

一橋大学 GCOE プログラム
「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」
大河内賞ケース研究プロジェクト

東レ
ポリアミド複合逆浸透膜および逆浸透膜システムの開発

藤原雅俊
青島矢一
三木朋乃

2010 年 12 月

CASE#10-11

本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。このプロジェクトは、大河内賞を受賞した業績について事例分析を行うもので、(財)大河内記念会と受賞企業のご協力をえながら、技術革新の概要やその開発過程、事業化の経緯や成果などを分析している。事例研究を積み重ねて、日本の主要なイノベーションのケース・データを蓄積するとともに、ケース横断的な比較分析を行い、日本企業のイノベーション活動の特徴や課題を探り出すことを目指している。なお、本プロジェクトを進めるに際して、(財)大河内記念会より多大なご支援・ご協力をいただき、心よりお礼を申し上げたい。
(プロジェクト活動の詳細については [http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/reserch/GCOEokochiprize\(A\).html](http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/reserch/GCOEokochiprize(A).html) を参照のこと)。

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

Tel:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp

東レ株式会社
「ポリアミド複合逆浸透膜および逆浸透膜システムの開発」¹

2010年12月24日

京都産業大学経営学部准教授 藤原雅俊**
一橋大学イノベーション研究センター准教授 青島矢一
立教大学経営学部助教 三木朋乃***

*〒603-8555 京都市北区上賀茂本山

masatosh@cc.kyoto-su.ac.jp

**Visiting Scholar

Asia Research Centre, Copenhagen Business School

Dalgas Have 15, DK-2000 Frederiksberg, Denmark

mfu.int@cbs.dk

***〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1

miki@rikkyo.ac.jp

¹ 本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション:実証的経営学の教育研究拠点」からの経費を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果の1つである。ケースの作成にあたっては、以下の方々から多大なご支援をいただいた。心から感謝を申し上げたい。

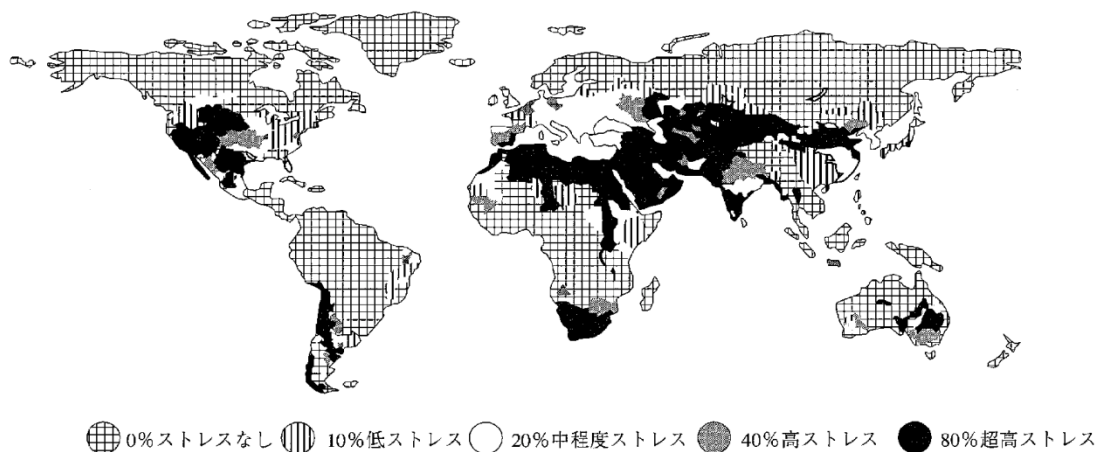
東レ株式会社（敬称略、アルファベット順、括弧内は取材当時の職位）

福井文明（メンブレン生産部メンブレン 第2生産課長）／房岡良成（参事／水処理・環境事業本部 水処理事業部門長）／姫島義夫（研究本部担当部長）／井上岳治（水処理技術部 メンブレン技術課長）／栗原優（フェロー 工学博士／最先端研究開発支援プログラム：“Mega-ton Water System”中心研究者／アジア・太平洋脱塩協会（APDA）会長／日本脱塩協会（JDA）会長）／三入誠司（事務部長）／西岡英二（メンブレン生産部 部員）／富山元行（愛媛工場長）／上田富士男（メンブレン生産部長）／植村忠廣（理事（技術）水処理事業部門 東レシンガポール水研究センター 工学博士）／上野賢司（参事／水処理・環境事業本部 水処理部門（技術・生産）担当）／山本正典（メンブレン生産部 メンブレン第1生産課長）

1. はじめに

目下 100 兆円市場²として世界中の期待を受け、注目を浴びている市場がある。水ビジネス市場である。そもそも、人が簡単に利用できる河川・湖沼などの淡水資源は、地球上に存在する水のわずか 0.01%に過ぎない³。そのなかで、世界的な経済発展、人口増加、そして環境汚染などが起きた結果、水不足が深刻な問題となり始め、大きな水需要を生み出している。図 1 は、2025 年における水ストレスの世界分布予測を示した図である。中東やアフリカを中心として、世界各地で深刻な水不足が見込まれていることに気づくだろう。造水とその供給は、逼迫した社会ニーズとなっているのである。

図 1：現状維持シナリオにおける 2025 年の世界の水ストレス



出所：世界水ビジョン川と水委員会編（2001）p.96。

水ビジネスといっても、その範囲は幅広い。公共事業としての色合いが強い上下水道の維持管理サービスや、超純水・地下水の供給サービスといった、水関連サービスがまず思い浮かぶ。こうした水関連サービスを支えるのが、装置・プラント建設ビジネスである。さらに、装置・プラントのなかで使う膜や薬品、膜ユニットを造るのが、素材・部材ビジネスである。こうした広い領域の中で日本企業がひととき目立つのが、水ビジネスの上流部分にあたる素材・部材ビジネスである。より具体的には、逆浸透膜と呼ばれる膜のビジネスである。

逆浸透膜は孔径 1nm 以下の非常に小さな穴を持つ膜であり、浸透圧原理に基づいて、塩

² 経済産業省（2008）、p. 351。

³ 浄水膜（第 2 版）編集委員会（2003）、p. 15。

分などのイオン成分を水と分離できる機能を持つ。淡水資源を持たない国では、この逆浸透膜を用いて、海水から真水を取り出して水資源を確保している。この逆浸透膜市場で、日本企業の健闘が目立つ。2009年度の世界市場シェアを見ると、Dow（35%）、日東電工（28%）、東レ（20%）、そして東洋紡（7%）と名を連ねる。国別でシェアを分ければ、日本企業が首位に立つ。

これら日系3社のなかで、最も早くから事業に乗り出していたのが東レである。同社が逆浸透膜開発に正式に着手したのは1968年。そして35年後の2003年、東レは、従来以上に高性能な逆浸透膜を開発したことに加え、その優れた生産技術や海水淡水化システムなどが総合的に評価され、「ポリアミド複合逆浸透膜および逆浸透膜システムの開発」によって第49回大河内生産賞（2002年度）を受賞した⁴。では、これだけ長い年月のなか、東レはいったいどのようにして逆浸透膜の開発を進めてきたのだろうか。

2. 技術と業界の概要

2.1 膜処理法の概要

まずは水処理技術の概要を記そう。水処理技術は、人口の増加とともに発展してきた技術である。かつて人は、自然の浄化作用を利用して水を確保したり、処理したりしていた。しかし、それでは急増する人口に追いつかなくなってきた。そこで1800年代から水処理技術が生まれ、発展してきた。

主たる技術は、その用途によって異なる。浄水処理用途では砂濾過を用いた緩速濾過システムや急速濾過システムが、下廃水処理用途では微生物による処理システムが生まれた。海水淡水化用途では、蒸発法が長く主流だった⁵。これは文字通り、海水を蒸発させた後に冷やして真水を得る方法である。蒸発させるのに大量の石油が必要なことから、水資源が極端に少なく、かつ、石油による熱資源が豊富な中東地域を中心に採用されてきた。こうした流れの中で近年注目されているのが、膜を利用した水処理技術である。これは一般に膜処理法と呼ばれている。

膜処理法とは、半透膜と呼ばれる分離膜を用いて不純物を取り除く方法のことである。半透膜とは、ある大きさ以上の分子またはイオンは通さず、それより小さい分子やイオンだけを通す膜のことである。半透膜は、不純物の除去方法によって大きく2つに分け

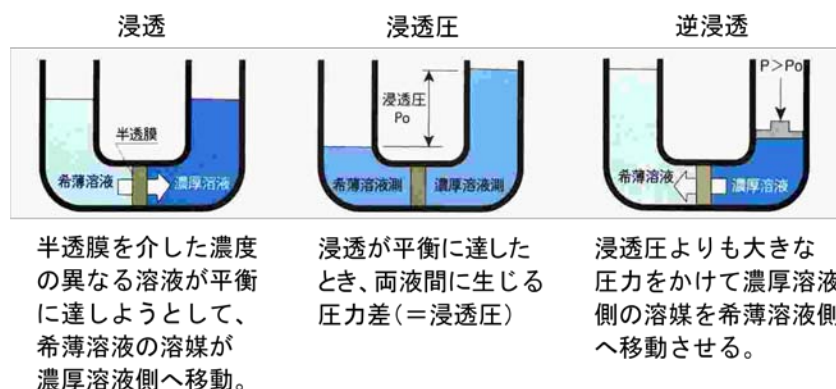
⁴ この間、東レは日本化学会化学技術賞（1992年「架橋芳香族ポリアミド複合逆浸透膜の開発」）および化学工学会技術賞（1994年「超純水製造用架橋芳香族ポリアミド系複合逆浸透膜エレメントの開発」）を受賞している。

⁵ 海水淡水化の方法には他に電気透析法がある。ただし、その比率は5.5%（1996年）と極めて小さい。

られる。濾過原理に基づいて不純物を除去する膜と、浸透圧原理に基づく逆浸透膜である。濾過原理に基づく膜は、一般的な濾過をイメージすれば理解できる。だが、浸透圧原理に基づく逆浸透膜については、多少の説明が必要であろう。

図2は、浸透圧原理を説明するための図である。左から順に見てほしい。通常、容器に入った水を半透膜で仕切って、一方の塩類濃度を高く、もう一方を低くすると、塩類濃度の低い方の水が高い方に向けて半透膜を透過していき、容器の塩類濃度はどちらも同じになろうとする。これを浸透と呼び、平衡に達したときに生じる圧力差を浸透圧と呼ぶ。ところが、塩類濃度の高い方の水に、浸透圧より大きな圧力をかけると、濃度の高い方から低い方へと水が逆に浸透していく。これが逆浸透と呼ばれる現象である。この原理を用いて不純物を取り除く半透膜を、逆浸透膜と呼んでいる。

図2： 浸透圧原理



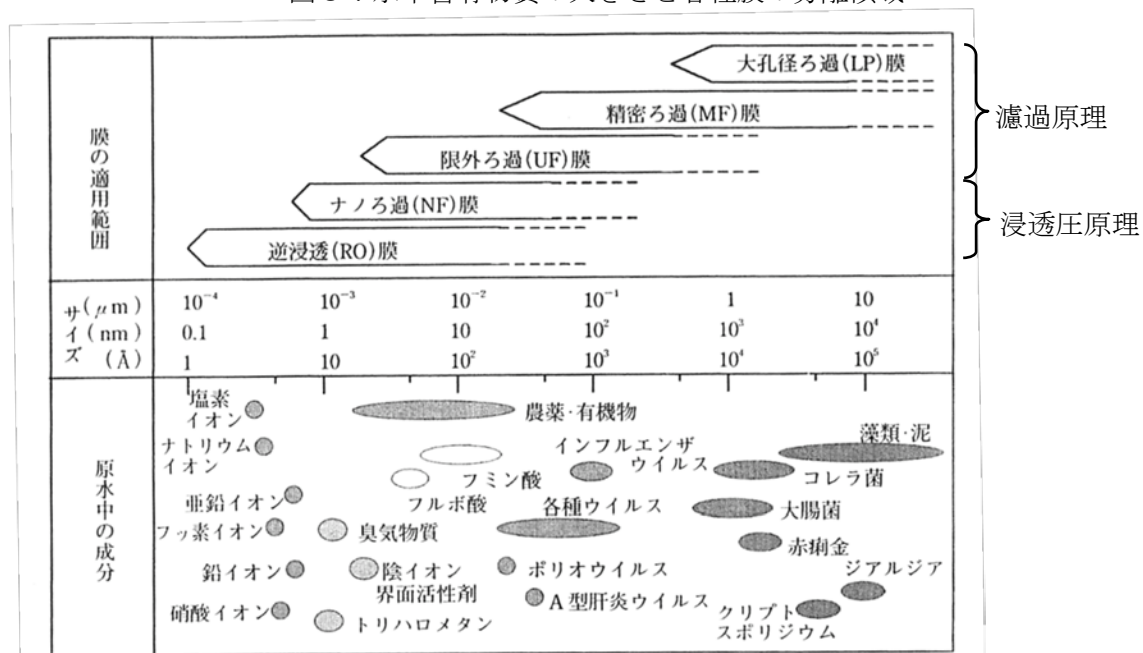
出所：東レ講演資料。

これら大きく2つに分かれる半透膜は、そこに備わる孔の大きさによって、さらに呼び名が異なっている。図3は、その孔の大きさと、水に含まれる不純物の大きさを比較した図である。濾過原理に基づく膜は、孔の大きい順に大孔径濾過膜(LP)、精密濾過膜(MF)、限外濾過膜(UF)の3つに分かれていく。一方、浸透圧原理に基づく半透膜は、孔の大きい順に、ナノ濾過膜(NF)、逆浸透膜(RO)に分かれていく。もちろん、孔の小さい方がより細かな不純物を取り除ける。とくにRO膜の孔径は1nmを下回り、塩分などのイオン成分も除去できる。そのためRO膜は海水淡水化に適している。

