

高度排水処理用担体の開発

—背景、法規から硝化用担体KPパールの開発・展開まで—

Development of the carrier for treatment of advanced waste -water

—The environmental regulation on water and the background on developing the carrier "KP pearl" to nitrify the waste -water—



新事業本部
技術部
泉田 仁
(農学博士)
Hitoshi
Izumida

総説・解説

1. はじめに

水は生活環境を構成する重要な要素であり、水環境の保全が大きな課題となっている。特に、水環境中で起きる富栄養化はアオコ、赤潮、青潮の発生の原因とされている。

富栄養化の原因物質の一つである窒素・リンの除去を行うためには、高度生物処理を行う必要があるが、生物処理法は反応速度が遅いため処理施設が広大になるという欠点がある。それゆえ、施設用地が不足しがちな都市部の下水処理場において窒素除去を行うためには、コンパクトで高速な生物処理装置の開発が求められていた。また、下水道が整備されていない地域においても、窒素・リンを処理できる高度合併浄化槽の整備が求められている。

窒素処理の高速化のためには、生物反応槽内の窒素を分解する微生物濃度を高める必要がある。窒素分解微生物(硝化菌)濃度を高める手段のひとつとして、担体表面に微生物を高密度に付着させる方法(担体投入型活性汚泥法)が実用化され、すでに多くの各種処理施設で稼働している。この担体投入型活性汚泥法は、既存設備のわずかな改良のみで窒素の高度除去が可能になる。

本稿では、水質保全に関する法規の動向を概説し、開発した担体を用いた投入型高度排水処理について述べる。

2. 水質環境基準について(水質汚濁防止法)¹⁾

1950年から70年代にかけて日本の公共用水域(河川、湖沼および海域)は、鉱工業由来の各種産業排水により著しく汚染し、これらの汚染により水俣病やイタイイタイ病などの公害を引き起こすことになった。

これを契機に1970年に水質汚濁防止法が成立し71年から施行された。水質汚濁防止法には「人の健康の保護に関する環境基準(カドミ、有機水銀、有機リン、六価クロムなど)」と「生活環境の保全に関する環境基準(BOD、COD、窒素、リンなど)」がある。それぞれの環境基準に対して全国一律排水基準を定めている。この一律排水基準は、排水基準違反を容易に認定できるように排水水質基準の最大値で定めている。水質汚濁防止上不十分と認められる水域については、都道府県の条例によって、より厳しい基準(上乗せ排水基準)が設定されている。表1に神奈川県

のA水域(水域によっても基準が異なる)及び海域、滋賀県における上乗せ排水基準と一律排水基準と対比して示した。

水質汚濁防止法が施行された結果、「人の健康の保護に関する環境基準」は、ほぼ達成されるまでになった。

一方、「生活環境の保全に関する環境基準」においてはここ10年は横ばい状態であり、赤潮、アオコの発生も減少していない。生活環境項目の河川、湖沼、海域及び全体の達成率の推移を図1に示した。また、BOD(生物化学的酸素要求量)、COD(化学的酸素要求量)等の環境基準達成率は、平成13年度で平均79.5%であるが、湖沼では45.8%、東京湾では68%、伊勢湾56%、瀬戸内海74%であり、湖沼、内湾で達成率が低くなっている。このような閉鎖水域では窒素、リン等を含む物質が流入し、富栄養化に伴う「赤潮」等の発生が見られる。赤潮の発生は東京湾44件(2001年)、伊勢湾47件、瀬戸内海88件、有明海42件(2002年)になっており、東京湾では青潮も観察される²⁾。

このように富栄養化の進展を止められない理由の一つとしてBODやCODなどの有機物を完全に除去したとしても、窒素・リンなどの栄養塩によって生ずる内部生産(メカニズムは次項に説明)により富栄養化が起きることがあげられる。窒素・リンの除去なしには赤潮、アオコ発生の原因である富栄養化を防ぐことは出来ない。

富栄養化防止の観点から1993年に窒素・リン規制にかかわる環境基準が定められた。その後、東京湾などの閉鎖水域の改善が進まないことから、2002年には窒素・リンの総量規制(第5次水質総量規制)が、限定的(東京湾、伊勢湾、瀬戸内海の三箇所、排出量50m³/日以上)の河川等へ直接排水する事業所)ながらスタートした。2005年度における削減目標量を2000年度における汚濁負荷量と比較すると、関係20都府県全体では窒素含有量については96%、リン含有量については93%とすることに設定している。この目標達成のために各自治体により窒素・リンの上乗せ排水基準が適用されている。表2に下水道処理場における東京都、神奈川県の上乗せ排水基準を示した。一律排水基準と比較して厳しく設定されている。

