

物質創製工学研究連絡委員会

有機材料専門委員会報告

水の有効利用のための
先進材料研究に関する提言

平成17年2月24日

日本学会議

物質創製工学研究連絡委員会

有機材料専門委員会

この報告は、第19期日本学術会議物質創製工学研究連絡委員会有機材料専門委員会が水の有効利用のための先進材料研究小委員会の調査結果に基づき審議した結果をとりまとめ、発表するものである。

[物質創製工学研究連絡委員会有機材料専門委員会]

委員長	岡野 光夫	(東京女子医科大学先端生命医科学研究所教授)
幹事	谷岡 明彦	(東京工業大学・大学院理工学研究科教授)
幹事	染宮 昭義	(化学技術戦略推進機構部長研究員)
委員	増田 優	(お茶の水女子大学教授)
委員	西出 宏之	(早稲田大学理工学部教授)
委員	小池 康博	(慶応大学理工学部教授)

[水の有効利用のための先進材料研究小委員会]

委員長	谷岡 明彦	(東京工業大学・大学院理工学研究科教授)
委員	安部 明廣	(第5部会員, 東京工芸大学工学部教授)
委員	井上 義夫	(東京工業大学大学院生命理工学研究科教授)
委員	岩本 正和	(東京工業大学大学院総合理工学研究科教授)
委員	国武 豊喜	(第5部会員, 北九州市立大学教授・副学長)
委員	小島 弦	(産業技術総合研究所副センター長)
委員	小松 優	(金沢工業大学教授)
委員	染宮 昭義	(化学技術戦略推進機構部長研究員)
委員	高原 淳	(九州大学先導物質化学研究所教授)
委員	立本 英機	(千葉大学工学部教授)
委員	中尾 真一	(東京大学大学院工学系研究科教授)
委員	西出 宏之	(早稲田大学理工学部教授)
委員	比嘉 充	(山口大学工学部助教授)
委員	植村 忠廣	(東レ株式会社地球環境研究所長)
委員	増田 俊夫	(京都大学大学院工学研究科教授)
委員	山本 和夫	(東京大学大学院工学系研究科教授)

要 旨

1 報告書の名称

水の有効利用のための先進材料研究に関する提言

2 報告書の内容

1) 作成の背景

現在、全世界では少なくとも2000億トンの水が不足していると考えられており、この問題を解決するためには海水、下水、汚染河川水の有効利用が必要不可欠とされている。特に欧米では水を戦略物質と位置付け、安全な飲料水や食糧生産用水を分離膜や吸着材を用いて簡単で安く持続的に得ることを最優先課題としている。このことから、我が国としてもこれまでに増して飛躍的に先進性のある水処理材料の創製が必須となっている。これを推進するには、従前のような材料創製のみの視点からだけでなく、水の分子論から問題解決のための社会的課題に至るまで幅広く議論することで問題点を把握し、本問題に関する展望を早急にまとめて関連研究分野の一層の活性化をはかる必要があると判断した。そこで、水問題に対する現状認識、水の有効利用において材料に求められる課題、先進材料研究開発に対する提言と研究体制確立の必要性などを骨子とする報告書を作成した。

2) 現状及び問題点

地球規模での水不足は世界経済に大きな影響を及ぼし環境劣化をより促進することは共通の認識であり、総合科学技術会議においても環境分野の取り組みの中で「自然共生型流域圏・都市再生技術研究」として水環境と関係の深い研究が取り上げられている。しかし、ここでは水利用・水管理システムを中心に据えており、多様な水資源を多段に水質で使いわける重層的な自律システム群からなる社会において必要な要素技術や先進材料の研究開発を意図したものではない。また、水環境に関する研究は基礎科学ではなく応用科学の範疇の研究であるとする認識が一般的であり、従来技術・材料の組み合わせを前提とした研究にとどまっている場合が多い。このような状況を改善し、積極的に世界の現状に対応しない限り、わが国の水に関連した高度な研究レベルを大幅に低下させ、優れた水処理材料に関わる製造技術の国際競争力を大幅に失わせることになる。

3) 改善策、提言等の内容

この領域は非常に幅広い分野からなる研究者から構成されており、限られた研究者数で高水準の研究を推進することは容易ではなく、研究の焦点を明確にした上で効率の良い研究体制の構築と支援が必要である。従って、(1)先進材料を用いた自律分散持続型水処理システムの研究体制整備、(2)量子的飛躍を目指した新規材料創製を行うための基礎研究体制の構築、(3)関係機関の連携による総合的な研究戦略の構築と教育の整備が急務である。このような研究体制を通じて産学官(独)協調がより進むことにより、水の有効利用のための先進材料研究がより促進され、研究レベルの高水準での維持と製造技術の国際競争力の確保がはかられる。このことは、結果として地球上の貧困や環境問題の解決のみならず水資源に関わる紛争を和らげ国際平和への貢献に繋がるものである。

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 水問題に対する認識及びそれを解決するための課題	3
2 - 1 わが国及び世界における水問題に対する認識	3
2 - 1 - 1 わが国の水問題	3
2 - 1 - 2 欧米先進地域の水問題	3
2 - 1 - 3 発展途上国の水問題	4
2 - 2 水問題を解決するための課題	5
2 - 2 - 1 わが国および先進地域の水問題に対する課題	5
2 - 2 - 2 途上国の水問題に関する課題	6
第3章 先進材料を用いた自律分散持続型水処理システムの提言	6
3 - 1 自律分散持続型水処理システムに必要な要素技術	8
3 - 1 - 1 水道浄水技術	8
3 - 1 - 2 下水処理技術	8
3 - 1 - 3 モニタリング技術	8
3 - 1 - 4 エネルギーの回収	8
3 - 1 - 5 膜濃縮排水の有効利用	9
3 - 2 自律分散持続型水処理システムに必要な材料と課題	9
3 - 2 - 1 水処理用分離膜	9
3 - 2 - 2 吸着材	10
3 - 2 - 3 高分子凝集剤	10
3 - 2 - 4 新規水処理用材料	10
3 - 2 - 5 ガス分離膜	11

3 - 2 - 6	環境モニタリング材料	11
第4章	水の有効利用のための先進材料研究推進に関わる提言	11
4 - 1	先進材料創製における異分野との連携の必要性	12
4 - 2	先進材料の創製のための基礎研究推進の必要性	14
4 - 3	先進材料創製における量子的展開の必要性	14
4 - 4	先進材料創製における革新的手法の展開	15
第5章	研究推進体制への提言	16
5 - 1	水の有効利用に関わる総合的戦略の構築	16
5 - 2	水の有効利用に関わる基礎および専門技術教育	19
5 - 3	水問題解決の重要性と先進材料研究による国際貢献	19
5 - 4	海外における研究動向	20
5 - 5	国内の水環境における産官学連携基礎研究プロジェクトとの関係	21
第6章	結語	22
	主な参考文献	23

第1章 はじめに

20世紀は石油の時代と言われ、21世紀は水の時代といわれている。これは、「20世紀は石油の争奪が原因で戦争が勃発したが、21世紀には水獲得問題が原因となって戦争が発生する可能性がある」という1995年のイスマエル・セラゲルディン世界銀行副総裁の発言が注目されたことを契機に、広く一般化されて伝わったものであろう。地球規模での人口の増加と乾燥地域の拡大に伴う水の不足は世界経済に大きな影響を及ぼし環境の劣化をより促進すると考えられ、今後20年間は食料やエネルギー問題よりも深刻であると言われている。日本においてもこの問題に対する重要性は幅広く認識されており、日本学術会議はすでに各国を代表する学術機関の連合組織であるインターアカデミーパネル(IAP)を通して積極的な貢献を行っている。また2003年3月には大阪、京都、滋賀において世界水フォーラムが開催された。

ところで、全世界では少なくとも2000億トンの水が不足しており、また、化学肥料、農薬、家畜の排泄物、工業廃水、家庭排水、重金属類、海水等による飲料水汚染の深刻さも世界的規模で増大しており早急な対策が望まれている。特に中国、インド、中東、旧ソ連周辺地域、アフリカにおいて水不足は非常に深刻な状況にあり、また米国やEU等においては河川や湖沼の汚染が深刻化している。わが国ではこれらに比べると一部の地域を除いて比較的問題は少ない。しかしながら、わが国は食料の輸入国であり、穀物等の育成に必要な水の量に換算すると年間で約740億トンの水を輸入していることになる。したがって世界的な水不足とは決して無縁ではなく、むしろこの問題を深刻に受け止め積極的に対応しなければならない。

このように深刻な水不足を解消するために各国は海水の淡水化、下水や排水の再利用等水の有効利用を積極的に推進し始めている。特に逆浸透膜、NF膜等の分離膜、イオン交換やキレート樹脂等の吸着材を水の有効利用のための先進材料と位置づけこれらの材料の高度な展開を目指した積極的な研究・開発を行っている。特に米国においては今後15年間、水を石油や食料よりも重要な戦略物質と位置づけ、国立科学財団(NSF)を中心に水の有効利用のための先進材料の研究・開発に積極的に資金を投入し、この領域における国際的な支配権の確立を目指している。またヨーロッパにおいては民営化された各国の水道企業が自国のみならず先進国や発展途上国を問わず各国の水処理事業に参入し、積極的にこれら先進材料の導入を図るとともに、EU共通のプロジェクトとして研究・開発に資金を投じている。またこれらの先進材料の研究は水資源の不足のみならずバイオ・ケミカルハザードからの安全な飲料水の確保という観点からも重要性が非常に増している。このように米国やEUが水の有効利用のための先進材料の研究・開発に積極的に取り組み、新たに開発した分離膜や吸着材を基に、世界的な規模を持つ「水産業」を育成し、地球規模での水不足への対応を始めている。これらの新規な分離膜や吸着材は、これまでとは全く異なったコンセプトの基に、新たに研究や開発を進めようとするものである。我が国は水の有効利用のための材料創製に関して世界に誇る優れた研究と開発を行って来た。しかしながら、各国の新しい動きは我が国のこれまでの努力を凌駕するものであると言わざるを得ない。このようなときに、この問題に対する重要さを認識し、水の有効利用のための先進材料の研究に我々が共通の認識を持ち積極的に世界の状況に対応しないかぎり、わが国が維持してきた世界的研究レベルも大幅に低下させ、強いては優れた膜や吸着材等を製造する企業の国