このうち、本ケースが対象とするのはNF膜やRO膜といった半透膜である。なお、一般に逆浸透膜という言葉は、浸透圧原理に基づく半透膜(NF膜とRO膜)を総称して指す

場合と、そのなかでも孔径が 1nm を下回る半透膜（RO 膜のみ）を指す場合とがある。本ケースでは、NF 膜と RO 膜を総称する場合には逆浸透膜と呼び、RO 膜のみを指す場合には RO 膜と区別して呼ぶ。では、逆浸透膜の構造を説明していこう。

図 3：水中含有物質の大きさと各種膜の分離領域



出所：浄水膜編集委員会（2003） p.34。をもとに著者作成。

2.2 逆浸透膜の構造と製品形状

逆浸透膜は、緻密層と支持層という 2つの層からなる。緻密層とは、膜表面に存在し、不純物を取り除く層である。支持層は、不純物の除去にほとんど寄与しない多孔質の層であり、これが膜の大部分を占める。不純物の除去に寄与しない支持層を持つのは、極度に薄い緻密層だけだと破けてしまうからである。

緻密層と支持層に用いる素材が同じ場合もあれば、異なる場合もある。同一素材を用いる膜の場合、その構造が膜の厚み方向に非対称となっているため、非対称膜と呼ばれる。非対称膜の代表が酢酸セルロース膜（以下、CA 膜）である。逆浸透膜として最初に工業化された材料であり、現在でも利用されている。

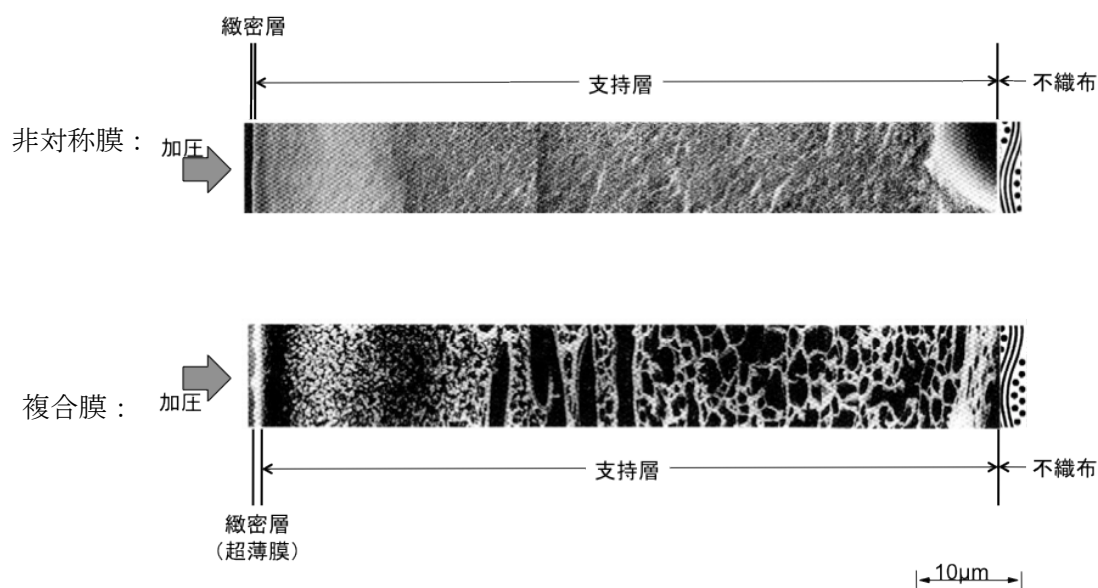
一方で複合膜は、それぞれの機能に最適化した異なる素材を用いて、緻密層と支持層を作ることができる。非対称膜との断面の違いは、図 4 に示される通りである。複合膜の場合、支持層の表面に緻密層を改めて作る必要がある。その形成方法には、支持層の表面

にポリマーを直接塗布する方法、モノマーを塗布してから重合する方法、水溶性ポリマーを架橋する方法など様々発明されてきたが、現在では界面重縮合という方法が主流となっている。重縮合とは、複数の化合物が結合しながら連鎖的につながって高分子を生成することであり、界面重縮合では、水相と有機相の境界面（つまり界面）において重合体が連続的に形成されていく。

より具体的な作り方は、次の通りである。まず、不織布の上にポリスルホン製の多孔質膜を支持層として作る。その表面にアミンの水溶液を塗布し、水相を形成する。そして、その上から酸塩化物の有機溶媒溶液をかけて界面重縮合させる。こうして厚さ $0.2\mu\text{m}$ 以下の薄いポリアミド膜を緻密層として作り出す。この様子は、補図1に示すとおりである。

界面重縮合の利点は、形成過程で膜が破けても再び水相と有機相が触れ合うために膜が再び形成できる、という点である。この自己修復性は、膜形成の難しさを和らげている。

図4：非対称膜と複合膜の断面写真



出所：東レ講演資料、および浄水膜（第2版）編集委員会編（2003）p.65 をもとに筆者作成。

逆浸透膜は、その後の製品形状に応じて、スパイラル型、中空糸型、そしてチューブ型に分けられる。図5にその形状を示している。スパイラル型は、まず平たいシート状の膜を作り、それをパイプに巻きつけて製品化する。できあがった製品は、逆浸透膜エレメントと呼ばれている。この大きさは業界で事実上の標準となっており、直径8インチ（約20cm）、長さ40インチ（約1m）である。一方、中空糸は、中が空洞になった細い糸のことであり、

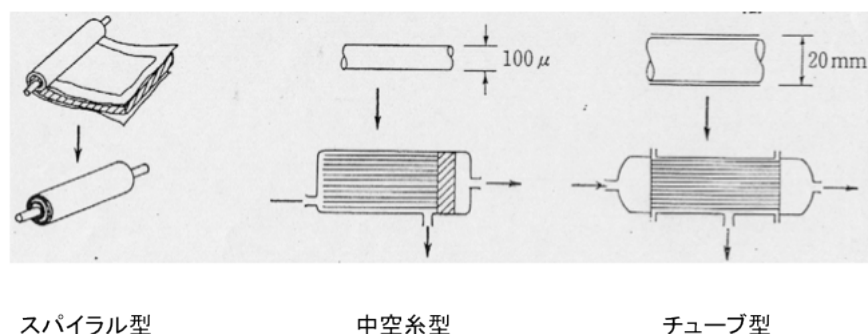
医療用の人工透析や、水処理用の MF 膜・UF 膜で主流となっている。チューブ型は中空糸型と似ているものの、中空糸の内径はより大きい。これら 3 つのタイプのうち、本ケースが主に扱うのは、最初に指摘した、スパイラル型の逆浸透膜エレメントである。

海水淡水化に用いられる RO 膜エレメントが海水から真水を取り出す仕組みは、図 6 に示される。図の左側から海水（供給水）を入れ、圧力をかけて RO 膜面を透過させながら、塩分を取り除く。エレメント内の RO 膜は側面が封止された封筒状になっているため、RO 膜の内側に入った透過水は、透過水流路材を通り、口の開いている中央部分に誘導されていく。パイプの側面には透過水を集める穴が開けられており、エレメントの中央部分からパイプへと集水される。こうして、真水（透過水）が中心パイプから右側へ出ていくのである。一方、残った水（濃縮水）は原水流路材に導かれ、同じく右側から排出される。先に述べたように、濾過・塩分除去には圧力をかける必要がある。そのため、エレメントは圧力容器に入れて使われる。

スパイラル型の長所は、熱に強く、丈夫であり、さらに汚れにくいことが挙げられる。一方の中空糸型の場合、流路材が不要であるため、膜の集積度と容積効率を高められる。その結果として、膜面積あたりの透水性能が低かったとしても、膜モジュールの単位容積あたりの濾過流量は高められる、という長所が挙げられる⁶。

以上が、膜処理法、逆浸透膜、そして製品構造の概要である。話がやや込み入ったけれども、半透膜には濾過原理に基づく膜（LP 膜、MF 膜、UF 膜）と浸透圧原理に基づく逆浸透膜（NF 膜、RO 膜）があり、逆浸透膜はその素材に応じて非対称膜と複合膜に分かれる、と考えてもらえば良いだろう。そして、逆浸透膜をどのような製品に仕上げるかによって、スパイラル型、中空糸型、チューブ型と分かれるわけである。

図 5：製品形状



スパイラル型

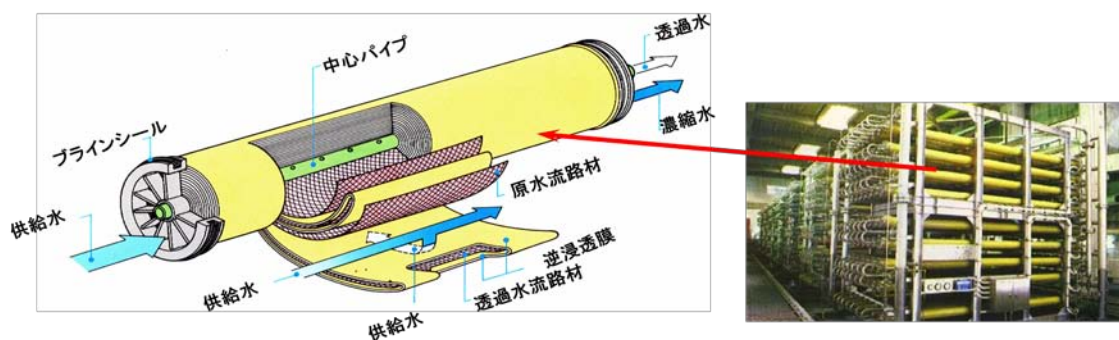
中空糸型

チューブ型

出所：東レ講演資料

⁶ 浄水膜（第 2 版）編集委員会（2003）、p. 87。

図6：RO膜エレメントの構造



出所：東レ講演資料

2.3 市場状況

まず市場全体の動きを確認しよう。造水需要は、近年急速に拡大している。世界脱塩協会によれば、世界の脱塩プラントにおける累積造水量は、1980年の507万tから、1480万t(1990年)、2670万t(2000年)へと増え、2008年には5332万tを記録している(IDA, 2009)。新規需要も、95万t(1980年)から89万t(1990年)、160万t(2000年)、そして557万t(2008年)という推移を示している。とくに2000年代に入ってから伸びが著しい。脱塩プラントは必ずしも逆浸透膜の使用を意味しないけれども、2003年以降の伸びは、逆浸透膜を用いた海水淡水化プラントが牽引しているという。

造水需要の拡大に合わせて、たしかに逆浸透膜の市場規模も拡大している。その世界市場規模は、690億円(2007年度)、722億円(2008年度)、そして549億円(2009年度)と推移している(富士経済, 2009; 2010)。金融危機の影響で2009年度は落ち込んだけれども、長期的には右肩上がりだと考えられている。

逆浸透膜の用途は、大きく4つに分けられる。まず最初に開かれた用途は、かん水淡水化用途であった。これは、河川や湖沼水など低濃度の塩分を含む水から塩分を除去・処理して淡水化する用途のことである。今現在で最も大きな用途である。次に、半導体向け超純水製造用途である。1970年代から80年代にかけて半導体産業が発展していくなか、高性能な半導体を製造するために超純水が求められ、不純物をより除去できる逆浸透膜がその役割を果たした。

続いて、海水淡水化用途が開かれた。もともと逆浸透膜の開発は、この海水淡水化を目的としてアメリカで始まったものである。ただしそのハードルは高く、なかなか産業として成り立たなかった。ところが技術進歩の結果、2000年代に入って逆浸透膜を用いた海水淡水化が急速に普及したのだった。そして最後に、近年拡大し始めたのが下 wastewater 再利用用

途である。文字通り、下廃水を処理して再利用可能にするための用途である。

次に、市場のプレイヤーに眼を移そう。表1は、世界の膜メーカーと膜製品群を示したものである。2010年時点で、NF膜を供給する企業5社、RO膜を供給する企業9社をそれぞれ確認できる。各社のシェアは、表2に示す通りである。RO膜とNF膜の供給企業はほぼ同じであり、RO膜のシェアもこれに近いと考えられる。

2010年現在、海水淡水化用RO膜市場には、スパイラル型の架橋芳香族ポリアミド系複合膜と、中空糸型の（三酢酸セルロース系）非対称膜の2種しか存在しない。表3は、各社が採用しているRO膜と製品形状をまとめた表である。東レ、Dow社、日東電工、Koch社が、ポリアミド系のスパイラル型複合膜エレメントを採用していることがわかる。東洋紡1社だけが、中空糸型の非対称膜を採用している。

膜製品を購入するプラント・メーカー側からすれば、同系統の素材で代替可能なメーカーが複数存在する、ポリアミド系のスパイラル型複合膜エレメントを導入した方がリスクは小さい。したがって、今日ではポリアミド系のスパイラル型複合膜エレメントが市場の主流を占めている。2009年度のデータによれば、ポリアミド系逆浸透膜が92%に達し、セルロース系はわずか8%にとどまっている（富士経済、2010）。

