

水問題！ 日本の貢献は？

—世界の水環境問題解決に貢献する東レの水処理膜技術と
日本企業の水処理事業世界展開に向けて—



東レ株式会社 顧問 水処理・環境事業本部・技術センター

栗原 優（くりはら まさる）

1963年群馬大学工学部応用化学科卒業、東洋レーヨン株式会社（現 東レ）入社。基礎研究所有機化学研究室配属。1970年工学博士（東京大学）授与。米国IOWA大学J.K.Stille教授のもとで博士研究員留学。1991年高分子研究所長兼地球環境研究室長。理事、研究本部（機能膜）担当、ケミカル研究所長。常務理事を経て2002年常任理事。2003年から専任理事。水処理事業本部（技術渉外）・技術センター（水処理技術開発センター）・研究本部（水処理）担当。2006年から、現職。国際脱塩協会理事、日本脱塩協会会長。



東レ株式会社 水処理・環境事業本部 水処理・環境事業企画管理室 主幹

（事業開発担当部長）

竹内 弘（たけうち ひろむ）

1971年慶應義塾大学工学部機械工学科修士課程修了、東レ株式会社入社。エンジニアリング研究所配属。フィルトライザー製品設計、トレカ高速回転試験機設計担当。1977年（財）造水促進センター出向、海水淡水化装置の運転管理技術開発。1980年開発部にてPEC膜エレメント開発・プロセス開発。その後、中東・欧州等海外向け海水淡水化技術サポート（メンブレン事業部）、液体・ガス分離膜事業企画（新事業企画部）沖縄県海水淡水化プロジェクト・技術担当（メンブレン事業部）、上水プラント事業開発担当（水処理システム事業部）を経て現職。

Point

- ① 人口増加と経済発展から、世界の水需要と環境汚染が進んでいる。
- ② この世界の水環境問題解決に向け、日本（東レ）が得意とする水処理膜技術が、基幹技術となってきた。
- ③ 今後は、日本企業が、水処理事業分野で、いかに世界展開するかが課題となる。

I. 世界の水環境問題

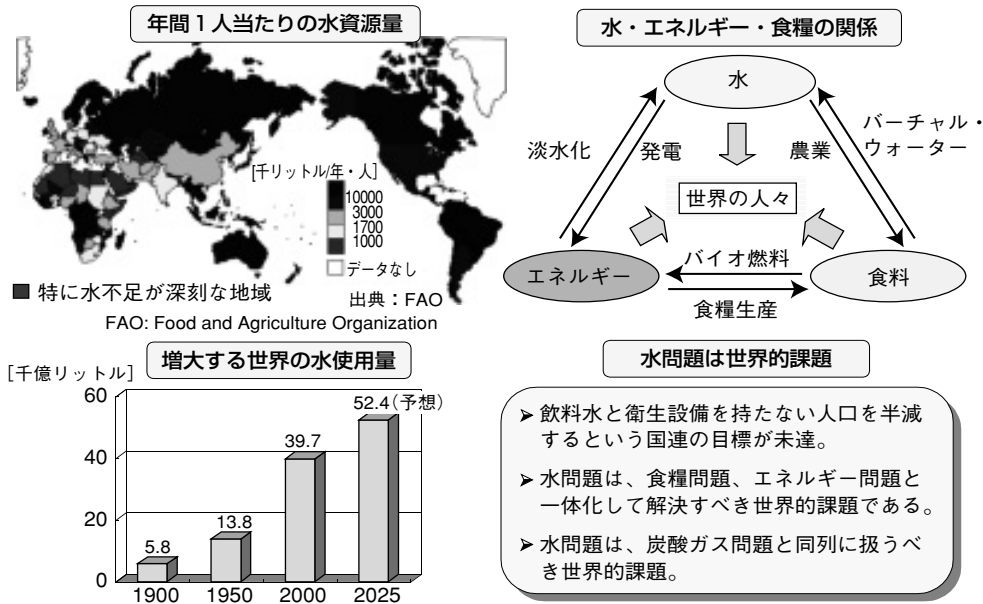
スイスのダボスで開催された世界経済フォーラム（2007年1月）において地球環境問題が焦点となった。同時期にパリで「IPCC」（気候変動に関する政府間パネル）が開催され、第1作業部会として、“地球の温暖化は確度が高く、人為的原因によるものである”との第4次報告（2007年2月2日）がなされた。地球という閉鎖的環境において、人口増加と経済成長に伴うエネルギー消費が地球の自浄能力を超えた結果と考えられる。

世界の水環境問題は、これを切っ掛けに広く

認識されるようになった。温暖化は、地球社会に及ぼす影響が重大で、地球の生態系への影響だけではなく、大規模な水不足、農業への打撃、感染症の増加、自然災害の激化など、悪影響が複合的に生じる恐れが強いことを“日本の科学者”（中央環境審議会会長・鈴木基之氏等）が指摘した。

現在、これら地球環境問題は、政府レベルでも高い関心が払われており、『水・エネルギー・食糧』のトライアングルの関係にある問題の解決が必要であると認識され、各方面でその対策が検討されているところである（図表1）。