際競争力を失わせることになる。

従って、我が国としては従来に比して飛躍的に先進性のある材料の創製が必要となっている。このことを推進するには、従前のような材料創製のみ視点からだけでなく、水の分子論から始まり、材料の界面現象の解析、材料創製の科学と技術、材料や利用技術のシステム化、さらには問題解決のための社会的構造に至るまで幅広く議論し問題点を把握しなければならない。同時にこのような材料からの水の有効利用への貢献は途上国の貧困問題や先進国の環境問題、及び水資源利用の効率化を通じて水資源紛争を和らげ国際平和への貢献に繋がるものである。

本報告書は6章から構成される。第2章ではわが国及び世界における水問題に対する現状認識と水問題を解決するための課題について言及し、第3章では水を有効利用するために最も適した方法である先進材料を利用した自律分散持続型水処理システムの研究体制の整備を提案し、第4章では水の有効利用のための先進材料研究の推進とその量子的展開を行うための基礎研究体制構築を提案し、第5章では関係する大学、公的研究機関、企業研究及び技術組織、行政機関等が連携し総合的に戦略を構築して研究を推進する必要性を述べるとともに教育の整備を提言している。

第2章 水問題に対する認識及びそれを解決するための課題

世界の水問題には、水不足や水質の問題と洪水の問題がある。前者は水質と飲料水の安全性及び廃水と環境水の汚濁に関する問題に関り、後者は治水に関する問題である。利水と治水の問題はヒト社会の発生と共に始まり、先進国においても途上国においても自然発生的に、関与する分野ごとに個別に管理され、制度が成立している。先進国においても現在途上国が遭遇している問題と同様の問題を歴史的に経験し、とりあえず克服した上に現在の状況があると言える。その結果、人と水環境と地球環境との関係のあり方を検討すると、先進国においても、水の問題を総合的に取扱って根本的に改めなければ解決し難い基本的な問題が残されている。そのため、先進国における水問題解決の方向は、途上国の水問題を根本的に解決する上でも、非常に参考になると考えられる。

ここでは本報告書の主旨から、都市の水利用と水管理の問題を中心に、わが国について多少詳しく検討し、次いで世界の水問題を概観して、水の有効利用における課題について言及する。

2 - 1 わが国及び世界における水問題に対する認識

2 - 1 - 1 わが国の水問題

明治時代以後、わが国の中世から江戸時代にかけて考案された治水技術に替わり、西洋の近代的治水技術が導入され、大都市には浄水を有圧で大量輸送する上水道施設の建設が進められた。太平洋戦争後、塩素消毒法をとり入れた上水道の普及が進み、高度成長期を迎えると都市化・工業化が急速に進み、近代的生活様式が普及し始めた。上水道の普及が急速に進む一方、環境規制や下水道施設の整備がなされないまま工場排水が増加し、同時に水洗式トイレが普及すると、都市部の河川水質の汚濁化が進み、下水道の整備が急速に進められた。他方各地で、工業用水に地下水を過剰に汲み上げた結果、地域の地下水位の低下を引起し、飲用井戸が使用できなくなり、地盤低下をもたらして社会問題となり、工業用水道の整備が行われた。大量生産・大量消費の文化は有害化学物質を環境水中に放散させ、地下水汚染や河川水等の汚濁・汚染を招き、水道水源の汚染が進んでいる。化学肥料や農薬を多用する農業の変貌も地下水や河川水の汚染の原因となっており、減反政策は地下水位低下の一因となっている。上水道の普及は水系感染症を制圧したが、塩素消毒による消毒副生成物の問題を引起し、耐塩素性病原微生物による感染症を防止することができず問題となっている。また、グローバル化の進展は、食料や木材の形でわが国に間接的に大量の淡水資源を輸入させている。途上国や水資源に問題を抱える国々からの輸入は、輸出国側の水問題とわが国の危機管理を考えると問題は大きい。また、地球気候変動による渇水や洪水の頻発、近い将来に予測されている急速な人口減少に対する社会インフラの維持管理も考慮すべき問題である。

2 - 1 - 2 欧米先進地域の水問題

スペイン等の一部地域を除けばヨーロッパ各国は比較的水資源に恵まれていて量的問題はないようである。ヨーロッパ先進地域では上水道施設はほぼ整備されており、大都市部を中心に下水道施設等も整備が進んでいて、衛生的環境が実現されている。この近代的上水道システムの整備は、19世紀前半の数回にわたるコレラの大流行が契機となってパリやロンドンから始められたものである。それ以前はセーヌ河やテムズ河、その他河川の水

を飲用水に使用し、し尿は石切場跡や街路等に投棄されて、街路の側溝から同じセーヌ河やテムズ河等に流れ込んでいて、人々は極めて非衛生的な都市環境で生活していた。近代的上下水道のシステムは、わずか150年の間に発展した技術である。ロシア西部を含むヨーロッパの主要河川のほとんどは下水道と化して、「産業および人的廃棄物を海へ運んでいる」といわれているように、河川・湖沼の汚濁、地下水の汚染の問題は極めて深刻である。従来、フランスやドイツ・オーストリア等の多くの都市では水道水源を湧水や地下水に求めてきたが、都市部の人口増加で水需要が増大し、取水量が不足するようになった。そのため、河川表流水等も利用するようになり、原水の汚染に対してオゾン処理や促進酸化処理等の高度処理を開発し、さらには水質を向上させるため、最近、フランスのメリーショワーズ浄水場やオランダのヒームスカーク浄水場ではNF膜やRO膜などによる処理も組み合わせるようになっている。

北米は総量的には淡水資源に恵まれた大陸であり、カナダは良質の淡水資源を豊富に保有している。しかし米国には、水質汚染や西南部と太平洋岸に砂漠が広がる乾燥地帯があり、深刻な水問題が存在している。例えば、五大湖等の水質汚染は著しく、湖産の魚を食用にして健康被害を起こしている。家畜の糞便に由来する病原性原虫による飲料水の汚染の問題も、広い地域で起きている。南部のリオグランデ河は未処理の下水と農薬、産業廃棄物の汚染で危機に瀕した川になっているといわれている。カリフォルニアや南西部の乾燥地帯の粗放な灌漑農業は塩害による不毛化をもたらしている。塩濃度の高い灌漑排水はコロラド河下流のメキシコの農業に深刻な打撃を与え、流量の著しい減少は河口域のメキシコ漁業に壊滅的打撃を与えている。さらに、水質汚染は未処理の下排水の放流や肥料・農薬等によるばかりではなく、自動車のガソリンに加えられるメチルトリブチルエーテル（MTBE）による地下水汚染や排ガス中の窒素酸化物による汚染、灌漑排水による塩分濃度の上昇も問題となっている。地下水の過剰揚水の問題も深刻である。地下水の枯渇や南西部の砂漠化と土壌の塩類集積の進行はこの地域の農業の持続を困難にし、近い将来、世界の食料供給に甚大な影響を与えているといわれている。

2 - 1 - 3 発展途上国の水問題

アジア・アフリカ等の発展途上国の水問題は、社会的インフラが整備されぬまま爆発的に人口増加が進み、その人々が都市に集中するため、人々に安全な飲料水を供給できないと同時に、し尿の衛生処理が行われず、非衛生的な生活を送らなければならない状況におかれているところにあり、貧困がそのような状況に拍車をかけている。現在、世界で約11億人の人々が安全な飲料水が入手できない環境に暮らし、約24億人の人々がサニテーションが十分にいきわたらない状態で暮らしている。さらに、排水設備が未整備なために毎年3億人以上の人々が劇症のマラリアに冒され、100万人以上の人々が亡くなっている。また、水系感染症の下痢性病気は40億人が罹患し、220万人が死亡しており、そのほとんどが5歳未満の児童であるといわれている。

人口増加が著しい北アフリカ、中近東、あるいは南インドなどはまた乾燥地帯でもある。人口の増加は、食料増産のための焼畑や農地の拡大を促し、住居や燃料の材料入手のために樹木や森林の伐採を増加させて、乾燥・砂漠化を招いている。そして、旱魃の頻発と相俟って水入手を困難にして、貴重な労働時間を奪い、貧困を増幅している。このような状況は人々をさらに都市に集中させ、都市の水の総需要量を急増させる。河川流域に発達し

た都市は水の入手が容易であっても，し尿や下水が未処理で投棄されるために河川水の汚濁を著しく進め，水系感染症の感染源になっている。

アフリカでは多くの国で国民の少なくとも半数に安全な水を供給できないでいる。バングラデシュやインド等のアジアの一部地域では，乾季と雨季の差が顕著で雨季には洪水に見まわれ，乾季には水不足で生活用水が入手できずにいる。やむなく地下水を飲用水に使用して重篤なヒ素中毒に罹患している人々が多数いる。

メキシコシティやブエノスアイレスなどの中南米の諸都市では 20 世紀初頭から水道設備が建設されていて水道普及率は比較的高いが，設備の老朽化と人口増加による水需要の増加に対応できないでいる。他方，下水道普及率は低く都市下水の処理率も低い。ブラジルの河川の化学物質や産業廃棄物による汚染は深刻であり，エクアドルやアルゼンチンの湖沼や海湾の汚染も顕著である。

フィリピンのマニラや中国の諸都市も同様に老朽化した水道施設の近代化と増強が急務とされている。中国の北部では水不足と汚染が著しく，北京に給水すべき貯水池二つのうち一つは水質悪化で閉鎖されている。また，地下水の過剰揚水で地盤沈下と地下水位の低下が著しく，北京周辺の一部の農家は農地を放棄して都市部に流入しているといわれる。森林伐採による環境破壊や砂漠化も問題である。

アラル海を囲むトルクメニスタン，ウズベキスタン，カザフスタン等ではアラル海が縮小して塩分濃度が上昇し，砂漠化した農地には農薬と塩分が集積し，湿地が消滅するに従って降水量も半減している。これはソヴィエト・ロシア時代にアラル海に流れ込むアムダリア川とシルダリア川から大量に取水して砂漠に引きこみ灌漑農業を進めた結果である。このような灌漑による塩害問題は，米国中西部の他に，アスワン・ハイ・ダム建設で毎年の洪水が起こらなくなったナイル河デルタ地帯や，中東やアフリカの乾燥地帯で灌漑農業を行っている地域でも程度の差はあれ塩分濃度が上昇し，農業に適さなくなっている。

