

下水道による地球温暖化適応と安全で美しい水環境の実現

下水道研究部長

清水 俊昭

下水道による地球温暖化適応と安全で美しい水環境の実現

下水道研究部長 清水俊昭

はじめに

国総研下水道研究部では下水の高度処理や再利用あるいは下水汚泥の処理処分に関する技術の研究を行っており、①安心して暮らせる生活環境を実現するために必要な、下水処理水や汚泥の安全性・快適性を確保すること、②美しく良好な環境の保全と創造を実現するために必要な、環境質を低下させる汚濁を除去し規制すること、③地球環境への負荷軽減のために必要な、温室効果ガス排出量を削減することや、地球温暖化に伴う気候変動に適応するために必要な、水の循環利用に関すること、④国際的な水環境保全のための技術援助のため、国際的な支援プロジェクトに参加すること、⑤新に開発された下水処理技術を根幹的な下水処理技術として政令に定めるために必要な評価を行う委員会の事務を取り扱うことなどを実施している。本日は、これらのうち①～③に関する主要な調査研究成果を通じて、最近の下水処理を巡る技術の状況等を報告する。

1. 地球温暖化と下水処理

地球温暖化は人類の化石燃料消費に伴い、地球規模で炭酸ガスバランスが崩れたことによって引き起こされた現象であり、これを防止するためにはエネルギーの化石燃料依存から脱却しなければならない。また、緊急かつ大幅な温暖化ガス発生量削減を達成する過程では、相当なエネルギー消費量削減が必要であると考えられている。

下水処理は都市の公的部門において消費するエネルギーのうち比較的大きな部分を占めており（図－1.1）、処理に伴って排出される温室効果ガス発生量も多く、その削減は重要な

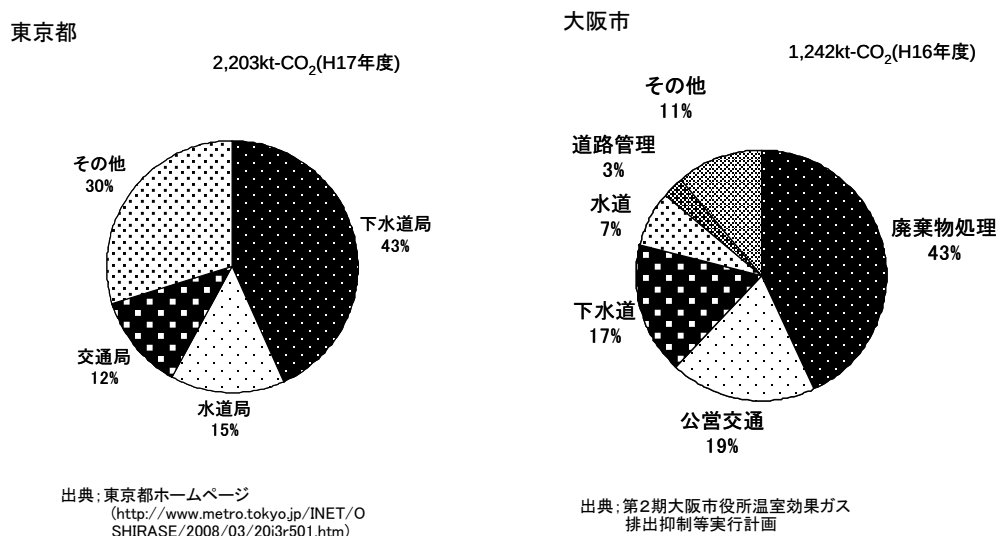
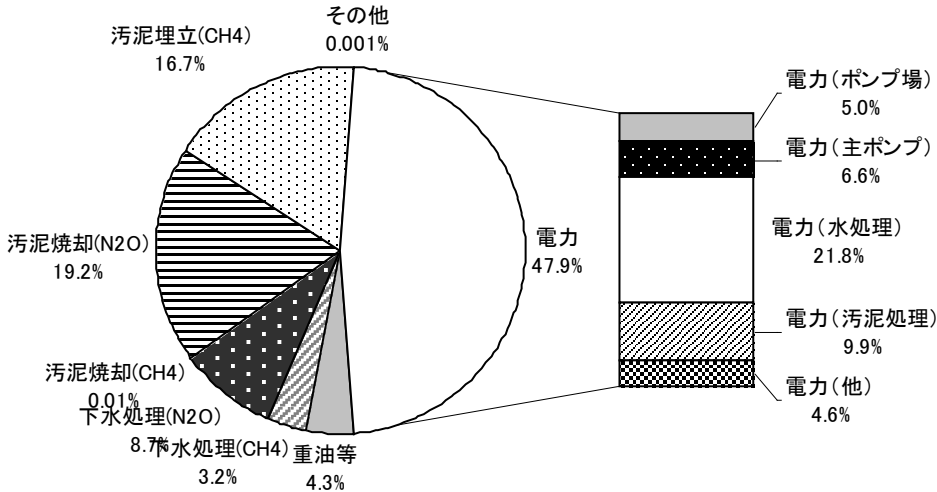
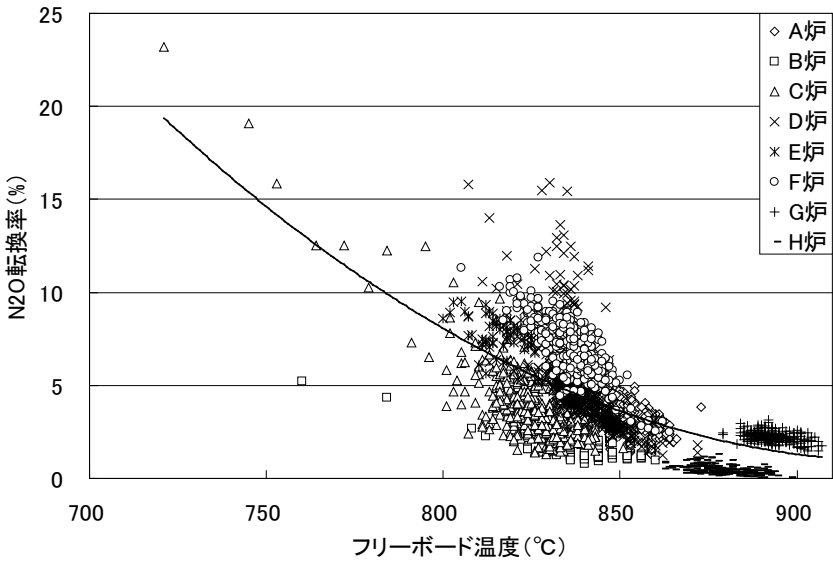


