

〈特集〉

海外における環境技術としての造水技術の動向

大 熊 那 夫 紀

一般財団法人 造水促進センター

(〒103-0003 東京都中央区日本橋横山町4-5 E-mail: ohkuma@wrpc.jp)

概 要

造水技術は、水不足に対応する環境技術として、国内外で種々稼働している。造水技術の核となる技術は膜技術である。そこで、水道、海水淡水化や下水道の分野での膜技術の適用状況をまとめた。また、カーボンニュートラルに寄与する造水技術として、嫌気性 MBR, MABR, FO 膜技術, ZLD 技術の動向を紹介した。さらに、造水技術を用いた水再生ビジネスについて、中東や南アフリカでの事例を紹介する。最後に、日本が積極的に活動している TC282「水再利用」の国際標準化の概要を整理した。

キーワード：造水技術，膜技術，水再生ビジネス，水再利用，国際標準化

原稿受付 2022.12.25

EICA: 27(4) 42-47

1. 造水技術とは

都市の開発や人口の増加に伴う水不足は、世界各地で大きな社会問題となっている。毎年開催されているダボス会議ではグローバルリスクの中で水危機が各国の経済に大きなインパクトを与えうると報告している。世界の水需要は、OECD によると Fig. 1¹⁾に示すように 2000 年から 50 年で約 1.5 倍になると推計され、BRIICS 諸国の水需要が大きく伸びることが予想されている。この水需要を河川や地下水の在来水源で賄うことは困難で、非在来水源（海水、下水処理水、排水処理水など）を活用する必要がある。

そこで、我々は、非在来水源を有効に活用するための技術を造水技術（“Zosui” Technology）と呼んでい

る。造水技術を駆使して、水不足に対応するため、具体的には、海水淡水化や水の再利用が必須になり、そこには、膜処理技術の活躍の場があるといえる。また、カーボンニュートラルの観点から、環境技術として省エネ技術やエネルギー回収技術などでも膜技術は注目されており、ここでは、膜技術を中心とした造水技術の概要を紹介する。