では、これらの逆浸透膜はいったいどのように開発され、市場はどのように立ち上がっていったのであろうか。次節では、まず逆浸透膜開発の歴史から辿っていこう。

表1：世界の膜メーカーと膜製品群

		RO膜	NF膜	UF膜	MF膜	MBR膜
海外	Dow Chemical(US)	◎	◎		○	○
	Koch(US)	○		○	○	○
	Generarl Electric(US)	○	○	◎		◎
	Siemens(Germany)					○
	Norit(Netherlands)			◎		○
	Woongjin Chemical(Korea)	○	○			
	MOTIMO(China)			○	○	○
	Vontron(China)	○				
日本	東レ	◎	○	○	○	○
	日東電工	◎	◎	○	○	
	三菱レーヨン				○	○
	東洋紡	○		○		
	クボタ					◎
	旭化成			○	◎	○
	ダイセル化学	○		○		
	クラレアクア			○	○	
	メタウォーター				○	

◎：高シェア品 ○：市販製品

出所：東レ講演資料

注1：MBR膜（Membrane Bio-Reactor）とは、膜分離活性汚泥法のことである。

注2：東レの特徴は、5種類の膜を一貫して自社開発してきたことである。

表2：逆浸透膜の世界市場シェア（金額ベース、%）

社名 年度	Dow Chemical	日東電 工	東レ	東洋紡	Woongjin Chemical	Koch	Trisep	その他
2008	39.1	27.0	16.2	5.3	3.5	n.a.	n.a.	9.0
2009	34.6	28.2	20.0	7.3	2.7	2.6	1.8	2.7

出所：富士経済（2009；2010）

表3：世界市場における海水淡水化用RO膜

膜メーカー	製品	膜素材	膜	製品形状
東レ	TM-800	架橋芳香族 ポリアミド (PA)	複合膜	スパイラル型
Dow/FilmTec	SW-30			
Koch/Fluid Systems	TFCL-HP			
日東電工/Hydranautics	NTR-SWC			
東洋紡	HOLLOSEP	三酢酸セルロース (CTA)	非対称膜	中空系型

出所：東レ（2010年7月15日講演会）をもとに筆者作成。

3. 逆浸透膜の開発史

3.1 米国における初期の探索研究：1950年代⁷

1950年代、アメリカのフロリダ大学とカリフォルニア大学ロサンゼルス校（UCLA）の

⁷ 初期の歴史に関しては、主に Glater (1998) に依拠している。

研究者たちは、それぞれ独立に、逆浸透膜の探索研究を行っていた。

フロリダ大学では、塩水局 (The Office of Saline Water) の支援のもと、Charles Reid が海水淡水化の研究を進めていた。塩水局は、将来の水不足を懸念したアメリカ政府が 1952 年 7 月 2 日に塩水法 (Saline Water Act) を成立させたことを受け、内務省が設置した機関である。塩水局は国家レベルでの海水淡水化研究プログラムを推進し、その一環として Reid が研究を進めたのであった。

Reid は、1953 年に逆浸透膜の有効性を示し、1955 年には「海水淡水化のための浸透膜」という研究プロジェクトを提案して具体的な開発を進めていった。市販の様々なポリマーフィルムを試した結果、Reid は、酢酸セルロース膜が最も高い脱塩率を示すことを発見した。そして 1959 年、Reid と Ernest Breton は、酢酸セルロース膜の脱塩メカニズムを明らかにするとともに、新たな脱塩システムを発表する (Reid and Breton, 1959)。しかし、このシステムでは造水量が 1GFD (gallons per square foot per day) にも達せず、実用化にはほど遠かった。

一方、カリフォルニアでは、戦後、人口増加が急速に進み、水不足が深刻な問題となっていた。そのため UCLA では、海水淡水化の研究に高い優先度が与えられていた。UCLA の海水淡水化研究はフロリダ大学より一足早く、1949 年に Gerald Hassler が提出した "The Sea as a Fresh Water" というタイトルのレポートに始まる。Hassler は、続く 1950 年に逆浸透膜を使った淡水化を提案し、そのアイデアを検証するための実験装置が 1954 年に完成した。しかし、Hassler が提案した技術でも十分な造水量を確保できず、このプロジェクトは 1960 年に中止された⁸。

UCLA には、Samuel Yuster が率いるもうひとつ別のプロジェクトがあった。逆浸透膜の実用化を大きく前進させたのは、このプロジェクトに参加していた Srinivasa Sourirajan と Sidney Loeb であった⁹。二人は、酢酸セルロース膜が厚み方向に非対称であり、その片面が脱塩機能を果たすことを発見する。その後、彼らは市販の酢酸セルロースポリマーを使って膜の生成を始め、高い脱塩率と造水量を両立する酢酸セルロース膜 (CA 膜) の開発に成功する。その造水量は、Reid が実現した量の 10 倍を超えた。この成果は 1960 年に発表され¹⁰、Loeb-Sourirajan 膜 (Loeb-Sourirajan membrane) と呼ばれた。

3.2 逆浸透膜の実用化：1960 年代

Loeb-Sourirajan 膜は、1961 年には特許や論文、種々の発表を通じて公知となり、低コ

⁸ この間の研究結果は、Hassler と McCutchan が 1960 年に発表した (Hassler and McCutchan, 1960)。

⁹ Loeb は、1958 年に新たにプロジェクトに加わった。両者とも Yuster を指導教官としていた。

¹⁰ Loeb, S. and S. Sourirajan (1960) "Sea Water Demineralization by Means of a Semi-permeable Membrane," UCLA-SEAS Report No. UCLA-ENG-60-60.

ストの脱塩装置の可能性が広く知られるようになった。1960年代前半には、Havens Industries社が彼らの膜を使い、チューブ型逆浸透膜の脱塩プラントを実用化した。Aero-jet-General Corporation社も、彼らの逆浸透膜を用いて工業化を進めた¹¹。

この頃、実用化を最も強く推し進めたのは、サンディエゴのGeneral Atomic社だった。同社では、Ulrich MertenやBob Riley、George Lonsdale、Donald Brayといった若い研究者が、塩水局からの支援を受けながら積極的に研究開発を進めていた。彼らは、1963年に現在の主流となるスパイラル型逆浸透膜エレメントを開発し¹²、1968年に特許を取得した¹³。

60年代中盤になると、Dow Chemical社やDuPont社といった大手企業も逆浸透膜の工業化に向けた開発を本格化させた。Dow社では、同社のHenry Mahonが1950年代後半から進めていたCA膜の研究に基づいて、中空糸型エレメントを開発した。しかしこれは性能面でLoeb-Sourirajan膜に勝てず、事業としてはうまくいかなかった。

CA膜を採用したDow社に対し、DuPont社は合成膜の開発を進めた。1967年、彼らは芳香族ポリアミド膜を合成し、それに基づいて中空糸型エレメントを開発する。これは、造水量でCA膜を下回りながらも脱塩率で勝る膜であり、海水淡水化に適していた。そのため、DuPont社がこれを製品化して「Permasep」という商品名で販売し始めると、高い人気を集め、当時としては商業的にも大きな成功を収めた。後述するように、このDuPont社の開発成功が、東レが逆浸透膜の開発を始めた直接のきっかけとなる。

このように60年代は、General Atomic社のCA膜によるスパイラル型エレメントとDuPont社によるポリアミド膜の中空糸型エレメントが市場を牽引していた。

3.3 複合膜の開発と工業化の加速：1970年代から80年代

70年代に入ると、CA膜の性能向上と実用化が進む一方で、複合膜の開発も進んだ。複合膜の開発では、支持層の表面にいかにして緻密層を形成するかが重要になる。そこで、ポリマーの塗布、モノマーを塗布して重合、水溶性ポリマーの架橋、表面組成の修正、界面重縮合など、様々な方法が模索された。これらの中で主流となるのが、アミンと酸塩化物の界面重縮合である¹⁴。

界面重縮合による複合膜の開発で重要な役割を果たしたのが、John Cadotteである。Cadotteは、MRI (Midwest Research Institute) という非営利研究機関のNorth Star

¹¹ ただし十分な経済性を得られず、その後、事業から撤退している。

¹² Global Water Intelligence (2008)

¹³ US Pat. 3,367,504 (発明者：Julius C. Westmoreland) および 3,417,870 (発明者：Donald T. Bray)。なおこのエレメントは、世界最大規模のかん水淡水化用プラントとして1971年に日本で実用化された。

¹⁴ この方法は、1965年にMoganによって報告されたのが最初である (Uemura and Henmi, 2008)。

Division に所属する研究者であった。1972 年、彼は界面重縮合による逆浸透膜を初めて開発し、脱塩率と造水量をともに飛躍させることに成功する。

現在の複合膜の基本構造を発明したのも Cadotte であった。1977 年、Cadotte は界面重縮合によって架橋芳香族ポリアミド複合膜を開発することに成功した¹⁵。この 2 官能アミンと 3 官能酸塩化物による架橋芳香族ポリアミド複合膜は、その後、逆浸透膜の標準となった (Baker、2004)。翌 1978 年、Cadotte は仲間とともに独立して FilmTec 社を設立、同年に米国特許を取得した。この特許は、特許番号が 4,277,344 であることから一般に“344 特許”と呼ばれ、逆浸透膜開発における重要特許となった¹⁶。Cadotte が開発した逆浸透膜は、その後、FilmTec 社から「FT-30」として発売された。

一方、General Atomic 社の Riley も界面重縮合による複合膜の開発を進めていた。彼の取り組みは、Cadotte よりも早かった。同社は 1974 年に逆浸透膜関連事業を UOP (Universal Oil Products) 社傘下の Fluid System 社へ売却したため、その翌 1975 年に Riley が開発した複合膜は、Fluid System 社から商品化された。この製品は、1979 年にサウジアラビアの Jeddah の大型海水淡水化プラントに納入された。

80 年代に入ると CA 膜、複合膜ともに、本格的な実用化の段階に入っていた。CA 膜で事業を展開していた Dow 社は、自社特許を売却した後、1986 年に FilmTec 社を買収して 100% 子会社化し、複合膜の技術を取得した。これにより、FilmTec 社の特許、生産設備、そして Cadotte 自身も Dow 社に移ることとなった。こうして Dow 社は複合膜での事業化を加速させ、世界のトップに躍り出ていくことになる。

1980 年代は、半導体産業が発展した時期でもあった。高性能化が進む半導体製造用に不純物のより少ない超純水が必要とされ、その超純水製造用に逆浸透膜の需要が急増していた。この段階では日本企業も多く活躍し始める。帝人や旭化成、住友化学、日東電工、東洋紡などが逆浸透膜の研究開発を行っていた。これらの企業の中で、最終的に RO 膜市場で健闘しているのは、東レと日東電工、東洋紡の 3 社である。

1968 年に逆浸透膜研究を正式に始めた東レは、70 年代は CA 膜で工業化する一方で、複合膜の研究開発も進めていた。彼らは新たな複合膜を開発して他社を凌駕する脱塩率を実現したものの、性能の安定性に問題があり、事業的な成功には至らなかった。事態が変わるのは、1985 年に同社が 4 成分系の高性能芳香族ポリアミドを発明し、1987 年に半導体工

¹⁵ Cadotte は、界面重縮合のみならず様々な方法を検討していた。そして、Luciano Scalla らの特許 (US Pat. : 3,744,642) にヒントを得て、最終的に界面重縮合に移行していった。

¹⁶ FilmTec 社を買収して 344 特許を得た Dow 社は 1991 年、日東電工が買収した Hydranautics 社や Koch 社を特許侵害で訴えている。しかし裁判の結果、334 特許に関わる発明は、MRI 時代に Cadotte が政府支援プロジェクトのなかで行ったものと判断され、344 特許はアメリカに帰属した。これにより、344 特許を使う全ての企業がアメリカに特許料を支払うこととなった。

場の超純水製造用に工業化したときからである。これが大河内賞を受賞した技術である。

日東電工の逆浸透膜開発は 1973 年に始まる。同社は、CA膜では他社技術を導入した後、急成長する半導体産業に目を付けて 1985 年から超純水向け事業へ傾注していった。1986 年には滋賀事業所に膜工場を設立し、膜製品の供給体制を整えた。さらに翌 1987 年には、アメリカのサンディエゴに拠点を置く Hydranautics社を 100%子会社化する。日東電工は、これを契機として複合膜事業の展開を加速させていった。東洋紡は、1972 年に非対称膜の開発に着手し始め¹⁷、1978 年に中空糸型逆浸透膜を開発、1979 年から「Hollosep」という商品名で発売している。以来、同社は中空糸型非対称膜を一貫して開発販売している。

以上が、1980 年代までの逆浸透膜開発の流れである。次節では、こうした開発の流れの中で、東レがどのようにして開発に着手し、展開してきたのかを明らかにしていく。

4. 東レにおける逆浸透膜開発

4.1 逆浸透膜開発の着手

1967 年、DuPont 社が芳香族ポリアミド中空糸の逆浸透膜の開発に成功した、というニュースが飛び込んできた。このニュースが、東レが逆浸透膜の開発に着手するきっかけとなった。「Reverse Osmosis とは何か」。DuPont 社を技術開発上のベンチマークとしていた東レでは、すぐに複数の研究組織において逆浸透膜に関する調査が始まった。

