

海洋深層水由来の淡水の水道事業適用に関する考察

On application of freshwater water supply business derived from deep ocean water

岩崎誠二¹・久保将太²・柳田幸嗣³

Seiji IWASAKI, Shouta KUBO and Yukitsugu YANAGIDA

Abstract

Application of desalination technology for deep ocean water (hereinafter, DOW) to the tap water supply business has been verified. DOW is advantageous for desalination because it has less suspended solids and less chlorine consumption than surface seawater (hereinafter, SOW). In addition, the amount of DOW is huge compared to the water available on land (river water, lake water, etc.) used in most of the current tap water systems. In addition, the water temperature and quality of DOW are stable, and its water quality is extremely clean as well as no restriction of water rights for using. Possible disadvantages are locations where DOW can be taken are generally far from urban areas, which are large-scale consumption areas, and the cost of desalination of DOW is higher than that of current tap water cleaning process using river and reservoir waters. However, the cost difference is narrowing with the progress of technology, and it is presumed that the cost will be further reduced if freshwater production is used as a by-product of ocean thermal energy conversion. Accordingly, it is considered that DOW desalination technology can greatly contribute to solving various problems of water treatments in the current tap water supply business.

Key Words: Deep Ocean Water, Seawater Desalination, Water Supply, Chlorine Consumption

要 旨

海洋深層水（以下、深層水）の淡水化技術の水道事業適用に関する妥当性を検証した。深層水は表層の海水（以下、表層水）と比較して浮遊懸濁物質が少ない、塩素消費量が小さい等、淡水化処理が有利である。また、現状の大多数の水道事業で使用されている陸水（河川水、湖沼水等）由来の原水と比較して水量が豊富であり、水温、水質が安定、水質は良好極めて清浄である上、水利権等取水にかかる制限も少ない。一方、深層水の取水可能な場所は大規模消費地である都市部からは一般に遠く、また海水淡水化にかかるコストが河川水等の浄化方法と比較して割高である。しかしながら技術の進展に伴いコストの差は縮まっており、海洋温度差発電の副産物としての淡水製造であればコストはさらに低減することが推察される。以上から、深層水淡水化技術は現在の水道事業が抱える水処理の諸問題解決への寄与が期待できる。

キーワード：海洋深層水、海水淡水化、水道事業、塩素消費量

1. 緒 言

海水の淡水化による水道水の供給は、降雨量が少ない地域や自己水源に乏しい島嶼等で広く適用され

ている（国土交通省、2021；金城、1999；平井、2001；小西、1972；竹内、1991）。淡水化の方法は、スプレーフラッシュ蒸発法（以下、SFED法）、逆浸透膜法（以下、RO膜法）、電気透析法が代表的で、その

¹ 三重大学生物資源学研究所（〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577）

² 尾鷲市商工観光課（〒519-3696 三重県尾鷲市中央町10-43）

³ みえ尾鷲海洋深層水アクアステーション（〒519-3922 三重県尾鷲市古江町806）

他LNG冷熱利用法、透過気化法がある(国土交通省, 2021)。水道事業として国内で稼働中の生活用水供給用淡水化プラント39件中、RO膜法29件、電気透析法10件であり、RO膜法は福岡県、沖縄県にそれぞれ5万 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ 、4万 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ 規模の設備があるほかは大部分が1000 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ 以下の小規模な設備である(国土交通省, 2021)。一方で「メガトンウォーターシステム」研究において、RO膜法による100万 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ 規模の淡水の製造が実証されている(早津ら2015; 栗原ら2015)。当該研究により、海水の淡水化におけるエネルギー、コストの大幅な縮減が示された。

世界の人口の急激な増加及び生活レベルの向上に伴い、食料生産、生活に必要な水需要は向上するが、水資源量には限界があるため、世界的な水資源の枯渇が懸念される(山脇, 2001)。我が国でも近年の異常気象に伴う渇水及び異常降雨により陸水の供給が不安定となり、水道水のほか工業用水、農業用水等にも影響が及ぶ恐れがある。これらの気候変動リスクへの対応するため、産業用水供給についても海水の淡水化を考慮する必要がある。

一方水道水源の汚染事故による被害は2021年度でも229件発生している(厚生労働省, 2022)。これらの汚染物質は通常の浄水方法では容易に取り除くことができないため、水処理時に薬品等の使用、場合により取水・給水停止が必要である。この他にも水源の富栄養化による異臭味発生被害も118件発生している(厚生労働省, 2022)。さらに、近年問題となっている浄水処理困難物質、すなわち原水中では汚染物質ではないが浄水処理により有害物質に変化する(たとえばヘキサメチレンテトラミンそのものは水道水質基準項目ではないが、浄水場の塩素処理で有害物質の基準項目であるホルムアルデヒドに変換される)への対応も必要となってきた。このように、河川、湖沼、地下水等陸水の水源水質の状況は年々悪化をたどっている。上記の海水淡水化に関する研究結果は、これらの水源汚染対応及び水道水源の安定確保の解決策として期待できる。

