

## 6 我国における富栄養化対策の中核としての霞ヶ浦水質浄化プロジェクト

茨城県地域結集型共同研究事業霞ヶ浦水質浄化プロジェクトは、平成9年11月に科学技術庁(現文部科学省)の事業採択を受け、科学技術振興事業団からの受託事業として5年間の計画で共同研究を進めているものである。この事業では、大学、独立行政法人、県の試験研究機関、研究開発型企業が結集し、「生態工学を導入した汚濁湖沼水域の水環境修復技術の開発とシステム導入による改善効果の総合評価に関する研究」をテーマとして、汚濁湖沼の水環境修復技術の開発に取り組んでいる。

茨城県内の霞ヶ浦は、我が国第2の水面積を有する淡水湖で、上水をはじめ工業、農業用水、さらには、淡水漁業等を支える重要な水資源であるにもかかわらず、水質が環境基準をはるかに超える状況が続いており、夏季には有毒藍藻類が繁茂し、なおかつ、年間をとおして糸状性藍藻類が顕在化している。このため、利水障害、景観の悪化をはじめとする解決すべき様々な水環境問題が山積みとなっている。したがって、これらの問題を解決していく上では藍藻類に異常発生の要因となる窒素、リンの除去に的を絞った抜本的対策を緊急に実施する必要がある。とくに、有毒藍藻類による被害は世界各地で顕在化しつつあり、世界保健機関(WHO)では藍藻毒のmicrocystinに対し、飲料水としてのガイドラインを設定したところである。このような、人間生命にも危険を及ぼす状況に水源が陥っていることから、その対策は緊急を要するものである。平成7年につくば市、土浦市で開催された「第6回世界湖沼会議」における「霞ヶ浦宣言」に基づいて、霞ヶ浦を抱える茨城県が強力なリーダーシップをもって、湖沼等の水環境修復・改善の世界的な発信の場となることが必要不可欠な状況となっている。

本事業では、湖沼の水環境の健全化に向けた対策の効果を県民の目にみえる形にすることを念頭に置き、産官学が有機的に連携し、水環境修復にかかる要素技術としての処理技術、モニタリング技術、マルチビジョン化技術等を開発し、なおかつ、これらの技術の汎用化と普及を目指したベンチャー産業を創出して、霞ヶ浦およびその流域に最適な形で導入するとともに、県内の産業の活性化を図ることを目標として推進することとしている。さらに、茨城県が建設計画を進めている「霞ヶ浦環境センター(仮称)」を水環境研究の世界的な発信機関として機能させるための基盤を創り上げると同時に、霞ヶ浦環境センターを核とした湖沼環境修復技術のメッカともなる地域COE(Center of Excellence)を構築し我が国のみならず世界に誇れる21世紀を先導するノウハウの集積された「霞ヶ浦宣言」を実行できる拠点を確立することを目指している。

窒素、リン除去を行う上では、発生源対策と直接浄化対策が必須であり、各対策を行うための要素技術の開発および各開発技術を霞ヶ浦およびその流域に効果的に導入するための水質の現状把握と導入後の改善予測技術の開発が必要不可欠となる。これらの要素技術の根幹となるのが生物処理工学としてのバイオエンジニアリングおよび自然生態系に工学を導入した生態工学いわゆるエコエンジニアリングであり、また、各要素技術の最適導入を達成するためのモニタリング・解析・評価・予測技術等が本事業における開発課題としてあげられた。

これらの開発課題は、霞ヶ浦と同様の貴重な水資源の富栄養化問題を抱える開発途上国においても同様であり、本事業は、このような問題を解決する上での国内外における対策技術開発研究のイニシアチブとして重要な位置づけにある。

本事業では、これらの側面から省エネルギー、省コスト、省維持管理を可能とした開発途上国の富栄養化対策にも適応可能なバイオ・エコエンジニアリングを基調とした水環境修復の技術開発および面的整備手法の確立の研究を推進してきており、以下にこれまでの研究成果を紹介する。

## 6-1 バイオエンジニアリングを活用した発生源対策

霞ヶ浦の富栄養化のは生活排水由来の窒素，リンの流入が大きな原因となっている。しかしながら，霞ヶ浦流域の下水道普及率は50%にも達していないのが現状である。これまで，霞ヶ浦流域は，人口の分散している地域が多いため，生活排水対策には下水道と相対する浄化槽が導入されてきた。ところが，導入されてきた浄化槽は，BOD(生物化学的酸素要求量)の除去のみに主眼がおかれ，窒素，リンの除去工程が組み込まれていなかったために，霞ヶ浦の富栄養化の防止に貢献することができていなかった。この結果は，汲み取り便所で生活雑排水の垂れ流しを現状として，それを水洗化した場合の汚濁負荷量の増減か

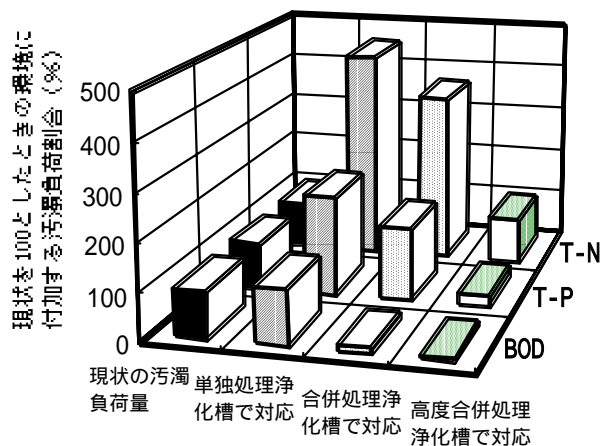


図 6-1-1 生活排水対策としての下水道，農業集落排水処理施設に共通する浄化槽のタイプの違いによる除去特性と窒素，リン削減強化の必要性

らみても理解できる(図 6-1-1)。すなわち，下水道で処理した場合の BOD, T-N (全窒素), T-P (全リン) の環境に与える汚濁負荷を 100 とすると，し尿処理浄化槽での処理のみでの T-N, T-P の汚濁負荷は，それぞれ 5 倍，2.5 倍となり，下水道での処理によるの負荷を大きく上回ることになる。一方，し尿と雑排水を一括処理する合併浄化槽においては，BOD の負荷は低減できるものの，T-N, T-P の負荷はそれぞれ 4 倍，2 倍となり，低減化は達成できない。とくに，霞ヶ浦流域は，水質汚濁防止法に基づく上乘せ排水基準の生活環境項目に窒素，リンが掲げられ，T-N (全窒素) として  $10\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下，T-P (全リン) として  $1\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下に基準化されている。したがって，霞ヶ浦の富栄養化防止の抜本的対策として，下水道と同等もしくは，それ以上に T-N, T-P も高度に除去可能な高度合併処理浄化槽を開発し，普及させることが極めて重要な課題となる。このような背景のもと，本事業では，生活排水由来の発生源対策として，BOD, 窒素，リン濃度として各々  $10\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下， $10\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下， $0.5\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下の処理水質を満足することができるバイオエンジニアリングを確立し，普及させることを目的として，種々の要素技術の開発を行ってきた。