このように窒素・リンの法規制は今後一層厳しくなることが予想されることから、この除去を行う高度処理システムの開発とその適用・展開が進展していくものと考えられる。

表1 全国一律排水基準と県条例上乗せ排水基準の例

	水質項目	全国一律基準	神奈川県上乗せ基準		滋賀県上乗せ基準
			A水域	海域	
人の健康 の保護に 関する 環境基準	カドミウム及びその化合物 (mg/l)	0.1	ND	一律基準と同	0.01
	シアン化合物 (mg/l)	1	—	一律基準と同	0.1
	有機リン化合物 (mg/l)	1	ND	0.2	ND
	鉛及びその化合物 (mg/l)	0.1	0.05	一律基準と同	一律基準と同
	六価クロム (mg/l)	0.5	0.05	一律基準と同	0.05
	砒素及びその化合物 (mg/l)	0.1	0.01	一律基準と同	0.05
	全水銀 (mg/l)	0.005	一律基準と同	一律基準と同	一律基準と同
	有機水銀 (mg/l)	ND	一律基準と同	一律基準と同	一律基準と同
	PCB (mg/l)	0.003	一律基準と同	一律基準と同	一律基準と同
	ホウ素 (mg/l)	海域 230	一律基準と同	一律基準と同	一律基準と同
		海域以外10	一律基準と同	一律基準と同	一律基準と同
フッ素 (mg/l)	海域 15	一律基準と同	一律基準と同	一律基準と同	
	海域以外8	一律基準と同	一律基準と同	一律基準と同	
生活環境 の保全に 関する 環境基準	pH	海域 5.0-9.0	—	一律基準と同	一律基準と同
		海域以外 5.8-8.6	一律基準と同	—	6.0-8.5
	BOD (mg/l)	160	15 (10)	一律基準と同	70-100*1 50-80*2
	COD (mg/l)	160	15 (10)	25 (20)	70-120*1 50-80*2
	SS (mg/l)	200	35 (20)	70 (40)	90*1 70*2
	n-ヘキサン抽出物 (鉱物油) (mg/l)	5	3	一律基準と同	一律基準と同
	n-ヘキサン抽出物 (動植物油) (mg/l)	30	3	5	20
	フェノール類含有量 (mg/l)	5	0.005	0.5	1
	銅 (mg/l)	3	1	1	1
	亜鉛 (mg/l)	5	1	1	1
クロム (mg/l)	2	0.1	一律基準と同	0.1	

注) ※1：日排水量30-50m³/日に適用 ※2：日排水量50m³/日以上に適用。

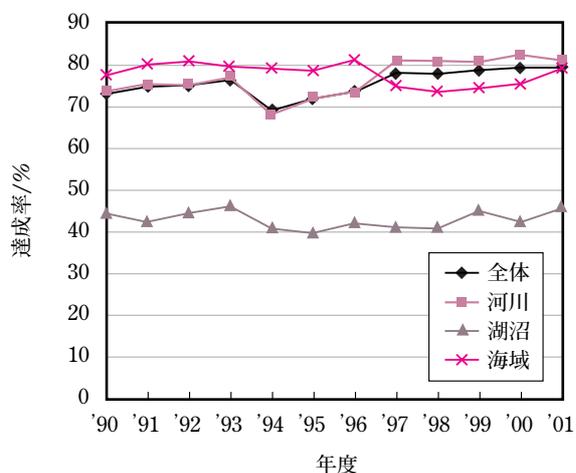


図1 生活環境項目の達成率の推移¹⁾

表2 各自治体公共下水道終末処理場における窒素・リンの上乗せ排水基準

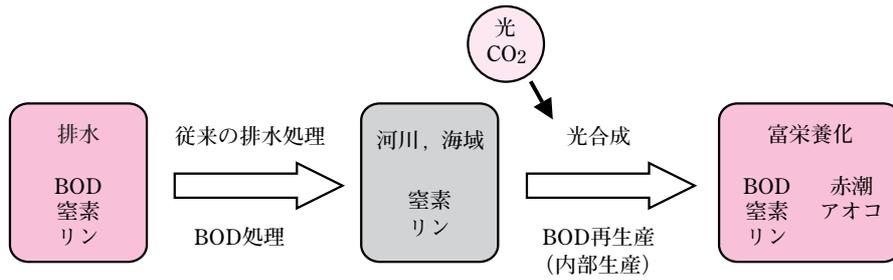
	窒素 mg/l	リン mg/l
国の一律基準	60	8
東京都上乗せ基準	20	1
神奈川県上乗せ基準	10	0.5
東京湾自治体目標値	8	0.4