図-1.1 都市の事務・事業から排出される温室効果ガスの例

課題である。下水処理における温室効果ガス削減のための様々な試み（省エネ機器への切り替え、汚泥消化ガスの有効利用、小水力発電、汚泥の燃料化、自然エネルギーによる発電、等）が行われている。下水処理や汚泥処理を行う際に下水に含まれる有機物が分解されることによって発生する二酸化炭素については、カーボンニュートラルとして、温室効果ガス発生量には含まれないことになっているが、同時に発生するメタンや亜酸化窒素が、そのまま大気放出されると、温室効果ガスとしてカウントされることになっている。これらのガスは二酸化炭素への換算係数が大きいため、発生量自体は少なくとも二酸化炭素に換算した下水処理全体の温室効果ガス発生量に占める割合は無視できない大きさになっている（図－1.2）。とりわけ、亜酸化窒素は換算係数が310倍と大変大きく、主な発生源



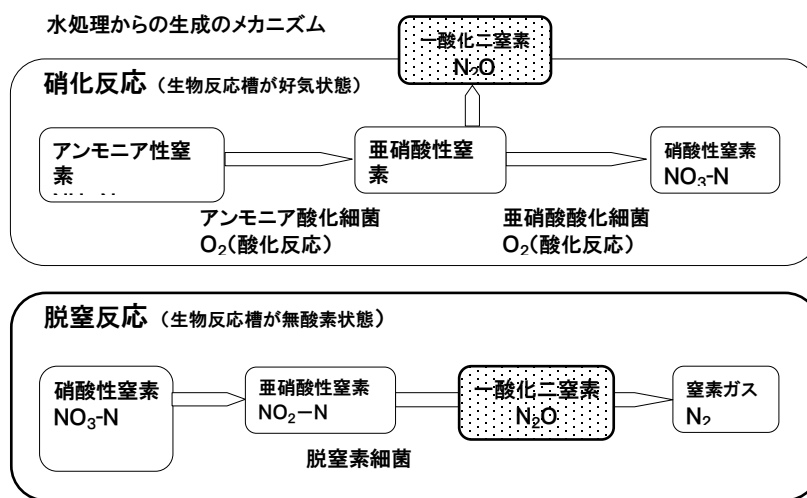
図－1.2 下水道事業における温室効果ガス排出割合の例（CO₂換算の比率）¹⁾



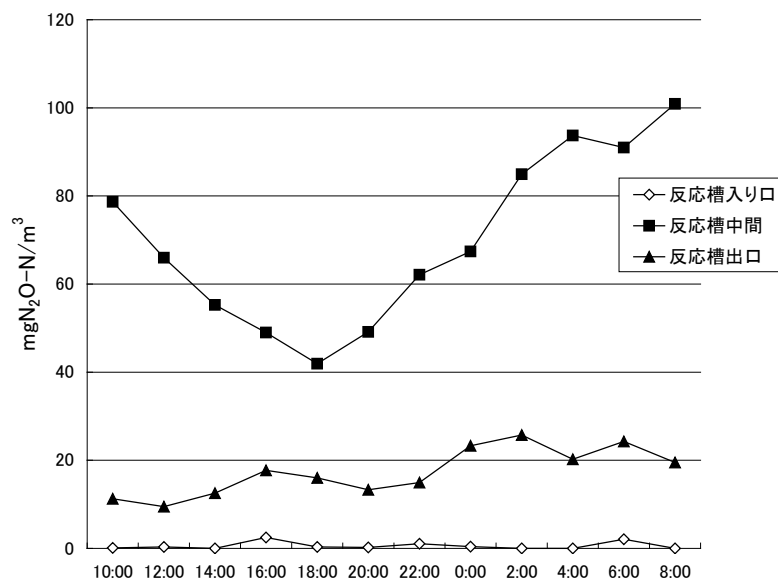
図－1.3 流動床型焼却炉フリーボード温度と N₂O 転換率の関係²⁾

である汚泥焼却炉やエアレーションタンクでの発生量削減が必要と考えられている。

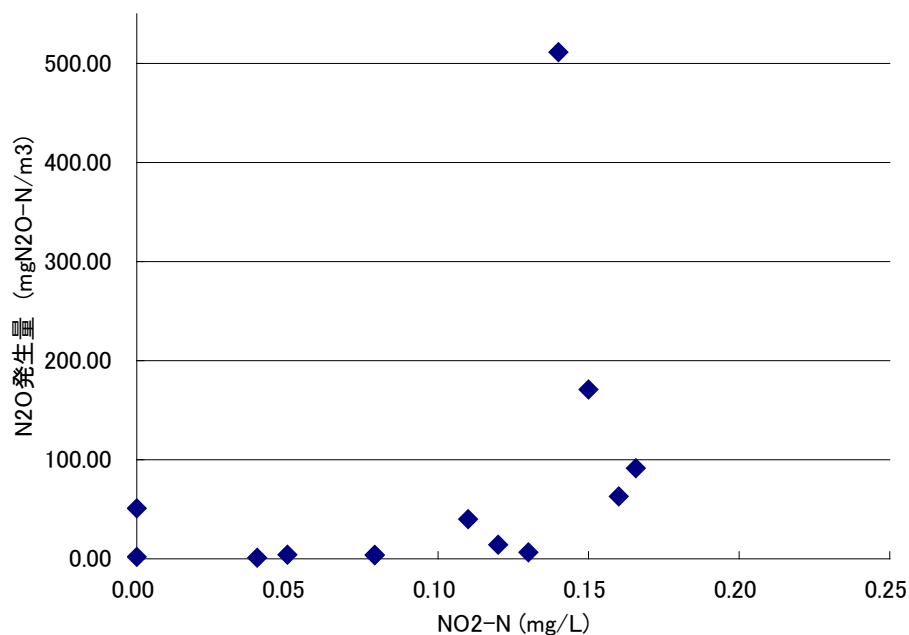
亜酸化窒素発生源のうち汚泥焼却炉からの発生抑制については燃焼温度制御による方法が効果的であること（図－1.3）が当研究部の調査などにより判明しており、既に対策が進められている。一方、エアレーションタンクからの亜酸化窒素ガス発生量については変動が激しく、発生原因も複数あって（図－1.4）、その機序がよく解明されておらず、適切な制御方法は未だ見つかっていない。下水道研究部では、「下水道施設における温暖化対策に関する調査」の課題の下で、活性汚泥処理工程で発生する亜酸化窒素の排出機序に関する解明と、排出抑制策及び窒素の処理水準に応じた亜酸化窒素排出量原単位の提案に関する技



