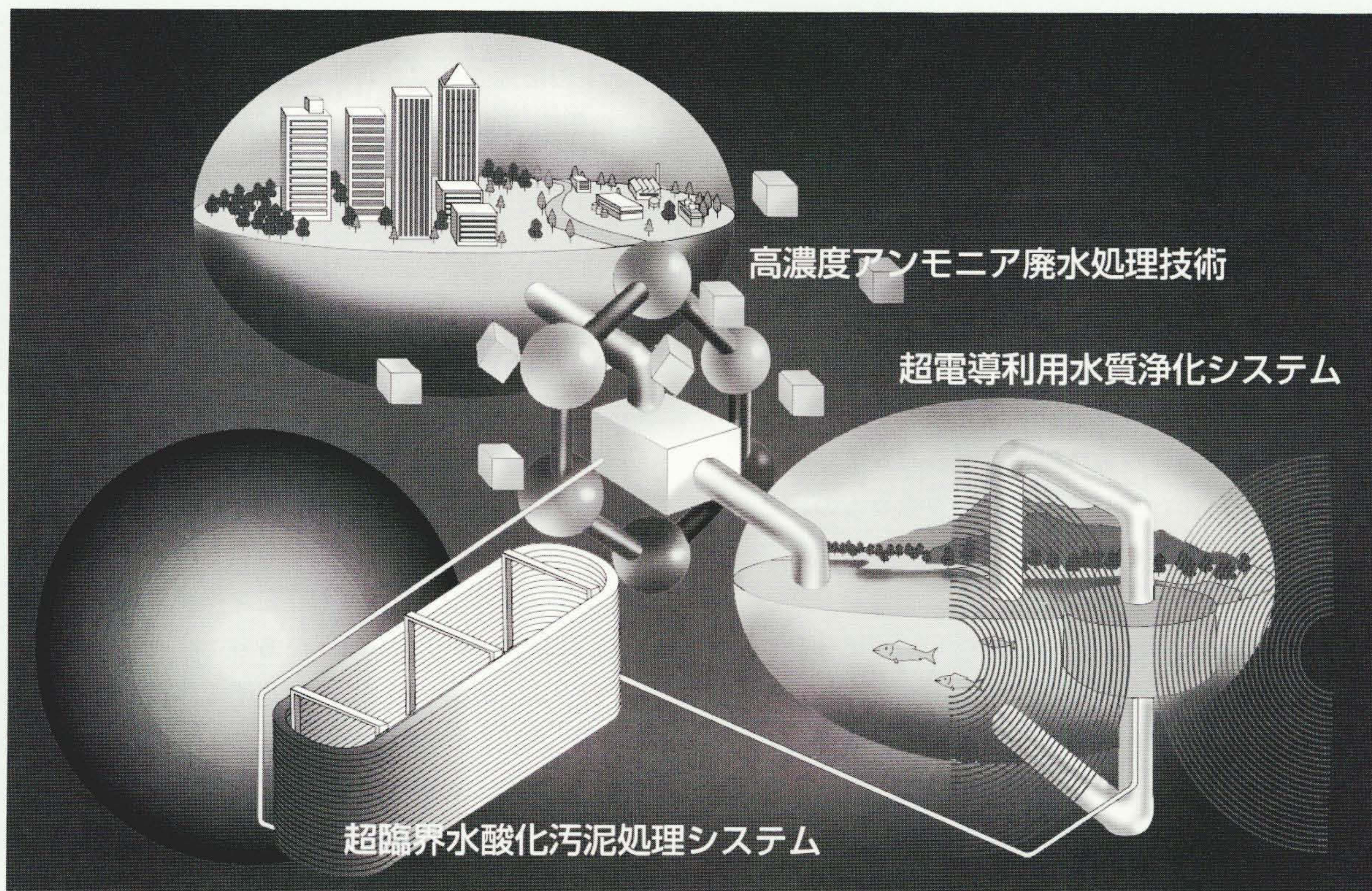


水環境のトータルソリューションを目指す次世代型 廃水高度処理・汚泥処理システム

Next-Generation Systems for Wastewater and Sludge Treatment Aiming at Total Solution of Water Environment

国井光男 Mitsuo Kunii 佐保典英 Norihide Saho
角野立夫 Tatsuo Sumino 川尻 斎 Hitoshi Kawajiri



水環境を保全する次世代型廃水・汚泥処理システム

21世紀に向けた水環境保全を目的に、さまざまな対応が求められている。日立グループは、高濃度アンモニア廃水の処理や、富栄養化した湖沼水などを浄化する超電導利用高速処理システムを開発し、さらに、超臨界水酸化による汚泥処理システムの開発に着手している。

これまで人類は、大量のエネルギーと資源を消費して生産活動を行い、社会発展と物質的豊かさを享受してきた。その結果、地球温暖化、広域化した水環境汚染、廃棄物問題など、国際的規模での環境問題がクローズアップされている。このため、1993年に「環境基本法」が制定され、また、1996年にはロンドン条約¹⁾が発効するなど、21世紀の環境保全に向けた新たな動きが活発化している。

水環境汚染の問題に対しては、それぞれの排水源での排水抑制対策や広域浄化技術はもとより、廃水処理過程

で生じる廃棄物としての汚泥処理技術など、多方面にわたる技術のシステム化を行い、総合的に取り組む必要がある。

日立グループは、(1)閉鎖性水域で富栄養化をもたらす窒素を、排水源で効率的に処理する廃水高度処理技術、(2)富栄養化した水を高速浄化する技術、(3)地球環境にやさしいコンパクトな汚泥処理技術など、さまざまなシステムの開発を進め、水環境の保全を総合的に支援している。

1 はじめに

産業・経済活動の活発化や生活様式の変化に伴い、この地球の恵みを支える水、大気、土壌の環境が損なわれることが危惧(ぐ)され、地球環境保全の重要性がますます高まってきている。このような中で、1993年に「環境基本法」が制定され、環境負荷の低減に向けた取組みが進められている。

1996年1月には、ロンドン条約(廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約)が発効し、産業廃液の海洋投棄が禁止されている。このため、産業廃液の自家処理が不可欠となり、高濃度アンモニア性窒素などの難分解性の物質を含む廃液の効率的な処理技術開発に対するニーズが高まっている。また、飲料水や農業用水などの水源であるダム貯水池や湖沼などに関しては、排水規制強化の諸施策が講じられているが、富栄養化の進行による水質障害事例が見受けられ、高速浄化技術が期待されている。さらに、水処理の過程で発生する膨大な量の汚泥処理に目を向けると、現在主流である焼却処理では環境規制強化に伴い、装置が大型で複雑なものになることから、焼却に代わる無害化・低コスト型汚泥処理システムが求められている。