海洋深層水(以下、深層水)を水源とした淡水化は、全国15カ所の深層水取水地点のうち10カ所で

実施されている。高橋は、世界的な淡水需要増加への対応策の一つが海水淡水化であり、その原水としては清浄な海洋深層水が適していることを指摘している(高橋, 2019, 2021)。

水道事業における政策課題及び具体的な施策等は、厚生労働省により公表された新水道ビジョン(厚生労働省, 2013)に明示されている。新水道ビジョンでは、これまで国民の生活や経済活動を支えてきた水道の恩恵を100年先まで享受するために水道の理想像の明示、その理想像の具現化を目指して当面の間に取り組むべき事項、方策を、提示している。

本研究では、筆者らの塩素消費量を用いた深層水淡水化技術の評価に関する既報、その他海水淡水化、深層水の水質等の文献から深層水の淡水化技術の特徴を現在大部分の水道事業体で使用されている陸水を水源とした浄水技術(以下、現行法という)と比較した。さらにこれらの深層水淡水化技術の特徴が、水道事業への適合性を有しているかに関して、新水道ビジョンを軸として考察を試みた。

2. 結果・考察

2.1 塩素消費量を指標とした深層水由来淡水の水質評価

a) 水質項目としての塩素消費量

塩素消費量とは、ある水試料に塩素を加えたとき、当該水試料によって分解、消費された塩素量である(日本水道協会, 2001)。塩素消費量の値が低いほど水道水として良好であると考えられている。我が国の水道水は一般に急速ろ過法で河川水・ダム湖水を大量処理して得られている。従来法の中でも代表的な浄水技術である急速ろ過法の水道システムフローは図1のとおりである。水道水の水処理で塩素処理を行う目的は、①処理設備での藻類生育防止 ②鉄、マンガンの酸化除去 ③給水末端(蛇口)の水を、遊離残留塩素を 0.1mg L^{-1} 以上に保持する義務(水道法)の3点である。それゆえ、各工程で加えた塩素を消費してしまう水は、水道水として好ましくない。その原因物質は、河川水ではアンモニア

設備名	河川・ダム湖	→	浄水場 着水井	→	薬品混和池	→	フロック形成池	→
浄水機能	原水貯留		原水受入		原水薬品処理		原水に含まれる浮遊物質を凝集・フロック形成	
使用薬品					前塩素*・凝集剤**			
設備名	沈殿池	→	急速ろ過池	→	浄水池	→	配水池	→ ユーザー
浄水機能	フロック沈殿除去		砂ろ過		浄水塩素滅菌・貯留		状況により追加塩素	
使用薬品	中間塩素*		1 μ m粒子除去		後塩素*		追加塩素*	

*前塩素、中間塩素、後塩素、追加塩素：次亜塩素酸ナトリウムとして加える

**凝集剤：ポリ塩化アルミニウム(PAC)

図1 一般的な水道水浄水工程（急速ろ過法）

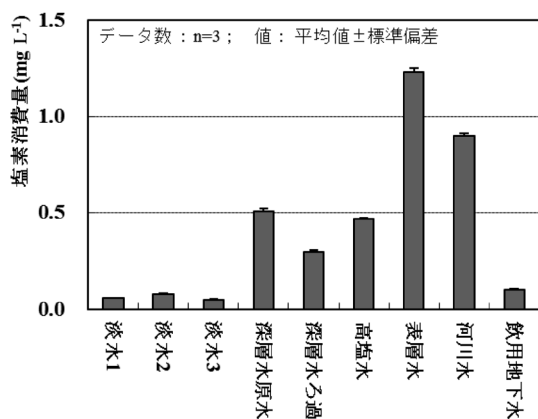


図2 深層水及び淡水化処理水等の塩素消費量

性窒素の寄与が最も大きく、その他プランクトン等の有機物、浮遊物質や金属類がある（日本水道協会、2001）。筆者は環境モニタリングの一環として海水の塩素消費量も測定しているが、外洋に近い海域ではアンモニア性窒素は低いことが多いため、プランクトンや浮遊物質がその要因であった（岩崎、2012）。清澄な河川水では塩素消費量は0.5-1 mg L⁻¹程度、外洋に近い比較的清澄な海水では1 mg L⁻¹程度、良質の地下水では0.1 mg L⁻¹を下回ることもある。図2に示した深層水原水の塩素消費量は、微細な粒子状の有機物等が考えられる。表層水の塩素消費量は深層水より高く、プランクトン及び陸水由来の有機物等が要因と考えられる。

