加処理を必要とせず、工業用水利用者にとっての費用面の利点を見出せる可能性がある。

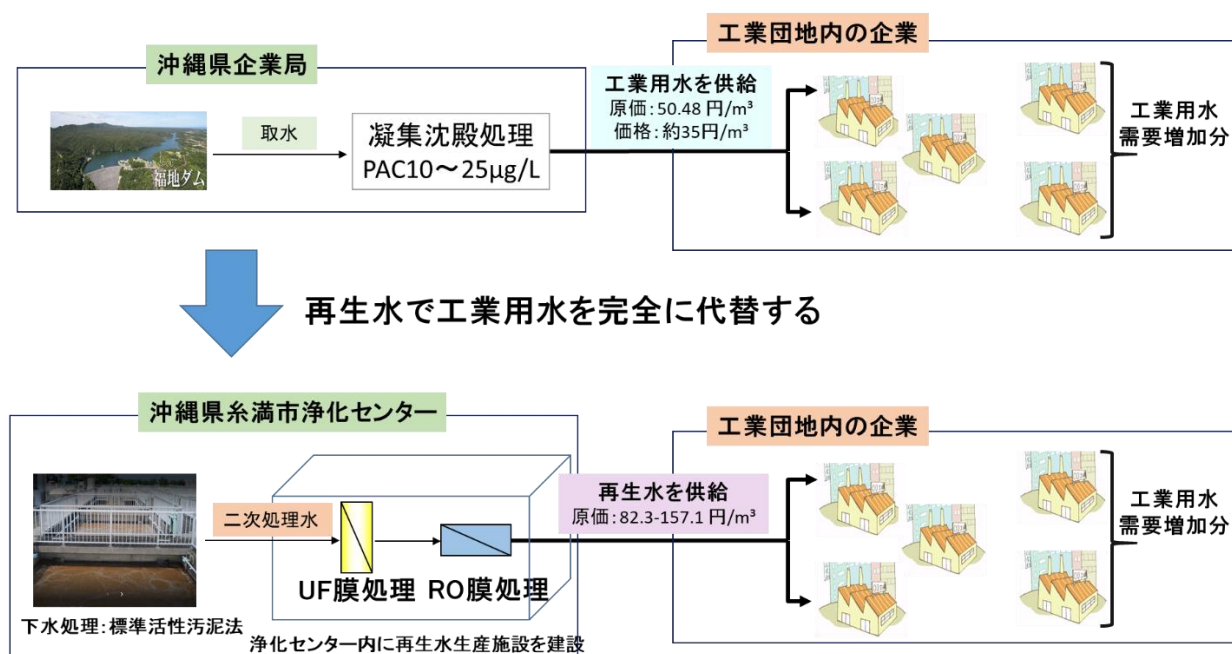


図 5.11 シナリオ 1 の概要

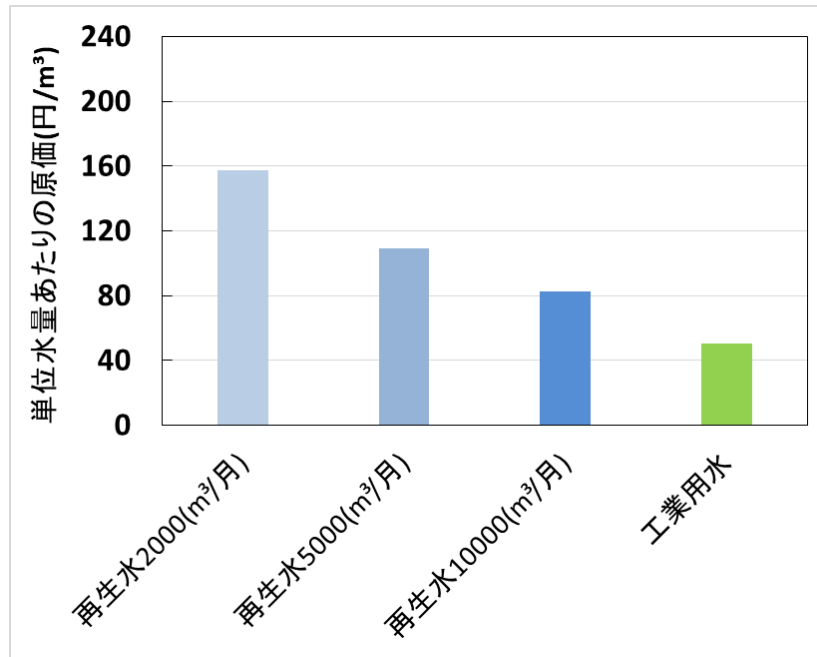


図 5.12：シナリオ 1 における再生水と工業用水の原価の比較

5.5.2.2 シナリオ 2

次に再生水導入によって工業用水の需要増加に対応するシナリオ 2(図 5.13)について、既存の工業用水の水源は限られており短期間の急激な工業用水需要増加に対応できないので、その需要増加分を水道水で追加供給すると仮定すると、再生水の競争相手となるのは水道水である。よってこのシナリオでは沖縄県内で供給されている水道水と再生水の供給原価を比較する。平成 28 年度の沖縄県企業局の経営レポート¹⁷⁾によると。現在の沖縄県の水道水の供給原価は 1 m³あたり 97.35 円となっている。

このため供給原価の観点から比較すると(図 5.14)、既存の工業用水供給量に近い再生水供給水量 2,000 m³/日及び 5,000 m³/日の場合の供給原価は、それぞれ 157.1 円/m³、109.0 円/m³のため、水道水に対して優位性は見いだせなかった。しかし、再生水の想定生産水量が 10,000 m³の場合は再生水の供給原価が 82.3 円/m³となり、水道水よりも供給原価が低くなるため、供給原価面で再生水の優位性を見出した。そのため、供給原価の面では、同工業団地及びその周辺地域の工業用水需要が、既存の工業用水需要量以上に大幅に増加した場合には、再生水設備を導入する余地があると言える。また、供給価格を考慮すると、現在沖縄県では水道料金は約 200 円/m³と設定されており、本シナリオにおける再生水の供給原価は 3 つのいずれの生産水量においてもこの金額を下回っているため、既存の水道水と比較して利益率が下がるが、生産水量 2,000 円/m³、5,000 円/m³の場合も既存の水道水以下の料金で再生水を供給することが可能である。

また 5.5.2.1 と同様に供給水の水質の観点からは、4 章 4.3.3 で既に述べた通り、現在糸満市西崎町で工業用水を使用している多くの食品系企業は Ca や Mg などの硬度物質を取り除くために、自社内で独自処理を行っている可能性が高い。また同市に供給される水道水には、既存の工業用水と同程度の硬度物質(約 33 mg/L)が含まれており¹⁸⁾、多くの食品

