

海水淡水化技術の開発

執筆者 佐藤眞士、神澤千代志

(東京工業試験所、化学技術研究所)

要旨

海水淡水化技術は東京工業試験所が蒸発法については過去の研究実績を生かし、即実用化を目指した大型プロジェクト技術開発(1969～1977年度)として取組んだものであり、逆浸透法については将来技術として我が国に技術の芽を育てる(1966年度)ところから取組み、造水促進センターに受け継がれて技術開発されたものである。いずれの技術開発も世界的に優れた我が国の海水淡水化技術として完成することができ、日本の技術に対する信頼性を獲得するものとして成功をおさめ、技術開発終了直後から水資源の乏しい中近東産油国に急速に普及するとともに、現代においても水資源確保の新たな方法として蒸発法は安定な水供給源として、逆浸透法は省エネルギーな水供給源として活用されているものである。特に、蒸発法については技術開発に至る経緯から技術開発への取り組み方、研究の進め方、技術開発成果の普及への取り組みなど、技術開発上参考にし得る内容を多く含むため、それら特徴部分についてできるだけ詳細に記述した。なお、逆浸透法については海水淡水化法として多くの実用化が成されているが、これに留まらず東工試で始まった研究は膜学会を生むなど幅広い分野の膜分離技術として展開されていった研究の原点を与えるものであったことに留意し、その後の展開にも触れて記述した。

[まえがき]

我が国の海水に資源を求める研究は、大戦直後の工業塩さえ入手が困難という状況を打開するために、東京工業試験所(以下、東工試)において昭和22年度から実施された「海水利用の研究」^{1,2)}に端を発している。そして、この研究は時代の変遷を経て、種々の技術を検証しながら、その後約20年に及んで東工試において引き続き実施され、海水処理に関する多面的な技術の蓄積が図られてきた。時代が進み、工業塩が安価に輸入できるようになり、一方大都市圏の水不足が予測されるに及び、目的対象物を淡水に転換して海水淡水化技術として、この技術開発に向けてこれまでの技術蓄積を生かしてフラッシュ蒸発(脚注1)法および革新的な将来技術としての逆浸透膜(脚注2)法(以下、逆浸透法)へと展開を図り、これらの技術開発を円滑に実施、発展させ、結実させたという経緯を持つものである。

脚注1. フラッシュ蒸発[flash evaporation]: ある温度にある溶液を、減圧ノズルを通して圧力の低い部屋に導くと溶媒成分が蒸発する。これをフラッシュ蒸発といい、発生した蒸気を凝縮分離すれば溶媒が得られる。溶液は蒸発潜熱を奪われて温度が下がり平衡温度に達する。多段フラッシュ蒸発法とは、この現象を用いたもので、減圧ノズルを通して圧力が次第に低下していくようにした蒸発室を多段に構成し、ここに高温に熱した溶液を流し、溶媒を効率よく分離していく方法をいう。

本文は、海水淡水化技術開発として同じプロジェクトリーダーが指導したこの二つの方法について記述することになるが、両者の技術開発には脚注に示したように技術手法が全く異なるものであることから、必然的に研究開発の目標、方法、研究体制など全く別種のものになるため、個別に[蒸発法]、[逆浸透法]として記述することとする。

1. [蒸発法]海水淡水化技術

1.1 はじめに

海水淡水化技術は、戦後の化学工業用原料としての工業塩さえ高価で入手が困難という状況を打開するために、東工試において実施された海水から苛性ソーダ、塩素等の化学資源を得るための「海水利用の研究」から始まっている。これらは昭和 22 年度から行われた電気製塩法^{1,3)}、蒸発濃縮法^{4~18,I.8)}、冷媒直接接触冷凍法^{18~22)}等によって研究され、それぞれ海水を濃縮する方法としても実績を挙げ、海水を取扱う技術が東工試に蓄積されていたという背景を示すものである。中でもとりわけ後の海水淡水化技術の技術基盤を構成したのは、蒸発濃縮法であって、この研究は昭和 27~29 年度に亘り山形県酒田市において実施された試験プラントによる海水利用中間試験である。これは工業技術庁長官の指定研究として海水 100m³/日の処理能力を有する試験プラントを、自動制御技術を確立して連続運転し、海水を蒸気圧縮法で蒸発濃縮し、溶存有用成分を濃縮し、既存技術の分離工程へと結びつけるための総合的な技術開発研究^{4~18,I.8)}であり、この成功の経験が蒸発法海水淡水化技術を生む礎となっている。このことは、この研究を総括した西田広三課長（当時）の報文¹⁷⁾から引用すると、本研究は「化学関係の担当として石坂誠一技官、化学機械担当として田原浩一技官、自動制御関係の計装の担当として遠山武元技官のほか約 20 数名の研究者の協力によったものである。」とあり、本海水淡水化技術のリーダーが名を連ねていること、多くの研究者がかかわり総力を挙げた研究であったことを知ることができる。

しかし、時代とともに、工業塩が安価に容易に入手できるようになり、一方では昭和 39 年の「東京オリンピック渇水」に象徴されるように、我が国においてさえ水資源の枯渇を経験することにより水資源確保に不安が生じる状況が生じ始めるというように、研究を取り巻く状況が大きく変化したのであった。水不足を契機に行政機関の対応が始まり、建設省が昭和 41 年度から広域利水調査を開始したことに象徴されるように、政府から都市における水資源確保のための各種の調査報告書^{23,24)}が出され、将来的には大都市圏にお

脚注 2. 逆浸透膜[reverse osmosis membrane]：半透膜を介して溶液と溶媒が接すると溶媒が膜を通り溶媒側に浸透する。この浸透する時の圧力を浸透圧という。浸透圧より高い圧力を溶液側にかけると溶液側から溶媒が反対に膜を透過し、溶媒側に移動させることができる。これを逆浸透といい、かける圧力を逆浸透圧、これに用いられる膜を逆浸透膜という。

いて大規模な水不足が予測されるという警告がなされる状況となり、海水利用技術を取り巻く環境が大きく変化したのであった。とりわけ、科学技術庁資源調査会の報告²³⁾は、「海水淡水化技術の研究開発は、我が国における淡水資源確保のための一つの有力な手段」であり、さらには「技術輸出の上からも十分期待がもてるもの」でもあり、「国は積極的に行政上、財政上の措置を講じること」の必要性まで踏み込んだ提言したのであった。

これらの状況変化に応じて、これまでの海水利用研究で育んできた技術をもとに海水から淡水を得る海水淡水化技術へと転換を図り、水資源確保という大量の生産物に対応できる技術開発として展開し、さらには濃縮排海水から有用成分を分離するという東工試に蓄積されてきた海水利用研究を集大成する形で実施されたのが蒸発法による海水淡水化技術であった。

水資源を海水から確保するためには、これまでの技術とは異なり極めて大規模なものとなる技術の開発が必要であった。また、河川から得られる水価格が我が国では極めて安価なため、できるだけ安価に供給できることが求められた。

これに対応するため、米国政府が 1952 年に塩水法 (Saline Water Act) を制定し、塩水局 (Office of Saline Water : OSW) を設けて、多額の資金を投入して海水、かん水から淡水を得る技術開発研究を先進的に実施していたこと、鈴木篁東工試第 3 部部長 (当時) が 1961 年 11,12 月に米国を訪問、調査し、その最新情報²⁵⁾ をもたらしていたこと、また当時、在米日本大使館科学アタッシュを務めておられた石坂誠一技官も 4 年間の任務を解かれ 1962 年 2 月に東工試に帰任され²⁶⁾、米国の数々の科学情報をもたらしていたことから、これら先進情報に学ぶ取り組みが開始された。そして、OSW が塩水淡水化に関する最新情報をまとめ発行していた OSW レポートをまず入手し、海水淡水化に関する最新技術の収集、分析などを行うことから始められたのであった。

同時に、これまでの海水利用研究による技術蓄積を生かして、通商産業省が昭和 41 年度から開始した大型技術開発制度 (以下、大型プロジェクト) に向けて海水淡水化技術開発を提案することを一つの目標として掲げ研究企画が成されたのであった。その一つとして特別研究「化学プロセス工学に関する研究」(昭和 42 年度) を実行し²⁸⁾、当面の大規模な海水淡水化の適正技術としてのフラッシュ蒸発の研究が 2 段フラッシュ蒸発試験装置を設置して研究された。また、この中で将来技術として昭和 41 年度に新しい脱塩法として始められていた逆浸透法の研究²⁷⁾ が充実され実施された。昭和 43 年度には「化学プロセス工学に関する研究」は大型プロジェクト提案に直結する研究内容に改められ、(1)「フラッシュ蒸発法」、蒸発缶体のコンクリート化を意図した(2)「構造材料の開発研究」、約 2 倍に濃縮され排出される海水 (ブライン) を利用して電気透析法により濃縮液からカリウム回収する方法についての(3)「カリウムの分離に関する研究」、カリウム濃縮法としての(4)「冷凍法の研究」を取り上げ、大型プロジェクト提案に向けての前段階の研究が実施²⁹⁾ されたのであった。

なお、逆浸透法の研究は超薄膜等新規膜を作成し、その膜性能を検討する³⁰⁾など、今後の展開に向けて地道に研究実績を積む方向で研究が推進されていたが、大型プロジェクトというのはプロジェクト終了時点における実用化を目指して研究開発を行うものであったことから、開発目的が異なるため、この提案には含まれなかった。そして、逆浸透法海水淡水化技術については、昭和 49 年度から省エネルギー海水淡水化技術の開発として(財)造水促進センター(1.2.6.1 参照)に各企業が参加した形で技術開発が進められ、大きな成果を上げたが、これについては次章の[逆浸透法]海水淡水化技術にて記述する。

この結果、大型プロジェクトとしては、大都市圏の水不足に対応できる技術開発の必要性のため、当時の最大級装置より一桁以上大きな造水能力を持つ 10 万 m³/日程度の大量淡水製造を、最高性能を持って達成するシステムの開発を目標として、これに適する多段フラッシュ蒸発法を選定し、昭和 44 年度に「海水淡水化と副産物利用」の研究開発を提案し、採用された。そして、昭和 52 年度まで以下の項目で詳述するように実施され、世界最高性能の海水淡水化技術を完成するという社会的インパクトの大きな成果を上げることができたのであった。その成果は直ちに中近東諸国の水資源の乏しい産油国との「日本—中近東合同会議」の開催等により積極的に紹介され、中近東諸国への海水淡水化装置の輸出が急速に促進され、我が国の海水淡水化技術の圧倒的な優位性を世界に示す結果を招いたのであった。

1.2 大型プロジェクトに至るまでの研究および技術開発の推移

海水から淡水を得る機械的な装置としては、長期の航海を要する船舶用の飲用水確保のために必需の船載装置として、比較的少量の水を得るために使われてきた蒸発法淡水化装置がその原型としてあり、陸上用としては、我が国においても水のない島の炭鉱(例えば、長崎県池島炭鉱)等小規模の装置が作られ用いられてきた。

この蒸発法海水淡水化技術は塩分を含んだかん水や海水にしか生活用水源を求められない、かつエネルギーが豊富に得られる中近東地域で用いられてきたが、1,000m³/日程度の大型のものでは 1963 年に初めて多段フラッシュ法 (MSF; Multi-Stage Flash Evaporator) によって建設され実用化された³¹⁾のであった。

この多段フラッシュ法海水淡水化装置というのは、図 1 に示したような比較的構成機器が少なく単純で海水から蒸気を発生させ、それを凝縮させて淡水とするものである。

装置は多段の熱回収部、通常 2~3 段の熱放出部、給水加熱器、補給海水前処理装置、ポンプ類が主な構成機器である。海水は海水供給ポンプにより熱放出部の伝熱管に送られ加熱されて一部は放出される。残りが補給海水前処理装置で脱炭酸等の処理をされて最終段に供給され脱気される。ただし、この最終段脱気の方式は本プロジェクトにおいて開発された方式を示したもので、通常は前処理において脱気までされる。こうして、最も真空度の高い最終段で脱気までされた補給海水は、各段で蒸気を発生させ最も濃縮されたフラ

ッシュブラインと混合されブライン循環ポンプにより、熱回収部の伝熱管に循環ブラインとして送られる。循環ブラインは各段で発生した蒸気を凝縮させ、ドレンとして淡水を作りつつ凝縮潜熱を回収し温度を上昇させ、給水加熱器に到達する。ここで、外部からの熱源である加熱蒸気によって、最高ブライン温度 (t_{max}) まで加熱され、1 段目のフラッシュ室のオリフィスにより減圧されてフラッシュ蒸発して蒸気を発生し、蒸発潜熱を失ってブライン温度が低下する。発生した蒸気は伝熱管表面で凝縮し循環ブラインに熱を与えて伝熱管から滴下しドレン受けにたまって淡水として分離される。これを各段で繰り返し温度と圧力が低下していくという方式で、結果として海水を加熱して蒸気を発生し、蒸気を凝縮して淡水として分離するという方式である。図には温度分布のモデルをも並示した。

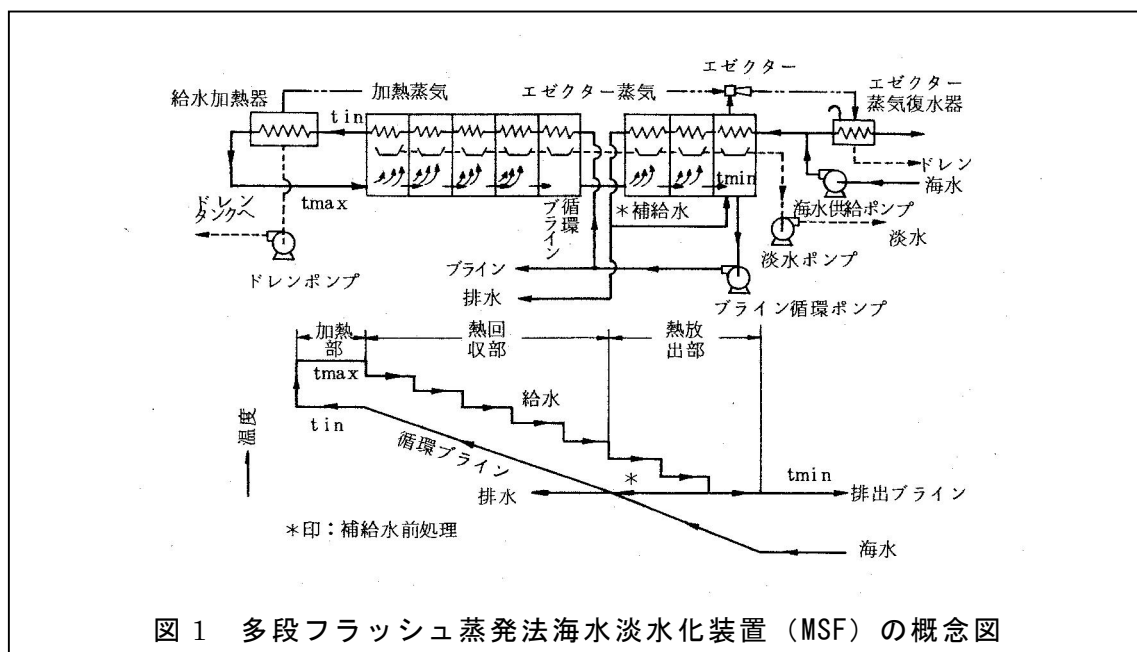


図 1 多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置（MSF）の概念図

一方、前項に述べた東工試における「海水利用の研究」は海水から有用な化学工業資源を得るための濃縮技術から始まっているが、淡水を目的生産物に転換したとしても技術面での本質的な違いはなく、この研究によって培われた経験と開発された技術が基礎となって技術開発が企画されたのであった。そして、都市圏の大規模渇水が予測されるにおよび、海水淡水化技術開発を明確に意識して前項で述べた「化学プロセス工学に関する研究」が組まれ、海水淡水化技術に対する研究を深め、最新技術情報を参加研究者全員で共用し究めてきたのであった。

昭和 42 年度の特設研究「化学プロセス工学に関する研究」には 14 名の研究者が参加しているが、発足と同時に 4 月から「海水の淡水化打ち合わせ会」が月に一度定例的に参加研究者を増やししながら約 2 年間持たれ、世界で最も進んだ海水淡水化情報を発信していた OSW レポートを中心に、海外情報の収集と課題、技術の問題点などの検討、2 段フラッシュ蒸発装置による研究等それぞれの研究の進行状況、成果の報告などを進め、大型プロジェクト研究開発への提案を打ち合わせ会の具体的な目途として準備をしてきたのであった。

年代		1950	1960	1970	1980
社会的背景	国内	工業塩を輸入、高価。 戦後もなく東工試において、工業塩、食用塩不足対策として「海水利用の研究」(昭和 22～29 年度)が実施され、「電気製塩、蒸発法の研究」により、苛性ソーダ、塩素などソーダ工業原料の取得のため研究が行われていた。 1952 上記のうち「蒸発法」は昭和 27 年度に工業技術庁長官指定研究になり酒田市鼓興社内に工業化中間試験装置を設置し、29 年度まで研究を実施し良好な成果を上げた。 1958 石坂誠一氏が在米日本大使館科学アタッシェ就任。	工業塩を安価に輸入可能になる。 1961 鈴木望氏(東工試第 3 部部長)が約 2 か月をかけてアメリカの塩水淡水化研究、試験工場の状況視察調査を行う。 1962 石坂誠一氏東工試に戻り、米国のかん水淡水化についての最新情報をもたらす。 1964 「東京オリンピック湯水」。 1967 科学技術庁資源調査会「海水淡水化の技術開発に関する報告」にて本技術開発は水資源確保、技術輸出が期待されるとし、国は積極的に行政上、財政上の措置を講じること提言。 1967 内田隆氏(東工試)が大型プロジェクト室に併任し、プロジェクト採用のための準備を行う。その後、プロジェクト終了まで毎年交代の併任者を出す。 1968 建設省報告にて昭和 60 年頃大都市圏で水不足が予測され対策の必要性が指摘された。	1973 (財)造水促進センター設立。 1975 海水淡水化大型プロジェクトの成果普及と各国計画調査のため、5 月中近東 5 カ国(イラン、クウェート、サウジアラビア、カタール、アラブ首長国連邦)の担当機関を訪問し、技術紹介、淡水化計画調査を行う。 1975 上記調査に基づき、開発官の要望により急ぎよ 12 月日本-中近東海水淡水化合同会議を東京で開催し、大分県鶴崎のテストモジュール研究を見学紹介。	研究担当者執筆による「海水淡水化技術」の出版、英訳され中東諸国に配布普及。
	国外	1952 (米)塩水転換法制定、塩水局(OSW)の設置し、水不足に備え「塩水転換計画」を開始。 OSW レポートの発行。	1963 中近東産油国に 1,000^m3/日規模の MSF 海水淡水化装置の設置がはじまる。 1964 「天然資源利用に関する日米会議」に「塩水転換技術及び副産物利用専門部会」設立(日米交互にホスト国となり年 1 回合同会議) 1965 ジョンソン大統領「塩水転換計画」の強化。毎年大量の OSW レポート(フラッシュ法、逆浸透膜法らが含まれる)が発行される。 1965 第 1 回国際脱塩会議(日本から 12 名参加) 1968 クウェートに我が国の企業による 1 万 m³/日のこれまで最大規模の多段フラッシュ装置(短管式)が建設される。	1973 第 1 次オイルショックによる原油価格の高騰 1975 この頃から中近東産油国に大型の蒸発法の海水淡水化装置が建設され始める。 1976 末から 1978 末までに世界の海水淡水化装置のうち蒸発法で建設された造水容量は約 170 万 m³/日、このうち日本の企業が建設したものは約 133 万 m³/日で約 80%を占めるというプロジェクトの成果が表れる。	1980 第 2 次オイルショック 中近東産油国に蒸発法の海水淡水化装置が大量に建設される。 (下段の内容参照)
東工試における海水淡水化に関連する研究	海水利用の研究	蒸発法 「蒸気圧縮法による海水濃縮と隔膜式電解法」(工業技術庁長官指定研究)(昭和 28～29 年度)(山形県酒田における中規模実験プラントによる研究:リーダー石坂誠一、田原浩一、遠山武) ⇒昭和 31 年北陸製塩(株)で実用化 冷凍法 冷媒直接接触冷凍濃縮法(昭和 27 年度～34 年度)(山口県徳山における実験プラントによる研究)	蒸発法 「化学プロセス工学に関する研究」(特別研究)(昭和 42～43 年度)にて海水のフラッシュ蒸発法:リーダー石坂誠一、田原浩一、外山茂樹(⇒大型プロジェクト海水淡水化多段フラッシュ法の開発へ) 逆浸透膜法 「化学プロセス工学に関する研究」(特別研究)(昭和 42 年度) 冷凍法 昭和 38 年度塩水より工業用水の製造に関する研究 昭和 40、41 年度塩水の淡水化に関する研究(⇒大型プロジェクト海水淡水化の副産物利用のカリウム回収の研究へ)	大型工業技術研究開発制度「海水淡水化と副産物利用」研究(昭和 44～51 年度)(東工試が全体のまとめ役) (1) 多段フラッシュ蒸発プロセスの工学的・材料的研究 ・高流速長管式テストプラントによる研究、テストモジュールによる研究 ・多段フラッシュ蒸発機構の解明 ・脱気・脱炭酸・スケール防止の研究 ・缶体材料(コンクリート)の研究 ・伝熱管材料の研究 ・最適化設計の研究 ・汚染海水の影響及び排出ブライン拡散の研究 ・海水淡水化トータルシステムの研究 (2) 副産物利用の研究 ・塩素等生成の研究 ・電気透析法の研究 ・カリウム回収の研究	我が国の技術による MSF 海水淡水化装置が全世界の造水量の 52%(1984)に達した。 サウジアラビアに大規模成果の技術で世界最大の合計 108 万 m³/日の装置(1984)が設置された。
	逆浸透法の研究		昭和 41 年度研究開始 化学プロセス工学に関する研究(昭和 42 年度)にて逆浸透法の研究推進(⇒次世代省エネルギー海水淡水化技術へ)の研究	1974 (財)造水促進センター、茅ヶ崎臨海研究所にて省エネルギー海水淡水化技術開発が始まる。	次世代プロジェクト

表 1 東工試における海水淡水化プロジェクト研究に至るまでの背景と経緯及び成果の普及

その成果の一部は昭和 43 年 11 月 13 日に行われた工業技術院創立 20 周年記念東工試研究発表会で報告された³²⁾。こうした中で、次項で述べる開発目標等が明確化され、昭和 44 年度からの大型プロジェクト開始が認められるに至ったのであった。

このような海水淡水化技術に関する研究および技術動向をプロジェクト研究に至る背景や経緯及びその成果の普及についてまとめ、表 1 に示した。

1.2.1 大型プロジェクトの開発目標設定のための検討項目

(下線部は浮かび上がった研究開発項目を示す)

1.2.1.1 大量・安価な海水淡水化技術のための開発課題

建設省河川局は「全国水需要の展望」(昭和 43 年 9 月)²⁴⁾において昭和 60 年には、関東地域で 10 億 m^3 /年の水不足の予測を明らかにしていた。このような巨大な水資源の絶対量不足に対処するためには、100 万 m^3 /日程度の規模で、安価に海水から淡水を作り出す技術開発が必要とされた。

このような大容量の造水量に対応するためには、図 1 に示したように構成要素が比較的単純で装置としてのスケールメリットを有し、大型化に最も適する方式である多段フラッシュ蒸発 (MSF) 法が選定され、100 万 m^3 /日造水量は基本ユニット 10 万 m^3 /日装置の並列使用で可能であることから、この基本ユニットの造水容量が開発目標の装置の規模に設定された。この方式は火力発電との二重目的プラントとして得られる低圧スチームが活用出来ることもメリットであったことも考慮された。さらには前に述べた特別研究「化学プロセス工学に関する研究」における 2 段フラッシュ蒸発実験装置による運転経験から稼働のし易さ、安定性などが明確にされていたことも考慮されたのであった。

また、このように巨大な多段フラッシュ蒸発装置は幅が数十 m 程度、直列に並べると長さが 150m 程度、高さが 3~4m といったように、従来の化学装置とは比較にならない程の巨大なものとなるため、建造物技術の革新的活用により装置費を軽減することを意図し、蒸発缶体をコンクリートで製作する技術の開発を目標に加え研究開発することとした。

さらに、できるだけ安価に淡水を得ることに資するため、多段フラッシュ法では約 2 倍に濃縮された海水が排出されることから、「海水利用の研究」の経験を活かして、これから副産物としてナトリウム塩、カリウム塩など、有用成分を経済的に回収する技術を開発することも目標とした。

1.2.1.2 高流速長管式の選定

多段フラッシュ蒸発法では、加熱された海水が減圧絞り機構(オリフィス)を通過してフラッシュ蒸発段に流下すると蒸発促進のため、フラッシュ流はできるだけ浅くなるように流したいために、大容量装置では流路幅は非常に広いものになる。これをできるだけコンパクトな装置で達成するためには装置幅あたりのフラッシュ流速を高速化する必要がある、

高流速フラッシュ流が課題とされた。

また、多段フラッシュ蒸発法には、伝熱管の設置方式である短管式と長管式とがある。短管式というのは従来の装置に用いられている伝熱管束の設置方式で、加熱された海水フラッシュ蒸発流に対して直交する形に伝熱管を設置する小型の装置に用いられ確立された方式である。一方、大型装置では短管式では伝熱管が流路幅方向に設置されるために流路幅の拡大とともに伝熱管が必要以上に長くなり、伝熱面積に無駄が生じること、段ごとに高価な伝熱管板が必要になること、流路が U 字型に段ごとに曲がることになり、流動抵抗が大きくなることなど、大型化には向いていない方式と判断される。