ここでは、日立グループが長年にわたり培ってきたさまざまな廃水高度処理と汚泥処理技術の中から、次世代に向けて開発・実用化を進めているシステムの概要について述べる。

2 高濃度アンモニア廃水処理技術

2.1 窒素処理の現状

日立プラント建設株式会社は、アンモニア性窒素が20～500 mg/L含まれる低・中濃度を対象にした、下水や産業廃水向けのアンモニア除去技術として、包括固定化微生物担体(3 mm角形ゲル状担体。以下、担体と言う。)を用いた「ペガサスシステム」を開発し、実用化している^{2)～4)}。これは、硝化細菌を含有する活性汚泥を、高分子ゲルの内部に高濃度に閉じ込めた担体を用いて処理するもので、これによって処理装置のコンパクト化が図れる。

一方、化学工業や食品工業などの業種では、高濃度アンモニア性窒素含有廃水が排出されることがある。この種の廃水はアンモニア性窒素濃度を500～2,000 mg/L含有しており、そのままでは処理ができないため、通常は希釈して生物処理される。そのために、設備が大型化し、大量の希釈水が必要などの問題があった。そこで、高濃

度アンモニア廃水を無希釈で、かつ高速で除去する新技術を用いた「多段処理システム」を開発した。

2.2 多段処理システムの開発経緯

システム開発の着眼点は、(1)硝化細菌の特性を生かすこと、(2)発酵槽の設計に用いる多段段数解析理論を応用することにあつた。

最初に、下水や電力廃水などの各種廃水で処理実験中である担体の細菌構成を調査した。調査した担体は、アンモニア性窒素の硝化処理に用いられているもので、担体中の硝化細菌(AL菌群：アンモニア性窒素濃度100 mg/Lの培地で計測される菌群、AH菌群：アンモニア性窒素濃度1,000 mg/Lの培地で計測される菌群)を計測した。

下水処理では、高濃度アンモニアに耐性がないAL菌群が優占していた。これに対し、アンモニア性窒素濃度が比較的高い廃水処理の担体には、高濃度アンモニアに耐性があるAH菌群が多数生息していた。

さらに、AH菌の純粋分離を試み、ゲランガム培地(植物組織細胞培養用培地)を用いて、純粋分離することに成功した(図1参照)。AL菌の硝化速度は、低アンモニア性窒素濃度でAH菌よりも硝化速度が速い傾向を得たが、アンモニア性窒素濃度が高くなると、硝化速度が低下した。これに対し、AH菌では、アンモニア性窒素濃度が高いほど活性も高くなる傾向があつた。