塩素消費量の試験方法は、既報（岩崎、2011）に従っている。すなわち溶存酸素測定用のフランビン（102 mL）に、深層水等の試料（繰返し数 $n=3$ ）を満

たし、一度密栓をして栓を取り、有効塩素量を約 100 mg L⁻¹に希釈した次亜塩素酸ナトリウム溶液適量（1-3 mL）を正確に加え、再び栓をして、ビンを数回逆さまに振り、試薬をかくはんする。本検体を、20℃で4時間静置したのち、有効塩素量（C）を測定する。別に蒸留水を用いて同処理を行い、かくはん直後の有効塩素量（C₀）を測定、C₀-Cを、当該検体の塩素消費量とする。なお、有効塩素量は、ポケット残留塩素濃度計58700-00（HACH社製）にて測定しているが、これは小規模水道事業者でも普通に保有している機器であり、化学分析の専門家でも容易に扱うことができる。すなわち塩素消費量は水質項目の中でも誰でも簡単に分析可能な項目であると言える。

b) 海洋深層水の塩素消費量

筆者は既報（岩崎、2011）で深層水原水、工程水及び浄水（淡水）の塩素消費量を測定している。その概要は次のとおりである。深層水原水及び各種処理水は、三重県尾鷲市の深層水取水施設アクアステーション（当該施設から約7 km沖、水深415 m）取水施設で採取した（深層水原水）。各種処理水の試料は深層水原水を孔径数 μ mフィルタでろ過した深層水ろ過水、深層水ろ過水をRO膜処理した淡水（淡水3）及び淡水化処理でRO膜に残留した部分の高塩水を用いた。表層水は、尾鷲市同施設前（賀田湾内）で採取した。また、淡水の清浄性比較のために日本海側の深層水取水施設※（石川県能登町あくあ

す能登及び富山県入善町入善海洋深層水活用施設)においてRO膜法で製造している淡水2種類(淡水1, 2)も使用した。陸水由来の塩素消費量と比較するため、飲用の地下水として三重県鳥羽市岩倉町鳥羽市水源地の浅井戸水、河川水は三重県宮川の公共用水域常時監視点(玉城町岩出(河川類型AA:簡易なる過操作で浄水可))を使用している。

その測定結果は図2のとおりであった。淡水1, 2は日本海側の施設、淡水3は、尾鷲市アクアステーション由来である。塩素消費量は $0.05\text{--}0.08\text{ mg L}^{-1}$ であった。深層水の淡水化は、孔径数 μm のろ過膜による前処理、RO膜処理の順で行われる。深層水原水は 0.5 mg L^{-1} 、ろ過水は 0.3 mg L^{-1} であり、アクアステーションの場合、塩素消費量は原水のろ過処理で 0.2 mg L^{-1} 相当、ろ過水の淡水化処理で 0.25 mg L^{-1} 相当それぞれ除去されたことになる。また表層水は 1.2 mg L^{-1} であった。また、ろ過水のRO膜処理では、淡水と濃縮水に分離されるが、高塩水 0.5 mg L^{-1} 、ろ過水 0.3 mg L^{-1} 、淡水 0.1 mg L^{-1} で、高塩水と淡水の塩素消費量の濃度平均値は、ろ過水の値と等しい値であった。すなわち、ろ過水の塩素消費量成分が高塩水側に多く残留し、淡水側は除去されていることがわかる。

2.2 海水淡水化による水道水供給の特性

緒言で述べたとおり、海水の淡水化はわが国では自己水源に乏しい島嶼や、降雨量が少ない地域等、水源を安定的に確保することが困難な地域で使用されてきた(国土交通省, 2021)。例えば南西諸島のサンゴ礁隆起の島嶼では、地表面が石灰岩であり、雨水が降雨と同時に浸透するため河川が存在しない(岩崎, 2005, 2015)。そのため水道事業による水道水の供給が普及する以前は、雨水を水ガメに貯留して使用するほか、干ばつ時には他島からの運搬も行われていた(琉球列島米国高等弁務官府出版物, 1971; 竹富町, 1975; 国立民俗博物館, 1999)。そのような経緯から、海水の淡水化技術は安定水源が得られない地域における代替的措置である。

水道水浄水技術では現行法は、河川水(ダム湖)、伏流水、湖沼水をろ過する方法、地下水をそのまま

利用する方法があり、その他稀に雨水の利用がある。陸水のろ過には急速ろ過法、緩速ろ過法、膜ろ過法がある。急速ろ過法は、原水にポリ塩化アルミニウム等の凝集剤を加えて濁質成分を沈殿除去して砂ろ過を行う。この方法はろ過速度が $120\text{--}150\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ と速いため大規模な施設の建設が可能であり、 $100\text{万 m}^3\text{ d}^{-1}$ を上回る浄水場もある。緩速ろ過法は砂ろ過材を用いて濁質成分を除去するとともにろ過材表面に生成した生物膜により有機成分等を除去する。ろ過速度は $4\text{--}5\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ であり、郡部の簡易水道等小規模な水道事業によく見られる。膜ろ過法はろ過膜ろ材を容器に収め膜モジュールとして原水のろ過に使用する方式で、除去対象物質により精密ろ過法、限外ろ過法等があり、RO膜法もその一つである。濁質の高い原水には適さず、前処理が必要である。浄水場の水源は水量では河川水が圧倒的に多いが、河川水の問題として水量の不安定、水質の変動、有害物質による汚染、降雨による濁水、カビ臭等異臭味の発生、水利権に伴う取水制限などがある。高濁度であっても急速ろ過法であれば除去は可能だが、有害物質及び異臭味は除去が困難である。その場合、オゾン、活性炭等高度処理が必要であるがその分造水コストは上昇する。海水ではこれらの問題は少ないが、内湾、陸に近い海域の海水では河川の濁水が流入するなど陸水の影響を受けやすく、通常運転でも急速ろ過法と同じ凝集沈殿と砂ろ過を行っている。