反応槽における N_2O 発生量の経時変化の一例



図－1.4 下水処理における N_2O 発生要因と変動³⁾

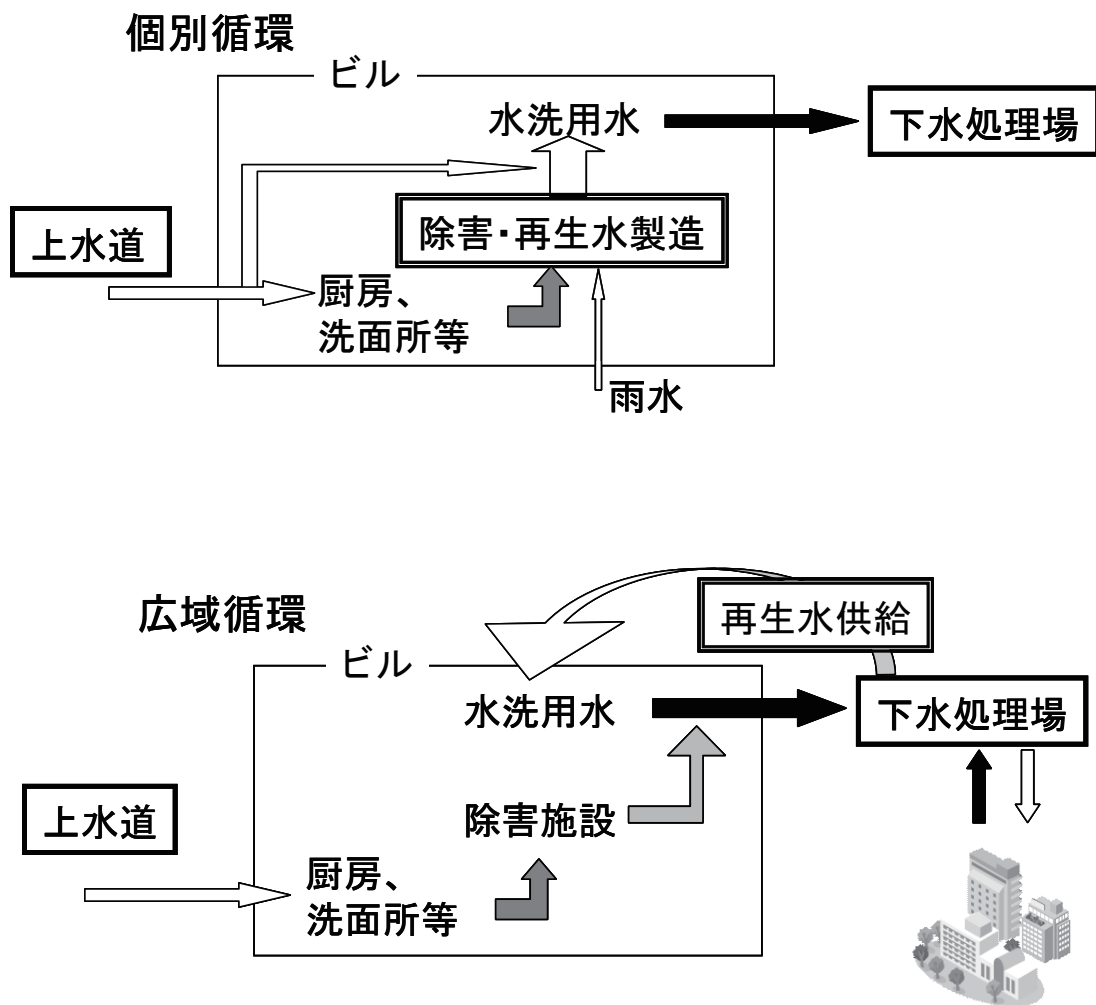


図－1.5 処理水中の亜硝酸性窒素濃度と N₂O ガス発生量の関係

術的検討を進めており、特に生物反応タンクにおける硝化反応との関係に注目して、発生率削減手法の検討を進めている。現在までのところ、硝化が100%進行する状況や全く硝化が起こらない状況では亜酸化窒素の発生率は低いことが明らかになっており（図－1.5）、様々な流入変動を受ける施設内でどのような制御を行えば確実に発生率を抑制することができるか検討を進めている。

地球温暖化の進行に伴う気候変動の影響として、日本では降水状況が極端化し、豪雨と渇水の頻度が増加すると考えられている。このような気候変動の影響のうち、渇水の頻発に対する適応策として、都市内で水の循環利用や節水を推進し、都市用水の取水量を減らして利水安全度を高めることが必要である。水の循環利用には、個別あるいは一地区の建物内で行う個別・地区循環と、下水道と中水道を介して行う広域循環があり（図－1.6）、水の需給が逼迫している福岡、東京、千葉、神戸、高松などでは下水処理場から再生水を中水道で供給する広域循環利用が行われている。当研究部では、下水処理水の再利用に関わる基準等（表－1.1）の整備をすすめ、水の循環利用推進を支援して来ている。

このような循環利用を行うことは、また、水の輸送に関わるエネルギーの削減や閉鎖性水域に排出される汚濁負荷量削減に関わるエネルギーの削減を通じて、水利用に関わる温暖化ガス排出削減に寄与できる可能性があり、現在、実態調査を行っている。表－1.2 は平成20年度に実施した水の循環利用に関わる地球温暖化ガス発生率調査の結果である。この調査は循環利用に伴う部分だけを抽出したものであるが、調査対象施設間で再生水1m³の利用に係る温室効果ガス発生量には大きな違いがあり、利用の形態や利用状況によって



