特集 1・生物膜法による排水処理の現状と動向 ―第 2 回生物膜法研究シンポジウムより―

造水促進対策の現状と今後の展望

岡 倉 伸 治*

1. 概 要

ダム建設等による従来型の水資源開発が適地の減少、補償交渉の難航等により困難化してきていることから、通産省では新たな水資源開発手法として造水関係の技術開発及びその成果普及を推進してきている。

通産省の実施している造水対策は、技術的にはアクアルネッサンス'90計画を中心とする下・廃水の再生利用と海水淡水化とに大別される。

2. アクアルネッサンス'90計画

近年の急速な技術革新を背景として、水処理技術の分野においても新しい技術シーズが育ってきている。通産省において昭和60年度から6カ年計画で実施しているアクアルネッサンス'90計画はこうした流れの中で生まれた技術開発計画であり、バイオテクノロジー、膜分離技術などを応用して従来とは発想を異にした水総合再生利用システムを開発し、1990年代に実用化を図ろうというものである。

2.1 研究開発体制

アクアルネッサンス'90計画の研究開発は工業技術院の大型工業技術研究開発制度（大型プロジェクト制度）により実施している。

同制度のもとで、微生物、膜素材などに関する研究

開発を工業技術院の試験研究所（微生物工業技術研究所、公害資源研究所、化学技術研究所、大阪工業技術研究所）が担当し、また、膜モジュール、バイオリアクター、計測制御システムなどに関する研究開発を民間企業等で構成されるアクアルネッサンス技術研究組合が担当することにより、産学官の技術力の結集を図っている。

2.2 研究開発課題

アクアルネッサンス'90計画においては、下水、産業廃水などを低廉なコストで再生処理するとともに、メタンガスを製造することを可能とする技術を確立するため、以下のような技術について研究開発を行っている。

(1) 微生物の研究開発

有用微生物群の探索、育種及び高活性化の研究開発を行う。

微生物の探索、育種としてはメタン製造に有効なメタン発酵菌、水処理に有効な難分解菌などのスクリーニング及び分類を行うとともに、これら微生物による各種微生物分解プロセスの詳細な解明を行う。また、微生物単体としての能力の解明を行うと同時に、実際のバイオリアクター内では、各種微生物が混在する状態で反応が進むことから、あらゆる組み合わせの微生物群の能力の解明及び外部から流入して来る雑菌に対

図-1 アクアルネッサンス'90計画の研究開発体制

* 通商産業省立地公害局工業用水課 Shinji OKAKURA

する挙動の研究を行う。また、微生物の高活性化のためには流入下・廃水中に含まれる各種化学物質及びバイオリアクター、担体などに使用される材料の微生物に与える影響を研究し、反応阻害物質及び活性促進物質を解明するとともに、微生物の混合培養系における生育条件について、微生物群の活性を最も高め、反応を明らかにするための研究を行う。

(2) 膜素材の研究開発

処理対象排水の種類や処理水の用途などに応じて、最適な分子量分画性能を有し、耐微生物性、耐薬品性などにすぐれた膜の開発を行う。現在、海水淡水化や純水製造などに利用されている膜は合成高分子の有機膜であるが、本プロセスのように汚濁物質負荷が高い上に耐微生物性などを要求される場所では、セラミックスなどの無機系素材に対する期待も大きい。

具体的には、有機膜素材及び無機膜素材について、汚濁物質による目づまりを防ぐため、各種有機物、微生物などの膜素材に与える影響及び付着状態を解明するとともに、これらに対処する方策について検討する。また、各種の下・廃水について要求される処理水水质を得るために、シャープな分画分子量を実現することのできる製膜技術を開発する。有機膜については、表面改質による膜表面の荷電制御などにより、既存の多種類の膜の中から有効なものを選択することも考えられる。無機膜については、ガラス、セラミック複合膜の開発など、近年発達の著しいセラミック技術の応用について広く検討する。

膜素材に関しては、このほか透水能力が高いことが要求されるが、さらに選択透過性を有するものであれば資源・エネルギー回収への利益の面で大いに有用な特性となる。

(3) 膜モジュールの研究開発

未分解有機物及び微生物の高濃度保持に適しているコンパクトな省エネルギー型膜モジュールを開発する。

非常にコンパクトであり、かつ効率的な有機物の分解及びエネルギーの回収を可能とする装置として微生物固定化膜が期待されているが、これを実現するためには各種の膜に固定化することが可能な微生物の研究、また微生物の活性を落さずに、なおかつ高機能な膜に固定、維持する技術などを開発することが必要となる。

また、汚濁物質などによる膜モジュール目づまりは透過水量の大幅な低下を引き起こすことから、有機物、嫌気性処理による無機生成物などの膜モジュールへの付着状態を解明し、これらの洗浄技術を開発する。