長管式というのは、フラッシュ流路に対して並行する形に伝熱管を設置する方式であるため流路幅には関係せず、大量のフラッシュ流に対しても余分な伝熱面積が生じることのない、大量の海水淡水化装置向きの方式である。また、伝熱管は数段のフラッシュ蒸発室を貫いて直線的に設置される方式であるため、管内流速の高流速化も可能で、こうすると伝熱管の総括伝熱係数のうち支配的な管内伝熱係数をも大きくすることができ、結果的に高価な伝熱管本数を減少することもできる。さらに、長管式では流路の曲り部の減少、流路の拡大・縮小の回数が減少することから流動抵抗が減少しポンプ動力が減少する、高価な伝熱管板が大幅に減少するなどの長所がある。一方、長管を多数段貫く工事法の確立、段間の圧力差を保持するための一本一本の伝熱管の段間シール技術の確立しなければならないという技術課題が生じることになり、これは解決しなければならない課題である。

以上のことから、開発目標の大容量海水淡水化装置として、高流速長官式多段フラッシュ蒸発方式が選定された。

1.2.1.3 伝熱管材料の選定

蒸発法海水淡水化装置は、フラッシュ室で発生した蒸気を冷却、凝縮して淡水を得るのであるため、伝熱管が大量に必要になり、プラント建設費全体に占める割合が数十%と大きく“熱交換器のお化け”といわれる由縁がここにある。伝熱管を流れる熱海水（ブライン）は淡水が除去された濃縮海水と前処理済み海水とが混合したもので温度、濃度が高くなるため、腐食性がより強いという問題があり、長管の伝熱管では、特に腐食によって交換等を要する管の発生はできるだけ避けなければならないため、安価で耐食性の強い伝熱管材料の選定が不可欠な技術課題である。

1.2.1.4 原料海水の前処理技術の確立

熱海水は腐食力が強い上に、海水含有化学成分によって、析出化合物を生じ、伝熱管内面にスケールとして付着し易い性質を持っている。そこで、原料海水は前処理によって、多段フラッシュ蒸発装置の稼働温度・濃度範囲では伝熱管等を腐食しないだけでなく、スケールを付着させないためのスケール防止技術の確立しておく必要がある。腐食性を抑制

するために海水から脱酸素するための脱気処理、発生しやすい炭酸化合物を抑えるために海水溶存の炭酸ガスを除く脱炭酸処理で、これを大型装置で効率的に行うための技術開発が課題である。

1.2.1.5 多段フラッシュ蒸発装置の高効率化の課題

高流速長管式多段フラッシュ蒸発テストプラントを設置し、その運転等を通じて、この高効率化を図るために、高流速化、および最高ブライン温度(最高加熱温度)を高められるか見極め、造水比（加熱蒸気量に対する生成淡水量比）を向上させ、大容量の造水をコンパクトな装置で、かつ世界最高性能の高効率さを実現する高流速長管式多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置の技術開発を行うことである。

1.2.1.6 有用副産物取得技術の確立

多段フラッシュ蒸発法で副生する約 2 倍の濃縮海水の利点を活用して経済的な有用成分の回収法を確立することができれば、造水コストの低減に役立てることができる。その方策として、「海水利用の研究」の成果を生かしてプロセスが組み立てられた。それは、まず電気透析法で塩分 20%程度まで濃縮し、固形塩を加えて飽和塩水とし、これを隔膜電解で塩素ガスと食塩を含むカ性ソーダ水溶液を得、このカ性ソーダ液を煮詰めて固形塩を晶析させ、母液にカリウム含有カ性ソーダ液を得て、さらにカ性ソーダとカ性カリウムに分けるという方式である。特に肥料成分として重要なカリウムは我が国では資源的に得られにくいものであることから、この方式を技術的に確立することができれば、淡水化の費用低減に貢献するだけでなく我が国にとって意義あるものであった。

1.2.2 大型プロジェクト「海水淡水化と副産物利用」研究基本計画

以上の研究開発課題についての検討内容を踏まえ基本計画は以下のとおり定められた。

- (1) 研究開発期間 昭和 44 年度から 7 年間（実質 9 年間）
- (2) 研究開発費総額 約 50 億円（実績約 67 億円）
- (3) 研究開発の目標と方式
 - 1) 近い将来に予測される水資源の絶対量不足に対処し得る安定した、しかも低廉な都市用水の供給を確保するため、海水から淡水を大型実用プラント(造水量 100 万 m^3/day 程度)により 30 円/ m^3 台で量産する技術確立するとともに、その副産物としてのナトリウム塩、カリウム塩などの有用成分を経済的に回収、利用する技術確立することを目標とする。
 - 2) 淡水化の方式は、現在大型化に最も適すると考えられている多段フラッシュ方式とし、昭和 44 年度から昭和 50 年度までの 7 年計画（注：実際には昭和 48 年度の石油危機のため昭和 51 年度まで延長された。そして、さらに当初計画にはな

かった調査研究である「海水淡水化トータルシステムの研究」が昭和 52 年度に実施された。) の計画によって 10 万 m^3/day 程度のプラントを建設するための基礎技術を確立する。

- 3) このため、高流速長管式多段フラッシュ法テスト装置(造水量 $3,000\text{m}^3/\text{day}$ 程度)の試作、運転研究を中心に、原料海水前処理(脱気・脱炭酸・スケール防止等)技術の開発、プラント材料(伝熱管及び蒸発缶体材料)に関する研究等を行い、これにより得られた成果を基礎に大型淡水化プラントの部分試作と運転研究(テストモジュールによる研究)を行う。
- 4) また、以上と平行して、電気透析法、カリウム回収法等の副産物利用技術の研究開発を行う。

以上のように、基本計画はプロセスとして「水資源の絶対量不足に対処」する一方法として「最も適すると考えられている多段フラッシュ蒸発方式」のみを取り上げ「海水から淡水を」「量産する技術を確立」することと整理し、見通しの立つ開発目標としたのであった。ただ、造水コストが基本計画の中に組み込まれたことは、水資源という自然界からの供給に対して桁外れなものにはならないことを示す意味合いの必要性はあったとしても、経済情勢によって激しく変動するものであり、特にプロジェクト推進中に石油危機を経験したことから明確になったのであったが、これを達成できないことをもって技術開発自身に支障を生じることのない配慮が当初からなされておく必要があったのではないと思われる技術開発上の問題点を含むものであった。幸いにして、プロジェクトリーダーはじめ担当者の努力により本技術開発は何ら支障なく継続されたのであった。なお、この造水コストに関してはプロジェクト内に委員会を設け、常に同一基準で評価するための「コスト算定基準」^{1.1)} が作成された意義も大きい。

以上の基本計画を具体化するために、研究課題とそのスケジュールが図 2 のように決定された。

図 2 には、実際に実施されたスケジュール及び研究項目を示したが、破線で囲まれた研究項目は計画段階ではなかったもので、研究の進捗とともに浮かび上がってきた必要性から組み込まれたものである。

「汚染海水の影響、及び排出ブラインの拡散の影響」は、前者は沿岸地域の汚染海水を原料として海水淡水化を行う場合の生成淡水に及ぼす影響、装置材料に及ぼす影響を明確にするためのもので、後者は排出ブラインが周辺海域にどのように拡散するかを明らかにし、環境に対する影響を明らかにしようとするものであって、環境問題へのはじめての取り組みであった。

「海水淡水化トータルシステムの研究」は、河川水と組み合わせて水供給トータルシステムの中に海水淡水化を組み込む場合において、経済性、運転方式、運転保守技術等

の問題点を、実用状態を想定して明らかにしようというものであった。

また、「多段フラッシュ蒸発機構の解明」、「最適化設計の研究」、「カリウム回収の研究」および「汚染海水の影響及びブライン拡散の研究」は東工試の基礎的研究として行われたもので、後者の2つ研究は再委託先の企業を選び、実施された。図2の研究項目の内容、成果については次節以降に紹介する。ただし、後述するように基礎的研究側と委託研究側との密接な連携が全ての研究項目について実施されたのであった。

昭和 44 (1969)年 度	45 (1970)	46 (1971)	47 (1972)	48 (1973)	49 (1974)	50 (1975)	51 (1976)	52 (1977)
-----------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

(1) 多段フラッシュ蒸発プロセスの工学的・材料的研究

高流速長管式テストプラントによる研究								
			テストモジュールによる研究				海水淡	
多段フラッシュ蒸発機構の解明							水化ト	
脱気・脱炭酸・スケール防止の研究				汚染海水の影響 及び 排出ブライン拡散の研究				ータル
缶体材料（コンクリート）の研究								システ ムの研 究
伝熱管材料の研究								
最適化設計の研究								

(2) 副産物利用の研究

	塩素等生成の研究						
	電 気 透 析 法 の 研 究						
カ リ ウ ム 回 収 の 研 究							

(3) 東京工業試験所臨海研究施設

茅ヶ崎臨海研究施設								
				大分臨海研究施設				

図2 研究項目と実施スケジュール

1.2.3 開発目標を実現するための研究手法

1.2.3.1 委託研究

基本計画の目標を達成するためには図2に示された各研究項目が行われなければならない。とりわけ、大規模なテストプラントを必要とするような研究は民間企業に委託された。委託研究先に選定された企業はヒアリングを介して専門知識を持ち、研究実績のある

企業が選ばれた。これを表 2 に示した。

「高流速長管式テストプラントによる研究」は実機規模のテストプラントを建設、運転し、高流速長管式多段フラッシュ法の基礎的特性を明らかにすること、テストプラントとしての最高性能を究めるとともに、これを維持しつつフラッシュブラインの高流速化の可能性と可能限界を追求し、コンパクトな最高性能の装置の実現化を図るためのものである。

表 2 委託研究項目と委託会社

高流速長管式テストプラント による研究	(株)笹倉機械製作所 石川島播磨重工業(株)
脱気・脱炭酸・スケール防止の研究	(株)日立製作所
缶体材料(コンクリート)の研究	鹿島建設(株)
伝熱管材料の研究	
ループテスト	日揮(株)
フィールドテスト	三菱重工業(株)
塩素等生成の研究	旭硝子(株)
電気透析法の研究	旭硝子(株)
テストモジュールによる研究	(株)笹倉機械製作所 [再委託 (株)日立製作所] [再委託 鹿島建設(株)]

「脱気・脱炭酸・スケール防止の研究」は 1.2.1.4 で述べた海水の前処理技術の確立に対応するものである。

「缶体材料(コンクリート)の研究」は、1.2.1.1 で述べた巨大な装置となりうる缶体の材料をコンクリートで建設、耐用可能性を追求し、現地施工等についても検討し、装置の建設費の低減化を図る課題に対応するものである。

「伝熱管材料の研究」は、1.2.1.3 で述べた安価で熱海水に対しても耐食性のある実用材料を見出し、伝熱管としての使用可能性を検証する課題に対応するものである。

「塩素等生成の研究」、「電気透析法の研究」は 1.2.1.6 で述べた濃縮排出ブラインから副産物を得るための技術開発で、電気透析法で塩分を濃縮し、これを隔膜電解で塩素ガスと食塩を含むカリウム含有カ性ソーダ水溶液を得るプロセスを高効率で実現し、カリウム

回収システム側に提供するなど副産物利用技術の高効率構築を図ろうとするものである。

「テストモジュールによる研究」は、高流速長管式テストプラントによる研究等海水淡水化装置に係るこれまでの開発技術を集約した本大型プロジェクトが目指す 10 万 m^3 /日級海水淡水化プラントのプロトタイプの装置である。これは、熱放出部の全段と熱回収部の稼働温度域の複数段からなる部分テストプラント(モジュール)で、実験温度域を変えることによってその部分の稼働域データを取得し、それを全温度域にわたって積み上げて、10 万 m^3 /日級海水淡水化装置全体にわたる実験データを得ることによって新たな技術開発を行うとともに、これまでの開発技術を集約総合化した状態での検証を実施し、実規模のプラント建設、運転技術を開発、確立しようとする海水淡水化装置開発の総まとめの研究である。

1.2.3.2 東工試の基礎的研究および技術開発における位置づけ

委託された研究項目とはいえ基礎的研究によるデータを必要とするなど東工試の研究と密接に連携しているために、それぞれの専門研究者が、専門知識を生かして分担、協力した。同時に、東工試としてどういう研究課題があるかをシステムティックに掘り出し、漏れのないようにカバーするために、表 3 に一例として示した現象／手法マトリクス法で課題を整理し選定した。

この例は図 2 に示した「多段フラッシュ蒸発プロセスの工学的・材料的研究」の開発研究課題の「多段フラッシュ蒸発機構の解明」、「最適化設計の研究」の研究項目について示したもので、多段フラッシュ蒸発装置を構成する諸現象のうちで、何らかの技術的課題を抱えているものを選び出し、それらの現象を解明する手法を選んでマトリクスを構成すると、その交点に具体的な課題が浮かび上がる。そのうち何らかの学術的あるいは技術的アクティビティを有するものを選び出したのがこの表である。このようにすると各研究課題が必要とする専門知識が手法として示されていることにもなり自然に各研究者の分担が決まっていくことになる。

こうして掘り起こされた研究課題は、図 2 の全体的なスケジュールに拘束されながら、より具体的な研究内容と研究相互の関連性を認識させることにつながる。これを明らかにする一例として図 3 の PERT 図が描かれた³³⁾。この図は、図 2 の研究実施スケジュールの中で、最も中心的な「高流速長管式テストプラントによる研究」とすべての研究開発成果が集約される「テストモジュールによる研究」を軸として、「多段フラッシュ蒸発機構の解明」と「最適化設計の研究」にかかわる表 3 に浮かび上がった研究課題の具体的内容を PERT 図に示したものである。本来ならば横軸に時間軸が取られるが、ここでは省略した。図の二本線で示した中心的な研究開発課題の流れを完成していくために各研究課題の役割と関連性が明確に示されている。このようにともすれば遊離しがちな委託研究と基礎的研究とがネットワークにより有機的な連携をもって進められなければならないことを明らか

にしたのであった。

表 3 多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置開発研究課題に関する現象／手法マトリクス

手 法 現象	数 学 的 解 析、ソフト ウェア	装 置（構 造）設計	伝熱工学	物質移動 学	流体力学	微粒子工 学	海水化学	熱力学	物性 測定法
凝縮伝熱、 流動伝熱	伝熱管束最 適設計、総 括伝熱係数 の算定	伝熱面表 面処理 伝熱管段 間シール	膜凝縮伝 熱、管外 伝熱係 数、管内 伝熱係数	非凝縮性 ガ ス 濃 度、蒸気 流、ミス ト拡散	管外凝縮 薄膜、乱流 状態、流動 分布	ミスト濃 度	スケール 成分の析 出、安定過 飽和度	熱物性予 測、温度 分布	温度セン サーの選 択・検定、 温度測定、 粘度
高流速フ ラッシュ 現象	非平衡度の 算定	絞り機構、 流動幅・深 さ、底面形 状	フラッシ ュ流内温 度分布	フラッシュ流動、非平 衡現象		ミスト発 生、ミスト 測定	装置腐食	非平衡温 度差	沸点上昇
飛沫同伴	デミスター設計			デミスターの性能、 ミスト発生・飛散濃度					ミスト粒 度、生成水 純度
脱気、脱炭 酸、結晶塩 析出	処理装置設計 最高温度、濃縮度		スケール 生成	スケール成分過飽和安 定流動、二相流 ガス放散			pH、溶解 度、スケー ル生成		ガス分析 過飽和度
管内流動 装置材料	缶体設計、管束設計 伝熱管段間シール		伝熱管選 定		流動分布 管室設計	スケール 沈着	熱海水の 材料腐食 特性		耐食試験
海水淡水 化システ ム	プロセスの動特性と制御、部分負荷稼働特性 シミュレーションと実験プラントデータ処理システム 性能評価と最適化								

特にこの中でも、研究開発の中心的課題である「高流速長管式テストプラントによる研究」では、東工試と委託研究会社との密接な打ち合わせの下に、本大型プロジェクトが目指す 10 万 m³/日級海水淡水化プラントの研究開発のためには、プロトタイプの実験プラントとして、どの程度の規模の装置で実験することが適当かといったところから検討が行われた。そして、当時の化学プラントのスケールアップ係数を考慮し、かつフラッシュ流速変更可能域は 2 倍程度までの高流速化を検証できることといった基本的観点、および最高性能の装置稼働の検証が実行可能なテストプラントを用意する観点を踏まえ、基礎的研究において実行されていた最適化研究の成果³⁴⁾をも考慮され、熱回収部 36 段、熱放出

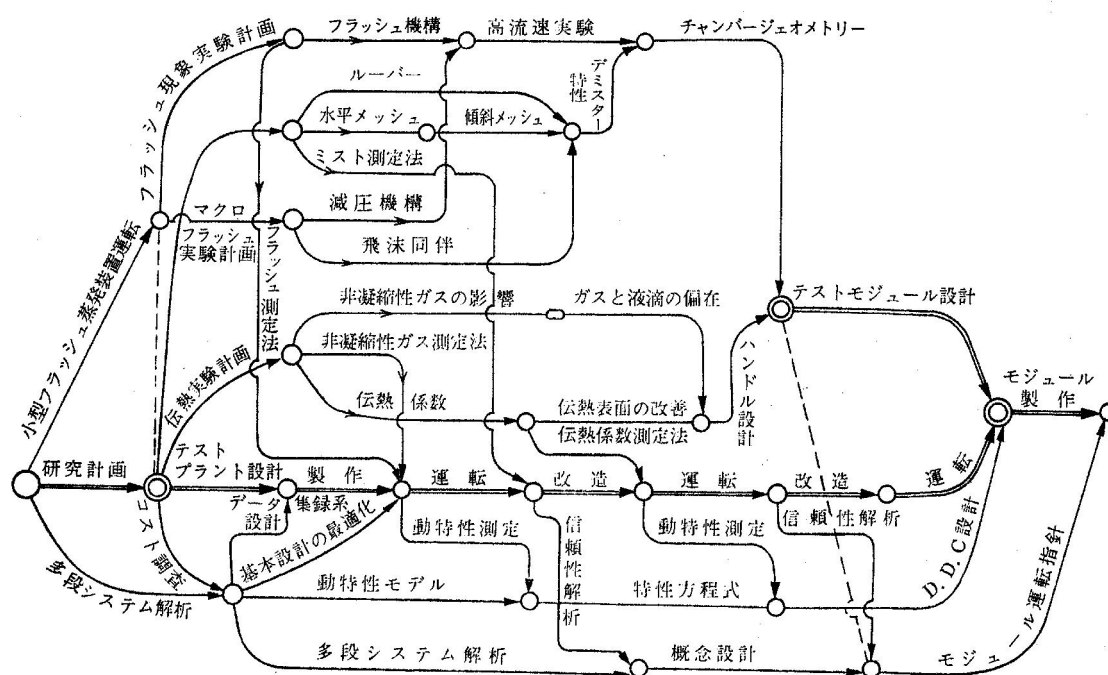


図 3 PERT(Program Evaluation and Review Technique)図 33)

部 3 段、最高ブライン温度 121°C 、造水比 11~12、排出ブライン濃縮比 2 で、 $3,000\text{m}^3/\text{日}$ の造水量の能力を検証可能なテストプラントとすることが決定され、さらにフラッシュ状態等が外部からすべての段において観察可能な大きなガラス窓付にすることが決定され、設計・建設されたのであった。また、温度測定センサー等センサー類の選定・設置場所等についても細かなところまで詳細にわたって協議し、実施された。

このプラントによる研究は本大型プロジェクトが目指す $10\text{万 m}^3/\text{日}$ 級海水淡水化プラントのプロトタイプであって、全体の研究計画の中でも中心的な役割を持つものであり、種々の課題に対して長期の連続運転により、多段フラッシュ蒸発装置の諸特性を明らかにする目的を持つものであったため、それらの信頼性あるデータを取得するためのデータ収録装置も含めて、東工試側の「最適化設計の研究」、「多段フラッシュ機構の解明」といった基礎的研究と緊密な連携を持って実行されるように考慮され、実際にそのように研究が進められたのであった。

このほか、「カリウム回収の研究」は委託研究「副産物利用の研究」との密接な連携の下、種々の方法の検討から始まり、最終的にはカ性ソーダ 3.5 水塩結晶を晶析分離し、溶液中にカリウムを濃縮回収するプロセスが提案され、長い研究実績を持つ冷凍法海水淡水化研究に携わったグループが研究を担当したのであった。

1.2.4 研究推進体制

この技術開発研究を成功裏に進め得た点を研究体制、組織の面から見てみると幾つの特徴を挙げることができる。まず、研究開発の推進に大きな役割を果たしているのが本省の大型プロジェクト研究開発官室である。ここに海水淡水化技術開発担当の研究開発官が一人、研究開発官付き専門職一人の行政技官がおかれ、ここに研究的な面でのバックアップのために東工試から研究者が併任の形で送られていた。ここでは本プロジェクトの円滑な推進のための行政業務、すなわち予算の積算管理業務、予算獲得のための省内及び大蔵省との折衝、あるいはジャーナリズム等に係る対外的な業務全般、特許・ノウハウ等技術成果の指定・管理事務など、行政面に係る全般的な業務を担当している。ここに、統括的に開発研究を進行している東工試からプロジェクト起ち上げ時期から研究者が送られており、行政側との密接かつ有機的な連携の下、研究開発が実質的に研究現場に重点を置いて進められるよう、あるいは研究現場の声がプロジェクト推進に即反映できるような構図ができていたことが特徴の一つであった。併任した研究者は任期のほぼ一年は研究から遠ざかることになり、まったく専門外の業務を経験することでその負担は大きなものであったが、その反面ともすれば研究室に閉じこもり社会から隔絶した研究生を送りがちな研究者を技術開発行政の世界に引出し、経験させることになったことは、いろいろな面で研究者の見聞を広めさせることにもなり、研究者の見識を豊かにすることにも役立つものになったのであった。

そして、テーマごとに組織されたワーキンググループの運用、臨海研究施設の活用、海水淡水化推進本部室の設置、各種調査委員会の開催、及び大学教授等専門知識に長けた方々の知恵をいただく流動研究員制度の活用などを挙げることができる。このように、東工試の主導性が一貫して貫かれる研究運営体制が生まれ、研究的裏付けを備え一貫した姿勢で指導したリーダーたちの存在と、円滑に機能するよう雑務的な業務をいわず精力的に協力した多くの研究者の存在とが相俟った結果によって、プロジェクトは成功裏に進捗することができたのであった。なお、流動研究員は 8 年間で延べ 82 名にもなり、このような外部との交流、外部からの研究協力が、この研究に知恵を与え、友好的な人々の輪を広げ、直接的、間接的にこのプロジェクトを支えたことも見逃せないことである。

1.2.4.1 ワーキンググループ

このプロジェクト研究は組織的な研究が必要であり、図 2 の研究スケジュール、図 3 の PERT 図で示したように、応用研究である委託研究と基礎的研究である開発研究とが有機的に連携した研究スケジュール、研究計画として組み立てられ、効率よく研究を推進することを必要としている。そのための組織として、テーマごとにワーキンググループが設けられた。ここには、委託研究、開発研究に従事する研究者は無論のこと、大学関係をはじめとする学識経験者も加わるという構成が執られた。この研究開発組織としてのワーキン

グループを図 4 に示した。

図 4 は研究開発官が統括する研究開発連絡会議内のテーマごとの研究開発に関する実務をつかさどるのがそれぞれのワーキンググループであることを示している。したがって、ワーキンググループでは研究計画、研究開発進捗状況および成果の検討、その研究開発分野の運営上の諸問題に関して実質的な議論、検討が行われた。

「研究開発連絡会議」はワーキンググループの名を持たないが、研究開発官を主査とするプロジェクト全体の統括のワーキンググループ機関であって、年 2 回開催され、年間の研究計画、研究成果を主として審議し、実質的な研究開発の運営は全体を統括する企画ワーキンググループないし、各技術専門別ワーキンググループが行なった。

図では並列的に示されているが、なかでも「企画ワーキンググループ」の主査は研究開発のプロジェクトリーダーが務め、各研究リーダーが幹事として補佐する体制を取っており、研究開発全般を把握しながら問題点の解決等全般的な進捗を円滑に進める役割をもってその機能を発揮してきたのであった。いわば研究現場を地盤として研究開発をいかに推進していくかという立場を明確にして、その役割を果たした企画ワーキンググループの存在が、石油危機等の荒波を切り抜け、最終的な実機規模の技術開発を行う大型モジュールによる研究開発まで実行できるよう引导し、プロジェクトを成功に導いたそもそもの要因であったとみることができる。

各技術分野のワーキンググループもこの主査および幹事の体制を踏襲し、そこにその分野の研究リーダー達が就き、その分野の研究開発の進捗に責任をもって円滑に進むよう運営を図ってきたのであった。

図 4 に示されたように、昭和 48 年度までとその後とは、その研究開発進行時期に対する各研究開発の必要性に応じてワーキンググループの構成を大幅に変え、モジュールワーキンググループのような総合技術の開発に対しては新規の設置と、要素技術の開発においてもその必要性に応じて内容の変更を行い、全般的な研究開発の円滑な推進のために対応している。こうした柔軟な対応は個々のワーキンググループの運営にも貫かれ、委員以外の研究者の参加が積極的に求められ、その発言も委員と同等に扱われ、研究開発推進に役立てられたのであった。

1.2.4.2 東京工業試験所臨海研究施設と海水淡水化研究推進本部室の設置

本技術開発は東工試の「海水利用の研究」による経験と技術蓄積を反映していく意味合いもあり、研究組合方式を取らず、東工試がこの任を果たす方式をとった。図 2 に示された多岐にわたる研究項目を推進し、海水淡水化プロジェクト全般にわたる総括的まとめや推進を行うシンクタンクの役割、及び研究の管理運営業務が果たされなければならない。そのために、東工試内に海水淡水化研究推進本部室が設置された。