図表1 世界の水資源と水問題



出典：UNESCO

出所：第67回総合科学技術会議（2007年5月18日開催）資料3 最近の科学技術の動向「世界へ貢献する日本の技術－日本が誇る水利用技術を例に－」

図表2 膜の種類と東レの膜製品

大きさ	0.001 μm	0.01 μm	0.1 μm	1 μm	10 μm
分離対象物質	イオン・低分子 トリハロメタン 1価イオン 多価イオン	高分子 農業・有機物 ウイルス	コロイド 細菌	粘土 バクテリア 大腸菌	粘土 クリプトスポリジウム
膜の種類	RO (逆浸透)	NF (ナノろ過)	UF (限外ろ過)	MF (精密ろ過)	
東レの膜製品	超純水の製造 海水の淡水化 排水高度処理 "ROMEMBRA" RO膜	硬水の軟水化 有害物質の除去 "TORAYFIL" NF膜	病原性微生物の除去 下排水処理 高度処理の前処理 UF膜	下排水処理 "MEMBRAY" M膜	下排水処理 MBR

出所：東レ株式会社

世界の水需要は、人口増加の2倍の速さで増加していると言われている。現在の世界が必要としている水量と水質を確保するためには、最適な水質制御と高速処理が可能な膜処理技術が必須の技術であると認識されてきた。

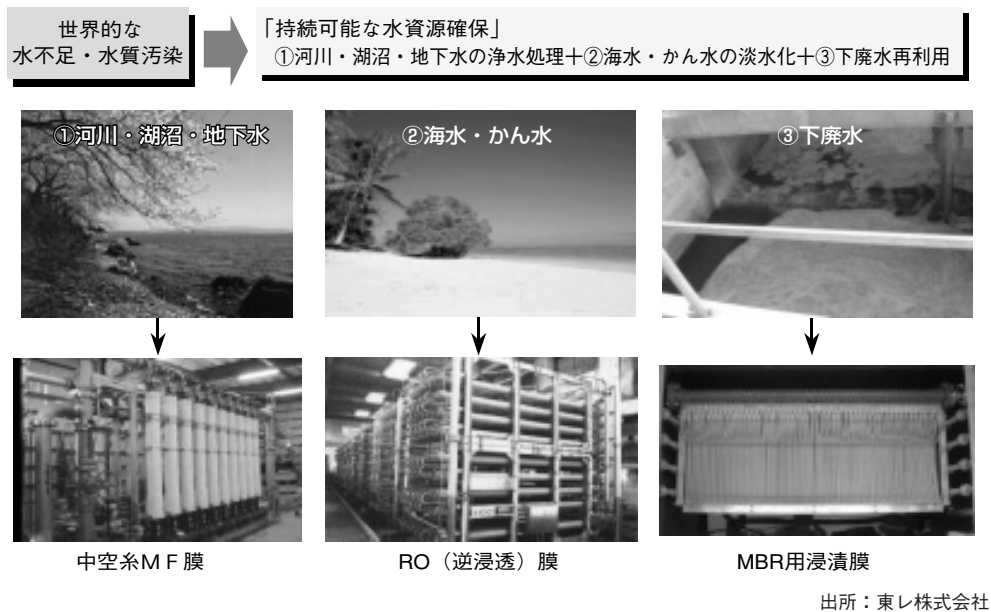
本稿では、世界の水環境問題の内、水不足と環境汚染の解決に向けた「東レの水処理膜技術」

と「日本企業の水処理事業世界展開に向けて」について述べる。

II. 東レの水処理膜技術

東レは、1968年に研究開発を開始、1980年に工業用超純水製造RO膜の開発・上市を契機に、様々な用途の分離膜を開発・供給してきた(図表2)。

図表3 膜の実用分野



水資源の枯渇や水質の悪化など今世紀の「水問題」の解決、すなわち飲料水や工業用水などの都市用水と農業用水（灌漑用）の確保のためには、①従来の河川・湖沼・地下水の浄水技術と共に、持続的な水資源としての②海水・かん水の淡水化技術や③下廃水の再利用技術が求められている（図表3）。

1. 海水淡水化（RO膜）

海水を水源とし真水を得る技術（海水淡水化技術）は、中東を中心に、海水を加熱蒸発後に凝縮・回収する方法（蒸発法）が主流であったが、近年、経済性に優れることから逆浸透膜を利用した海水淡水化方式の導入が顕著になってきた。当社は、高効率「濃縮水昇圧二段法」や超高压逆浸透膜等の開発と共に、膜製品の生産・供給能力の増強により、膜による造水コストの低減化を行ってきた。