(4) バイオリアクター及び水処理用リアクターの研究開発

リアクター内にメタン発酵菌などの微生物を高濃度に保持し、下・廃水中の有機物を効率よく分解・除去し、メタンを製造することのできるバイオリアクターの研究開発は、アクアルネッサンス'90計画の中心的課題である。

その中で、高濃度に菌体を保持する手段として担体に微生物を固定化する方法が有力であるが、こうした担体素材に要求される性質として、微生物の付着性とともにもその活性を阻害しないものであることがもっとも重要となる。

バイオリアクターとしての効率を上げるためには、これらの有用微生物を複数種、適切な共存共栄条件の下に同時培養することが必要であり、かつこのような微生物群と処理すべき廃水が十分な接触効率を維持できるようにリアクター構造を最適化するための研究を行う。

さらに、下・廃水中の有機物をメタンなどに分解し、これを効率よく回収することのできるバイオリアクターの形状、膜との組み合わせなどについても研究を行う。

バイオリアクター本体においては、下・廃水中の有機物をメタンなどに分解し、これを除去することとなるが、得られる処理水は、窒素、リンなどを含む場合があり、また、処理水の用途によっては非常に高度な水質を必要とする場合も多いことから、下・廃水の高度な再生を可能とする水処理用リアクターの研究開発を行う。特に、窒素は産業廃水中に多量に含まれる場合が多く、また、湖沼などの富栄養化の原因となるなど環境に与える影響も大きいので、これらの効率的な除去技術を開発する。また、残留する有機物を除去し高度な水質を有する再生水を得るため、排出される汚泥を油化し、重油等と同様な燃料として利用可能とする技術を開発する。

(5) 計測制御システムの研究開発

メタン発酵などを計測制御し、システム全体の効率的な運転を可能とするためには、センサーの高度化の研究開発を行うとともに、これら以外にシステムの制御に有効な因子を解明し、その計測技術を開発する。

システムの運転の最適化を図り、その自動運転を可能とするためには、制御システムの開発が特に重要な課題となる。流量変動、発酵反応などの制御のためには、数値モデルを作成し、モデルに基づく制御を行う

ことが必要であり、スカムの発生、汚泥の色などの状態については経験に基づく推論による制御を行うことが必要である。これらの制御方法については、情報処理技術を応用して、調和を取りつつ統合する。

(6) 総合調査研究

上記の技術を組み合わせて、下水、産業廃水などを効率的に処理して高度な水質の再生水を得るとともにメタンを製造することを可能とするシステム技術の研究開発を行う。

水総合再生利用システムは多くの要素技術を高度にシステム化したものであり、また、このようなシステムは、実際の下・廃水を対象として長期間の運転実験を行い、十分なデータを得ることが不可欠であることから、パイロットプラントを製作し、各種の下・廃水を対象として運転実験を行う。

また、システムの早急な普及を図るために、下・廃水の種類、要求される処理水質、得られるメタンの用途などに応じて各種の水総合再生利用システムの概念設計を行い、そのフィージビリティスタディを行う。

アクアルネッサンス'90計画を推進していく上で、以上のほかにも多くの技術的な研究開発課題があり、これらを解決し、すぐれた水処理システムを開発していくためには、多分野にわたる幅広い叡知と技術力を結集して加速的に研究開発を進めていくことが必要とされる。

2.3 今後のスケジュール

本プロジェクトは、国民生活環境の向上に資する公共性の高い社会システムの開発であり、今後、早期に研究開発成果の普及を図ることが重要となってくる。このため、基礎実験終了後できるだけ早くパイロットプラント（実用プラントの1/10～1/30程度の規模）の運転実験を開始し、当該技術の有効性を確立する必要がある。

しかし、実験室レベルの小規模な基礎的研究段階から、一挙に数百倍の規模のパイロットプラントの設計・製作段階に移行することは、リスクが大きすぎるため、代表的な排水を対象とした小型実液試験装置（実用プラントの1/100～1/500程度の規模）の運転実験

開発項目 \ 年 度	60	61	62	63	64	65
微生物の研究開発	探索・育種・高活性化	種・化技術の確立		中	探索・育種・高活性化技術	高活性の開発
膜素材の研究開発		高機能膜の開発			高機能膜技術	開発の確立
水処理用リアクターの研究開発		要素研究	基礎実験			
メタン発酵用膜モジュールの研究開発		要素研究	基礎実験			
新型メタン発酵用バイオリアクターの研究開発		要素研究	基礎実験			
メタン発酵用計測制御システムの研究開発		要素研究	基礎実験			
メタン発酵に関する総合調査研究	全体計画	策定技術動向状況等調査			パイロットプラント運転実験及び評価	
(1) トータルシステムの研究						
(2) 支援調査研究		調査研究			調査研究	