繊維研究所産業資材研究室には、ニューヨークの駐在員から DuPont 社による開発成功の情報がいった。当時研究員であった梅林寺良一は、非対称酢酸セルロース膜（CA 膜）の開発に取り組んでいった。梅林寺が開発する CA 膜を使った逆浸透膜エレメントの開発を担当したのは、エンジニアリング研究所の金丸直勝の開発チームであった。DuPont 社のニュースを機に湧き上がった東レの逆浸透膜研究は、翌 1968 年に正式に開始した。

加えて、中央研究所も独自の調査に基づき DuPont 社の情報を得ていた。そして 1970 年、応用研究室の池田幸重郎を中心として、ポリアミド複合膜の開発に着手した。こうして、逆浸透膜の開発は、繊維研究所産業資材研究室、エンジニアリング研究所、中央研究所の応用研究室の 3 カ所で並行して進められていった。

これら 3 つの部門が逆浸透膜関連の研究開発を進める一方で、後に東レの逆浸透膜開発を率いることになる栗原優が、1970 年 9 月、アメリカのアイオワ大学に留学する。ただし、当初の留学目的は、逆浸透膜の開発ではなかった。1963 年に入社した栗原は、留学するま

¹⁷ 澤田 (2010)

での間、基礎研究所で5年、中央研究所で2年過ごし、一貫して耐熱性ポリマーの研究を行っていた人物である。当初の留学目的も、耐熱性ポリマーの開発にあった。

しかし栗原は、留学先では耐熱性ポリマーの研究を続けるのではなく、新しい研究をやりたいと考えた。そこで栗原は、アイオア大学の指導教授に研究テーマのリストアップを依頼する。そこにあがったテーマの一つが、メンブレン（膜）だった。膜であれば、海水淡水化への応用もあるうえ、人工腎臓にもつながる。興味をもった栗原は、膜の研究を始めることにした。当時の様子を栗原は次のように語っている。

当時の留学生は意気込みが高いから、東レで全くやっていない仕事を持ち帰りたいという気持ち強い。・・・生意気にも「先生のやっている研究テーマをリストアップしてください」といったらメンブレンというのがあった。これ面白そうだとしたら、海水淡水化も人工腎臓もあるし。ポリマー加工してメンブレンにするんだと。「私にこのテーマをやらせてください」と。

ただし、膜の研究とはいっても、栗原は逆浸透膜の研究をしたわけではなかった。栗原のテーマは海水淡水化の脱塩膜ではあったが、逆浸透膜のように圧力をかけて水を押し出すのではなく、逆に塩を押し出す技術の研究だった。アメリカ内務省の塩水局から50%、東レから50%の研究費をもらい、栗原はこの研究を進めていった。

当時、塩水局は脱塩技術を含むレポートを定期的に発行していた。そこで栗原は、日本で逆浸透膜の研究を行っていた梅林寺や池田にそれを送付していく。帰国する1972年までの間、栗原は、逆浸透膜の研究こそ直接的には行っていなかったものの、逆浸透膜に関するアメリカでの開発状況に精通し、国内の開発部隊との間の情報の結節点としての重要な役割を果たしたのであった。

1972年9月、留学から帰国した栗原は、エンジニアリング研究所環境技術研究室の配属となった。当時、東レは研究開発システムの中央化を進めていた。その流れを受けて1971年、当初3つの部門で並行して進めていた逆浸透膜の研究はエンジニアリング研究所の環境技術研究室に統合され、そこで10人程度の研究者が研究開発に従事していた。栗原はここに加わったのである。このとき栗原は、人工腎臓の研究を行うか逆浸透膜の研究を行うか、という選択を研究室長から迫られ、逆浸透膜の開発を行うことに決めた。

4.2 複合膜の研究：PEC1000

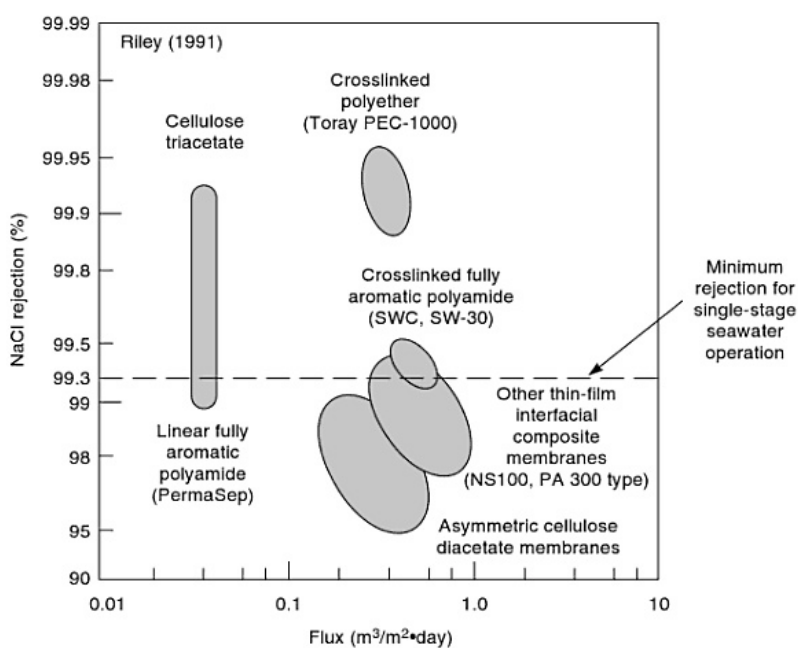
エンジニアリング研究所環境技術研究室のPECグループで栗原が進めたテーマは、逆浸透膜の中でも複合膜の開発であった。逆浸透膜は、このとき既に日本企業を含めて他社も

事業化開発に取り組んでおり、将来的には激しい競争が予測された。そのなかで、CA膜は既に東レ社内で事業化に向けた開発が進められていた。そこで栗原には、次世代技術として複合膜の開発がテーマとして与えられたのである。合成繊維事業で成長してきた東レにとっては、同じように合成して作る複合膜こそが本命だという考え方があった。

栗原は、架橋ポリエーテル複合膜の開発を進め、これを PEC1000 と名付けた。これは、界面重縮合ではなく、モノマーを支持層に塗布して表面で重合することで緻密層を形成していた。これにより、PEC1000 は非常に高い性能を示した。例えば、1978 年にニースで開かれた国際学会において、DuPont 社と FilmTec 社が発表した逆浸透膜の回収率（供給海水量に対する淡水の割合）が 30% だったのに対し、東レの PEC1000 と東洋紡の CA 膜は 40% の回収率を示していた。回収率が高いということは、つまり脱塩率が高いことを意味している。PEC1000 の脱塩率は、いまでも最高水準であり、非常に高い性能をもっていた。

図 7 は、他社製逆浸透膜との比較図である。PEC1000 が脱塩率と造水量を両立し、他を圧倒していることがわかる。PEC1000 は、脱塩率と造水量のトレードオフを超える複合膜だった。そこで 1980 年、栗原たち PEC グループは、その工業化を進めるべく開発部へ異動し、その販売に踏み切った。

図 7 : PEC1000 の比較



出所 : Baker(2004)p. 206

しかし、PEC1000には2つの問題があった。第一に、耐塩素性が弱かった。一般に逆浸透膜を洗浄する際には塩素を用いるため、この問題は厄介であった。さらに第二に、海水中の溶存酸素に対しても極端に脆弱であるという問題があった。これらの問題は深刻であり、ついに栗原はPEC1000の販売中止を進言した。栗原は次のように振り返る。

第一段階、80年代にPEC1000というのがあるんですよ。これが要素技術では性能は良いんだけど、・・・愛媛（工場）に行かなかった。滋賀でやっていて、愛媛に行く前に「やめた方がいい」と研究開発のトップに進言しました。こういう「やめた方がいいね」というのは、研究者が主導している。私は、馬鹿にされるかもしれないが「申し訳ありません」と（上司に謝った）¹⁸。

4.3 CA膜での事業化

複合膜の事業化に時間がかかる中、東レが逆浸透膜事業を継続できたのは、CA膜が一足先に事業化され、事業を支えていたからであった。そもそも東レは、CA膜だけの事業展開は最初から考えていなかった。東レは合成繊維で成長してきた企業であるため、ゆくゆくは自社で合成した独自の複合膜で事業を発展させる考えであった。しかし、その開発には時間がかかりそうであった。そこでいったんCA膜で事業を展開し、複合膜の開発成果を待つこととしたのである。栗原は、野球に例えて次のように語る。

セルロースだけで東レの上司に持っていくと、上が合成ナイロンの頭だから「世間でやっている素材で事業化するなんてあり得ないよ」と。（そこで、セルロースを担当した）川端さんや梅林寺さんは「豪速球（投手）が控えているから、先にやらせてくれ」と¹⁹。

いわば中継ぎ役のような役回りで開発を進めていたCA膜も、70年代前半にはなかなか応用市場が見つからず、東レは事業化の壁に直面していた。応用先として目論んでいた海水淡水化プラントでは蒸発法が主流であり、当時の膜処理法では、コスト面でまったく太刀打ちできなかった。

¹⁸ 栗原優インタビュー（2010年8月30日）。括弧内は筆者追記。PEC1000の販売が実際に終了したのは、後述するUTC80膜が開発された後の1993年頃である。

¹⁹ 栗原優インタビュー（2010年8月30日）。ここで登場する川端とは、川端達夫（民主党議員：前 文部科学大臣）のことである。当時、同氏は東レに勤務しており、エンジニアリング研究所で1970年頃からRO膜を研究していた。

こうしたなかで 1975 年、CA 膜の開発部隊はエレメントの開発と事業化を目指し、環境技術研究室から開発部に異動する。翌 1976 年、東レは日本企業で初めて逆浸透膜の事業化を発表し、同年末に IBM の野洲工場から初受注した。IBM は、廃水を再利用するために、その浄化膜として東レの CA 膜を採用したのである。CA 膜のスパイラル型エレメントは滋賀工場で生産され、1977 年に首尾良く IBM 野洲工場に導入された。とはいえ、廃水処理もニッチ市場であり、事業と呼ぶには未だ小さすぎた。

状況を一変させたのが、半導体工場における超純水製造向け市場の急成長であった。まさに「神風が吹いた」。1970 年代から 80 年代にかけて日本の半導体産業が急激に発展する中で、工場で使用される超純水の効率的生産が求められるようになった。それまで超純水はイオン交換法によって生産されていたが、それでは半導体の微細化とクリーン化に対応するに足る十分な純度を得ることが難しい。その点、高い分離性能をもつ逆浸透膜は、この市場に適していた。東レは、この新たな事業機会をスパイラル型 CA 膜でとらえた。改良された CA 膜であれば、半導体工場向けに十分な性能が得られた。栗原とともに逆浸透膜開発を進めた植村忠廣は次のように振り返る。

神風っていうんですかね、超純水の。日本の半導体事業がばーんと世界一になって、ウエハー 1 枚に超純水 1t が必要になって、1t あたり 1000 円くらいしても（超純水を）作る、ってなったんですね。

逆浸透膜の値段は今の何十倍かしてたんだらうけど、それを買ってもまだ半導体という事業が成り立って。それはやっぱり神風ですね。初めから「それが来るから逆浸透膜を始めましょう」なんて誰も思っていないでしたから。超純水で使われるようになって、あんまりたくさんは売れませんが、研究者数十人の飯を食わせていく、っていうのはそこでできましたね。事業もつながったし、研究開発もつながった²⁰。

その後、東レの逆浸透膜事業は、半導体産業の成長に歩調を合わせて成長していった。今日と比べればそれは決して大きな市場ではなかったが、他社に先んじていたこともあって市場シェアは 100% に近く、逆浸透膜開発に正当性を与えるには十分な大きさであった。

CA 膜がこうして事業化を遂げた一方で、複合膜の事業化にはまだ時間を要していた。CA 膜の開発部隊が開発部に異動した 1975 年以後、環境技術研究室では、複合膜を担当していた 10 名程度のメンバーが PEC グループとして開発を続けていた。

²⁰ 植村忠廣インタビュー（2010 年 7 月 15 日）

4.4 PEC2000 の事業化断念

栗原は、自らが PEC1000 の開発を担っていた一方で、次世代の膜として PEC2000 の開発を植村に任せていた。植村は、1974 年に東レに入社してすぐエンジニアリング研究所環境技術研究室に所属し、1 年ほど CA 膜の工業化開発を支援した後は一貫して複合膜の開発を担ってきた人物である。PEC2000 は、ポリマー系のアミンと酸塩化物のモノマーを重縮合させて生成したポリアミド複合膜であり、その膜の種類には UTC20(NF 膜向け)、UTC30 (海水淡水化用 RO 膜)、UTC 40 (かん水淡水化用 RO 膜) といった複数のバリエーションがあった。PEC1000 の工業化が進まない中で、次の PEC2000 に大きな期待がかかっていた。

1982 年、PEC2000 の開発グループは開発部へ異動し、量産化開発に着手していった。その一方で、栗原と植村を含む残りの 4-5 人の研究者は、機能膜グループとして独立する。同年 10 月に開発研究所 (かつての中央研究所) に機能膜研究室が立ち上がると、彼ら機能膜グループはそちらに異動し、1984 年頃まで PEC2000 の量産化サポートと他の新規材料開発を担った。