これらの菌の特性から、硝化槽を多段に仕切り、濃度こう配を付ける「多段処理システム」の開発に至った。

2.3 システムの概要と特徴

開発した多段処理システムとして3段処理の例を図2に示す。原水の流入側の1段目と2段目にAH菌群優占

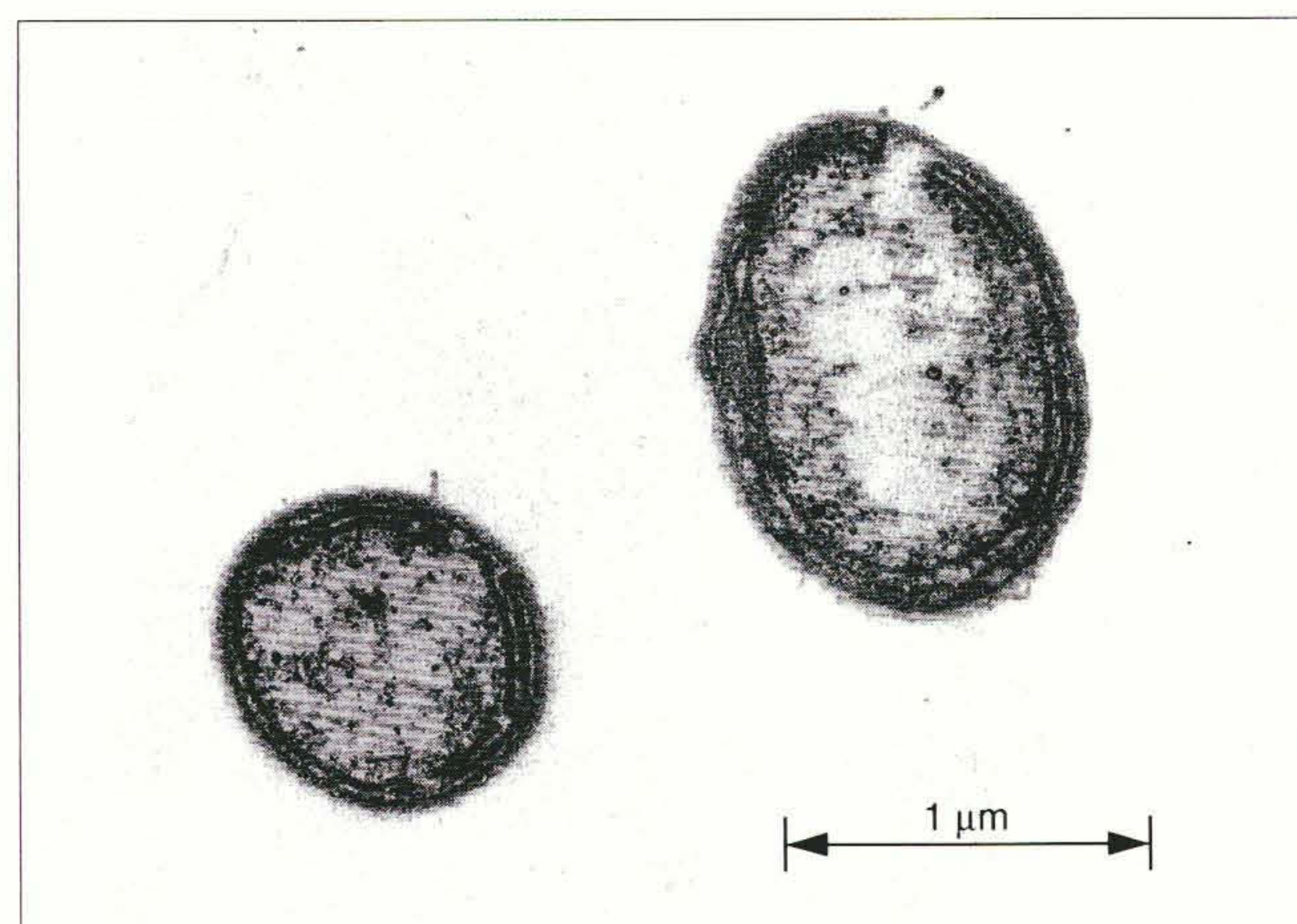


図1 純粋分離した高濃度アンモニア耐性硝化細菌(AH菌)の透過型電子顕微鏡写真

ゲランガム培地で純粋分離した、高濃度アンモニアに耐性を持つ硝化細菌を示す。細胞膜が多重膜構造を形成する特徴がある。

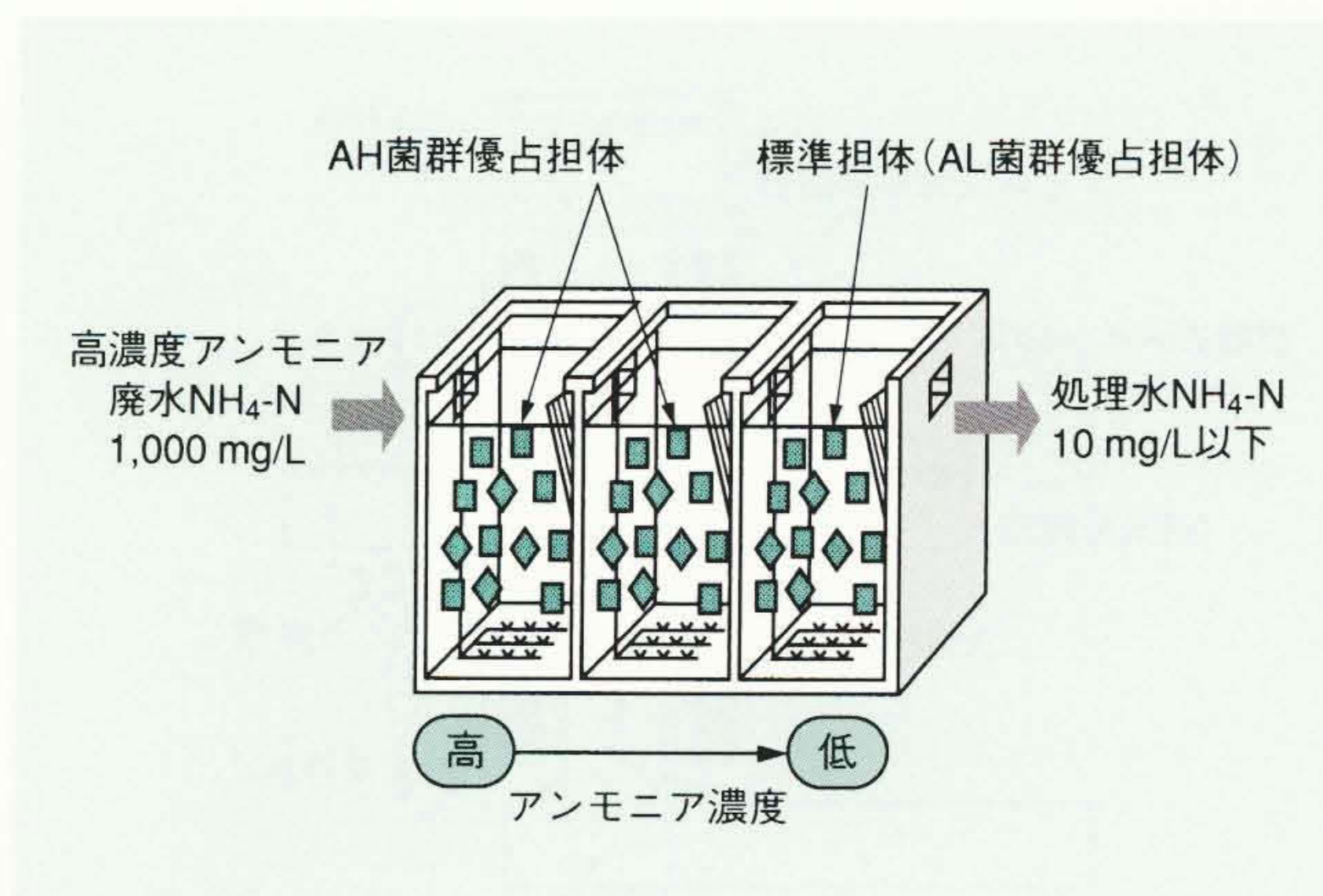


図2 高濃度アンモニア廃水処理用の3段階処理プロセス

高濃度アンモニア耐性菌の特性を生かした3段階処理により、高濃度アンモニア廃水を無希釈で高速に処理できる。

担体を、3段階目に標準担体をそれぞれ投入したものである。各反応槽でアンモニア濃度こう配が生じ、それぞれの槽での優占菌の最適環境が形成される。このシステムには以下の特徴がある。

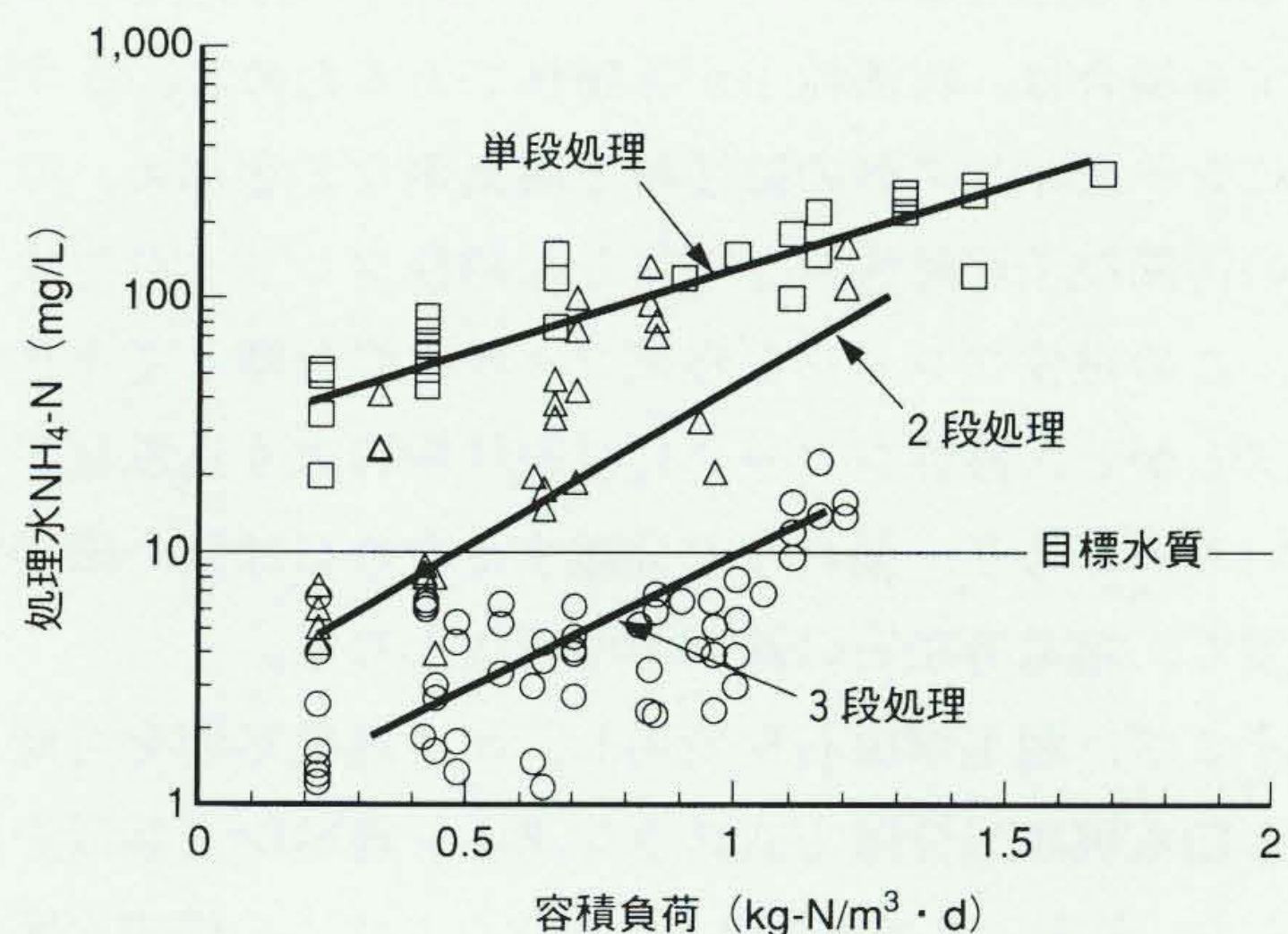
- (1) 高濃度アンモニア耐性菌を使用するため、無希釈で処理が可能である。
- (2) 菌を高分子ゲル内部に高濃度に保持しているため、高速処理が可能である。
- (3) 担体を使用するために、馴(じゅん)養での立上りが速い。
- (4) 担体からの菌のはく離が無く、処理が安定している。