### (1) 高度処理型浄化槽システム

窒素除去方法は，微生物のはたらきを利用した生物学的除去方法とアンモニアストリッピングやゼオライト吸着などの物理・化学的除去方法に分けることができる。生活排水中の窒素形態は有機体窒素とアンモニア態窒素であり，全窒素濃度は双方を含め約  $50\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  である。高度合併処理浄化槽の場合は，下水処理場のように，管理者が常時監視できないので，維持管理の容易性，構造の簡素化，さらには運転コストの低減化を可能にするため生物学的除去方法が採用されている。窒素除去における生物反応は，有機体窒素を基点とすると，脱アミノ反応，硝化反応，脱窒反応の 3 段階で進行するが，高度合併処理浄化槽は，これらの反応が円滑に進むように嫌気槽，好気槽，沈殿槽，循環ライン等が一つのユニ

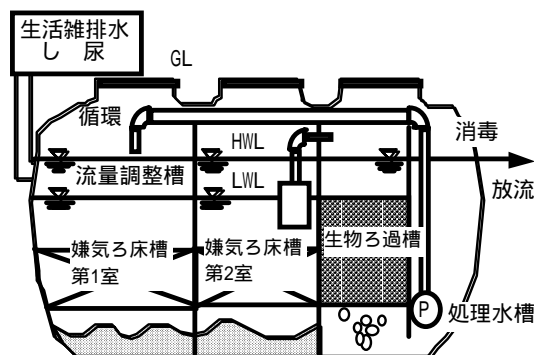
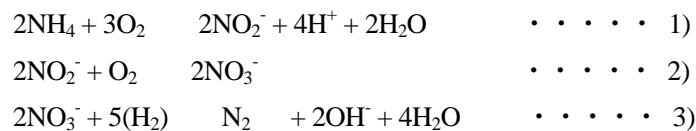


図 6-1-2 生物ろ過方式高度合併処理浄化槽

ットになっている。図 6-1-2 に高度合併処理浄化槽における窒素除去のフローを示す。なお、この浄化槽は 1 日 2 回の流入ピークに対応した流量調整型の高度合併処理浄化槽の一例である。まず、排水は、嫌気第 1 槽に入り、嫌気第 2 槽に押し出し移送される。これらの嫌気槽では有機態窒素は嫌気性細菌によりアンモニア態窒素に還元される。嫌気第 2 槽の処理水は、エアリフトポンプで、好気槽に定量移送される。好気槽では、アンモニア態窒素は硝化細菌により硝酸態窒素に酸化されるが、この反応は 2 段階で進行する。まず、アンモニア態窒素はアンモニア酸化細菌により式 1) のように亜硝酸態窒素まで酸化され、続いて、亜硝酸態窒素は、式 2) のように亜硝酸酸化細菌により硝酸態窒素



へと酸化される。この硝酸態窒素を含む処理水は、沈殿槽に押し出し移送され、ここから循環ラインを通過して嫌気槽第 1 室に連続的に返送される。嫌気槽第 1 室では、返送された処理水中の硝酸態窒素が 3) 式のように脱窒細菌により窒素ガスまで還元される。

脱窒に關与する細菌は一般的な通性嫌気性細菌である。この細菌は、水中に溶存酸素がある場合は、その酸素を利用するが、脱窒槽のように溶存酸素がない場合には、硝酸、亜硝酸中の窒素に結合する酸素を利用するという呼吸形態となる。3) 式の原系に示される水素は、流入排水の有機物(炭水化物など)として供給される。有機物量は、BOD 量として、脱窒しようとする窒素量の約 2.5~3 倍量が必要となる。これらの窒素除去プロセスは循環脱窒法とよ



写真 6-1-1 多孔質ヘドロセラミックス担体

ばれ、排水中の BOD/N が 2.3 以上(生活排水は約 4.0)ある場合の排水の窒素除去に有効である。このように、高度合併処理浄化槽において、窒素は硝化細菌と脱窒細菌の働きによってガス化されて除去されるという原理を利用するが、本事業では窒素除去の律速段階である、硝化反応の進行する好気槽に硝化細菌を高密度定着させ、安定した窒素除去が図れるような微生物付着担体の開発を行った。開発された担体は、多孔質のセラミック担体(写真 6-1-1)であるが、この原料は、霞ヶ浦の富栄養化を改善するために湖底から浚渫されたヘドロである。ヘドロセラミックスの製造工程は(5)で述べるが、これまで、霞ヶ浦の浚渫ヘドロは、その沿岸に処分地を設け埋め立て処分されていたが、本事業では、このヘドロから霞ヶ浦の富栄養化を防止する上での重要な役割を担う高度合併処理浄化槽の微生物付着担体として有効活用することに成功した。

## (2) リン除去・資源回収システム

富栄養化の原因物質であるリンの除去は、微生物の作用では限界があるため、本事業では、物理化学的にリンを除去するための 2 つの方法を開発した。一つは、図 6-1-3 に示すように、鉄電解リン除去プロセスで、高度合併処理浄化槽の後段に 2 枚の鉄電極を浸漬させ、この電極に微量な直流電流を与え、陽極から発生した三価の鉄イオンと水中のオルトリン酸イオンを結合させ、リン酸鉄にして沈殿させることでリンを除去する方法である。沈殿したリン酸鉄は余剰汚泥とともに引き抜き、コンポスト化することによって農地等で再利用するものである。これまで、ヘドロセラミックスと鉄電解リン除去プロセスを採用した高度合併処理浄化槽の実証試験において、BOD  $10\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下、T-N  $10\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、T-P  $0.5\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下の性能が得られること、鉄電極から溶出する鉄イオンが汚泥の凝集化を促進

し、固液分離能を向上させること、余剰汚泥の発生量も従来の高度合併処理浄化槽と変わらないことが明らかとなった。

もう一つは、リン吸着担体を利用したリン除去方法である。リンは富栄養化の原因物質であるが、農業、工業生産にとって不可欠な資源であり、年間140万トンを超えるリン鉱石を輸入している。ところが、リンは石油と同様に枯渇する資源であるため、アメリカ合衆国では、国内でのリンの枯渇を防止するためにリン鉱石の輸出を全面禁止する方策を講じるようになった。日本では、リン鉱石資源がないため、ほぼ100%海外からの輸入に依存し