2. 水環境における膜技術の市場

2.1 水道

水道分野への膜技術の適用は、1991 年からの MAC21 計画で始まった。それ以来、水道技術研究センターにより、種々の膜プロジェクトが継続的に実施

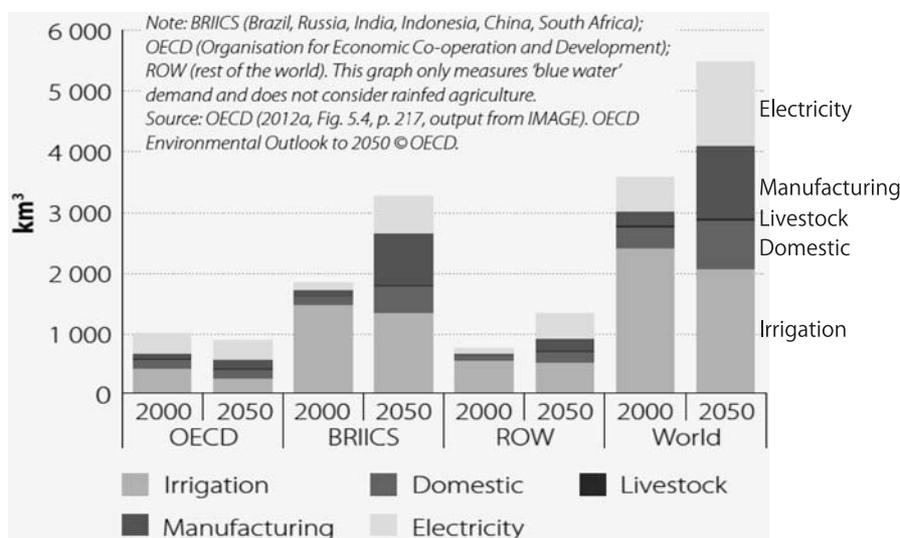


Fig. 1 Global water demand forecast

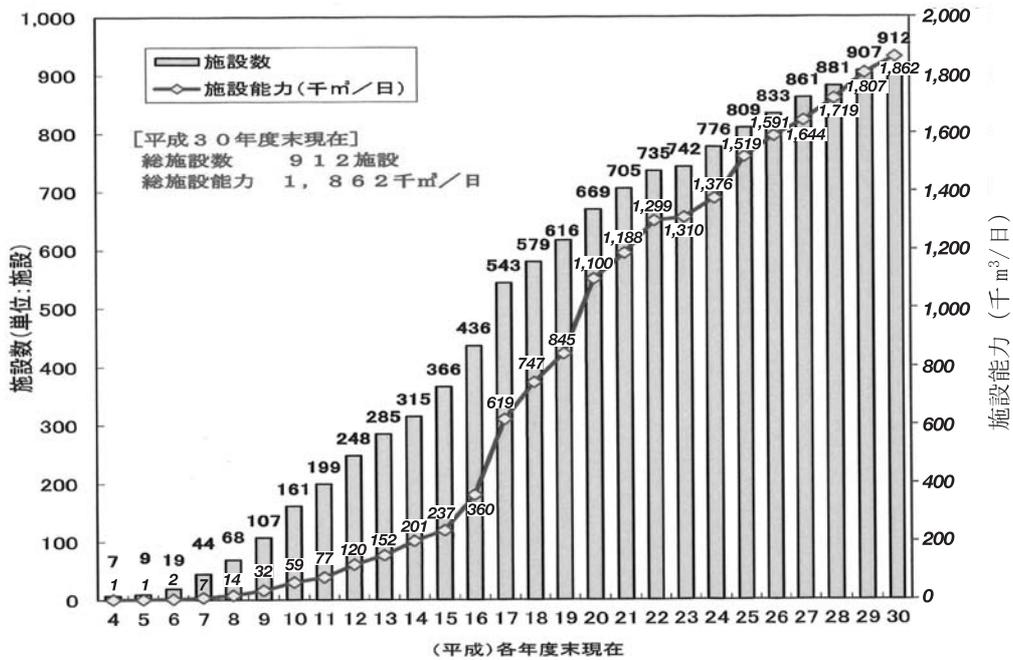


Fig. 2 Installation status of membrane filtration water treatment plant

され、現在では、900 か所を超える膜利用型浄水設備が稼働している²⁾。これを Fig. 2 に示す。最大の膜利用型浄水設備は、神奈川県の川井浄水場でセラミック膜を用いた 171,070 m³/d の処理規模を有している。日本における膜型浄水量は約 190 万 m³/d で日本の浄水量の約 2.5% が膜型浄水量による供給となっている。一方、世界では 4,000 万 m³/d 以上の膜型浄水場が稼働しており、最大の膜型浄水場は、アゼルバイジャンで稼働している処理能力 520,000 m³/d の設備である。

近年では、省エネ化を目指し、土地の高低差を活用した水位差運転の膜型浄水場が稼働している³⁾。また、海外において、日本製のセラミック膜の稼働⁴⁾も相次いでおり、2022 年には、世界最大の 210,000 m³/d が受注された。今後の展開が期待される。

2.2 海水淡水化

海水淡水化市場に占める技術の動向を Fig. 3 に示す⁵⁾。RO 膜技術は、膜性能の向上、エネルギー回収装置の開発などによる技術向上が顕著で、約 7 割が RO 法となっており、今後もシェアの拡大が予想される。中東では、発電設備と海水淡水化設備を組合せた IWPP (Independent Water and Power Producer) などでは、廃熱が利用できる場合には、蒸発法などが利用されるが、最近では、RO との組合せシステムが採用されることが多い。トリハイブリッド法などの組合せ技術でさらなる効率向上を目指した開発も行われている⁶⁾。RO 膜にける日本の膜メーカーのシェアは、約 50% で、日本の膜技術の高さがうかがわれる。