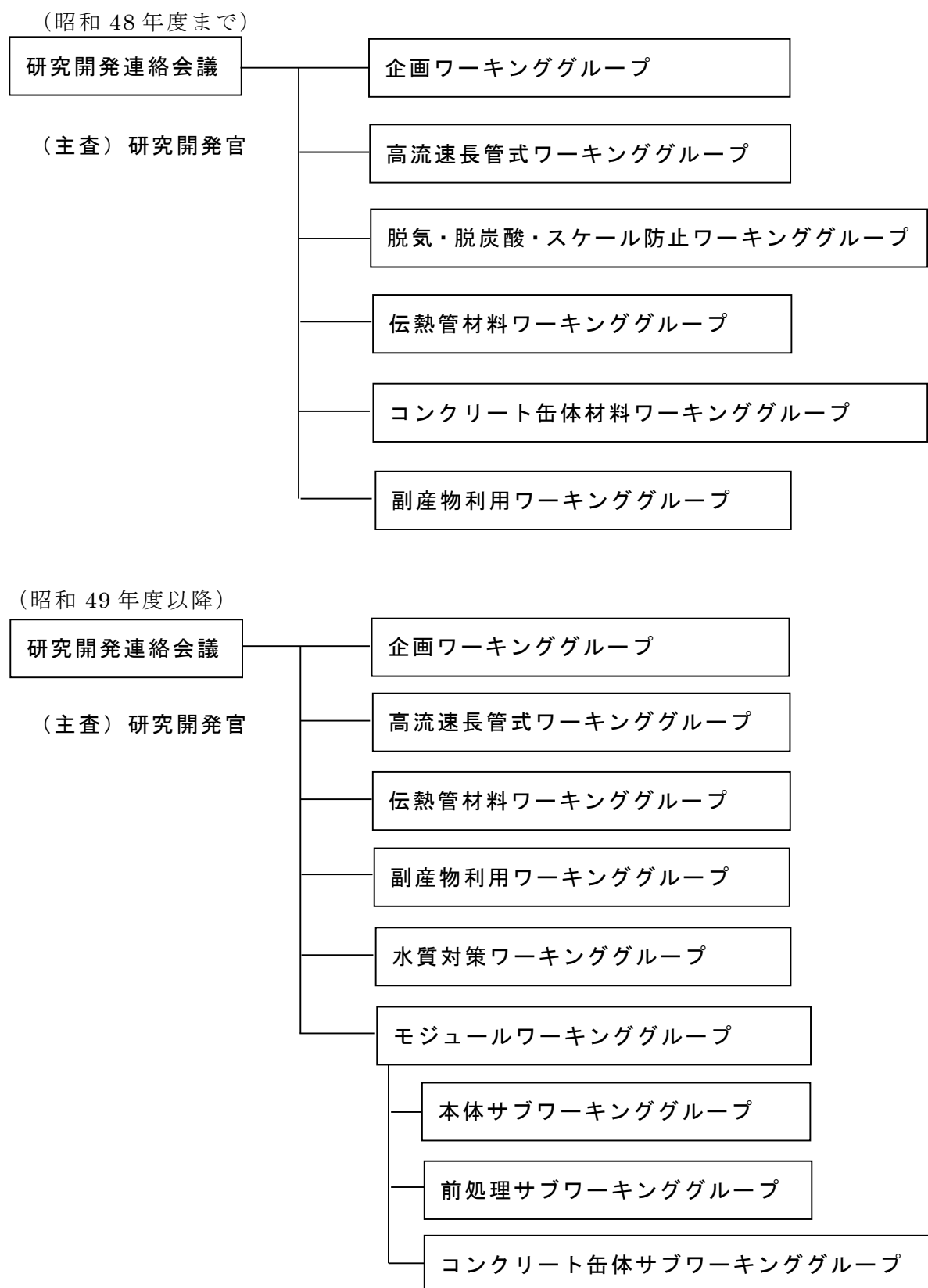


図 4 ワーキンググループ

この推進本部が中心となり委託研究の実施場所としてお互いの研究連携が円滑にでき、即、相互の研究に反映できるように、図 2 最下段に示したように、臨海研究施設を計画した。

海水淡水化技術開発の研究には、大量の海水を定常的に必要とし、電力もかなり必要となる。個々の研究課題ごとに海水を確保するより海岸に近い適当なところにまとまって研究場所を確保できれば良いことは明確なため、非常な努力の結果、最終的には神奈川県の高力な協力を得て、茅ヶ崎市汐見台海岸の国有地に「東京工業試験所海水淡水化茅ヶ崎臨海研究施設」を設けることができた。なお、総務部の方々の協力も得られ海水取水管敷設に関わる漁業補償の問題という研究開発とはほとんど無関係に思える面倒な問題なども解決することができたことは、付随的なものに思えることが実験施設としては本質的なものであり、こうした問題を円滑に解決することができたことは研究開発推進の上での大きな貢献であった。この臨海研究施設は、前に述べた「海水利用の研究」における酒田市の工場内に設けた「東京工業試験所試験工場」の設置の経験が生かされたものと思われるが、その時に経験した知見が生かされ、クリーンな海水及び必要電力が定常的に得られ、各研究施設に送水、送電することが問題なくでき、研究開発の第一歩をスムーズに進めうることを保障したのであった。

一方、この施設運営のために多くの業務がこなされなければならなかった。そのために、海水淡水化研究推進本部室は、臨海研究施設における研究全般にわたる円滑な推進を図るための種々の業務を行った。主な業務として各研究施設の割り振り・設計、海水の取水、受変電管理、実験プラントへの送電・送海水、漁業補償をはじめとする地元対策、取水管敷設等に伴う許可申請業務、各研究施設の研究スケジュール調整、施設管理に伴う法規上の事務処理、見学者対策など表には出ないけれども研究の円滑な推進には欠かせない業務を担当したのであった。前述したが、総務部の本務を超えた協力も得られ、これらの実務が問題なく実行されたのであった。

このようなプロジェクト全般にわたるマネジメント業務は非常な負担であったが、このように海水利用研究に長い研究履歴を持ち、この技術に通じた東工試が全体を把握し、プロジェクト全体の統括を行ったからこそ研究開発目的に向かって集中する形で円滑に推進されることになったのであった。さらには、世界に誇る海水淡水化技術を研究開発するという高い目標に向けて、東工試、委託会社の研究者がともに、日夜同じ場所で共同して同じ目的に向かって努力している中から研究仲間意識が創生され、互いに競い協調する形で円滑な研究開発推進がなされたという影の効果も大きかったものと思われる。

また、ここは東京から近く交通の便もよいため研究の進行とともに、海水淡水化研究のメッカとして多くの見学者を迎えることができた点も評価しておかなければならないことである。

この多岐にわたる研究項目をカバーするために、昭和 49 年度のこの研究を担当した東

工試第3部の部員数は56名であったが、この研究に関与した研究者数は44名に達し³³⁾、まさに当時の第3部の総力を挙げての研究であった。そのほかに、臨海研究施設関係では総務部の方々の協力も得ていたのであった。

ここに、設置された実験プラントを表4にまとめて示した。

表4 茅ヶ崎臨海研究施設の主要設備及び実験プラント

主要設備

海水取水設備

取水管	①径	700mm	長さ	600m
	②径	150mm	長さ	400m

ポンプ海岸堤防下地下ポンプ室内設置

- ① 60kW 3基
- ② 7.5kW 1基

取水量	①	1,500m ³ /hr
	②	50m ³ /hr

塩素注入設備 海水電解方式及びポンベ方式

貯水槽

海水槽	400m ³ 及び20m ³	生成淡水槽	200m ³	かん水層	200m ³
-----	--------------------------------------	-------	-------------------	------	-------------------

事務棟 鉄筋プレハブ2階建て 延349m²

事務室1、取水管理室1、実験室3、会議室など

実験棟 延210m²

コンクリート缶体実験室2、実験室2、会議室1、管理室1、宿泊室1

受変電設備 3,700kVA

実験プラント

高流速長管式多段フラッシュテストプラント

脱気・脱炭酸・スケール防止テスト装置

伝熱管材料ループテスト装置

伝熱管材料フィールドテスト装置

コンクリート缶体耐食試験装置

コンクリート缶体力学的試験装置

コンクリート缶体多段フラッシュ蒸発試験プラント

電気透析テスト装置

カリウム回収試験装置

アルミニウム合金耐食試験装置

チタン管振動試験装置

これらの実験プラントがそれぞれ当初の成果を上げ、昭和 49 年度にそれらの成果を集約して実機規模のモジュールプラントによる研究への移行に伴って当施設の研究は終了し、取り壊されたが、事務棟をはじめ諸施設はその後、通商産業省立地公害局工業用水課に移管され、(財)造水促進センターによって逆浸透法による海水淡水化技術開発に引き継がれ、さらに日本における海水淡水化技術開発の歴史を積み上げることになったのであった。

要素技術の開発が終わって総合技術開発としてのテストモジュールによる研究は、適地探索の結果、用地があり、海水が得やすい、熱源も供給を受けられるという条件のそろった大分県鶴崎の昭和電工コンビナート内に設けられた。これが大分臨海研究施設である。この研究は委託会社が 1 社に絞られたため、この施設の管理運営はすべて委託先によって行われた。

後述するが、このテストモジュール研究が行われている昭和 50 年 5 月に、日本の技術開発が海水淡水化技術を求めている中近東諸国で知られていないこと、中近東諸国の情勢を我が国は十分には把握していないとの事情から、調査団を急きょ派遣し⁹⁰⁾、その結果、我が国の技術開発をもっとよく知りたいとの熱い期待が寄せられたことにより、日本—中近東海水淡水化合同会議を同年 12 月東京で開催し⁹¹⁾、この出席者には研究終了直前のテストモジュールプラントを実験稼働状態で見学してもらえることになり、これをきっかけに大型プロジェクトの成果を背景に、中近東諸国に我が国の海水淡水化プラントが急激に普及することにも結びついたのであった。

1.2.4.3 各種調査委員会の設置とその活動、成果

研究を効率的に進めること、問題点を絞り開発の焦点を明確化するために、その当時の関連技術の情報を集約するために、その技術関係の学協会に調査委員会を組織してもらい、委託する形で行われた。ここには東工試の研究者が委員として参画し、プロジェクトの方針が明確に伝えられ、専門の先生方によって目的に合った調査が実現し、プロジェクトの進行を円滑にすることに大きな貢献を果たしたのであった。

1) 伝熱管材料委員会

伝熱管に要する費用は、多段フラッシュ蒸発装置による造水コストに占める比率が大きいことから、大型プロジェクト研究が開始される 1 年前に、耐海水性材料についての資料を得ること、長期使用可能な信頼性ある材料についての情報を整えるために電気化学協会に委託され、委員会が組織された。そして、腐食性の強い高温の海水に適用可能な伝熱管材料を選択し、それらの耐食性について検討され、「伝熱管材料調査報告書」としてまとめられた。これは、その後の伝熱管材料テストプラントによる耐食試験に供すべき材料の選択に多くのデータを与えるとともに、耐食試験の方法及び伝熱管材料テストプラントの設計に大いに役立てられたのであった。

2) コンクリート缶体材料委員会

10 万 m³/日の多段フラッシュ蒸発装置は幅が数十 m、長さが 150m、高さ 3～4m というように従来の化学装置とは比較にならない程に巨大なものである。その缶体にコンクリートをもって建造する可能性を検討するために、日本海水学会に委託され、「コンクリート缶体材料委員会」が組織された。その結果、「コンクリート缶体材料調査報告書」がまとめられ、研究課題が提起されて、その後の実験プラントによる研究計画に盛り込まれ、最終的にはコンクリート缶体の開発を成功に導く役割を果たしたのであった。

3) 海水淡水化装置補機類調査委員会

大型プロジェクトの研究開発項目には含まれていないが、大型プラントを建造するに際して問題となってくるポンプ等の補機類の大型化による経済的、技術的問題点を明らかにしておくことは欠くことのできない課題である。これら補機類(ポンプ、配管、ポンプ駆動装置、バルブ、電気設備、計装設備、取排水設備)の技術水準、動向を明らかにし、大型装置に適した補機類の選択及びスケールアップ効果・限界等についての情報を得るために、日本海水学会に委託され、「海水淡水化装置補機類調査報告書」^{1,2)}としてまとめられ、大型プロジェクト研究を補う形で、大型装置の建設のための補機類に関する有効な資料を用意することができたのであった。

4) コスト算定基準委員会

研究開発の進捗によって開発された技術が造水コストにどの程度反映するかを評価するために、一定の基準のもとでコストを算定する必要があり、コスト算定基準委員会が企画ワーキンググループの諮問機関として設けられ、昭和 46 年(1971)8 月に暫定基準^{1,1)}をまとめた。その後、最終的な開発技術の総仕上げの研究である「テストモジュールプラントによる研究」の成果を評価するために昭和 52 年(1977)4 月には「多段フラッシュ蒸発法による海水淡水化コスト算定基準」をまとめた。これは大型プロジェクト研究の成果を評価する尺度として使われただけでなく、多段フラッシュ法海水淡水化に関してコストの算定が生じた場合に、常に役立てられているのである。

5) 海水淡水化トータルシステム調査委員会

海水淡水化装置を新しい飲料水の供給源として、都市システムの中にどのように組み込んでいくかを明らかにし、かつ研究成果の活用と普及を図ることを目的として日本海水学会に調査委託され、設けられた委員会である。この調査は昭和 50 年、51 年度の 2 年間にわたって行われた。その成果は「海水淡水化トータルシステムの評価調査報告書」にまとめられた。

このほか、図 1 にはプロジェクト研究項目として「海水淡水化トータルシステムの研究」が挙げられているが、これについては、開発技術の円滑な普及を図るために、最終年に(財)造水促進センターに委託され、専門家 13 名による「海水淡水化

トータルシステム研究委員会」が組織され、さきの「海水淡水化トータルシステムの評価調査報告書」を踏まえて、実際に都市に適用し得るシステムについての事例の検討を行った。それらは、発電と造水の二重目的プラントの試設計 2 件、都市ごみ焼却熱利用の海水淡水化プラントの試設計、二重目的プラントの新設と電力ネットワークとの関係、河川ダム建設との比較検討等についての内容で、昭和 52 年 (1977)10 月に「海水淡水化トータルシステムの研究成果報告書」にまとめられた。これはその後、海水淡水化装置の導入計画が日本各地で起こるたびに検討の基礎データを与えるものとして貴重なものであり、活用されたのであった。

1.2.5 研究開発の成果

1.2.5.1 多段フラッシュ蒸発機構の解明

これは既に表 3 現象・手法マトリクス、図 3PERT で説明した東工試の基礎的研究で実施されたものである。主な成果を以下に示すこととする。

その一つは、フラッシュ室 1 段のガラス窓付のフラッシュ現象実験装置による研究である。この装置により、フラッシュ現象には泡立ち沸騰現象と蒸気が飛散して蒸発するスプラッシュ沸騰の 2 つの様式があり、温度、流量等操作条件およびフラッシュ室長さとの関係で決定され、スプラッシュ沸騰へ遷移していくにしたがって非平衡温度差（フラッシュ段出口液温度 - 塩濃度に対応した沸点上昇 - フラッシュ段蒸気温度）が急激に低下していくことを明らかにすることができたのであった。この結果から、フラッシュブラインの高流速化を実現する技術開発に対して、通常約 2 倍程度の高流速ブライン流量、 $1,500 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}$ における実験研究において、低温段における非平衡温度差が著しく大きくなる傾向を明らかにし、この対策として上げ底によってフラッシュ蒸発を促進し非平衡温度差の解消を検証した成果を明らかにした³⁵⁾のであった。そして、これを 10 万 $\text{m}^3/\text{日}$ テストモジュール研究の委託研究にて検証すべきことを提案し、実際にコンクリート缶体の熱放出口に採用され、その効果が発揮されて高効率高流速化に貢献したのであった。

また、フラッシュ蒸発に伴い発生するミストについて測定装置から開発研究され、フラッシュ流速の高速化によって発生ミストの粒度、濃度が拡大することを明らかにし³⁶⁾、この飛沫ミスト除去のための金属ワイヤーメッシュによるミストエリミネーターは高流速化を考慮したものにならないこと、ミストエリミネーターからの再飛散をも考慮すべきなど飛沫除去機構の設計に貴重なデータを提供したのであった。このミストエリミネーターからの再飛散については家庭排水など汚れの混じった海水が混入したことが原因であることも明らかにされ、汚染海水の影響の研究の重要性を指摘することにもなったのであった。

このほか、5 段の小型フラッシュ実験装置によって非平衡温度差の低減をオリフィス機構との関連で詳細に調べ新規の可変面積の減圧機構の提案³⁷⁾もなされ、高流速長管式テ

ストプラントに設置され、実用化試験を行うなどフラッシュ蒸発に関する新しい知見を生み出したのであった。

凝縮伝熱に関する研究も実施され、伝熱管群凝縮伝熱実験装置を製作し、伝熱管からの滴下液滴と液膜、伝熱管表面性状、非凝縮ガスの影響等を広範囲に理論的実験的に検討した。また、「テストモジュールプラントによる研究」にも参画し、このプラントの巨大な管群(径約 1,600mm、伝熱管 3,600 本)内の流速分布、温度分布を詳細に測定し、大型管束内の流速、伝熱係数の不均一性の影響を検討し、非常に良好な流動状態にあることを明らかにした³⁸⁾のであった。

海水物性データの不足を補う研究も行われ、信頼度の高い推算式などが開発され用いられた。また、海水中の溶存酸素濃度の測定法について共存イオンの影響しない方法を確立し³⁹⁾、また、溶存酸素濃度の測定を容易にするために、純水用のガストランスファ型のプロセス計器について検討し、海水淡水化プラント用として使用可能であることを明らかにし⁴⁰⁾、脱気性能、缶体内への空気の漏洩、伝熱管腐食への影響を調べることに貢献したのであった。さらに、充填塔による真空脱気について、ラシヒリング充填塔の効果について検討し、給液がフラッシュする場合、塔底からストリップングスチームを供給した場合に効果が大きくほぼ溶存酸素濃度を 0 にすることができること⁴¹⁾を明らかにしている。

1.2.5.2 高流速長管式テストプラントによる研究

本開発研究は表 2 で示したように、委託研究で実施され、表 4 に示した「高流速長管式多段フラッシュ実験プラント」を用いた実験研究である。実験プラントは前述したような検討を通して、熱回収部 3 6 段、熱放出部 3 段、最高ブライン温度 121℃、造水比 11~12、排出ブライン濃縮比 2 で、3,000m³/日の造水量の能力を検証可能な 10 万 m³/日級海水淡水化プラントのプロトタイプの実験プラントである。フラッシュ状態等が外部からすべての段において観察可能な大きなガラス窓付で、データ取得のための温度測定センサー等多くのセンサー類を備えものである。実験プラントの建設、運転を通して、高流速長管式の高効率の海水淡水化技術を開発するためのプロジェクト初期における中心的課題を担う研究であった。そのため、委託研究とはいえ、図 3PERT 図で示すように「多段フラッシュ蒸発機構の研究」、「最適化設計の研究」を担当する東工試の多くの研究者も本研究には参画して実行されたのであった。

このテストプラントの建設において、20m 以上の伝熱管を使用した長管式の装置設計、組み立て方法等についての技術が開発され、長期連続運転により、安定運転が可能なことを実証した。さらに、このテストプラントの運転研究において、運転起動、長期安定定常運転、安定的停止方法等に関する高流速長管式多段フラッシュ蒸発装置の基礎的稼働特性、コントロール法、安定な運転操作法が確立された。特に長管式プラント特有の伝熱管貫通孔の段間シール工法について高温段に O リングシールの適用あるいは伝熱管を通す穴に工

作を加え透過する蒸気の圧縮膨張を導くラビリンス効果によってシール効果を得る方法を確立し、これによって長管式技術が確立されたのであった。

テストプラントの運転研究の目的生成物は後の解析に耐えうる信頼性の高い実験データを得ることであるため、委託先との十分な打ち合わせの下に、「最適化設計の研究」において東工試が当時市販されるようになったばかりのミニコンピュータで構成したデータ収録処理装置の設計製作を担当した⁴²⁾。計測点数は約 200 点（うち温度約 150 点、流量、液レベル、圧力、pH、濃度）で、とりわけ、温度測定は、フラッシュ蒸発進度の良否を判定するための非平衡温度差などの測定精度が装置性能に大きく響くこと、さらにはテストセクション段が数段設けられており、その段内温度分布の測定を可能とするため、0.05℃の測定分解能を保障しなければならなかった。この問題を解決するために、東工試側の基礎研究において温度センサー検定装置を設計準備し、テストプラントに設置した全ての温度センサーを検定し、個々のセンサーの特性式を作成するというも行われた。こうして、センサー情報は東工試側が設計管理したデータ収録処理装置に送られ、特性式のあるものは換算変換され、すべてのセンサー情報が収録処理されて磁気テープに記録されると同時に、一時間ごとにはプリントアウトもされ、39 段の実験プラント全体の稼働状態が委託研究側に提供され、実験運転の結果が実時間で正確に把握できる環境が作られ、本研究の円滑な進捗に大きな貢献をしたのであった。いわば、テストプラントによる実験的研究はこうした実験稼働状況のデータを正確に得ることによって達成できるものであるため、これが委託研究側と基礎研究側との密接な連携もとに実現したために極めて円滑に開発研究が進捗したという一例を示すものであった。

この方法は、「テストモジュールによる研究」で詳述するが、より進んだ形で踏襲され、東工試側が温度センサーの検定から始めて、その後のコンピュータの進歩等も取り込むとともに研究上必要とされるフラッシュ流路内の温度分布データまで測定可能な実質 0.01℃分解能を保障する超高精度 A/D 変換装置など最新技術を組み込み、約 500 点の測定点について対応できるデータ収録処理装置を準備し⁴³⁾、委託側へ実時間データを提供するという連携が行われ、本研究を成功に導く大きな役割を果たしたのであった。

また、基礎的研究「最適化設計の研究」によるプラントにパルスやステップの熱入力の外乱を加えた実験研究によって動特性⁴⁴⁾、部分負荷静特性⁴⁵⁾についての詳細な情報が得られ、10 万 m³/日の装置設計に向けての基本情報を習得することができた。さらなる稼働特性についても上記の動特性研究、部分負荷研究から、発電との二重目的プラントとして活用された場合のブラインヒーターへの熱入力変化に安定に追随するには、海水淡水化装置の従来最高ブライン温度制御に加えて、中高温段のブラインレベルを検出し、ブライン流量をコントロールする方式を併用すべきことなども明らかにされたのであった。

本テストプラントの主たる研究開発目的の一つがフラッシュブライン流速の高流速化による装置のコンパクト化であったが、これに対して、従来の 800 m³/hr・m に対して、900

$\text{m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}$ による長期安定運転を確立し、さらに流路幅を狭め、 $1,125 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}$ の長期安定運転を確立し、最終的には段間オリフィスの改良、消泡剤の添加等を通して従来技術の 2 倍である $1,660 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}$ の条件で、最高ブライン温度 121°C 、造水比 12 で安定に運転する技術を確立し、装置のコンパクト化への道を切り開き、10 万 $\text{m}^3/\text{日}$ テストモジュール研究へと導いた。

このテストプラントは総合的な海水淡水化装置であるため種々の技術開発に伴う結果を得ることができるものであった。その教訓的な一例は、1,500 時間程度の長時間安定運転時に低温段に著しい伝熱係数の低下をみるトラブルが出現し、この原因が鉄分を主体とした無機コロイド状スラッジの付着であることが東工試の多くの研究者の協力を得て明らかになり⁴⁶⁾、この解決策としてのボールクリーニング法についての最適効果の検討⁴⁷⁾、後述の脱気・脱炭酸・スケール防止法の研究委託先の研究成果^{48,49)} とその協力を得てボールクリーニング法を適用した実験によって解決したということがあったことである。

このことは、実用装置は年間を通して連続して稼働を求められるものであるため、この程度の長期連続運転を経験しておくことは不可欠であったことをいみじくも指摘するものであり、このような研究開発にとって極めて重要なポイントを示すものであった。

1.2.5.3 脱気・脱炭酸・スケール防止法の研究

本開発研究は表 2 で示したように、委託研究で実施され、表 4 に示した「脱気・脱炭酸・スケール防止テスト装置」を用いた実験研究である。蒸発法の海水淡水化技術においては伝熱管の占める割合が非常に大きいことを前に述べたが、海水前処理による伝熱管腐食の低減のための研究、および装置性能に大きく影響する伝熱管へのスケール付着による伝熱係数の低下を抑える研究は長期に高効率で稼働する海水淡水化装置にとって、欠くことのできない開発課題である。

金属腐食の主要原因は溶存酸素量である。すなわち、海水に溶存している酸素をいかに効率よく除去するかという脱気処理技術の確立は欠くことのできない開発課題である。脱気処理については充填塔方式と最終段脱気方式について性能及び経済性が実験的に検討されたが、新たに装置を設けることなく熱放出口最終段の真空度を生かすことができるコンパクト化されたパンチプレートを用いた装置を開発し、これを最終段に組み込む方式が優れていることを明らかにした。そして、この方式はテストモジュールに組み込まれて検証され、目標溶存酸素濃度 30ppb 以下を達成し技術的开发に成功したのであった。

スケール生成の海水前処理については、海水に溶存した炭酸カルシウムと水酸化マグネシウムが主成分のアルカリスケール(ソフトスケール)と呼ばれるものと硫酸カルシウムが主成分のハードスケールと呼ばれるものがあり、この生成を抑制するための技術開発である。ソフトスケールについては東工試では既に「海水利用の研究」時に、この問題を取り