この結果、東レRO膜の出荷量は年率20%以上で伸びており、プラント累積造水量は日量1,400万m³（5,600万人の生活用水相当）になっている（図表4・5）。

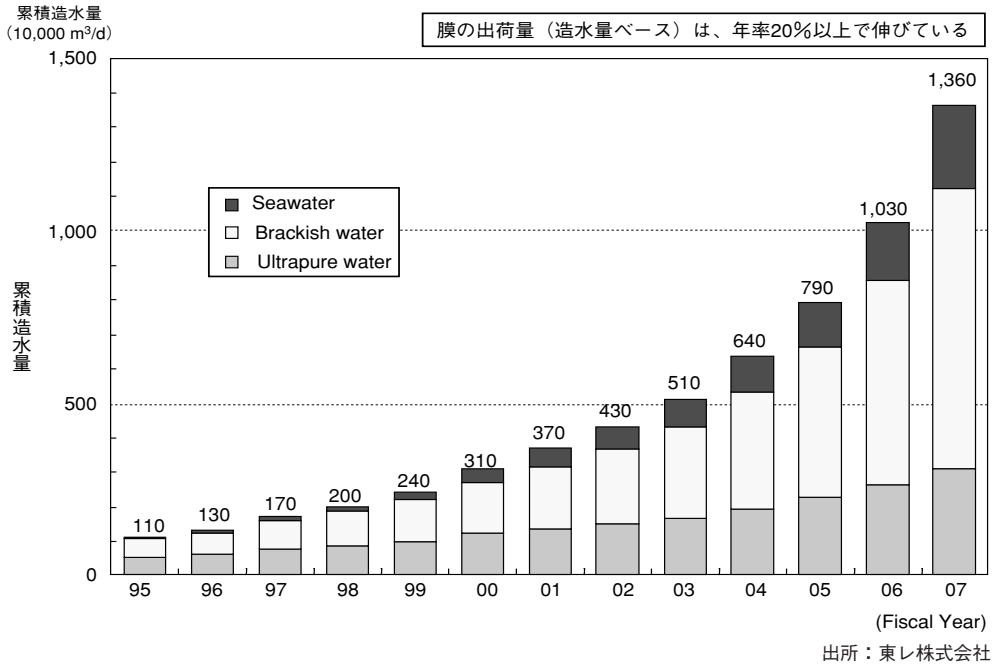
当社のRO膜は、架橋芳香族ポリアミド複合逆浸透膜であり、海水・かん水の淡水化、下廃水の

再利用、超純水用などの各種用途に使用されており、日本化学会技術賞（1992年）、大河内記念生産賞（2003年）等を受賞している。

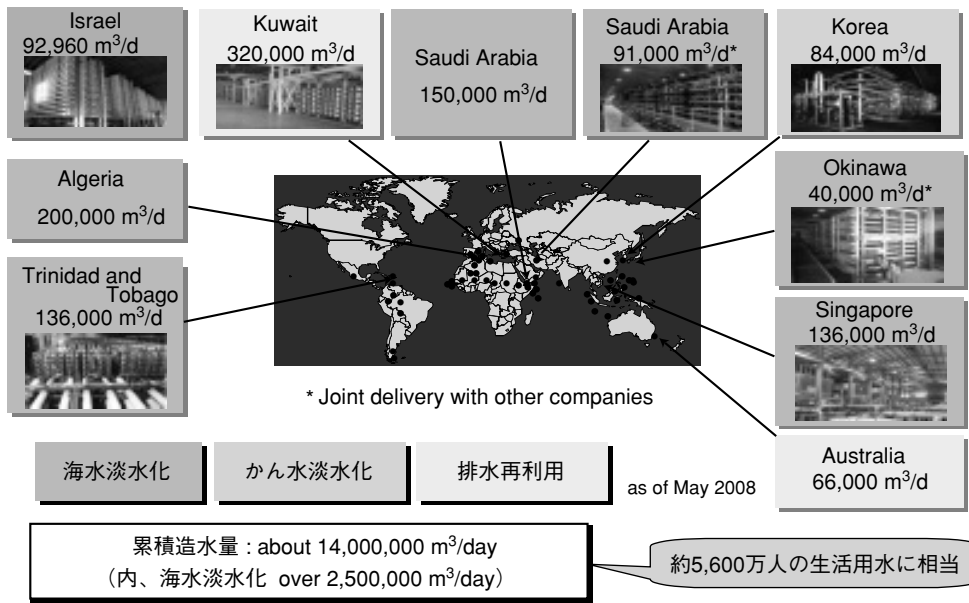
世界の大規模海水淡水化ROプラントを図表6に示す。トップ20位の6件で当社膜が採用されている。このうち、稼働している大規模プラントを紹介する。

- 1) アルジェリア／ハンマ（Hamma）の海水淡水化設備、規模は20万m³/日とアフリカ最大の海水淡水化プラントで、本年2月に稼働開始した。
- 2) シンガポール／チュアス（Tuas）の海水淡水化設備の規模は13.6万m³/日と環太平洋地域最大のもので、シンガポールにおける全使用水量の10%以上、生活用水使用量の20%に相当する量である。
- 3) トリニダード・トバコ／ポイント・リサ（Point Lisas）の設備は、13.6万m³/日で、西半球最大の海水淡水化プラント。このプラントは、海水淡水化RO部分に東レ独自の高効率・低コスト型海水淡水化システムである『濃縮水昇圧2段法』を採用し、従来の淡水回収率よりも高い47%の回収率を実現している。

図表4 東レRO膜が採用されているプラントの累積造水量の推移



図表5 東レRO膜納入実績/大型プラント代表例



図表6 世界の大規模海水淡水化ROプラント

as of March 2008

	Country	Location	Capacity (m ³ /d)	Operation Year	Membrane Manufacturer
1	Israel	Ashkelon	330,000	2005	Dow
2	Saudi Arabia	Shuqaiq	216,000	(2008)	Toyobo
3	Saudi Arabia	Rabigh	205,000	(2008)	Toyobo
4	Algeria	Hamma	200,000	2008	Toray
4	Algeria	Beni Saf	200,000	(2008)	Hydranautics
6	UAE	Fujairah	170,000	2003	Hydranautics
7	Saudi Arabia	Shuaiba	150,000	(2009)	Toray
8	Spain	Valdelentisco	140,000	2007	Dow
9	Trinidad & Tobago	Point Lisas	136,000	2002	Toray
9	Singapore	Tuas	136,000	2005	Toray
9	Australia	Perth	136,000	2006	Dow
12	Australia	Gold Coast	132,500	(2008)	Hydranautics
13	Saudi Arabia	Yanbu	128,000	1998	Toyobo
14	Spain	Carboneras	120,000	2002	Hydranautics
15	Saudi Arabia	Jeddah	113,600	1989	Toyobo
16	UAE	Dubai	100,000	2005	Dow
16	Algeria	Skikda	100,000	(2008)	Hydranautics
18	USA	Tampa Bay	94,635	2007	Dow
19	Israel	Palmachim	92,250	2007	Toray
20	Saudi Arabia	AlJubail	91,000	2000	DuPont-Toray (24,240cmd)

