



サウジアラビアの海水淡水化技術の課題とこれからの展望

松井 康 弘

世界最大の産油国サウジアラビアにおいて、発電事業と造水事業を両立した蒸発法造水技術が定着している。近年、造水事業における膜ろ過法の機会拡大を目指し活発な議論がなされている中、サウジアラビア海水淡水化公団 (SWCC) が主催 (2014年9月17～18日) したワークショップ「Sustainable and Cost Effective SWRO Desalination for GCC」に出席した (写真1)。膜ろ過法の機会拡大には、新技術の導入にあたり重視される実績や、要求される技術内容の保証など障壁もある。世界最大の海水淡水化の造水実績を誇る SWCC とは、省エネルギーや低ライフサイクルコストという新たな課題を共有し、技術開発を推進してきた。本稿では、海水淡水化技術として膜ろ過法を訴求する背景と、課題及び展望をまとめた。

キーワード：蒸発法、逆浸透 (RO) 膜、前処理技術、UF 膜、MF 膜

1. はじめに

アラビア半島の西岸、サウジアラビア (以下、サ国) 内の紅海沿いには大小の都市が点在する。これら都市は、イスラム教の聖地メッカとメディナを繋ぐ港湾もしくは、巡礼街道の中継地として発展を遂げてきた。いずれも降雨に乏しい過酷な自然環境を今に伝えている。現在人口 300 万人を超えた大都市ジェッダはメッカに近く、毎年、世界のイスラム教徒 200 万人以上を迎え入れている。ジェッダの都市化は、同時に巡礼者や市民への水需要を増加させ、水道の歴史は 16 世紀マムルーク朝からオスマン朝にかけて、ジェッダ郊外で井戸や湧水水源の開発や導水に遡る。しかし当時から、水源の枯渇や塩水化に悩まされており、安定した水供給は今と共通した課題であった。海水淡水化 (以下、海淡) の歴史は、現在人口 30 万人程度の中都市ヤンブーで生まれた。ヤンブーはメディナに近く、主にエジプト、北アフリカからの巡礼者を受け入れる紅海航路の拠点として都市化が進んだ。古くは井戸に依存した水供給を実施していたが、水蒸気機関船が普及していた 20 世紀初頭のオスマン朝において、塩水から淡水蒸留の発想が生まれ、水不足の窮地を凌ぐ手段が芽生えた。人口数万人の地方都市であるアルワジフ、ウムルジなども聖地へ繋ぐ巡礼街道沿いの中継地として成長した。このような地方小都市でも、1950 年代にアルワジフで、70 年代にウムルジで水不足を補う目的で蒸留装置が普及した記録が残っている¹⁾。これ



写真1 SWCC 主催ワークショップ パネルディスカッションで講演をする筆者

らいずれの都市も、湧水を飲料水に利用している名残は今もなく、水供給を海淡が完全に支えているのが現状だ。また、地方都市は巡礼街道沿いの中継都市としての機能も薄くなり、その代わりに、巡礼街道を、海淡のエネルギー源として消費される軽油の運搬にローリー車が行き交うようになった。国際原油価格の大幅な上昇とともに経済発展を遂げた中東において、海淡中心の大規模な造水技術や装置が普及した一方で、運用と維持管理において、今後も莫大なコスト負担を余儀なくなった。その中で、省エネルギー及び、低ライフサイクルコストの概念も根付き始めている。海淡による安定した水供給を最優先としながら、エネルギー消費の最適化にも高い関心を示しているサ国海淡技術