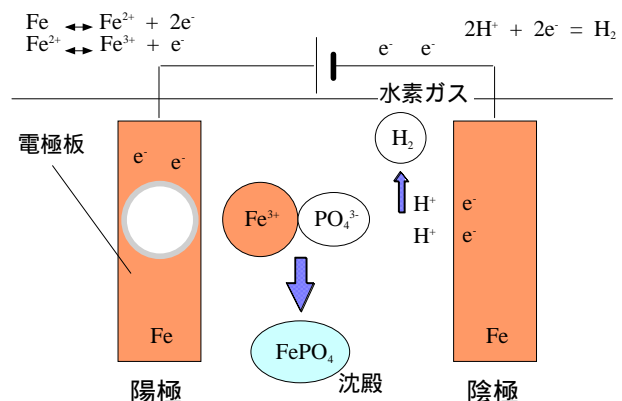


図 6-1-3 鉄電解リン除去プロセスの原理

ており、その約30%をアメリカ合衆国から輸入している。他の輸出国においても輸出禁止措置やリン鉱石の高騰が懸念される。したがって、今後の日本においては、国内に存在するリンを回収しリサイクルする社会システムを構築していく必要がある。そこで、リン吸着担体を利用したリン除去方法の開発においては、図6-1-4に示すように、リン資源の回収、リサイクルシステムの構築を目標とした。

使用するリン吸着担体は0.7mm球状のジルコニウムフェライト系である。実証試験では、この担体が充填されたカラムを高度合併処理浄化槽の後段に設置し、処理水中のリンを吸着させ、およそ3ヶ月に1回吸着担体をリン回収モデルステーションに持ち込み、そこで7%水酸化ナトリウム溶液で吸着担体からリンを脱離させ、さらに、水酸化ナトリウム溶液の濃度を上げて晶析させ90%以上のリン酸ナトリウムとして回収する。脱離後の吸着担体は硫酸酸性で活性化させ、pHを中性付近に調整して、再び高度合併処理浄化槽の後段カラムに充填する。この方法によ

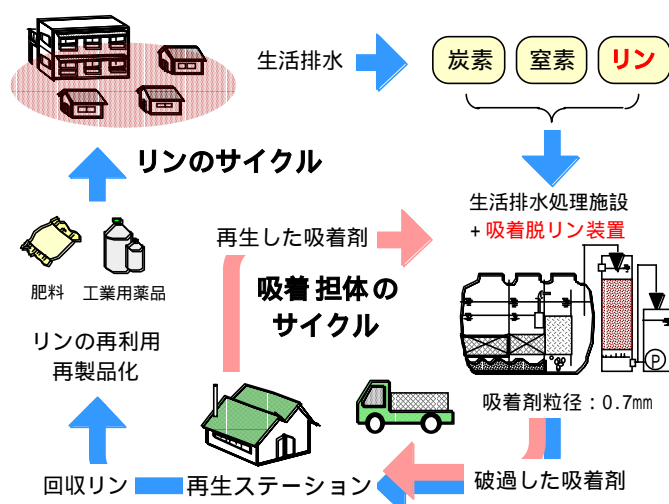


図 6-1-4 リン資源の回収・循環型社会システムのフロー

って、BOD  $10\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下、T-N  $10\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、T-P  $0.5\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以下の高度処理が達成されるとともに、枯渇資源としてのリンの高純度回収も可能となる新たなリン回収型資源循環システム技術の開発へと大きく進展させることができた。

### (3) 有用微生物の高密度化システム

生活排水を高度処理する上で、重要な役割を担うのが有用微生物である。高度合併処理浄化槽においては、処理水の透明度に貢献する微小動物、アンモニアの硝化、脱窒化に貢献する硝化細菌、脱窒細菌の反応槽への高密度定着化が極めて重要である。このことをふまえ、水の透明度を高める輪虫類 *Philodina* 属 (図6-1-5) の高度合併処理浄化槽への高密度化手法の開発を行い、スポンジ担体を利用した生物ろ過法において、高密度定着化を実現し、これによって、処理水の透明度を極めて高い状態に維持できることがわかった。さらに、*Philodina* 属の増殖促進成分が穀物残さに含まれている

ことを見出し、この穀物残さで *Philodina* 属の大量培養に成功し、しかも、この穀物残さを添加することによって、生物ろ過法のような混合微生物生態系のなかで *Philodina* 属を選択的に高密度化できることを明らかにした。有用微生物を高度合併処理浄化槽へ供給する上では、利用し易い形態にする必要があるが、*Philodina* 属の場合、増殖促進成分とともに製剤化して供給できる可能性もでてきている。こうした研究の成果は、処理機能の向上に有用な微生物を製剤化して流通させるという、新たな環境産業の創造に大きく展開できると考えられる。

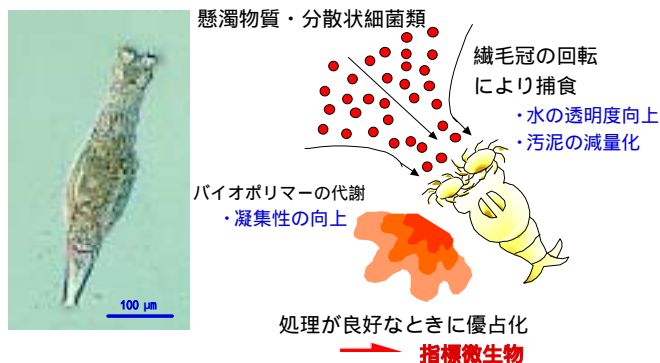


図 6-1-5 輪虫類 *Philodina erythrophthalma* の特性

#### (4) ハイブリッド型河川・水路浄化システム

生活雑排水は、霞ヶ浦の汚濁負荷の大きな原因であるが、霞ヶ浦流域では、雑排水が十分に処理されずに水路や小河川に放流されるケースが多い。水路や小河川に放流された雑排水は、やがて本流河川と合流し霞ヶ浦へ流入する。このため水路・小河川の多くは霞ヶ浦への汚濁負荷の流入経路となっている。そこで、本流河川および霞ヶ浦に流入する手前で汚濁負荷を低減化するための水路・小河川浄化の技術開発が必要となった。水路・小河川は地域によって水量、汚濁状況、規模が異なるため、浄化技術は適所に応じて開発する必要がある

が、とくに、開発のポイントを維持管理の容易性と低コスト化に絞った。比較的水量が多く汚濁が著しい水路・小河川を対象に、嫌気・好気循環セラミックス充填プロセスに脱リン吸着プロセスを組み合わせたリン資源回収型浄化システムの開発を行い、年間をとおした実証試験により適用できる可能性の高いことを明らかにした。また、比較的水量が少ないケースを対象に、夾雑物除去・植栽・土壌浄化（花水路）システム(図 6-1-6)の開発を行っている。