我が国における海水淡水化技術開発の最近の大型開発プロジェクトとしては、栗原氏 (東レ株式会社フェ

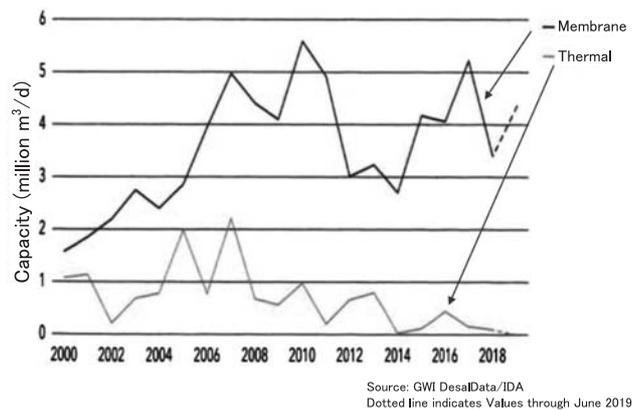


Fig. 3 Technological Trends in the Seawater Desalination Market

ロー) を中心研究者とする通称メガトンプロジェクトがある。最先端研究開発支援プログラムの一環で、「Mega-ton Water System」⁷⁾として、11 大学、18 企業、2 機関で 2009 年から 2013 年にかけて実施された。省エネルギー、低環境負荷、低コストに配慮した「100 万 m³/d 規模の海水淡水化システム」を最終的な成果と位置づけている。本プロジェクトの次のステップとして、サウジアラビアで実証実験が始まった。現在、1 万 m³/d 規模の実証設備を建設中である。

2.3 下水道

下水道分野では、下水処理水の再利用が活発に行われている。国内では、福岡や東京などの広域雑用水道やビルの中水道などが進められている。世界では、クウェートのスレイビアやシンガポールの NEWater は有名である。これらは下水処理水を UF 膜処理後、RO 膜で処理している。クウェートでは灌漑用水に、

Table 1 MBR wastewater treatment plants in the world

Installation	Location	Technology supplier	(Expected) Commissioning date	PDF (MLD)	ADF (MLD)
Tuas Water Reclamation Plant	Singapore	TBC	2025	1200	800
Beihu WWTP	Hubei, China	Beijing Origin Water Technology Co., Ltd	2019	1040	800
Henriksdal, Sweden	Stockholm, Sweden	SUEZ - Water Technologies & Solutions	Stage 1: 2019 / Stage 2: 2021 / Stage 3: 2023 / Stage 4: 2026	864	536
Huaifang Water Recycling Project	Beijing, China	Memstar	2016	780	600
Water Affairs Integrative EPC	Xingyi, Guizhou, China	Beijing Origin Water Technology Co., Ltd	2016-2017	399	307
Seine Aval	Acheres, France	SUEZ - Water Technologies & Solutions	2016	357	224
Canton WWTP	Ohio, USA	Ovivo (GLV Group)	2015-2017	333	159
9th and 10th WWTP	Kunming, Yunnan, China	Beijing Origin Water Technology Co., Ltd	2013	325	250.
Wuhan Sanjintan WWTP	Hubei Province, China	Beijing Origin Water Technology Co., Ltd	2015	260	200
Jilin WWTP	Jilin Province, China	Beijing Origin Water Technology Co., Ltd	2015	260	200

シンガポールでは間接飲料水や工業用水として再利用されている。

また、下水処理そのものに膜技術を活用している MBR は、生物処理と膜処理の組合せ技術で、下水の再利用には適した技術である。1989 年に浸漬膜型 MBR の概念が山本⁸⁾より提案された。この提案により、世界では一気に MBR 市場が拡大していった。日本では、1998 年から日本下水道事業団と企業による MBR 技術の実用化研究⁹⁾がスタートした。その結果、2005 年に下水処理場に一号機が導入された、これまでに 23 か所の MBR 設備が建設され、22 か所が稼働中である。国内最大の処理規模を有するのは、三宝下水処理場の 60,000 m³/d であったが、建設当初より期限付きの稼働であったため、現在では撤去されている。この MBR 設備の実績を踏まえて、現在では、10,000 m³/d 以上の規模を持つ MBR 設備の建設が計画されている。日本でもやっと 10,000 m³/d 以上の MBR 設備の建設が始まったところである。