図-2 研究開発スケジュール

表1 アクアルネッサンス'90計画に係る小型実液試験装置の設置場所等について

排水の種類	担 当 企 業	設 置 予 定 場 所
高 濃 度 高 S S	神戸製鋼所, 日本ガイシ, 三菱レーヨン・エンジニアリング, 三菱電機	兵庫県山崎町 長田産業
	造水促進センター, 西原環境衛生研究所, 日東電工	愛知県知多郡 東部知多衛生センター
高 濃 度 低 S S	三機工業, 栗田工業	鹿児島県鹿屋市 NEDOアルコール工場
	栗田工業, 清水建設, 東陶機器, 東芝	愛媛県伊予三島市 大王製紙
低 濃 度	千代田化工, 久保田鉄工, 日東電工	横浜市磯子区 日清製油
	荏原製作所, 川崎重工, 日東電工, 東陶機器, 東芝	神奈川藤沢市 荏原製作所
	造水促進センター, ディック・デグレモン, 石川島播磨重工, 三菱レーヨン・エンジニアリング, 日立プラント, 三菱電機	神奈川県茅ヶ崎市 海水淡水化臨海研究施設

注：下線は取りまとめ担当企業

を行うことにより、パイロットプラントへのスケールアップに伴うリスクを最小限にとどめることとしている。

こういった観点から、昭和63年度においては、小型実液試験装置の運転実験を実施し、この結果に基づき中間評価を行う予定である。

3. 海水淡水化

3.1 海水淡水化の諸方式と特性

海水には、約3.5%(35,000ppm)の塩分が溶解しており、海水淡水化とは、海水から溶存している塩分を除去することにより、淡水を得る方法である。この塩分を除去する方法には、逆浸透法、電気透析法、透過気化法のように特殊な膜の性質を利用する方法や、蒸発法、LNG冷熱利用法のように水の相変化（水から水蒸気又は水への変化）を利用する方法がある。

我が国における海水淡水化技術の開発は、通産省工業技術院の大型プロジェクト制度により、昭和44年度から52年度にかけて実施された蒸発法の技術開発にはじまる。この蒸発法技術開発の成果は、世界における蒸発法プラントの約47%を我が国企業が受注するという実績につながっている。

また、通産省では、省エネルギー型でメンテナンスも容易な海水淡水化技術として昭和49年度から逆浸透法の技術開発を、昭和55年度からは、LNG冷熱利用法の技術開発を、さらに昭和60年度からは、透過気化法の技術開発を、(財)造水促進センターへの委託事業として実施してきている。

逆浸透法については、昭和54年度に800 m³/日規模の実証プラントを神奈川県茅ヶ崎市の通産省海水淡水化

茅ヶ崎臨海研究施設内に建設内に建設の後、ホローファイバー(中空糸)型、スパイラル型の二方式の膜モジュールを用いた実証運転実験を継続中であり、LNG冷熱利用法については、昭和59年度に10 m³/日の造水能力を持つプラントによる連続運転実験を行い、LNG冷熱利用法海水淡水化の実用化への目途をつけ終了した。また、透過気化法については、昭和60年に基礎実験装置を製作し、透過気化膜の特性、造水条件の把握等の基礎的技術開発を行っている。

このように、海水淡水化技術については種々の方式が技術開発され、あるいは実用化されているが、これは、造水コストのより一層の低減化を図るためであると同時に、海水淡水化を実用化する場合の立地条件、経済条件等に適した方式の確立を図ることを目指しているものである。例えば、エネルギーが比較的安価でかつ大量の水を必要としている中近東諸国では大容量の蒸発法プラントが建設されており、一方、わが国では、逆浸透法のような省エネルギー型技術が中心となっている。なお、近年は、産油国においても逆浸透法、太陽熱利用法に重点を置くようになってきており、省エネルギー化が海水淡水化技術開発の重要なポイントとなっている。

3.2 海水淡水化利用の現状

全世界の海水淡水化プラントの利用状況をみると、その設備容量は年々増加し、1984年12月末日現在で992 m³/日に達している。

方式別では、蒸発法が747 m³/日と全体の75.3%を占めており、次いで逆浸透法が198 m³/日で20.0%を占めている。このうち日本のメーカーが設置した分は蒸発