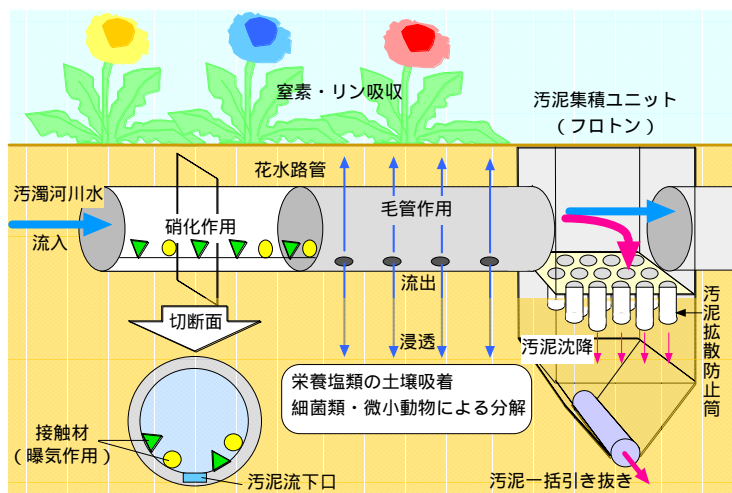


図 6-1-6 花水路システムにおける汚濁水の浄化機構

これらのシステムで  $BOD\ 10mg \cdot l^{-1}$  以下、 $T-N\ 10mg \cdot l^{-1}$ 、 $T-P\ 0.5mg \cdot l^{-1}$  以下の性能が得られることが明らかとなってきたが、さらにシステムの簡易化・システムの低コスト化の技術開発の実証化研究を行っていくこととしている。

#### (5) 無循環型土壌トレンチ浄化システム

生活排水対策を効果的に実施するためには、敷地の制約の有無により適用する浄化システムを選定する必要がある。すなわち、敷地に大きな制限があるところでは、高度合併処理浄化槽のようなバイオエンジニアリング活用型浄化システムの設置が有効と考えられるが、敷地が広く利用可能なところでは、エコエンジニアリング活用型浄化システムの適用が有効と考えられる。ここでは、土壌の浄化力を活用し、無動力でミニマムエネルギー方式の技術として嫌気ろ床・土壌トレンチをセットとして、

これを目標水質に応じて、2セット、3セット接続する新技術の開発を行った(写真6-1-2,図6-1-7)。これまでの実証試験においては、3セット接続された嫌気ろ床・土壌トレッチシステム、すなわち、第1嫌気ろ床槽、第1土壌トレッチ、第2嫌気ろ床槽、第2土壌トレッチ、第3嫌気ろ床槽、第3土壌トレッチの順に配置したシステムに排水の流入分配比を第1嫌気ろ床槽へ5、第2嫌気ろ床槽へ3、第3嫌気ろ床槽へ2に設定することにより、無循環、無動力でBOD 10mg・l<sup>-1</sup>以下、T-N 10mg・l<sup>-1</sup>、T-P 0.5mg・l<sup>-1</sup>以下の処理性能が得られることが明らかとなった。本システムは敷地に余裕のある農村地域や開発途上国に適した方法であると考えられるが、本研究では、県内の農村地域の生活様式を対象とした流入負荷変動と性能との関係を実証研究により明らかにすることとしている。



写真6-1-2 無循環型土壌トレッチシステムの写真

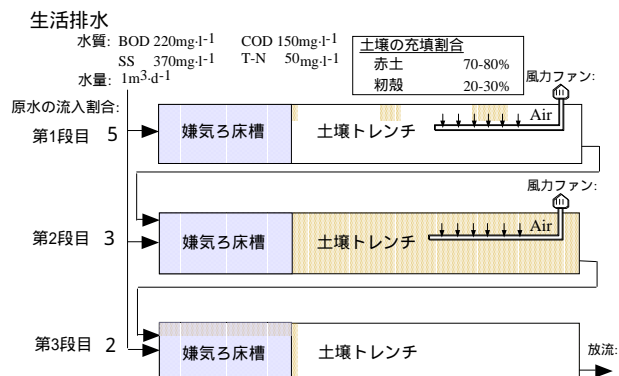


図6-1-7 無循環型土壌トレッチシステムの浄化フロー

## (6) 電気化学的浄化システム

排水処理の多くは生物処理方式が活用されているが、電気化学的浄化システムは、電気化学的技術を活用したものである。排水を物理化学的に処理する上では、多くの場合、排水に含まれる懸濁性有機物の分離を容易にするために凝集剤などの薬剤投入を必要とする。しかし、この方式は、薬剤投入が不要である。一般的に、電気化学的処理には、懸濁性有機物の浮上作用、凝集沈殿作用、酸化作用がある。排水中の懸濁性有機物、溶溶性有機物は、この3つの作用によって除去される。そのなかの酸化作用は溶溶性有機物の除去にとって最も重要なものであり、酸化は、直接酸化と間接的酸化に分けられる。直接酸化はTiO<sub>2</sub>、SnO<sub>2</sub>などの酸化金属の触媒作用によって有機物が直接に電極の酸化金属表面で酸化される。間接的酸化は陽極放電によって水から生成されたヒドロキシルラジカル(・OH)によるものである。本開発研究では、これらの原理を排水処理分野で効率よく活用するための詳細なメカニズム解明および処理費用、施設面積、投入エネルギーを考慮した実用可能な排水処理のリアクター化を行ってきた。これまでの成果として、パイロットプラントスケールの電気化学的高速排水処理装置(処理能力:7.2t・day<sup>-1</sup>)の開発に成功した。システムのフローを図6-1-8に示す。スクリーンで原水に含まれる大きな固形物を取り除いた後に酸化槽で約15min凝集沈殿処理し、沈殿槽1で固液分離した上澄みを還元槽で15min処理し、沈殿槽2で固液分離した上澄みを放流する。酸化槽には低電圧がかけられ、主に活性酸素ラジカル(・O)が生成される。還元槽には高電圧パルスがかけられ、主にヒドロキシルラジカル(・OH)が生成される。酸化槽および還元槽には酸化金属(主にTiO<sub>2</sub>)電極が設置されている。生活排水およびアオコ含有湖水に対する本装置の実証試験を行った結果、生活排水に対してT-N、T-P、NH<sub>4</sub>-N、CODの除去率は、それぞれ83%、97%、89%、86%であった。アオコ含有湖水に対してT-N、T-P、CODの除去率は、それぞれ84%、94%、92%で、SS、クロロフィルaは99%以上となった。処理過程で、凝集剤は添加しなかったが、処理水は清澄になった。このように、有機物の

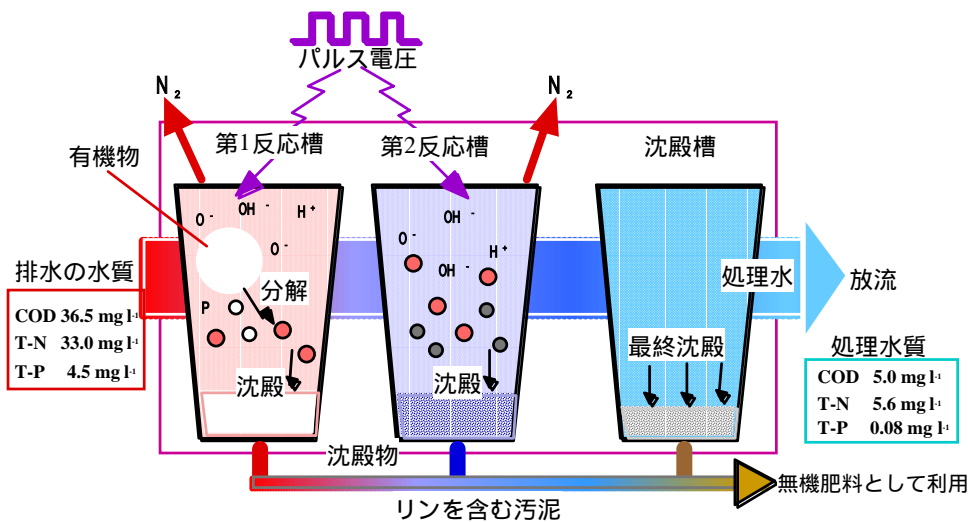


図6-1-8 電気化学的浄化システムの処理フロー

反応を早め、脱窒を促進し、反応残さの凝集化にも優れていることが実証できた。さらに、従来までの電気化学的処理方式の3分の1までの低コスト化できる可能性が示されてきている。