扱っていて、海水を脱炭酸し、 HCO_3^- をあらかじめ除去する工程が必要なことを明らかにしていた^{8,17)}ものである。

ハードスケールは酸に溶けず、生成した場合には除去が困難であり、もし生成した場合には伝熱管交換さえ必要な極めて困難なもののため、決して生成させてはいけないものである。過去の研究成果を生かし、その生成限界を究め、多段フラッシュ法では循環ブラインの加熱後の最高ブライン温度にある状態においてのみ生成する可能性のあることを明確にすることができ、この温度の正確なコントロールが必要であることを明らかにしたのであった。そして、多段フラッシュ法ではこのハードスケール生成温度域を安定過飽和状態のまま数秒以内の短時間で通過させることが可能なため、循環ブラインの濃度を考慮し最高温度(t_{max})として 121°C が上限界として設定され⁵⁰⁾、高流速長管式実験プラント等において検証された結果、これがハードスケール生成回避の稼働方法として確定したのであった。

アルカリスケール(ソフトスケール)については、その生成物の熱的特性⁵¹⁾を明らかにするとともに、造水量 $100\text{m}^3/\text{日}$ の再循環型 10 段フラッシュ蒸発装置で、伝熱管を抜き取りスケール付着量が測定できるように製作された装置を用いて、酸添加による pH コントロール法、抑制剤注入法、種晶添加法について長時間運転による実験によって検討された。その結果、その効果、経済性から pH コントロール法が選ばれ、これに対して、充填塔、スプレー塔、多段カスケード流下法、バブリング法について、それぞれの性能が実験的に、またその経済性が検討され、その結果、多段カスケード流下方式が選定され、「高流速長管式テストプラント」において用いられていた装置においても検証され、そして「テストモジュールによる研究」において、目標全炭酸濃度 15ppm 以下を達成し、技術開発に成功したのであった。

スケール防止法については、前述の装置を用いて、発電所等のコンデンサーのスケール除去法として委託先の技術であったスポンジボールによる伝熱管洗浄法に東工試の防食技術を加えて開発され、長期運転によるスラッジ生成にも対応できるスポンジボールクリーニング方式を確立し^{48,49)}、テストモジュールプラントにおいて検証するなど、前述の pH コントロール方式と併用することによって、長時間安定運転を効果的に可能とする技術開発に成功したのであった。

1.2.5.4 伝熱管材料に関する研究

伝熱管材料の研究は、多段フラッシュ蒸発装置の建設費でかなりの割合を占める伝熱管束のコスト低減のために、安価で耐食性に優れた伝熱管材料を探索する研究であって、本プロジェクトにおける非常に重要な課題であり、従来蒸発法海水淡水化装置に用いられているキュプロニッケルやアルミニウム黄銅に代替する適切な材料を探索するとともに、適応可能と考えられる銅合金を含む主な伝熱管材料全般についてその適応性を再検討し、大

型の高流速長管式多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置に適した伝熱管材料を選定することであった。

そのため、基礎的研究を担当する東工試と表 2 で示した委託研究との連携だけでなく、伝熱管材料ワーキンググループが中心となり、サブグループとして材料提供メーカーも参画して、プロジェクトを推進するというユニークな研究実施体制が組まれたのであった。すなわち、このワーキンググループで選ばれた材料が、委託研究に託され、表 4 に示した「伝熱管材料ループテスト装置、伝熱管材料フィールドテスト装置」を用いて実験的に検証され、その結果がまたワーキンググループで評価されて最適材料を探索する方法で研究が実施されたのであった。

基礎的研究では委託研究に先立って、まずブラインの溶存酸素濃度が非常に低い材料実験環境を作り出す方法を開発⁵²⁾し、まず安価な鉄鋼材料の使用可能性を検討するために、軟鋼と 21/4Cr-1Mo 鋼の腐食の試験^{53,54)}及び腐食を抑えるための伝熱管内面の電気防食法の研究⁵⁵⁾が実施され、情報をワーキンググループに提供することから開始されている。

委託研究はワーキンググループで選ばれた材料を、まずループテスト装置(高温海水を回流させたループ内に多数の試験片を暴露しスクリーニングテストを行う装置)により、試験片を熱海水流動環境に長時間さらし、その変化を調べることから開始された。板状試験片は銅合金 29 種、アルミニウム合金 24 種、チタン 3 種、低合金鋼 17 種、ステンレス鋼 24 種、被覆鋼材 9 種の 106 種で、管状試験片は銅合金 8 種、アルミニウム合金 4 種、チタン 1 種、低合金鋼 8 種、ステンレス鋼 7 種、被覆鋼材 2 種の 30 種について実験的に調査を行った。1,000 時間を 1 ループとして合計 17 回の試験が行われ、各種材料の重量減による腐食速度、孔食の有無、隙間腐食等の局部腐食特性の試験が行われた。特に、伝熱管のコスト低減が期待される鉄系、アルミニウム系材料については、pH9 といった極端な環境条件を含めて幅広く材料の適応性が検討された。このループテストによって、次のフィールドテストに供する伝熱管材料が選定された。

フィールドテスト装置は造水量 24m³/日の多段フラッシュ蒸発装置で、ブラインヒーター、熱回収部 4 段、熱放出部 2 段の構成で、試作伝熱管の実地テストを行うための装置である。フィールドテストでは、2,000 時間のテストを 5 回行い、実験 1 から 3 までは材料選定のためであり、実験 4 は腐食および、伝熱係数に対する運転条件の影響を検証するためであり、実験 5 はアルミニウム合金伝熱管の電蝕(ガルバニック腐食)を防ぐために欠くことのできない鋼製缶体との絶縁方法についての試験であった。実験 6 は 5,000 時間のまとめのテストで、これまでに試験により基準材料として選定された銅合金、低合金鋼、ステンレス鋼、チタンの各 1 種の伝熱管を対象とし、局部腐食、腐食速度、表面粗さ、スケール付着、伝熱係数等の変化に対する試験^{56~60)}であった。

このほかに、東工試と日本軽金属協会との共同研究による小型のアルミニウム合金製多段フラッシュプラントを用いた研究、三菱重工業(株)に委託された管外蒸気流による薄肉チタン伝熱管の振動破壊条件をチタン管振動試験装置によって検討する研究が行われた。

こうして選定された材料が、テストモジュールによる研究においてさらに検証され、高流速長管式多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置用の伝熱管材料として、次のような成果が得られた。

- (1) 銅合金について 従来用いられているキュプロニッケル (70/30 および 90/10Cu-Ni)、アルミニウム黄銅は、伝熱管として安定した特性を持っていることを明らかにし、かつ、その耐食性及び伝熱特性から伝熱管の薄肉化による価格低減及び金属資源の節約(最高約 50%)が可能となることを明らかにすることができた。
- (2) チタンについて チタン伝熱管は一般には約 0.7mm 肉厚の溶接管、または引抜き管であるが、本研究開発のチタン管はそもそも肉厚 0.3~0.4mm の溶接管という画期的なものであった。この肉厚で十分な耐食性を示すことが明らかにされた。一方、環境条件によってはチタン材特有の水素吸蔵現象が見られ、特に、加熱部など高温部において起っていることを明らかにすることができ、これについては今後の研究の必要性が指摘される結果を得たのであった。
- (3) アルミニウム合金について 有望な材料であるが、さらに孔食成長速度、そしてこの孔食を不動態化する試験が必要なことを明らかにすることができた。そのほか、缶体材料との電蝕や高温域におけるハードスケール生成が見られ、この防止法の研究が使用に際して必要なことが指摘されるという結果を得た。
- (4) 低合金鋼について 溶存酸素量が少なく、スラッジ除去に対するボールクリーニング法を適用することができれば、耐食性はある、将来的に実用化に期待できるものであることを明らかにすることができた。
- (5) ステンレス鋼について ステンレス鋼は海水に対して孔食腐食を起こすことが一般的に知られており、抗孔食性の材料を見出すことが必要で、24 種の材料のうち 3 種の優れた材料を見出すことができたのであったが、実用化のためにはさらに長期間の試験を通して孔食成長速度と不動態化を見極める必要が指摘される結果となった。

このように、非常に幅広く可能性を持つと思われる材料について世界的に例のない実験研究が実施され、それらの特性についての知見を明らかにするとともに、大型海水淡水化装置に採用すべき最適材料を選定するとともに、さらに、10 万 m³/日テストモジュールプラントにおける試験を通して、将来的に可能性のある材料を提起し得たという画期的な成果を上げることができた⁶¹⁾。しかし、材料研究ではライフ(耐用年数)の推定が必要とされることもあり、そのためには、さらに長期の実用機等による試験研究の必要性が残され

た課題であることも明確にされたのであった。この伝熱管材料研究に携わった研究者は 99 名にも上ることが研究関係者リストとして記載されており⁶¹⁾、我が国の伝熱管に関する専門家の総力を挙げての研究であったことが示されている。

そのほか、プラント各部に使われる金属材料に対する腐食性の強い熱海水への対策も必要とされていた。そこで、東工試の基礎的研究で以上の研究では知ることのできない生成淡水ドレントレイ材としての鉄系材料について検討し、軟鋼は耐食性が小さく、21/4Cr-1Mo 鋼は軟鋼の数倍の耐食性があること、軟鋼を用いる場合には適当な材料でライニングする必要のあること⁶²⁾を明らかにしたのであった。

1.2.5.5 コンクリート缶体の研究

蒸発缶体をコンクリート缶体とすることにより、装置材料費を低減し、かつ巨大装置の現地施工を可能として巨大部品の輸送問題をなくし、巨大海水淡水化装置の建設費の低減を図ろうとする開発研究である。研究は基礎的研究としての東工試と表 2 で示した委託研究で実施され、表 4 に示した「コンクリート缶体耐食試験装置、コンクリート缶体力学的試験装置、コンクリート缶体多段フラッシュ蒸発試験プラント」を用いた実験研究を中心とするものである。

このために本開発研究では、基礎的研究としてセメントモルタルに対する熱蒸留水⁶³⁾、セメントモルタルとコンクリートの熱海水⁶⁴⁾の影響の検討から始まり、これらをベースとしてコンクリート缶体が海水のフラッシュ蒸発缶体として必要な条件を備えているかの研究としてのコンクリート素材の化学的、材料力学的検討、耐食性の研究などの実用装置に適用する場合に生じる諸問題を解決するために行なわれた。

熱蒸留水については、腐食は 80℃、一年間で 0.15mm であり施工時にこの腐食分を見込んでおけばよいこと⁶⁵⁾、熱海水については、セメントモルタルとコンクリートについて 1.5 年間の試験から、スケールの生成、フライアッシュモルタルでは変質層の生じること、配合が適切であれば強度低下はないことなど、コンクリート素材についての基礎的知見が得られた^{64~66)}。次いで、コンクリート缶体のように多数の配管がコンクリート壁を貫通するタイプの箱型缶体の気密性について検討し、コンクリートの気密性は高く、鋼とコンクリート取り付け部分の透気量が多くなること、ひび割れの影響はひび割れのない場合の 2 倍程度の透気量になることが明らか^{67,72)}にされた。

コンクリート缶体力学的試験装置による研究では、20~120℃の温度条件でコンクリートの圧縮強度、弾性係数、クリープ試験が鉄筋コンクリート缶体とプレストレスト缶体について実行され、コンクリート缶体を設計する場合、温度条件を考慮し、力学的定数を決定すればよいこと、保温材の使用により応力が軽減すること、プレストレスト缶体の使用もクリープ係数を常温より大きめにとれば有効であることが明らかにされた^{68~71)}。

「コンクリート缶体モジュールによる研究」では、以上述べてきた成果を組み込みコンクリート缶体の設計、製作を行い、延べ2年間のモジュールの運転研究を通してコンクリート缶体を用いたプラントの性能、運転方法について多くのデータ及びノウハウを得、実用装置へのコンクリート缶体利用の道が開かれたのであった。そして、その成果を10万 m^3 /日のテストモジュールの熱放出部に適用することによって、最終的にその適用性を検証し、コンクリート缶体の技術開発を以下に示す通り成功裏に終了したのであった。

10万 m^3 /日のテストモジュールの熱放出部は3段、鉄筋コンクリート（RC）構造で、最終段には脱気装置を内蔵し高さが9mにも及び流路方向断面の形状は上げ底構造を採用し複雑で、段間隔壁の鋼板、循環ブライン用鋼管との接続等取り合い部分の多い実機構造で製作されていた。

テストモジュールの運転研究により、コンクリート缶体熱放出部であっても100℃近い高温化での熱回収部温度条件下の各種データも得られ何ら問題がないこと、また、最終段脱気による0.1気圧以下という真空中に近い状態でコンクリートの気密性は保持されること、急熱急冷運転も実施されたがこのようなコンクリート缶体にとっては極限状態においても性能を保ち得ること等が延べ6,300時間の運転を通して明らかにされたのであった。

以上の研究を通して得られた成果を集約すると次のとおりである。

- (1) コンクリート缶体は鋼製缶体に比べ経済的である。装置が大型化するほどその効果は大きい。
- (2) コンクリートは高温ブラインに対して十分な耐食性を持っており、ライニングを必要としない。
- (3) コンクリート缶体は海水淡水化プラントの運転条件下における温度及び圧力に十分に耐えうる構造に設計製作可能である。
- (4) コンクリート缶体は海水淡水化プラントとして要求される気密性を十分に保つことができる。
- (5) コンクリート缶体は任意の形状に設計、製作ができ、現場施工であるため、現地で入手可能な材料による建設が可能である。
- (6) コンクリート缶体を用いた装置の運転においてはプラント運転開始、あるいは停止時においてコンクリート缶体に過剰な温度応力を生じないように段階的に温度の上げ下げを行うことが望ましいが、事故等による急熱急冷にも耐えうる。
- (7) 以上の成果は、海水淡水化装置だけではなく原子炉圧力容器、大型海洋構造物など特殊条件下に置かれることを想定しなければならないコンクリート構造物の技術進歩に貢献するものである。

1.2.5.6 最適化設計の研究

多段フラッシュ蒸発プロセスの技術開発を行うためには、その当初においてプロセス工学的な観点からの検討を加え、プロセスの特性を明らかにし、実験装置を製作する上での情報、取得すべきデータ、運転操作上、制御上の情報を提供する必要は欠くことができないものである。また、研究開発の進捗によって、得られたデータ等新たに加わる技術的情報にダイナミックに対応し、技術開発を円滑に進行させることが必要である。このために基礎的研究として全体を見渡すことができる東工試が担当した。

すでに解説したところであるが、最終目標の 10 万 m^3 /日高流速長管式多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置の技術開発を行うための第 1 段階として、既往の技術的情報を総合し、経済的条件を加えて最適化計算を行い、開発しようとするプロセスの概要を与えるとともに、造水コストに及ぼす影響の大きな因子を決めるために、最適設計を行い、装置概要を与え、構成上多変数間の関係や影響を明らかにした³⁴⁾。この結果を盛り込んで、また当時のスケールアップ定数を考慮して高流速長管式多段フラッシュ蒸発法実験プラントは製作されたのであった。また、伝熱面積の低減のために伝熱面積の最適な配分の検討を行い、この装置の特性としてこのような配分にはメリットのないことを明らかにした⁷³⁾。

「1.2.5.2 高流速長管式テストプラントによる研究」で述べたが、高流速長管式テストプラントの実験研究の円滑な進行を図るために、データの解析、実時間の実験状況の詳細が分かり、記録されるように配慮したデータ集録装置を当時の最新技術を取り込んで開発し運用した⁴²⁾こと、データの信頼性を確保するために欠くことのできなかった温度センサーの検定等が行われた。このシステムによる実験即解析データの取得の実現は、タイトな研究スケジュールを確実な成果を積み上げながらこなしていくことを保障するものであり、欠くべからざるものであった。この経験は、「1.2.5.9 テストモジュールによる研究」で述べるが、テストモジュール用データ処理装置システムの設計、製作、運用⁴³⁾に活用され、テストモジュールの研究を円滑に進め成功に導く役割を果たしたのであった。ちなみに、このデータ集録システムは、余談的にはなるが酒田における「海水利用の研究」で計装を担当された当時の遠山武技官がデータの 2 進法計数による処理(今日のデジタル処理)の有効性を見抜かれ、その応用を試みられていたのだが、それをデータ集録という形で実現したものでもあったのである。

さらに、発電との二重目的プラントとして活用された場合のブラインヒーターへの熱入力変化に安定に追随するために、高流速長管式多段フラッシュ蒸発テストプラントを用いた実験的研究を実施し、装置の動特性³⁷⁾、および熱入力低下した状態での多段フラッシュ蒸発装置の部分負荷静特性についてのデータが得られた。その結果、フラッシュ段の液レベルの変化が非常に激しいこと、低温段にフラッシュしない段(非有効段)が生じ、造水比は著しく低下することなど詳細な情報を提供することができた⁴⁵⁾。また、計装への情報として海水淡水化装置の従来最高ブライン温度制御に加えて、中高温度段のブラインレベ

ルを検出し、ブライン流量をコントロールする方式を併用すべきことなども明らかにされたのであった。さらに、部分負荷稼働についてはシミュレーションにより第1段から出た循環ブラインの一部を中間段戻す還流ラインを設けることにより非有効段なしに安定な稼働が可能になることを示唆する結果⁷⁴⁾を明かにした。このように発電との二重目的プラントとして実用されるケースまで考慮した10万 m³/日高流速長管式多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置の装置設計に向けての基本情報を提供したのであった。

1.2.5.7 副産物利用の研究

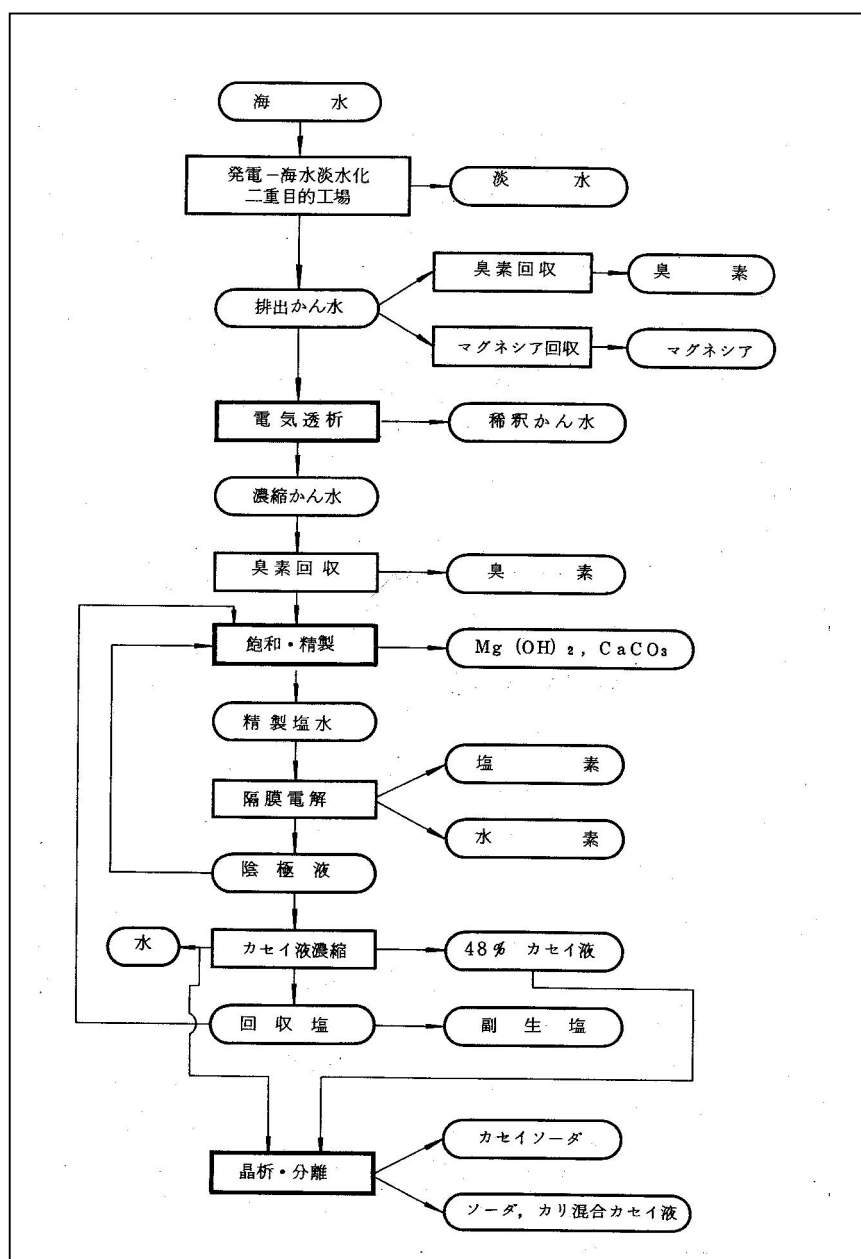


図5 副産物活用プロセス

海水から溶存有効成分を回収しようとする研究は「海水利用の研究」以来の長い歴史を持つ研究である。海水淡水化では必然的に約2倍程度の濃縮された海水が脱炭酸されて得

られる。これを原料にすれば処理量も減り、工業塩を得るコストも大幅に減ることになる。濃縮海水にはマグネシウム、カリウム、臭素なども濃縮されているため、これらを有機的に結び付けた海水利用の総合システムを構成すれば、工業塩の自給を達成できるだけでなく、資源の乏しい我が国にとって有意義なことであった。この観点から図 5 に示すような副産物回収システムが提案された。

「塩素等生成の研究」および「電気透析の研究」は委託研究で、「カリウム回収の研究」は基礎的研究で実施された。これらの研究は表 4 に示すそれぞれのプラントを用いて昭和 48 年度まで実施された。この間、塩素・ソーダ工業では水銀法から隔膜法への転換、イオン交換膜法の活用方法の出現など予想を超える速いテンポで新しい事態が起こり、加えて国の黒字対策としてメキシコ、オーストラリア、中国からの工業塩の輸入が迫られる事態も起こった。これらはすべて、本研究の意義を脅かすものであったが、数々の成果を生み出すことができたのであった。その第一は、海水中の未利用資源を回収・活用することのできる副産物利用工程の技術開発が完成された。第二にこのプロセスは高温、高濃度の排出ブラインを原料とするものであり、海水を原料とするのに比べ省エネルギーな技術である。第三に、そのためソーダ工業用塩を輸入塩に十分対抗できるコストで生産できる技術を確立することができた。

カリウム回収技術は図 5 に示した 48% カセイ液からカ性ソーダ 3.5 水塩結晶を晶析分離し、溶液中にカリウムを濃縮回収するプロセスの開発を行うことになった。このため、まずカセイ液からカ性ソーダ 3.5 水塩結晶を晶析分離にする場合の融点を決定^{75,76)}することから始まり、次いで、カ性ソーダ 3.5 水塩結晶の晶析分離に要する熱収支が求められ⁷⁷⁾、基礎データが整えられた。晶析分離プロセスについては長い研究歴を持つ冷凍法海水淡水化のグループが冷媒の直接接触冷凍法方式により、基礎的研究の委託先としての三井造船(株)の協力を得てパイロットプラントによる研究を通して、この技術を確認した。この技術は同時にカ性ソーダの生成にも役立ち、隔膜法による不純なカ性ソーダの精製法としても注目された。このカリウム回収では、カ性ソーダとカ性カリの混合液の状態までで分離をとどめたが、我が国のカリウム肥料用カリウム塩の 90% は輸入に頼っており、そのままでもカリウム肥料原料として活用できる見込みができ、カリウム塩の輸入量を抑えることができる見通しを与える結果であった。

ところが、日本では、本格的な蒸発法海水淡水化装置は稼働していないこと、我が国の黒字対策という政策の実情のため、この技術の実施は適わなかったが、輸入塩の購入価格を抑える上で政策的に役立ったとのことである。副産物利用システムもそのままでは使われていないが、開発された技術が部分的には使われているとのことである。このようにして、「海水利用の研究」以来の海水溶存未利用資源の活用技術開発という我が国の宿願が達成されたのであった。

1.2.5.8 汚染海水の影響及びブライン拡散の研究

海水淡水化の設置を計画する場合、取水域の海水の汚染はどの程度のものか考慮しなければならないし、装置や生成淡水への影響を知っておかなければならない。また、装置から排出される濃縮された排出ブラインが排出海域にどのように分散し、海域への影響があるとすればどの程度のものになりうるか検討しておく必要がある。

海水に含まれる恐れの高い揮発性の汚染物質の代表的なアンモニア、フェノールが生成淡水へ移行する可能性について検討するために、海水中のこれらの気液平衡関係についての基礎研究を実施し、淡水側に移行することが明らかにした^{78,79)}。また、高流速長管式多段フラッシュ実験プラントへのアンモニア、フェノールの添加実験も行い、生成淡水へのこれら汚染物質の移行は気液平衡値にほぼ一致すること^{80,81)}、また、アンモニアについてこの実験結果を水素イオン濃度、ブラインの緩衝作用等も考慮したシミュレーションプログラムを作成し検証したところピークの生じる段までも実験によって得られた結果を正確にシミュレートすることができた⁸²⁾のであった。フェノールについては5段フラッシュ蒸発装置を用いた添加実験からシミュレーション法を導き、これによって高流速長管式多段フラッシュ実験プラントへの添加実験結果をも説明できることを示した⁸³⁾のであった。よって、これら汚染物質が取水海域に存在する場合には前処理段階で除去する、あるいは不揮発性のものに変換してやる必要のあることを明らかとしたのであった。

また、高流速長管式多段フラッシュ実験プラントから長期間稼働後に装置内から硫酸塩還元菌が発見され、高温の装置内でも生存すること、そしてこの菌は硫化水素を発生し特に銅系合金の伝熱管を激しく腐食するため、まず、沿岸海域の汚染と硫酸塩還元菌の生息数、生息域について東京湾をモデルにして研究を行い、河川の流入域、底質中で増殖することを明らか⁸⁴⁾にし、取水管の設置には注意を要することを明らかにした。同時に、硫酸塩還元菌が装置内で生息して硫化水素が発生したことを想定し軟鋼腐食挙動について研究結果を明らか^{85~87)}にしたのであった。