化石水の利用も大きな問題となっている。サウディアラビアやイスラエル等の中東地域，あるいはリビアのヌビア帯水層等からは，地下水が大量に汲み上げられて食糧生産用や飼料生産用の農業用水や都市用水に使用されている。これらの地下水は有史以前に涵養された水であり，確実に枯渇する時を迎えると考えられている。

アラル海に流れ込むアムダリア川とシルダリア川，黄河，長江，ヨルダン川，トルコ領内のユーフラテス河，及びガンジス河等では堰堤や巨大ダムを建設し，それらの河川流域外へ大量の水を移送して自然環境や生態系，あるいは地域の気候等に大きな影響を与え，または隣接する国々の間で水をめぐり争いを起こしている。

以上のような様々な問題は，近年頻発する旱魃や洪水などの異常気象によって，より一層深刻さを増してきている。

2 - 2 水問題を解決するための課題

2 - 2 - 1 わが国および先進地域の水問題に対する課題

上述の様に欧米やわが国における水に関する問題は，生活用水特に飲料水の消毒副生成物，有害化学物質，及び農薬や，肥料に由来する硝酸性窒素などによる汚染に関する水質的問題と，下水や産業排水等による河川，湖沼，及び海域等の環境水の汚濁に関する問題，そして過剰な取水が原因する環境への破壊的な影響の問題に集約されよう。この様な問題

を根本的に改善する方策は、第1に水資源の質による使い分けと使いまわしを徹底して粗放な水利用システムを改めること、第2にその結果として自然の水循環系から取りこむ清浄な水の量を可能な限り節減すること、第3に自然環境系へ排出する下水処理水等は、自然の浄化容量を越えることがないレベルまで処理をして放流すること、に尽きるであろう。

2 - 2 - 2 途上国の水問題に関する課題

発展途上国の水に関する最大の課題は、安全な飲料水の給水システムの整備と、下水処理システムの整備である。困難な財政状況の中で効果的に上下水道施設を整備して衛生的な生活環境を確立し、いかに持続的に維持・管理して行くか。水利用・水管理に関する問題を曲がりなりにも克服し、様々な経験の過程で教訓を得た先進国が、発展途上国に対して支援しなければならない課題でもある。そして、多くの発展途上国には、隣国や河川上流の国々と水を巡る紛争問題があるが、友好的な関係を保って平和的に問題を解決することができるかという点も大きな問題である。特に、従来技術をベースとした上下水道設備を“輸出”して先進国型施設を整備する方法から、途上国に適した施設整備の方法を考え出して支援して行く方法に転換する必要がある。そして、従来の欧米型水利用・水管理システムを経由する回り道をせずに、21世紀型水利用・水管理システムに、様々な技術的工夫や制度改革をとり入れながら、直に進むべきであろう。途上国の多くの人々がわれわれと同じような水の使い方が出来るほど地球上の水資源は豊でないし、従来と同じレベルで自然環境に放流される下水中廃棄物を許容できるほど自然浄化能力に余裕があるとは考えられないことは、先進地域の水環境の現状を見れば明らかであろう。

水資源不足地域では、自然エネルギーや下水エネルギーの利用技術を活用して下水の再利用や海水・かん水の淡水化等の技術も取り入れ、灌漑農業には散水と排水に適切な技術と管理をとり入れて水の浪費と塩害を防止することが必要である。乾燥地帯にある中東の石油産出国では、豊富な石油を使用して蒸発法や逆浸透(RO)法で海水から淡水を製造し、飲料水に供給している。

第3章 先進材料を用いた自律分散持続型水処理システムの提言

これまで世界の水問題を概観してきたが、各地域において固有の課題を抱えており単純に解決できる問題ではない。その中でも我が国と関わり合いが深い重要な課題は都市用水と都市下水の問題である。都市の水代謝系が従来のシステムのままで都市への人口集中・増加が続けば、早晩、行き詰まると多くの専門家は考えており、粗放な水利用・水管理システムを変革し、新たな都市・地域水代謝システムすなわち用水を水質で使い分けて多段に循環利用する水利用・水管理システムの考え方が提案されている。このようなシステムを具現化する方式としては様々なシステムが考えられ得るが、その基本概念は、図1に示すような20世紀の後半に新たな水処理の基本技術として実用化された各種分離膜や吸着材をはじめとする水の有効利用のための新素材の出現で現実性を与えられた、小規模・分散型のシステムを重層構造的にネットワーク化した「自律分散持続型水処理システム」である。水の有効利用のための先進材料研究の進展には自律分散持続型水処理システムの研究体制整備が必要となる。本章では、このシステムの構築に必要な要素技術及び材料とその課題について言及する。

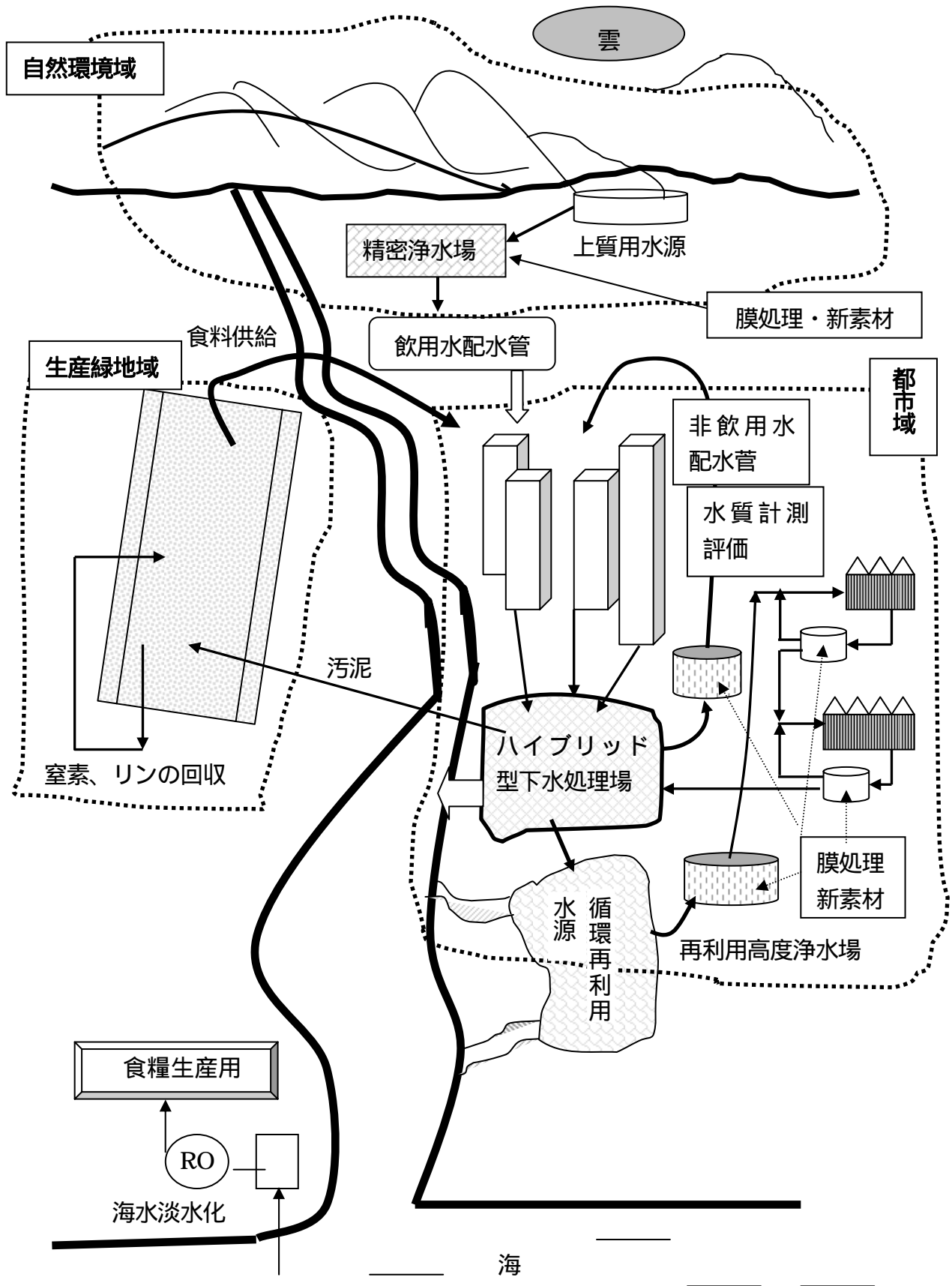


図1 質で使い分け使い回す「自律分散持続型水処理システム」
健全な水循環・水環境・生態系を守る各種先進水処理材料の実用例

3 - 1 自律分散持続型水処理システムに必要な要素技術

3 - 1 - 1 水道浄水技術

従来の水道浄水処理は、緩速ろ過法または急速ろ過法で浄化し、塩素で消毒して給水している。緩速ろ過法はろ材の砂粒子表面に繁殖した微生物相の働きで原水中の濁質や細菌、鉄・マンガン、有機物を除去する方法で、急速ろ過法は、凝集処理と組み合わせて適用される。最近になって、精密ろ過（MF）膜や限外ろ過（UF）膜による膜ろ過法やナノフィルトレーション（NF）膜や逆浸透（RO）膜による膜処理が導入され始めている。MF膜やUF膜のろ過操作は基本的に膜の細孔の篩効果による固液分離法であり、砂ろ過法に比べて、ろ過精度が格段に高い。NF膜やRO膜によれば低分子の溶解性物質の除去が出来るので、低分子フミン質等のトリハロメタン前駆物質や臭気物質、AOC、農薬、硝酸性窒素、カルシウムなどの硬度成分等の除去を目的として使用され、欧米特に米国で導入が進んでいる。

3 - 1 - 2 下水処理技術

下水の処理は一般に活性汚泥法や散水ろ床法などの生物処理法で行われる。生物処理法には好気性処理と嫌気性処理とがある。それぞれ、微生物が浮遊している状態で処理が行われる浮遊生物法と、担体表面に形成された生物膜などによる非浮遊生物法とに区分される。最近になって、活性汚泥法と膜分離技術を組み合わせた膜分離活性汚泥法（MBR：Membrane Bio-Reactor）が開発され、特に分離膜モジュールを活性汚泥液中に浸漬して使用する浸漬型膜分離活性汚泥法が注目されている。膜分離活性汚泥法は分離膜モジュールを使って活性汚泥液から処理水を分離して取り出し排出する方式である。細菌等を分離除去することができて処理水質に優れているだけでなく、活性汚泥濃度を高く保つことが出来るために処理能力が高く、活性汚泥の沈殿池が不要であるなどの利点がある。