水道事業運営において浄水場の運転管理コストは重要事項の一つである。コスト試算には維持管理費単独の場合、建設費を含む場合等様々な方法があるため一概に比較はできないが、維持管理費は日本水道協会の資料では全国の水道の平均値で 1 m^3 当たり 167.57円 (日本水道協会, 2021)、一方海水淡水化では沖縄県5か所の離島における実績では平均 590円 であった(金城, 1999)。また、国土交通省の資料では沖縄県の 4万 m^3 規模の設備で、ダム方式と海水淡水化方式のコスト比較では、 1 m^3 当たりダム方式: 268円 (イニシャルコスト 180円 、ランニングコスト 88円)、海水淡水化方式: 499円 (同 361円 、 138円)であった(国土交通省2015)。試算方法により差

異はあるものの、海水淡水化と陸水では2倍近い開きがある。その反面陸水の造水でも都市部のように原水の水質が悪く高度処理が必要である場合維持管理費が3割以上となる場合もある。「メガトンウォータープロジェクト」の成果では、維持管理費は従前の海水淡水化技術のおおよそ1/2に低減できる目途を立てている(栗原, 2015)。エネルギー消費量では、RO膜処理の低エネルギー化が進んでいるとともに、近年の研究成果では高濃度海水からの濃度差発電等によりエネルギーを回収することが報告されている(比嘉, 2019)。このように海水淡水化は現行法とのコストは縮む傾向にはあるものの、陸水の造水においても低コスト電気機器や、小水力発電によるエネルギー回収技術が開発されるなど、省エネルギー化、コスト削減が試みられているので、海水淡水化もエネルギー、コスト縮減に向けてさらなる技術開発が必要である。

その他、海水の淡水化の特徴としては原水が無尽蔵にあり取水時に法的な制約が存在しないこと、水源確保にダムなど大規模な施設が不要であること、浄水設備の敷地面積が小さいことがある。

2.3 水道水源としての深層水の特性(水質面)

深層水由来の淡水は、その原水の清澄・深淵なイメージにより飲用水として広く流通・販売されている。深層水の清澄、低温、安定という特徴は、飲用水の原水としては好ましい性質である。また深層水は放射性物質等による汚染のおそれに関しても表層水と比較して格段に安全と考えられている(高橋, 2011)。

このように深層水は淡水化の原水としては表層水と比較して優れた部分が多いと考えられるので、深層水の大量消費用途として水産、発電に次いで今後水道事業への適用も期待できる(高橋, 2019, 2021)。

表層水を淡水化する場合、2.2節で述べた凝集沈殿、砂ろ過の前処理が加わる。深層水の場合、取水後簡易ろ過を経てRO膜処理となるため、この部分は建設、維持管理とも表層水の淡水化と比較してコストダウンとなる。

表層水を原水とするRO膜法の淡水の製造では、

海水取水タンクの生物増殖を防ぐため、次亜塩素酸ナトリウムを添加している。これが高濃度塩水に残留してそのままでは海域に放流できず別途処理が必要である。深層水は水温が低く、細菌数等生物の生存量が少ないこともあり、現状の深層水淡水化設備では次亜塩素酸ナトリウム処理は行われていない。処理を行うと仮定しても深層水の塩素消費量は表層水の1/2以下であるから(図2)、次亜塩素酸ナトリウムの量も1/2以下である。したがって、次亜塩素酸ナトリウムの残留量が少ないばかりでなく、塩素処理により生成する有害物質であるトリハロメタンを抑えることもできる。筆者の調査では、深層水のトリハロメタン生成能すなわち同じ次亜塩素酸ナトリウムを加えた時に生成するトリハロメタンの量が表層水の2-4割であった(岩崎, 2011)。トリハロメタンの中でも海水の塩素処理で生成するブロモホルムはRO膜で99%以上除去されることが報告されているが(栗原・房岡, 1996)、処理前の原水の段階からトリハロメタンが含まれていない方がRO膜への負荷の低減等水処理上好ましいことは言うまでもない。また深層水は、 $0.45\mu\text{m}$ ろ過による浮遊物質が表層水の14%程度の 0.5 mg L^{-1} 以下、またろ過速度係数も3分の1以下と小さく、変動も少ない。したがって深層水の利用は、ろ過時間、ろ過材の耐久性双方に大きなメリットがある(菅野ら, 2008)。その他、浮遊物質が少ない海水を得る方法として海水井戸及び海底取水がある。海水井戸は地表面から汚染の可能性、海底井戸も工事が大掛かりとなる問題があるが、取水場所の制限が少ないなどの利点もある(林, 2017)。