系企業が水道水を使用したとしても、追加で高度物質を取り除く独自処理設備を導入する必要がある可能性が高い。一方で再生水中には硬度物質がほとんど含まれていないため(3章 3.4.3 の結果より)、企業内での追加処理を必要としない。そのため再生水の水質を考慮すると、水道水と同程度の料金設定をしたとしても利用者が再生水利用にメリットを見出せる可能性がある。

工業用水の需要増加分に対し再生水を供給する (再生水と工業用水の併用)

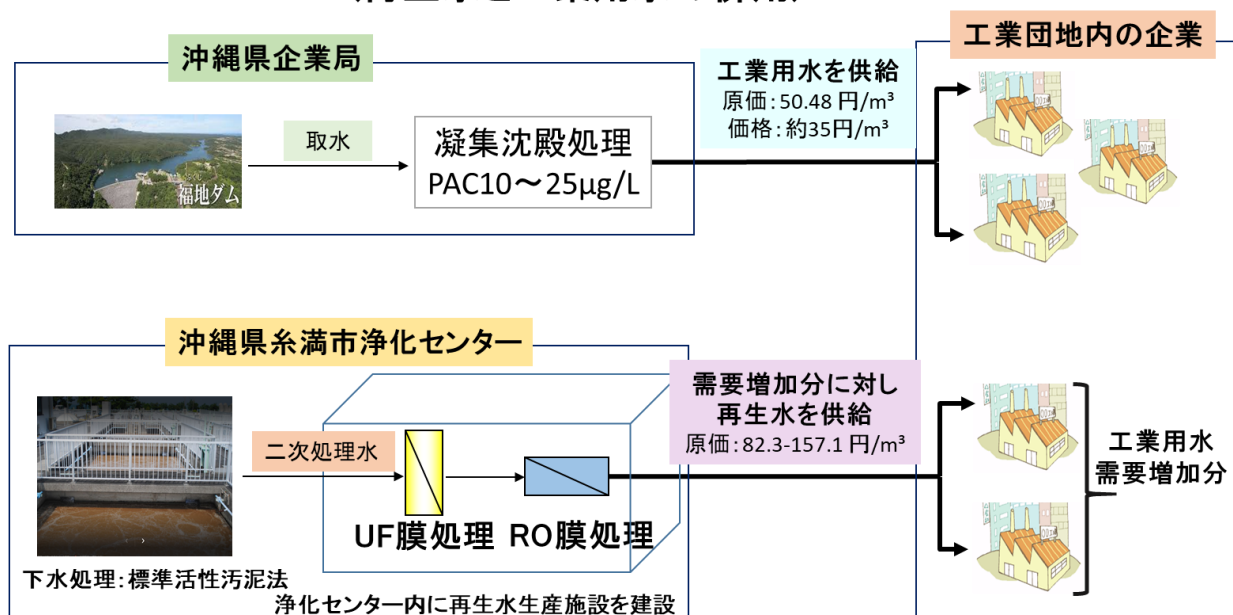


図 5.13 シナリオ 2 の概要

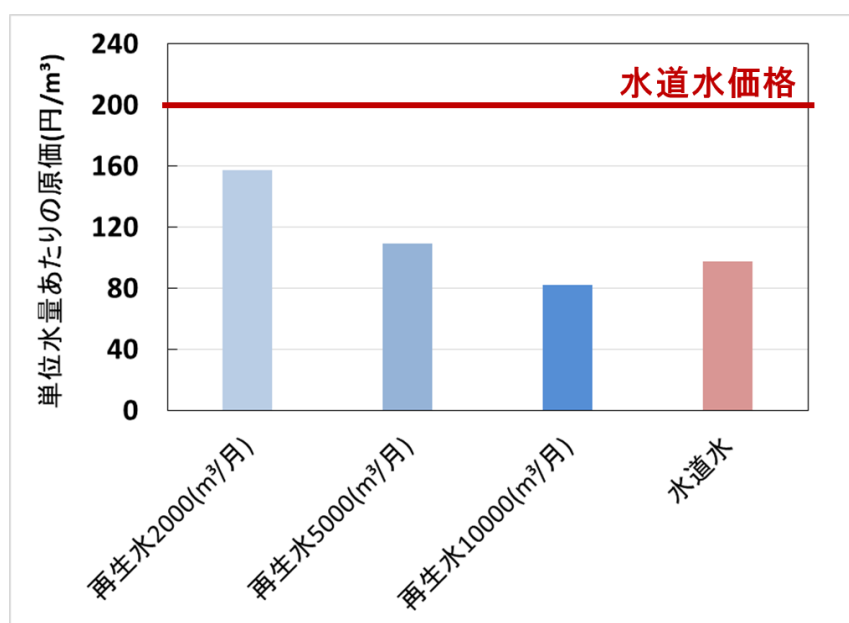


図 5.14 シナリオ 2 における再生水と水道水の原価の比較

5.5.2.3 シナリオ 3

最後に再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水の需要増加分に対して再生水を供給する（シナリオ 2 と同様に再生水と既存の工業用水を併用する）シナリオ 3(図 5.15)については、まず競争相手となるのはシナリオ 2 と同様に水道水である。再生水の原価は、このシナリオでは新たな配管を建設しないため、配管の建設費を表 5.11 の費用から差し引いて算出した。供給原価の観点から比較すると(図 5.16)、再生水供給水量 2,000 m³/日の場合の供給原価はそれぞれ 125.6 円/m³のため、水道水に対して優位性は見いだせなかった。しかし、再生水の想定生産水量が 5,000 m³/日、10,000 m³の場合は、再生水の供給原価がそれぞれ 87.4 円/m³、68.5 円/m³となり、水道水よりも供給原価が低くなるため、供給原価面で再生水の優位性を見出した。そのため供給原価の面では、同工業団地及びその周辺地域の工業用水需要が既存の工業用水需要量以上に増加した場合には、再生水設備を導入する余地があると言える。また水道水の供給価格を考慮すると、シナリオ 2 と同様に本シナリオにおける再生水の供給原価は 3 つのいずれの生産水量においても水道料金約 200 円/m³を下回っているため、生産水量 2,000 円/m³の場合も既存の水道水以下の料金で再生水を供給することが可能であり、供給原価が 125.6 円であるため、2 章 2.1.4 で述べた現在日本国内で工業用再生水が供給されている価格帯(5.25 - 150 円/m³)での供給が可能であるため本シナリオが実現可能であることが示唆された。

工業用水の需要増加分に対し再生水を供給する (再生水と工業用水の併用かつ工業用水の配管を使用)