図－1.6 水循環利用方式（個別循環と広域循環）

表－1.1 下水処理水の再利用に関わる基準等

主な再生水利用基準等の名称	制定年次
下水処理水循環利用技術指針（案）	1981（昭和 56）年
下水処理水の修景・親水利用水質検討マニュアル（案）	1990（平成 2）年
下水処理水の再利用水質基準等マニュアル	2005（平成 17）年

表－1.2 循環利用施設の CO₂ 発生率 調査結果（2008 年度）

方式	施設	規模 (m ³ /日)	生物 処理	膜処理	ろ 過	オ ゾ ン	活 性 炭	凝 集 沈 殿	そ の 他	平均 稼働 率 (%)	再利用 CO ₂ 発生率 (kg/m ³)
広域	A	1600	有			有		有		9	2.86
広域	B	7200			有	有		有		73	0.77
広域	C	7900	一部有	一部有	有	有				44	0.96
広域	D	5000			有	有				45	0.40
個別	E	780	有		有					36	2.43
個別	F	397	有		有				有	58	0.40
個別	G	120	有		有		有			65	0.84
個別	a	950			有		有			56	1.22
個別	b	50	有		有					127	0.70
個別	c	88		有			有			49	0.33
個別	d	153	有		有		有			15	2.67
個別	e	719			有					40	0.09
個別	f	1,589		有	有				有	18	3.75
個別	g	2,822	有	有			有			92	1.40
個別	h	1,051			有		有			75	1.10