一方深層水の水道原水としての短所は水質面ではホウ素濃度が高く、従前はRO法でも十分に除去できず、水道水質基準(0.5 mg L^{-1})を上回る恐れがあったが、これは近年の膜技術の進歩により克服されつつある(芹澤, 2009; 伊吹・川北, 2011)。

水道施設の浄水工程で加えられた塩素は、送水中に徐々に低減する。これは水道水に塩素消費量物質が含まれること及び貯水池等貯留時の揮散が主な原因である。そのため送水途中で塩素の追加設備を設置して追加塩素を行い、塩素の低減を防ぐこともあ

る。深層水由来淡水の塩素消費量は小さいので水道水の配水における配管や配水池で塩素が長時間保持されることとなる。清浄な水道水といえども長期間の配水では管路に汚れが付着するので定期的な洗管が必要である。洗管作業には膨大な人員と時間がかかるが、水質が良ければ洗管の頻度は小さい。以上から、原水、浄水の水質が良好であれば浄水工程の作業量、経費の節減が可能となる。

2.4 水道水源としての深層水の特性（設備面）

水道水原水の水源確保は水道事業における大きな課題であり、法律、規則に関する制約が意外に大きい。水道水源は現在大部分が陸水であるが、河川、ダム湖では河川法に基づく水利権が存在しており、地下水には地域によりくみ上げの許可が必要である。水利権による取水に伴う義務としては、ダム水を使用する場合建設、維持管理分担金、取水量、堰高さ等取水諸元データのダム管理者への報告、災害時の待機等多岐にわたる。

一方海水の使用は、海岸法では取水施設など工作物の設置に制限があるが、取水、使用に関しては特に規制はない。これらの点は水道施設の維持管理上、経費、労力の面から有利である。

現在の海水淡水化設備は陸水の浄水場と比較すると小規模であるが、メガトンウォータープロジェクトでは日間 $100\text{万}\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 以上の造水規模も視野に入れている（栗原ら、2015）。2020年の東京都の日平均の水道水使用量は $472\text{万}\text{m}^3\text{d}^{-1}$ であり、都市部には $100\text{万}\text{m}^3\text{d}^{-1}$ を上回る浄水場も少なくない。国内最大は大阪広域水道企業団の村野浄水場（ $179\text{万}\text{m}^3\text{d}^{-1}$ ）であるが、近年の水道事業では巨大な浄水施設は更新時等の一時給水停止及び事故災害等危機管理上問題であるため、ダウンサイジングの傾向にある。したがって、深層水を淡水化して水道事業に使用する場合には、淡水化の設備規模に関しては現状の技術で十分である。

そのほかに深層水利用を水道事業に適用する際の問題点としては、原水取水に必要である水深200–300 m以上の海域が大都市圏からは50–100 km以上、また内陸地域からはさらに遠いことが考えられる。

しかしながら現在の水道事業においても原水取水～配水の管路総延長が100 kmを超えることは珍しいことではない。水源水量が豊富で安定であること、取水・浄水設備が小規模である等建設、維持管理上の利点を併せて、深層水の淡水化による水道事業が普及することでさらに技術の進展、経費節減が図られれば、水道事業体に深層水淡水化技術が徐々に普及する可能性がある。

2.5 SFED法の適用

本法は深層水そのものを淡水化するのではなく、深層水と表層水を利用した温度差発電（OTEC）から淡水を得るもので、淡水化される海水は表層水である。本報文は深層水由来の淡水に関し考察しているが、OTECにかかるSFED法は深層水を利用しているもので、少しふれておきたい。

SFED法は、現在の水道事業では使用されておらず水道事業としては1967年長崎県池島に建設された多段蒸発法の設備が国内唯一の例となっている。池島は炭鉱の島であり、本設備も石炭エネルギーを動力としていたが（竹内ら、1991）炭鉱は2001年に閉山されている。国土交通省の資料では当該設備は2008年までは掲載されていたが、閉山後の稼働実体等は不明である（国土交通省、2008）。

深層水を利用したOTECでは発電と同時に本法により淡水製造を行う複合利用が可能である（古屋、2008; 大内、2012; 浦田、2021）。この場合の淡水は発電の副生成物でもあるので、製造コストは非常に低い（有馬ら、2017, 2019）。OTECは表層水と深層水の海水温の温度差が 20°C 以上必要であるため、適用可能である地域は国内では南西諸島等に限定されている。OTECは海上浮遊設備による複合利用の構想もあり、電気と水道インフラの同時供給は、交通不便地や島嶼の多い地域では特に有用と考えられている（大内、2012）。

当該技術による淡水化を水道事業として適用するにあたり、留意すべき点として原虫クリプトスポリジウム対策が考えられる。水道事業では、飲用水に含まれた原虫クリプトスポリジウムによる食中毒が1990年代に各国で発生したことを受け厚生労働省が