注) 数字は日間平均

3. 窒素・リン除去高度処理について

3.1 窒素・リン除去が必要な理由

BOD, COD のような有機物が除去されたとしても、排水中に窒



窒素・リンを除去をしないと、放流された河川、海域で光合成により、赤潮、アオコが発生する。除去したBODが再生産（内部生産）される。

図2 富栄養化による赤潮発生のメカニズム

素・リンが含まれると大気中に無限に存在する炭酸ガス (CO₂) と太陽光により光合成が起き、赤潮、アオコなどの植物プランクトン（有機物）が生産される（図2）。例えば従来の排水処理施設により 100mg/l の BOD が 80% 除去されたとしても、窒素・リンを除去しなければそれに匹敵する BOD の内部生産が起きることが計算上明らかにされている³⁾。従って、閉鎖海域では窒素・リンの除去なしに富栄養化対策を進めることは極めて困難であるといえる。

3.2 生物学的窒素除去のメカニズムと排水処理用担体の役割

曝気槽（好気槽）中でアンモニア性窒素は、まず硝化菌により硝酸性窒素にまで酸化される（図3）。硝化菌は生育が非常に遅いため、通常の処理方式では槽内からの硝化菌の流出を防ぐため、排水の滞留時間を長くする必要があり、そのため、アンモニア性窒素を効率よく除去するためには曝気槽の大型化が必要となる。

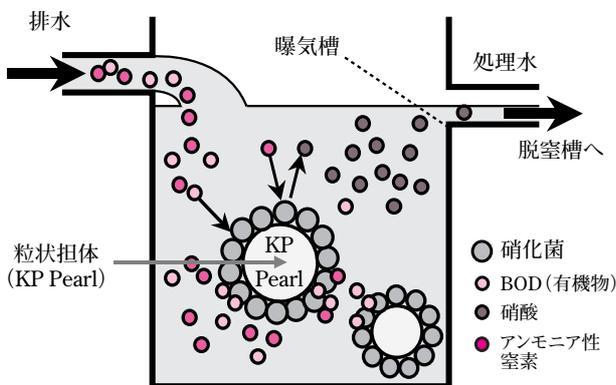


図3 KPパールによるアンモニア性窒素の除去

この課題は担体表面に硝化菌を選択的かつ大量に付着させることができる樹脂を利用することで克服できる。このような表面を有する担体を曝気槽に投入し馴養することで、大量の硝化菌を表面に付着させることができる^{4),5)}。

担体を投入することで硝化菌を槽内に留め効率よくアンモニア除去することが可能になり、窒素を除去する目的の各種処理槽に利用されるようになった。アンモニア性窒素は曝気槽で硝酸性窒素にまで酸化される。下式のように硝酸性窒素は脱窒槽（脱窒槽）内で脱窒菌により還元され、気体窒素として大気中に放出される。

脱窒菌



脱窒菌は硝化菌よりも生育が早いので、通常の活性汚泥法で十分とされてきたが、付着担体法により槽内の脱窒菌濃度をさらに上げることで、処理施設をさらに小型化できるメリットがあることが認識されつつあるため、脱窒用担体も開発した⁶⁾。

3.3 硝化菌付着担体の硝化能^{7)~9)}

担体投入型高度排水処理法に着目し、約10年前から硝化菌が高濃度に付着できる担体を開発すると共に高度排水処理施設や合併浄化槽への適用展開を行ってきた。

まず、硝化菌が高濃度に付着できる樹脂の選択を行った。すなわち、担体表面の親水疎水バランスや樹脂の架橋間分子量、表面電荷などの性質を細かく調節し、性質の異なる種々の樹脂を用いて担体を作成した。

表3 人工アンモニア廃水の基本組成 (pH 8.3)

NH ₄ Cl	76 mg
NaH ₂ PO ₄	23
NaCl	10
KCl	4.7
CaCl ₂ · 2H ₂ O	235
MgSO ₄ · 7H ₂ O	6.7
水道水	1 L