注）広域の算定対象は再生処理施設（通常の下水処理分を除く）と利用先までの配水施設。個別循環の算定対象は再生処理施設（除害施設のうち再利用相当分含む）で、建物内配水のための施設及び汚泥処分を含まない。

は上水道の平均的なライフサイクル温室効果ガス発生率より高い数値となっており、温暖化ガス発生率の削減に寄与できない場合もあることが判明した。

今後は、水の循環利用に係わるシステム全体としてのライフサイクルエネルギー及び温室効果ガス発生率についての調査を進め、効果的な下水処理水再利用手法を明らかにするため、安全性を含む総合的な見地から検討を進めることとしている。

2. 再生水利用と下水処理の高度化

下水処理水を再利用するためには、再利用の用途別に必要とされる水質を確保するために、ろ過をはじめとする高度処理を付加する場合が多い。平成17年に定められた再生水を都市用水として利用する場合の用途別基準は、表－2.1に示す通りであり、各々の用途毎に示された代表的な処理方法と同等以上の高度処理を付加することによって、必要な水質が確保される。この様な処理の高度化は、利用用途における機能上の必要性とともに利用

表－2.1 再生水利用に関する水質基準等及び施設基準

	基準適用箇所	水洗用水	散水用水	修景用水	親水用水
大腸菌	再生処理施設出口	不検出 ¹⁾	不検出 ¹⁾	備考参照	不検出 ¹⁾
外観		不快でないこと			
濁度		2 度以下（管理目標値）			2 度以下
色度		－ ²⁾	－ ²⁾	40 度以下 ²⁾	10 度以下 ²⁾
臭気		不快でないこと ³⁾			
pH		5.8～8.6			
残留塩素	責任分界点	(管理目標値) 遊離残留塩素 0.1mg/L 又は結合 残留塩素 0.4mg/L 以上 ⁴⁾	(管理目標値 ⁴⁾) 遊離残留塩素 0.1mg/L 又は結合 残留塩素 0.4mg/L 以上 ⁵⁾	備考参照 ⁴⁾	(管理目標値 ⁴⁾) 遊離残留塩素 0.1mg/L 又は結合 残留塩素 0.4mg/L 以上 ⁵⁾
施設基準		砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること。	砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること。	砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること。	凝集沈殿＋砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること。
備考		1) 検水は 100ml とする（特定酵素基質培地法） 2) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて基準値を設定 3) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて臭気強度を設定 4) 供給先で追加塩素注入を行う場合は個別の協定に基づくこととしても良い	1) 検水は 100ml とする（特定酵素基質培地法） 2) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて基準値を設定 3) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて臭気強度を設定 4) 消毒の残留効果が特に必要ない場合には適用しない 5) 供給先で追加塩素注入を行う場合は個別の協定に基づくこととしても良い	1) 暫定的に現行基準（大腸菌群数 1000 CFU/100ml）を採用 2) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて上乗せ基準値を設定 3) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて臭気強度を設定 4) 生態系保全の観点から塩素消毒以外の処理を行う場合があること及び人間が触れることを前提としない利用であるため規定しない	1) 暫定的に現行基準（大腸菌群数 1000 CFU/100ml）を採用 2) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて上乗せ基準値を設定 3) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて臭気強度を設定 4) 消毒の残留効果が特に必要ない場合には適用しない 5) 供給先で追加塩素注入を行う場合は個別の協定に基づくこととしても良い

者の感覚的快適性や給配水施設を含む設備機能保全上の要求を満足するために行われる。そのため、公共用水域の水質保全を目的として栄養塩類除去等を行う一般的な高度処理とは目的を異にする項目（例えば、色度）があり、付加処理の内容が栄養塩類除去を目的とする下水処理の高度処理化とは合致しない場合がある。農業用水、工業用水、流・融雪用水あるいは環境用水として利用される場合は、利用先の要求にあわせて水質が設定されることになるため、水質基準・施設基準は定められていない。

再生処理のために付加される高度処理は砂ろ過が一般的である。さらに色度改善のためにオゾン処理をおこなうこともしばしば行われる。一方、栄養塩類除去等を目的とする高度処理では、嫌気好気法、循環式硝化脱窒法、嫌気無酸素好気法など活性汚泥法の様々な変法と後段に砂ろ過を組合せる場合が多い。したがって栄養塩類除去のための高度処理が行われていると、再生水質が向上するだけでなく、再利用のために新たに砂ろ過施設を設ける必要がない場合が多く、少ない費用で放流水を再生水に転用できることになると思え