の展望を紹介する。

2. 海淡技術と消費エネルギーの現状

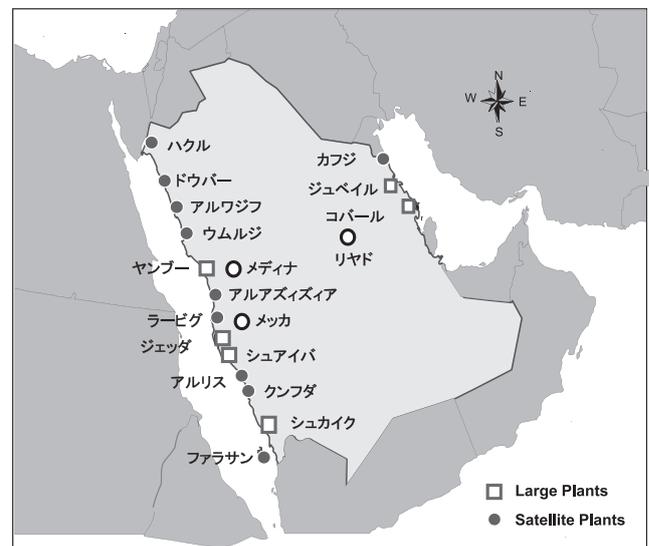
サウジアラビアに普及する海淡技術は、蒸発法と膜ろ過法である。前者は多段フラッシュ法 (MSF) と多重効用法 (MED)、後者は逆浸透膜法 (RO) を指す。MSF は、海水を加熱して蒸発させ、水蒸気を凝縮することで淡水を得る。サウジアラビア海淡公団 (以下、SWCC) が運用する西海岸の MSF は、いずれも数十から数百メガワット級の発電設備と併設されており、発電における余剰蒸気を MSF で利用している。MSF は、減圧蒸留において淡水の回収効率を上げるため大型で多段構造となるが、新規 MSF プラントの更なる大型化はサウジアラビア、中東諸国の傾向である。MED は、多数に並べた蒸発室 (効用缶) からなり、前段の効用缶で発生した蒸気を次段の効用缶へと循環させ、順次、最終効用缶まで繰り返して海水の加熱、蒸発に用いる。効用缶内で蒸気は伝熱管内を流れ、伝熱管の外側の海水により冷却され、凝縮し淡水を得る。MED は、MSF に比べれば造水コストは安く抑えられる効果がある。その一方、MED は造水量数千 m^3 / 日から 2 万 m^3 / 日以下の小型プラントへの適用にとどまっていた。SWCC は、2015 年 1 月に 9 万 m^3 / 日超級の MED の導入を発表しており、今後の MED の大型化の兆しを見せている。海淡に依存傾向が極めて強いサウジアラビアでは、海水の水質変動に左右されず、前処理も必要としない MSF 及び、MED は安定した水供給源という観点で魅力である。SWCC は、同一 MSF プラントを 30 年以上と長く運用している事例も多く、部材選定の最適化や、スケール生成の抑制などの技術開発に積極的である。また SWCC は、新設プラントを建設する場合の 20% から 30% 程度のコストで、プラント寿命を 15 年程度延ばすことを目的とした既設蒸発法プラントのリハビリ実績も有している²⁾。RO は、海水が有する浸透圧以上の圧力をかけて、海水から塩分を分離して淡水を得る。逆浸透膜が海水中の無機物や有機物及び、微生物などで閉塞しないように前処理を施す必要がある。現状で SWCC は、砂ろ過を前処理に適用しており、海域によっては水質的な阻止性能の確実性に不安を残している。よって、SWCC は、逆浸透膜の閉塞と因果のあるバイオフィリングの発生リスクを低減するため、逆浸透膜上での微生物繁殖を防ぐ塩素消毒の手段を採用している。逆浸透膜の材質は、耐塩素性の三酢酸セルロースの選定が有効であることから、SWCC はウムルジを除くすべての RO プラントにおいて三酢

酸セルロース系逆浸透膜 (以下、CTA-RO 膜) を使用している。

前述のとおり、MSF は発電設備と併設されているため、一概に実際の海淡プラント毎に造水エネルギーコストを比較することは難しい。蒸発法と膜ろ過法で理論的な比較をするならば、単位造水量 (m^3) あたりのエネルギー消費は、蒸発法の必要動力 62.9 kWh (必要熱量 54,000 kcal) に対し、中東の高塩分濃度を勘案した膜ろ過法は 4.5 kWh (3,870 kcal) の範囲に収まる³⁾。大型プラントによる実例の報告によれば、シュワイバ (IWPP) で MSF (88 万 m^3 / 日) と隣接する RO (15 万 m^3 / 日) の必要動力はそれぞれ 25 kWh と 4.6 kWh と試算されている⁴⁾。このように膜ろ過法に関しては、脱塩時に発生する高圧エネルギーの回収技術がプラント設計に浸透しており、エネルギー効率の向上は大幅な進化を遂げてきた。しかし未だ SWCC による造水量実績において、蒸発法が 85% 程度を占め、膜ろ過法を圧倒していることは事実である。安定性で優れる蒸発法への実質的な依存は拭えず、水質変動に対しても安定性を発揮する前処理を備えた膜ろ過法、維持管理性の向上、そして逆浸透膜の安定した供給が課題として残存する。