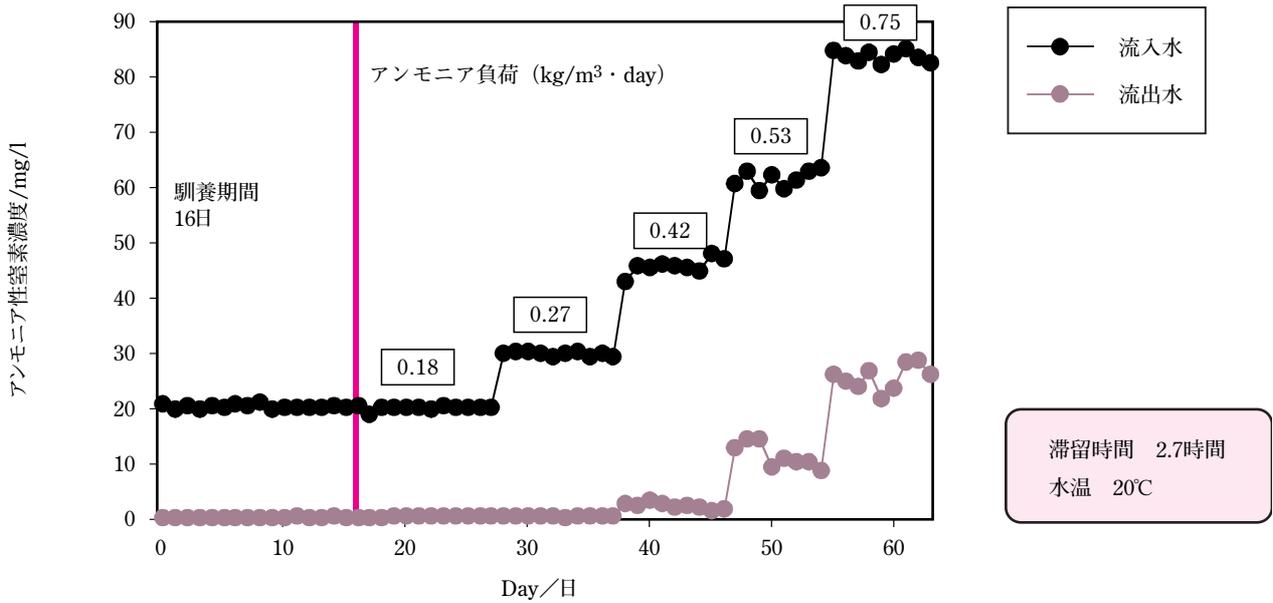


図4 硝化試験の結果

作成した担体の硝化能試験は、容積 12L の直方体のリアクターに容積当たり 15% (みかけ) の 4mm タイプ粒状担体を充填して実施した。リアクターの温度を約 20℃ とし、滞留時間 2.7 時間～8 時間で人工アンモニア廃水(表 3)を流入し、硝化能を測定した。滞留時間を 8 時間から 2.7 時間へと短くし、その後濃度を上げることで徐々にアンモニア窒素負荷を上げていった(図 4)。このように、アンモニア窒素容積負荷が 0.42kg-N/ m³・日までは、アンモニアをほぼ完全に硝化することができた。

硝化能試験の結果をもとに、最もよい硝化能を示す担体を選定し他社担体との比較実験を行った。試作担体を 100 (見かけ充

填率を一定にした) とした場合、PP 系担体が 45、PVA 系担体が 60 と極めて良好な硝化能を示した。この担体を商品名 “KPパール” として、製品化した。