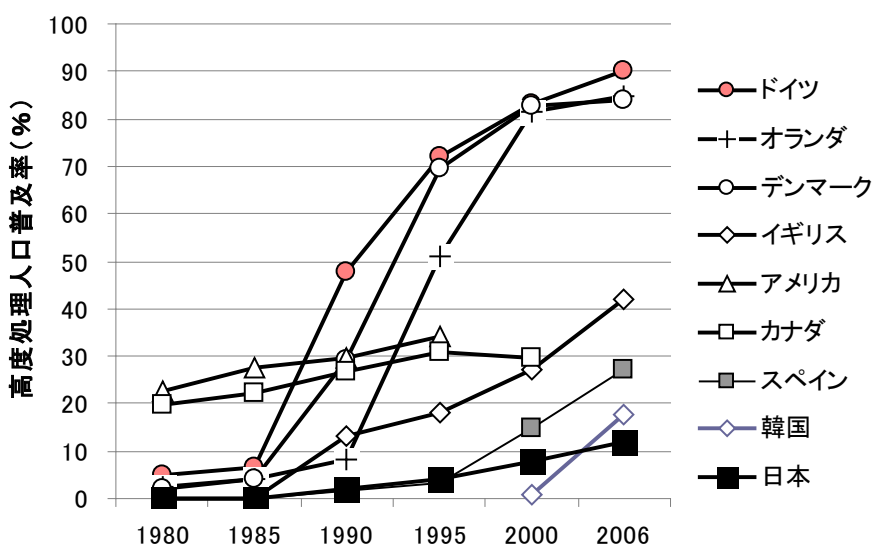
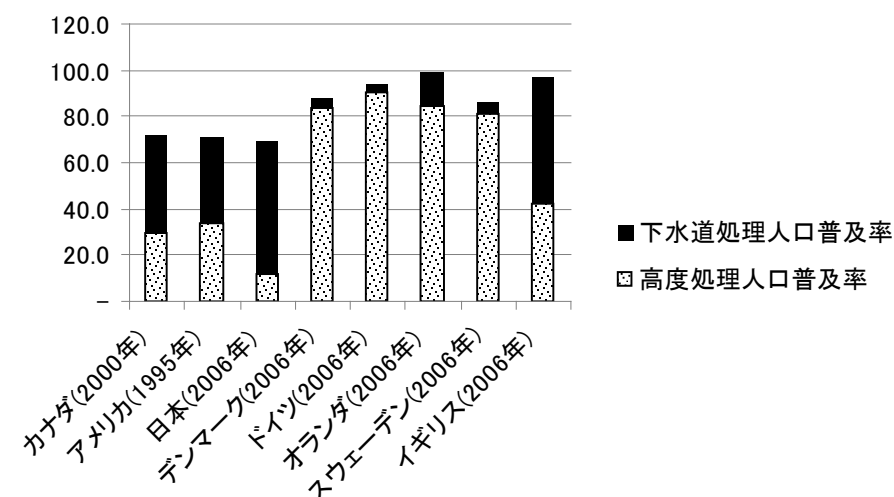
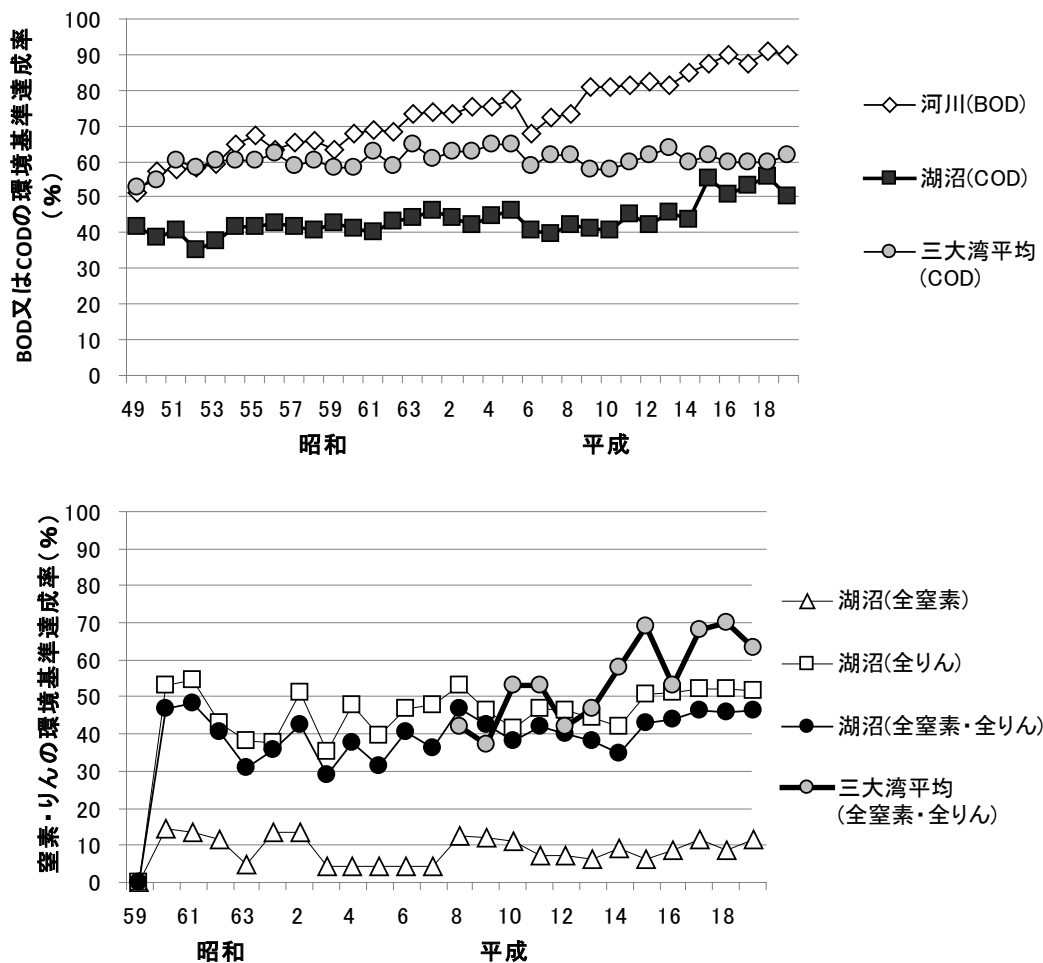