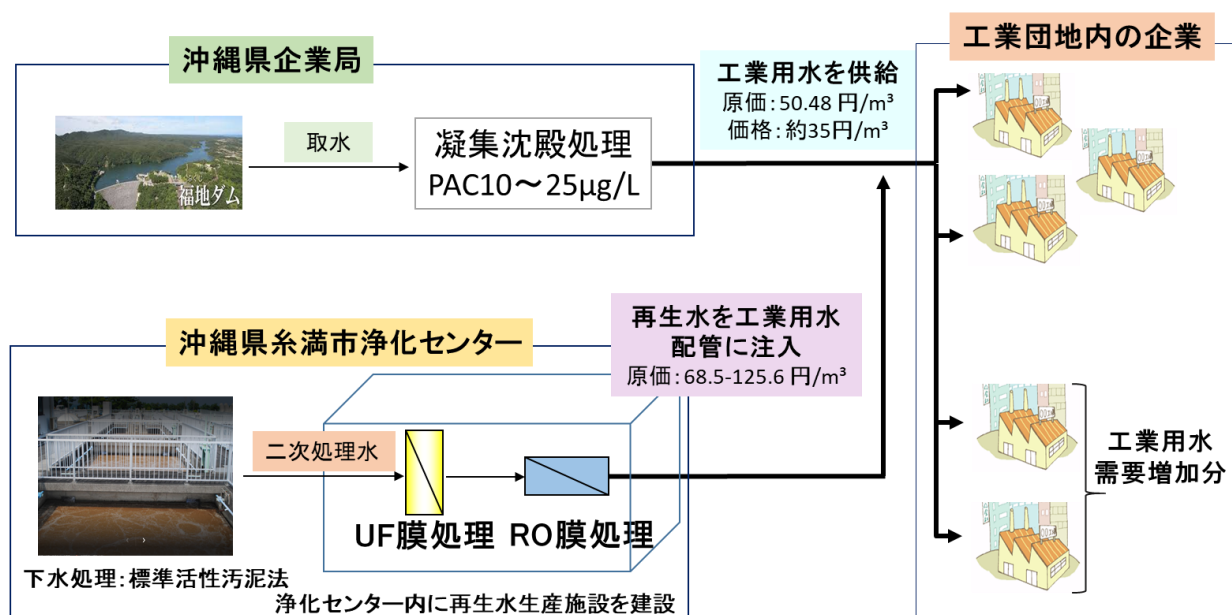


図 5.15 シナリオ 3 の概要

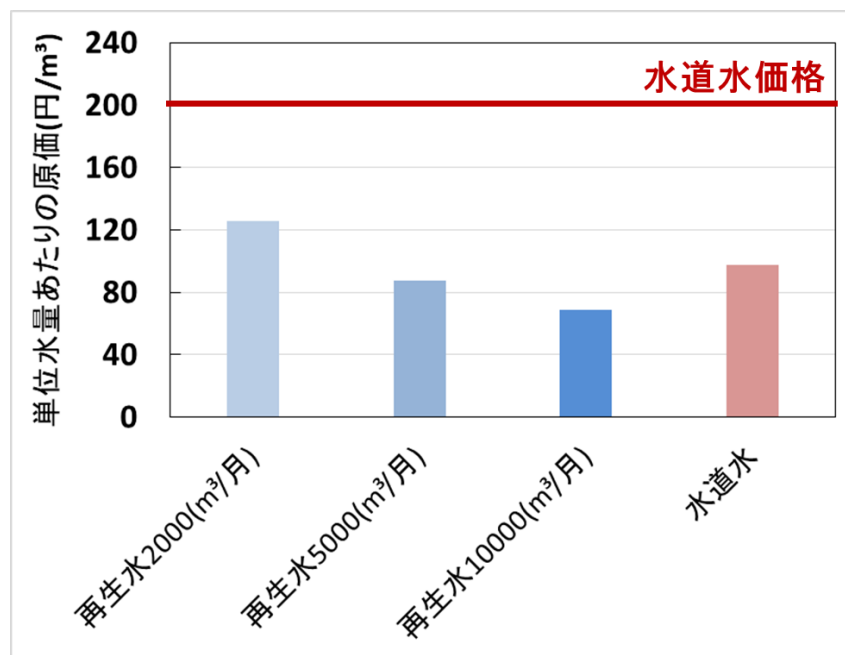


図 5.16 シナリオ 3 における再生水と水道水の原価の比較

5.6 本章のまとめ

本研究において沖縄県糸満市に二次処理水に対し UF 膜処理及び RO 膜処理を行う再生水生産施設を導入し工業用水を西崎工業団地内外の企業に供給することを想定し、年間生産費用を算出した。そこで得られた結果について、(1)将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替するシナリオ 1、(2)将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する(再生水と既存の工業用水を併用する)シナリオ、(3)再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 3 の 3 つのシナリオについて、3, 4 章の水質測定結果と工業用水に関するアンケート結果も踏まえた上で実現可能性について検討した。以下が本章で得られた知見である。

1. UF 膜処理・RO 膜処理・送水に係る年間費用については、いずれも建設費を年間費用に割り戻した額が維持管理費を大きく上回った。UF 膜・RO 膜処理の維持管理費の中では運転に係る電力費と補修費が比較的費用の大きな割合を占めていた。
2. 単位水量あたりの再生水生産費用(UF 膜処理・RO 膜処理・送水に係る費用)は想定生産水量が多いほど低くなる傾向が見られた。これは建物の建設やポンプ設備の導入に係る費用について規模の経済の効果が働くためであると推察された。
3. 将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替するシナリオ 1 については、供給原価の比較の観点からは既存の工業用水を再生水で完全に代替することは難しいと推察された。供給水の水質も考慮すると、硬度物質を除いた水を必要とする食品系企業による工業用水の需要が増加するとした場合、再生水中には硬度物質がほ

とんど含まれていないため、企業内での追加処理を必要とせず、工業用水利用者にとっては費用面の利点がある可能性がある。

4. 将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 2 については、沖縄県内で供給されている水道水を再生水の競争相手と想定した。供給原価の観点では既存の工業用水供給量に近い再生水供給水量 $2,000 \text{ m}^3/\text{日}$ 、 $5,000 \text{ m}^3/\text{日}$ の場合については、水道水に対して費用面の優位性は見いだせなかったが再生水の想定生産水量が $10,000 \text{ m}^3$ の場合は再生水の供給原価が水道水よりも供給原価が低くなり、供給原価面で再生水の優位性を見出した。また生産水量 $2,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 、 $5,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ の場合も既存の水道水以下の料金で再生水を供給することが可能であった。また供給水の水質の観点からは、糸満市に供給される水道水と比較して再生水中には硬度物質がほとんど含まれておらず企業内での追加処理を必要としないため、水道水と同程度の料金設定をしたとしても利用者が再生水利用にメリットを見出せる可能性がある。
5. 再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 3 については、シナリオ 2 と同様に沖縄県内で供給されている水道水を再生水の競争相手と想定した。このシナリオではシナリオ 2 と比較して配管の建設費の分再生水の供給原価を下げるができる。供給原価を水道水と比較すると、再生水供給水量 $2,000 \text{ m}^3/\text{日}$ の場合は水道水に対して優位性は見いだせなかった。しかし再生水の想定生産水量が $5,000 \text{ m}^3/\text{日}$ 、 $10,000 \text{ m}^3$ の場合は水道水よりも供給原価が低くなり、供給原価面で再生水の優位性を見出した。また生産水量 $2,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ の場合も単位水量あたりの原価が $125.6 \text{ 円}/\text{m}^3$ であり、既存の水道水以下かつ現在日本国内で工業用再生水が供給されている価格帯($5.25 - 150 \text{ 円}/\text{m}^3$)で再生水を供給することが可能であることが示唆された。