産業排水等は、少数の特定成分が高濃度で含まれていることが多く、発生源で処理することが効率的であり、その特性にあった処理方法が選択され、膜技術や吸着剤技術等が活用される分野である。一般的な産業排水は、下水処理と同様の活性汚泥法で処理される。

3 - 1 - 3 モニタリング技術

水処理システムで従来必要とされてきた測定・分析技術には、pH、濁度、色度等の物理的測定と、過マンガン酸カリ消費量、硝酸性・亜硝酸性窒素、硬度成分等の物理化学的測定、トリハロメタン類、臭気成分、農薬、消毒副生成物等の分析化学的測定、および一般細菌、大腸菌、病原成原虫等の生物学的測定等に区分できる。物理的測定は連続測定が可能であるが、その他は測定・分析に煩雑な手作業と長時間を必要とするものが多い。今後さらに高度な技術を要する微量分析項目が増加することも考えられる。「自律分散持続型水処理システム」ではオンラインの工程管理を実施する必要があることから、ニーズに適合するセンサー材料の研究が極めて重要である。

3 - 1 - 4 エネルギーの回収

下水や活性汚泥槽の汚泥中の有機性廃棄物は微生物によりメタンガスに分解される。このメタンガスを燃料として熱源やガスタービン発電に利用することも可能であるが、触媒を用いて水素と炭酸ガスに分解し、ここで生じた水素ガスを分離精製して高分子固体電解質形燃料電池で発電に利用すれば、約 80 程度の熱と電気を得ることができ、高効率でエネルギー回収ができる。今後下水エネルギーの有効活用方法として期待することができる。自律分散持続型水処理システムでネットワーク化された地域社会は、このような下水中の

BOD を電気エネルギーや熱エネルギーとして回収し、有効利用するために、極めて有利な社会システムでもあると考えられる。

3 - 1 - 5 膜濃縮排水の有効利用

海水淡水化から排出される濃縮海水は、海洋に投棄されており今後処理量の増加とともに環境問題を誘引する可能性がある。また内陸部におけるかん水の淡水化によりもたらされる濃縮塩水は投棄する場所を確保する困難さを抱えている。両者とも本システム普及の障害となる可能性があり、今後濃縮塩水を有効な資源として利活用する必要がある。濃縮塩水の利活用として次の分野が考えられる。

- 1) 食品製造業（製塩業における RO/ED ハイブリッドシステム、好塩性マイクロアルジェ利用による抗酸化性物質やカロチノイド類等の機能性食品素材の回収、濃縮果汁）
- 2) バイオテクノロジー（前処理により除去された海洋微生物の利用）
- 3) 発電（浸透圧発電、濃淡電池）
- 4) 健康産業（人工死海）

3 2 自律分散持続型水処理システムに必要な材料と課題

3 - 2 - 1 水処理用分離膜

高分子や無機材料を利用した逆浸透（RO）膜やナノろ過（NF）膜は所定の分子量の溶存物質を除去することができ、精密ろ過（MF）膜や限外ろ過（UF）膜は所定のサイズの微粒子を確実に除去することができる。このため、水中の微量有害化学物質の除去や、感染が成立する最小量が著しく小さいクリプトスポリジウムやウイルス等の除去において膜技術に期待が集っている。また、下水処理等の活性汚泥法に膜分離を応用した MBR の実用化も始まっており、処理水質の高さ、処理性能、沈澱処理の省略、維持管理の容易さ等で注目されている。

しかし、水処理用膜は実用化が始まったばかりで、膜処理を長期間安定的に使用する上で障害となるファウリング等の現象や、様々な用途における膜に対する要求性能と評価項目など、実用上の問題が解明されておらず、その問題に対する解決方法が確立されていない。また、これまで水処理用途に試用された膜・膜モジュールは、従来から膜が利用されてきた海水淡水化、超純水製造、各種工業用途、医療分野等で開発されたものであり、水処理用途の目的に合わせて開発され、最適化されたものではない。例えば、現行の RO 膜を用いて海水淡水化を行うと、硼素とフッ素の濃度が WHO の飲料水質基準より高くなる。そのためこれらの有害物質が高選択的に除去可能な新規な RO 膜材料の開発が必要とされている。したがって、今後、蓄積されるパイロットプラントや実プラントの知見を分析して、本格的に水処理用分離膜の研究が発展する必要があると考えられる。

特に新規高分子材料やこれまで膜として利用されなかった高分子を用いて RO 膜や NF 膜を創成し各種機能を付与することは、さらなる性能の向上や水処理システム全体の低コスト化を図る上で必須のことである。特に従来膜で除去することが難しかったリンやホウ素やヒ素の除去性能の向上が期待される。このように様々な機能を発揮できる水処理用分離膜は、自律分散持続型水処理システムの中で浄水処理から下・排水処理、再利用水処理等のプロセスになくってはならない中核的技術になると考えられる。

3 - 2 - 2 吸着材

活性炭，イオン交換樹脂，キレート剤は吸着材である。活性炭は非常に古くから利用されて来ており，水処理において重要な役割をはたしているが，高度処理技術のさらなる高度化等には活性炭素繊維等を微生物の固定化に利用する方向が考えられる。イオン交換樹脂は核物質の処理の利用からはじまり，硬水の軟水化や超純水の製造等の水処理に利用されて来ている。キレート樹脂は最も開発の歴史が新しいが，特定の物質とコンプレックスを形成し優れた選択吸着性を有していることから，今後広範な有害物質を対象にしてコンプレックス形成の可能性を試みる必要がある。また分子インプリント法等の形状を合わせた鑄形状の空間の形成と組み合わせる技術も期待される。リンやホウ素やヒ素の除去にキレート樹脂，イオン交換樹脂を使用する方法も有望である。吸着材は膜と同様，自律分散持続型水処理システムの中核技術に発展するものと考えられる。

3 - 2 - 3 高分子凝集剤

水道浄水プロセスや下排水の回収処理プロセスにおいて，水中の懸濁物質や汚濁物質を分離する基本的な前処理技術として，凝集・沈殿(及び浮上)処理は欠かせない技術であり，汚泥の脱水にも高分子凝集剤はなくてはならない薬剤である。水道浄水プロセスでは，高分子凝集剤は浄水場汚泥の処理に使用されていたが，海外では近年になって浄水処理の凝集沈殿処理に無機系凝集剤と併用するようになってきている。わが国では平成 12 年の水道施設基準の制定で始めて高分子凝集剤の使用が認められるようになり，検討が開始されている。水道浄水プロセスの凝集沈殿処理では，濁質等のコロイド粒子以外に原水に溶存している高分子フミン質等の天然有機物もフロックに取りこまれて除去されることが知られているが，低分子フミン質は凝集剤で捕捉されない。高分子凝集剤の研究から，低分子フミン質等が凝集処理で捕捉できれば，膜性能を不可逆的に低下させる目詰まり現象(膜ファウリング)を防止する前処理技術になる可能性がある。低分子フミン質の成分であるフミン酸やフルボ酸も除去されないために，消毒副生成物や AOC の前駆物質となっているが，フミン酸やフルボ酸等を効果的に取り込むことができる凝集剤が開発できれば，消毒副生成物の抑制につながる。自律分散持続型水処理システムの必須技術の一つとなろう。高分子の構造(分岐，ブロック性，デンドリマー構造など)と凝集効果(凝結・凝集，フロック形成，ろ過助剤，汚泥脱水促進作用)との関係について，水溶性高分子及び高分子電解質の溶液物性の立場からの基礎的・理論的な研究が期待される。

3 - 2 - 4 新規水処理用材料

微生物を担持した機能性ゲル膜は排水中の有機性有害化学物質を効率よく分解除去する材料として注目されている。特に高分子ゲルは物質の透過性だけではなく微生物の活性を保持する上で優れている。これらのゲル膜としてポリビニルアルコール等の親水性高分子が使用されることが多い。

炭素繊維の束や織布は水中に置くと微生物の居住性が良いことから，各種有害有機化合物を分解する菌類を居住させることで水処理を行うことができる。最近炭素繊維の中でも活性炭素繊維の開発が積極的に行われている。従来の炭素繊維と比べて繊維長が短く不織布としてのみ使用可能であるが，多数の細孔を有しており吸着性が高いことから水中の微量成分の除去には優れた性能を発揮する。活性炭素繊維に微生物を居住させ，水中の有害有機化合物の分解処理をはかることが試みられている。粒状活性炭とは異なって，様々な

形状に成型加工が可能であるので、水処理システムで多様な用途が考えられる。

アナターゼ型のチタニアは、それ自身のバンドギャップを超えるエネルギーに相当する波長の光を照射すると、優れた光触媒酸化活性を発現することが知られている。これらはフィルム状または粉末状のチタニアを用いたものである。しかし前駆体の合成過程に低分子量添加物が表面に移動する現象を利用して繊維状とすることができる。チタニア繊維は粉末状のチタンや基板にコーティングしたチタンと異なり、水処理中に分散したり剥離することがない。従ってチタニア繊維は、光の照射が必要であるが、高速流体中での有害化学物質や有害菌の分解を行うことが可能である。また、製造法の改良により各種の形状に成型された不織布を得ることができる。さらに、チタニア繊維以外にも他の無機や金属触媒を利用することも可能である。

3 - 2 - 5 ガス分離膜

下水や活性汚泥槽の汚泥中の有機性廃棄物から発生するメタンガスは燃料として熱源やガスタービン発電に利用することも可能であり、また触媒を用いて水素と炭酸ガスに分解し、生じた水素ガスを高分子固体電解質形燃料電池で発電に利用すれば、熱と電気を得ることができる。汚泥中から発生したメタンと窒素および酸素は高分子気体分離膜を用いて分離することができる。またメタンガスと酸素より生じた水素と炭酸ガスを分離する水素分離膜も必要である。さらに水素をプロトンに変換し電気を得るにはカチオン交換膜を用いなければならない。現在これらの膜は存在するが、性能やコストの面から問題が多く新しい膜材料の開発が望まれている。