図-2.1 OECD 諸国の下水処理・高度処理普及率⁶⁾

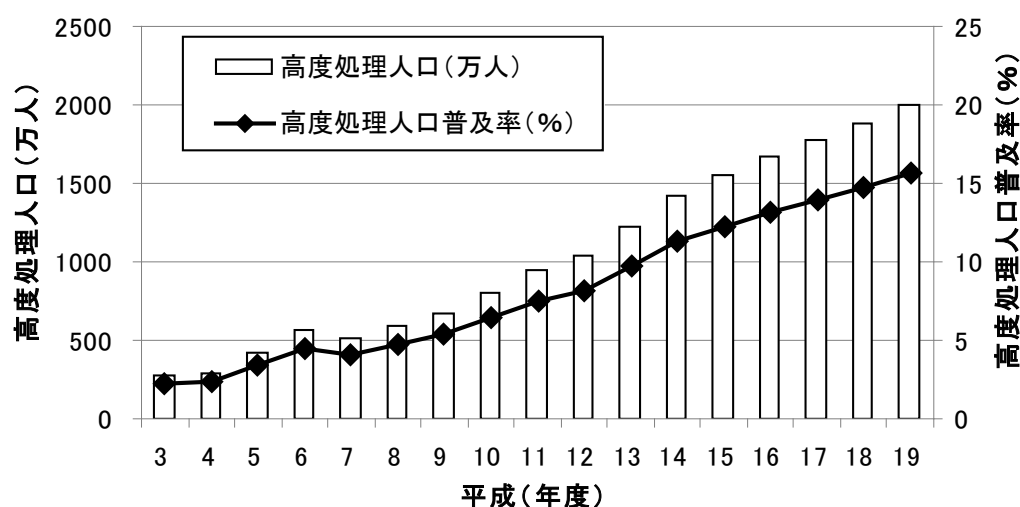


図－2.2 水域環境基準達成状況の推移⁷⁾

られる。

現在、下水処理の高度化は、主として、湖沼・内湾など閉鎖性水域のうち窒素・りん的环境基準が設定された水域にあって、流域別下水道整備総合計画（流総計画という）が策定された区域内にある下水道終末処理場において、流総計画で定められた放流水質基準を達成するために実施されている。高度処理が必要な流域は人口が集中する3大湾と瀬戸内海を含んでおり、高度処理化が必要な人口は約8千万人（総人口に対する割合は約62％）に上る。2007年時点における高度処理の人口普及率は15.7％にとどまっており、2004年にOECDがとりまとめた欧米先進国の高度処理普及率と比較するとかなり立ち後れている（図－2.1）。その結果、河川等におけるBODを指標とする環境改善率と比較すると、湖沼および海域の環境改善率は進んでいないのが現状である（図－2.2）。

この様に我が国の高度処理普及が進まない理由としては、次のような原因が考えられている。第一に、3大湾や瀬戸内海に面した多くの都市では、人口密度が高く、高度処理化



図－2.3 我が国の高度処理普及状況の推移⁸⁾

に必要な用地確保が困難である。第二に、既存施設を高度処理施設に改築する際に一旦休止することになる施設が受け持つ下水処理機能を代替するための施設を確保することが困難である。第三に、これらの地域では合流式下水道で整備されている処理区も多く、雨天時放流水質改善のための施設整備が必要であること、古い施設が多く耐震性強化や老朽化した管渠の更新が必要であること、等々、多くの課題を抱えており、高度処理化も同時に進めることは財政的に困難である。