硝化速度とアンモニア性窒素濃度との関係式から、理論段数の算出が可能である。この段数解析により、各種アンモニア性窒素濃度での最適理論段数を決定でき、適切なプロセスの構築が可能である。

2.4 多段階処理の性能特性

実廃水(アンモニア性窒素濃度700~900 mg/L)を用いた、多段階処理での処理例について以下に述べる。

3段階処理で、滞留時間を18~96 h(容積負荷0.2~1.2 kg-N/m³・d)として連続処理した場合、負荷0.2~1 kg-N/m³・dの範囲で処理水中のアンモニア性窒素濃度を10 mg/L以下にすることができる。処理水に及ぼす負荷の影響について単段階処理、2段階処理と3段階処理を比較した例を図3に示す。閉鎖性水域の窒素排水規制に対応するためには、アンモニア性窒素濃度を10 mg/L以下にする必要がある。3段階処理では負荷1 kg-N/m³・dまで目標水質を満足し、2段階処理の2倍の負荷を達成できる。このように単段階処理よりも2段階、さらに3段階処理でより良好な処理水を得ることができる。



注：記号説明 □(単段階処理)、△(2段階処理)、○(3段階処理)

図3 実廃水処理での処理水水質に及ぼす負荷の影響

同じ容積負荷の比較では、単段階処理よりも2段階処理、さらに3段階処理でより良好な処理水を得ることができる。

開発したこのシステムは、高濃度アンモニア性窒素を含有する化学廃水処理、食品廃水処理などに適用でき、従来の希釈法と比べて約 $\frac{2}{3}$ に小型化できるとともに、処理水水質の向上を図ることができる。

3 超電導利用水質浄化技術

公共用水域への窒素やリンなど栄養塩類の排水規制が強化される一方で、ノンポイント負荷の増大による湖沼などの富栄養化は依然として進んでいる。アオコ(特定の植物プランクトンが過剰に増殖し、水面に青緑の膜を形成した状態)の発生は、多大な利水障害を伴うため、その効率的な浄化技術が求められて久しい。特に夏場に広範囲に発生したアオコを迅速に除去するためには、高速・大容量の除去装置が必要である。超電導磁石を応用した磁気分離法によるプランクトン連続除去装置の概要と適用例について以下に述べる。

3.1 概要

超電導磁気分離装置は、超電導磁石の強い磁場を利用して、湖沼などで増殖した植物プランクトンを迅速に除去する装置であり、水質障害の発生を未然に防止するものである。磁気分離法とは、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。特に、分離部の磁場中に磁性体のフィルタエレメント(以下、磁気フィルタと言う。)を設け、その表面に生じる大きい磁気こう配を利用した高こう配磁気分離法は大きな磁気力を得られるので、処理速度を速め、かつ磁性粒子の分離効率を高めることができる。

この分離法を湖沼⁵⁾、河川⁶⁾や下水⁷⁾の水浄化処理に応用する場合は、汚濁粒子が非磁性であるために、まず原水にシーディング剤の磁性粉と凝集剤などを加え、原水中の汚濁粒子が磁性粉と凝集した磁性フロックを生成させ、この磁性フロックを磁気フィルタで分離して浄化する。しかし、磁性フロックには磁性粉の取り込み量が少ないものがあり、漏れなく分離するためには強い磁場が必要で、超電導磁石の適用が不可欠となる。

そこで、超電導磁石を使用し、かつ連続処理を可能とする超電導磁気分離方式プランクトン連続除去装置を試作した。装置の外観を図4に、浄化システムの構成を図5にそれぞれ示す。この装置は、小型ヘリウム冷凍機で超電導磁石を直接冷却する構造であり、液体ヘリウムなどの寒剤を供給する必要がない。装置は、(1)磁性フロックを生成する前処理部、(2)磁気フィルタで磁性フロックを捕そくし、洗浄除去する磁気分離部、(3)遠心分離による脱水、磁性粉の回収を行う後処理部から成り、一貫かつ連続的に処理できる。装置の特徴は、以下のとおりである。

(1) 円筒状磁石を上下に持つツイン型超電導磁石の間に左右に移動するメイン磁気フィルタを配置し、さらに下部磁石の漏れ磁場内に一方向に回転するサブ磁気フィルタを配置する。これは、超電導磁石に通電したまま、強い磁場空間位置で磁性フロックを捕そく分離し、それぞれの磁気フィルタを磁場外に移動させて、弱い磁場空間位置で磁性フロックを洗浄水で除去する構造である。この構造により、磁性フロックの連続分離、除去が可能である。