こうして CA 膜に加えて PEC2000 も量産化への道筋をつけ始めた 1984 年 4 月 2 日、東レは逆浸透膜を主力製品とするメンブレン事業部を発足させる。このとき掲げられていた方針は、同事業部の売上高を今後 3 年間で 100 億円に引き上げる、というものであった²¹。1983 年度における同事業の年間売上高が 20 億円弱であることを考えると、これは強気の計画であった。

この計画に基づき、東レは 1985 年に愛媛工場内に逆浸透膜の量産工場を新設、PEC2000 の量産化ラインも整備していく。逆浸透膜の生産を愛媛に引っ張ってきた当時の愛媛工場長は、後に社長を務める前田勝之助であった。前田は逆浸透膜事業の将来性を買い、その量産体制を滋賀ではなく愛媛工場で整備するよう強く働きかけていた。こうして、量産・市販に向けて少なからぬ社内資源が振り向けられた。

ところが、この状況のなかで、栗原はまたしても PEC2000 の市販化中止を進言する。PEC1000 の時と同様に、耐塩素性の問題がクリアできないことがその理由であった。とはいえ、今回は既に量産工場まで立ち上がっていた。この状態で開発者が事業化にストップをかけるには、相当の覚悟が必要であった。しかし栗原は、分子構造の基本的な脆弱性から PEC2000 では海水淡水化事業で勝負できない、と確信していた。これに対し、開発部や工場からは「やる前からなぜあきらめるのか」と強い反発があった。この時の様子を、栗

²¹ 『日経産業新聞』1983 年 7 月 29 日、p. 18 ; 1984 年 3 月 3 日、p. 9 ; 1984 年 4 月 12 日、p. 12。なお、1984 年 4 月 2 日には、他に医薬事業部とセラミック事業部が発足している。

原は以下のように述べている。

どこが苦しかったかという、ここですね。これ(PEC1000)は仕方ないとして、2000はもう愛媛にいて、どどこ走っていて、開発部長は引くに引けない状態になっているところに、私自身が「あれはやめた方がいい素材ですよ」っていったもんですから、開発部長と開発研究所所長がけんかしちゃうわけです。・・・化学工学や機械工学の専門家は、できの悪い息子でも使い勝手に良くしてみせる、というのがあつた。(だから)「世間が弱いといっていないうちに、なぜ敗北宣言するんだ」と。

PEC1000に続くPEC2000の事業化断念は、海水淡水化用逆浸透膜の事業化に疑問符をつけた。海水淡水化市場は極めて小さく、商談が来るのは数年おきであるうえに、導入するとすると大規模な設備を納入しなければならない。何年かに一度訪れるかどうかもわからない大波に備えて量産工場を用意しておくことは、事業部として独立した組織からすれば、合理的とは言えなかつた。むしろ、CA膜で開拓した超純水やかん水向け市場を意識して開発を進める方が商業的にも確かだとされた。植村は次のように振り返る。

その頃、海淡は今みたいに毎年毎年あつたわけじゃなくて、何年かに一回だけ、しかも何万tという大きな設備が、ポーン、ポーンと設置されるような状況でした。「そのために生産設備を作つて、案件のない間、何もしていないときどうするの?」と言われました。もともとPECは海淡向けで開発し、やってみたら何年かに一回案件があるだけ。(だから)「海淡はターゲットとして良くない。それよりも、超純水とかかん水みたいに、連続して毎年、小物でも良いからたくさん売り先があつてコンスタントに売れていくものをやりなさい」と(言われた)²²。

開発グループとしては、もちろん海水淡水化が一大目標であることを捨てたわけではなかつた。しかし、現実的な判断として、今着手しているポリアミド膜をいったん超純水、かん水向けに開発することとなつた。こうしてUTC20をもとにして新たに開発したUTC60は、NF膜として製品化された²³。

²² 植村忠廣インタビュー(2010年7月15日)

²³ UTC20はポリマー系であるのに対し、新たに開発されたUTC60はモノマー系である。その違いは、アミンがポリマーかモノマーかによる。これらの化学構造は、次に示すとおりである。

5. 4成分系ポリアミド複合膜の開発

5.1 新たな膜材料の探索とブレークスルー

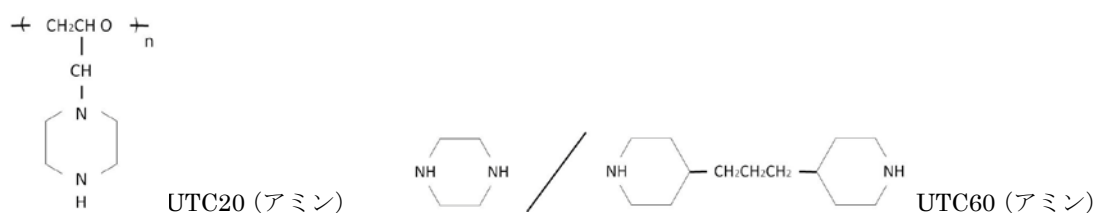
PEC1000 は、基本的には市販で手に入るモノマーを材料にしていた。PEC2000 では、いくつかの化学構造の修正が行われ、ポリマー系アミンが合成された。しかし、PEC1000 や PEC2000 が抱える耐塩素性の問題は残っていた。現実的な開発目標は「かん水向け」といったん定めていたものの、海水淡水化を見据えた場合には、この問題を根本的に解決する必要があった。そしてそのためには、新たなモノマーを合成することから始める必要があると栗原たちは考えていた。

栗原は 1984 年、一人の新入社員に対して「理想的な膜の合成」をテーマとして与えた。担当したのは、機能膜研究室に配属されたばかりの姫島義夫であった。姫島は大学・大学院と有機合成を行っていた人物であり、うってつけであった。彼は、従来と同じ分離性能を持ちながら高い耐塩素性を実現する材料を探索することに邁進していく。

他社を含めた過去の様々な開発の経験から、アミン水溶液と酸塩化物の有機溶媒溶液を界面重縮合させてポリアミド膜を形成する、という基本的な方向性ははっきりしていた。ポイントは、具体的にどのような構造の材料にすれば良いのかであった。姫島が主としてベンチマークとしたのは、Cadotte が開発した二官能芳香族アミンと三官能の芳香族酸塩化物の界面重縮合による架橋ポリアミド膜の性能であった。この性能を凌駕する理想的な膜の開発が目標となった。姫島は次のように述べる。

芳香族モノマー系という Cadotte。そこの特許とか・・・学会の発表とかはむさばるように情報を集めましたね。あの頃 Cadotte といえば神様みたいな人でしたから・・・そういう人たちをみながら、追いつきたいし、彼らが気づかないことを一つでもきづいて良いものをつくりたいという気持ちがあった。

姫島は性能間の様々なトレードオフを解決しつつ、試行錯誤を通じて最適なパラメータを探索しながら、材料を絞り込んでいった。何百というモノマーを合成しては、それをベテランの研究者に渡して、膜にしてもらい評価する。その繰り返しの中で見つかったの



がトリアミノベンゼンであった。その後の東レの逆浸透膜事業にとって鍵となる発見である。1985年5月、開発グループはトリアミノベンゼンを用いたRO膜の検討を開始する。姫島が研究を始めてから1年が過ぎた頃のことであった。

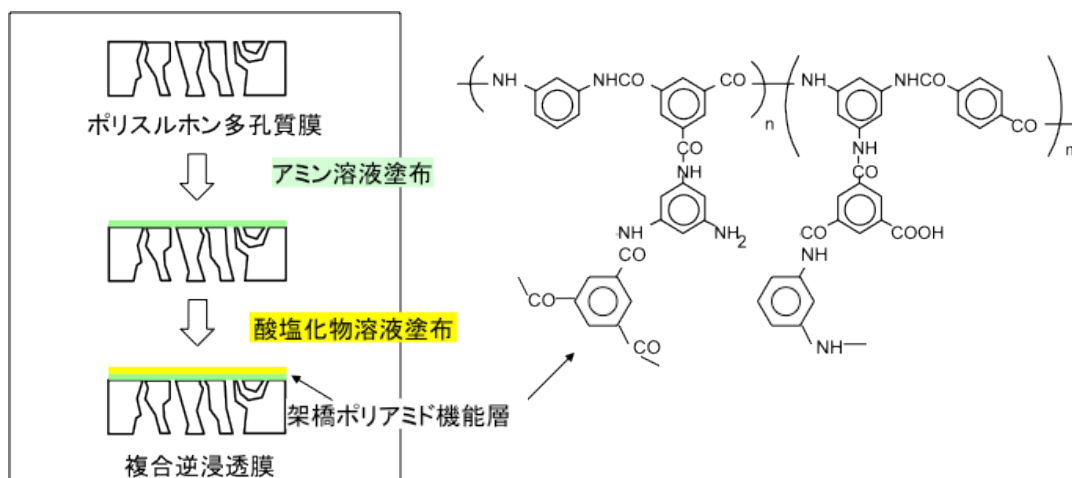
トリアミノベンゼンは、それ自体、必ずしも新しいモノマーではなかった。しかし、市販品としては手に入らなかった。そこで姫島は、引き続きトリアミノベンゼンを高純度で創製する独自の方法を開発していった。姫島の発見と並んで、機能膜研究室の植村を中心とするグループは、具体的な膜構造の特定作業を進めた。そうして最終的に行き着いたのが、4成分系架橋芳香族ポリアミド膜 UTC70 であった。

UTC70の化学構造と製膜方法は、図8の通りである。この複合膜は、姫島が開発した三官能の芳香族トリアミン（トリアミノベンゼン）と二官能芳香族ジアミン（フェニレンジアミン）を併用した水溶液に、三官能性芳香族カルボン酸塩化物（トリメシン酸塩化物）と二官能性芳香族カルボン酸塩化物（テレ、イソフタル酸塩化物）を界面重縮合させて生成されている。これら4成分をうまく調整しながら界面重縮合させることで、高い選択性と耐久性を備えた緻密な網目構造をとりながら、造水量を大幅に増やす超薄膜を東レは実現したのであった。

あとでわかったことだが、界面重縮合によって複合膜を形成すると、膜の表面がひだ状になって表面積を広くしていた。そのため、孔径が非常に小さくなりながらも、表面積が広がった分だけ、原水が透過しやすくなったのである。これが、高い脱塩率と造水量をもたらしたのであった。

図8：

4成分系架橋芳香族ポリアミドの化学構造と、界面重縮合による複合膜の製膜方法



出所：東レ講演資料

UTC70 の開発が進んでいた同じ 1985 年、東レは RO 生産部を発足させ、RO 膜の量産体制の整備に力を注ぎ始めていた。この RO 生産部に UTC70 が技術移管されたのは、1987 年 2 月のことである。そして同年、東レは、UTC70 を「SU-700」として製品化し、東芝大分工場へと納入した。同工場は、最先端技術の粋を集めた 1MB・DRAM 工場であった。さらに東レは、かん水淡水化用にも製品化を進めていく。こうして、同社の逆浸透膜事業は CA 膜から複合膜へとその主軸を一気に移していった。

逆浸透膜開発におけるこれら一連の流れは、補図 2 に示す通りである。

5.2 海水淡水化への展開

UTC70 の開発成功は、2つの点で、東レの逆浸透膜事業の将来に光をもたらした。

第一に、UTC70 は、超純水やかん水淡水化用市場で CA 膜を代替しただけでなく、さらに大きな商業的成果をもたらした。そこで開発陣は、次なる開発課題として、逆浸透膜エレメントの操作圧力を低圧化して造水コストを低減することを狙った。彼らは、製膜条件や反応触媒、ナノ構造の制御などを改善させながら、低圧化を進めた。表 4 は、かん水淡水化用に投入された東レの RO 膜の性能を示したものである。より低圧ながらも、高い脱塩率と造水量を実現する膜エレメントが市場に投入されていることがわかる。

表 4：東レのかん水淡水化用 RO 膜の展開

		低圧		超低圧	極超低圧
膜エレメント名 (販売年)		SU-720 (1987 年)	SU-720L (1988 年)	SUL-G20 (1996 年)	SUL-H20 (1999 年)
性能	脱塩率(%)	99.4	99.0	99.4	99.4
	造水量(m ³ /日)	26.0	22.0	26.0	26.0
	圧力(MPa)	1.5	1.0	0.75	0.5
試験	温度(°C)	25	25.0	25	25
条件	給水濃度(mg/L)	1500	1500,0	1500	1500
	濃縮水流量(L/分)	80	80,0	80	80

出所：Uemura and Henmi(2008)

第二に、UTC70は海水淡水化用RO膜の事業化に再び道を開いた。経営トップも、開発者たちが海水淡水化を熱望していることは知っていたため、UTC70の開発成功を機に、その事業化を再び後押しし始めた。かん水淡水化用RO膜が低圧化を目指したのとは逆に、海水淡水化用RO膜の開発で重要な点は、膜の耐圧性を高めることであった。

本ケースの冒頭で記した通り、逆浸透現象を起こすには浸透圧以上の圧力を濃度の高い水にかける必要がある。濃度が高いほど浸透圧は高まるため、海水から淡水を取り出すには今まで以上に高い圧力が必要であり、その圧力に耐えるRO膜を開発する必要があった。1969年にDuPont社が開発していたポリアミド膜の耐圧は5.5MPa程度であり、淡水回収率は20%に満たなかった。1980年代に入ると6.9MPaに耐える膜が登場したものの、その回収率も25%に過ぎなかった。