3 - 2 - 6 環境モニタリング材料

水中の汚染物質の測定・監視はより安全で効率よく水処理を行うために欠かすことができない。特に重金属、有害有機化合物、有害微生物等の微量汚染物質の監視は重要である。これらの物質は単独ではなく多成分混合系となっており、個々の成分を正確に特定しなければならない。質量分析や液体クロマトグラフィー等の分析法は微量成分の分析に適しているが装置が大がかりで迅速な計測を行うことができない。一方センサーによるモニタリングは非常に簡便であり迅速な測定を行うことができる。現在金属イオンに関してはイオノフォアやイオン選択膜を用いて特定のイオンのみを識別し電位や電流値に変換することにより検出を行っている。ダイオキシン等の有害有機化合物や有害微生物のモニタリングにはポリマーチップを利用したバイオアッセイや抗原/抗体反応等を利用したバイオセンサーの研究開発が進められている。自律分散持続型水処理システムにおいて処理水は次工程へ供給され再利用されることから、製造業の化学プラントと同様のオンラインの工程管理を実施する必要があり、センサー材料の研究が極めて重要である。

第4章 水の有効利用のための先進材料研究推進に関わる提言

分離膜や吸着材をはじめとする水処理用材料については、これまでに多くの提案がなされ、研究や開発についても積極的に行われ、実用化もかなり進んでいる。しかしながら、前章で示したように実用化の進展とそれに伴う利用地域の拡大によりこれまでの材料では解決できない重大な問題が数多く存在し、水の有効利用を行う上で必要不可欠な自律分散持続型水処理システムの構築には大きな課題が残されている。ここでは、水の有効利用に必要な先進材料を創製する上で重要な課題である微量物質の高度認識、水の高透過性、反

応と輸送の高連結性、ファウリング初期の検知と回避、システムの最適化、製造工程の単純化などに焦点をあて、前章の後半で述べた従来材料の問題点を基に、先進材料創製における異分野との連携の必要性を述べると共に新しい材料のあり方とそれを飛躍的に推進するための具体的な展開の方法、先進材料創製における革新的手法の展開を中心に提言を行う。

4 - 1 先進材料創製における異分野との連携の必要性

20世紀の後半における分離膜や吸着材等の飛躍的な進展により、水の有効利用のために材料は必要不可欠な存在となってきた。しかし、これまでの性能をはるかに凌ぐより先進性の高い材料を得るには、従前のような材料創製のみ視点からだけではなく異分野の研究者との連携が必須である。たとえば、水と材料の相互作用に関しては物理や化学の基礎科学、材料や利用技術のシステム化に関してはプロセス工学、水質に関しては環境科学、飲料水に関わる疾患に関しては医学、微生物の利用には生物工学、自律分散持続型水処理システムの構築には土木・衛生・都市工学、さらには問題解決のための社会的課題については社会科学との連携により初めて画期的な先進材料の創製が可能となるだけでなく優れた性能を発揮することができる。またこれまでの議論を集約すると、先進材料創製において重要な課題となるのは、微量物質の高度認識、水の高透過性、反応と輸送の高連結性、ファウリング初期の検知と回避、システムの最適化、製造工程の単純化等であると考えることができる。これらの課題に対して材料工学からのアプローチが必要であることは言うまでもないが、基礎科学、プロセス工学、生物工学等との横断的な連携も必要である。図2に研究・開発の内容と異分野との関係について示した。

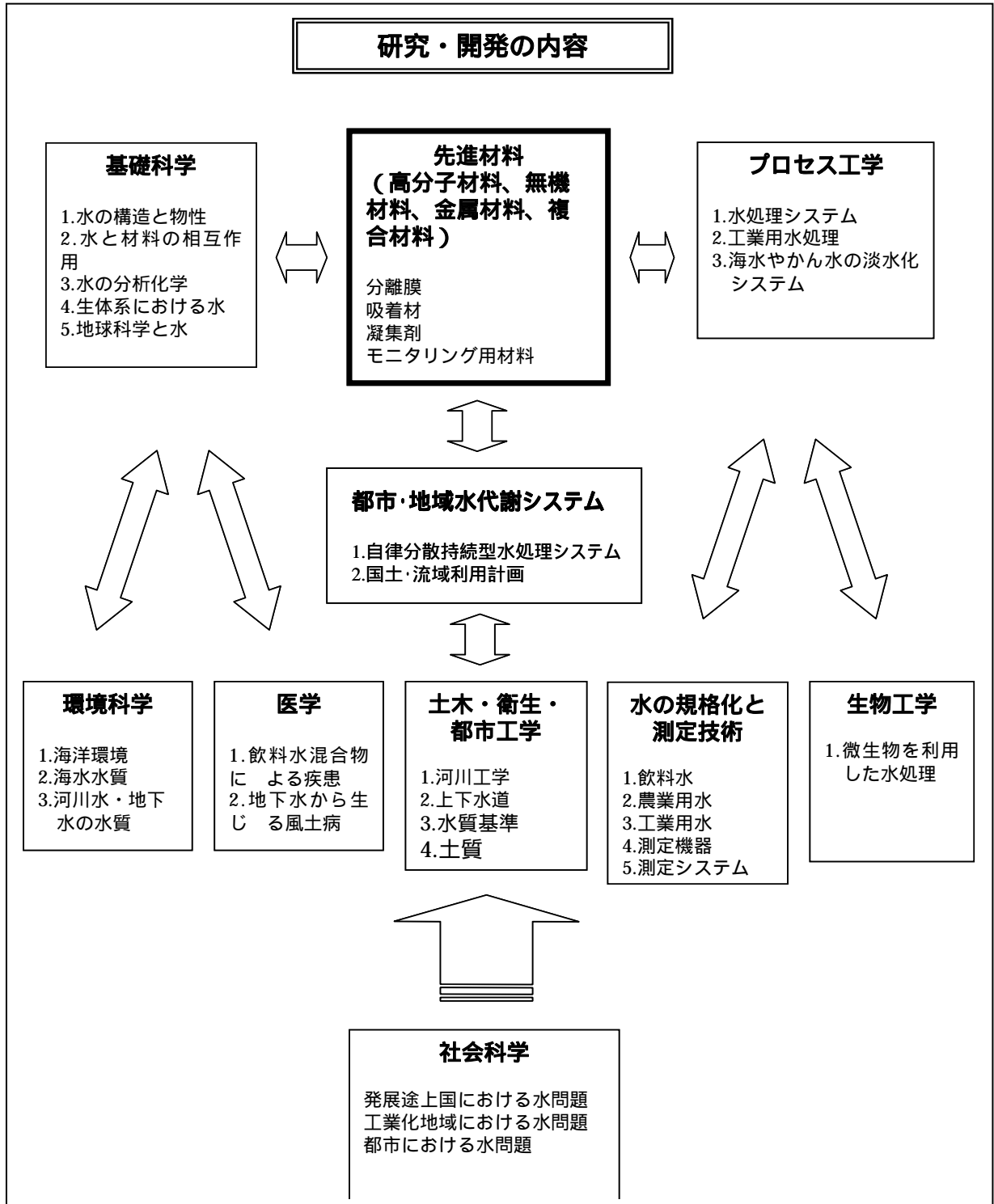


図2 研究・開発の内容

4 - 2 先進材料の創製のための基礎研究推進の必要性

物質分離過程には、特定物質を認識する過程と、それに続く物質輸送過程がある。まず物質認識現象において、これまでの研究では、中性分子の場合は分離材料に対する物質の吸着や溶解に関する古典熱力学や統計熱力学が、イオンの場合はドナン平衡の理論を用いた解析が行われてきた。しかし先進材料の創製に必要な精密な物質認識を行うためにはこのようなマクロ的、一次元的理論に基づいた解析ではなく、ナノレベルにおける分子間相互作用の解析が必要となる。そのためには水分子やクラスター、分離材料表面を形成する分子、溶質分子に存在する官能基間に相互に働くファンデアワールス力、水素結合力、クーロン力を、分子軌道法、分子動力学法等を用いて計算することが重要である。さらに、たんぱく質に存在する基質部位に類似するような水分子と特定溶質を認識分離するために最適な官能基が鑄型状に空間配置した構造の設計を、先の相互作用力の計算結果に基づいて行う必要がある。またこれらの解析手法を用いて分離材料表面の吸着現象を解析することで分離材料表面のファウリング機構の解明を行うことが可能となる。

次に移動現象においては、これまでは10nm以下の孔径内において、中性物質に関してはフィックの拡散方程式、荷電物質に関してはネルンストープランクの方程式により解析されてきた。しかしこれらは平衡の熱力学に基づいて提唱された理論であり、非平衡の熱力学に基づく新しい理論とモデルの構築を行わなければいけない。さらに非平衡の熱力学に関しても平衡の極近傍のみの議論に終始しており、平衡からかなり離れた、つまり物質が高速で反応や移動する場合にも適応可能な理論の構築が必要となる。さらにこれまでの理論は平均場の媒体の中での一次元的な解析が主に行われてきた。しかし先進材料の創製に必要な高選択的、高透過性の輸送を行うためには、三次元空間に配列された官能基と水分子や溶質間に働く各種の相互作用力を考慮した新しい理論の構築が必要となる。そしてこの理論に基づいて先に設計した官能基配置を三次元空間に配列させることで構成されたチャネル構造のモデリングと、このモデル構造内での水分子や溶質分子の移動現象の解析が必要となる。これらの移動現象の解析を基に、溶質分子間、溶質分子と分離材料間の化学反応が起きる場合における、各々の輸送と化学反応の連結現象を動的解析することも重要となる。またこれらの分離材料を形成する分子が静的に空間配置された場合の輸送現象だけでなく、生体膜のゲートのオープン/クローズに対応する、分離材料のある特定ユニットの高次構造が動的に変化する場合における物質移動現象のモデルの構築とその解析も必要となる。