プラントから排出される濃縮海水の環境へ及ぼす影響については、基礎的研究の再委託先である(株)東京久栄により火力発電所の温排水対策に用いられている手法を適用し、濃縮海水(排出ブライン)の拡散を実測し解析した。その結果、排出ブラインの拡散予測が可能となり、環境へ与える影響の範囲を推定できるようになり、取水並びに排水設備の設計に貴重な資料を提供できるようになった^{1,5)}のであった。また、放流方式の検討から排出ブラインを水中放流すると海水とよく混合し、環境へ与える影響が大幅に縮小することを明らかにすることができ、この結果は中近東諸国でも関心を集め、日本の技術への信頼性を高める結果を生んだのであった。

1.2.5.9 テストモジュールによる研究

本研究は昭和 48 年度までの前段階の各要素技術開発研究の成果を盛り込み、プロジェクトの最終目標である 100 万 m^3 /日プラントの 1 ユニットとなる 10 万 m^3 /日プラントの設計、製作、運転等の技術を確立する集大成の技術開発研究であった。そのためのテストプラントとして部分試作装置(テストモジュールプラント)、すなわち概念設計による 10 万 m^3 /日プラントに比して幅が 1/4、段数が 1/4 の装置により、運転条件をすべての段領域をカバーするように稼働条件を変えて運転を行い、最終的なスケールアップ上の問題点を検証し、採用された要素技術が滞りなく、その性能を発揮するか否かを検証し、最終的にフルプラントのためのデータを取得する目的を持つものであった。その仕様を表 5 に示す。

表 5 テストモジュールプラントの仕様

() 内は基礎的研究が対応する実験事項を示す

概念設計 10 万 m^3 /日プラント ^{1.4)}		テストモジュールプラント	
段数	51 段	15 段	
熱回収部	48 段	12 段	
熱放出部	3 段	3 段	
装置幅	18m	4.5m	
伝熱管束数	8	2	
最高ライン温度	121℃	高温試験 121℃	低温試験 54.4℃

テストモジュールプラントの詳細仕様

ライン加熱器 伝熱管 薄肉チタン管厚さ 0.4mm、0.3mm

熱回収部

缶体 鋼製

伝熱管 キュプロニッケル管 19mm 径 1mm 厚 長さ 約 34m

伝熱管束数径 1,600mm 伝熱管本数 3,600 (水室にて管束内流速分布測定)

(テストセクション段 第 1 段, 第 2 段, 第 10 段, 第 11 段)

熱放出部

缶体 コンクリート(RC)製(上げ底構造)

伝熱管 チタン管 16mm 径 0.4mm 厚 長さ 約 20m

造水量

9,500 m^3 /日 高温運転時 5,300 m^3 /日 低温運転時

海水前処理方法

脱気方法 最終段組み込み多段パンチプレート脱気

脱炭酸 硫酸添加 pH コントロールカスケード流下法

スケール防止法 ボールクリーニング法

テストモジュールプラントには、「高流速長管式多段フラッシュ蒸発法テストプラントによる研究」の成果が全般的なプロセスの設計及び運転技術として、「コンクリート缶体モジュールによる研究」の成果が熱放出部の缶体に、「脱気・脱炭酸・スケール防止の研究」の成果がパンチプレートによる最終段脱気装置として、およびカスケード型脱炭酸装置及びボールクリーニング装置として、「伝熱管材料の研究」の成果が伝熱管の選定に集約されたのであった。

本研究は表 2 に示すように委託研究で実施されたが、前処理関係とコンクリート缶体関係はその技術の開発を担当した企業による再委託研究として 3 社のチームによって構成された。そして、研究サイトは昭和電工(株)鶴崎コンビナート内に「大分臨海研究施設」を設け、ここに、昭和 48 年度からテストモジュールプラントが建設されたのであった。

基礎的研究では、研究に先立って東工試は最新の解析能力を持つデータ処理装置を開発して設置した⁴³⁾。これは、「1.2.5.2 高流速長管式テストプラントによる研究」において開発した方法をその後のデジタル機器の進歩を取り入れより進んだ形で踏襲したもので、東工試側が温度センサーの検定から始めて、コンピュータの進歩を活用し、後述する研究上必要とされるフラッシュ流路内の温度分布データまで測定可能な実質 0.01℃分解能を保障する超高精度 A/D 変換装置など最新技術を組み込み、温度、圧力、流速等々の 10 種の各種測定点合計 570 点(重複点を除くと 468 点)について対応するデータ収録処理装置を準備し、委託側へ実時間データを提供するという連携が行われ、2,700 時間に及ぶ実験研究に対応し、故障などもなく極めて円滑なデータ処理を実行し⁴³⁾、この研究を成功に導く大きな役割を果たしたのであった。

また、表 5 に示したテストセクションにおける幅の広いフラッシュ室でのブライン温度、流速を計測し、特に低温運転時に流れ幅方向に温度分布が生じていることを明らかにし、この原因を考察し改善点を指摘した⁸⁸⁾のであった。

さらには、装置が巨大になると配管から水室へのブラインの流入、流出に伴い伝熱管への流れが不均一になりがちなため、これに対して表 5 に示した巨大な伝熱管束内の伝熱管内流れ計測を熱電対とピトー管を用いて管束各部の伝熱管について行い、伝熱管が 34m と長いことや、管束内伝熱管配列と水室構造が適切なことから、流速、温度分布は均一であること³⁸⁾を検証したのであった。

排出ブライン拡散の影響を検証するための研究でも参画し、委託先との連携を強め、それぞれの研究から得た課題を提起し、即解決しながら研究を実施したのであった。

このようにして、基礎的研究を中心として東工試も参画して、最終的にフルシステムの高流速長管式多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置の全温度範囲についてカバーする運転を通じて、装置は安定した性能を発揮すること、また安定した運転も可能であること等を確認し、最終的には最適な 10 万 m³/日プラントの設計を行って、プロジェクトの所期の目的である技術開発を成功裏に終了することができたのであった。

すなわち、当初目標の「高流速」は従来の約 2 倍の流速を実現して装置のコンパクト化を現実のものにし、「長管式」は伝熱管 34m を使用して実証し、「コンクリート缶体」の適用性を明らかにし、「脱気・脱炭酸・スケール防止法」として大型装置に適した最終段脱気法の適用性を検証し、pH コントロール法による脱炭酸法を確立し、スポンジボールクリーニング法を実現して、これらの技術を通して最高ブライン温度も 121℃を可能とし、適性を持った「伝熱管材料」が選定され、有用「副産物の利用」を輸入塩に対抗できるプロセスとして確立し、「汚染海水及びブラインの環境影響」対処法を確立し、プロジェクトの開発目標をすべて達成する成果を得て世界最高性能の多段フラッシュ蒸発装置の開発に成功したのであった。

1.2.5.10 海水淡水化トータルシステムの研究

以上述べてきたように、10 万 m^3 /日高流速長管式多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置の設計、建設、運転に関する技術開発が完成されたのであった。最後に、この装置の実用化を図る上で、なお残された問題を抽出、検討し、その対応を明確にしておく必要がある。そのために、図 2 に示した「海水淡水化トータルシステムの研究」に対応して、本プロジェクトでは都市圏の水不足対策として、この装置が実用化された場合を想定して、その経済性、エネルギーの有効利用システム、河川水との関係等、海水淡水化装置を新しい水資源として活用するに際しての位置づけ、運用方法を総合的に検討することとなった。

本研究は、海水淡水化装置を新しい飲料水の供給源として、都市システムの中にどのように組み込んでいくかを検討した日本海水学会の昭和 50 年度、51 年度「海水淡水化トータルシステムの評価調査報告書」を踏まえたものであるが、開発技術の円滑な普及に役立てることを念頭に、最終年に（財）造水促進センターに委託され検討を行ったものである。

それらは、実用化を想定した次の 3 件であった。

（ケース 1）巨大都市への適用を想定した 100 万 m^3 /日の海水淡水化プラントと新鋭大型火力発電プラントとの組み合わせによる二重目的プラント。

（ケース 2）大・中都市への適用を想定した 10 万 m^3 /日の海水淡水化プラントと新鋭大型火力発電プラントとの組み合わせによる二重目的プラント。

（ケース 3）一般都市への適用を想定した 2.5 万 m^3 /日の海水淡水化プラントと都市ごみ焼却熱利用との組み合わせシステム。

以上に対して、昭和 52 年(1977)10 月に「海水淡水化トータルシステムの研究成果報告書」にまとめられた。その結果、当時の経済状態における最適な 10 万 m^3 /日多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置の最適仕様の概要は次のような結果^{1.6,1.7)}であった。

①造水比：14、②段数：53 段（熱回収部 50 段、熱放出部 3 段）、③取水海水温度：25℃、④取水海水量：18,600 トン/時、⑤蒸気消費量：ブラインヒーター用（127℃）298 トン/時、エジェクター用（183℃）7.4 トン/時、タービン用（260℃）92 トン/

時、⑥循環ブライン量：30,400 トン／時、⑦単位幅あたりのブライン流量：1,700m³／時、⑧排出ブライン温度：34℃

これはその後、海水淡水化装置の導入計画が日本各地で起こるたびに、その検討のための基礎データを与えるものとして貴重なものであり、活用されたのであった。

1.2.6 成果普及

1.2.6.1 （財）造水促進センターの設立

当時、通商産業省では、水資源の確保と排水の環境問題解決のために、その方策を調査研究してきていたが、新しい水資源を排水と海水に求める技術開発を促進する推進母体の必要性から、官民一致協力のもとに本プロジェクト進行中である昭和 48 年 5 月に財団法人造水促進センターを設立した⁸⁹⁾。本プロジェクトの研究成果の普及促進、造水事業の需要調査と開拓、造水技術の現状調査、海外に対する造水技術協力事業等が進められ、特に、前述した成果普及に関して「海水淡水化トータルシステムの研究」の委託先として活躍した。また、逆浸透法海水淡水化技術開発の委託先として大きな力を発揮したのであった。

1.2.6.2 「海水淡水化技術」⁹²⁾の執筆

以上の研究を通して得られた海水淡水化技術に関する諸情報は非常に貴重なものであるため、関係者が散逸してしまわないうちにまとめておくことになり、本技術成果の普及も意識して、関係者が共同して執筆し「海水淡水化技術」を（財）日本産業技術振興協会から出版した。これは、海水淡水化技術の我が国の教科書的なものになって活用されたのであった。なお、これには、逆浸透法による海水淡水化技術についても当時の最新技術内容がまとめられている。また、これは英訳され、日本-中近東海水淡水化合同会議等の参加者を通して、関係諸国に送られ、国際的に日本の海水淡水化技術の優秀さが認知されることに役立てられたのであった。

1.2.6.3 中近東諸国への技術紹介とプラント輸出

1973 年以來の石油価格の急騰は、産油国である中東諸国に莫大な収入をもたらし、水資源のないこれら諸国の海水淡水化の実情を知る必要性と、日本の優秀な開発技術紹介を兼ねて、プロジェクト終了を控えた 1975 年 5 月に中東産油国（イラン、クウェート、サウジアラビア、アブダビ、カタール）へ急遽ミッションが送られ、海水淡水化装置導入計画が多々あること、日本の技術に対する期待が大きいことが明らか⁹⁰⁾になったのであった。この報告を受けて、1975 年 12 月東京にて日本-中近東海水淡水化合同会議（Near Middle East-Japan Joint Conference on Desalination, Tokyo）が代表団（エジプト、イラク、クウェート、カタール、サウジアラビア）を招いて開催され、非常に熱心な意見交換が行われ⁹¹⁾、テストモジュールプラントによる実験を稼働状態で見学するなどを通じて日本の技

術が高く評価されたのであった。

中でも最大の海水淡水化装置需要国であるサウジアラビアは我が国の技術に注目し、国際協力事業団（JICA）の国際協力事業として、日本－サウジアラビア海水淡水化技術協力事業を結び、日本の技術に学ぶ体制を組んだ⁸⁹⁾のであった。

この地域の特性から、必要とされる水の大部分は海水淡水化に求められ、大規模な海水淡水化プロジェクトが相次ぎ実施され、我が国のプラントメーカーは本プロジェクトを通じて得た世界最高の技術を背景に目覚ましい進出を収め、次のような事態を生んだのである。大型プロジェクトの技術開発終了時点の 1976 年末において世界の海水淡水化プラントのうち蒸発法の造水容量合計は 287.9 万 $\text{m}^3/\text{日}$ で、そのうち日本企業製造のものは 67.3 万 $\text{m}^3/\text{日}$ であったものが、1978 年末においては 460.1 万 $\text{m}^3/\text{日}$ (全ての造水容量の 77.8%) となり、そのうち日本企業の建設したものは 200.5 万 $\text{m}^3/\text{日}$ ⁹³⁾ となっており、世界におけるこの 2 年間の増加分の約 80% は日本企業が製造したという結果³³⁾ を招き、大型プロジェクトの成果の与えた世界的インパクトが如何に大きなものであったかを知ることができるのである。また、1984 年時点のデータで海水淡水化多段フラッシュ蒸発装置について見てみると、日本企業が製作したのは 234 基、348 万 $\text{m}^3/\text{日}$ と世界の全容量のほぼ 52% を占め、世界第一位⁸⁹⁾ となっているのである。中でも、サウジアラビアのアルジュベールにおける総容量 108 万 $\text{m}^3/\text{日}$ に上る世界最大の海水淡水化プロジェクトの第 1 期(23,500 $\text{m}^3/\text{日}$ 、6 基)、第 2 期(23,500 $\text{m}^3/\text{日}$ 、40 基)ともに建設したのは大型プロジェクトの成果を生かしたものでプロジェクト参加企業が製造したものであった⁸⁹⁾。そして、2014 年 9 月の情報によると約 30 年使われた第 2 期のうち 10 基が日本企業により約 3 年かけて改修工事⁹⁴⁾ により更新され、さらに使われていくとのことである。

海水淡水化法については、造水促進センターによる 2011 年 10 月現在の調べ（GWI: Global Water Intelligence の DesalData のデータに基づく）では世界の海水淡水化装置のうち多段フラッシュ蒸発法は 41%、逆浸透法は 45% となっており、依然として多段フラッシュ蒸発法が使われている現状を知ることができる。

ただ、残念なことはコンクリート缶体がいずれの装置にも使われていないことである。これは日本で 10 万 $\text{m}^3/\text{日}$ 級の多段フラッシュ蒸発法海水淡水化装置の建設需要が生まれなかったためではあるが(これは日本にとってはいいことではあったが)、これが仮に実現していれば、アルジュベールの装置も日本にならって 1 基当たりの規模を拡大しコンクリート缶体を用いるメリットを生かして建設することになったのではとの思いは技術開発と実用化の差を提示しつつも残る課題である。

【謝辞】

大型プロジェクト海水淡水化技術開発の立案、企画、運営については、当時東工試の第 3 部の石坂誠一部長の委託研究を含めた全般的な指導性とそれを支えた田原浩一課長（故

人)、外山茂樹課長、藤井欽二郎課長(故人)の果たした役割は大きなものであった。さらに、大型プロジェクト採択にあたっては研究開発官室に併任されていた内田隆技官の献身的な努力あってのものであった。東工試に帰任後課長になられ、その日の浅いうちに採択にかかわる激務がたたったのか急逝されたことは悲しい出来事であったが、以上の方々の努力あって第3部の多くの研究者が一丸となって研究に邁進できたものであり、その名を記し、感謝の意を表する。

また、研究成果の普及については当時の佐山実研究開発官による努力、予算をどこからか工面され計画になかったミッションの中近東への派遣、ミッションからの情報に基づいて中近東諸国から参加者を招き日本-中近東海水淡水化合同会議を急ぎょ開催し、モジュール研究現場の見学を実現するという離れ業に近い行政手腕を発揮された賜物であったことを、感謝の意を込めて記す。

なお、石坂氏ご夫妻にはこの記録を記すにあたって所持されていた貴重な資料を産総研への寄贈を承諾しお送りいただき、役立てさせていただいたことを記し感謝するものである。

【参考文献】

- 1) 東京工業試験所年報 昭和 24 年度、p.4 (1950)
- 2) 東京工業試験所年報 昭和 26 年度、p.38-39 (1952)
- 3) 東京工業試験所五十年史、p.488 (1951)
- 4) 東京工業試験所年報 昭和 27 年度、p.35 (1953)
- 5) 東京工業試験所年報 昭和 28 年度、p.142-143 (1954)
- 6) 東京工業試験所年報 昭和 29 年度、p.185 (1955)
- 7) 田原浩一、“酒田における海水利用に関する中間試験の概要”；化学工業資料、第 24 巻、p.129-136 (1956)
- 8) (故) 田中健二、西田広三、石坂誠一、田原浩一、遠山武、松田博明、寺田松雄、岩田重雄、小畑健三郎、大山敬司、佐藤和男、和田吉郎、“海水利用の研究(第 1 報)”；東京工業試験所報告、第 51 巻、p.437 - 497 (1956)
- 9) 遠山武、岩田重雄、佐藤和男、“海水利用の研究(第 2 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.41 - 79 (1957)
- 10) 石坂誠一、和田吉郎、“海水利用の研究(第 3 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.90 - 96 (1957)
- 11) 石坂誠一、寺田松雄、“海水利用の研究(第 4 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.97 - 104 (1957)
- 12) 石坂誠一、和田吉郎、“海水利用の研究(第 5 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.187 - 196 (1957)
- 13) 岩田重雄、“海水利用の研究(第 6 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.197 - 200 (1957)
- 14) 石坂誠一、寺田松雄、“海水利用の研究(第 7 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.201 - 204 (1957)
- 15) 石坂誠一、岩田重雄、“海水利用の研究(第 8 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.205 - 211 (1957)
- 16) 田原浩一、佐藤和男、“海水利用の研究(第 9 報)”；東京工業試験所報告、第 52 巻、p.212 - 218 (1957)
- 17) 西田広三、“海水利用の研究”；工業化学、61、p.623 - 637 (1958)
- 18) 東京工業試験所六十年史、p.75 - 86 (1960)
- 19) 東京工業試験所年報 昭和 30 年度、p.11 (1956)
- 20) 東京工業試験所年報 昭和 31 年度、p.11 (1957)
- 21) 東京工業試験所年報 昭和 32 年度、p.12-13 (1958)
- 22) 馬野周二、“冷凍分離法”；化学工業資料、第 27 巻、p.127 - 129 (1959)
- 23) 科学技術庁資源調査会、「海水淡水化の技術開発に関する報告」、昭和 47 年 7 月 25

日発行

- 24) 建設省河川局、「全国水需要の展望について」、昭和43年9月発行
- 25) 鈴木篁、“アメリカにおける塩水の淡水化研究の状況”；化学工業資料、第30巻、p.136 - 147 (1962)
- 26) 化学語り部第8回“石坂誠一先生インタビュー”、日本化学会化学遺産委員会、(2010 発行)
- 27) 東京工業試験所年報 昭和41年度、p.17 (1967)
- 28) 東京工業試験所年報 昭和42年度、p.10 (1968)
- 29) 東京工業試験所年報 昭和43年度、p.11 (1969)
- 30) 東京工業試験所年報 昭和43年度、p.12 (1969)
- 31) Anthony Bennett, "50th Anniversary: Desalination - 50 years of Progress (part 1)"; Filtration+Separation Desalination, (Web), (17 July 2013)
- 32) 石坂誠一、田原浩一、小畑健三郎、佐藤和男、佐藤眞士、“海水淡水化と副産物利用—フラッシュ蒸発法—”；東工試ニュース、第4巻、p.65 - 85 (1969)
- 33) 化学技術研究所八十年史、p.227 - 258 (1981)
- 34) 佐藤眞士、田原浩一、外山茂樹、菅田孟、“多段フラッシュ装置の最適化と感度解析”；日本海水学会誌、第26巻、p.91 - 100 (1972)
- 35) 菅田孟、外山茂樹、“高流速フラッシュ蒸発現象に関する実験的研究”；化学工学論文集、Vol.4、p.148 - 153 (1978)
- 36) 後藤昭博、外山茂樹、牧野和孝、井伊谷鋼一、“高流速長管式海水淡水化多段フラッシュ蒸発装置内で発生するミストの粒度分布測定”；日本海水学会誌、第31巻、p.221 - 227 (1978)
- 37) 佐藤和男、神山健次、田原浩一、“フラッシュ蒸発過程における非平衡温度差の測定”；日本海水学会誌、第25巻、p.198 - 206 (1971)
- 38) 中嶋義弘、中沢宣明、外山茂樹、“多段フラッシュ蒸発装置の性能に及ぼす凝縮管束内のブラインの流れの不均一性の影響”；日本海水学会誌、第33巻、p.274 - 280 (1980)
- 39) 杉野邦雄、小畑健三郎、後藤藤太郎、“ウィンクラー法による海水中の微量溶存酸素定量”；日本海水学会誌、第29巻、p.64 - 73 (1975)
- 40) 杉野邦雄、小畑健三郎、“ガストランスファ形計器を用いた海水中の微量溶存酸素測定の検討”；日本海水学会誌、第32巻、p.34 - 39 (1978)
- 41) 小畑健三郎、杉野邦雄、田原浩一、“充填塔による真空脱気について”；日本海水学会誌、第28巻、p.104-109 (1974)
- 42) 佐藤眞士、菅田孟、外山茂樹、遠山武、“多段フラッシュ蒸発テストプラント用データ処理システムについて”；日本海水学会誌、第30巻、p.87-98 (1976)

- 4 3) 伊ヶ崎文和、佐藤眞士、菅田孟、外山茂樹、遠山武、“海水淡水化 10 万 m³/日テストモジュールプラントのデータ収録システム”；日本海水学会誌、第 31 巻、p.110-122 (1977)
- 4 4) 佐藤眞士、伊ヶ崎文和、菅田孟、外山茂樹、堀田和之、遠山武、“海水淡水化多段フラッシュ蒸発装置の部分負荷への動特性に関する実験”；化学工学論文集、Vol.3、p.606-611 (1977)
- 4 5) 佐藤眞士、伊ヶ崎文和、外山茂樹、“海水淡水化多段フラッシュ蒸発装置の部分負荷静特性”；化学工学論文集、Vol.4、p.342 - 349 (1978)
- 4 6) T. Hakuta, T. Okubo, T. Yarisawa, S. Tomizawa, I. Hayano, T. Goto, K. Tawara, S. Ishizaka, "Sludge Depositions in a Long Tube-High Flow MSF Test Plant"; Desalination, 17, p.87-95 (1975)
- 4 7) 伊ヶ崎文和、外山茂樹、佐藤眞士、菅田孟、“多段フラッシュ蒸発装置におけるスポンジボール洗浄の最適洗浄操作”；日本海水学会誌、第 29 巻、p.187-198 (1976)
- 4 8) 六串俊巳、高橋燦吉、和泉健吉、“海水淡水化装置の伝熱管汚れ物質とボール洗浄効果の検討”；日本海水学会誌、第 32 巻、p.128 - 140 (1978)
- 4 9) 六串俊巳、高橋燦吉、和泉健吉、“フラッシュ蒸発式海水淡水化プラント用ボール循環装置”；日本海水学会誌、第 35 巻、p.10 - 15 (1981)
- 5 0) 通商産業省編、「海水淡水化技術」、p.132、日本産業技術振興協会、昭和 53 年 3 月
- 5 1) 和泉健吉、山田章、“蒸発式海水淡水化装置で生成するアルカリスケールの熱的特性”；日本海水学会誌、第 35 巻、p.355 - 359 (1982)
- 5 2) 大里一夫、中内博二、梅野秀夫、神田幸雄、佐々木英次、“低い溶存酸素濃度の実験室的制御法”；防食技術、Vol.22, p.517-522(1973)
- 5 3) 佐々木英次、神田幸雄、大里一夫、中内博二、梅野秀夫、“高温脱気塩水中における軟鋼と 2¹/₄Cr-1Mo 鋼の腐食(第 1 報)”；防食技術、Vol.24, p.351-355(1975)
- 5 4) 佐々木英次、神田幸雄、大里一夫、中内博二、梅野秀夫、“高温脱気塩水中における軟鋼と 2¹/₄Cr-1Mo 鋼の腐食(第 2 報)”；防食技術、Vol.24, p.357-363(1975)
- 5 5) 中内博二、大里一夫、梅野秀夫、“海水淡水化装置における伝熱管内面の電気防食法”；防食技術、Vol.26, p.711-720(1977)
- 5 6) 佐々木利夫、栄幸雄、梅野秀夫、“多段フラッシュ海水淡水化装置の伝熱管材料に関する研究(第 1 報)”；防食技術、Vol.25, p.289-298(1976)
- 5 7) 中村寿雄、渡辺幸健、佐藤史郎、立石武、“多段フラッシュ海水淡水化装置の伝熱管材料に関する研究(第 2 報)”；防食技術、Vol.25, p.299-309(1976)
- 5 8) 佐藤史郎、永田公二、渡辺幸健、“多段フラッシュ海水淡水化装置の伝熱管材料に関する研究(第 3 報)”；防食技術、Vol.25, p.311-321(1976)
- 5 9) 渡辺幸健、永田公二、中村寿雄、鬼村吉郎、“多段フラッシュ海水淡水化装置の伝熱