一方、世界では、約 2,000 万 m³/d の MBR 型下水処理場が稼働しており、処理規模のトップ 10 を Table 1¹⁰⁾に示す。現在計画中の MBR 設備で最大規模は 120 万 m³/d で、シンガポールでは 2025 年の稼働を目指している。Table 1 に示すように中国の大規模 MBR 設備が突出している。中国では、地下に建設する MBR 設備が活発で、10,000 m³/d 以上の MBR 設備が 170 か所で稼働している¹¹⁾。また、韓国では、25,000 m³/d 以上の MBR 設備が 12 か所あり、最大の設備は、130,000 m³/d である¹²⁾。このように海外では、大規模下水処理場に MBR 技術が適用されつつある。

3. カーボンニュートラルに寄与する造水技術

3.1 嫌気性 MBR (Membrane Bioreactor) 技術

高濃度有機排水が排出されることが多い食品工場等では、排水処理とエネルギー回収を同時に行う技術として、嫌気性 MBR が注目されている。従来の嫌気性処理では固液分離に課題があり、有機物のガス化率は 75~80% であるが、嫌気性 MBR では、確実な固液分離ができるため、95~99% に向上する。その結果、処理水中に残存する有機物濃度が低減するため、処理水質が格段に向上する。嫌気性 MBR は、欧米の食品工場で実機が 2010 年頃から稼働しており、ガスの回収率が上がることにより、設備投資を 2~3 年で回収している。オランダのチョコレート工場に設置された嫌気性 MBR 設備 (500 m³/d) では槽外型の UF 膜が採用されている¹³⁾。

3.2 MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor) 技術

下水処理はエネルギー消費型の水処理である。その大きな原因は、活性汚泥法のばっ気動力であるため、その省エネ対策が種々検討されている。しかし、活性汚泥法を下水道の処理方式としている限り、ばっ気動力の低減は大きな望めないことがわかっている。そこで、その対応策の一つとして、近年注目されている技術が、MABR といえる。

MABR は、当初、酸素透過膜がアイルランドで開発されたこともあり、ヨーロッパを中心として実機が稼働している。MABR は、酸素透過膜の表面に付着したバイオフィルムで、硝化脱窒反応を進行させることで、ばっ気動力を大幅に低減することができる¹⁴⁾。

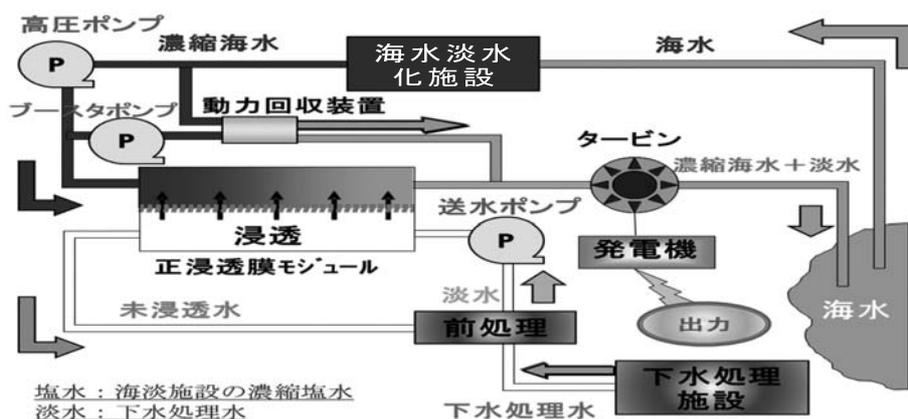


Fig. 4 PRO system flow

我が国においても酸素透過性の高い膜が開発され、国交省の下水道応用研究プロジェクトで三菱ケミカルと農工大のチームで検討されている¹⁵⁾。

3.3 FO (Forward Osmosis) 膜活用技術

FO 膜法は、膜の両側の液の浸透圧差により、溶媒である水を高浸透圧液側に移動させる技術である。食品分野では、ジュース等の省エネ濃縮方法として、RO 法を置き換えるべく検討されている。海外では、海水淡水化の省エネ技術や ZLD 技術の濃縮技術として、実機が稼働している。

PRO (Pressure Retarded Osmosis) は、浸透圧発電とも呼ばれ、原理的には 1976 年に S. Loeb により提案³²⁾されている。国内では、坂井ら¹⁶⁾は、海水淡水化設備から排出される濃縮海水を利用した PRO で 6 W/m^2 の発電量を示し実用化の可能性を示した。このフローを Fig. 4 に示す。