(2) 大きい磁性フロックをあらかじめ分離、除去するサブ磁気フィルタと、さらに強い磁場で小さな磁性フロックを分離、除去するメイン磁気フィルタの組合せにより、

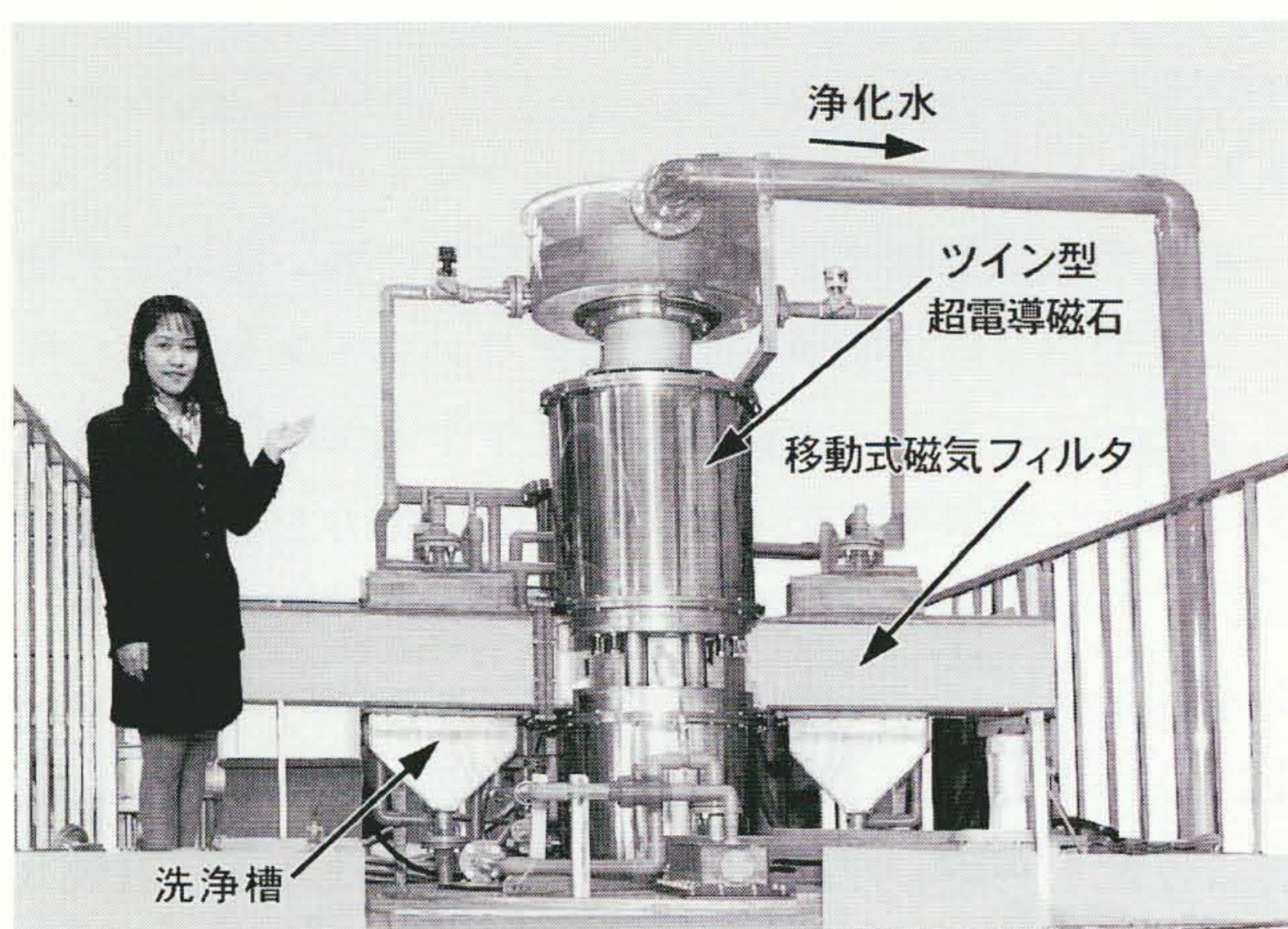


図4 超電導磁気分離方式プランクトン連続除去装置の外観
室温ボア径310 mmで、処理能力は400 m³/dである。

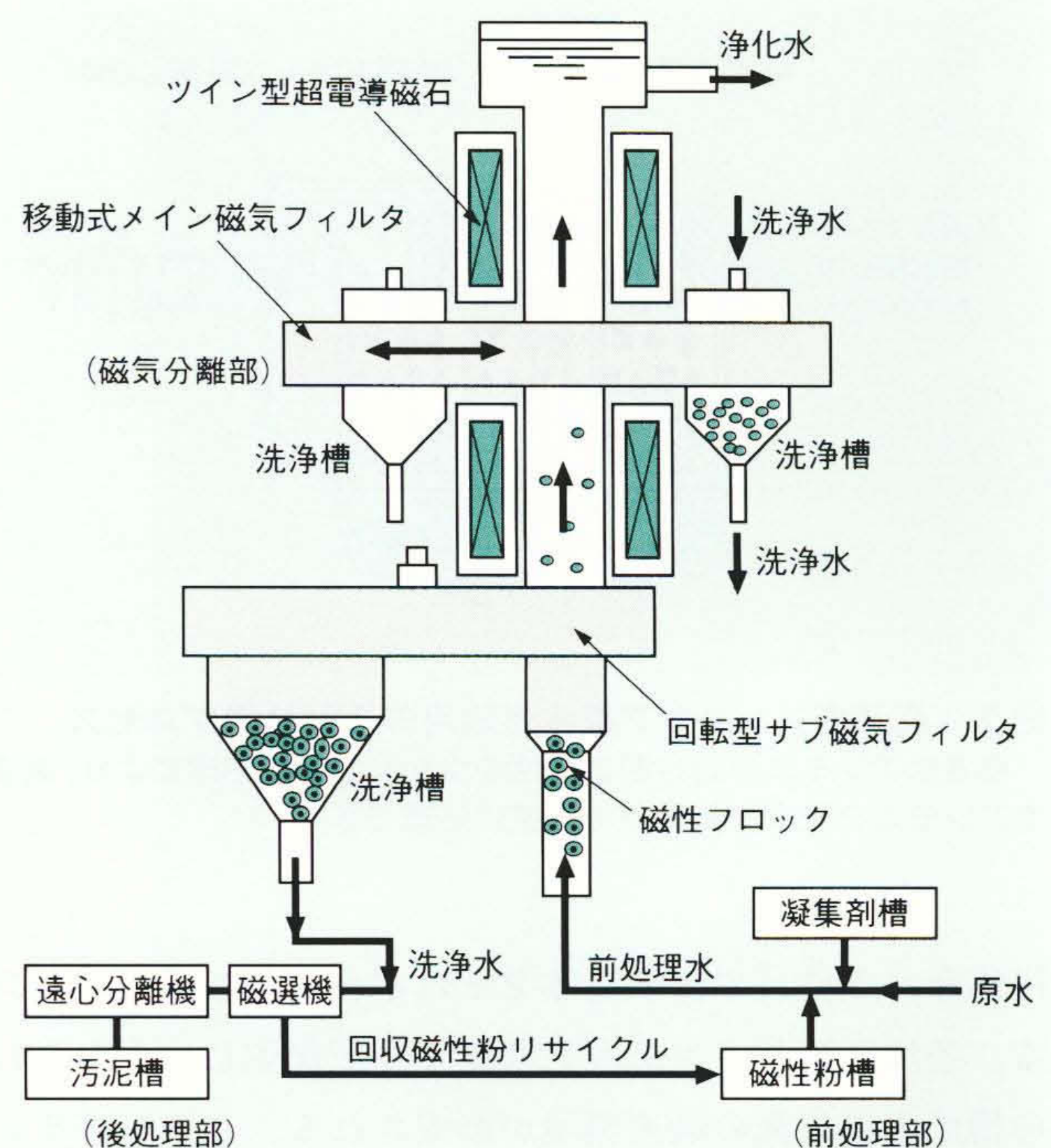


図5 浄化システムの構成

磁性フロックを生成する前処理部と、磁性フロックを捕捉、洗浄する磁気分離部、および磁性粉の回収、汚泥の脱水を行う後処理部から成る、一貫かつ連続的なシステムが特徴である。