参考文献

- 41) B-DASH 評価書：第 2 章 実験計画 P13
- 42) CREST 報告書：2.2.3 UF 膜+UV プロセスの運転性能評価
- 43) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.19 UF 膜ろ過と紫外線消毒を用いた高度再生水システム導入ガイドライン（2018 年 2 月） 第 3 章 導入検討 P44
- 44) 国土交通省 都市・地域整備局 下水道部：バイオソリッド利活用基本計画策定マニュアル（平成 16 年 3 月）
- 45) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.19 UF 膜ろ過と紫外線消毒を用いた高度再生水システム導入ガイドライン（2018 年 2 月） 第 3 章 導入検討 P37
- 46) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：平成 18 年度 下水道関係調査研究年次報告書集（2007 年） 6.再生水利用の促進に関する調査 P28-29
- 47) 厚生労働省 健康局水道課：水道事業の再構築に関する施設更新費用算定の手引き（平

- 成 23 年 12 月) 2-2-5 管路(1) 開削工 開削工事方式、ポリエチレン管、車道、昼間
施工 P2.51
- 48) 厚生労働省 健康局水道課:水道事業の再構築に関する施設更新費用算定の手引き(平
成 23 年 12 月) 2-2-3 送配水ポンプ施設(場外) (1) 送配水ポンプ施設(場外) P2.44-
2.45
- 49) 沖縄電力株式会社: 主要料金単価表 高圧電力 A
- 50) 株式会社富士経済:高機能分離膜/フィルター関連技術・市場の全貌と将来予測 2014 4.
価格動向(2016 見込) P60
- 51) B-DASH 評価書: 第 3 章ライフサイクルコスト縮減効果 P10
- 52) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: B-DASH プロジェクト No.19 UF 膜ろ過と紫
外線消毒を用いた高度再生水システム導入ガイドライン (2018 年 2 月) 第 3 章 導
入検討 P41
- 53) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: B-DASH プロジェクト No.19 UF 膜ろ過と紫
外線消毒を用いた高度再生水システム導入ガイドライン (2018 年 2 月) 第 3 章 導
入検討 P42
- 54) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部: 流域別下水道整備総合計画調査指針と
解説 参考資料 18.費用関数 (4)ポンプ施設 維持管理費 P131
- 55) B-DASH 評価書: 第 3 章ライフサイクルコスト縮減効果 P8
- 56) 沖縄県企業局: 平成 28 年度版 沖縄県企業局経営レポート―第 9 次経営計画―
料金水準及びコストについて判断する指標 (水道) P14
- 57) 沖縄県企業局: 水道用水供給市町村 浄水場ごとの供給市町村
http://www.eb.pref.okinawa.jp/water/72/187#a_suido_cities(最終アクセス日: 2019 年 1 月
27 日)
- 58) 沖縄県企業局 水質管理事務所: 水質年報 平成 28 年度 (2016 年度) (5)西原浄水場
P183-198
<http://www.eb.pref.okinawa.jp/userfiles/files/autoupload/NenpouH28.pdf>
(最終アクセス日: 2019 年 1 月 27 日)

第 6 章 結論と今後の課題

6.1 結論

本研究は下水処理場の二次処理水に対し「UF 膜処理+RO 膜処理」を施して得られる再生水を工業利用することを目的として、①再生水と既存の工業用水の水質比較、②アンケート調査をもとにした沖縄県糸満市における工業用水利用状況及び再生水需要の把握、③再生水生産に係る年間費用の把握をもとにした再生水事業の実現可能性の評価の 3 つを行った。以下に本研究を通して得られた成果をまとめた。

第 3 章の「UF 膜処理+RO 膜処理」に関する運転性と水質の評価及び工業用水との水質比較については、パイロットスケールで 1 つのエレメントを用いて「UF 膜処理+RO 膜処理」の運転を行った場合、連続運転期間が約 8 日間であったが、UF 膜処理については CIP 間隔の算定を通して 2 か月間の連続運転が可能である可能性が高いことが示唆された。RO 膜処理についても竹内らの連続運転時と比較して運転開始から 7 日間の入口圧力の上昇度合いがほぼ同じかそれ以下であったことから、少なくとも 23 日間の連続運転が可能と推察された。

処理水の水質については、有機物質指標の TOC は濃縮水の循環率の違い、水質の変動、未処理の工業用水の採水地点の違いを考慮しても、測定値は RO 膜処理水の方が既存の未処理の工業用水を下回るという結果が得られた。窒素類(TN、NH₃)については下水を水源としている RO 膜処理水の方が既存の工業用水と比較して測定値が高くなる傾向が見られた。次に金属類については濃縮水の循環率の違い、日時による水質の変動、未処理の工業用水の採水地点の違いを考慮しても、再生水中に含まれる Na・Ca・Mg の濃度は工業用水を下回る結果となった。さらに RO 膜処理水と硬度成分を取り除く企業内独自処理を施した工業用水の水質を比較したところ、硬度物質の Ca・Mg の濃度についてはどちらも検出下限値以下でほとんど含まれていなかった。また RO 膜処理水中の Na の濃度は独自処理工業用水の濃度を下回っていた。このことから下水処理水に対し「UF 膜処理+RO 膜処理」プロセスを適用することにより、独自処理工業用水と同程度まで硬度物質を除去することができ、Na や Cl の濃度が独自処理工業用水以下の再生水を得ることができることが示された。実プラントを想定し RO 膜エレメントを 7 つ接続した際のエレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質は、上記のエレメント 1 つを用いて再生水と工業用水の水質比較を行った場合と同様に TN 以外の項目で RO 膜エレメント全体を通して得られる処理水の水質が既存の未処理の工業用水よりも濃度が低い結果が得られた。独自処理工業用水と比較すると、有機物質・Na・Cl 及びリンの算出値は独自処理工業用水の測定値を下回っており、硬度物質の Ca・Mg についてはどちらも検出下限値以下であった。一方で、TN については独自処理工業用水の測定値を上回っていた。このため実プラントと同様に 7 つのエレメントを接続した場合においても、下水処理水に対し「UF 膜処理+RO 膜処理」プロセスを適用することにより、独自処理工業用水と同程度まで硬度物質を除去することができ、Na や Cl の濃度が独自処理工業用水以下の再生水を得ることができることが示された。