また、FO 膜処理を下水処理システムに展開しようとする試みは、国内外で検討が始まっている。三好¹⁷⁾は中空糸型の FO 膜を用いて、海水をドロソリューションとして下水流入水を 16 倍まで濃縮できる可能性を示した。また、造水促進センターを代表とする共同体は、国土交通省の下水道応用研究プロジェクト¹⁸⁾において、FO 膜処理と嫌気処理を組合せた超省エネ型下水処理システムを検討し、カーボンマイナスの下水処理システムを提案している。

3.4 ZLD (Zero liquid discharge) 技術

竹内¹⁹⁾は、中国における ZLD (ゼロ・リキッド・ディスチャージ) 事例を 3 例紹介している。いずれも MBR-RO に加えて、蒸発法を組み合わせ、排水の再利用の促進と産業廃棄物量の大幅な低減を図り、コストメリットを生み出している。

中国やインドでは、ZLD のシステムが稼働している MBR-RO 膜を使った排水処理システムの場合、濃縮水が出てくる。つまり、廃液として系外に出てくる

が、ZLD の場合は、固形分として排出される。つまりリキッドをゼロとすることからゼロ・リキッド・ディスチャージと呼ばれる。中国では、石炭火力発電所の排煙脱硫排水の ZLD を実現している²⁰⁾。

国内の食品工場の例²¹⁾では、まず、排水を MBR で処理する。MBR 処理水は中水並みの水質であるため、トイレ用水などに使われる。残った処理水は RO 膜で処理し、ボイラー用水として使う。その結果、排水の水質保全のほか、年間 1,400 万円のコスト削減効果ができ、水を回収できると同時に、下水の排水量と下水料金を減らすというメリットがある。この工場の場合、水道の単価が 300 円/m^3 と高く、下水料金と併せると約 600 円/m^3 となるため再利用のメリットが出ることになる。

水道代の高いところには工場を作らない方がよいのだが、物流面等を考慮した時作らないといけない場合が生じる。そのような際には間違いなく水を再利用させるメリットが必ず出るので、用途先をうまく見つけて回収率を上げることが重要になってくる。

4. 水ビジネスと造水技術

4.1 中東における再生水ビジネス

UAE のラスアルハイマ首長国内のアルガイル工業団地では、水道水をタンクローリで運搬し、生活用水と工業用水に使用し、生活排水はタンクローリで数十 km 離れた下水処理場に運搬、処理していた。そこで、ここでは、 $2,000 \text{ m}^3/\text{d}$ の MBR 設備と $1,000 \text{ m}^3/\text{d}$ の RO 設備を設置し、生活排水の処理と工業用水の製造を行い、生活排水の処分費と工業用水の販売費を収入源とする事業運営を目指す NEDO 実証事業²²⁾として実施した。

現在では、現地ラスアルハイマ政府により事業運営がなされている。筆者は、10 年ぶりに当地を訪問した。Fig. 5 に 2009 年の建設時の設備写真と 2020 年時の設備状況を示す。砂漠の中に 10 m を超す木々が緑