除去性能を高める。

超電導磁石の室温ボア径は310 mm、ツイン磁石間の磁場は約1 Tで、400 m³/dの処理能力を持つ。ツイン型超電導磁石の仕様を表1に示す。日立製作所の敷地内にある遊水池の原水の連続浄化実験を行った結果、磁気フィルタ部滞留時間数秒で、プランクトン除去率93%以上の浄化性能を得た。これは、従来の約10倍の除去速度である。

3.2 適用例

この磁気分離方式では、超電導磁石を使用しているので運転電力を小さくでき、かつ高速処理が可能である。そのためこの装置は、大容量浄化設備として、ダムや湖沼、河川などの広域浄化装置として適用できるほか、大型の給電装置が設置できない船や車への搭載も可能である。

表1 ツイン型超電導磁石の主な仕様

処理能力400 m³/d用の超電導磁石の仕様を示す。

室温ボア径	310 mm
磁石温度	4.4 K
中心磁場	1 T
消費電力*	12.4 kW

注：*消費電力は、冷凍機の消費電力を示す。

4 超臨界水酸化による污泥処理システム

前述の水圏浄化で除去されるアオコや、高濃度アンモニア廃水処理で発生する污泥の最終処分形態としては、近年の埋め立て地の用地確保が難しくなっている背景から、最も減容化できる焼却処分による方法が現実的である。しかし、アオコや污泥を焼却すると、ばいじんや、 NO_x 、 SO_x などを含む排ガスが発生し、環境規制強化に伴い、排ガス処理が必要となり、装置が大型で複雑なものになる。そこで、焼却に代わる無害化・低コスト型污泥処理システムとして、污泥を超臨界状態の水の中で燃焼させる「超臨界水酸化法」による污泥処理システムの開発に着手した。これについて以下に述べる。

4.1 超臨界水酸化法の原理

水は、臨界点(374℃、22 MPa)以上の温度、圧力で超臨界状態となり、これを超臨界水と呼ぶ(図6参照)。超臨界水は、(1)蒸気よりも高密度で、誘電率が低いことから、無極性溶媒的な働きをする、(2)密度がガスに近づくことにより、酸素と水がよく混ざる、(3)粘性と表面張力が低いため、水が固体細孔中によく浸透し、普通の水に溶けない有機物も100%溶かすことができ、有機物と酸素分子と水分子が均一な状態の下に、きわめて速い酸化反応が進行する。このような特性を持つことから、超臨界水によるPCB(多塩素化ビフェニル)やダイオキシンなどの難分離性物質の分解でも研究開発が進められている。この方法を污泥処理に適用した場合、(1)酸化速度が速く、有機物分解率が高い、(2) NO_x 、 SO_x 、ばいじん、ダイオキシンの発生がないなどの特徴があり、焼却に代わる次世代の污泥処理法として期待されている。