次に第4章のアンケート調査については、(1)工業用水と水道水の使用量の関係、(2)工業用水の独自処理と使用水量・利用用途の関係、(3)工業用水の独自処理と重視する水質項目の関係、(4)再生水の利用可否及び要求する料金水準の4つの観点から分析を行った。(1)工業用水と水道水の使用量の関係については、工業用水利用企業の「工業用水+水道水」の使用量は工業用水未利用企業の「水道水」使用量よりも多く、利用水量が多い企業が使用水量にかかる費用削減のために工業用水を使用しているということが推察された。さらに工業用水利用企業において水道水使用量は工業用水使用量と比較して少量であり、工業用水利用企業においてはできるだけ多くの用途に工業用水を使用し、単価が高い水道水はあまり使用していないと推察された。(2)工業用水の独自処理と使用水量・利用用途の関係については、企業内で工業用水に対し独自処理を行っている企業は、行っていない企業と比較して工業用水使用量が多いという結果が得られた。このことから使用水量が多い企業が水道料金を削減するために、水道水から工業用水に転換し、必要な水質を担保するために独自処理を導入したと推察される。独自処理の有無と工業用水の利用用途の関係をみると、企業内の独自処理がされていない工業用水はほとんど食品・飲料製造用に使用されていないという結果が得られた。一方で独自処理を行った水は多くが食品・飲料製造用やそれらに関する洗浄用に使用されていた。このことから利用者は工業用水を独自に自社内で処理を行い、水質を管理することで食品・飲料の製造用にも用いることができていることが示唆される。(3)工業用水の独自処理と重視する水質項目の関係については、食品系の工業用水利用企業の多くが濁度・細菌/ウイルス・硬度物質に対し注意を払っているという結果が得られた。そのため独自処理を行っている食品系の企業の多くが次亜塩素酸ナトリウムの添加またはRO膜処理により、細菌/ウイルスを除去していると推察される。さらに独自処理を行っている企業の多くが工業用水に含まれるCaやMgなどの硬度物質を取り除くために軟水化処理やRO膜処理などの独自処理を行っている可能性が示唆された。(4)再生水の利用可否及び要求する料金水準については、工業用水利用企業はその多くが既存の工業用水と同程度もしくはそれ以下の料金で再生水利用を検討すると回答した。これらの企業は既に料金単価が低い工業用水を使用しているため、こうした企業に対し再生水の導入を推進するためにはさらなる再生水供給に係る費用削減が必要であることが示唆された。一方で工業用水未利用企業に関しては食品系・非食品系に関わらず多くの企業が水道料金以下で再生水の導入を検討すると回答した。このことから再生水事業の収益性を考慮すると工業用水利用企業と比較して未利用企業の方が再生水導入の推進をし易い可能性がある。しかし、回答者が重視する再生水の水質の観点からは、RO膜処理などの細菌/ウイルスを完全に除去できる再生水生産プロセスを用いる必要があることが示唆された。また再生水を使用しないと回答した工業用水未利用企業はその多くが「必要がないから」、または「使用水量が少ないから」と回答しており、再生水の供給は利用水量が多い企業を対象とすべきであると考えられる。

最後に第5章の再生水生産に係る年間費用の把握をもとにした再生水事業の実現可能性の評価について、「UF膜処理+RO膜処理」、送水に係る年間費用の内訳については、いず

れも建設費を年間費用に割り戻した額が維持管理費を大きく上回った。UF 膜処理及び RO 膜処理ともに維持管理費の中では運転に係る電力費と補修費が合わせて維持管理費全体の 7 割以上を占めており、効果的な連続運転を行い、電力費を削減すること、及び補修・メンテナンスをより少なくできる設備を導入することが維持管理の削減に大きく寄与することが示された。さらに単位水量あたりの再生水生産費用(UF 膜処理・RO 膜処理・送水に係る費用)は想定生産水量が多いほど低くなる傾向が見られた。これは建物の建設やポンプ設備の導入に係る費用について規模の経済の効果が働くためであると推察される。

この最後に費用算出結果を用いて(1)将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替するシナリオ 1、(2)将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する(再生水と既存の工業用水を併用する)シナリオ 2、(3)再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 3 の 3 つのシナリオについて、3, 4 章の水質測定結果と工業用水に関するアンケート結果も踏まえた上で実現可能性について検討した。

将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替するシナリオ 1 については、供給原価の比較の観点からは既存の工業用水を再生水で完全に代替することは難しいと推察されたが、硬度物質を除いた水を必要とする食品系企業による工業用水の需要が増加するとした場合、再生水中には硬度物質がほとんど含まれておらず、企業内での追加処理を必要としないため、水質面で再生水の優位性を訴求できる可能性がある。

将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する(再生水と既存の工業用水を併用する)シナリオ 2 については、沖縄県内で供給されている水道水を再生水の競争相手と想定した。供給原価の観点では既存の工業用水供給量に近い再生水供給水量 $2,000 \text{ m}^3/\text{日}$ 、 $5,000 \text{ m}^3/\text{日}$ の場合については、水道水に対して費用面の優位性は見出せなかったが、再生水の想定生産水量が $10,000 \text{ m}^3$ の場合は再生水の供給原価が水道水よりも供給原価が低くなり、供給原価面で再生水の優位性を見出した。また生産水量 $2,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 、 $5,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ の場合も既存の水道水以下の料金で再生水を供給することが可能であった。

再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 3 については、シナリオ 2 と同様に水道水を再生水の競争相手とした。このシナリオはシナリオ 2 と比較して配管の建設費の分再生水の供給原価を下げるができる。供給原価を水道水と比較すると、再生水供給水量 $2,000 \text{ m}^3/\text{日}$ の場合は水道水に対して優位性は見出せなかった。しかし、再生水の想定生産水量が $5,000 \text{ m}^3/\text{日}$ 、 $10,000 \text{ m}^3$ の場合は水道水よりも供給原価が低くなり、供給原価面で再生水の優位性を見出した。また生産水量 $2,000 \text{ 円}/\text{m}^3$ の場合も単位水量あたりの原価が $125.6 \text{ 円}/\text{m}^3$ であり、既存の水道水以下かつ現在日本国内で工業用再生水が供給されている価格帯($5.25 - 150 \text{ 円}/\text{m}^3$)で再生水を供給することが可能であることが示唆された。