ら「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」(厚生労働省, 2007)が示された。この中で原水から大腸菌等のクリプトスポリジウム指標菌が検出された河川水、湖沼水は、「レベル4」として浄水濁度0.1度以下にできるろ過設備(砂ろ過、膜ろ過など)が必要であるが、海水が原水である場合の規定が見当たらない。RO膜法の場合、RO膜自身及び前処理ですでにろ過処理が行われているので、指針のろ過設備の規定は満たしている。SFED法の場合は表層水が原水であり、表層水からは指標菌が検出されることが多い。すなわち、SFED法は淡水化の海水フラッシュ時に淡水側にクリプトスポリジウムが取り込まれる恐れが想定されるので、後処理として簡易なろ過が必要となる可能性がある。

2.6 深層水由来の淡水の災害時の有用性

深層水はその存在量・水質とも安定していることから、深層水由来の淡水の供給は災害対応にも有用と考えられる。一般に深層水取水には200 m以上の水深が必要であり、取水地点から陸までの距離が近い方が有利であるため、取水位置は溺れ谷の地形が適する。そのような地形の地域は平地が少ない交通不便地となる傾向がある。このような地域では水道水源は豊富であることが多いが、多雨による土砂災害に伴う水源の高濁度化で水処理が困難となる。また、交通、水道管路の寸断等が発生して水の供給が寸断されることもある。例えば尾鷲市を含む三重県南部地域は全国有数の多雨地帯で、当該地域全体で過去15年に2度土砂災害などで大規模な断水が発生している(岩崎, 2006)。尾鷲市以外の周辺自治体では、他の水道事業体から応急給水が必要であった。これに対し深層水の水量・水質は降雨により変動しないので、津波災害等は別にして、淡水化設備が無事であれば淡水は災害時にも供給可能である。アクアステーションの淡水製造能力は1日3.6 m³に対し、当該設備のある賀田湾沿岸の人口は約1700人なので一人当たり2.1 L d⁻¹である。「水道の耐震化計画等策定指針」(厚生労働省, 2015)では、非常時に必要な飲用水は、一人1日当たり3 Lとされていること及び医療用その他の用途でも必要なので災害時

の十分な量とはいえないが、良質な淡水が災害地域において連続的に供給されることは大変心強い。淡水水源が乏しい地域における可搬式淡水装置による給水支援の例ではRO膜ろ過器により最大35 m³ d⁻¹の造水を行った事例もある(出口ら2013)。全国10カ所の深層水由来淡水の製造可能な地点ではすでに災害時の淡水としての使用を想定していると考えられるが、その他の淡水を製造していない取水地点もすでに良質な海水淡水化原水すなわち深層水が常時取水できる状態にある。当該地域においても移動式淡水化設備を使用することにより、災害時に良質な淡水を得るポテンシャルがある。

3. 結 論

緒論で述べたとおり我が国の水道事業は新水道ビジョンを基本方針として進められている。これは水道事業の将来を見据え、水道の理想像を明示した上で当面取り組むべき事項を「安全・強靱・持続」として提示したものである。したがって、深層水の淡水化技術の水道事業に対する適性を評価するためには、当該技術の新水道ビジョンに示す事項に対する適合性が一つの判断基準となる。

まず安全については、水道事業では浄水場の水質管理及び送配水時の水質の衛生確保が課題となる。そのために水道水質管理では場内及び送配水中の塩素の濃度は厳重にコントロールされている。深層水の淡水化の各工程における塩素消費量は原水～淡水を通じて他の水道水質よりも低いので、水道水の配水時に塩素が下がることがなく衛生上非常に優良である。また飲用水質基準値については国内の深層水の淡水ではすべて適合しているがこれは現行の水道事業も同様であり差はない。以上から、深層水の淡水化技術は水道事業においても安全性は現行法と同等かそれ以上に確保されると見込まれる。

水道事業でいう強靱とは自然災害等による被災を最小限にとどめ、被災した場合であっても、迅速に復旧できるしなやかな水道である。すなわち設備の強度に加え、被災した際の復旧のための体制、事業継続のための代替え措置をも含む。深層水の淡水化

では設備の強度に関しては従来のRO膜ろ過設備と同じである。立地場所では深層水の場合は海域沿岸部とすると津波の被害のリスクは高く、土砂災害の場合には沿岸部は被害のリスクは低目である。また、水源の汚染事故では化学物質汚染、放射能汚染ともに深層水は陸水及び表層水と比較して格段にリスクは低いといえる。陸水と海水のように特性が全く異なる水源を持つことは水道事業体として強靱性が高まることになる。