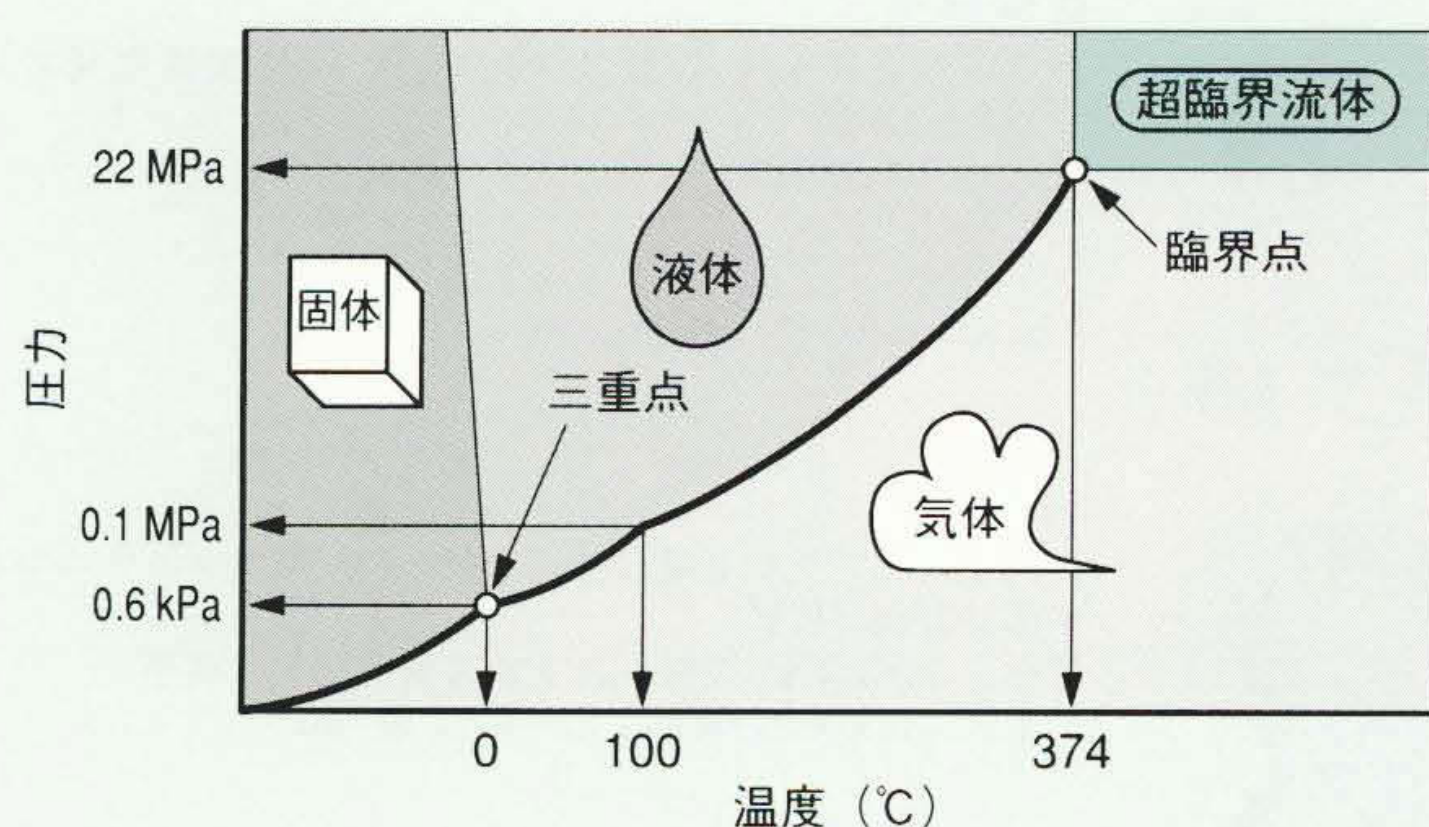


図6 水の状態

水は、温度374℃、圧力22 MPaの臨界点以上の温度、圧力になると、固体でも液体でも気体でもない超臨界流体となる。

4.2 システムの概要

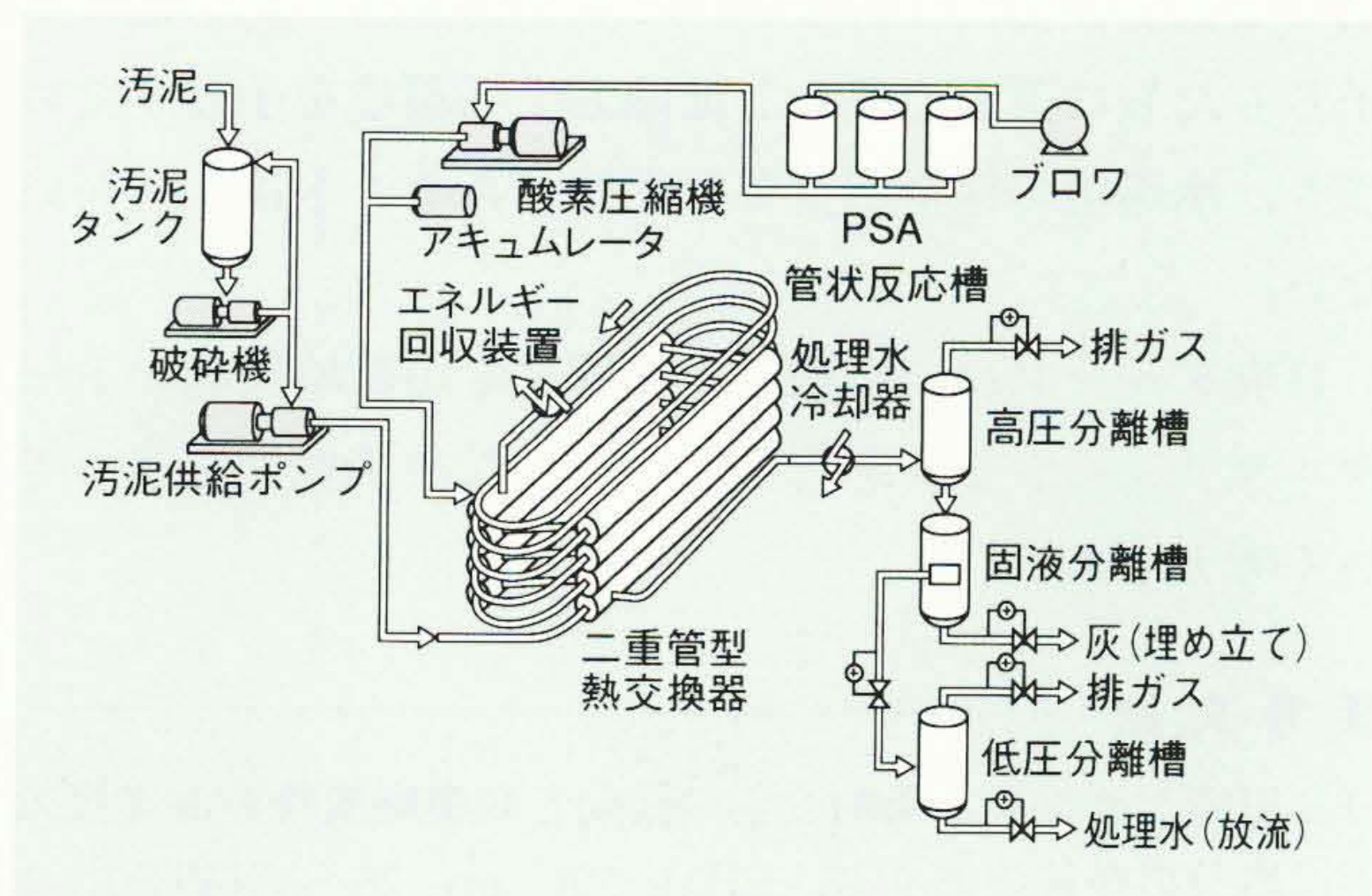
超臨界水酸化法を利用した污泥処理システムを図7に示す。固形物濃度10%に濃縮した污泥を破碎後、污泥供給ポンプで25 MPaに加圧し、二重管型熱交換器で常温から300℃程度に予熱する。予熱した污泥に酸素を投入後、管状反応槽で有機物の酸化が始まり、反応熱で超臨界状態温度374℃以上となる。この超臨界状態で有機物は酸化分解され、反応槽の出口では600℃となる。エネルギー回収装置でこの熱を回収後、二重管型熱交換器で原污泥を予熱する熱源として回収する。処理水冷却器で冷却後、各種分離槽を経て、排ガス、処理水、灰に分離する。

このシステムの特徴は、(1)污泥の酸化分解が高速で進むので、装置がコンパクトである、(2)投入污泥が酸化分解時の反応熱で処理できるため補助燃料が不要であり、ランニングコストが安い、(3)排ガス・排水・灰の再処理が不要などである。

4.3 開発状況

下水污泥の超臨界水酸化分解実験には、電気炉とカラムなどで構成するカラム実験装置を使用した。実験では、所定量の乾燥污泥に過酸化水素水を充てんし、電気炉内を所定温度まで加熱した。発生圧力は、乾燥污泥と過酸化水素水量で調整した。