6.2 今後の課題

本研究を通して得られた成果を踏まえ、今後の課題を以下に示す。

第3章については、「UF 膜処理+RO 膜処理」の運転性について、本研究では約8日間の短期間しか実施できなかったため、今後はUF 膜処理・RO 膜処理ともにより長期の連続運転を実施する必要がある。

実プラントを想定し複数のRO 膜エレメントを接続した際のRO 膜処理水の水質について、本研究では2つ目から6つ目のエレメントの運転状態を再現できなかったため、今後の研究で本モデル式を用いたエレメント全体を通して得られるRO 膜処理水の水質が本当に実測値と乖離がないか検討する。また、本研究ではモデル式の適用において計算の簡略化のため濃度分極を無視して計算を行ったため、濃度分極を加味することでより実測値に近い水質の推定ができると考えられる。

第4章については、今回無記名式で企業内の回答者を指定せずに調査を行ったため、回答者の属性の違いが結果に反映されていない可能性がある。そのため今後はできるだけ回答者の属性をそろえることが望ましい。また再生水の利用可否及び求める料金水準についての質問の際は段階的に再生水についての情報を提供し(例えば「再生水事業の概要の説明⇒質問⇒再生水の安全性の説明⇒質問⇒再生水の必要性の説明⇒質問」など)、それにより回答者の回答がどう変わるかの検討は再生水が本当に利用者に受け入れられるかの評価に有用であると考えられる。

第5章については、本研究を通して将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する(再生水と既存の工業用水を併用する)シナリオ2及び再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ3について、費用面と水質面から再生水の導入の余地があることが示されたが、今後は供給者と利用者双方を考慮して再生水供給価格をいくりに設定すべきか検討する必要がある。また、本研究では再生水を下水処理場の敷地内で一括生産・供給するシナリオについて検討したが、この他にも再生水の利用地点で生産する手法など様々な再生水の供給システムについて検討する必要がある。

本研究では糸満工業団地内外の企業に対するアンケート調査を行った。ここでは実際に配布したアンケート用紙(図 A4.1-A4.2)及び再生水に対する説明資料(図 A4.3)を示す。

- 87 -

問 6. 工業用水を利用するにあたって水質面で特に重要視する項目があればご記入ください。

(①pH・②電気伝導度・③濁度・④有機物質(TOC)・⑤細菌やウイルス・
⑥窒素・⑦リン・⑧カルシウムやマグネシウムなどの硬度物質・
⑨塩素やナトリウムなどの塩類・⑩その他())

問 7. あなたの会社では使用する工業用水の水質のモニタリングなどを行なっていますか。あてはまる番号を1つ選んで○印をつけてください。また、水質モニタリングを行っている場合は、その方法と、モニタリング対象水質項目、その項目の許容値範囲(濃度など)をご記入ください。

①行なっている(方法)

(対象水質項目)

(許容値範囲)

②行なっていない。

問 8. その他工業用水を利用するにあたっての経歴があればご記入ください。

()

水道水について

問 9. あなたの会社での水道水の1日あたり使用量と使用時間を教えてください。

①1日あたりの使用量(ml/日)

②1日あたりの使用時間(時間/日)

問 10. あなたの会社の水道水の利用用途を教えてください。あてはまる番号すべてに○印をつけてください。

①手洗い・トイレなど ②飲水・洗浄など

③業務用 (具体的にお書きください)

④その他 (具体的にお書きください)

問 11. 水道水を利用するにあたっての経費があればご記入ください。..

(..)
..
..

その他の水について

問 12. あなたの会社では地下水や井戸水、雨水などを利用していますか。あてはまる番号を1つ選んで○印をつけてください。..

- ①利用している..
②利用していない → 問 15へ..
..

→ (問 13は、問 12で ① と答えただけにお答えください。)..

問 13. あなたの会社の地下水や井戸水、雨水などの利用用途をご記入ください。..

(..)
..
..
..
..

→ (問 14は、問 12で ① と答えただけにお答えください。)..

問 14. あなたの会社では地下水や井戸水、雨水などの利用の際は源泉で再処理していますか。あてはまる番号を1つ選んで○印をつけてください。また、再処理している場合は、その方法をご記入ください。..

- ①再処理している (処理方法 ..)
(処理目的 ..)
②再処理していない..
..
..

排水の処理について

問 15. あなたの会社では使用した工業用水を排水する際に源泉の処理を行っていますか。あてはまる番号を1つ選んで○印をつけてください。また、処理を行っている場合は、その方法と目的、処理の際に発生する排水の処理方法をご記入ください。(排水の一部でも源泉の処理を行っている場合は①を選択してください。)..

あなたの会社について

問1. あなたの会社の業種をお選びください。

食品系

(水産加工業・水産販売業・その他食品製造加工業・その他食品販売業)

非食品系

(製品加工業・製品販売業・サービス業)

その他

()

問2. 具体的に扱っている製品・サービスをご記入ください。

()

工業用水について

問3. 工業用水を使用しない理由があればご記入ください。

[]

問4. 重要視する水質項目があれば教えてください。

(①pH・②電気伝導度・③濁度・④有機物質(TOC)・⑤細菌やウイルス・
⑥窒素・⑦リン・⑧カルシウムやマグネシウムなどの硬度物質・⑨塩素やナトリウムなどの塩類・⑩その他())

水道水について

問5. あなたの会社での水道水の1日あたり使用量と使用時間をご記入ください。

①1日あたりの使用量 (ml/日)

②1日あたりの使用時間 (時間/日)

問6. あなたの会社の水道水の利用用途を教えてください。あてはまる番号すべてに
○印をつけてください。

①手洗い・トイレなど ②散水・洗浄など

③業務用 (具体的に書きください)

糸満工業団地における再生水の工業利用の アンケート調査について

(1) アンケート調査の目的

① 再生水の工業利用の用途と需要の把握

本アンケートを通して、再生水が工業用として具体的にどのような用途に適用可能かを把握したいと考えています。

また、糸満工業団地でどの程度の工業用の水需要があるかを調査し、今後の計画に活用したいと考えています。

② 再生水の工業利用用途に応じた水質の把握

現在、日本では再生水の工業利用について明確な水質基準がないため、工業利用に向けてどの程度の水質にすればよいか分からないのが現状です。

そこで、実際に工業用の水利用に関わる方々の要望や懸念事項をもとに、再生水処理プロセスとその適用範囲を把握したいと考えています。

(2) 再生水とは

現在、「糸満市浄化センター」（西崎にある下水処理場）では、毎日約1万㎡（学校のプール40杯分）の処理された水が海に放流されています。

この放流水を、さらに高度処理（膜ろ過や消毒など）した水が、再生水です。

再生水は、処理方法によっては水道水と同等以上の水質を確保することができます。

再生水利用を進めることは、北部ダムなどの水源の使用量を減し、沖縄県における水不足の解消に寄与できます。

(3)再生水工業利用の目的..