水道事業の持続のためには事業費の安定も大切であるが、深層水を含め海水淡水化技術の最大の問題点として建設、維持管理のコスト高がある。技術の進歩に伴いその差は徐々に縮んでおり、また従来法であっても水源水質悪化等により高度処理を追加した場合には3割以上維持管理費が上昇する報告もあるが、コストが従来法に並ぶことは現時点では困難であると推測される。現実的な深層水淡水化技術の運用方法として、現行法の水源や浄水場が不調の際のバックアップ体制、補助的機能としての使用方法が考えられる。このような使用方法であれば全体のコストに与える影響は小さくなり、深層水淡水化の必要性が高い事業体では容認できない差でもなることも考えられる。福岡県では水不足に悩まされ続けたため2005年に海の中道奈多海水淡水化センター(愛称:まみずピア)を立ち上げ、 $5\text{万m}^3\text{d}^{-1}$ の淡水化施設を稼働させており、渇水時であっても給水制限を行うことなく十分なバックアップが取れるとされている(林, 2007)。当該施設稼働の費用便益は渇水被害を上回ると試算されている(後ら, 2017)。また深層水水源量が無尽蔵で水温、水質の安定性が高いこと、取水に係る法的制限が存在しないこと、これに伴う機器や職員への負担が軽減されることがあり、これらの点は持続性の要素として現行法には存在しない事項である。

以上、新水道ビジョンの視点で深層水淡水化技術の水道事業への適用を考察する限り、コストの問題は依然大きい、事業体の事情からコストを容認しなければならぬ場合もある。そのため、水道事業体としては水道水供給安定の一手段として部分的な利用・運用が適切であると考えられる。深層水淡水

化の現状は現在の水道事業体にはほとんど知られておらず、従って、水道事業の計画に話題になることは難しい。今後は深層水の技術、研究者等の関係者が水道関係者その他に広く深層水の利点を広報して、地球上の最後資源とまで言われている深層水を我々の身近な生活物資である水道水に適用していくことを目指したい。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、公益財団法人日本科学協会会長の高橋正征先生には執筆の奨励から論文の内容に至るまで有益な助言をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 有馬博史・稲富諒・松田昇一(2017)久米島海洋深層水を利用した海水淡水化用プレート式熱交換器の伝熱性能に関する研究. 海洋深層水研究, 18(1), 8-17.
- 有馬博史・松田昇一・重永裕大(2019)久米島海洋深層水を利用した海水淡水化装置用凝縮器の熱伝導に関する研究. 海洋深層水研究第23回全国大会(鹿児島大会)講演要旨, 20(1), 15.
- 出口美香・清水 亨・小平 卓・杉尾俊治(2013)可搬式海水淡水化装置による給水支援の課題と対策. ダム技術, 323, 58-62.
- 古屋温美・中泉昌光・矢本欽也・横山 純・黒澤馨・長野 章・吉水 守(2008)海洋深層水利用による地域振興策とその評価. 海洋深層水研究, 9(2), 89-97.
- 林 浩志(2017)漁港等における海水取水について.(一財)漁港漁場漁村総合研究所調査研究論文集, 28, 19-26.
- 早津昌樹・都築浩一・岸澤夏樹(2015)メガトンプロジェクトにおける大規模海水淡水化プラント向け低圧多段(2段)高収率ROシステムの開発. 膜(MEMBRANE), 40(2), 80-85.
- 比嘉 充(2019)特集「西日本の海水科学研究(8)」(総説)塩分濃度差エネルギー発電の原理と最近の技術動. 日本海水学会誌, 73(1), 396-401.
- 平井光芳(2001)小特集[世界の水不足と海水淡水化]—海水淡水化技術の現状とその将来. 日本海水学会誌, 55(3), 130-140.
- 伊吹 哲・川北浩久(2011)海洋深層水中のホウ素除去技術の確立. 高知県海洋深層水研究所報,