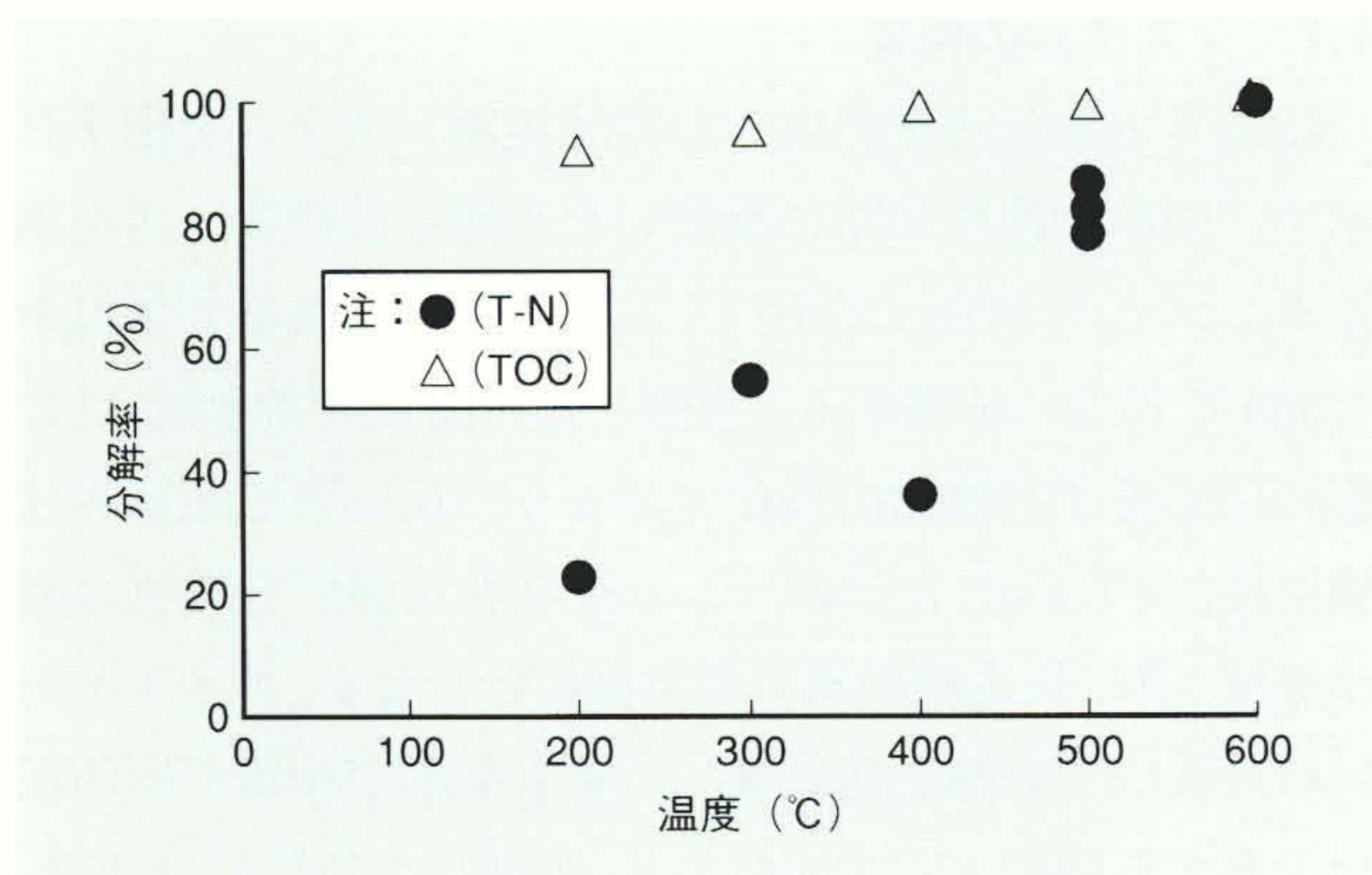
この実験で得られた反応温度とTOC(全有機炭素)、T-N(全窒素)分解率の関係を図8に示す。TOCでは、反応温度が400℃以上で99%以上の分解率を示している。T-Nの99%以上の分解には600℃以上が必要であった。また、超臨界水酸化処理でできた灰の重金属溶出試験結果を表2に示す。灰からの重金属の溶出は、埋め立て基準



注：略語説明 PSA(Pressure Swing Adsorber)

図7 超臨界水酸化法を利用した污泥処理システム

投入污泥の反応熱で加温できる二重管型熱交換器を用いることにより、外部からのエネルギーを必要としない污泥処理システムとしている。



注：略語説明 T-N(全窒素), TOC(全有機炭素)

図8 カラム実験結果

TOC, T-Nは、処理温度が600℃で完全分解できる。

値以下の値であった。

以上の結果から、(1)有機物や窒素は完全に分解できる、(2)灰からの重金属溶出は埋め立て基準以下であることを確認した。これらにより、超臨界水酸化法は、焼却に代わる処理法として適用可能性が高いと評価できる。現在、連続試験装置により、基本特性の把握、熱交換システムの設計諸元取得などを行い、実装置化に向けて検討中である。

5 おわりに

ここでは、水環境保全を支援する次世代型の廃水高度処理技術、水質浄化技術および廃水処理の過程で発生する廃棄物としての汚泥を無害化し、かつ高速で処理する超臨界水酸化技術について述べた。

水は、空気とともに、人間を取り巻く生態系全般を形成する重要な要素の一つである。新たに21世紀を迎える子どもたちに美しく豊かな地球と生活環境を手渡すためにも、水環境の保全が重要な課題であることはまちがいない。

日立グループは、今後も水循環系での環境問題のトータルソリューションを目指し、新たな技術開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 川崎：ロンドン条約改正の動向と産業廃棄物の海洋投入処分の今後のあり方, PPM, 9, pp. 26~32(1995)
- 2) 森, 外：水環境保全と水資源確保を支援する廃水高度処理システム, 日立評論, 78, 7, 509~514(平8-7)

表2 重金属の溶出試験結果

超臨界水酸化法で下水汚泥を処理してできた灰の重金属溶出は、管理型埋め立て基準を満足できるものである。

項 目	超臨界水酸化灰	管理型埋め立て基準
Cd (mg/L)	<0.001	<0.3
Pb (mg/L)	0.0055	<0.3
Hg (mg/L)	<0.00005	<0.005
T-Cr(mg/L)	0.0126	<1.5
As (mg/L)	<0.001	<0.3

注：略語説明 T-Cr(全クロム)

- 3) T. Sumino, et al.: Immobilization of Nitrifying Bacteria by Polyethylene Glycol Prepolymer, J. Ferment. Bioeng., 73, pp. 37~42(1992)
- 4) 日本下水道事業団技術開発部：包括固定化担体を用いた硝化促進型循環変法「ペガサス」の評価に関する報告(1993)
- 5) 佐保, 外：超電導磁気分離技術によるアオコ除去装置の開発, 電気協会雑誌, 8, 874, 31~33(1996-8)
- 6) 金子：高勾配磁気分離法—藻類を多量に含む水への適用—, 造水技術, 8, 3, 49~53(1982-8)
- 7) 藤田, 外：磁気分離処理システムに関する研究, 下水道新技術研究所年報, 111~114(1994)

執筆者紹介



国井光男

1976年日立プラント建設株式会社入社、水処理システム事業部 上下水第一計画部 所属
現在、上下水道および関連水処理システムの計画・設計に従事
技術士(水道部門)
E-mail: hpcwater@mb.infoweb.ne.jp



角野立夫

1978年日立プラント建設株式会社入社、技術開発本部 松戸研究所 所属
現在、水処理技術の研究開発に従事
農学博士



佐保典英

1971年日立製作所入社、機械研究所 環境機器開発プロジェクト 所属
現在、極低温機器、水浄化機器の研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員、低温工学協会会員
E-mail: saho@merl.hitachi.co.jp



川尻 斎

1971年日立プラント建設株式会社入社、環境システム事業本部 開発部 所属
現在、浄水、下水処理システムの研究開発に従事
E-mail: hpcwater@mb.infoweb.ne.jp