以下に、開発した硝化用担体KPパールの製造法、特徴について述べる。

3.4 硝化用担体KPパールの特長^{10)~15)}

KPパールは図 5 に示すように、下記の手順で製造され、生産量は年間およそ 2000 m³ が可能である。

- ① 光硬化性樹脂溶液をポンプでノズル槽に供給する。
- ② 塩化カルシウム溶液に滴下し粒状化する。
- ③ 粒子を光照射部に導き光硬化させる。

このような過程を経て製造したKPパール(写真1)は次のような特徴をもっている。

- ① ポリエチレングリコールを主成分とする光硬化性ウレタン樹脂(図6)で硝化菌を安定かつ大量に表面に付着できる。

硝化菌付着前後のKPパール表面の走査型電子顕微鏡観察結果を写真2示した。

- ② 成型方法より、3.4mm～5.5mmの範囲で均一粒径の製品を大量に製造可能である。(標準品 4.2mm) 製造した4mmタイプ担体の粒度分布を図

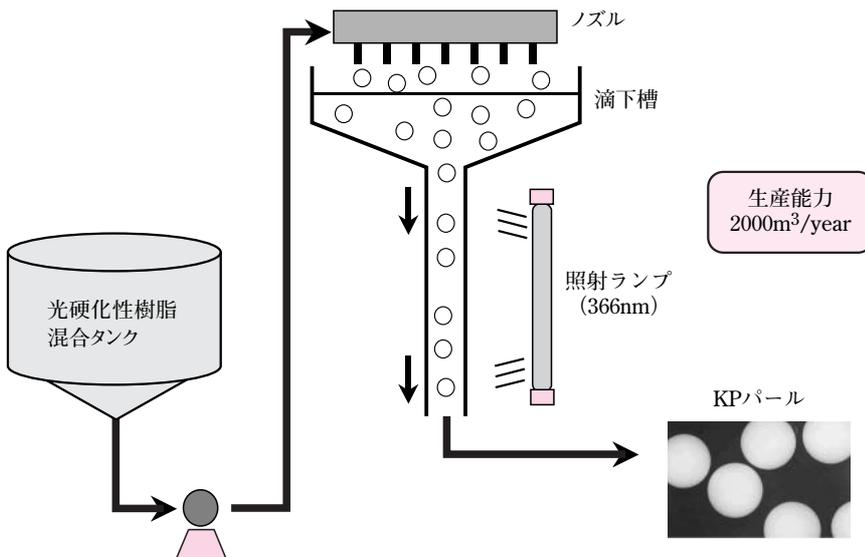


図5 KPパール製造ラインの模式図

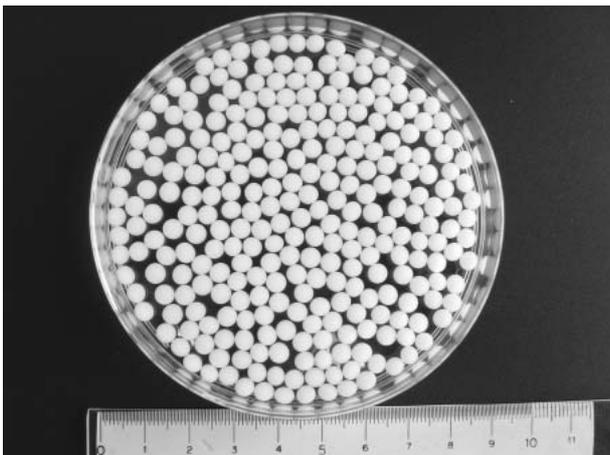


写真1 KPパール

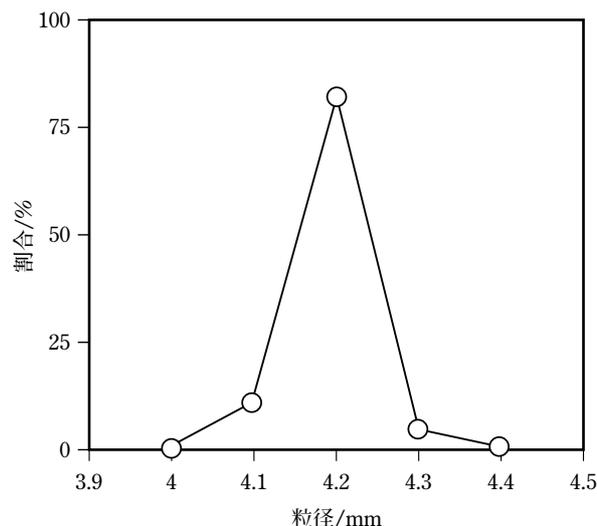


図7 KPパールの粒度分布

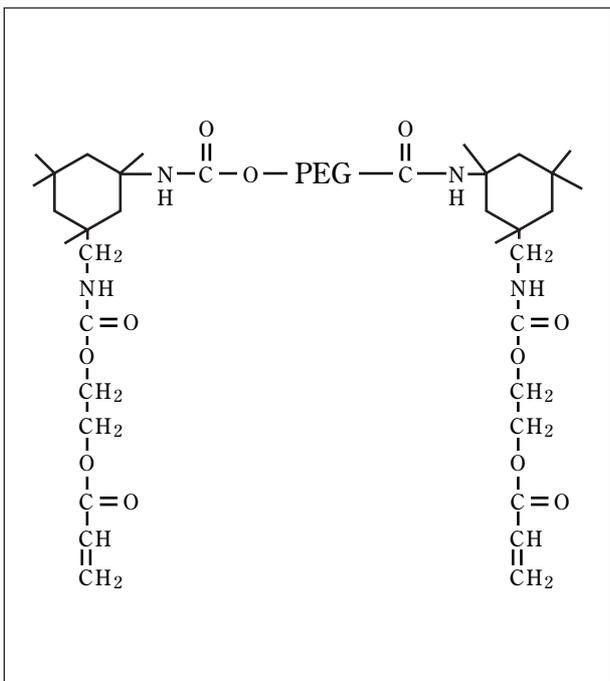
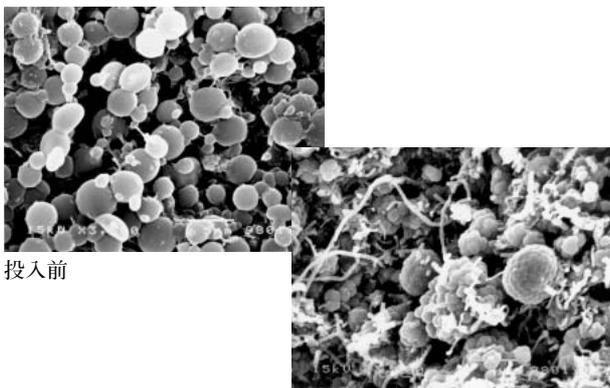