これに対し、東レが開発したUTC70は、海水淡水化用にも十分展開できた。そのため開発グループは、UTC70と同じくトリアミノベンゼンを用いながら、膜の脱塩率を高めるとともにエレメントの構造を改善し、海水淡水化用RO膜UTC80を開発した。UTC80は、1991年に「SU-800」として製品化され、沖縄の北大東島・南大東島へ初めて納入された。さらに「SU-820」（8インチ）としても製品化され、1996年に沖縄北谷（4万m³/日）へ導入された。その性能は、操作圧力6.5MPa、脱塩率99.75%、造水量16.0m³/日であった²⁴。

ただし、海水淡水化用RO膜事業が立ち上がったとはいえ、その事業規模は、いまだ満足いく大きさではなかった。RO膜による造水コストが高止まりしていた上に実績も不足していたため、既存の蒸発法の方が断然優位にあったからである。苦戦は続いていた。1994年、このとき既に社長となっていた前田勝之助はついに業を煮やし、海水淡水化システムの抜本的な改善を強く指示した。

5.3 高効率2段法海水淡水化システムの確立

RO膜を用いた従来の海水淡水化システムは、図9のようなシステムであった。まず、吸い上げた海水に塩素処理をして凝集剤を加え、砂濾過などの前処理を行う。そして、高圧ポンプでRO膜エレメントに供給し、脱塩する。その後、透過水を取り出し、塩素を加えて生産水とする。残った濃縮水は海へ放流する、という仕組みである。

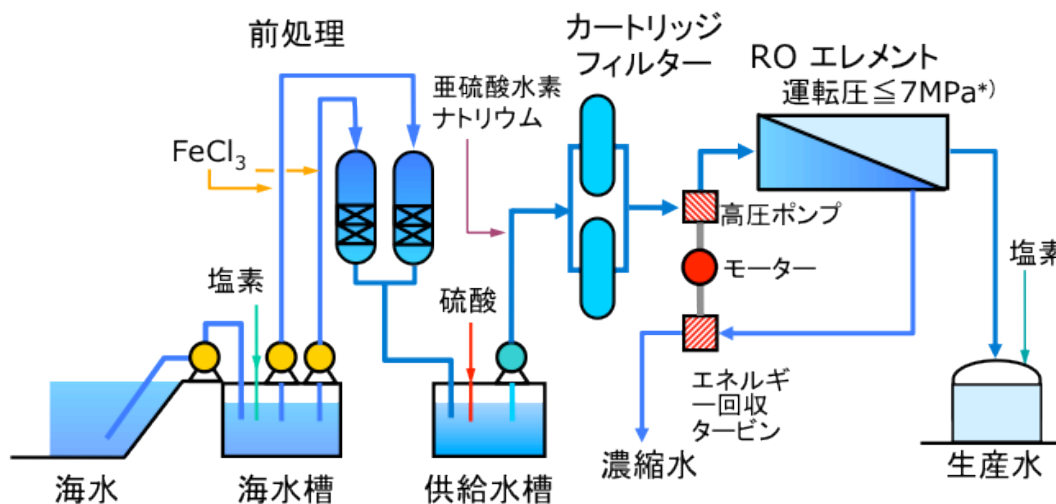
しかし、このシステムでは回収率が40%程度にとどまっていた。なぜなら、回収率を上げるにはRO膜にかける操作圧力を高める必要があり、RO膜がその圧力に耐えきれず破れてしまうからである。当時のRO膜の性能からして5.5～7.0Mpa程度の操作圧力が適当であり、その結果として、回収率40%という程度にとどまっていたのである。

²⁴ Kurihara et al. (2001)

これに対して、東レは回収率をあげる試みを進めた。その仕組みは、1段階目の運転で排出される濃縮水を別のRO膜にもう一度通し、海水を2段階で淡水化していこうというものである。このシステムを確立するには、2段階目のRO膜にかける操作圧力を9.0MPa程度まで高める必要があった。そこで彼らは、基本的な素材や構造は従来のものと同じでありながらも、より高い圧力を長時間かけても耐えるRO膜「SU-820BCM」(操作圧力9.0MPa、脱塩率99.70%、造水量16.0m³/日)を新たに開発した²⁵。

栗原たちは、これを高効率2段階海水淡水化システム(Brine Conversion System:BCS)と呼んだ。前田が号令を発した1994年のうちに彼らはその基本発明を遂げ、1997年に愛媛でパイロット・プラントの運転に成功した²⁶。1999年、東レはこのシステムを商業化し、スペインのマスパロマスやカリブ海キュラソーに納入した。図10にあるように、これまで廃棄していた濃縮海水を2段階目RO膜エレメントで再び分離して20%の淡水を新たに回収することで、1段階目と合わせて合計60%の淡水を得るシステムであった。これによりプラント設置面積や建設費、運転費が削減されるため、総造水コストは従来比で約20%低下した。

図9：逆浸透法海水淡水化システムのフロー



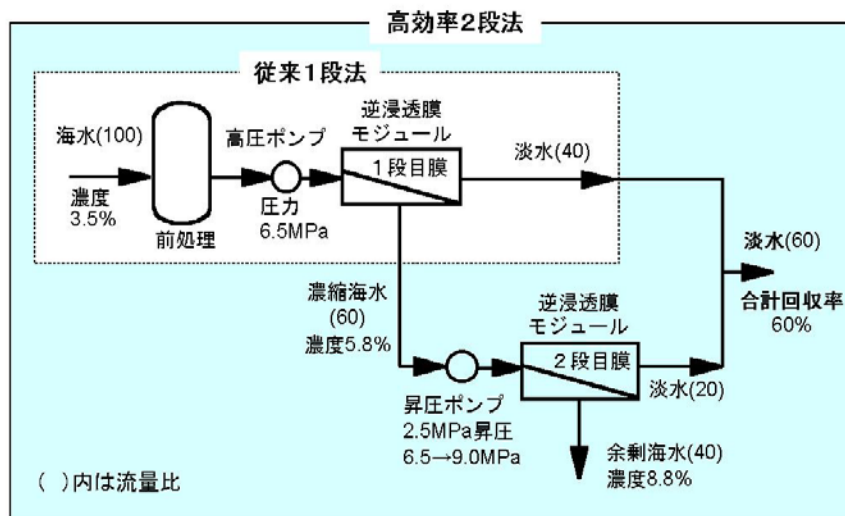
*) スパイラルエレメントの場合

出所：東レ講演資料

²⁵ 耐圧性の高いこのRO膜を東レが他社に先駆けて開発できたのは、同社が蓄積してきた繊維技術およびフィルム技術を駆使し、新たな膜エレメント構造を革新したからである。

²⁶ BCSに関する特許(特許公開平8-108048; US Pat. 6,187,200)に前田勝之助の名前があることから、前田が逆浸透膜事業に強く関わっていたことがうかがえる。

図 10：高効率2段法海水淡水化システム



出所：東レ講演資料

6. 事業成果と今後の展開

6.1 その後の取り組みと事業成果

2002年、トリニダードトバゴの世界最大海水淡水化プラント（136,000m³/日）に東レのBCSが採用される。この時期になると海水淡水化プラントもかなり大規模化してきたため、納入する際に必要な膜エレメントも大幅に増えた。そのため愛媛工場ではその安定大量生産体制の構築が重要課題となった。

それまで愛媛工場では、人手に頼って膜エレメントを生産していた。とくに膜をエレメント化するための生産工程においては、膜を巻き上げる工程が重要なボトルネックであり、完全に熟練に頼っていた。しかし、それでは生産性は一向に高まらない。そこで、愛媛工場のメンバーは、自動巻囲機を導入することで膜の巻き上げ工程を無人化し、生産性を高めていく取り組みを進めた。これにより、生産能力は一気に上がり、量産効果も生まれ、逆浸透膜の生産コストは徐々に低下していった。

さらにこの頃になると、逆浸透膜の開発課題が、耐圧性や脱塩率からホウ素除去能力や低ファウリング化へと変わり始めていた²⁷。というのも、まず、ホウ素には生殖阻害毒性があると言われ始めたからである。また、膜エレメントの性能を持続させるために、低フ

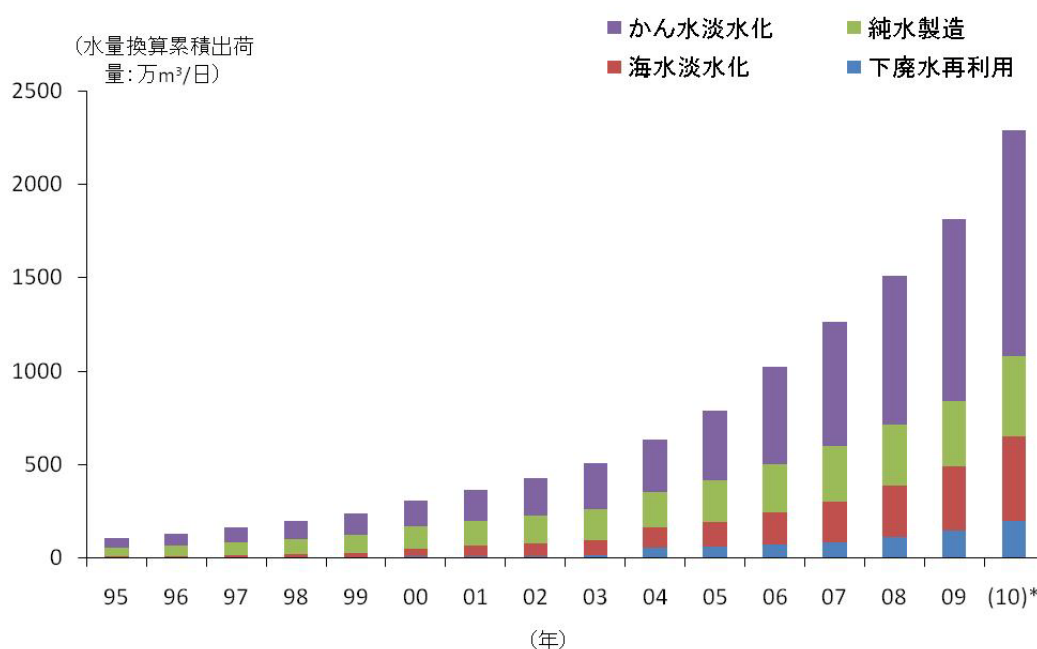
²⁷ そのひとつの背景には、エネルギー回収装置が登場したことで、BCSのように高い淡水回収率を必ずしも求めなくても良くなったことが挙げられる。なお、ファウリングとは膜面の汚れのことを意味する。

ファウリング化も求められ始めていた。これらの開発課題に対して東レは、低ファウリング化して性能を向上させたRO膜UTC70ULBを「TML-720」として発売した。

一連の性能向上と、生産コストの低下に伴う価格低下によって、膜処理法はしだいに割安になった。膜処理法による海水淡水化プラントの比率は、1996年には36.7%にとどまっていたものの、2004年には蒸発法を超えたと考えられている²⁸。ボトルネックと言われた造水コスト(1tあたり)は、2007年度の試算において、蒸発法90～140円、膜処理法60～80円となった²⁹。こうして逆浸透膜が市場の主流となり始め、同時に、東レの逆浸透膜事業も成長した。

東レにおけるこれら一連の逆浸透膜事業の発展を示したのが、図11である。この図は、東レの逆浸透膜を採用したプラントにおける累積造水量の推移を、1995年から示している。当初は超純水製造用逆浸透膜の比重が非常に大きく、その後、かん水淡水化用逆浸透膜が最も著しく成長を遂げていく動きが確認できる。かん水淡水化用逆浸透膜は、今日でも最大の比重を占める重要セグメントである。2000年代に入ると、海水淡水化用RO膜もその規模を拡大し始めていることが確認できる。

図11：東レRO膜採用プラントの累積造水量



出所：東レ講演資料

注：2010年は見込み。

²⁸ 『週刊ダイヤモンド』2007年1月27日号、p. 82。

²⁹ 『日経ビジネス』2000年7月24日号、p. 83；2007年3月19日号、p. 134。

6.2 競争激化：モジュール化と新規参入

東レにおける逆浸透膜事業の成長は、優れた逆浸透膜を開発したことに加え、世界的な需要拡大にも支えられた。2000年代に入り世界各地で水不足が問題として懸念され始めると、淡水化プラントが増え始めるとともに大規模化し、逆浸透膜の新規需要が拡大した。さらに、逆浸透膜は汚れによる性能劣化が起きるため、交換需要も生まれた。たとえば、2009年度の逆浸透膜市場は549億円だとケース冒頭で記したが、そのうち新規需要分は250億円であり、交換需要が299億円にのぼっている³⁰。

これらの需要拡大は東レの事業成長に追い風を吹かせたものの、既存企業同士の競争を激化させた。いったん自社の逆浸透膜エレメントを納入できれば、その後の交換需要を独占できるという期待から、プラント新設にともなう受注獲得競争が激化したのである。