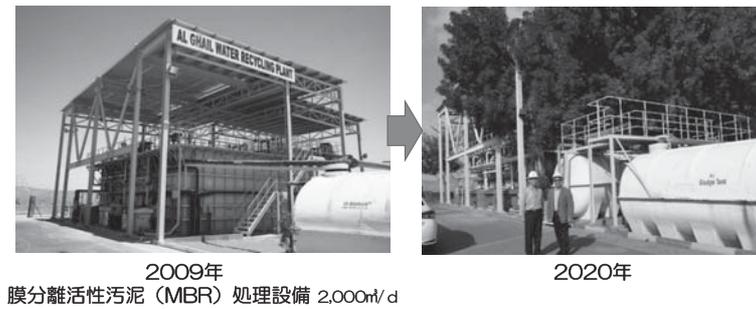


Fig. 5 Facility status of reclaimed water sales business

の森を形成していた。「水」があることの素晴らしさを実感した次第である。

4.2 南アにおける水ビジネス

北九州市のウォータープラザでは、NEDO 事業として、世界的な水不足に対して、工業用水の効率的な製造技術の開発を目指し、RO 膜を用いた海水淡水化システムの省エネと生活排水の処理との組み合わせシステムの実証事業を 2009 年度から開始した²³⁾。これは、ウォータープラザ構想として、北九州市日明浄化センター内に 1,500 m³/d の MBR, RO 設備を設置し、MBR 処理水の RO 濃縮水を海水に混合することで海水の浸透圧を低下させ、海水淡水化での動力 30% 低減を目標としている。再生水は近隣の発電所の工業用水として利用していた。この結果は、南アフリカでの実証事業として展開されている²⁴⁾。さらにウォータープラザでは、テストベッド設備を設け、各種実証が行える環境を整備している。ウォータープラザは、省エネルギーで環境に調和した水循環システムの構築、国際社会への普及促進に寄与するため、海水淡水化と下水再利用の統合による低コスト・低動力の新規造水システムのデモプラントとして位置づけられている。

下水処理水からの再生水製造と海水淡水化を組み合わせることで海水淡水化の消費動力を低減する省エネシステムが提案されている。現在、南アフリカにおいて、飲料水、工業用水を製造し販売するビジネスを目指し、NEDO の実証事業が進められている。このシステムフローを Fig. 6²⁵⁾に示す。



Fig. 6 “RemixWater” system flow

5. 水再利用の国際標準化

各種水処理のエネルギーフットプリント²⁶⁾によると、水再生のためのエネルギー消費量が一番高いのは海水の淡水化である。つまり海水淡水化は、かなりのエネルギーを使って淡水を作り出しているということになる。それに対して、水の再利用、下水 2 次処理水をターゲットにした場合のエネルギー消費量は、海水淡水化に比べると同じような水質を得るのにエネルギーが 1/3~1/5 で済む。これが水の再利用が進む要因である。

水の再利用に関する世界的なルールを作るため、ISO/TC282「水の再利用」の委員会が、2013 年 6 月にイスラエル・日本・中国の三か国が中心となり設立された。再生水の使い方（灌漑用、都市用、工業用）を規格する分科会とこれらに共通する再生水や技術の評価の規格を策定する分科会で構成されている。現状の体制図を Fig. 7 に示す。これまでに 32 件の規格が発行され、そのうち日本主導で、9 件が発行されている。日本からは、健康リスク管理のガイドラインや再生水処理技術の性能評価ガイドライン等の規格を策定している²⁷⁾。

日本が水再利用の規格策定を主導する意義は、日本の優れた再生水処理技術の適正な評価による国際競争力を高め、持続可能な水利用に貢献するためである。これにより、日本企業の海外展開を後押しすることを企図している。今後は、策定した規格の普及促進活動を積極的に実施していかねばならない。

また、ISO/TC224「上下水道サービス」の委員会では、WG12 の作業部会で、シンガポールが提案した ISO46001「水の効率管理」の規格が開発されている。この規格は、環境管理の ISO14001 や品質管理の ISO9001 と同様に、工場内の水使用量を継続的に削減するための管理認証規格である。企業にとっては、気にしなくてはならない規格の一つといえる。