表2 各種海水淡水化方式の原理と特徴

方 式	原 理	特 徴
蒸 発 法	海水を加熱して蒸発させ、発生した水蒸気を冷却して淡水を得る方法。	スケールメリットが効く方式であり、エネルギー多消費型であることから産油国向きの技術である。
逆 浸 透 法	水は通すが塩分は通さない半透膜で容器を仕切り、その片側に海水を入れ海水に圧力を加えることによって淡水だけを透過させる方法。	電力消費量は少なく、省エネルギー型技術である。 塩分濃度が低いかん水の淡水化を行う場合には、造水コストの低減が可能となる。
電 気 透 析 法	陽イオン交換膜と陰イオン交換膜の間に海水を通し、両膜の外側から直流電圧をかけることにより膜を通して海水の塩素イオンとナトリウムイオンを除去して淡水を得る方法。	塩分濃度が低いかん水の淡水化を行う場合には、造水コストの低減が可能となる。 温度の高い海水を淡水化する場合にも、淡水化の効率が上昇して造水コストの低減が可能となるため、排熱との組み合わせが検討されている。
LNG 冷熱利用法	LNG (液化天然ガス：沸点-162℃) を用いて海水を凍結させ、氷を解かして淡水を得る方法。	現在ほとんど利用されていない LNG の冷熱を有効利用することにより、少ないエネルギーで淡水を得ることが可能となる。 適用地域が LNG 基地周辺に限られる。
透 過 気 化 法	水蒸気は透すが水は通さない透過気化膜で容器を仕切り、その片側に海水を入れ水蒸気のみを透過させて淡水を得る方法。	省エネルギー化が十分進んでおり、排熱の有効利用が可能であることから、太陽熱等利用しうる排熱が十分に存在する地域に最適な技術である。

法で47.2%、逆浸透法で7.2%、全体では37.4%を占めている。

また、地域別に海水淡水化プラントの設置状況をみると、中東地域が620万 $\text{m}^3/\text{日}$ と全体の62.5%を占めており、アメリカ合衆国、アフリカ、ヨーロッパがそれに続いている。特にシェアの高い中東地域においては、これらのプラントで生産された淡水が、生活用水、工業用水、更には緑化のためのかんがい用水として幅広く用いられている。

海外において日本のメーカーが設置した主たる海水淡水化装置は、昭和54年以降蒸発法が126基、逆浸透法が4基となっている。

我が国においては、海水淡水化プラントはこれまで主として離島の水源及び工業用水の一部として使用されてきた。離島の水源としては蒸発法、電気透析法を中心として使用されてきたが、最近では逆浸透法プラントの設置が増加している。

工業用水としては、発電所のボイラー用水用として蒸発法プラントが、また、かん水脱塩用として逆浸透法、電気透析法プラントが使用されている。

図-3 地域別海水淡水化プラント設置状況

総能力 9,920,119 $\text{m}^3/\text{日}$ 。単位は 1,000 $\text{m}^3/\text{日}$ 。1984年12月末現在 Desalting Plants Inventory Report No.8 より

図-4 海水淡水化プラントの設置状況

4. 今後の展望

通産省では、造水促進対策として、上記の他にも各種の技術開発を推進してきているところであるが、今後とも造水コストの低減、信頼性の向上等を図ること

により、技術開発成果の普及を図り、渇水に強く潤いある社会の形成に役立っているとともに、国際社会における技術先進国としての責務を果たすべく海外への技術協力を積極的に推進していきたいと考えている。

海外環境情報

Sonoxco 社、排ガス成分監視センサーを開発中

Sensors monitor fluegas components
H 2101356

Sonoxco 社(米)は米エネルギー省(DOE)との契約研究で、接触反応方式の硫酸化合物、窒素酸化合物センサーを開発中である。これは現場用のもので、現行の光学方式より安価で、メンテナンスも容易である。

同社は、特殊な触媒を用いて排ガス中のCOを燃焼させ、その結果の温度上昇により元のCO濃度を知る測定器を市販している。今度の装置の原理もそれと同様であるというが、燃焼反応が利用されているかなど、詳しいことは特許の関係で明らかにされていない。

同社は、DOEとの以前の契約研究でこの方式が有

効であることを示しており、この第2次契約では実験室用装置の開発と寿命の評価を行うとのことである。

1987年8月に同社は、COセンサーを改良したIES型を、燃焼工程の空気流量制御、爆発の危険性のある所でのガス分析などの用途に出荷開始した。

一体型セラミックのこの装置は、CO濃度がフルスケールで250 ppmのような低いところから、5%の高さまで、リニアな出力を与えるという。S/N比は他の製品の2倍である。さらに、IESセンサーは1個でも500ドル、数量がまとまれば競合品のほぼ半額の100ドル余りで入手できる。

PARKINSON G
B251A Chem Eng (New York) 94 [13]19

(Sep. 28, '87)

(日本科学技術情報センター 許可第文-6225号)