しかし、新規需要の獲得は必ずしも交換需要の囲い込みを意味していない。なぜなら、膜エレメントは、直径8インチ、長さ40インチという大きさのモジュールで事実上の業界標準となっているからである。プラントを導入した側からすれば、交換時期が来たときに新しい膜メーカーを選ぶことが可能なのである。実際、沖縄北谷に導入された海水淡水化プラントの交換状況を見ると、1999年と2001年には膜指定だったものの、2002年からは入札に切り替わっている³¹。現在までのところ、交換時期における納入メーカーの大きな変動はほばないものの、モジュール化は、新規需要の獲得が将来の交換需要の確保を約束しないものにしたのである。

交換需要がメーカー選定の仕切り直しを意味するとすれば、先行者の優位性は働きづらく、潜在的な新規参入業者にも参入余地を生む。そのため市場拡大は、新たな参入や、競争力強化を狙った活発なM&Aを招いた。General Electric社は2003年にOsmonics社を買収、膜技術を獲得した。さらに、韓国ではWoongjin Chemical社がSaehan社を買収して膜技術を取得し、中国ではMOTIMO社、Vontron社がRO膜市場に参入している。これらの新規参入企業は、シェアこそ小さいものの、市場競争を激しくする要素となりつつある。加えて、生産を担う自動設備の登場は、新興企業の追随スピードを速めている。設備を購入すれば、ある水準程度の逆浸透膜は生産できるからである。

この状況に対し、東レは大きく3つの取り組みをしている。第一に、先述したように逆浸透膜の改良による性能差別化である。低ファウリング化とホウ素除去能力の向上がこれにあたる。性能を差別化することで、製品のコモディティ化に陥らないようにしているのである。第二に、逆浸透膜のみを販売するだけでなく、より川下にあたるエンジニアリン

³⁰ 富士経済（2010）。2009年度は金融危機の影響で新規需要が落ち込んだため、交換需要が上回ったという事情もある。2008年度は、新規需要が交換需要を上回っていたという。いずれにせよ、交換需要が無視できない大きさであることはわかるだろう。

³¹ 國吉（2007）

グ業務にまで乗り出している。従来から協業関係にあった東レエンジニアリングに加え、現在は水道機工を子会社化することで川下へのつながりを強化している³²。

そして第三に、世界展開である。もともと逆浸透膜事業は世界市場と無関係ではなかったが、とくに2005年に日覺昭廣（現、社長）が水処理部門長として着任して以降、同事業はめざましく世界展開を遂げた。日覺は、世界展開を狙って研究開発と生産能力の拡充に務めた。東レは、スイスやアメリカに出資会社を持つが、いずれも膜の生産・販売を行うための海外拠点という位置づけにある。日覺が社長に就任してからも同事業の世界展開は続き、2010年8月には75億円を投じて北京に一貫生産工場を建設、RO膜の生産能力を一気に1.5倍に引き上げた³³。

6.3 おわりに

東レが1968年に開発を正式に始めてから2003年に第49回大河内生産賞を受賞するまでの35年の間、開発を牽引してきた企業の多くは、市場から撤退ないしは他社に吸収されている。

RO開発の初期段階で重要な役割を果たしたGeneral Atomics社のRO膜事業は、UOP社傘下のFluid Systems社に吸収された。そのFluid Systems社は、1994年にUOP社からAnglian Water Group社の手に移り、1998年にはKoch Membrane Systems社へと渡っていった。Cadotteが活躍したFilmTec社は、1986年にDow社によって買収された。Hydranautics社も、1987年に日東電工によって買収された。東レの逆浸透膜開発にきっかけを与えたDuPont社は、2001年3月に市場から撤退した³⁴。一貫して自社開発を続けながら市場で生き残っているのは、東レだけである。この事実だけでも、開発成果を事業化することがいかに難しいかを物語っている。加えて、東レは市場で確たる地位を築いてきている。

これだけ厳しく展開してきた競争の中で東レが開発を続け、事業化し、市場で確たる地位を築けたのは、なぜだったのだろうか。逆浸透開発を粘り強く進めた栗原は、2つの点を指摘する。第一に、ポリアミド系のスパイラル型複合膜という、他社と同じ技術領域の中で性能競争を繰り広げたからだという。他社が手を付けない技術領域は、独自かもしれないけれども競争原理が働かない、というのがその理由である。同じ技術領域に陣取るか

³² 『フォーサイト』2009年2月号、p.71。なお、東レと同じ戦略をとる企業としては、Dow社やKoch社、GE社やシーメンスがあげられる。日東電工や東洋紡は、特定のタイプの膜のみを供給し、かつ膜エレメントの開発・販売のみに集中する特化戦略を展開している。

³³ 『日本経済新聞』2010年7月31日、p.12。

³⁴ 業界標準となった芳香族の複合膜ではなく独自の脂肪族の複合膜にこだわったことも、同社が撤退した一因であった。

からこそ競争原理が働いて開発が進む、という論理である。もちろん、技術の筋が良いことがその前提にあるという。

そして第二に、彼らの開発を理解して支えてきた経営トップの力も大きかった、という。開発の初期段階では、伊藤昌壽（後の社長：1981-1987）が開発研究所長として開発グループを支援していた。伊藤の後を継いで社長となり中興の祖と言われる前田勝之助は、愛媛工場長時代に逆浸透膜の量産体制を整備するために注力し、社長に就任した後も逆浸透膜事業の発展に関与し続けた。栗原は、逆浸透膜開発の解散を迫るような厳しい意見は聞いていない、と振り返っている。現社長の日覺昭廣は、水処理部門長に着任した時点から一貫して同事業の世界展開を強く牽引してきた。東レにおける逆浸透複合膜の開発は非常に長期に及ぶ開発であったが、とくに事業化局面におけるトップの関与は、この開発の経営成果を著しく高めることに貢献していたという。

本ケースは、開発と事業化の歯車がうまく噛み合った好例である。もちろん、競争は続く。世界的な造水需要拡大のなかで、東レ逆浸透膜事業の舵取りは今後大変興味深い。

<参考文献>

Baker, R. W. (2004), *Membrane technology and applications (2nd ed.)*, John Wiley & Sons, Ltd.

Dow Jones & Co, Morningstar, Inc. (1995), *The Dow Jones guide to the world stock market*, Prentice Hall.

富士経済（2010）『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 2010』。

富士経済（2009）『2009年版水資源関連市場の現状と将来展望』。

船木春仁（2009a）「水の世界をリードする日本の『膜』技術①：高脱塩・高透過を実現した日東電工の『逆浸透膜』」『フォーサイト』、2009年2月号、pp. 68-71。

船木春仁（2009b）「水の世界をリードする日本の『膜』技術②：急成長の『污水再利用』で競う東レと三菱レイヨン」『フォーサイト』、2009年3月号、pp. 60-62。

Glater, J. (1998), “The Early History of Reverse Osmosis Membrane Development.” *Desalination*, 117, pp. 297-309.

Global Water Intelligence (2008), *Water Desalination Report*, Vol. 44, No. 5, 2008 (http://www.nmbworks.com/other_pdf/WDR-5.pdf).

Hassler, G. L. and J. W. McCutchan (1960), “Saline Water Conversion,” *Advances in Chemistry Series*, No.27, American Chemistry Society, Washington DC, p. 192.

- IDA (2009), *Desalination Year Book 2009-2010*.
- 井上岳治 (2004) 「逆浸透膜」『繊維と工業』 Vol. 60, No. 6, pp. 163-165.
- 浄水膜 (第2版) 編集委員会編 (2003) 『浄水膜』 技報堂出版。
- 科学技術庁資源調査会 (1967) 『海水淡水化の技術開発に関する報告』 科学技術庁資源調査会報告第41号。
- 経済産業省 (2008) 「第3章第4節 水問題と我が国の取り組み」『通商白書<2008>』, p. 351.
- 國吉長和 (2007) 「沖縄県企業局海水淡水化施設の運転状況」『造水技術』 Vol. 31, No. 4, pp. 35-39.
- 栗原優・竹内弘 (2008) 「水問題！日本の貢献は？」『経営センサー』東レ経営研究所, pp. 31-41.
- 栗原優・植村忠廣・姫島義夫・上野賢司・梅林寺良一 (1994) 「橋かけ芳香族ポリアミド複合逆浸透膜の開発」『日本化学学会誌』 No. 2, pp. 97-107.
- Kurihara, M., H. Yamamura, and T. Nakanishi (1999), “High recovery / high pressure membranes for brine conversion SWRO process development and its performance data,” *Desalination*, 125, pp. 9-15.
- Kurihara, M., H. Yamamura, T. Nakanishi, and S. Jinno (2001), “Operation and Reliability of Very High-Recovery Seawater Desalination Technologies by Brine Conversion Two-Stage RO Desalination System,” *Desalination*, 138, pp. 191-199.
- Lonsdale, H. K. (1982), “The Growth of Membrane Technology,” *Journal of Membrane Science*, No. 10, pp. 81-181.
- 『日経ビジネス』2007年3月19日号、p. 134。
- 大河内賞受賞業績報告書第49回 (2003) 「ポリアミド複合逆浸透膜および逆浸透膜システムの開発」
- Petersen, R. J. and J. E. Cadotte (1988), “*Thin Film Composite Reverse Osmosis Membranes*,” Handbook of Industrial Membrane Technology, Porter, M. C. (ed.), Noyes Publications, pp. 307-348.
- 澤田大祐 (2010) 「2 : 水資源問題の解決に取り組む日本の膜技術」『持続可能な社会の構築』 pp. 135-144.
- 世界水ビジョン 川と水委員会 (2001) 『世界水ビジョン』 山海堂。
- 『週刊ダイヤモンド』2007年1月27日号、p. 82。
- Strathmann, H., L. Giorno, and E. Drioli (2006) *An Introduction to Membrane Science and Technology*, Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Taylor, J. S. (2000), *Flat Sheet, Bench and Pilot Testing for Pesticide Removal Using Reverse Osmosis*, American Water Works Association.
- 東レ株式会社 (1997) 『70年史』。

東レリサーチセンター（2008）「第2章逆浸透（RO）法」『液体の膜分離』株式会社東レリサーチセンター。

通商産業省・財団法人造水促進センター（1987）『海水淡水化技術開発について：茅ヶ崎研究施設における技術開発の概要』。

Uemura, T. and M. Henmi (2008), “*Thin-Film Composite Membranes for Reverse Osmosis*,” Li, N. N., A. G. Fane, W. S. Winston Ho, and T. Matsuura (eds.) *Advanced Membrane Technology Applications*, John Wiley & Sons, Inc.

<参考 URL>

<http://caselaw.findlaw.com/us-federal-circuit/1287586.html>

<http://ftp.resource.org/courts.gov/c/F2/982/982.F2d.1546.92-1091.html>

<http://www.carlsbad-desal.com/news.aspx?id=99>

<http://www.waterworld.com/index/display/article-display/340334/articles/water-wastewater-international/volume-23/issue-4/features/the-reverse-osmosis-membrane-evolution.html>

<http://www.workingwithwater.net/view/3230/water-purification-ultrafiltration-for-portable-water-purification/>

<講演会、取材：敬称略、アルファベット順、肩書きは取材時点のもの>

福井文明 メンブレン生産部メンブレン 第2生産課長

2010年8月26日 13:00～17:40 愛媛／愛媛工場

房岡良成 参事 水処理・環境事業本部 水処理事業部門長

2010年7月15日 14:00～15:45（講演会） 国立

2010年7月15日 15:50～16:40 国立

2010年8月30日 15:30～17:45 滋賀／滋賀事業場

姫島義夫 研究本部担当部長

2010年8月19日 15:00～16:30 東京／東レ本社

井上岳治 水処理技術部 メンブレン技術課長

2010年8月26日 15:30～17:40 愛媛／愛媛工場

栗原優 フェロー 工学博士

最先端研究開発支援プログラム：“Mega-ton Water System”中心研究者

アジア・太平洋脱塩協会（APDA）会長

日本脱塩協会（JDA）会長

2010年8月30日 15:30～17:45 滋賀／滋賀事業場
三入誠司 事務部長

2010年8月26日 13:00～17:40 愛媛／愛媛工場
西岡英二 メンブレン生産部 部員

2010年8月26日 13:00～17:40 愛媛／愛媛工場
富山元行 工場長

2010年8月26日 13:00～14:00 愛媛／愛媛工場
上田富士男 メンブレン生産部長

2010年8月26日 13:00～17:40 愛媛／愛媛工場
植村忠廣 理事（技術）水処理事業部門 東レシンガポール水研究センター 工学博士

2010年7月15日 14:00～15:45（講演会） 国立
2010年7月15日 15:50～16:40 国立
2010年8月30日 15:30～17:45 滋賀／滋賀事業場

上野賢司 参事 水処理・環境事業本部 水処理部門（技術・生産）担当

2010年7月15日 14:00～15:45（講演会） 国立
2010年7月15日 15:50～16:40 国立
2010年8月26日 13:00～17:40 愛媛／愛媛工場