図6 光硬化性樹脂の構造式



投入前

投入後 (一般菌中の硝化菌2~3%が10%に増加)

写真2 KPパール表面の走査型電子顕微鏡写真

7に示した。4.2mm ± 0.1mmの範囲に97%以上と非常にシャープな分布をしていることがわかる。

- ③ 担体の比重を1.004-1.070 (標準品 1.02) の範囲で調整することができる。標準品は比重が水に近く、槽内での流動に余分なエネルギーを必要としない。
- ④ 担体の物理的強度が強く、このため攪拌効率に優れたエアレーターの使用が可能である。
- ⑤ 光架橋により不溶化しているため、化学的に安定であり生分解を受けない。
- ⑥ 形状がほぼ真球であり、磨耗等による消耗が少なくハンドリング性がよい。
- ⑦ 製品の長期保管が可能である。
- ⑧ 既存設備の改良だけによる高度処理が可能になる。
- ⑨ 担体表面の親水疎水、表面電荷を自由に設計することができるため、菌体の高密度付着が可能である。

上記特長を持つことから、排水の種類やその処理設備に適した担体の開発や製造が可能である。

4. 排水処理施設の種類のKPパールの利用

排水処理施設は産業排水を処理する施設と主に生活排水を処理する施設に分けることができる。生活排水処理施設には「下水道」「農業集落排水処理施設」「合併浄化槽」などがある。その他に埋立地から出る浸出水を処理する施設「埋立浸出水排水処理施設」などがある。これらの多岐にわたる処理施設に対して、約10年前より硝化菌を高濃度に付着させることができる含水ゲル担体KPパール投入を開始し、現在までに施設数で20件以上、量で4000 m³以上の担体を投入した。これにより、硝化用担体KPパールは極めて優れた硝化処理能力と持続性を有していることを確認した。

最近では、一施設で1000 m³以上のKPパールが投入される事例もある^{16), 17)}。従来の散気管方式による曝気槽だけでなく水中エアレーター方式の曝気槽にも投入され、さらには、合併浄化槽の高度化にともなって、それら浄化槽向けにも投入されてきている。

排水処理担体による処理が実施されている、或は実施は検討されている代表的な排水処理施設の例を下記に示す。

4.1 産業排水処理施設

河川等へ直接放流する工場（特定事業所）は、水質汚濁防止法の水質基準を守る必要があるため、工場内に排水処理施設を設置している。

民間し尿処理施設、メッキ工場などから排出される表面処理排水、電力会社の排煙を水で落としたあとの洗煙排水など窒素が多く含まれる産業排水処理施設にKPパールが採用されている。

4.2 下水道

下水道とは、下水管、ポンプ場、終末処理施設により生活排水を処理することを言う。市町村が単独で行う公共下水道と都道府県が事業主になり流域自治体の処理を行う流域下水道に分けられる。2002年現在東京都における下水道普及率は97.6%、平均で65.2%となっている。しかしながら、人口5万人未満市町村の普及率は31.8%になっている¹⁸⁾。

第5次総量規制もあり、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海沿岸の自治体は窒素・リン除去の高度処理化を推進している。KPパールは、これら自治体に窒素除去高度処理用担体として納入されている。

4.3 合併浄化槽

浄化槽には、し尿のみを処理する単独浄化槽と、し尿以外に洗濯、風呂、台所などに使われる生活雑排水を同時に処理する合併浄化槽に分けられる（図8）¹⁹⁾。単独浄化槽の規制はBOD 90mg/l以下（合併浄化槽 20mg/l以下）と緩く生活雑排水は垂