## 6 - 2 エコエンジニアリングを活用した湖内対策

湖沼の富栄養化は、河川などからの外部負荷のほかに、底泥からの内部負荷も原因とされている。この底泥からの内部負荷、すなわち窒素やリンの溶出は、湖底に蓄積した過剰な有機物が微生物によって分解される際に、底泥付近の溶存酸素を消費して貧酸素状態になると増大する。このため、湖内の直接浄化対策は、有害藍藻類の分解・除去技術、窒素・リンの直接除去技術に加え、底泥への有機物の蓄積を抑制および底泥からの窒素・リンの溶出抑制を目的とした技術も開発課題となっている。

### (1) 水耕栽培バイオパーク方式浄化システム

水生植物として、アシ、ガマ等を活用した浄化技術は、従来から研究されてきたが、これらは資源回収とリサイクルに難点があるのも事実である。このことをふまえ、本開発研究では、食用の植物を活用した浄化方式、すなわち食用植物水耕栽培浄化のシステム化のための技術開発を行ってきた。これまで、クレソン、クウシンサイなどの食用植物を植栽したバイオパーク方式の浄化システムを製作し、水質浄化能の検討を行った。その結果、浄化速度はアシ、ガマの10倍近くあり、かつ、植物の適切な間引き収穫を行うことにより、浄化能力の保持が可能であることが明らかになった。さらに、植物を間引き収穫するというこの方式は、生産物としての有価物資源の回収も可能であることが明らかとなった。また、植物の根圏には、シジミ貝の大量繁殖が認められ、その成長過程などをモニタリングした結果、浄化機能に大きく貢献していることが推察された。シジミ貝は、ろ過摂食性のベントスで、水中の懸濁物を捕食し、水の透明度を飛躍的に向上させる作用があり、しかも、食用の水産資源としても高価値である。こうした生産物を適量に系外に取り出すことによる副次的な浄化が期待できるが、植物およびシジミ貝の収穫作業、収穫物の無料持ち帰りを市民に開放し、いわゆる市民参加型で間引き収穫を行うことにより、浄化能力の向上のみならず、市民の環境に対する意識を向上させる環境教育の場としても有効な浄化システムであることがわかった。このように、水耕栽培バイオパーク方式浄化システム(図6-2-1)は、食用植物、水産物の生産と水質浄化の両立、さらには、環境教育の啓蒙、啓発が可能なことが実証されたが、今後は、維持管理の容易性およびコスト面、浄化能力の向上を図るための植栽工法の検討、閉鎖性の強い富栄養化水域に対する浄化能力の解析など、最適な状態で実用現場に導入するための開発研究を行うこととしている。

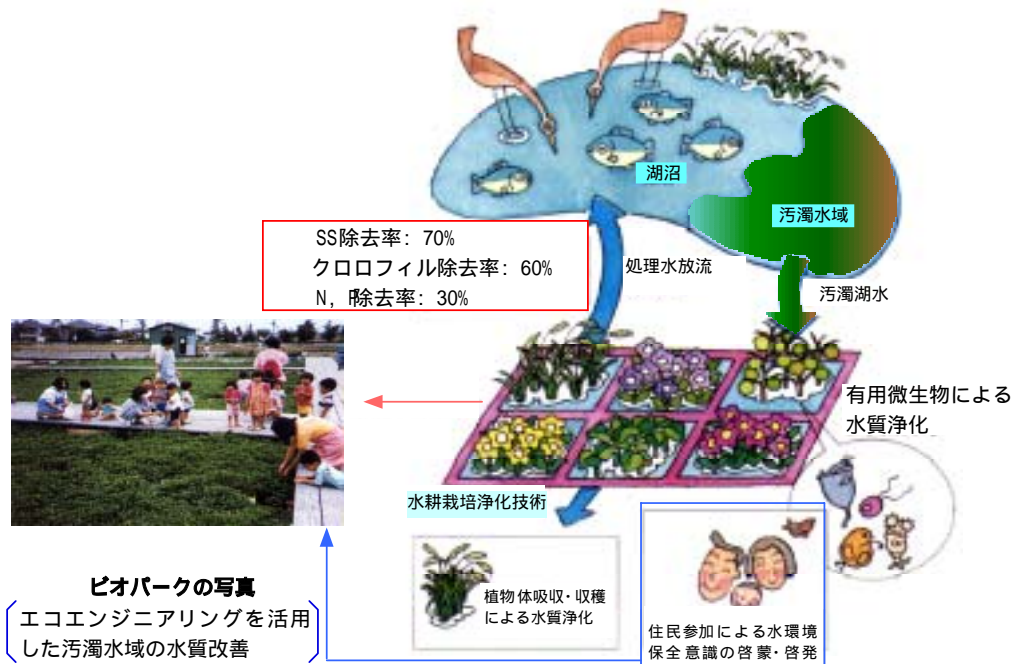


図 6-2-1 水耕栽培ビオパーク方式浄化システム

## (2) 超音波による藍藻類除去システム

アオコの原因種である藍藻類 *Microcystis* 属は、複数の細胞が集合した群体を形成し、さらに、細胞内にはガス胞という浮き袋をもち、それが膨張、収縮することにより浮上、沈降する性質が有る。本システムは、水面近くで浮遊する *Microcystis* 属に超音波を照射して殺藻した後、一方方向に水流を発生させ、その死骸を湖底の一部に集め、これを分解機能の高い微生物で分解する、という物理化学的手法と生物学的手法を組み合わせ装置化させたものである。図 6-2-2 に、プロトタイプ装置のフローを示した。この方法は、アオコが発生した中小規模の湖沼やアオコの集積が著しい水域のアオコ除去に適用できる可能性の高いことが明らかになってきている。さらに、霞ヶ浦のように水面積が広く水深が浅い湖で、底層部を好気化させ底泥からの *Microcystis* 属（アオコ原因種）の栄養源の供給を阻止させるとともに、水中に浮遊する懸濁物の好気分解の促進を狙った、湖水の密度流拡散方式の実用化研究も行っている。この方式においても、超音波発生装置が組み込まれ、*Microcystis* 属の活力を低下させるために、わずかな超音波処理で *Microcystis* 属のガス胞を破壊し、光合成活性の低い底層部に沈降させ、増殖抑制を図るシステムが付設され、その性能の検証が行われている（図 6-2-3）。