出所：東レ株式会社

2. 陸水の浄水処理 (UF / MF 膜)

陸水の水処理分野では、膜の処理能力の高さと病原性原虫のクリプトスポリジウム除去の有効性など、処理水質の良さが認められたことから、世界的に広く利用されるようになってきた。設備の大型化とともに、大量処理、省エネルギー（低圧）運転、高信頼性運転が求められるようになった。

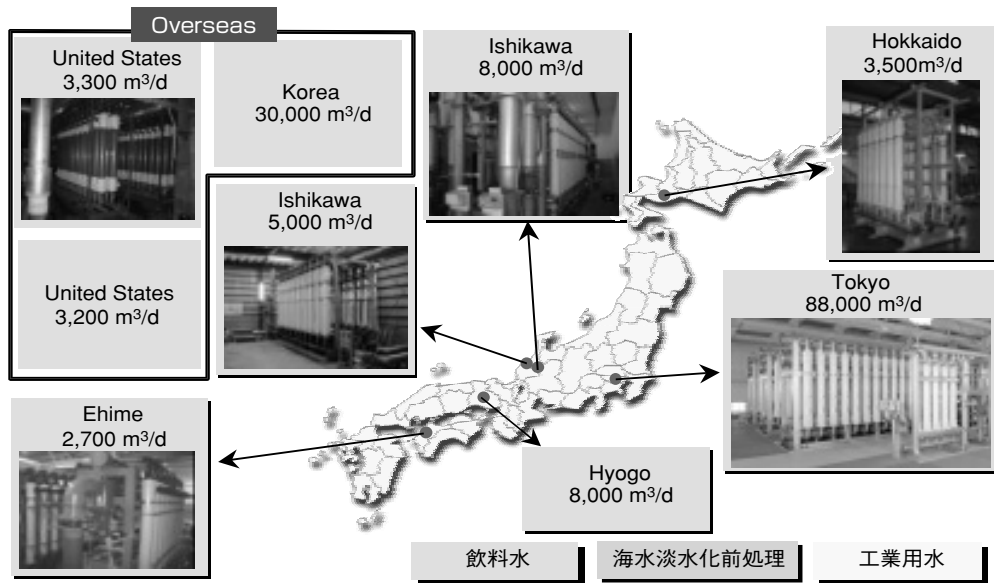
東レは、世界的な水不足対策を予測した事業拡大策として、先行メーカーの性能をしのぐ高性能膜の開発に取り組み、物理的強度、化学的耐久性の高いPVDF素材の採用と、「熱誘起相分離法」を製膜基本原理に、独自の結晶化技術を組み合わせ、高透水性と高強度を両立するPVDF中空糸製膜技術を工業レベルで確立した。

図表7 水源水質に対応した3種類のPVDF製中空糸膜

		清澄水用膜 HFM	表流水用膜 HFS	表流水用膜 HFU
膜の種類		MF膜		UF膜
孔径または分画分子量		0.1 μm	0.05 μm	15万
膜構造		対称構造	非対称構造（複合中空糸膜）	
対象原水	種類	清澄水	表流水	
	平均濁度	～0.05度	0.05～30度	5～100度
特長		清澄水での 高過流速運転可能	低濁度表流水で 高過流速運転可能	凝集前処理不要

出所：東レ株式会社

図表 8 東レの MF/UF 膜納入実績



出所：東レ株式会社

また、水処理用ろ過膜に重要な「低ファウリング性」について、上述の支持層に、東レのナノファブリケーション技術による「低ファウリング性分離機能層」を組み合わせることで独創的な「複合中空糸膜」を開発した（2007年日本化学工学会技術賞受賞）。この「低ファウリング性分離機能層」は、微細で平滑な構造を有し、汚れ物質の膜内部への浸入を抑制し、物理的な洗浄で容易に汚れ物質を膜表面から剥離することが可能となる。

この結果、東レはPVDF中空糸膜モジュールとして、(1)「清澄水」用途のMF膜、(2)「表流水」用途の低ファウリングMF膜、(3)「汚濁表流水」用途のUF膜を開発し、あらゆる水源水質に対応可能な3種類のPVDF製中空糸膜モジュールをラインナップした（図表7）。

2002年6月に国内上水道用途で初受注して以来、2007年4月までに国内外の累積造水量で日量22万m³を受注している。特に、国内最大規模の膜ろ過浄水処理施設である東京都砧浄水場及び砧下浄水所（合計給水量日量88,000m³）で、本膜ろ過プロセスが採用され、2007年3月から供給が始まった（図表8）。