3. エネルギーコスト負担と今後の動向

SWCC が運営する主な海淡プラントを図一に示し、SWCC が 2012 年実績として公表した西海岸の海淡プラントの造水能力及び、燃料消費を表一に示す⁵⁾。大規模な MSF は原油、C 重油及び、分解油を、小規模な MED は軽油を燃料としている (なお、東海岸の MSF は天然ガスを使用)⁶⁾。サウジアラビアの油田は、東



図一 SWCC が運営する海淡プラント

表一 1 造水能力と蒸発法の燃料実績

		造水能力 (万 m ³ /日)	蒸発法の燃料消費 (2012 年実績)
MSF	ジェッダ	① 8.8 ② 22.1	C 重油 (180 cSt) : 1.3 百万 ton
	シュアイバ	① 22.3 ② 45.4	原油 : 1.4 百万 ton 分解油 : 0.3 百万 ton
	ヤンブー	① 10.8 ② 14.4	C 重油 (180 cSt) : 0.7 百万 ton C 重油 (380 cSt) : 0.4 百万 ton
	シュカイク	9.7	C 重油 (180 cSt) : 0.2 百万 ton
MED	アルアズィズィア	0.4	軽油 (7 サイト合計の過去 4 年実績) :
	アルワジフ	0.9	
	ウムルジ	0.9	
	ファラサン	0.9	
	クンフダ	0.9	
	アルリス	0.9	
	ラビーグ	1.8	
RO	ジェッダ	① 5.6 ② 5.6	
	ヤンブー	12.8	
	ハクル	0.4	
	ドゥバー	0.4	
	ウムルジ	0.4	
		0.4	

2012 年 SWCC 年次報告に開示された情報の抜粋⁹⁾

部及び、アラビア海沿岸の陸上にあり、世界最大の原油埋蔵量を誇り、バレルあたりの生産コストは 4.5 米ドルと安価である（なお、メキシコ湾深海部油田は 60 米ドル）⁷⁾。東部から西海岸へと輸送された原油が、西海岸の拠点都市で精製、または発電及び、MSF の燃料として消費されている。一方、MED は地方小都市に普及しており、燃料の軽油は巡礼街道を車輛で運搬されている。SWCC は、年間 10 億 m³ の造水量に対して、燃料費用は単位造水量 (m³) あたり 0.15 米ドルと紹介しており、概して 1.5 億米ドルを投じた計算となる⁶⁾。アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市機構 (King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy) は、この 09 年統計に対して、サ国内外の価格ギャップ (表一 2) を反映させた海淡事業における実際的な燃料費用を 30 億米ドルと試算している。近年、サ国は各種燃料の国際市場価値を意識しており、

RO や自然エネルギーの活用を指向する傾向は強くなっている⁸⁾。

4. RO の飛躍を支える前処理技術への期待

サ国海淡プラントにおける CTA-RO 膜の普及は目覚ましい。SWCC は、1998 年に同膜を造水量 12.8 万 m³/日のヤンブーに導入して以来、2013 年に 24 万 m³/日のジェッダ (Jeddah III) に、2014 年に 34.5 万 m³/日のラスアルカイル (Ras Al-Khair) にそれぞれ導入しており、大型化に向けた実績を着実に残している。その一方で、SWCC は CTA-RO 膜以外の選択も模索している。CTA-RO 膜の調達メーカーは現状 1 社に限られるが、ポリアミド系逆浸透膜 (以下、PA-RO 膜) は 8 社である点を示唆しており、SWCC は、複数社の PA-RO 膜を用いて水透過性や、塩分の阻止性を長期間にわたり調査している¹⁰⁾ PA-RO 膜は、塩素耐性がないためバイオフィウリング対策として、CTA-RO 膜が適用しているような塩素消毒を実施できない。CTA-RO が適用されている SWCC の海淡プラントは、砂ろ過を用いた前処理によって海水中の夾雑物を取り除いている。一方、海水温が高い紅海、アラビア海の沿岸では植物プランクトン濃度の指標に用いられるクロロフィル a や、植物性プランクトン由来の粘性重合物質粒子 (Transparent Exopolymer