実験現場の写真

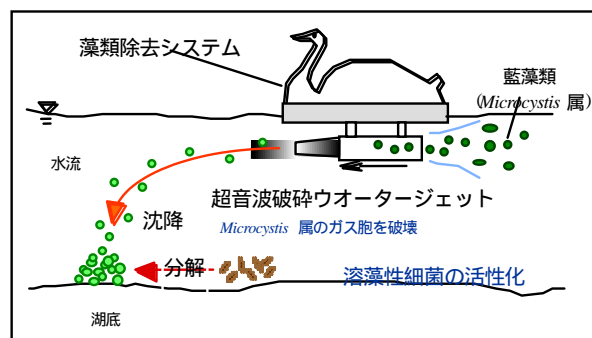


図 6-2-2 超音波による藍藻類除去システム



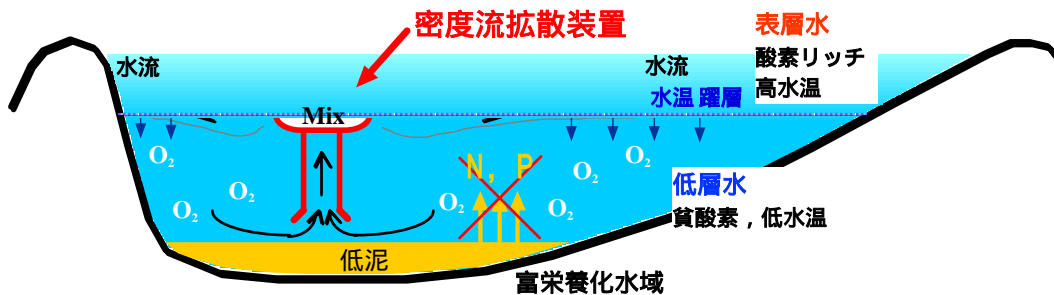


図 6-2-3 密度流拡散方式による低層の好気化と栄養塩の溶出抑制

### (3) 超電導高速凝集ろ過システム

本方式は、磁石の磁気力を利用して、流体中の磁性粒子を分離、除去する方法である。この方法は従来より、製鉄所の排水や火力発電所の循環水から鉄酸化物を除去するために用いられてきた。本方式をアオコが繁茂する湖水の固液分離に応用する場合、まず、懸濁粒子（アオコ）が非磁性であるため湖水に磁性粉と凝集剤を添加し、磁性粉とアオコが凝集した磁性フロックを形成させる。つぎに、このフロックを磁気分離部に通水し、ツイン型電導磁石から発生した磁場内に設置された磁気フィルターの表面で、この磁性フロックを捕捉することによって固液分離する。このような原理で、アオコを効率よく回収し、除去するためのプロトタイプ装置（超伝導磁石の室温ポア径：310mm，ツイン磁石間の磁場：約1ステラ）を試作し、その性能試験を行った結果、処理水量は  $400\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  で、COD 除去率 86%，T-N 除去率 71%，T-P 除去率 93%，アオコの除去率も 95% と高い除去効果が得られることが明らかとなった。本方式は、小型化が可能なので、小型船舶に搭載する浄化設備として実用化ができる段階まで達した。ダムや貯水池などのアオコ高速除去への適用が可能である。

### (4) 有用微小動物を活用した糸状性藍藻類の除去システム

霞ヶ浦では、ここ数年前から水温が低下する秋季から春季にかけて糸状性藍藻類の *Oscillatoria* 属や *Phormidium* 属の優占化が著しくなった。これらの種の増加に伴い、低水温期においても、湖水の COD は上昇し、湖水の透明度は著しく低下している。なかでも、とくに *Oscillatoria* 属は、凝集処理を極端に低下させる物質を代謝するため浄水処理工程の固液分離能を低下させる原因となっている。これらのことをふまえ、本開発研究では、糸状性藍藻類を捕食し、分解する有用微小動物を活用した湖水の浄化システムの開発を行っている。糸状性藍藻類を捕食する微小動物としては、これまでに *Trisigmostoma* 属、*Thecamoeba* 属が探索され、これらの分離と培養実験により増殖特性、捕食特性、高密度化方法などを明らかにしてきている。さらに、有用微小動物の定着可能な生物ろ過装置

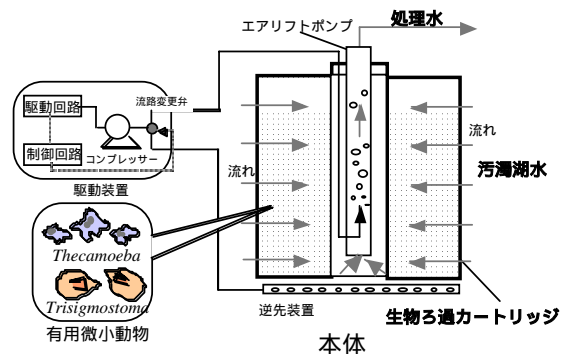


図 6-2-4 有用微小動物を活用した糸状性藍藻類の除去システム

のプロトタイプを試作し、それを用いて実際の霞ヶ浦湖水の直接浄化の検証実験を行うこととしている。本システムによる浄化のフローは図 6-2-4 に示したとおりで、浄化性能は、糸状性藍藻類および COD の除去率、処理水量、有用微小動物の個体群動態、装置の動力エネルギー消費量に基づき総合解析するとともに、問題点、改善点を見極め、実用化における適正な設計指針および管理指針を立案し

ていく計画で開発研究を進めている。

この直接浄化方式を実水域に導入するために、図6-2-5に示したように、有用微小動物を高密度定着させた木炭充填カートリッジをフロートで支持し、目的の水域へ小型船舶で容易に移動可能とし、稼動に必要な電源は、太陽電池とコンデンサー回路の併用により供給できる設計である。なお、本方式は低コスト、低エネルギーでの運用が可能なることから、開発途上国への適用が期待され、日中共同研究「太湖水環境修復プロジェクト」における技術導入が計画されている。

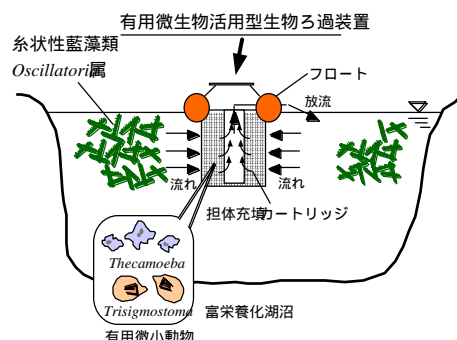


図6-2-5 有用微生物活用型生物ろ過装置による直接浄化方式のフロー

### (5) 浚渫底泥の資源化システム

底泥の除去（浚渫）により発生するヘドロを廃棄物ではなく、汚濁湖沼，河川を浄化する材料として活用するための用途を考案し，ヘドロを原料としたセラミックス製造の応用研究に着手した。汚濁湖沼の底質を直接浄化するための微生物用担体，および排水処理用の担体として活用するため，生物付着性の高い多孔質セラミックスの製造技術の開発を行ってきた。その成果として，図6-2-6に示したようにヘドロセラミックスの製造工程を確立した。