- 9, 19-22.
- 岩崎誠二・加藤 進 (2006) 宮川における台風21号 (平成16年) による長期間の濁流水の継続に関する調査. 水環境学会誌, 29(11), 749-754.
- 岩崎誠二・加藤 進・栗冠真紀子・栗冠和郎 (2011) 海洋深層水を原水とした飲用水の塩素要求量による水質評価. 海洋深層水研究, 12(2), 46.
- 岩崎誠二 (2012) 海洋深層水および深層水由来の淡水のトリハロメタン生成能. 海洋深層水研究第16回海洋深層水利用学会全国大会2012伊豆大島大会講演要旨, 13(2), 93.
- 岩崎誠二・加藤 進・栗冠真紀子・栗冠和郎 (2012) 塩素要求量の水質モニタリングへの適用. 第46回水環境学会年会講演要旨集, 176.
- 金城義信 (1999) 小特集「海水淡水化における逆浸透法の高圧化・高回収率化」水道水源としての海水淡水化施設の現状と今後の技術動向. 日本海水学会誌, 53(6), 432-439.
- 国土交通省 (2008) 平成20年版日本の水資源について～総合的水資源マネジメントへの転換～ 平成20年8月 国土交通省 土地・水資源局水資源部 日本の水資源 第Ⅲ編 日本の水資源と水需給の現況 第3章 水資源開発と水供給の現状 参考資料 (<https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/H20/3-3s.pdf>)
- 国土交通省 (2015) 第2回水マネジメント懇談会 (https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past-shinngikai/shinngikai/management/pdf_2/management04.pdf)
- 国土交通省 (2021) 水管理・国土保全局 水資源部 令和3年版日本の水資源の現況について 第3章 参考資料14-15 (<https://www.mlit.go.jp/mizukoku-do/mizsei/content/001371927.pdf>)
- 国立民俗博物館 (1999) 村が語る沖縄の歴史—歴史フォーラム「再発見・八重山の村」の記録—, 202-205.
- 小西泰次郎・野間泰二 (1972) 沖縄の水資源5. 八重山群島・黒島の水～離島における水問題と塩水の淡水化について～. 地質ニュース, (5) 14-28, 213.
- 厚生労働省 (2007) クリプトスポリジウム等対策について (<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kikikanri/01a.html>)
- 厚生労働省 (2013) 新水道ビジョン 平成25年3月 (<https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/newvision/newvision-all.pdf>)
- 厚生労働省 (2015) 水道の耐震化計画等策定指針 (<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000089462.pdf>)
- 厚生労働省 (2021) 水質汚染事故による水道の被害及び水道の異臭味被害状況について (<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000910286.pdf>)
- 栗原 優・房岡良成 (1996) 解説3. 海水淡水化技術の実際3.2.1 スパイラル型逆浸透モジュール1. 日本海水学会誌, 50(4), 240-245.
- 栗原 優・竹内 弘 (2015) 最先端研究開発支援プログラム「メガトンウォーターシステム」—21世紀型大規模水処理システムの開発—. 膜 (MEMBRANE), 40(2), 52-59.
- 日本水道協会 (2001) 上水道試験法 2001年版, 257-258.
- 日本水道協会 (2021) 水道資料室 日本の水道の現状 (<http://www.jwwa.or.jp/shiryuu/water/water.html>)
- 太田敬一 (2005) 特集「沿岸・浅海域の資源の有効活用を目指した技術開発」(資料) 造水技術および水利用—海水淡水化—. 日本海水学会誌, 59(6), 396-401.
- 大内一之・實原定幸・渡辺敬之 (2010) 離島のインフラとしての海洋深層水多角利用型洋上発電所の概念設計. 海洋深層水研究, 第15回全国大会 (伊豆大会) 講演要旨, 12(2), 95.
- 大内一之・實原定幸・渡辺敬之 (2012) 離島のインフラ生産のための海洋深層水複合利用洋上浮体施設. 海洋深層水研究, 13(1), 17-24.
- 琉球列島米国高等弁務官府出版物 (1971) 八重山住民を助ける住民活動. 守礼の光, 12, 4-7.
- 関野政昭 (1996) 解説3. 海水淡水化技術の実際 3.1 中空糸型逆浸透モジュール. 日本海水学会誌, 50(4), 231-239.
- 芹澤 暁 (2009) 特集「海水資源の有効利用を考える」海水淡水化技術の動向と課題. 日本海水学会誌, 63(1), 8-14.
- 菅野 敬・阿部祐子・奥田一雄・高橋正征 (2008) 高知県室戸沖の深度320 mから取水した海洋深層水の懸濁物質による清浄性評価. 海洋深層水研究, 9(1), 3-13.
- 高橋正征 (2011) 2011年度定期総会 原発事故の放射性物質による海洋深層水汚染の可能性. 海洋深層水研究, 12(1), 27-34.
- 高橋正征 (2019) 日本における海洋深層水の利活用の過去・現在・未来. 海洋深層水研究, 19(3), 149-157.
- 高橋正征 (2021) 海洋深層水の資源利用によるこれからの社会の方向～動物的社会から植物的社会へ～. 海洋深層水研究, 21(3), 61-67.
- 竹富町 (1975) 黒島, 新城海底水道名誉町民推挙資料 (黒島研究所蔵), 昭和50年2月.

- 竹内清文・田尻宏太郎(1991) 長崎県の離島における水資源と水利用—久賀島・赤島・黄島を例として—. 長崎大学教育学部社会科学論叢, 42, 1-12.
- 上原春男・Erich Stuhlträger・宮良明男・古賀 透・日野雅貴(1991) スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化に関する研究—ノズル形状の影響について—. 日本海水学会誌, 45(1), 16-21.
- 上原春男・中岡 勉(1999) 海洋温度差発電とスプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化の開発と展望. 日本海水学会誌, 53(1), 2-10.
- 上原春男(2008) 海洋温度差発電の新しい展望. 海洋深層水研究, 9(1), 21-30.
- 浦田和也・安永 健・池上康之・小見聡史・富賀見清彦・田中辰彦・鎌野 忠・石田雅照・大原順一・西田哲也・中岡 勉(2021) 久米島における海洋温度発電と海洋深層水複利用のための海洋調査. 海洋深層水研究, 22(2), 39-47.
- 山城保雄(2011) 第14回海洋深層水利用学会全国大会 特別シンポジウム 久米島における海洋温度差発電複利用事業計画について. 海洋深層水研究, 12(1), 19-22.
- 山脇道夫(2001) 一小特集 [世界の水不足と海水淡水化]—世界的な水不足問題への提言. 日本海水学会誌, 55(3), 119-121.

(2022年8月1日受付；2022年10月26日受理)