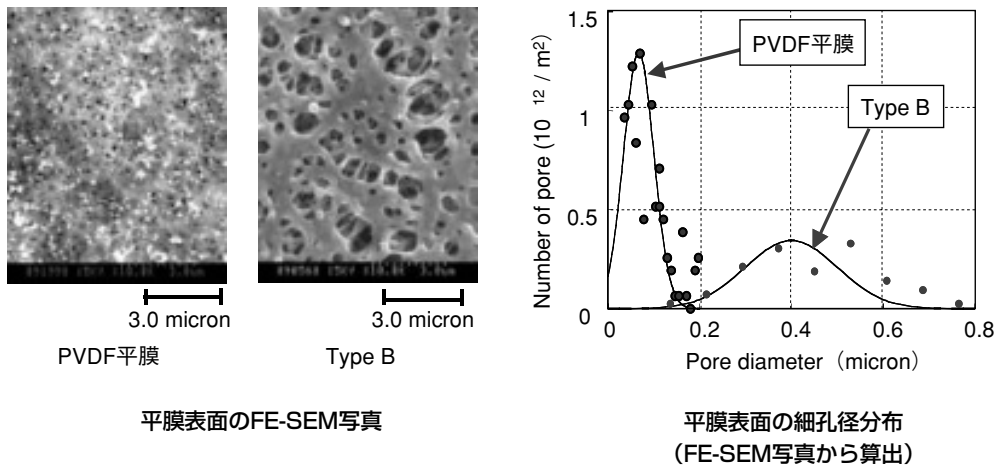
3. 都市下水の処理と再利用（MBR）

水資源を持続的に確保・利用するため、下廃水の処理と再利用の技術が重視されてきた。特に、MBR（メンブレン・バイオ・リアクター）では、従来法で使用される沈殿池を必要としないため、(1)省スペースであること、(2)浄化効率が飛躍的に向上できることから、最近、世界規模で急速に普及し始めたが、効率の向上と安定運転のための膜ファウリング抑制が重要な技術となっている。

なかでも、分離膜には汚泥に対して目詰まりしにくい特性や、高い化学的・物理的耐久性が要求される。東レは、目詰まり防止効果が高い平膜構造で、膜素材としては耐久性が高いPVDFを使用した浸漬型膜モジュールを開発した（図表9）。

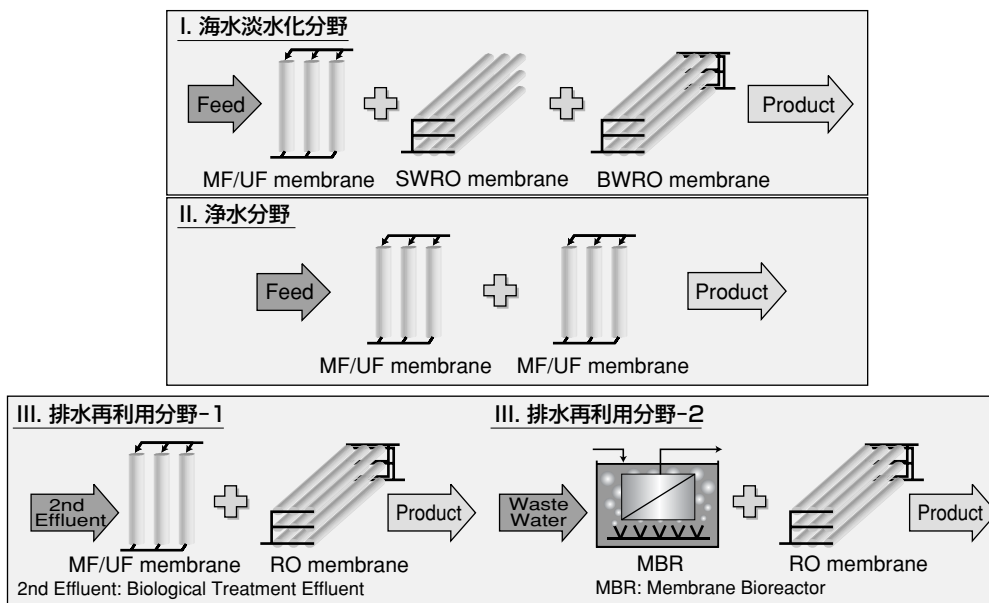
PVDF膜表面の微細孔径は、活性汚泥粒子より細かな約100nmに制御し、孔径分布がシャープでかつ微細孔の数を多くすることにより、汚泥が目詰まりしにくく、かつ透水性を高く維持できる構造とした。海外を中心にテストを進め、特に、欧州の実用化試験では、従来の膜モジュールの2倍以上の性能が実証されたことから、現在では多くの納入実績を得ている（2008年3月現在の受注累積約20万m³/日）。

図表9 MBR用PVDF平膜の基本特性



出所：東レ株式会社

図表10 統合膜処理システム IMS (Integrated Membrane System)



出所：東レ株式会社

4. 統合膜処理システム (IMS)