れ流されている²⁰⁾。このようなことから、2001年から単独浄化槽の新設が禁止された（切り替え義務なし）。

合併浄化槽を整備している人口は2001年度現在で7.6%である。その設置、維持を個人で行う点は他の排水処理設備と異なる。人口密度が小さい地域では、下水道を設置するよりもコストダウンになり、設置スペースは駐車場一台分、設置期間も7～10日と短期間であることから徐々に普及しつつある。

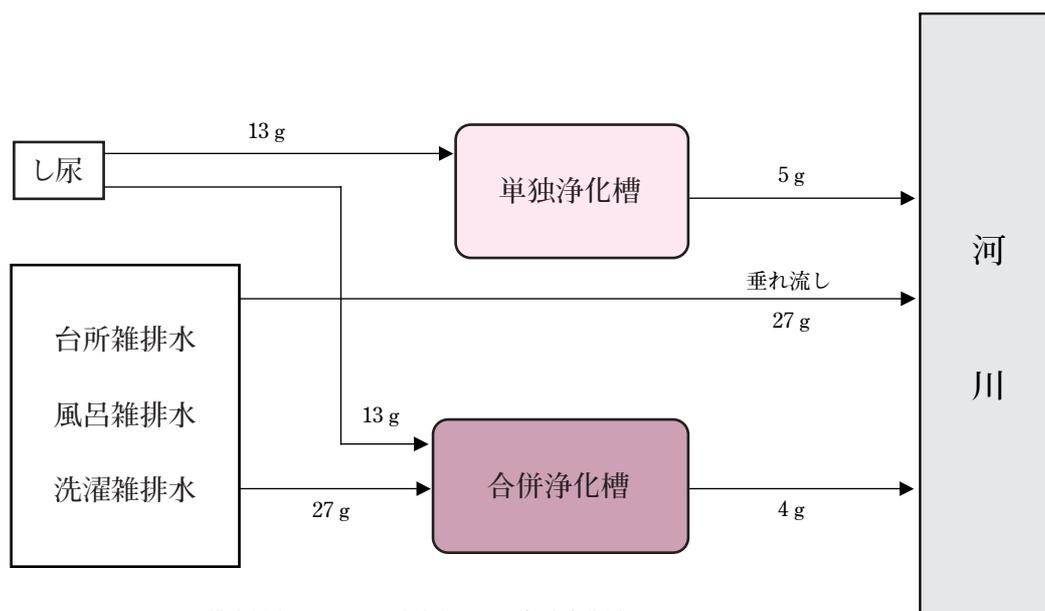
また、近年窒素・リンを効率よく除去することができる高度合併浄化槽の開発が進んできた。この様な情勢に対応して担体の開発・改良を行い、窒素除去高度処理用担体として商品化している。

4.4 埋立浸出水排水処理施設

産業廃棄物やゴミ等の埋立地は、雨水等によって浸出した排水を処理施設に集め処理する必要がある。近年最終処分場で埋め立てられるゴミ質は焼却灰や飛灰の占める割合が増加してきており、それに伴い浸出水中の窒素濃度が高濃度化（数100mg/l）している²¹⁾。このため窒素除去高度排水処理化が望まれており、この用途にKPパールが採用されている。写真3に埋立浸出水排水処理施設にKPパールを投入している様子を示した。

4.5 農業集落排水処理施設

農業振興地域の整備に関する法律に基づく農業集落を対象にしたもので、し尿、生活排水、畜産排水（小規模）などを対象にしている。人口1000人規模以下で1施設としている。一般に日本農業集落排水協会が開発したJARUS型の処理方式が採用されており、下水道と同じく下水管で排水を集める方式を用いている。近年は窒素・リン除去用の高度処理施設も建設されている。



BOD1日1人あたりの排出量を40gとして計算すると、単独浄化槽は合併浄化槽の8倍の汚れを放流する。

図8 単独浄化槽および合併浄化槽の仕組み¹⁹⁾

1. 投入前の担体の荷姿(写真右上)
2. 硝化槽への担体投入(写真下)
3. 担体の曝気している状態(写真右下)



写真3 KPパール投入の様子

光硬化性樹脂を用いた担体は、担体表面のコントロールが容易なため、硝化、脱窒用以外にも幅広く利用される可能性を秘めている。さらなるコストダウンと併せて、たとえば、水槽用担体、養殖用担体、厨房処理水用担体、嫌気発酵用(消化)担体等、新用途への展開を進め、水環境保全の一翼を担っていきたい。