このように、より優れた水の有効利用のための先進材料の創製には、基礎的問題において解決すべき課題が山積しており、これまで以上に基礎研究を推進する必要がある。

4 - 3 先進材料創製における量子的展開の必要性

究極の分離や分子認識は生体膜上のイオンチャネル、ウォーターチャネル、シナプスにおいて行われており、人工材料を用いた認識・分離システムの開発はこれらが有する高選択性と高透過性、抗ファウリング特性を目標としている。しかし、これまでの材料研究の連続的な延長で生体膜類似の高機能性膜を開発することは困難であり、量子的に飛躍した発想に基づく、全く新しい水の有効利用のための量子的先進材料(Quantum-Leap Advanced-materials for Water Purification : QLAM)の創製が求められている。そのため

にはサブナノからナノ，サブミクロン，ミクロンオーダーまでの階層的な水分子や溶質と分離材料界面の相互作用と，分離材料内での物質移動現象に関する新しい理論の構築，及びこの理論に基づいて材料設計を行う場合に必要なモデル化計算手法の開発を行う必要がある。そしてこの計算手法により，分離膜，吸着材，凝集剤，及びセンサー等に使用する階層的な材料構造の設計を行う必要がある。このようにして設計された材料構造の具現化においても，精密に分子構造を制御可能な合成法の確立や，高次構造制御するための相分離現象の理論構築とモデル化，そしてこれらに基づく計算機シミュレーションによる構造設計は必要不可欠である。また実際の製膜技術の確立に対する議論等を促進する必要がある。

量子的展開はファウリング現象に関しては最も重要と言える。これまでは，膜表面の改質等に関する研究に重点がおかれ、例えばファウリングの前兆現象に対する研究はほとんど考慮されることはなかった。しかし，これまでの研究結果から，むしろ前兆現象をあらかじめ検知し解消することが必要であるとの認識に至っている。このためにはバイオテクノロジーを駆使した新規バイオフィルム創製が必要となる。このようなバイオフィルムにはセンシング機能、ファウリングの除去機能、物質の選択分離等の機能を同時に備えていなければならない。

さらに量子的展開をはかる先進材料の方向として，電位差，圧力差，濃度差，磁場等の物質を駆動する場すなわち「一次場」以外の外部刺激，例えばレーザー，超音波，電磁波，渦電流，低周波振動等のいわゆる「高次場」の効果を考慮した研究が必要である。これらの高次場は表面に対する影響が非常に大きいことから，膜，吸着材，繊維の表面の微細な構造等が著しい影響を及ぼすと考えられ，輸送現象やファウリングに対して飛躍的な効果を与える可能性がある。

4 - 4 先進材料創製における革新的手法の展開

先に示した理論構築と計算手法で提唱したモデル構造体を具現化するためには，理論計算やモデリングの結果により，その使用目的に応じて高分離，高フラックス，耐ファウリング性，耐薬品性，耐熱性などを有する各機能性部位を，目的とする表面や，膜内部にサブナノレベルの分子配列を行うための高分子の合成が必要となる。そのために最近盛んに研究され，実用化されつつある原子移動ラジカル重合法に代表されるリビングラジカル重合法などの精密重合法を用いて，これらの官能基がシミュレーションによって計算された三次元空間に配置可能な自己組織的高分子の合成，また遺伝子組み替え技術等を利用して官能基の配列を制御した新規高分子合成手法の確立が必要不可欠である。

さらにこれらの高分子を用いてミクロ相分離等による自己組織化により分離材料の界面において決められた方向性を有するチャンネル構造を形成し，そのチャンネル構造を制御可能な製膜技術の確立が必要である。そのためにはナノオーダーからサブミクロンオーダーにおける相分離形成メカニズムの解明と理論構築，及びこの現象のモデル化を行い，そのモデルを用いた計算機実験による最適製膜条件を検討する必要がある。これらの材料創製法を基本として，分離材料に要求される，より精密制御された材料構造をより低コストに作製する方法の検討が必要である。例えば緻密層と多孔質支持層を同じ材質で作る非対称膜および異なる材質で作る複合膜の両方を検討し，それぞれの最適作製条件を決め，各膜分

離法に最適な薄膜作製法の確立や、熱誘起相分離法(Thermally Induced Phase Separation, TIPS法)などにより高分子濃度勾配や冷却速度勾配を形成させることによる膜孔径の精密制御、非対称構造の作製技術の確立、および親水性高分子と疎水性高分子のブレンド膜や、有機化クレイを用いた有機・無機ハイブリッド膜、ナノ粒子を用いることでシャープに孔径制御された膜の作製、低コストで耐ファウリング性が得られる膜表面処理技術の開発の検討などである。また最近のナノテクノロジー加工技術の駆使により、より高度な性能を有する材料の研究開発が必要である。ナノ粒子、ナノファイバー、ナノポイド、ナノチャネルを形成するナノテクノロジー技術を駆使することにより、より高度な性能を付与することが可能となる。さらに、明確な構造と空間形成を予測できる高分子に樹木状多分岐高分子(デンドリマー)がある。デンドリマーは、その空間をシュミレーションすることが可能であるため、導入する置換基の構造とそこから得られる空間を予想することにより、ナノポーラス、マイクロポーラス特性を発現できると考えられる。

水処理材料の発展から見るとまず形状がイオン交換樹脂や活性炭やキレート樹脂のように三次限的な広がりを持つ粒子状の物質の利用から始まった。次に分離膜に見られるように、二次的広がりを持つ材料の利用が続いた。今後フィラメントや織布または不織布等の形状に加工した一次元の材料としてのナノファイバー等の繊維材料が重要な役割を果たすと考えられる。まずイオン交換樹脂や活性炭やキレート樹脂と同様の機能を付与することができる上に、これらの材料とは異なり固定することが可能であり、分散・消失をおこすことはない。化学触媒や酵素やバクテリア等の「バイオ触媒」の担持と高速反応が可能であり反応と分離の連結に関して分離膜に見られない機能性を付与することが可能である。

さらに、ナノテクノロジーやバイオテクノロジーは水の有効利用のための先進材料創製における革新的手法の展開に必要不可欠である。

第5章 研究推進体制への提言

5-1 水の有効利用に関わる総合的戦略の構築

持続的発展が可能な社会の実現の前提となる水問題を根本的に解決する究極的システムの実現の鍵を握る水の有効利用のための先進材料の研究について、関係する大学や公的研究機関及び企業研究組織が連携した「先進水処理技術研究戦略協議会」(仮称)等を通じて、総合的に戦略を構築して研究を推進しなければならない。水の有効利用は研究者間の相互連携だけではなく、実際にシステムを運用する技術者の強力な援用が必要であり、また社会的な関わりとも強いことから行政等公的機関からのアドバイスも重要である。ここで先進水処理技術研究戦略協議会の役割を以下に示す。