- 管材料に関する研究(第4報)”;防食技術、Vol.25, p.323-335(1976)
- 60) 梅野秀夫、長野博夫、湯川憲一、松島巖、中野弘一、岩倉暢宏、“多段フラッシュ海水淡水化装置の伝熱管材料に関する研究(第5報)”;防食技術、Vol.25, p.337-348(1976)
- 61) 栄幸雄、渡辺幸健、佐々木利夫、梅野秀夫、“多段フラッシュ海水淡水化装置の伝熱管材料に関する研究(第6報)”;防食技術、Vol.25, p.349-362(1976)
- 62) 神田幸雄、梅野秀夫、中内博二、大里一夫、佐々木英次、“海水淡水化装置の高温脱気生成水による鉄系材料の腐食”;日本海水学会誌、第28巻、p.162-167(1974)
- 63) 近藤和吉、藤井欽二郎、“セメントモルタルに対する熱蒸留水の溶解作用”;セメント技術年報、XXVI、p.119-123(1972)
- 64) 金子茂十士、近藤和吉、藤井欽二郎、“熱海水に対するセメントモルタルとコンクリートの耐食性”;セメント技術年報、XXVI、p.124-130(1972)
- 65) 野尻陽一、田沢雄二郎、秋山暉、山下茂、小関善久夫、吉本富義、西村計一、藤井欽二郎、“海水淡水化装置用コンクリート缶体の開発研究(その3)”;鹿島建設技術研究所年報、第21号、p.123-132(1972)
- 66) 近藤和吉、金子茂十士、田沢雄二郎、小関善久夫、岡村鉄三郎、藤井欽二郎、“熱かん水(80℃)中におけるセメントモルタルとコンクリートの耐食性”;セメント技術年報、XXVIII、p.131-135(1974)
- 67) 秋山暉、石堂善彦、河田叡治、野尻陽一、藤井欽二郎、“コンクリート箱型缶体の透気性に関する研究”;セメント技術年報、XXVI、p.293-297(1972)
- 68) 野尻陽一、田沢雄二郎、山下茂、“高温時におけるコンクリートの力学的性質に関する実験”;セメント技術年報、XXVI、p.345-351(1972)
- 69) 秋山暉、石堂善彦、河田叡治、野尻陽一、藤井欽二郎、“円筒形および箱形コンクリート試験体の熱応力”;セメント技術年報、XXVII、p.293-296(1973)
- 70) 秋山暉、石堂善彦、河田叡治、野尻陽一、藤井欽二郎、“プレストレストコンクリート缶体の熱応力に関する研究”;セメント技術年報、XXVII、p.297-302(1973)
- 71) 野尻陽一、田沢雄二郎、秋山暉、山下茂、“海水淡水化装置用コンクリート缶体の開発研究(その1)”;鹿島建設技術研究所年報、第20号、p.123-132(1971)
- 72) 野尻陽一、田沢雄二郎、秋山暉、山下茂、“海水淡水化装置用コンクリート缶体の開発研究(その2)”;鹿島建設技術研究所年報、第20号、p.133-142(1971)
- 73) 佐藤眞士、外山茂樹、“多段フラッシュ蒸発装置の伝熱面積配分の最適化”;化学工学論文集、第1巻、p.534-538(1975)
- 74) 佐藤眞士、外山茂樹、“部分負荷稼働を考慮した海水淡水化多段フラッシュ蒸発プロセスの特性”;日本海水学会誌、第33巻、p.109-115(1979)
- 75) 早野市郎、後藤藤太郎、石坂誠一、“NaOH-KOH-H₂O系におけるNaOH・3.5H₂O

- の融点”；日本海水学会誌、第 24 卷、p.253-258 (1971)
- 7 6) 早野市郎、後藤藤太郎、“NaOH-KOH-NaCl-KCl-H₂O 系における NaOH・3.5H₂O の消失（析出）温度および塩化ナトリウムと塩化カリウムの挙動について”；日本海水学会誌、第 29 卷、p.261-270 (1976)
- 7 7) 秋谷鷹二、大輪優、川崎成武、“NaOH-KOH 混合水溶液の積分希釈熱について”；日本海水学会誌、第 33 卷、p.207-213 (1979)
- 7 8) 白田利勝、“アンモニア-水系の気液平衡関係”；日本海水学会誌、第 28 卷、p.353-359 (1975)
- 7 9) 中沢宣明、佐藤眞士、大久保悌二、“希薄アンモニア-塩水の気液平衡関係”；日本海水学会誌、第 38 卷、p.348-352 (1979)
- 8 0) 遣沢哲夫、白田利勝、大久保悌二、清水和雄、“蒸発法海水淡水化装置におけるアンモニウムイオンの挙動”；日本海水学会誌、第 28 卷、p.168-174 (1974)
- 8 1) 遣沢哲夫、白田利勝、大久保悌二、清水和雄、“蒸発法海水淡水化装置におけるフェノール類の挙動”；日本海水学会誌、第 28 卷、p.321-326 (1975)
- 8 2) 中沢宣明、明尾誠、佐藤眞士、大久保悌二、“海水淡水化多段フラッシュ蒸発装置におけるアンモニアの挙動”；日本海水学会誌、第 40 卷、p.152-158 (1980)
- 8 3) 白田利勝、根岸章、大久保悌二、後藤藤太郎、“多段フラッシュ蒸発装置におけるフェノール類の挙動とその予測”；日本海水学会誌、第 29 卷、p.255-260 (1976)
- 8 4) 中原東郎、佐々木英次、神田幸雄、梅野秀夫、“沿岸海水汚染と硫酸塩還元細菌”；日本海水学会誌、第 30 卷、p.133-141 (1976)
- 8 5) 佐々木英次、棚木敏幸、中原東郎、神田幸雄、大里一夫、梅野秀夫、“硫化水素を含む人工海水中における軟鋼の腐食”；防食技術、Vol.26, p.229-236(1977)
- 8 6) 佐々木英次、中原東郎、神田幸雄、大里一夫、梅野秀夫、“硫酸還元菌による軟鋼の水素復極現象の可能性”；防食技術、Vol.26, p.125-132(1977) p.225-230 (1987)
- 8 7) 佐々木英次、中原東郎、神田幸雄、大里一夫、梅野秀夫、“硫酸還元菌による硫化水素の発生と軟鋼の腐食挙動の関係”；防食技術、Vol.26, p.77-86(1977)
- 8 8) 菅田孟、伊ヶ崎文和、佐藤眞士、外山茂樹、“10 万 m³/日海水淡水化多段フラッシュ蒸発装置テストモジュールにおけるフラッシュブライン流の不均一性とその装置性能の及ぼす影響”；日本海水学会誌、第 33 卷、p.214-220 (1979)
- 8 9) 佐山実、“プロジェクトのまとめと成果普及”；大型プロジェクト 20 年の歩み ― 我が国産業技術の礎を築く ― 工業技術院研究開発官室監修 (財)通商産業調査会 昭和 62 年発行、p.225-230 (1987)
- 9 0) 佐藤眞士、“中近東諸国の海水淡水化事情について”；日本海水学会誌、日本海水学会誌、第 29 卷、p.232-236 (1976)
- 9 1) 加藤順、“日本―中近東海水淡水化合同会議”；造水技術、Vol.2(No.3),p.63-69、Vol.2

(No.4),p.43-49(1976)、Vol.3(No.1),p.58-62(1977)

- 9 2) 「海水淡水化技術」、[編集]通商産業省、[発行](財)日本産業技術振興協会、昭和 53 年 3 月 (1978)
- 9 3) 国定勇一、“茅ヶ崎における逆浸透法海水淡水化の技術開発”；日本海水学会誌、日本海水学会誌、第 35 巻、p.82-92 (1981)
- 9 4) ITOCHU, “News Releases 2014 - ITOCHU and Sasakura to Receive Order for Project for Restoration of Al Jubail Seawater Desalination Plant - ”、(Web) (September 5 2014)

【石坂誠一氏より提供された「海水淡水化」関係資料より引用】

- I.1) 海水淡水化大型プロジェクトコスト算定基準小委員会、“多段フラッシュ蒸発法による海水淡水化コスト算出暫定基準”、昭和 46 年 8 月 20 日
- I.2) 日本海水学会、“海水淡水化装置補機類調査報告書”、昭和 47 年 3 月
- I.3) 東京工業試験所、“海水淡水化のしおり 大型プロジェクト「海水淡水化と副産物利用」”、昭和 48 年 3 月
- I.4) 株式会社 笹倉機械製作所、“テストモジュールによる研究 昭和 47 年度研究成果報告書 10 万 m³/日海水淡水化プラント概念設計”、昭和 48 年 3 月 31 日
- I.5) 株式会社 東京久栄、“排出ブライン拡散に関する研究報告書”、昭和 52 年 3 月
- I.6) 産業技術審議会 大型技術開発部会 評価分科会、(部内資料)「海水淡水化と副産物利用」の研究開発に関する評価報告書、昭和 53 年 3 月
- I.7) 産業技術審議会 大型技術開発部会 評価分科会、(部内資料)「海水淡水化と副産物利用」の研究開発に関する評価報告書概要、昭和 53 年 3 月
- I.8) 東京工業試験所、「海水利用の研究－海水の連続精製中間試験－」、昭和 29 年 3 月 31 日 (1954)

【その他参考資料】

佐々木壱咲、「潮目 - 海水淡水化物語 -」、桜美林大学北東アジア総合研究所 (2013)

【著者略歴】

佐藤眞士 1942 年生 工学博士 (専門分野) 化学工学、省エネルギー
1968 年 4 月 東京工業試験所入所 海水淡水化技術開発に従事
2003 年 3 月 産業技術総合研究所定年退職
現在 無職

2. 逆浸透法の研究開発

2.1 はじめに

逆浸透法の研究開発は筆者が東京工業試験所（以下、東工試）に入所した 1966 年（昭和 41 年）に始まった。当時、海水淡水化の研究は東工試第三部を中心に蒸発法および冷凍法による方法が研究されており、特に蒸発法については工業技術院の大型プロジェクト研究への参加が検討されていた（前述）。蒸発法も冷凍法も淡水化の過程で海水の相変化（蒸発法では水の気化、液化、冷凍法では水の固化、融解）を伴うため、当時東工試第三部課長（後の工業技術院長）であった石坂誠一氏がより省エネルギー的であると考えられる（相変化を伴わない）膜法（逆浸透法）の検討を指示して研究が始まった。

「逆浸透法の開発」を「海水淡水化法」の一部として述べるにあたって最初におことわりしておくことがある。逆浸透法は海水淡水化の一方法として提案されたものであり、また我々は海水淡水化を担当した部門に所属してはいたが、この研究に携わった研究者は「逆浸透法」と「海水淡水化」を直接的に関連させてはおらず、実験でも海水（人口海水も含めて）に触れたことはない。我々の興味は膜はどのようなものであり、どのようなところで用いることができるかということであった。これはまだ膜の性能が海水淡水化ができる能力に達していなかったことも一因であったと思う。また石坂氏も当初は海水淡水化の一方法として考えていたと思われるが、研究の進展に伴って、まず逆浸透法の基礎をしっかりととらえ一つの基盤技術として発展させてほしいとのスタンスであったと思う。なお逆浸透法の研究は主に 5 名の研究者（増田等、中根堯、松田正治、原谷賢治、神澤千代志）で行った。

「海水淡水化」を格段に進歩させたのは偏に米国あるいは日本の企業であり、東工試や各大学の研究者が（データ解析等で貢献はしていても）直接的に（膜モジュール等の開発に）貢献したとは考えてはいない。

我々は日本で最初に逆浸透膜の基礎研究を行い、これを論文等で発表¹⁾²⁾³⁾⁴⁾して広くこの方法の発展性を知らしめたこと、これらの成果を基に研究会を開催し学会設立の基盤をつくったこと、研究所内にも膜関連のグループ発展的に構成され、水分離だけでなく種々の膜プロセスの可能性を広げたことなどで貢献したと認識している。このような視点でこの項を述べることをお断りしておきたい。

ここで、逆浸透法の原理について説明しておく。図 2.1 に示すように水は透過するが塩は透過しない半透膜の両側に純水と NaCl 水溶液を入れると純水は水溶液側に移動し、やがて浸透平衡に達する。このときの両液の圧力差が浸透圧である。浸透圧に対して NaCl 溶液側に機械的圧力をかけ純水を取り出すのが逆浸透法である。海水はおよそ 2.5MPa の浸透圧をもっているので濾過を有効におこなうためには海水側これ以上の圧力をかけて

水のみを濾過する必要がある。

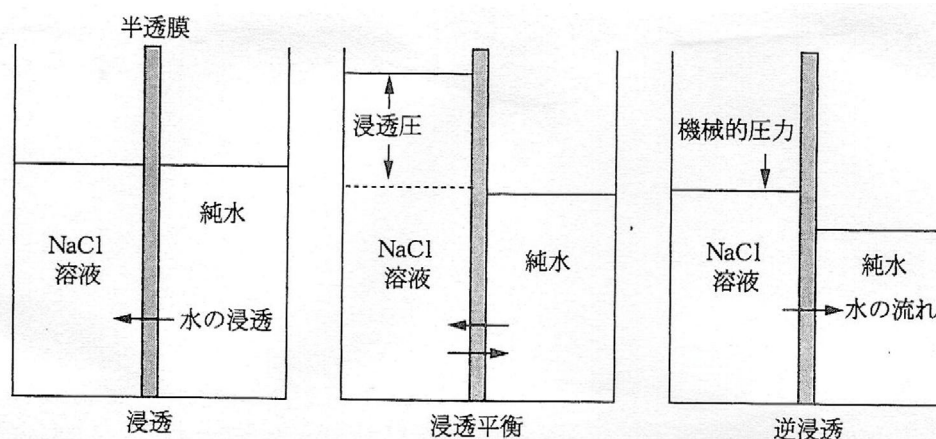


図 2.1 逆浸透法の原理

さて、膜分離技術の発展について考える際には多くの先達の優れた研究を想起しなければならないが、ここで膜関連研究の流れをごく簡単に述べておきたい。

ノレ (A.Nollet) が「ワインの精」を動物のぼうこう膜に入れその口を縛って水の中に入時間の経過に従ってぼうこう膜がしばしば破裂するのを見た⁵⁾。このように膜の透過理論の基礎として用いられる重要な法則が生まれるが、実用化の気運が生まれるのは半透性が実験的に確かめられたのは 1748 年であった。その後 19 世紀にはフィック (Fick) の法則⁶⁾ (1855 年) やグラハム (Graham) の法則⁷⁾ (1866 年) など今日でも透過理論の基礎として用いられている重要な法則が生まれた。

電気透析法については実用化技術よりもむしろ理論の方が先行していて、その概念はすでに 19 世紀末に示されていた。電気透析法における milestone のひとつは Donnan 平衡、Donnan 電位の概念の発表^{8) 9)} (1911 年) であり、これらは生体の細胞膜がイオンに対して選択透過性をもつ現象を解明する過程で生まれた。つづいて 1936 年にテオレル (T. Teorell)¹⁰⁾、およびメイヤー (K.H.Meyer)、シーバース (J.F.Sievers)¹¹⁾ によってそれぞれ独立にイオン選択透過性膜の性質を説明し得る理論的基礎が完成された (これを TMS モデルという)。1953 年、最初の商業規模の脱塩プラントが製造され電気透析法の実用化の基礎となった。現在、日本の食塩のかなりの部分は電気透析法によって製造されている。また血液透析法を人工腎臓に応用したのはオランダのコルフ (W.J.Kolff) であり、いわゆる人工臓器の基礎を築いた¹²⁾ (1944 年)。

逆浸透法はフェッファー (W.Pfeffer) の浸透圧測定¹³⁾ (1877 年、この測定データは後にファントホッフ (van't Hoff) の浸透圧の法則¹⁴⁾ につながる) にその源をたどらねばならないが、気の遠くなるような年月を経て脱塩法としての提案につながるのである。

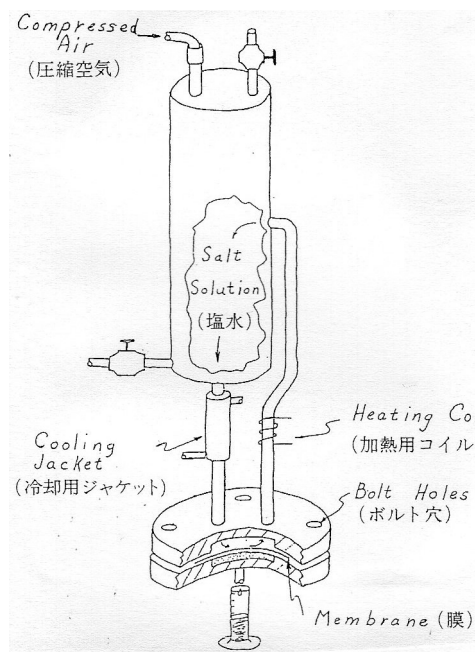
2.2 逆浸透法発展の経緯の概要

逆浸透法の技術開発は極めて順調に推移し、1953年の提案から30年程度で海水淡水化技術を含めて実用化技術の基本となる技術が確立されている。このような言わば理想的な技術発展は、フロリダ大学 C.E.Reid 教授による提案、Loeb と Sourirajan による非対称酢酸セルロース膜の開発、その後の日米研究機関による基礎研究に続いて行われた日米の企業による優れた技術開発によるものである。この技術は当初目的としていた省エネルギー的海水淡水化技術として世界中に広まるのと同時に現在では工業を支える基盤技術の一つとして極めて広い分野で用いられている。

このように「基礎」と「開発」が相まって極めて「理想的」に発展した技術展開を理解するために、最初に逆浸透法の発展の経緯およびその中で東工試の研究グループの果たした役割の概略を述べ、後にその中身の詳細を述べることにしたい。従って述べる内容に若干の重複があることをお断りしておきたい。

2.2.1 逆浸透法の提案

逆浸透法は1953年フロリダ大学の C.E.Reid 教授によって提案された。1957年フロリダ大学の Breton は酢酸セルロース膜が NaCl を 98% 以上分離することを示したが、水の透過流束はとても小さかった（当時用いられていた実験装置を示すが、良い膜が見いだせず、装置も不十分が研究開発初期段階の苦勞が感じられる）。



最初に公表された淡水化用半透膜試験装置

(アメリカ塩水局内務省レポート OSW Report No. 16(1957))

そのため原理的には興味をもたれたが、海水から安価な純水を大量に生産する方法として

はそれほどの期待はされていなかった。1960 年、カリフォルニア大学で海水淡水化の研究を行っていた Loeb と Sourirajan は酢酸セルロースを用い膜表面だけが極端に薄い非対称膜を作成した。この膜の透過流束は従来の膜の 50 倍程度あり、実用化への期待が芽生えてきた。(逆浸透法の初期および中期の発展については 1952 年に設立された米国内務省塩水局 (Office of Saline Water) の報告書の果たした役割が大きかった。OSW Research & Development Report は 1000 報を超えたが、この中の数報は後の本法の発展に確実に貢献した。)

2.2.2 東工試における初期の研究

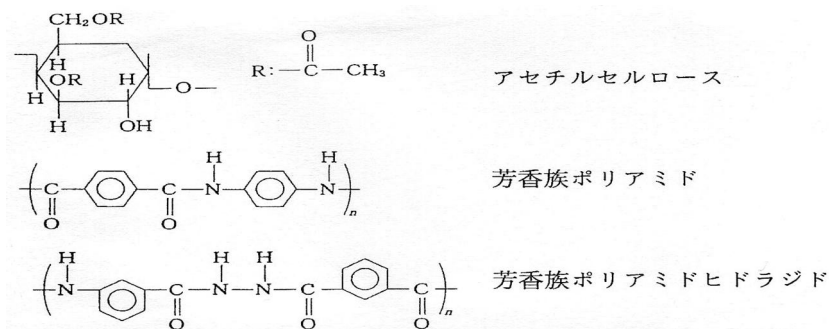
1965 年に第 1 回国際脱塩会議がワシントンで開催されたが¹⁵⁾、この会議に参加した石坂誠一課長 (後に工業技術院長) が逆浸透法関係の 4 報告を入手した。これらの報告を入所したばかりの筆者に示し、よく内容を理解し研究を始めるように指示したことで逆浸透法の研究が開始した。おそらく日本では最初の研究であったと思うが、同時に当時の日本専売公社小田原研究所、民間では膜メーカーの東レ、水処理関係の栗田工業(株)、プラントメーカーとしての三菱重工(株)などが興味を示し何らかの検討をしていたと思われる。

我々は日本で最初となる論文を 4 報発表して (第一報のややトレース的な論文は専売公社と同時発表)、酢酸セルロース膜の基本的透過性能を示し逆浸透法の広い発展可能性を示した。この時期になると相当数の企業等がこの方法に興味をもっていることがわかったので石坂部長の声掛けで 1972 年に膜研究懇話会をつくった。懇話会には膜メーカー、水処理会社ばかりではなくこの技術に興味をもった商社、銀行、自動車メーカー、電池メーカーなど数十社が参加してかなり盛会であった。このころにはカナダ NRC (国立研究所) で逆浸透法の研究を行っていた木村尚史東京大学教授、続いて大矢晴彦横浜国立大学教授が帰国して日本における逆浸透法の研究が盛んになってきた。

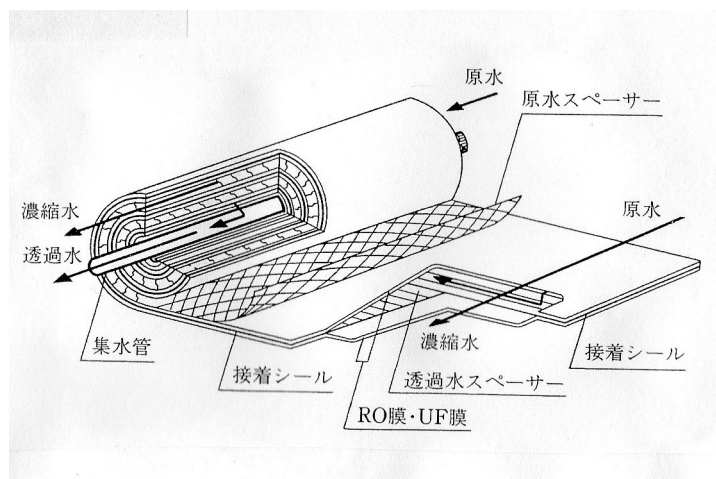
なお、この膜研究懇話会は石坂部長の次長昇進に伴って、木村教授に預けられたが、1976 年の膜学会設立の基盤になった。

2.2.3 膜関連企業による開発と急速な展開

我々の研究が開始すると同時期あるいは少し後に企業による逆浸透法に用いる膜の研究が始まった。1968 年から 1973 年にかけて東レ (株)、続いて東洋紡 (株)、日東電工 ((株)) による研究が始まった。米国による研究、特に膜に関する研究の開始時期は早く、我々は後に知ったことだが、デュポン社では 1960 年頃から 100 種類以上の高分子の膜としての性質を調べ、下記に示すような構造の酢酸セルロース、芳香族ポリアミド、芳香族ポリヒドロジドの評価が高かった。



膜を大規模に用いるためには膜を耐圧容器と一体化したいいわゆるモジュールの開発が必要であった。膜モジュールは単位容積あたりの膜面積が大きいこと、処理水（海水）をろ過するときに濃度分極（後述）が小さいことなどを考慮して作製する。開発初期には耐圧版モジュールや管型モジュールが見られたが、その後殆どのモジュールは下図に示すようなスパイラル型モジュールと中空糸型モジュールになった（現在はスパイラル型が大勢を占めている）。



スパイラル型モジュール

海水淡水化モジュールの開発は急速に進み 1982 年に最初の大規模プラントが建設されると、その後、主に日本、米国の関連企業による激しい競争によって次々と建設され、最大規模では 20~30 万 m³/日規模のものもあり、また生産される純水の価格は大幅に下がり水 1m³ 当たりの価格は 1 米ドル以下まで低下したものもあった。

2.2.4 海水淡水化以外の分野への展開

逆浸透法を含む膜法の種類およびその応用分野は下表に示したが、幅広く発展し、半導体関連産業、食品関連事業、医薬品関連事業、環境浄化事業などを含む広い分野が含まれている。

また水処理のみならず二酸化炭素分離回収、石油成分分離などへの適用、化学（あるいは生物）反応を促進するためのメンブレンリアクター（膜反応器）への適用など新分野の研究も進んでいる。また 1970 年代になると政府のいくつかの省庁において膜分離技術が

次の時代を担う基盤技術のひとつであると認識され数多くの膜関連プロジェクトが実施された。

以上、逆浸透法発展の経緯の概要を示したがこれらのことを踏まえた上で研究の初期段階で東京工業試験所の果たした役割について述べる。

膜分離法	分離対象	分離機構	駆動力	応用分野
精密ろ過 (MF)	微粒子 (0.025~10 μm)	ふるい機構 (孔径)	圧力差 (減圧~0.2MPa)	水処理(清澄、超純水、無菌水、用水等) 微粒子除去(除濁、除菌、微生物分離等)
限外ろ過 (UF)	コロイド物質 (2,000<Mw)	ふるい機構 (孔径・ 親和性)	圧力差 (0.05~1.0MPa)	水処理(超純水、無菌水、用水、廃水等) 食品加工(果汁、乳製品、醸造品等) 有価物回収(電着塗料、高分子物質等)
ナノフィル トレーシ ョン (NF)	塩類・低分子物質 (300<Mw<2,000)	ふるい機構 (孔径・ 親和性)	圧力差 (0.2~2.0MPa)	水処理(超純水、用水、軟水化、廃水等) 食品加工(果汁、糖類、醸造品等) 有価物回収(酸素、医薬品、化学品等)
逆浸透 (RO)	塩類・低分子物質 (Mw<300)	溶解拡散	圧力差 (1.0~10MPa)	水処理(淡水化、脱塩、超純水、廃水等) 食品加工(果汁、糖類、醸造品等) 有価物回収(酸素、医薬品、化学品等)
拡散透析 (DD)	イオン・低分子物 質・コロイド物質	拡散速度・ 荷電性	濃度差	有価物回収(酸、アルカリ、塩類等) 精製(糖、蛋白、酵素等)
電気透析 (ED)	イオン・塩類	荷電性	電位差	製塩(塩水の濃縮) 脱塩(アミノ酸の精製等) その他(カセイソーダの精製等)
浸透気化 (PV)	水・溶媒	溶解拡散	蒸気圧差 (1次側:加熱 2次側:減圧)	脱水(アルコール等有機溶剤) 脱有機物(フェノール、ハロゲン化炭素)
気体分離 (GS)	気体混合物	溶解拡散	圧力差	有価物回収(水素、酸素、炭化水素等) 不純物除去(CO ₂ 、SO ₂ 等)