表一 2 蒸発法燃料のサ国内外の価格⁵⁾

	サウジ国内価格	国際価格
天然ガス	300 US\$/MCF*	4,080 US\$/MCF*
C 重油 (180cSt)	11 US\$/ton	444 US\$/ton
C 重油 (380cSt)	11 US\$/ton	424 US\$/ton
分解油	2.3 US\$/barrel	80 US\$/barrel
軽油	52 US\$/ton	735 US\$/ton

* MCF : Million cubic feet

Particles, 以下 TEP) 濃度が高い。とりわけ TEP は、海水中の有機物であり、粘着性が強く不定形な集塊をなし、海洋微生物の捕食対象でもあることから海域環境の動態モニタリング上の重要な指標にとどまらず、RO ファウリングを未然に防ぐ前処理プロセスの管理指標にもなる。PA-RO 膜においては、バイオフィアリングのリスク低減の観点からも、確実に前処理プロセスで TEP をはじめとする微粒子の除去が必要である。この TEP や微粒子除去においては、前処理プロセスに精密ろ過 (MF) 膜や、限外ろ過 (UF) 膜といった砂ろ過よりもふるい分け効果の高い膜素材の適用が有力な選択肢である。市場には、サブミクロン以下、10nm 以上の粒子を分離できる PVDF 製 UF 膜¹¹⁾ や、海水の水質変動に対応し膜洗浄効果の高いセラミック製 MF 膜¹²⁾ が存在している。微粒子から高分子領域までの高い阻止性能を駆使した膜ろ過前処理システムの安定運転を、SWCC との共同研究や技術交流を積極的に行っている。また、一部の中東地域の海淡水プラントでの前処理への膜ろ過技術の実用化も始まっている。今後、世界最大の造水量を誇る SWCC が、膜ろ過技術を適用した前処理プロセスの適用に踏み切るかどうか待たれる。この膜による前処理が本格化することにより、CTA-RO 膜及び、PA-RO 膜といった逆浸透膜種の充実を推進し、海淡水に依存するサウジアラビア及び、中東諸国における蒸発法と膜ろ過法の将来の均衡を促すと考えている。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) H. Pampanini. Desalinated water in the Kingdom of Saudi Arabia: The history of the Saline Water Conservation Corporation (SWCC), Turnaround Associates, Inc. 2010.
- 2) 鈴木明彦, サウジアラビアにおける海水淡水化エンジニアリング事業, 日本貿易会月報, 2008年2月号 (No.656).
- 3) 藤田賢二, 水道工学, 技報堂出版 (2006).
- 4) Global Water Intelligence (GWI), Vol.11, Issue10, October 2010.
- 5) A. Baras, W. Bamhair, Y. AlKhoshi, M. Alodan, J.Engel-Cox. Opportunities and challenges of solar energy in Saudi Arabia, The World Renewable Energy Forum 2012.
- 6) SWCC Annual Report of Operation and Maintenance, 2009.
- 7) 岩間剛一, 堅調に成長するサウジアラビア経済とサウジアラビアのインフラストラクチャー開発の最新動向と日本企業の事業機会, 中東協力センターニュース (2012).
- 8) Global Water Intelligence (GWI), Vol.13, Issue12, December 2012.
- 9) SWCC Annual Report 2012.
- 10) M. Farooque. Performance of different SWRO membrane in Arabian Gulf, Sustainable and cost effective SWRO desalination for GCC workshop, 2014.
- 11) M. Taniguchi. High performance UF membrane for desalination and water treatment, Sustainable and cost effective SWRO desalination for GCC workshop, 2014.
- 12) Y. Matsui. Latest pretreatment membrane technology, Sustainable and cost effective SWRO desalination for GCC workshop, 2014.

【筆者紹介】

松井 康弘 (まつい やすひろ)
METAWATER USA, INC.
副社長