山本正典 メンブレン生産部 メンブレン第1生産課長

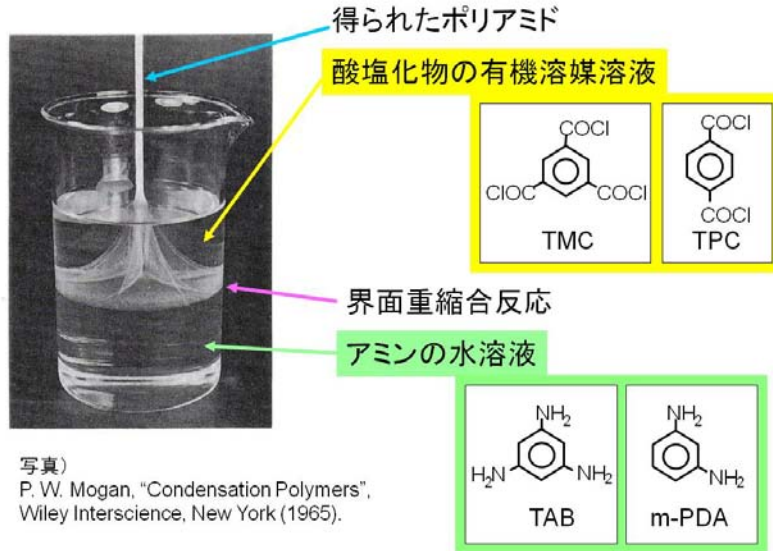
2010年8月26日 14:00～17:40 愛媛／愛媛工場

＜補図表＞

補表 1：初期の逆浸透膜開発史

年	出来事
1940-50年代：探索研究（UCLA とフロリダ大学）	
1949年	Hassler が“The Sea as a Fresh Water”というタイトルのレポートを提出。続く 1950年、逆浸透膜を使った淡水化を提案する。
1952年	米国内務省に塩水局が設立され、海水淡水化の国家プロジェクトが始まる。
1955年	フロリダ大学の Charles Reid が「海水淡水化のための浸透膜(Osmotic membranes for Demineralisation of Saline Water)」研究プロジェクトを提案
1959年	Breton と Reid が酢酸セルロース膜の脱塩メカニズムを明らかにする。
1960年代：実用化開発（General Atomics 社（Fluid System 社）と DuPont 社）	
1960年	UCLA の Loeb と Sorirajan が非対称 CA 膜の開発に成功し、実用化の道を開く。
1963年	General Atomics 社、CA 膜スパイラルエレメントを開発。1967年に特許取得。
1967年	DuPont 社による芳香族ポリアミド膜中空糸型エレメントで脱塩システム「Parmsep」を発売。最初の商業的成功を収める。
1968年	東レが逆浸透膜の開発を正式開始
1969年	DuPont が海水淡水化向け逆浸透エレメントを発売。
1970年代：合成複合膜の開発（Filmtec, Fluid Systems（UOP）、東レなど）	
1972年	North Research の Cadotte が界面重縮合による複合膜を開発
1975年	Fluid Systems による界面重縮合による複合膜の工業化
1977年	MRI の Cadotte が、界面重縮合による 2 官能アミンと 3 官能酸塩化物の架橋系芳香族ポリアミド複合膜を政府支援プロジェクトで開発
1978年	Fluid Systems 社の RO 膜がサウジアラビアの Jeddah 海水淡水化プラントに納入
1980年代：界面重縮合ポリアミド膜	
1980年	東レ、架橋ポリエーテル膜（PEC1000）の工業化
1985年	東レ、4成分系芳香族ポリアミド複合膜の基本素材発明。1987年には超純水製造向けに工業化。
1986年	Dow 社が Filmtec 社を買収
1987年	日東電工が Hydraneutics 社を買収
1989年	東洋紡の CA 膜中空糸型エレメントがサウジアラビアの Jeddah プラントに導入
1990年代	
1998年	Koch Membrane Systems 社が Fluid Systems 社を買収

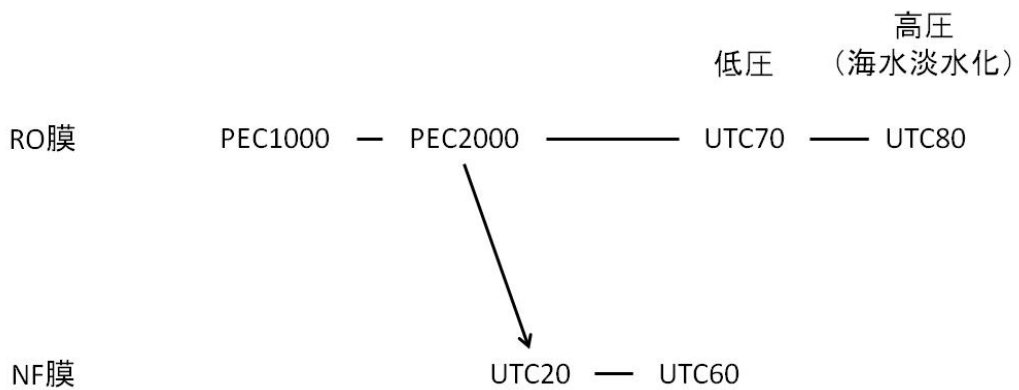
補図 1：界面重縮合によるポリアミド形成の様子



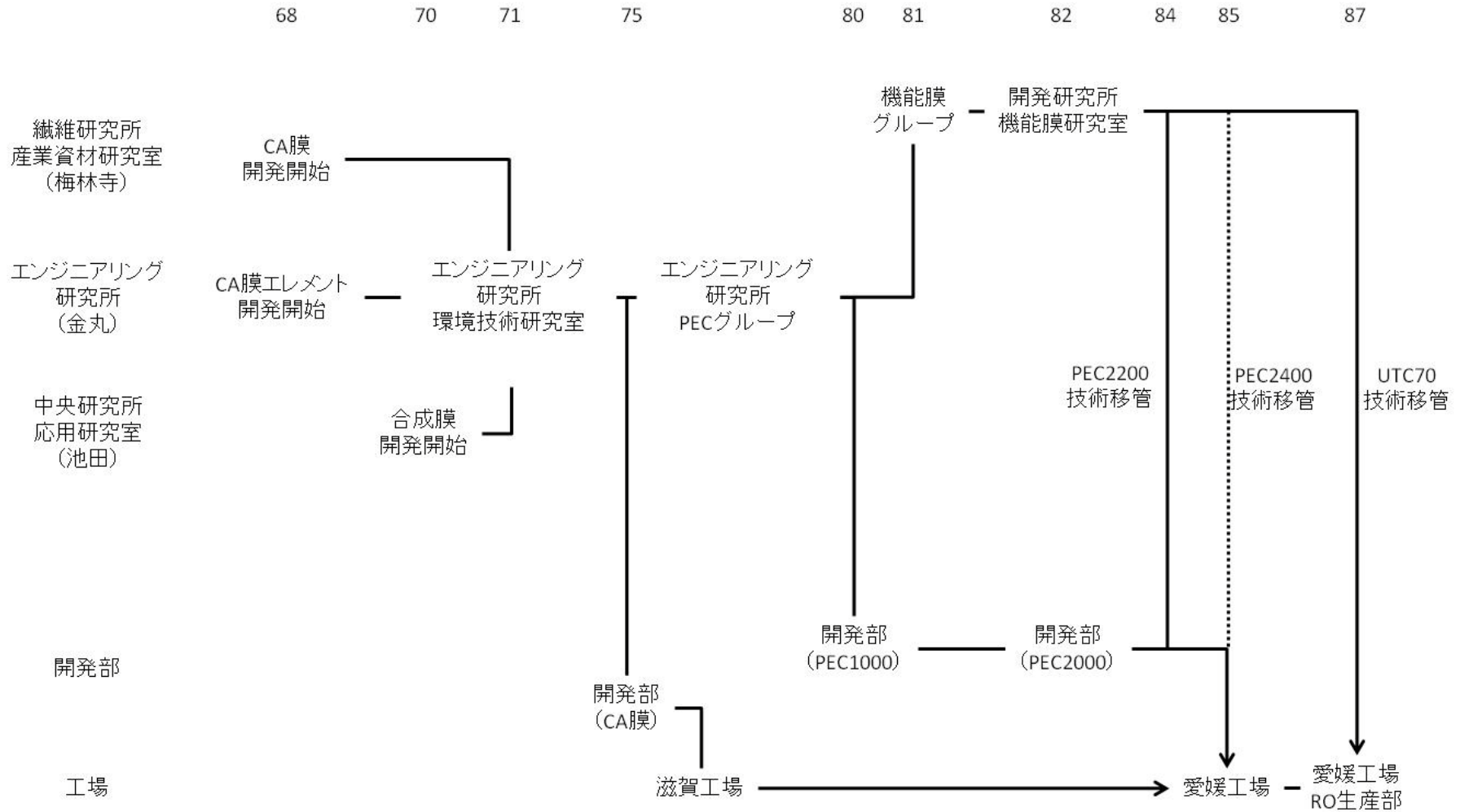
出所：東レ講演資料

補図 2：開発の流れ

<複合膜の展開>

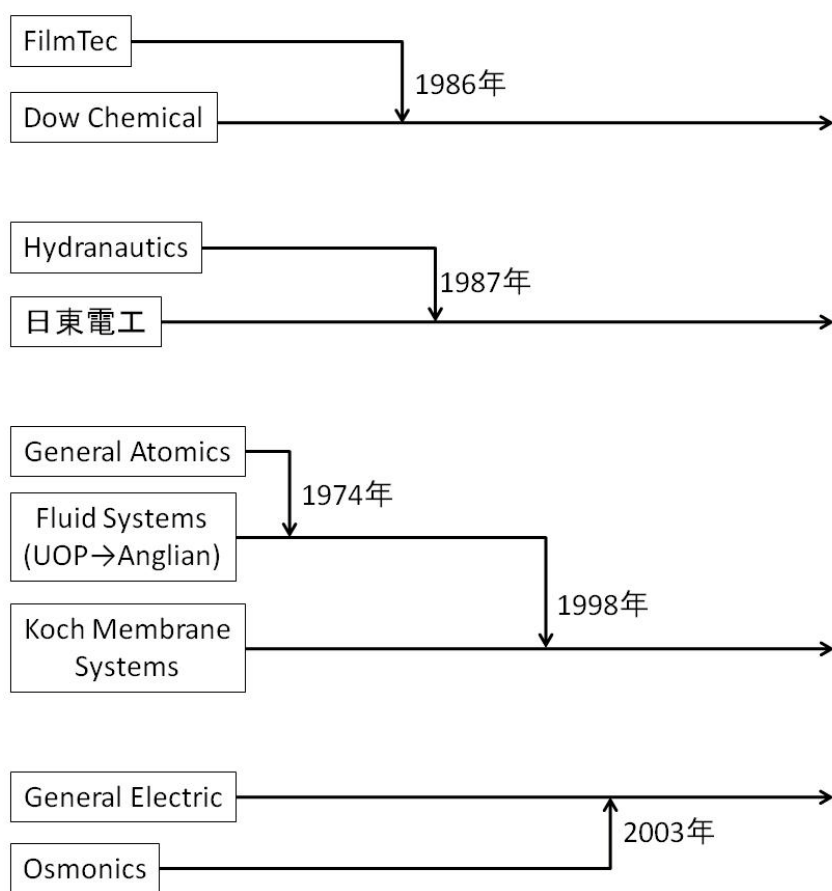


<組織の流れ>



出所：インタビューをもとに、筆者作成。

補図 3 : RO 膜技術に関わる主要 M&A 動向



出所：富士経済（2009）pp.49-50 をもとに筆者作成。

IIIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2010

NO.	著者	タイトル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003年2月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機—自動販売機業界での成功要因」	2004年3月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機—新たなる課題への挑戦」	2004年3月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機—飲料自販機ビジネスの実態」	2004年3月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004年3月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績V字回復への改革」	2004年3月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004年3月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004年3月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004年3月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004年3月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004年3月
CASE#04-12	伊諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004年3月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004年10月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004年10月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004年11月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 —300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化—」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A)：事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B)：事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鑄造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鑄造システムの開発」	2009 年 7 月
CASE#10-01	工藤悟志 清水洋	「東芝： 0.6 μm 帯可視光半導体レーザーの開発」	2010 年 1 月
CASE#10-02	山口裕之	「東レ： 非感光ポリイミド法に基づくカラーフィルターの事業化と事業転換」	2010 年 3 月
CASE#10-03	三木朋乃 積田淳史 青島矢一	「NHK 放送技術研究所・NHK エンジニアリングサービス・日本ビクタ 株式会社： 話速変換技術を搭載したラジオ・テレビの開発」	2010 年 4 月
CASE#10-04	青島矢一 高永才 久保田達也	「日本電気： 最先端 LSI 量産を可能にした ArF レジスト材料の開発」	2010 年 5 月
CASE#10-05	青島矢一 大久保いづみ	「新日本製鐵： コークス炉炭化室診断・補修技術」	2010 年 7 月
CASE#10-06	久保田達也 青島矢一	「横河電機： 高速共焦点顕微鏡の開発と事業化プロセス」	2010 年 7 月
CASE#10-07	工藤秀雄 延岡健太郎	「パナソニック： IH 調理器の開発」	2010 年 7 月
CASE#10-08	今井裕介 岩崎慶 幸務正 鈴木裕一郎 山田将知	「株式会社高井製作所の組織改革」	2010 年 7 月
CASE#10-09	工藤悟志 清水洋	「ソニー： MOCVD 法による化合物半導体デバイスの開発と量産化」	2010 年 8 月
CASE#10-10	積田淳史 藤原雅俊	「中田製作所： 高機能造管成形機の開発と実用化」	2010 年 9 月
CASE#10-11	藤原雅俊 青島矢一 三木朋乃	「東レ： ポリアミド複合逆浸透膜および逆浸透膜システムの開発」	2010 年 12 月