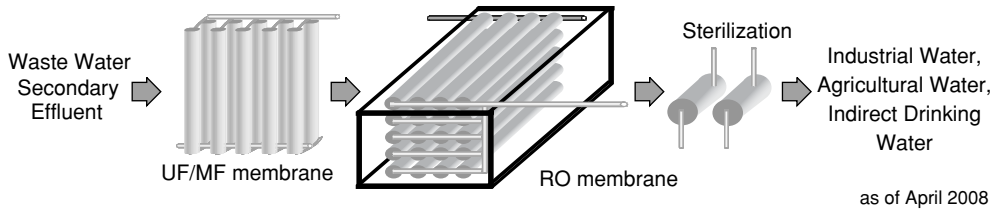
複数の膜による水処理プロセスは、統合膜処理システム (IMS：インテグレートド・メンブレンシステム) と言われるが、様々な水資源及び利用目的に合わせて最適な水処理プロセスを構築出来ることが特長である。特に、当社は、MF膜からRO膜までの全4種類の膜を自前の技術で保有しているため、膜の特長を生かし、最高のパフォーマンスとコスト削減が実現できる (図表10)。

膜による排水再利用の方法は、大きく分けて2

種類になる。下水の2次処理水を膜ろ過後、RO膜で処理する方式と、下水をそのままMBRで処理し、RO膜にかける方式である (図表10/Ⅲ)。

膜利用の排水再利用プラントで世界最大は、クウェートのスレビア (Sulaibiya) プラントである。給水能力32万m³/日の水は農業用水、工業用水として使用されている。都市下水を原水としているが、飲料水相当の良好な水質が得られている (図表11)。本分野では東レのRO膜は高いシェアを有している。

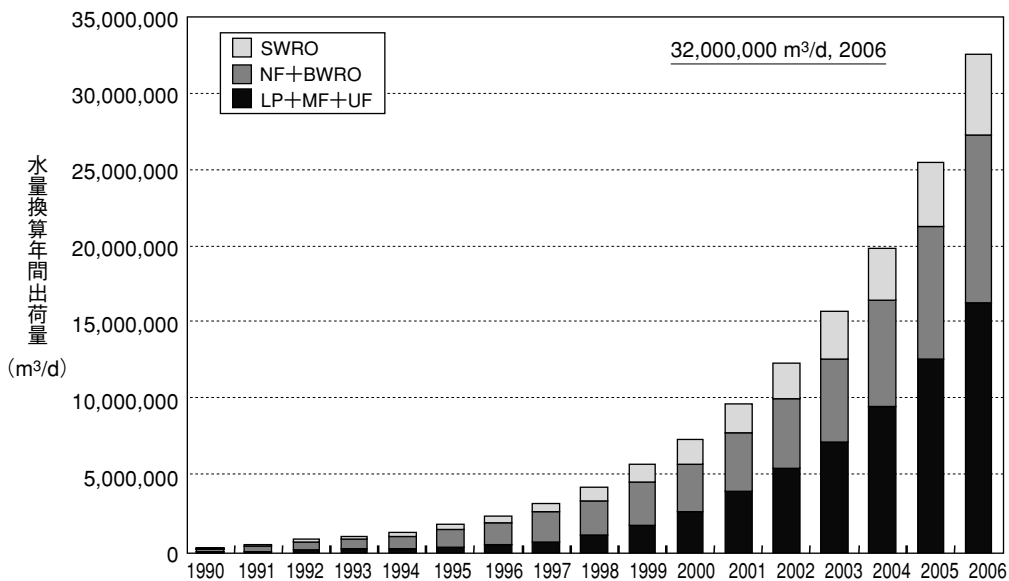
図表 11 世界の大規模・膜利用排水再利用プラント



	Country	Location	Capacity (m ³ /d)	Operation Year	UF/MF Membrane Manufacturer	RO Membrane Manufacturer
1	Kuwait	Sulaibiya	320,000	2005	Norit	Toray
2	Singapore	Changi	228,000	(2009)	Not Fixed	Not Fixed
3	USA	Fountain Valley	220,000	2007	Siemens (Memcor)	Hydranautics
4	Singapore	Ulu Pandan	140,000	2006	Asahi Kasei	Hydranautics
5	USA	West Basin	75,000	1997-2001	Siemens (Memcor)	Hydranautics
6	Australia	Luggage Point	66,000	(2008)	Pall	Toray
7	Singapore	Kranji	40,000	2003	Siemens (Memcor)	Hydranautics
8	Singapore	Bedok	32,000	2003	GE (Zenon)	Hydranautics
9	China	Tianjin	30,000	2006	Siemens (Memcor)	Toray
10	Singapore	Seletar	24,000	2004	Hyflux	Toray

出所：東レ株式会社

図表 12 全膜種の普及状況（累積ベース）



出所：膜分離技術振興協会：浄水膜第2版（技報堂出版），p6, 2008.2

Ⅲ. 日本企業の水処理事業世界展開に向けて

地球環境問題の根本原因は、人口増加と経済成長にあることは明らかである。人類共通の課題として世界的な水不足と水環境汚染の解決に向けて、膜処理技術の開発、普及が目覚ましい勢いでなされている。これは、必要な水量と水質の確保に向けて、水質制御と高速処理に対応できる膜処理技術が必須技術であると認識されてきたことによる。

1. 膜処理法の普及規模

全膜種の普及状況を示す（図表 12）。

河川・湖沼・地下水等の陸水の浄水処理に用いられる MF 膜・UF 膜と海水やかん水の淡水化に用いられる RO 膜等の全膜種の水量換算年間出荷量（2006 年時点）は、累積ベースで日量 3,200 万 m³（1 億 2,000 万人の生活用水に相当する水量）と加速度的に増加していることが明らかになっ