すなわち，霞ヶ浦の浚渫ヘドロを送風乾燥機で乾燥（120℃，24hr）させた後，ジョークラッシャーで粗粉碎，フレットミルで1.0mmに粉碎したものをロータリーキルンで焼成（温度：1,150℃，15～20min）する工程で製造できる。これにより，生物ろ過プロセスの充填担体に適した低比重（1.2-1.4）の多孔質ヘドロセラミックスの製造が可能となってきた。さらに，6.1の1)で述べたように，この多孔質ヘドロセラミックスの高度合併処理浄化槽における浄化性能の実証試験を行い，性能は十分であることが検証できた。これらの基盤研究をもとに，多孔質ヘドロセラミックスの製造コストの削減方法の検討と量産工程を確立するとともに，汚濁湖沼の底質の直接浄化や他の水質浄化技術への適用性について，実証研究を行うこととしている。

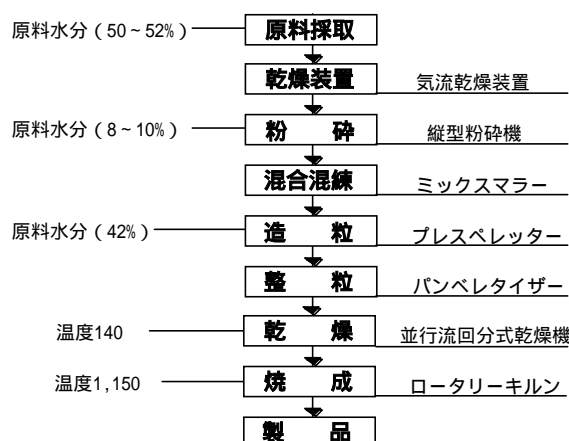


図6-2-6 ヘドロセラミックス製造のフロー

### 6 - 3 水質改善効果の総合解析評価

霞ヶ浦の流域管理を的確に行うためには，常時，霞ヶ浦およびその流域の水質変動をモニタリングし，本プロジェクトで開発された要素技術を発生源対策，湖内対策が最も効果的，かつ，低コストで行えるよう適所へ導入していく上では，導入後の改善予測手法と，実際の水質改善効果の追跡手法に基づく，総合的な解析，評価が必要不可欠である。水質改善効果の解析評価では，このような点をふまえて，流域管理モニタリングシステムの開発と流域管理のための水質改善費用投資およびエネルギー投入効果の評価手法の開発を行ってきた。

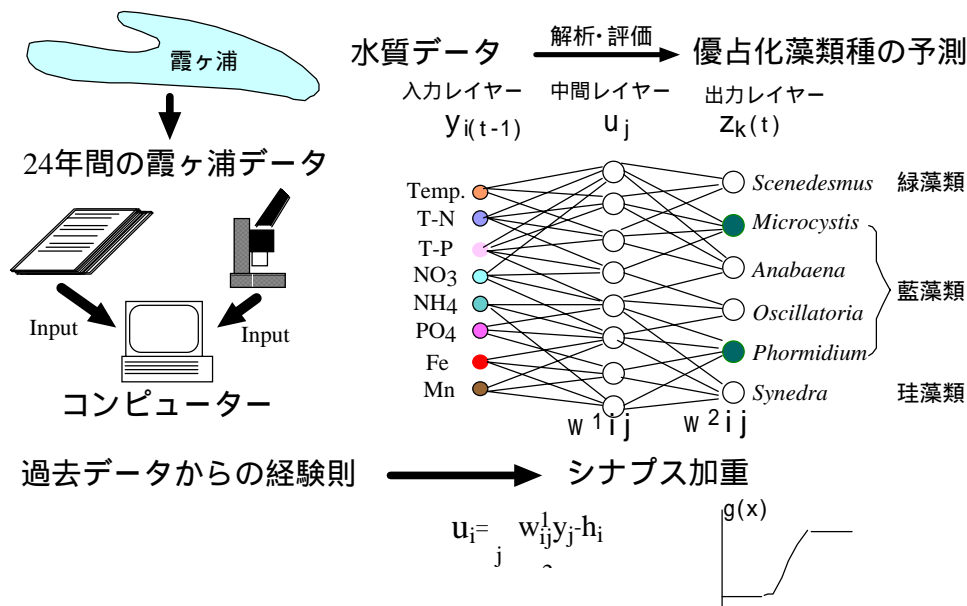


図 6-2-7 ニューラルネットワークによる優占藻類の予測解析モデル

### (1) 流域管理のための水質解析手法の開発

流域管理を適切に行い、湖沼の水質変化と藻類の発生を明らかにしていく上で、水質変化からの藻類発生の事前予測が可能になれば、早急な流域管理対策を行うことが可能となる。そのために、ニューラルネットワーク解析(図 6-2-7)を導入し、過去 24 年間の霞ヶ浦の水質情報を総合解析して特定藻類の異常発生に関する環境因子、富栄養化への影響因子として、窒素に比べてリンとの相関が大きいことや藻類の多様性指数が *Microcystis* 属が優占する時に、減少することを明らかにしている。これらの水質特性をさらに解析し、藻類の発生予測を可能とする解析手法の開発を行うこととしている。

### (2) 流域管理モニタリングシステムの開発

水質解析を行う上では、迅速に多くの水質データを得ることが必要となる。これまでの水質分析は、各成分によって異なる分析手法が必要であり、データが得られるのに時間と労力が必要であった。そこで、近赤外波長(800~2,000nm)において対象物質の吸収データに対し、重回帰分析・主成分分析などの統計手法を用いて情報を抽出する近赤外分光法(NIR法)(図 6-2-8)による湖沼の水質の分析手法の開発を行っている。全ての物質はこの波長域で独自の吸収波長をもっており、様々な物質が混在する溶液

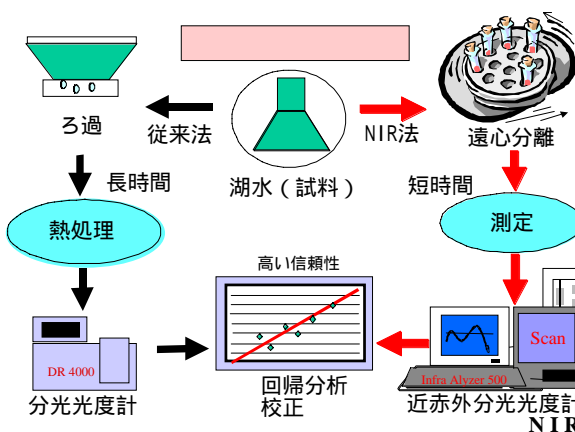


図 6-2-8 近赤外分析(NIR)法による湖水の分析

であっても、得られた吸光ピークや波形を様々な方法で解析することによって、特定物質の現存量を把握できる可能性が高い。この方法により、多項目の水質に対して迅速な分析が可能となり、窒素、リン、COD の分析が可能であることが明らかとなった。また、藻類の増殖に影響を与えているといわれているフミン酸や藻類から生産されるグリコール酸などの分析も可能となって、藍藻類