現在、糸満市では「糸満市浄化センター」で生産した再生水（レベル1：..UF膜+UV消毒）を、農業用や散水用等として利用する検討を進めています。..

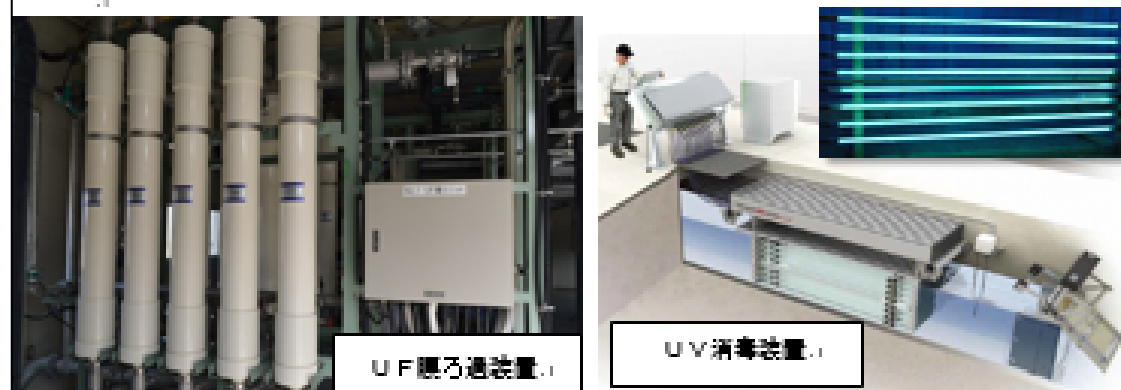
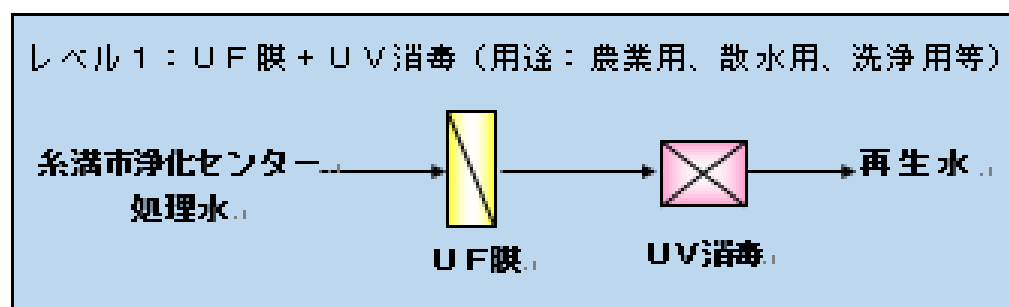


図1 「糸満市浄化センター」にある再生水（レベル1）の処理フロー..

さらに、再生水の工業利用を推進することで、再生水の利用用途拡大につながり、沖縄県の水資源の確保に寄与できます。..

また、糸満工業団地に供給されている工業用水は、北部ダムの水を取水し、簡易処理したものであり、北部の浄水場から南部の糸満市までの長距離を輸送しているため、多くの送水コストがかかっています。..

「糸満市浄化センター」から工業用の再生水（レベル2：UF膜+NF膜／RO膜）を糸満工業団地に供給することが可能となれば、工業用水のコストを低減することにもつながると考えられます。..

レベル2：UF膜＋NF膜／RO膜（用途：工業用等）

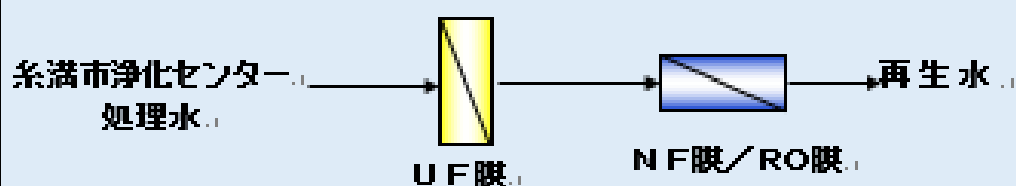


図2 再生水(レベル2)の処理フロー

(4)再生水の水質

「糸満市浄化センター」の処理水に対して、工業用の再生水の高度処理を行うと、水道水と同等以上の水質の再生水になります。

表1 工業用再生水(UF膜＋NF膜、UF膜＋RO膜)の水質と水道水基準

水質項目	単位	工業用再生水① (UF膜＋NF膜)	工業用再生水② (UF膜＋RO膜)	水道水質基準
TDS(総溶解固形分)	g/L	0.46	0.02	0.5以下
EC(電気伝導率)	mS/cm	0.72	0.03	—
濁度	NTU	0.01以下	0.01以下	2以下
TOC(全有機炭素)	mg/L	5.0	1.1	3以下
TN(全窒素)	mg/L	13.8	0.3	—
TP(全リン)	mg/L	0.02	0.01以下	—
Na(ナトリウム)	mg/L	91.7	3.5	200以下
Ca(カルシウム)	mg/L	12.3	0.001	—
Al(アルミニウム)	mg/L	0.02	0.01以下	0.2以下
Fe(鉄)	mg/L	0.01以下	0.01以下	0.3以下

図 A4.3 再生水に関する説明資料（工業用水利用・未利用企業両方に送付）

また 4 章 4.3 で取り上げた回答企業のうち現在工業用水を使用していない企業についての業種と現在工業用水を使用していない理由を集計したものを以下の表 A4.1 に示す。再生水利用可否、及びその理由を集計したものを以下の表 A4.2 に示す。