大学、公的機関、及び企業研究組織の水の有効利用のための先進材料の研究推進・連携・方向付け

水の有効利用のための先進材料の研究動向調査

水問題の調査・水問題関係機関・組織との連携推進

水道・下水道事業者、関係省庁等の情報ネットワークの組織化

水道・下水道事業者、水処理エンジニアリング企業との連携/共同研究推進

先進都市水代謝システムの研究

国際共同研究・開発途上国支援等の推進

等である。図3に先進水処理技術研究戦略協議会の概要を、また図4に参加研究機関示す。

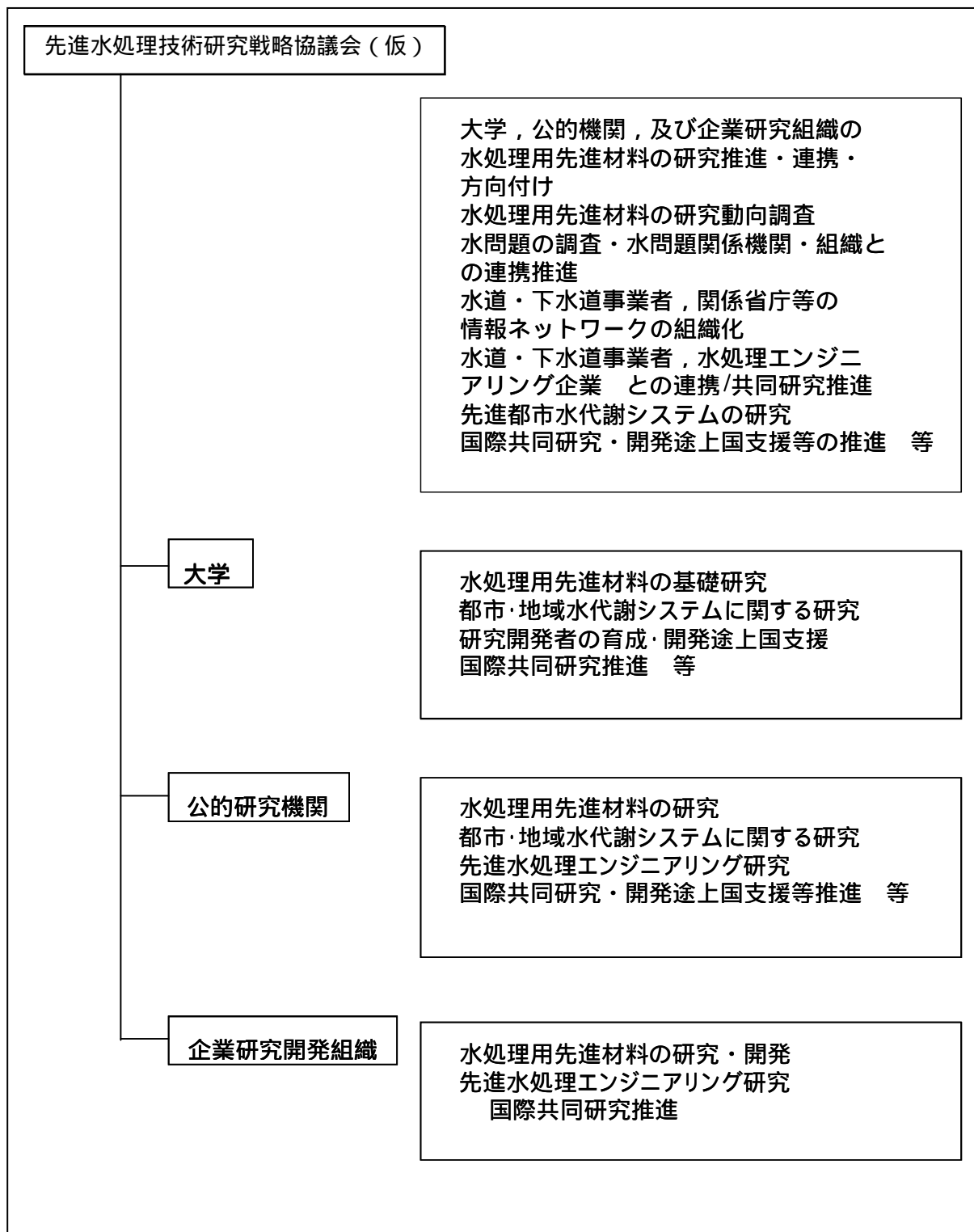


図3 先進水処理技術研究戦略協議会における研究推進体制

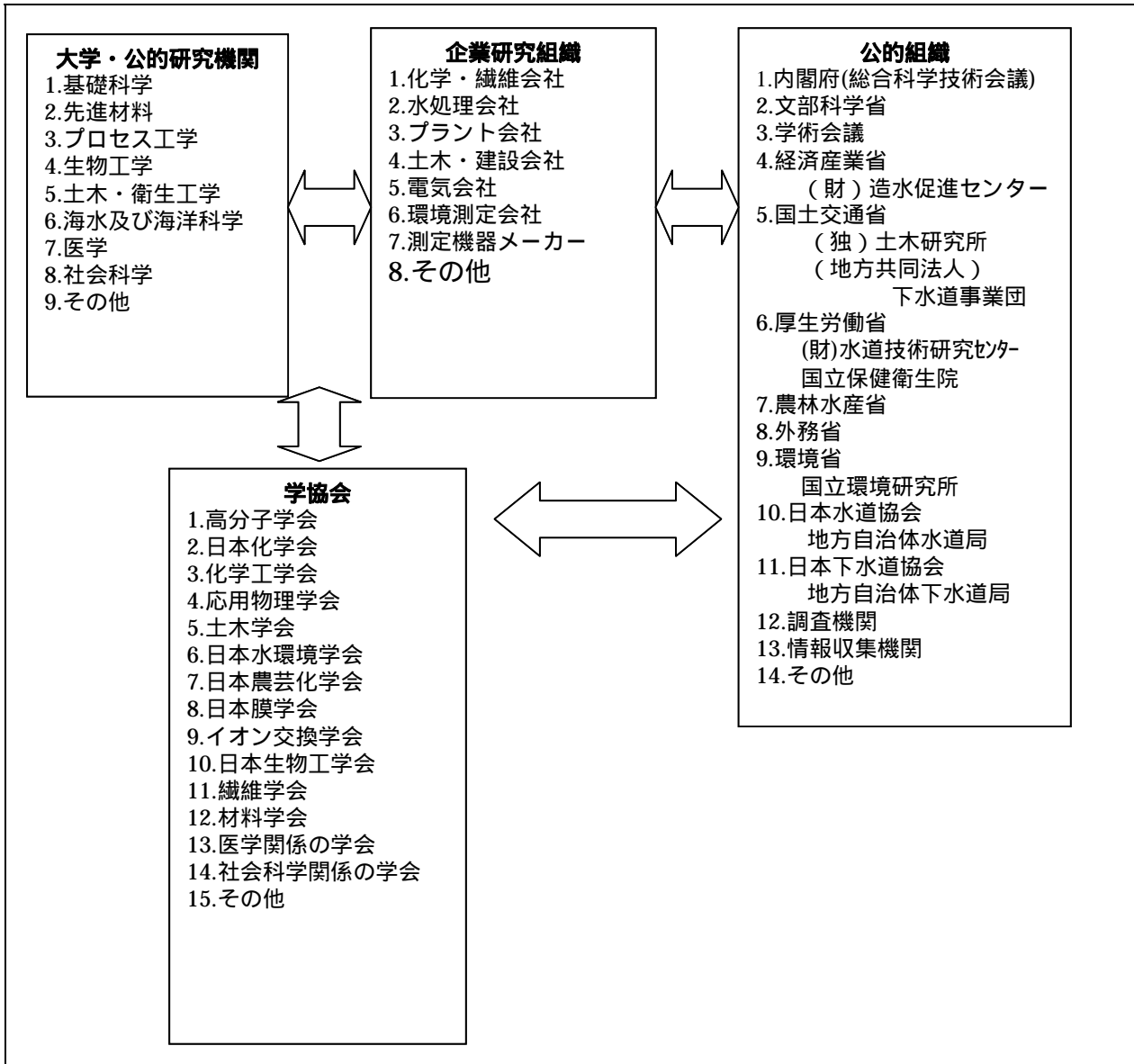


図4 参加研究機関

5 - 2 水の有効利用に関わる基礎および専門技術教育

水の有効利用のためには専門技術者の育成のみならず、水の重要性に対する若年期からの教育や幅広い啓蒙が必要である。

まず専門技術者の育成に関しては、数学、物理、化学、生物学、地学の基礎科学、高分子科学、材料科学、化学工学、生化学、生物工学、土木工学等の科学や工学および医学、農学に対する基礎教育のみならず経済学、法学、歴史学等の文化的素養の育成、マネジメント等の管理能力を得るための教育が必要である。これらの上にさらに水の有効利用のための先進材料開発に携わる専門家の育成・教育、膜システム・先進的水処理システムを取扱う専門家の育成を目指した職業訓練校や高専における技術教育が必要であると同時に大学等における先進的水処理システムに関する基礎教育も怠ってはならない。特に発展途上国では最も水不足が深刻で、今後各種の援助等を通じて先進材料を用いた水供給システムが導入されるにも関わらず、新しい技術を用いた訓練施設等が不足していることからODAを使った外国人の研修等が必要である。

またこれらのことをスムーズに行うためには一般国民および小・中学生等に対して水の重要性や安全性について教育すると共に水利用・水管理についての啓蒙教育が必要である。

5 - 3 水問題解決の重要性と先進材料研究による国際貢献

発展途上国の水問題は、貧困と紛争の原因である。水系感染症やマラリアなどの疾病は労働力を奪い、水汲み時間は労働時間を空費させ、貧困からの離脱を困難にしている。貧困は社会的不安定要因であり国際的紛争の原因となる。飲料水や食糧生産用水の水不足は水資源の争奪の原因となって国や民族間の対立を招き深刻な状況を作り出している。発展途上国の水問題では、当面、安全な飲料水の供給と下排水の処理を進め衛生的な環境を実現することが優先的課題であろう。上下水道施設の整備による保健衛生の改善を通じて貧困から開放されれば、社会的不安の一部は解消され、米ソ冷戦時代以降の世界の不安定要因であるアジア・アフリカ等の発展途上国における争いの緩和に役立つであろう。

欧米先進国やわが国においては、使い捨て物質文明の下で粗放な水利用・水管理を続けることで水資源を浪費して“断流”や地下水の枯渇を招き、河川や湖沼、沿岸海域までも生活排水や人工的化学品で汚染し、その結果飲料水の安全性も懸念される状況に至っている。近い将来、水不足が灌漑農業を破滅に導き、食料生産力を低下させ、国際的問題に発展すると予想される。先進国の水問題では、当面、水道浄水処理方法を高度化して有害化学品や消毒副生成物のリスクを減じ、下排水処理を徹底・高度化して環境水の汚染を食い止めることが優先課題であろう。

しかし、根本的な水問題の解決は、これまでの粗放な水利用・水管理システムを改め、自然の水循環の中で水環境を修復し維持し続けられる社会に改めなければならず、自律分散持続型水処理システムを指向する必要がある。すでに上水道と下水道が普及している先進国が目指すべきシステムは、可能な限り取水量を節減し、排出物を削減して、自然環境、特に水環境への負荷を自然が許容する範囲内に抑制されている持続的発展が可能となるシステムである。そのためには社会システムの変革も必要であろう。上・下水道施設等の整備をこれから進める開発途上国は、先進国が先に歩み経験している環境水の汚染と汚濁、水資源の枯渇、あるいは飲料水の人工化学品や消毒副生成物による汚染等を惹起した 20

世紀型水利用・水管理システムを回避して、自律分散持続型水処理システムを目指した社会基盤の整備を進めるべきであろう。当初から自律分散持続型水処理システムを目指せば、必要な地域に必要な規模とレベルの施設を分散して設置するので整備を進めやすく、自律型であることは住民参加型の運営であり、水資源の節約や環境負荷低減に有利に展開することが期待される。

水は生命の存続に必須の物質であり、われわれ人間の食料生産にも必須の資源である。われわれが直面しつつある水問題は人類の存続に決定的に関わる問題である。地球環境、特に水環境の修復と保全は持続発展型社会の前提になるものであり、水問題解決は21世紀における人類の最大の課題である。自律分散持続型水処理システムは、水問題解決の方向性を示す、おそらく唯一の考え方であろう。われわれが欧米先進国に先駆けて、自律分散持続型水処理システム構築に必要な要素技術の開発を目指して、水の有効利用のための先進材料の研究を進めることは、世界の水問題解決の道筋を具体的に示すことであり、日本の国際貢献は高く評価されよう。

5 - 4 海外における研究動向

水の有効利用のための先進材料の研究に取り組んでいる研究プロジェクトとしては、米国の公的資金によるプロジェクトと私的資金によるプロジェクトが知られている。

一つは、The National Science Foundation (NSF)の Science and Technology Center が進めている Project "Advanced Materials for Water Purification" である。Project Director は、Prof. James Economy, University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC) で、参加研究機関は、Clark Atlanta University (CAU), ETH-Zurich, Southern Illinois University(SIU), Stanford University, University of California at Berkeley, University of California at Santa Barbara (UCSB), University of Illinois at Urbana-Champaign で UIUC が幹事機関となっている。Applied Membrane Technology, Bioscan A/S, British Petroleum, Caterpillar, EFX Systems Inc., ONDEO Nalco, Pall Corporation などの民間会社が参画している。

他に米国の National Water Research Institute(NWRI) の活動がある。NWRI は、1991年に南カリフォルニア水道局が私的財団の協力を得て設立した研究組織であり、共同研究活動を通じて水供給と水環境の保全、維持、修復を促進することを目的にしている。NWRI は水に関する研究を専門とする世界で唯一の私的基金による機関であり、その運営は研究評議委員会の広範な活動に委ねられている。委員会は全国から選ばれた水科学の専門家で構成されていて、この12年間、優秀な経済学者、エンジニア、微生物学者、水理学者、地理学者、政治学者、及び弁護士らが NWRI の研究プロジェクトの発展に寄与している。