*Microcystis* 属の計数測定も可能であることが明らかになってきた。これらの基盤研究をもとに、この方法を現場設置型モニタリング装置に組み込み実証化研究を行うこととしている。

### (3) 流域管理のための費用効果の評価手法の開発

本プロジェクトで開発された発生源対策技術および湖内浄化手法を効果的に設置、普及させる手法を確立し、費用的、エネルギー的にもっとも小さく、さらに、最も効果的な浄化を目指した流域管理手法をシミュレーションし、湖沼流域管理システムの確立化と提案を行うこととして、適正化手法の開発を行い、総合解析評価手法の構築をめざし、推進することとしている。以上に述べた本プロジェクトの概念は、(図6-2-9)に示したとおりである。

## 6 - 4 課題および展望

地域結集型共同研究事業の当初の目的に応じて霞ヶ浦水質浄化プロジェクトでは、要素技術の開発および水質改善に最も効果的な実現可能な開発要素技術の効果的面的整備手法の開発を行い、霞ヶ浦の水質改善と同時にベンチャー産業の創出を目途として研究を推進している。本プロジェクト研究により得られる成果を目に見える形で推進する上で、汎用化可能な要素技術として、低コスト、低維持管理、資源循環を考慮した実用化システムの構築を目指した開発を第一期においては、実証現場において、技術の改善のあり方、更なる高度化を可能とするよう各要素技術の適正な組み合わせ手法の開発を強化する必要がある。また茨城県として開発した技術の評価認証する制度作りを行い、ベンチャー産業の創造に連携できるようにする必要があり、また、本プロジェクトでの第一期を目指し、茨城県に配備される霞ヶ浦環境センターおよび国立環境研究所に整備されるバイオ・エコエンジニアリン

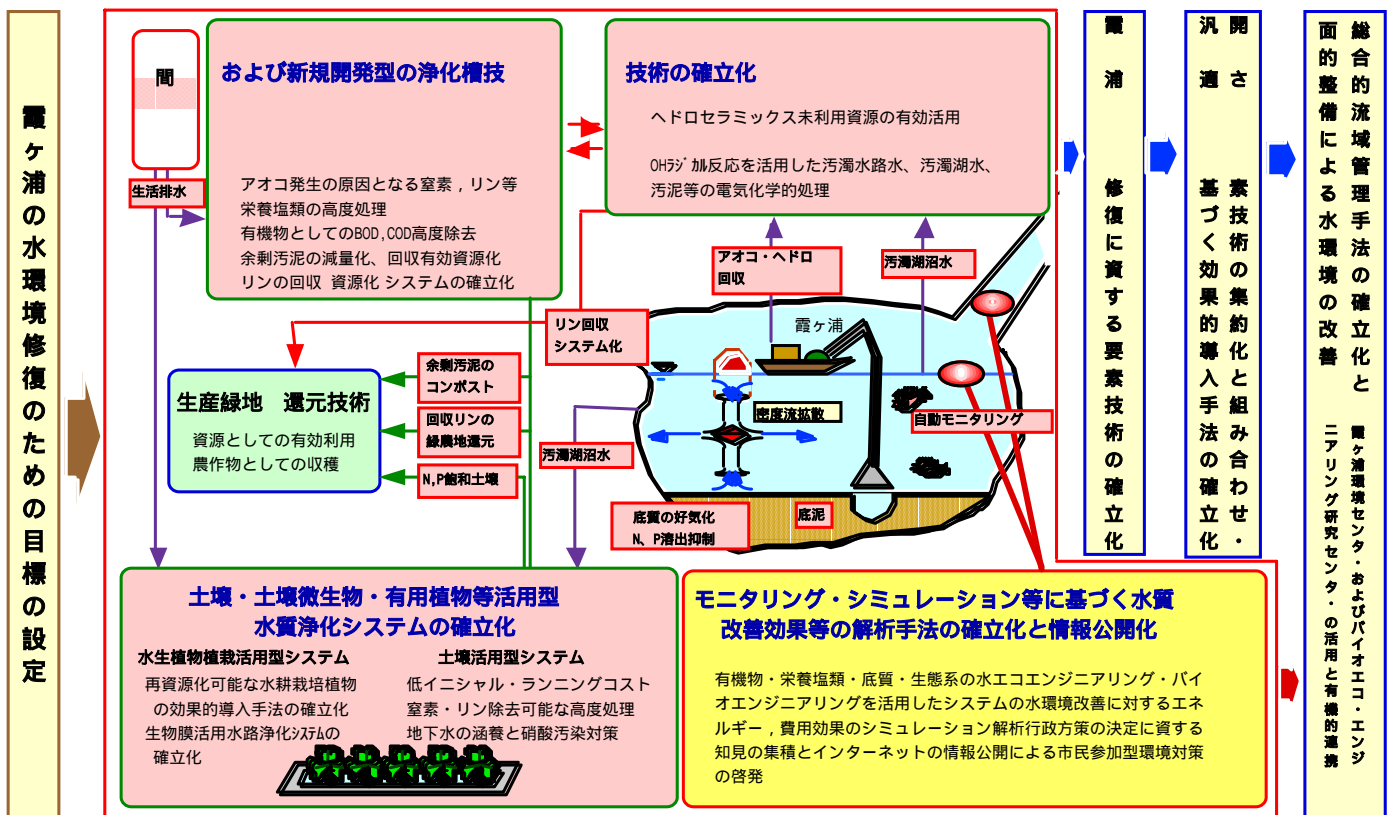


図6-2-9 霞ヶ浦の水質浄化技術の開発のあり方とこれからの展望

グ研究施設でのシステム技術の定着化、普及整備の具現化に繋がるような体制、組織の構築を進める

必要がある。このことにより、住民の目に見えるような形のプロジェクトの成果が国内外を問わず波及でき、効果が発揮できるようになるものと大きく期待できる。

<参考文献>

- 1) Yuhei INAMORI, Xiao-Lei Wu, Yuzuru KIMOCHI, Kazuhiro ONUMA, Katsumi SHINOZAKI, Kazumi YAGUCHI and Ryuichi SUDO(1999): Technology Development for Renovating the Polluted Lake Environment Using Ecological Engineering Approaches and Overall Assessment of the Developed Systems, 8<sup>th</sup> International Conference on the Conservation and Management of Lakes
- 2) 稲森悠平(1999): 水環境修復のための窒素, リンの除去と地域リサイクルエコシステムの創造, 関東畜産学会報, 第49号, 35-57
- 3) 稲森悠平(1998): 生活排水対策ハンドブック, 産業用水調査会, 東京

(国立環境研究所: 岩見徳雄)