参考文献

- 1) 日本水環境学会編：“日本の水環境行政”、株式会社ぎょうせい(1999)
- 2) 環境省編：“平成15年版環境白書”、p.131-147、株式会社ぎょうせい(2003)
- 3) 高度処理浄化槽開発技術研究委員会編：“高度処理浄化槽の普及と展開に向けて”、p.1-20、株式会社ぎょうせい(2002)
- 4) J. Tanaka, H. Izumida et al.: Environmental Microbiology, 5, p.278-286 (2003)
- 5) 田中淳一：塗料の研究、139, p.2-10 (2002)
- 6) T.Takadera, H.Izumida et al, ICWRER2002, vol2, p.131-134 (2002)
- 7) 泉田仁、高寺貴秀、杉浦敦子：月間エコインダストリー8月号、43 (2001)
- 8) 泉田仁：拓人、p.12-16 (2002)
- 9) 泉田仁、森田薫：産業と環境、p.83-86 (2003)
- 10) 三島浩二ほか：エバラ時報、111, p.1-9 (1994)
- 11) 菊田真人、泉田仁、牧野隆、平間敏郎：塗料の研究、127, p.35 (1996)
- 12) 泉田仁、楨哲：地球環境、4月号、p.144-145 (2000)
- 13) 泉田仁、杉浦敦子、高寺貴秀：第36回水環境学会要旨集、p.328 (2001)
- 14) H. Izumida, M. Naonori and T. Maki T: Fall Conference of Korean Society of Environmental Engineers (KSEE), p.155-156 (2001)
- 15) H. Izumida : An advanced nitrogen or phosphate treatment system (ENVIRO 2002 in Korea). p.11-17 (2002)
- 16) 三島浩二、伊藤三郎、平間敏郎：産業機械、576(9), 3 (1998)
- 17) 力石元：エバラ時報、177, 39 (1997)
- 18) 社団法人日本下水道協会ホームページ
http://www.alpha-web.ne.jp/jswa/05_arekore/07_fukyu/index.html (2004)
- 19) 石井薫、山田国広：“浄化槽革命”、合同出版(1994)
- 20) 本間都、坪井直子：“合併浄化槽入門”、北斗出版(1998)
- 21) 力石元：造水技術、24, p.47-50 (1998)
- 22) 中村浩志、鈴木卓ほか：第32回下水道研究発表会講演集、428 (1995)
- 23) 三島浩二、山田武彦ほか：エバラ時報、170, 81 (1996)

5. 主な適応例

KPパールの適用例を文献にて紹介する。

- ① 一般公共下水を用いて、原水量 25 m³/日、曝気槽 3.2 m³、T-N30mg/l (アンモニア窒素 20mg/l)、BOD 75 mg/l、担体充填率 20% (充填率はすべてみかけ) の条件で高度処理運転をした。その結果、BOD 除去率 95%、アンモニア性窒素除去率はほぼ 100%、リン除去率 82% で良好に処理できている²⁾。
- ② 既存の汚泥焼却炉洗煙排水処理施設を担体投入型高度排水施設に改造し、原水量 30 m³/日、曝気槽 58 m³、アンモニア窒素濃度 350mg/l、COD480mg/l、担体充填率 9% の条件で高度処理運転をした。その結果、アンモニア性窒素は、5mg/l、COD は 20mg/l で良好に処理できている³⁾。
- ③ ごみ埋立地浸出水処理施設での運転実績を紹介する。処理水 3865 m³/日、T-N (全窒素) 535 mg/l、曝気槽 4957 m³、担体充填率 20% の条件で運転を行った。その結果、放流水窒素濃度 16~19mg/l、硝化速度 0.39kg-N/ m³/日、脱窒速度 0.33kg-N/ m³/日であり、担体がない場合の 2.6~4 倍の速度で窒素を処理できた。従来の活性汚泥法と比較すると硝化速度が 1.1~3.9 倍、脱窒速度が 1.1~2.2 を達成している³⁾。

6. おわりに

現在、下水道の窒素全国一律排水基準は日間平均で 60mg/l (最大値 120mg/l) であるが、将来的には規制が強化されていくと考えられる。また、閉鎖水域の下水道施設については、すでに窒素 10mg/l という上乘せ基準値が設定されている。担体投入型排水処理法は、わずかなシステムの改良のみで厳しい排水基準にも充分に対応できることから、今後伸びていくことが期待される。