表 A4.1 工業用水未利用企業が工業用水を使用していない理由

分類	取扱製品・サービス	水道水使用量(㎡/月)	工業用水を利用しない理由
食品系	健康食品製造・販売	3600	健康食品製造工場としてのイメージ悪化を懸念
	弁当、冷凍食品、レトルト食品	2000	
	魚全般	800	・工事にお金がかかる ・工業用水を使用して、刺身等大丈夫か？
	加工黒糖	300	食品を扱っているため
	食肉加工	207	食品会社のため、汚染防止の必要あり
	練製品製造業	200	
	惣菜	165	
	海ぶどう・清涼飲料水・食塩製造	50	
	青果物、健康補助食品	30	
	沖縄そば製造	0.1	
	ソデカ・もずく	使用水量未記載	・工業用水認知度が低い・末端消費者向けなので、殺菌の問題が不明
	フィルム包材	1335	機械設備使用量が少量のため
	飲食業	275	
非食品系	鉄スクラップ、古紙、収集・販売	200	
	コンクリート二次製品	180	使用する水量(水道料金)に比べて、工業用水導入経費(工事費)が高かった
	お菓子、民芸工芸品、衣類	170	
	電気工事業、土木工事業	167	
	液化石油ガス(LPG)	130	
	印刷用紙・紙器	110	
	印刷業	100	製品製造時に pH・伝導率の変動が影響を与えるため
	し尿、浄化槽汚泥	85.7	施行時に工業用水がなかったため
	詰衿学生服の製造	84	必要としていないから
	自動車整備	71	
	各種伝票類	50	
	業種未記載	50	
	化粧箱	49	
	汚水(生活排水・工業排水等)	45	場内浄水設備あり必要ないため
	一般貨物運送(建築資材運搬)	45	必要がない
	食材・日用雑貨保管、配送	45	
	リネンサービス	40	
	障害福祉サービス	40	
	資材販売	35	
	かりゆしウェア	35	
	ユニフォーム・学生服など	35	
	清涼飲料水	35	
	業種未記載	33	
	機械のメンテナンス	30	
	浄化槽	30	特に需要がない
	缶の製造販売、瓶等の仕入れ販売	30	多量の水を使用する必要がない
	自動販売機整備・パーツ洗浄等	30	
	パンフレット・冊子・伝票	25	工業用水の存在自体知らなかった
	土木・建築	18	必要としていないから
	自動車部品販売	18	弊社は工業用水を利用する業種ではありません
	業種未記載	15	水を使用しない
	木材・建築資材	15	
	業種未記載	13	手洗い、トイレにしか使用しないため
	リース、電気工事業	12.3	
	建築仕上材販売	12	
	ペビー用品	12	契約が会社主導であるため
	アルミ	11	
	アルミサッシ加工・製作	11	
	ガソリン販売	11	団地内に本社しかないから
	詰衿学生服の裁断	11	必要としていないから
	事務機器・サービス	10	手洗・トイレぐらいしか使用していないため。
	杉材等	10	仕事上、水を使用する機会はほとんどなく、飲料等での用途が多い
	LPGガス	9.5	
	鉄筋	9	
	ガラス製品	8	卸売業なので、特に業務上水を使用するわけではないから
	鋼材、異形鉄筋の販売	7	
	農業用農プラスチック	7	必要としないから
	照明機材賃貸	7	
	業種未記載	6	使用水量が少ないから
	印刷	6	
	空調、換気、ダクト	5	
	鉄鋼二次製品	4	製造等は行っておらず、工業用水を使用する目的がないため
	ペット餌・飼育用品、ホテル消耗品等	4	商品販売のための
	包装資材の製造・販売	3.5	必要がない
	琉球ガラス製品	3.5	
	葬祭用品全般	3	
	電気、通信工事	3	
	木材、金物	3	
	業種未記載	2	建設業のため工業用水は扱わない
	木材建具・家具製作	2	木材には工業用水使用はないと思う
	業種未記載	1	
	業種未記載		
	印刷物		営業所のみで工場は県外
	運輸業		
	業種未記載		
	施工管理、設計、埋蔵文化財調査		業務上必要としていないため
	タクシー事業		
	イベント事業		使用量が少ないため
	建設機械等		

表 A4.2 工業用水未利用企業の再生水の利用可否とその理由

分類	取扱製品・サービス	水道水使用量(m³/月)	再生水の利用可否	再生水を使用しない理由
食品系	健康食品製造・販売	3600	1	
	弁当、冷凍食品、レトルト食品	2000	3	
	魚全般	800	2	
	加工黒糖	300	1	
	食肉加工	207	3	
	練製品製造業	200	1	
	惣菜	165	1	
	海ぶどう・清涼飲料水・食塩製造	50	1	
	青果物、健康補助食品	30	1	
	沖縄そば製造	0.1	3	
	ソデイカ・もずく	使用水量未記載	2	
非食品系	フィルム包材	1335	1	
	飲食業	275	1	
	鉄スクラップ、古紙、収集・販売	200	3	
	コンクリート二次製品	180	4	水道水で十分で、新たな設備を設置した場合、管理等で人員が割かれるから
	お菓子、民芸工芸品、衣類	170	2	
	電気工事業、土木工事業	167	4	使用水量が少ないから
	液化石油ガス(LPG)	130	3	
	印刷用紙・紙器	110	1	
	印刷業	100	2	
	し尿、浄化槽汚泥	85.7	4	無償であれば施設の希釈水として活用してみたい
	詰衿学生服の製造	84	1	
	自動車整備	71	2	
	各種伝票類	50	4	
	業種未記載	50	4	必要ないから
	化粧箱	49	1	
	汚水(生活排水・工業排水等)	45	4	場内浄水設備あり必要ないため
	一般貨物運送(建築資材運搬)	45	未記載	
	食材・日用雑貨保管、配送	45	2	
	リネンサービス	40	3	
	障害福祉サービス	40	1	
	資材販売	35	2	
	かりゆしウェア	35	1	
	ユニフォーム・学生服など	35	1	
	清涼飲料水	35	1	
	業種未記載	33	1	
	機械のメンテナンス	30	未記載	
	浄化槽	30	4	
	缶の製造販売、瓶等の仕入れ販売	30	1	
	自動販売機整備・パーツ洗浄等	30	2	
	パンフレット・冊子・伝票	25	1	
	土木・建築	18	4	必要ないから
	自動車部品販売	18	1	
	業種未記載	15	1	
	木材・建築資材	15	1	
	業種未記載	13	3	
	リース、電気工事業	12.3	4	使用水量が少ないから
	建築仕上材販売	12	4	
	ベビー用品	12	4	本部が契約を見直せば検討する
	アルミ	11	1	
	アルミサッシ加工・製作	11	3	
	ガソリン販売	11	4	
	詰衿学生服の裁断	11	1	
	事務機器・サービス	10	4	使用水量が少ないから
	杉材等	10	4	安全なことを証明できれば使用を検討する
	LPガス	9.5	1	
	鉄筋	9	1	
	ガラス製品	8	1	
	鋼材、異形鉄筋の販売	7	1	
	農業用廃プラスチック	7	1	
	照明機材賃貸	7	4	使用水量が少ないから
	業種未記載	6	1	
	印刷	6	1	
	空調、換気、ダクト	5	2	
	鉄鋼二次製品	4	1	
	ペット餌・飼育用品、ホテル消耗品等	4	未記載	
	包装資材の製造・販売	3.5	4	使用水量が少ないから
	琉球ガラス製品	3.5	1	
	葬祭用品全般	3	2	
	電気、通信工事	3	4	必要ないから
	木材、金物	3	2	
	業種未記載	2	4	使用水量が少ないから
	木材建具・家具製作	2	4	閉鎖予定のため
	業種未記載	1	4	使用水量が少ないから
	業種未記載		1	
	印刷物		4	必要ないから
	運輸業		2	
	業種未記載		4	雨水があるため必要ないから
	施工管理、設計、埋蔵文化財調査		4	
	タクシー事業		1	
	イベント業		3	
	建設機械等		3	