た。これは年率 20～25% の増加であり、世界の人口増加年率 1.3%、水需要の増加年率約 3% を大きく超えているが、推定される 1 年当たり全体の水需要量の増加分 1,000～2,000 万 m³/日に対し、膜の年間出荷量（造水量ベース）は高々 600 万 m³/日であることから、ここ当分の間は膜の受注は高い伸びが続くものと推定できる。

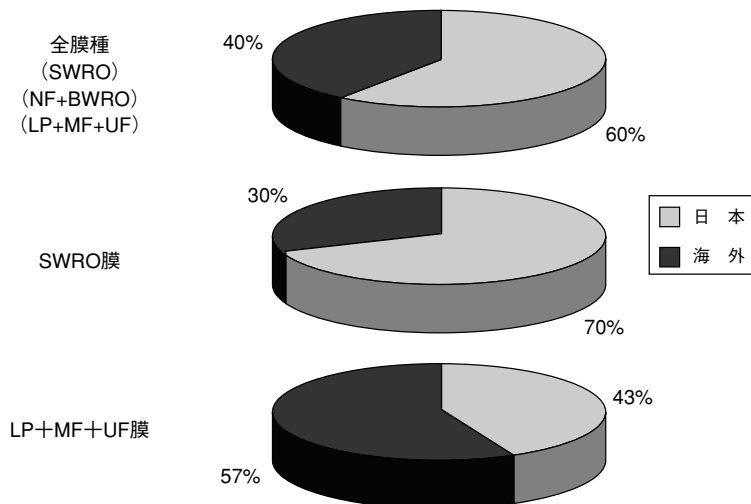
2. 日本の膜メーカーのシェア

膜処理技術の要である膜そのものの供給は、

日本の膜メーカーの占める割合が圧倒的に高いことが明らかになった。特に、海水淡水化用の RO 膜については、約 70% が日系企業であり、全膜種に対しては 60% と高い。MF / UF 膜は、日系企業が 43% で、海外メーカーが優位にある（図表 13）。

これは世界の膜メーカー（図表 14）に示すように、海外メーカーは、M & A によって膜メーカーを買収してきたが、日本の大部分のメーカーは、自前の技術開発にて膜技術を獲得、蓄積した

図表 13 水処理用膜の供給国（日本・海外）別出荷量割合



出所：膜分離技術振興協会：浄水膜第 2 版（技報堂出版），p12, 2008.2

図表 14 世界の膜メーカー

【東レ調査】

		RO	NF	UF	MF	MBR
Overseas	DOW / Filmtec (US)	◎ Filmtech	◎ Filmtech		○ Omex	○ Omex
	Koch (US)	◎ UOP	△ UOP	○ Abcor	○ Abcor	○ Puron
	GE (US)	○	○ Osmonics	◎ Zenon		◎ Zenon
	Siemens (Germany)				◎ Memcor	○ Memcor
	Norit (Netherlands)			◎ X-Flow		○
Japanese	Toray	◎	○	○	○	○
	Nitto Denko	◎ Hydranautics	◎	○	○	
	Mitsubishi Rayon				○	○
	Toyobo	○		△	△	
	Daicel Chemical	○		○		
	Asahi Chemical / Pall (US)			○	◎	○
	Kubota					◎

◎ : High share product ○ : product in the market △ : under development

出所：東レ株式会社

ものであり、水質制御と高速処理について、絶えず性能向上が求められる現在の膜処理技術分野での強さの源泉がここにあるものと考えている。

3. 世界の水処理事業の中での日本企業の位置付け

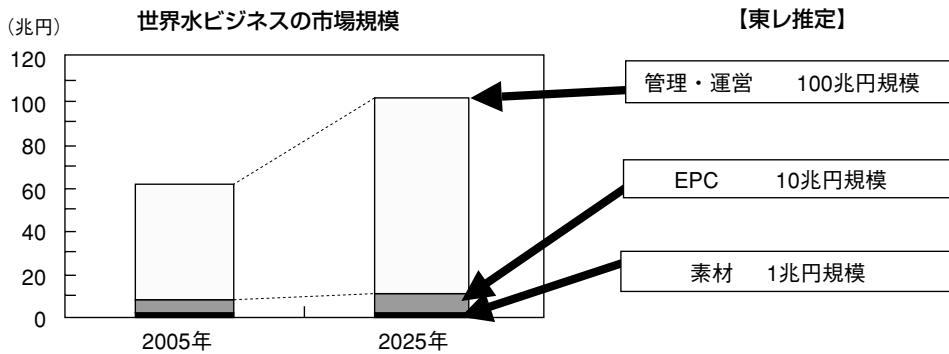
世界の水処理事業について目を向けると、日本は、膜などの素材分野では強いものの、その市場規模は、世界で年間1兆円程度である。水処理事業の本丸である管理・運営分野では、2025年時点で年間100兆円規模に増大すると予想されていることから、この分野への参入が中・長期的な

事業拡大にとって極めて重要であり、日本企業への大きな課題である（図表15）。

水処理事業の形態は、図表16に示すように、（1）水道事業の管理・運用、（2）プラント建設・エンジニアリング、（3）機器・素材の供給の3つに分けられる。

この中で、最近、大きな変化が生じてきているのが、世界の水道事業分野である。水処理技術は、地域特性（水質条件と経済条件）に左右されるので、ローカルな問題として解決することが基本であるが、管理・運営能力を有している欧州の