2.3 東京工業試験所における基礎研究

2.3.1 研究開始

先に述べたような経緯で1966年に逆浸透の研究を始めることになった。

まず、1) 文献に載っている非対称酢酸セルロース膜を作ってみること、また作った膜の脱塩性能を測定すること2) 膜の性能を測定するできるだけ使いやすい装置を作ること

を当面の目標とした。実験開始時期の稚拙な苦労について若干記しておきたい。

まず膜試験装置の製作にとりかかった。外注することにしたが、文献を基に原案をつくり理化学メーカーに相談し試験対象膜3枚を同時に試験できる装置の仕様書を作成した。予算は石坂課長が用意してくれたが(100万円程度だったので)、大会社が入札することはないと思っていたが石川島播磨重工業(IHI) ㈱が落札したのは驚いた。三菱重工業㈱も入札に参加していたのでいくつかの水処理関連企業は逆浸透法の将来へのある種の期待をもっていることを感じた。

IHI が作った装置はしっかりとしていて、膜の装着、取り外しを容易にすることができ、水圧をかけた試験水を流しながら安定的に膜を試験することができるなど多くの試作膜を迅速に試験することができた。(この装置は後に多摩精機工業(株)が製造、販売したが100 台以上売れたと聞いた)。

膜は文献に従って、含水性酢酸セルロース膜の作製にとりかかったが原材料の酢酸セルロースについてはタバコのフィルタに用いられていることもあってダイセル化学工業(株)に提供して頂いた。膜は酢酸セルロースをアセトン、ホルムアミドなどの混合溶媒などに溶かしガラス板に一定の厚みで流延した後、定温の湯で熱処理して作った。緻密な層(約0.2 μm 程度)は主にアセトンが蒸発するときに形成され、残りの大部分は緻密な層を支えるいわゆる支持層となっているところが優れていて、当時「ローブ(Loeb)型膜」とよばれていた。実験を始めた頃には初歩的なミスをいくつかおかした。まずは膜をつくる際の原材料の問題であった。

文献に書いてある通りいくら膜を作っても、文献の膜性能(おもに脱塩率)を達成することができなかった。いろいろと調べ、結局セルロース本体の原料由来によるものであることがわかった。すなわち日本のセルロースは材木由来、米国のセルロースは綿花由来のものが多く、材木由来のものにはヘミセルロース等若干の不純物が含まれていて、これが膜性能にかなりの影響を与えていたのである。以来セルロースは米国製(Eastmann 社製398-3)を用いることにしたが、これにより作製した膜の膜性能は格段に安定した。

文献に述べられている方法をトレースした後、酢酸セルロースの混合溶媒中のホルムアミドを各種のアミドに変えて(炭化水素鎖の長さを変えて)膜を調整した。作製した膜の性能は変化した、ホルムアミドを用いた性能の膜をこえることはできなかった。この結果を日本海水学会誌に投稿したが、これが日本で最初に逆浸透法を紹介した論文となった。

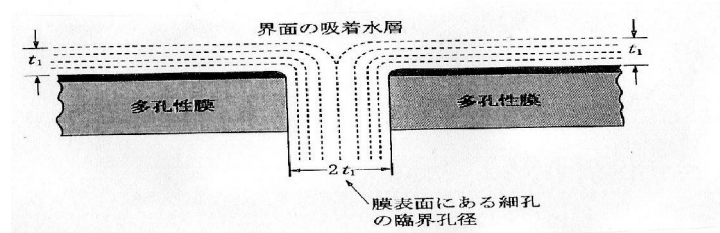
2.3.2 膜透過機構の解明

膜の半透性すなわち水は透過させるが NaCl のような塩は排除する(透過させない)とはどういうことか。実用化の可能性のある逆浸透膜をつくりだしたスリラージャンとローブは「ギブスの等温吸着式*1」によって食塩水を空気中におくと食塩水表面には純水の層が存在する。これをかきとれば純水が得られるが物理的に難しいので、純水の層が吸着するような固体表面をつくり、これに孔をあけて食塩水を通せば、純水が取り出せるであろう。孔はあまりにも大きいと塩が入り込むので下図に示すように純水層の2 倍の径をもつものが最適である。

*1 ギブスの等温吸着式 溶質が溶液の表面に吸着される場合に、表面において溶液内部に比べて余分にある溶質の量を与える次式をいう。

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \ln a_2} \right)_T$$

ここで γ は溶液の界面張力、 a_2 は溶質の活量、 Γ は界面における溶質濃度の過剰量



(スリラージャンらによる) 膜中の理想的な孔径の考え方¹⁶⁾

ここで膜中の水について簡単に説明する。いわゆるふつうの水は分子間に働く強い水素結合のために、水分子が数個から数 10 個集まったクラスターを形成していて、これが離散集合を繰り返している。ここに親水性のポリマーがあると水構造が乱されて親水部に結合する。これを束縛水と呼んでふつうの水に近い自由水と区別する。

筆者らはこれらの仮説、研究に基づいて、では膜中の孔径はどの程度かまた透過させる物質の物理的、化学的特性は膜透過にどのような影響を及ぼすのかということに大きな興味をもち研究を行った。

当時、水および溶質が膜を透過する現象は次式で記述されていた¹⁷⁾ (この他非平衡熱力学を考慮した式¹⁸⁾、膜中の孔の性質を記述する式¹⁹⁾などもあった)。

$$J_1 = \frac{D_1 C_1 V_1 (\Delta p - \Delta \pi)}{RTl} = \frac{P_1 V_1}{RT} \cdot \frac{\Delta p - \Delta \pi}{l}$$

$$J_2 = D_2 K_2 \frac{\Delta C_2}{l} = P_2 \frac{\Delta C_2}{l}$$

ここで J_1 は質量流束 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) で添え字 $i=1,2$ はそれぞれ水および溶質を表す。 D_1 、 D_2 はそれぞれ水および溶質の拡散係数を (m^2/s) を表す。 C_1 は膜中の水濃度 (kg/m^3) , V_1 は水のモル体積 (m^3/mol)、 K_2 は膜-溶質間における分配係数である。 Δp 、 $\Delta \pi$ 、 ΔC_2 はそれぞれ膜の両側における圧力(Pa)、浸透圧(Pa)、および溶質濃度(kg/m^2)の差であり、 l は膜の厚さ(m)である。

膜の性能を決定するのは D と K である。すなわち D は対象となる物質がいかに速く膜を透過するかを表す係数であり、 K は対象となる物質がいかに多く膜に溶解するか (入り込むか) を表す係数である。このことを明らかにするためにいくつかの溶質を用いて膜透過挙動あるいは膜への吸着挙動などを調べた。

2.3.2.1 カルボン酸の膜透過挙動²⁾

透過試験を行うための溶質として水に溶解し、かつ分子の大きさを系統的に変化させることができる直鎖カルボン酸 (ギ酸、酢酸、プロピオン酸、酪酸、吉草酸) と電解質と

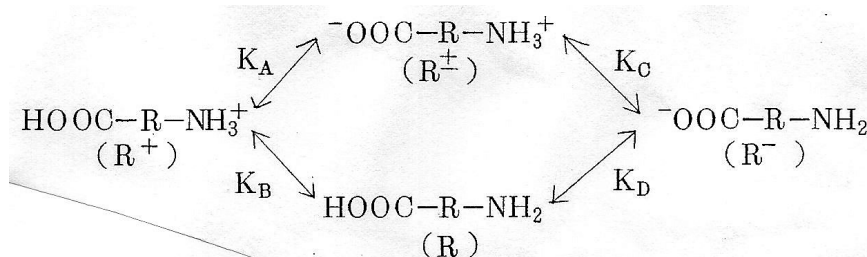
して酢酸ナトリウム、参照物質として NaCl を選択し、各 0.1N 水溶液を試験溶液として用いた。

膜は酢酸セルロース (Eastman398-3) 25、ホルムアミド 30、アセトン 45 の重量比で混合したキャスト液を用いて作製した。膜性能は熱処理温度を変化 (温湯で 40、60、70、75、80℃) させて調整した (熱処理温度が高くなるほど膜は緻密になる)。その結果水溶液中のカルボン酸の分子量が大きくなるほどそのカルボン酸と水の膜透過量は小さくなった。また膜によるカルボン酸の除去率は非常に小さく場合によっては膜を透過することによって原液が濃縮された。これは無機塩の透過と比較すると異常とも思える結果であった。酢酸セルロース粉末への溶質の吸着を測定した結果、溶質-膜間の親和性 (カルボン酸の分子量が大きくなるほど酢酸セルロースへの吸着量は大きくなった) と溶質の除去率との間にかなり密接な関係があることがわかった。また酢酸ナトリウムは NaCl と同じような透過特性を示し有機酸と塩との違いが明らかになった。

この実質第一報となった工業化学雑誌への論文は塩以外の物質透過を調べた論文としてかなり好評であり、2, 3 の水処理メーカーからは「興味深かった」とのコメントを頂いた。

2.3.2.2 アミノ酸の膜透過挙動³⁾

前報および他の論文から NaCl や Mg_2SO_4 のような電解質は逆浸透膜を容易に透過しないが酢酸、フェノールのような非電解質は容易に膜を透過することがわかったが、溶液中の分子のイオン解離状態と透過量の定量的な関係はまだ明らかになっていなかった。そこで分子の形態を変えずに荷電状態を変えて透過状態を調べるためにアミノ酸を用いることを考えた。アミノ酸の水溶液中での解離状態は次式で表されることがよく知られている。

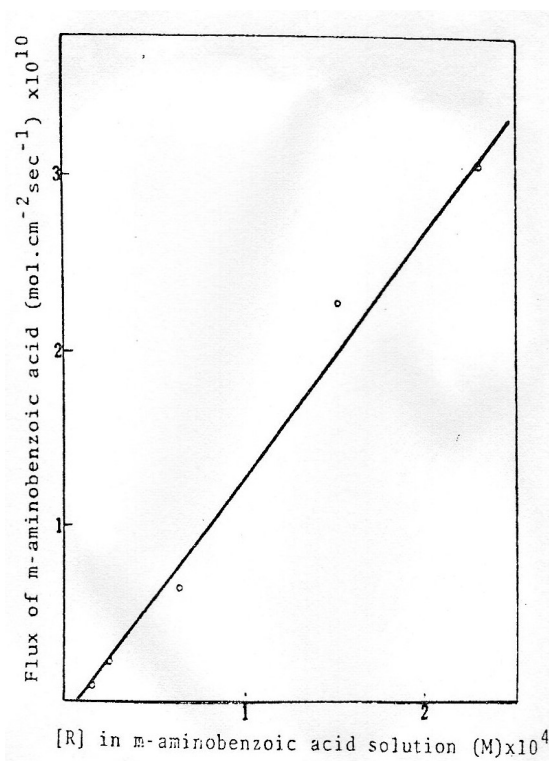


アミノ酸の解離状態

実験開始時には溶液の pH を変化させれば容易にアミノ酸の荷電状態を変えられると考えていたが両性イオンであるアミノ酸は溶液中で上図のように解離し、pH を変えても (プラスイオンとマイナスイオンの量は変わっても) 多くは荷電状態にあることがわかった。

困っていたが先輩研究者等の助言により関係書籍を詳細に調べたところアミノ安息香酸についてはメタ体とパラ体における $R^\pm/R$ の値は各々 2.29 と 0.135 で pH によっては R (非荷電状態) がかなり存在することがわかった。

実験をしてみると（計算した）非荷電状態にあるアミノ安息香酸量と膜透過量が下図に示すようにきれいな直線関係にあり、荷電イオンと非荷電分子との透過挙動の差異を明確に示すことができた。



メタアミノ安息香酸中の非荷電分子濃度 [R] と膜透過量の関係

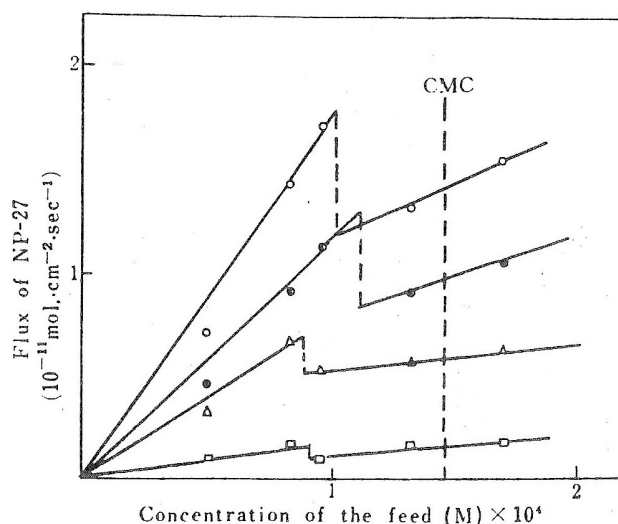
2.3.2.3 界面活性剤の膜透過挙動⁴⁾

次に選択した溶質は各種、各濃度の界面活性剤であった。これは各種の界面活性剤がどのような透過挙動の違いをみせるかを調べる目的もあったが、興味の内容は界面活性剤特有の臨界ミセル濃度が膜面濃度分極に及ぼす影響を調べたかったことにあった。濃度分極について簡単に説明しておきたい。

膜を工業的に活用しようとするといくつかの問題点が生じてくる。膜を一定時間つかっていると一般に水の透過流束が低下してくる。この原因のひとつは圧密化（compaction）とよばれる膜の構造変化、またファウリング（fouling）とよばれる膜汚染、さらには濃度分極（concentration polarization）である。さて、膜を用いて分離を行うと膜を透過しない成分は膜面に蓄積し透過を妨げる働きをする。逆浸透法においては浸透圧の増加、塩の析出等に起因する透過流束がみられることが多い。このような現象を一般に濃度分極とよんでいる。濃度分極を防ぐために、膜面流速を大きくとる、膜面で乱れが起きるようにするなどの工夫がなされている。

さて、溶質として用いる界面活性剤としては陰イオン系活性剤としてドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム（ABS）、陽イオン系界面活性剤としてテトラベンジルアンモニウ

ムクロリド (TDBNC) そして非イオン系界面活性剤としてポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル (オキシエチレン基の鎖数 $n=10, 16$ および 27 のもの) を用いた。熱処理温度 $60, 70, 75$ および 80°C の酢酸セルロース膜を用いて透過実験を行ったが、その結果 (1) 特に臨界ミセル濃度 (CMC) 以下ではイオン系活性剤の除去率は非イオン系活性剤に比較して大きい (2) 非イオン系活性剤の膜透過流束はその分子量が大きくなると小さくなることがわかった。下図に CMC を境に活性剤の透過流束が急激に変化することを示した。



膜透過量に及ぼす界面活性剤原液濃度の影響

非イオン系活性剤について CMC 以下および以上での活性剤透過流束を考慮することによって膜面の濃度分極を計算したが、その結果、膜面の活性剤濃度は操作条件によって試験溶液濃度の $1.32 \sim 1.61$ 倍になった。この実験によって濃度分極は我々が用いた試験装置であっても予想以上に大きいものであることを認識した。

2.3.2.4 金属錯体の膜透過挙動 ²¹⁾

以上の 4 報の論文によって国内における逆浸透研究のひとつの拠点は東工試であると認められたものと考えているが、溶質の膜透過挙動をより明確にするために金属錯体の膜透過挙動を調べた。膜を透過する流束は基本的にその物質の膜中の拡散係数 (膜中での動きやすさ) と膜への分配係数 (膜への溶け込みやすさ) の積で (操作条件を除けば) 決まると考えられている。これらを求めるために金属錯体を用いることが有効だと考えたためである。すなわち金属配位錯体は電子対が不足している金属陽イオン (Lewis 酸) が塩基性基 (配位子) と反応したものとみなすことができる。塩基性体としては NH_3 や H_2O のように中性のものか CN^- や Cl^- のように負に帯電しているものが多い。従って配位子を変えることによって溶質の性質を比較的簡単に変えることができる。選択した金属塩と配位子 (7 種) は表に示した。詳しい内容は相当長い説明になるので原論文を参照してほしいが、ここに要約を示す。金属イオン (例えば Cu^{2+}) にクエン酸や EDTA のような有機物を配

位させると金属イオンは膜を透過し難くなる。この傾向はクエン酸や EDTA のように溶液中で解離し、かつ分子サイズの大きいものほどその程度が大きかった。一方、配位子がアンモニアやチオシアンイオンのように比較的分子サイズが小さい無機イオンの場合には金属イオン（例えば Ni^{2+} ）への配位数を増しても、その除去率は必ずしも上昇しない。この点を明らかにするために均質膜を用いた錯体の吸脱着実験を行った。 $\text{Ni}^{2+}\text{-SCN}^-$ 錯体の場合には Ni^{2+} への SCN^- の配位が増加するに従って、錯体の膜への分配は増加するが、膜中の拡散速度が減少するために前述したような現象が生じることがわかった。 $\text{Ni}^{2+}\text{-NH}_3$ 錯体では 3 配位または 4 配位までは膜への分配が増加するがそれ以上の配位数で減少した。これは最初は Ni^{2+} の電荷が配位した NH_3 によって弱められ分配がすすむが、配位数が増すと立体的因子が働いて膜に入り難くなったためと考えられる。この場合には Glueckauf の理論式を用いて膜中の孔径を計算することができて約 1.1~1.2nm であった。この値は他の研究者の計算値とも近く透過の立体障害因子を考える場合の目安になると考えられる。このような膜透過機構に関する研究は学会に認知され膜分離の研究が広く行われるになったことに対しては国の研究所として一定の役割を果たしたと考えている。

我々の行っていた基礎研究に対して、逆浸透技術を実用化可能な技術とするためにいくつかの企業では多くの研究者を集中させるなどして大変な努力がなされていた。

2.4 企業による海水淡水化のための膜およびモジュールの開発

米国では逆浸透膜モジュールを用いた実用化の動きが早く 1960 年代半ばには Dow Chemical や DuPont など大手の企業でも研究開発が本格化していた。これらの研究開発を見ていた日本の企業（主に繊維関係の）も徐々に研究を始めたようである。まずは東レ（株）、続いて東洋紡（株）、日東電工（株）などである。海水の淡水化を目指す場合には相当性能のよい膜をつくる必要がある。海水中の塩分濃度は 3.5% (35,000ppm) 程度であり、飲料水の塩分濃度および水の回収率を考えると 99.8%以上の塩分除去率を持つ膜をつくる必要があった。各社の開発の詳細については、知ることができないが各社とも CA 膜の改良から研究を進めている。この中で東洋紡だけが CA 膜（二酢酸および三酢酸）のみで開発を進めているが、他の二社は芳香族ポリアミド複合膜を用いている。複合膜は先に述べた「ローブ型膜」の支持体（ポリスルホンなど）相当部分に芳香族ポリアミド薄層を合成するものである。特に DuPont 社の芳香族ポリアミド芳香族ポリアミドは多くの研究によって膜にしたときの特性が優れていることが証明されていた。特に DuPont 社は芳香族ポリアミドを商品化して「Permasep」の名で商品化した。その後 North Star Research にいた Cadotte と Rozelle は NS-100、NS-200 と呼ばれる架橋芳香族ポリアミド膜の優位性を示したが、界面縮重合の手法も含め後の膜開発の指針となった。こうして東レ、東洋紡、日東電工による海水淡水化用膜モジュールの開発が進められていくが、米国の各企業との競争、国内での熾烈な主導権争いの中での膜あるいは膜モジュールの開発

は大変なものであり、研究担当者の苦労は大変なものであったろうと想像できるし、そのような状況の中で米国各企業に追いつき、あるいは追い抜くような技術開発成果が得られたことは驚嘆に値する。

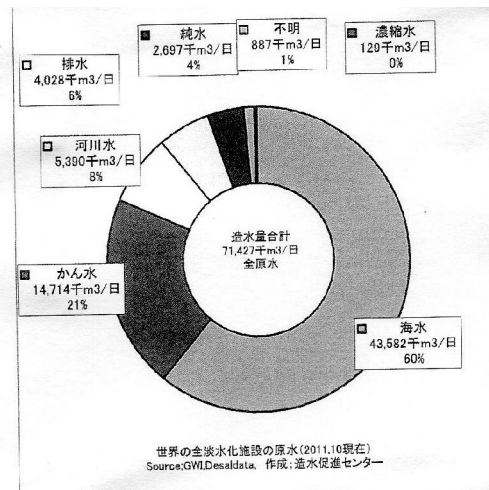
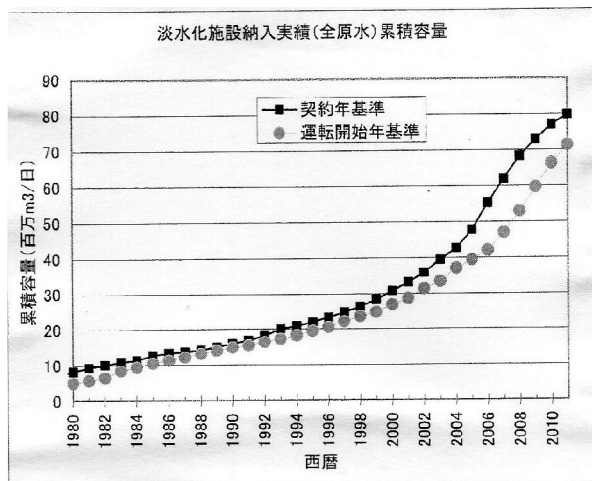
さて「蒸発法の開発」の項で詳しく述べられているが昭和 44 年（1969 年）に大型プロジェクト「海水淡水化と副産物利用」が始まり、3000m³/日多段フラッシュ法の実証試験が茅ヶ崎臨界研究施設で行われた。実証実験はさらに発展して昭和 49 年大分県鶴崎市に実験場を移転した。この間昭和 48 年、増大する水使用問題に対処するために財団法人造水促進センターが設立された。茅ヶ崎臨界施設の運用は造水促進センターに任せられるが、ここで昭和 49 年、省エネルギー型海水淡水化として逆浸透法の実験が開始された²²⁾。昭和 51 年には国産逆浸透モジュール（東レ(株)、日東電工(株)、(株)東洋紡）を用いて実験が開始された。続いて逆転ポンプエネルギー回収、800m³/日実験、ろ過膜前処理実験などが行われて国による支援もあって技術は徐々に進歩していった。

逆浸透法による海水淡水化技術は前処理法、耐塩素性膜の開発、ホウ素除去等いくつかの問題はあったが既に実用化レベルに達していたが、実需はそれほど多くはなかった。このような状況を画期的に改善したのは 1980 年代の半導体産業の活況であった。電気機器の多様化、小型化、通信機器の発展に伴って半導体ウエファ어의サイズは猛烈な速度で小型化、大容量に進展していった。ウエファ어를洗浄する水の清澄度に対する要求は急速に高まり、水中のわずかな溶解イオンも許さない「超純水」が求められたのであった。イオン交換樹脂と逆浸透を組み込んだ水処理システムによって超純水が得られた。

このような幸運もあったが、逆浸透法は徐々に蒸発法に代わる省エネルギー的海水淡水化技術と認められ淡水が不足している世界各地に広まっていった。

日本でも水不足の頻度の高かった沖縄県と福岡県にそれぞれ 4 万 m³/日（平成 9 年、北谷市）と 5 万 m³/日（福岡市）規模の装置が建設され稼働している。

下図に造水促進センターが集計した 2011 年までの淡水化施設納入実績（累計）と処理原水の割合を示したが、すでに 8 千万 m³/日以上の実績があり、そのうち海水を原水とするものが 60%をこえていることがわかる。このデータから既に数年が経過しているが、20 万 m³/日以上プラントも建設されており、この勢いが継続すれば、水処理市場は 2030 年に 100 兆円を超えると予想されている。



2011 年までの淡水化施設納入実績（累計）と処理原水の割合（造水促進センター調べ）

2.5 学協会設立、発展等への関与

2.5.1 膜学会

我々は日本で最初となる論文を 4 報発表して（この後の膜関係発表論文は数十報を数える）相当数の企業等が興味を示したので、石坂部長の声掛けで 1972 年に膜研究懇話会をつくったことは前述した。

なお、この膜研究懇話会は石坂部長の次長昇進に伴って、木村教授に預けられたが、1976 年の膜学会設立の基盤になったと聞いている。膜学会は理学、工学系の膜研究、生体系の膜研究などを含め現在も幅広い活動を続けている。工業技術院の研究所からは数名が「膜誌」編集委員会などで活動した。

2.5.2 日本規格協会

1980 年代になると水の精製については分離膜によるものが主体になってきたがこれに使用される精密ろ過膜（MF 膜）、限外ろ過膜（UF）および逆浸透膜についての性能評価法、性能表示、膜モジュールの形態など不統一があり標準化が望まれていた。このため 1986 年工業技術院は日本規格協会に対して「膜の標準化に関する体系調査」を委託したが、この調査結果を受け翌年工業技術院は「膜用語ほか 13 件の工業標準新規原案」作成の委託を同協会に対して行った。同協会は木村尚史東大教授を委員長に MF 膜、UF 膜および RO 膜の作業部会と膜用語についての作業部会を組織し、互いに連携をとりつつ原案作成の作業を進めた。膜モジュール等いわゆる装置部分の規格原案の作成は企業が担当したが、工技院の 3 人の委員は「膜用語」作業部会に加わり（筆者は作業部会長をつとめた）原案作成に携わった。

すでに「フィルタ」に関わる規格があることもあって、特に基本的な用語についての定義には各自意見があり、まとめるのに苦労した。例えば「膜（membrane）」の定義には 1

時間程度かかり、「二つの相の境界をなし、物質の移動速度に影響を及ぼす薄い物体」と定義することになった。この結果は 1988 年 3 月に工業規格案として工業技術院に提出した。続いて 1989 年 1 月に開催された化学分析部会において審議決議され、同年 5 月 1 日付で JIS K 3802 として制定された。