6. 今後の造水技術への期待

2020 年から世界的なコロナ禍になり、生活環境や

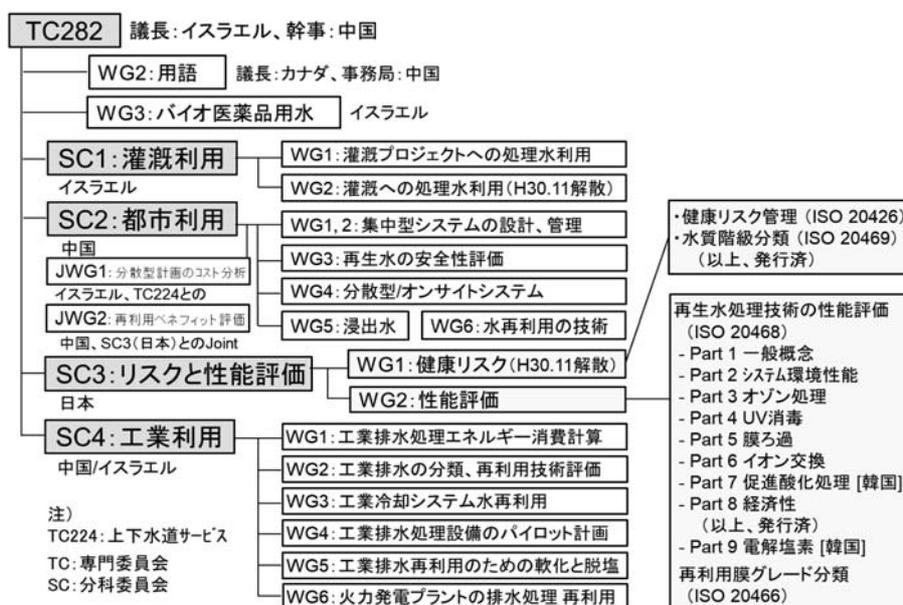


Fig. 7 ISO/TC282 “Water Reuse” Development Structure

ビジネス環境が劇的に変化している。造水技術にもその影響はあると考える。AI 技術を活用した RO 技術は運転動力の低減や運転管理、特に膜洗浄頻度の低減を実現している²⁸⁾。また、MBR の膜差圧の予測制御も種々検討されている。AI 技術の活用には、これまでにないセンシング技術やソフトセンサーの技術の開発も重要になってくる。

今後、環境技術は、カーボンニュートラルに寄与する新しい技術やシステムが開発され、造水技術もこれまで以上に IoT, AI 技術を活用し、日本発の技術として海外に発信し、水ビジネスに寄与することを期待している。

参考文献

- 国土交通省：2014 年国連世界水発展報告書, p.11 (2014)
- 水道技術研究センター：水道ホットニュース, 667 号 (2019)
- 膜を利用した水処理技術研究委員会：水環境学会誌, Vol. 42 (A), No. 12 (2019)
- 榊明電舎 HP：https://www.meidensha.co.jp/news/news_03/news_03_01/1223958_2469.html
- GWI: Desaldata (2014)
- Y. Taniguchi: IDA World Congress, Dubai UAE, 7-12 (2009)
- 栗原優 他：膜, Vol. 40, No. 2, pp.52-59 (2015)
- K. Yamamoto, et al.: *Water Science and Technology*, 21 (4/5), 43 (1989)
- K. Yamashita: International Workshop on MBR Technology in Kita Kyushu on June 18 (2015)
- https://www.thembrsite.com/membrane-bioreactor-global-

capacity/

- Kang XIAO, et al.: *Front. Environ. Sci. Eng.*, Vol. 8, No. 6, pp. 805-819 (2014)
- Sangho Lee: The 2nd Asian Symposium on Water Reuse, Kyoto (2016)
- 大熊那夫紀：日本食品工学会誌, Vol. 16, No. 1, pp.75-78 (2015)
- 多久和克哉：ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2022, S8-3-3-1 (2022)
- 木子胤制：ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2022, S8-3-1-1 (2022)
- 谷岡明彦, 坂井秀之 他：膜, Vol. 40, No. 2, pp.67-72 (2015)
- 三好太郎：文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム, 平成 27 年度活動報告会 (2015)
- 国土交通省 HP：https://www.mlit.go.jp/common/001284517.pdf
- 竹内雅人：造水シンポジウム 2015「新しい造水技術の現状と今後の展望」(2016)
- GWI: IDA Desalination Yearbook 2015-2016 (2016)
- 奥原正彦 他：食品工場長 2016 年 12 月号, No.236, 58-60 (2016)
- 大熊那夫紀 他 5 名：日立評論, Vol. 93, No. 9, 18-23 (2011)
- 大熊那夫紀：用水と廃水, Vol. 52, No. 7, 57-62 (2010)
- NEDO ホームページ：https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101292.html
- 日立製作所 HP：http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/11/1118a.pdf
- 国土交通省：2014 年 国連世界水開発報告書, p. 8 (2014)
- 加藤裕之, 大熊那夫紀, 中村裕紀：下水道協会誌, Vol. 58, No. 709, 44-49 (2021)
- 小野崎澄人：ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2022, S7-3-1 (2022)