ヨーロッパに関しては、ドイツに水科学に関する研究組織があるが、その活動内容の詳細についてはよく分かっていない。フランスやオランダには水処理技術に関して活発な活動をしている企業や研究機関がある。特にフランス企業のオンデオやビベンディは促進酸化法や膜技術を取り入れた先進的な浄水場をフランス、オランダなどに建設・運営しており注目される。スウェーデンでは各種の膜処理技術を適用した変形二元給水法の実施設による検討例が報告されている。

しかし、欧米の水処理材料の研究が社会システムの変革までも視野に入れた自律分散持

続型水処理システムのような構想の下で総合的に取り組んでいるか否かは不明である。

なお、米国における研究状況や、ヨーロッパにおける水問題に関する研究の取り組み状況を把握するため、今回改めて米国及びヨーロッパ各国に調査団を派遣した。

また、NWRI を代表する Dr.Linsky からわが国の膜技術研究者に呼びかけがあり、2004 年 3 月 29 日～31 日に The First Pacific Rim Quantum Leap Membrane Research Symposium (Honolulu Conference)が行われた。Membrane Research for Water をテーマとする日本、米国、中国、オーストラリア、シンガポールの 5 カ国の研究者・技術者による国際会議として開催され、水問題の国際共同研究として進めてゆく意図が込められている。

5 - 5 国内の水環境における産官学連携基礎研究プロジェクトとの関係

国内では、日本学術会議が

また、総合科学技術会議における環境分野の取り組みの中で「自然共生型流域圏・都市再生技術研究」として水環境と関係の深い研究が取り上げられている。環境分野の研究は科学技術基本計画で戦略的重点化分野に指定され、総合的な研究の展開が求められており、水循環・水環境に関する様々な共同研究が、各省庁、独立行政法人、大学、民間研究機関との連携で進められている。しかし、ここで取り上げられている研究には、水利用・水管理システムを中心に据えており、多様な水資源を多段に水質で使いわける重層的な自律システム群からなる社会システム構築に向けて、そのような社会で必要とされる要素技術や必要な先進材料の開発を意図する研究はない。

科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(CREST)の「環境低負荷型の社会システム」領域平成 8 年度採択研究課題「質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築 - 構造的な濁水と水質汚濁からの脱却 - 」は、本提案と同様の水利用・水管理システムを指向する研究であるが、必要な要素技術を構成する先進材料の研究を中心的課題とする研究プロジェクトではない。

わが国の当該分野の研究については、水環境分野における産官学協調の必要性は認識されているが、具体的な方法や目指すべき方向についてはコンセンサスが得られておらず、水環境に関する研究は基礎科学ではなく応用科学の範疇の研究であるとする認識が一般的であり、従来技術・材料の組み合わせを前提とした研究にとどまっていると思われる。

従って本提案における研究は、これまでとは異なり「質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システム」をさらに発展させた社会システムを想定した「自律分散持続型水処理システム」の構築に必要とされる水処理用先進材料の研究を目指すものである。

5 - 5 本研究課題のわが国経済発展に対する貢献

21 世紀は、開発途上国の人口増加と生活用水及び食糧生産用水等の水需要増加で、深刻な状況と水をめぐる紛争多発が予想され、水問題が国際的最重要課題になると予想されている。さらに先進国においても、水問題は持続発展型社会を実現するために根本的に解決されなければならない最重要課題であることの認識が深まろう。

このような国際社会において、環境技術、特に水処理に関する技術は、最も重要な技術として位置付けられよう。環境技術は知識集約的技術であり、固定的設備だけでなく経験と運転管理のノウハウが安定したシステム運営を左右する分野である。環境技術先進国で

あることを自負し、人的資源以外に天然資源に乏しいわが国にとって技術立国は唯一のいきる道であり、水利用・水管理技術において欧米先進国に先駆けて革新的な水処理システムを構築し、必要な要素技術及び先進材料の開発で優位に立つことが出来れば、世界貢献に役立つだけでなく、先進材料開発・生産、水処理要素技術の開発・設備産業の活性化、環境技術の輸出を通じて環境産業の活性化、ひいてはわが国の経済的発展へ貢献することが可能となろう。そして持続発展型社会の構築に寄与する科学・技術、産業が世界的に高く評価される時代が到来するであろう。

第6章 結語

地球規模での人口の増加と乾燥地域の拡大に伴う水の不足は世界経済に大きな影響を及ぼし環境の劣化をより促進すると考えられる。このような、21世紀の水問題は、飲料水のみならず食糧生産用水の確保に伴う諸課題の解決であることは言うまでもないが、これら突き詰めれば都市用水と都市下水の問題に収斂する。この問題を解決するカギとして、20世紀の後半に新たな水処理の基本技術として実用化された各種分離膜や吸着材をはじめとする水の有効利用のための新素材の出現で現実性を与えられた、小規模・分散型のシステムを重層構造的にネットワーク化した自律分散持続型水処理システムである。しかしながら、実用化の進展とそれに伴う利用地域の拡大によりこれまでの材料では解決できない重大な問題が数多く存在し、水の有効利用を行う上で必要不可欠な本システムの構築には大きな障害となることが明らかとなって来た。そこで、水の有効利用に必要な先進材料の創製を積極的に展開する必要とする上で重要な課題である微量物質の高度認識、水の高透過性、反応と輸送の高連結性、ファウリング初期の検知と回避、システムの最適化、製造工程の単純化などに焦点をあて、従来材料の問題点、新しい材料のあり方とそれを飛躍的に推進するための具体的な展開の方法を中心に提案を行った。

また本報告では、持続的発展が可能な社会の実現の前提となるこのような水問題を根本的に解決する究極的システムの実現の鍵を握る水の有効利用のための先進材料の研究について、関係する大学、公的研究機関、企業研究及び技術組織、行政機関等が連携し、総合的に戦略を構築して研究を推進する必要性を述べた。また教育の整備についても提言した。

主な参考文献

1. 丹保憲仁・丸山俊明編：水文大循環と地域水代謝，技報堂出版，2003．
2. 世界の水ビジョン 川と水委員会編：世界水ビジョン，山海堂，2001．
3. 国土交通省土地・水資源局水資源部編：日本の水資源（平成 14 年度版），財務省印刷局，2003．
4. 厚生労働省：生活環境水道部会・第 4 回水質管理専門委員会検討資料 水道，Vol. 47 ， No.12 ， pp . 59-71 （2002）．
5. （社）日本水道協会：WHO 飲料水水質ガイドライン（第 2 版）第 2 巻，1999．
6. 西村哲治・内海英雄：未知化学物質にどう対応するか - バイオアッセイによる有害負荷量の把握に向けて - ，水環境学会誌，Vol.24，No.8，16-20（2001）．
7. 森田昌敏：水環境分析～20 世紀の遺産と今後の課題～，水環境学会誌，Vol.24，No.8，2-5（2001）．
8. 黒田洋一郎：アルツハイマー病，岩波書店，1998．
9. 亀田泰武・渡部春樹・金井重夫・野村充伸著：新版 下水処理と水環境，山海堂，2000．
10. 高橋 裕著：水の国際化と日本，科学，Vol.73，No.2，202-206（2003）．
11. 武田育郎：水と水質環境の基礎知識，オーム社，2002．
12. 高橋 裕著：地球の水が危ない，岩波書店，2003．
13. 特集：水環境における産官学連携，水環境学会誌，Vol.26，No.2，1-25（2003）．
14. 松井三郎：「世界水ヴィジオンから見た日本の上下水道の検証」，水道公論，Vol.38，No.1，26-29（2002）．
15. 平山和徳：「健全な水代謝システムの構築に向けて」，水環境学会誌，Vol.24，No.7，7-11（2001）．
16. 稲葉紀久雄：進化下水道学から見た経営論」，水道公論，Vol.38，No.7，27-30（2002）．
17. 渡辺義公：科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（CREST）平成 8 年度採択研究課題「質に利用を中心に据えた新しい都市水代謝システムの構築 - 構造的な濁水と水質汚濁からの脱却 - 」研究成果発表シンポジウム予稿集，2002．
18. 熊谷和哉：水循環と水道，水道，Vol.48，No.4，16-24（2003）．
19. 松井三郎監訳・著，清水芳久・松田友成・内海英樹他訳：都市水管理の先端分野 行きづまりか希望か，技報堂出版，2003．
20. マルク・ド・ヴィリエ：ウォーター 世界水戦争，共同通信社，2002．
21. 藤木 修：世界のサニテーション問題をどうするか，水道公論，Vol.39，No.3，35-41（2003）．
21. 小倉健二：人口爆発と水不足 - 人口増に食料生産は追いつくか（1），水，Vol.45-6，No.641，66-72（2003）．
22. 小倉健二：人口爆発と水不足 - 人口増に食料生産は追いつくか：（2），水，Vol.45-12，No.647，63-70（2003）．
23. 氏岡庸士：世界の水道民営化最前線 1～25，最終回，総括編，水道産業新聞，2001．
11．1～2002．10．10

24. ジェフリー・ロスフェダー：世界の水危機と水戦略 水をめぐる危険な話，河出書房新社，2002．
25. (財)水道技術研究センター：浄水技術ガイドライン，(株)日本水道新聞社，2000．
26. 真柄泰基：平成 10～12 年度厚生科学研究費補助金生活安全総合研究事業総合報告書「水道における化学物質の毒性，挙動及び低減化に関する研究」．
27. (オゾン水処理研究会)：オゾン利用による水の蘇生技術，サンヨー書房，1997．
28. 中島英一郎：下水処理技術の新たな方向，水道公論，Vol.38、No.7、43-46 (2002)．
29. 膜分離技術振興協会・膜浄水委員会監修：浄水膜，技報堂，2003．
30. 日本膜学会・(社)日本能率協会：第 20 回ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2003 予稿集．
31. 造水技術シンポジウム「21 世紀の水問題と先端水処理技術の展望」,造水技術 ,Vol.28 , No.1 , 3-19 (2002)．
32. 第 6 回水資源に関するシンポジウム「21 世紀の水問題」～そのブレークスルーは可能か?～，水道公論，Vol.38，No.12，24-37 (2002)．
33. 熊谷和哉：有害物質の水環境管理について(上) 水道，Vol.49，No.2，1-10(2004)．