またこれに続いて、1990 年、バイオインダストリー協会に委託された「空気ろ過用フィルタの微生物補足性能試験法」の JIS 規格原案の作成委員会にも委員として参加した。

2.5.3 その他関連協会

1980 年代になると膜の利用は幅広い分野で用いられるようになった。この頃になると膜の利用分野を共有するメーカー、ユーザーが研究会、組合あるいは協会などを設立するようになった。筆者はこれらの設立に関与したことはないが、講演等を依頼されたことなどがあるので知っている範囲で簡単に述べておきたい。

「膜分離技術協会」は 1982 年に医薬品製造分野における膜分離技術・システムの振興と普及を図る目的で設立された。注射用水に蒸留水だけでなく逆浸透水も用いることができるように実験データを積み上げたなど協力体制があったと聞いている。その後都市化の拡大などによる水需要の高まりを受けて水道用浄水、下水処理、再生利用分野などへの膜分離技術・システムへの振興と普及を目指している。

「食品・分離技術研究会」は 1989 年に設立された「食品膜技術懇談会」を 2005 年に改称したものである。食品産業における膜・分離技術の研究開発および利用と普及を目指す食品会社。食品関連会社、膜・分離技術関連会社等の民間企業と国公立（独立行政法人）試験研究機関（農水省関連が多い）および大学教育研究機関をそれぞれ団体および個人会員として運営されている。本会は食品分野での膜・分離技術関連分野の研究開発、かんれんする行政の動向等の調査研究を通じて、食品産業と関連する学術の振興を図り、国民の健康増進・福祉の向上、食文化の発展に寄与することを目的としている。

「ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム」は日本膜学会と一般社団法人日本能率協会（事務局）が主催して毎年開催される膜関連技術の講演会である。このシンポジウムは 1984 年に第 1 回が開催され 2016 年の開催は 33 回目になる。シンポジウムは通常 4 日間にわたって 8 テーマについての講演が行われ毎年活況を呈している。講演テーマは 10 数人の委員からなる企画委員会できめられるが、企画委員は大学教員、国立研（現在は独立行政法人）研究者、膜関連企業担当者などからなる。テーマは上水処理、下水処理など比較的長い間問題になっているテーマもあるが、ガス（水素、CO₂などの）分離、メンブレンリアクター（膜反応器）、濃度差発電などその時点で話題になっているテーマが取り上げられることも多い。海水淡水化関連では膜による前処理、ホウ素除去など問題になっている技術が取り上げられることもあるが、技術の完成度が上がるに伴ってあまり見られなくなった。

以上筆者の関わったいくつかの膜関連団体、講演会などについて述べたがこの他いくつかの膜関連団体が存在すると思われる。なお地球産業技術開発機構（RITE）など大きな目的をもつ中で研究手段の一部として膜を用いている機関については紹介を割愛した。

2.6 膜に関連する政府プロジェクト

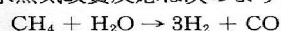
1970年代になって逆浸透法による海水淡水化を含め膜法の実用化の兆しがみえてくると、いくつかの省庁では膜分離技術が次の時代を担う基盤技術であると認識され、数多くの膜関連プロジェクトが生まれた。下表にはこれらのプロジェクトのいくつかを示した。通商産業省（現経済産業省）、農林省（現農林水産省）、厚生省（現厚生労働省）、建設省（現国土交通省）などでそれぞれの観点から分離膜の開発、利用のプロジェクトが推進されてきた。通産省のプロジェクトで我々の研究所で関与したいくつかの研究開発について述べる。

表 政府関連の膜関連プロジェクト

年	通産省関係	農水省関係	厚生省関係
1973	造水促進センター設立	食品産業センター技術研究	
74		馬鈴薯でんぷん回収	
75	省エネルギー海水淡水化	果汁濃縮	
76		マルトース製造	
77		牛乳処理	
78		醤油の脱塩	
79	八百トン/日(海水), 下水処理		
80	シーワン (C1) 化学		
81	次世代一高効率高分子分離膜	バイオマス変換計画	
82		膜技術研究組合発足	膜分離技術振興協会設立
83	酸素富化膜研究組合		
84			
85			
86	アクアルネッサンス '90		
87			
88	JIS 規格 (純水製造)	バイオセパレーション	
89		MRC ^{†1} 設立	局方改正 (注射用水)
90			
91	CO ₂ 化学的固定プロジェクト		膜利用型新浄水システム (MAC21 ^{†2})
92			
93	高温 CO ₂ 回収プロジェクト		
94	石油成分分離膜の開発		第2MAC21
95			
96			沖縄海水淡水化稼働
97	メンブレンリアクター		

†1 MRC: Membrane Research Circle ; †2 MAC21: Membrane Aqua Century 21

*2 炭化水素の水蒸気改質は炭化水素と水蒸気を Ni 系触媒のもとで 700~1150K で反応させ、水素や合成ガス（水素と一酸化炭素）を製造するための反応である。例えば、メタンの水蒸気改質反応は次のように示される。



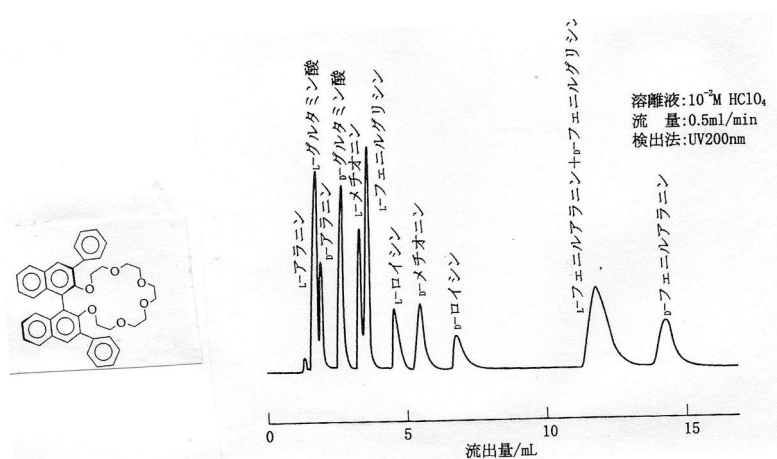
2.6.1 シーワン (C₁) 化学

シーワン (C₁) 化学プロジェクト (1980-1986) の目的はオイルショック後におきた石油依存度低減の考え方に呼応するもので、石炭、天然ガスなどの資源から水蒸気改質（ス

チームリフォーミング) などによって一酸化炭素と水素を得て、これを化学工業原料にしようとするものである。CO と H₂ を原料とする各種化合物の合成技術を確認することが大目的であったが、そのときに原料気体の組成を調整することが必要であり、これらの二成分を分離するための膜の開発が開始された²³⁾。当時の化学技術研究所が膜およびモジュールの評価・解析を担当し、膜の開発は宇部興産(株) (ポリイミド膜)、東洋紡績(株) (ポリスルホン膜、シリカ系多孔質膜)、住友電気工業(株) (テフロンベース膜) の各社によって行われた。膜は分離性能の他に耐熱性(100-150℃)を要求された。いずれの膜も目標値を超える性能を示したが、特にポリイミドをベースとする非多孔質膜は優れた性能と耐熱性を示し同社のガス分離膜の市場における基盤を築いた。

2.6.2 次世代産業基盤技術—高効率高分子分離膜の研究開発

本プロジェクト(1981-1990)では化学産業では重要な物質でありながら分離が難しいとされる物質についての研究が行われた。化学技術研究所では光学異性体アミノ酸分離膜の研究を行った²⁴⁾。アミノ酸の光学分割には優れた不斉識別能をもつキラルなクラウンエーテルを分離のためのキャリア(運搬体)として用いた。ポリプロピレン多孔質(保持)膜にキラルクラウンエーテルを溶解した溶媒(α -ニトロフェニルエーテルなど)をしみ込ませた膜(含浸液膜)をつくる。このような膜を用いて例えば、ラセミ体のフェニルグリシンを透過させると D 体のフェニルグリシンがキャリアによって選択的に透過し最大で 22.7 の分離係数(光学分割比)を得ることができた。一般に、液膜は透過速度がやや遅いこと、安定性に欠けること、大容量化が難しいことなどから工業化には結びつかなかったが、このキラルクラウンエーテルはアミノ酸分離用のカラム充填剤として用いられるようになった。このクラウンエーテルを疎水性カラムの表面に均一にコーティングして希酸水溶液を溶離液とすることにより、ほとんどのアミノ酸を完全に光学分割することができる。6 種類のアミノ酸の分割例を図に示す。キラルクラウンエーテルを用いたカラムが市販されている。

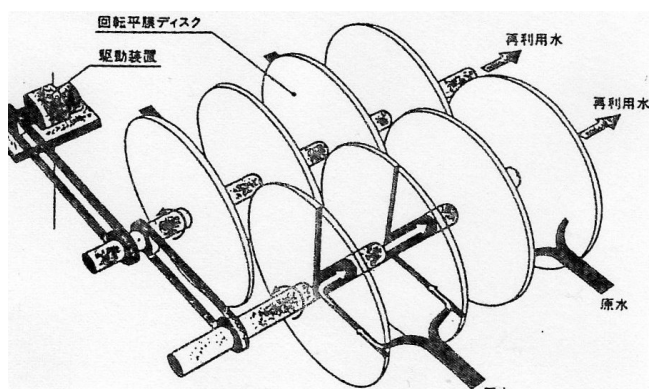


キラルクラウンエーテル (R) -3 カラムを用いた 6 種類アミノ酸の分析例

2.6.3 アクアルネッサンス ‘90 計画

アクアルネッサンス ‘90 計画（水総合再生利用システム、1986-1990）は現在広大な敷地で行われている活性汚泥法による下水等の水処理を分離膜と嫌気性発酵を組み合わせによりコンパクトに、かつ省エネルギー的に行おうとするものである。従来の好気性微生物による発酵では空気を供給するためのポンプ動力が必要であるが、嫌気性の発酵では空気を送る必要がないうえに、メタンガスを得ることができる。膜は嫌気性微生物を濃縮すると同時に浄化された透過水を得るために用いる。分離対象となった廃水は下水、油脂・タンパク系廃水、でんぷん系廃水、アルコール系廃水、紙・パルプ系廃水、し尿である。工業技術院の 4 研究所と 20 社が参加したプロジェクトであった。分離膜としては有機膜 3 種類と無機膜 3 種類が種々のモジュール形態で用いられた。特徴的なものを紹介すると有機膜では中空糸膜の使用があげられる。三菱レーヨン(株)の中空糸膜はポリエチレン製で外径 400 μ m、内径 300 μ m で孔径 0.1-0.2 μ m であった。従来、中空糸膜は膜充填密度は大きい、懸濁物濃度の高い廃水や髪の毛等を含む廃水の処理は難しいとされていた。しかし糸の並べ方、原水の流し方を工夫することによってこの問題を解決し中空糸膜の用途を大幅に拡大した。

膜面の濃度分極を取り除くために従来は処理する溶液の膜面流速を大きくとるようにしていたが、回転膜モジュール（図）では膜の方を回すという発想をした。この方法では回転速度が小さくても効率的に膜面の汚れを落とすことができた。化学技術研究所の研究者の発想を日立プラント(株)と共同でモジュール化した。簡単な概念図を下図に示す。



化学技術研究所と日立プラント（株）で共同開発した回転膜モジュール概念図

一方、無機膜を用いた平膜モジュール、管型モジュール、浸漬型モジュールの開発が行われた。膜の使い方の工夫とセラミック膜の低価格化が図られその後の膜利用型新浄水システム（MAC21、厚生省プロジェクト）などで有機膜と競合できるまでになった。

2.7 今後の分離膜研究開発—物質研での研究開発の展開を例にして

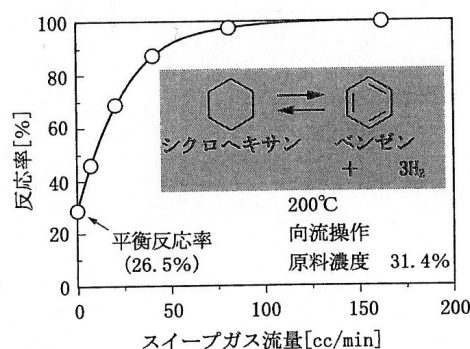
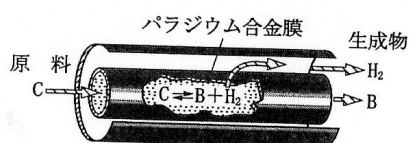
水処理膜についての技術開発は成熟期に差し掛かってきており、社会的に影響の大きい

大規模な応用技術を安価にできるような「システム」の開発に向かっている。

我々の研究所内では、産業の基盤をより幅広く支えるべく気体成分や有機物の分離の研究も含めるべきだとの気運が高まり新しい研究グループが活動を始めた。また触媒などを組み入れた新しい膜システムの研究も始まった。ここでは逆浸透膜、限外ろ過の研究を基盤にして発展した研究所内の新しい膜および膜分離システムの研究開発について述べる。

2.7.1 メンブレンリアクター (MR、膜反応器)

膜を反応と組み合わせて反応系から生成物を除去・分離すればルシャトリエ・ブラウン (Le Chatelier-Braun) の平衡法則 (1884 年) から明らかなように、平衡反応率をこえて反応を促進できるばかりでなく分離精製もすることができる。MR の考え方はバイオテクノロジーの分野でも展開されているがここでは化学工業分野での研究例を示す。図に MR の概念図を示した。この分野の報告は脱水素あるいは水素化反応に関するものが多かった。



メンブレンリアクター (膜反応器) 概念図

シクロヘキサン→ベンゼン反応率の向上

これはパラジウムという水素を特異的に溶解し、透過させる金属があるためである。物質研でもこの分野に注力してきた²⁵⁾。水素が関係する反応例としてはシクロヘキサンからベンゼンをつくる反応 ($C_6H_{12} \rightarrow C_6H_6 + 3H_2$) メタンの水蒸気改質 (スチームリフォーミング)、エチレンベンゼンからからのスチレンの製造 ($C_6H_5 \cdot C_2H_5 \rightarrow C_6H_5=CH_2 + H_2$) などの例がある。図に示すようなシクロヘキサンの脱水素の例では平衡反応率 26.5%が MR を用いることにより反応率 100%を達成した。

MR の効率的操作のためにはガスの流し方、熱移動と物質移動の同時制御などの工学的視点も重要である。反応は高温かつ水素存在下でおこるのでパラジウム膜の水素脆化も大きな問題である。通常は銀との合金を用いた。膜厚についても 50 μm よりも薄くすると耐久性に欠けることから薄膜の固定化についても検討した。これらの研究は現在宇都宮大学工学部で継続、発展している。

2.7.2 無機膜の開発

有機膜に代わる新しい無機膜の開発も行われた。初期の無機膜の多くはアルミナ多孔体を加工したもので、膜の用途は主に精密ろ過膜であった。1980年代になるとゼオライトなどを利用した、いわゆる分子ふるい膜をつくらうという動きが活発化してきた。ゼオライトは図に示すように分子サイズの孔をもつ結晶性のアルミノケイ酸塩（他の元素からなるものもある）である。物質研ではゼオライト合成を最も一般的な方法である水熱合成法で行った。また高分子を前駆体として炭素膜をつくり気体透過試験を行った。さらに酸素透過性の無機膜を開発するためにペロブスカイト型酸化物膜の研究も行った。

2.7.2.1 疎水性シリカライト膜²⁶⁾

アルミナ分を含む親水性ゼオライトの研究が多くみられるが、物質研ではシリカ分のみからなる疎水性ゼオライトの研究を中心に行った。例えば、 $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ のモル比 90 の製膜液を用いて水熱合成によりステンレス版上に作成したシリカライト膜は、 30°C の 5vol% のエタノール水溶液に対して分離係数 120（透過流束 $0.2\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ）という優れた選択透過性を示した。電子顕微鏡観察によるとこの膜はシリカライトの多結晶体であることがわかった。膜厚は $300\mu\text{m}$ であり、基盤側は $3\sim 5\mu\text{m}$ 程度の小さな結晶からなっていて、結晶と結晶の間に間隙が存在していた。溶液側に向かって結晶が成長し、溶液側表面のシリカライト結晶の大きさは $30\mu\text{m}$ 程度であった。小さな結晶と大きな結晶の間に緻密な層が観察されるがこの層の形成過程は当時明らかになっていなかった。まだ粒界を透過する成分の割合が多いので、さらに精密な構造制御を行い、透過のメカニズムを厳密に議論できるだけのデータを揃える必要があった。水熱合成法の他に、気相輸送法、レーザーアブレーション法など新しい方法についても検討した。

2.7.2.2 炭素膜

多くの有機溶剤あるいは気体に耐性が大きいと考えられる炭素膜について検討した²⁷⁾。

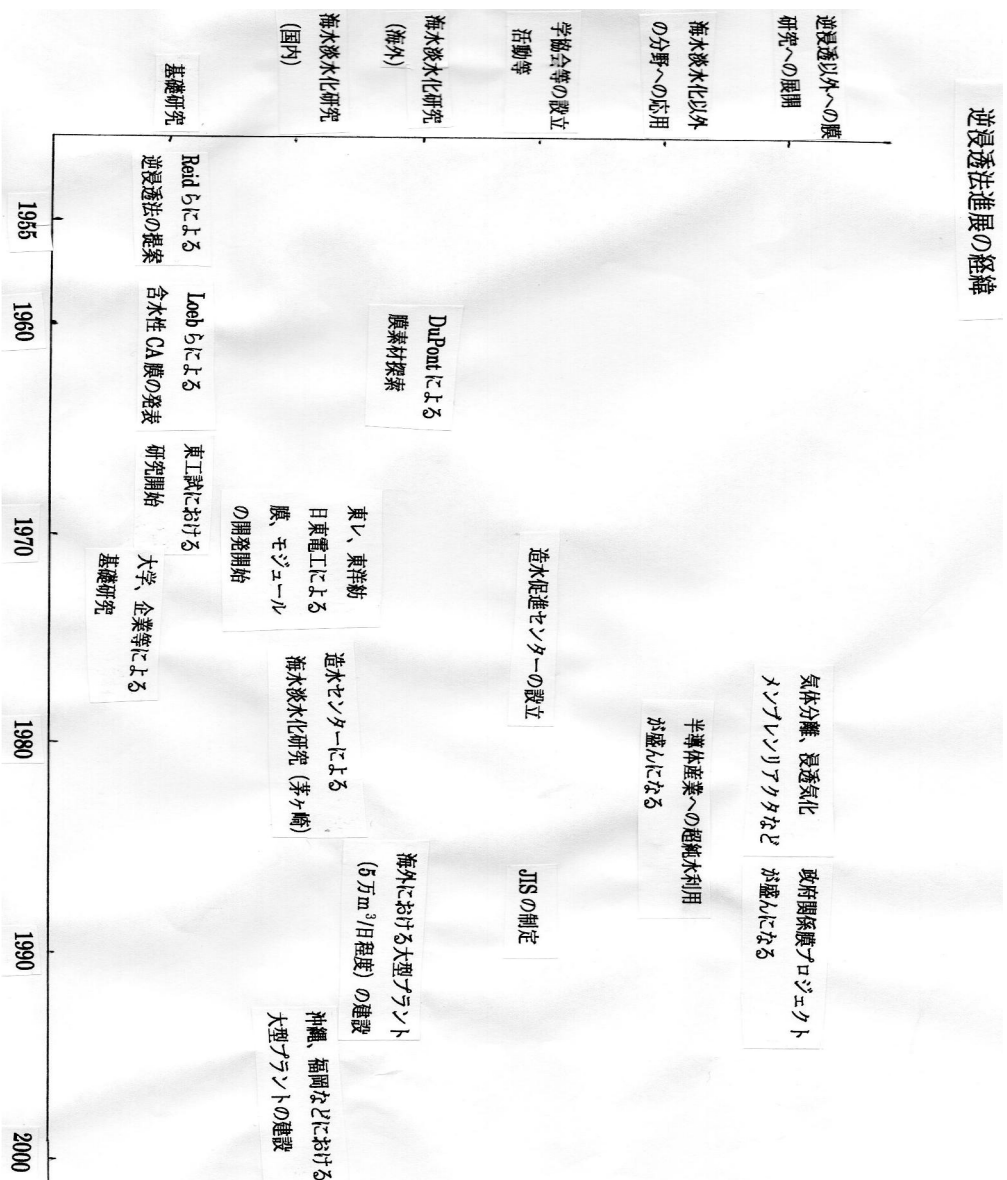
高分子を前駆体として用いいわば蒸し焼きをして作成する炭素膜について研究を行った。通常、高分子は成形性に優れているため炭素膜を作る際にあらかじめ膜表面の緻密な活性層と多孔質支持層をつくることのできる、また充填密度の大きい中空糸膜を作成できることなどが大きな利点である。前駆体の高分子は高温中でも熔融等により構造がこわれてはならないのでその選択は限られている。まず市販の芳香族ポリイミド（Du Pont 社の商品名 Kapton 化学構造を下に示す）を高純度アルゴン中で蒸し焼きにする方法で研究を開始した。温度 950°C で 2 時間処理するが、昇温速度が小さいほど結晶質炭素の割合が大きくなり、透過速度は小さくなるが、分離係数は大きくなった。 $80^\circ\text{C}/\text{h}$ で昇温して作成した膜の選択性は N_2 を基準にすると H_2 ; 4700、 He ; 2800、 CO_2 ; 122、 O_2 ; 36 であり高分子膜よりも 3~5 倍程度大きかった。

中空糸膜をつくる場合には平膜をつくる時に用いたカプトンを活用することが難しい。カプトンがほとんどの溶剤に不溶であるためである。そこでポリイミド膜前駆体のポリアミック酸の段階で相転換法により製膜をおこなう。テフロン支持体上に作成したポリアミック酸をイミド化した後炭化处理をした。得られた中空糸膜は、例えば外径 1.5mm、膜厚 100~150 μ m であった。このような方法で分離性を保ちながら透過速度を大きくすることによって耐熱性にも優れた炭素膜の開発研究が続けられた。

この他、酸素透過性の無機膜を開発するためにペロブスカイト型酸化物膜の研究もおこなわれた。詳細は割愛するが、この型の酸化物が非化学量論的な構造をとりやすく、結晶格子中に欠陥構造が容易に形成されるので、これを酸素イオンの透過に活用しようとするものである。

このように逆浸透法の研究開発をきっかけにして分離膜の研究は幅広く裾野を広げている。水処理の関する膜市場は 2000 年以降もさらに拡大しているが、その他の膜分離技術（気体、有機化合物の分離、あるいはメンブレンリアクター（除く下廃水处理））については大きな技術的展開はみられるものの大きな市場拡大はみられていない。これは膜分離が基本的に単段の分離プロセスであること、分離対象物が比較的安価であるにも関わらず、膜性能の良い膜、装置等にコストがかかることなどの理由があると思われるが、逆浸透法の開発にみられたような技術のブレークスルーを目指してほしいと思っている。

最後に逆浸透法発展の経緯を簡単な図にして示す。



【参考文献】

- 1) 神澤千代志、増田等、石坂誠一、日本海水学会誌、vol .5,194(1967)
- 2) 神澤千代志、石坂誠一、工業化学雑誌、vol .72,1227(1969)
- 3) C,Kamizawa,H.Masuda and S.Ishizaka, Bull.Chem.Soc.Japan, vol.45,2964(1972)
- 4) C.Kamizawa and S,Ishizaka, Bull.Chem.Soc.Japan, vol.45,2997(1972)
- 5) Abbe Nollet, Lecons de Physique Experimentable, Hippollyte-Louis Guerin and Louis-Francois Delatour, Paris(1748)
- 6) A.Fick, Über Diffusion, Prog. Ann. **94**, 59(1855)
- 7) T.Graham, Phil. Trans. Roy. Soc., **151**, 1836(1861)
- 8) F.G.Donnan, Z. Electrochem.,**17**, 572(1911)
- 9) F.G.Donnan, Z. Physik. Chem., **A168**, 369(1934)
- 10) T.Teorell , Proc. Soc. Exptl. Bio., **33**, 282(1935)
- 11) K.H.Meyer and J.F.Sievers, Helv. Chim .Acta. **19**, 649(1936)
- 12) K.Kolff and H.T.Berk, Acta Med Scand., **117**, 121(1944)
- 13) W.Pfeffer, Osmotische Untersuchungen, Leipzig(1877)
- 14) J.H.van't Hoff, Z. Phys.Chem., **1**, 481(1887)
- 15) First International Symposium on Desalination, Washington D.C.,1965
- 16) S.Sourirajan,Ind.Eng.Chem.Fund., **2**, 51(1963)
- 17) W.Banks, A.Sharples,J.Appl.Chem., **16**, 153(1966)
- 18) K.S.Spiegler, O.Kedem, Desalination, **18**, 311(1966)
- 19) F.Glueckauf, Desalination, **18**, 155(1976)
- 20) J.E.Cadotte and L.T.Rozelle OSW R&D Report No.927(1972)、No.982(1974)
- 21) C.Kamizawa, J. Appl.Polym.Sci.,**22**, 2867(1978)
- 22) 国定勇一、日本海水学会誌、vol.35, 82 (1981)
- 23) 伊藤直次、進藤勇二、原谷賢治、小畑健三郎、白田利勝、化学工学論文集、**9**, 572(1983)
- 24) 新保外志夫、山口智彦 他 、繊維学会誌、**52**, 105(1996)
- 25) 伊藤直次、許 維春、原谷賢治、化学工学会第 58 年会予稿集 M104(1993)
- 26) T.Sano, Y.Kawakami, Y.Kiyozumi and H.Yanagishita, J.Mater.Chem.,**2**, 141(1992)
- 27) 須田洋幸、原谷賢治、膜、30(1) 7(2005)

【著者略歴】

神澤千代志 1942 年生 工学博士 (専門分野) 膜分離工学、環境化学
1966 年 4 月 東京工業試験所入所 逆浸透法等膜分離技術の研究開発
2001 年 3 月 産業技術総合研究所定年退職