図表15 世界水処理事業の市場規模



(引用) 産業競争力懇談会: 急拡大する世界水ビジネス市場へのアプローチ (最終報告書), p2, 2008.3
出所: 東レ株式会社

図表16 水処理事業の形態と日本の課題

【東レ推定 2008年5月】

		世界	日本	市場規模予測 (2025年)
水道事業 (上水・下水) 新規・水事業 (造水・再利用)	管理 (資産所有)	公共事業	公共事業	100兆円
	運用 (運転維持管理)	①欧州水メジャー: ヴェオリア (仏)、スエズ (仏) ②M & Aによる新規参入型: GE (米)、シーメンス (独) ③国家戦略型: シンガポール、オランダ、韓国 (ドーサン)、ドイツ	①国際コンソーシアム型 丸紅、三井物産、住友商事、三菱商事、 ②国内民需型 栗田工業 (*)	(60兆円) -2005年-
プラント建設 (EPC)	建設	ヴェオリア (仏)、スエズ (仏)、GE (米)、フィッシア (伊)、ドーサン (韓国)	三菱重工、日立造船、ササクラ、日揮、東洋エンジ、千代田化工、鹿島建設、荏原製作所、日立製作所、栗田工業 (*), オルガノ (*)	10兆円
	エンジニアリング			
機器・素材供給	ポンプ	Sulzer, Calder, Grundfos, ERI	西島製作所、荏原製作所、日立製作所	1兆円
	膜	ダウ (米)、GE (米)、シーメンス (独)	東レ、旭化成、日東電工、クボタ、東洋紡績	

(注) 企業名は、グループ統合会社 (代表例)、*印は、民需主体 (非社会インフラ設備) を示す。

出所: 東レ株式会社

水メジャー（ヴェオリア〔Veolia Water：1853年設立、フランス〕、スエズ〔Suez：1822年創立、フランス〕）や、M & Aによる新規参入のGE、シーメンス（Siemens：1847年設立、ドイツ）、国家戦略型のシンガポール、オランダ、韓国の参入が続いている。

これに対し日本勢は、中東地区におけるIWPP¹として商社が事業化を進めているが、水道・下水道の世界の公共事業分野については、プレーヤーが存在しないのが実情である。

4. 日本企業の水処理事業世界展開に向けて

水道・下水道分野では、水環境問題解決に向けた、(1) 浄水と造水、(2) 下廃水の処理と再利用について、日本は膜を基幹技術とした優れた水処理技術を有していることから、水処理施設の

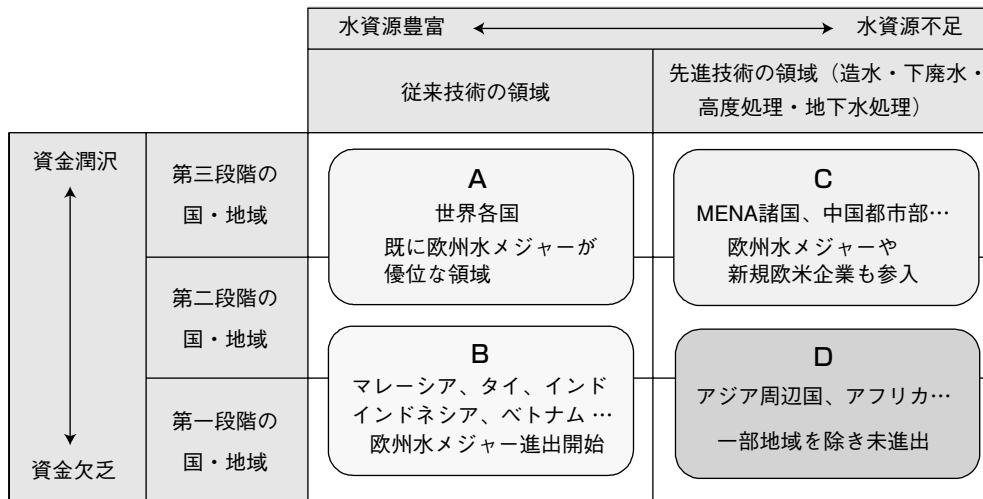
管理と運用を含む水処理事業の全体を統合し、欧米の水メジャーに対峙できる民間系企業の出現が待望されている。

産業競争力懇談会（COCN）²では、世界水ビジネスの戦略マップ（図表17）を作成すると共に、今後の活動方針として、次の3つを提言としてまとめた。

- ① 推進体制の確立／民間フォーラムの設立
- ② モデル事業の創出
- ③ R & Dの推進

2008年7月7日から開催されるG8洞爺湖サミットにおいて、日本政府は、世界の『水・エネルギー・食糧』の問題解決への政策提言発表を検討しており、現在、各方面で鋭意検討が進められている。

図表 17 世界水ビジネス戦略マップ



- A・・・既に欧米水メジャーが優位なエリアであり、他領域から進出を図る。
- B・・・ODAなど日本の国際協力が活発に行われている領域。
- C・・・日本の先進技術を活用した取り組みが可能な領域。
- D・・・潜在的市場規模は大きく、今後のR & Dに期待される領域。

(注) MENA: Middle East & North Africa

出所：産業競争力懇談会：急拡大する世界水ビジネス市場へのアプローチ（最終報告書）、p16, p32, 2008.3

1 IWPP：Independent Water and Power Project, 独立系の造水・発電事業

2 産業競争力懇談会（COCN）：Council on Competitiveness Nippon