これらの課題に対して行財政面で支援が行われてきているが、高度処理人口普及率の進展は年率1%台にとどまっているのが現状である（図－2.3）。

3. 膜処理の推進

昨今長足の進歩を遂げた膜処理技術を適用することによって、前章で述べた高度処理の普及を阻む課題のうち、第1の用地問題と、第2の改築工事中の処理能力確保問題については抜本的な解決が可能であり、第3の財政的な課題についても建設費削減によって相当軽減を図ることができると考えられている。それは以下の様な膜処理技術～特に膜分離活性汚泥法～の適用によるものである。

下水処理への膜処理技術の適用は、主として次の2つの方法によって行われる。

第一は膜分離活性汚泥法（以下 MBR という）によるもので、活性汚泥を重力沈降で固液分離する代わりに膜で分離し、機能改善を図るものである。

第二は逆浸透膜（以下 RO 膜という）処理によるもので、溶解性物質を含むほとんどの成分を取り除くことができる RO 膜によって、上記の MBR 処理水等を処理し、飲用も可能

な極めてきれいな水を取り出すものである。

MBR は主に下水処理の様々な高度化手法として適用され、RO 膜処理は高度な再利用のための処理法として適用される。

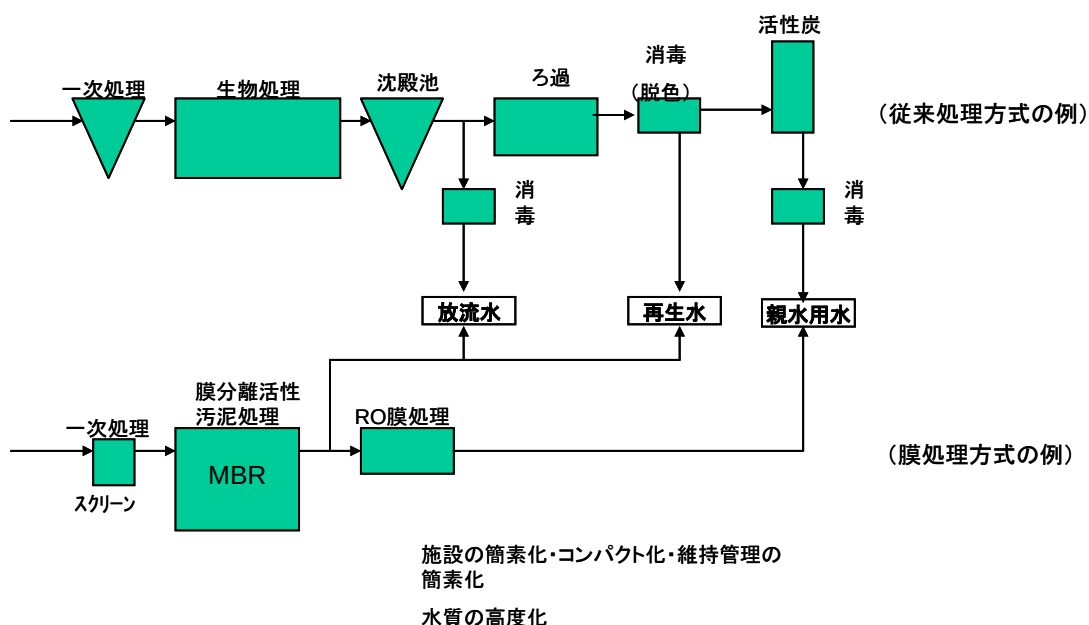


図-3.1 従来方式による高度処理・再利用と膜処理技術適用の場合との比較⁹⁾

図-3.1 は MBR を適用した高度処理施設フローと従来の方法によるものとを比較したものである。MBR を適用すると、下水処理のために必要な沈殿池等の水槽の数が少なくて済み、再利用のための処理フローも簡略化される。その結果、必要な敷地面積と建設費が減少する。また、副次的な効果として維持管理作業も少なくなり、かつ、簡略化されることから、維持管理の省力化を図ることができる。さらに、MBR では沈殿池に代わって膜で固液分離が行われることから、反応タンク内の微生物濃度の範囲を最大 2 %程度まで高めることができる。従来の活性汚泥法～重力による固液分離～では高々 0.4 %までであったことと比較すると、大幅に高濃度の活性汚泥を使用することができる。その結果、タンク内の微生物量と処理時間で決まる反応タンクの処理能力を、従来の活性汚泥法より数倍以上に高めることができるようになり、反応タンクの小型化の他、既存反応タンクの処理能力強化と窒素除去や窒素・りん同時除去などの高度処理化とを同時に達成するといった、従来は不可能に近いと考えられていたことも可能であると考えられるようになった。

このように、MBR を適用することによって、前章で指摘した高度処理化を阻んでいる障害の一つである、拡張用地不足の問題は、それ自体が不要になると云うことで解消できることになる。第二の問題として指摘した、改築工事に伴って休止する系列の処理機能をどの様に代替するかということについては、改築しない系列に暫定的に膜分離装置を設置し

て高濃度活性汚泥処理系列とし、これに休止系列分と併せた水量の処理を受け持たせることによって解決できる。また、このような対応を通じて、高度処理化のための用地費や建設費は相当削減されて、自治体の財政負担を軽減することができ、第三の財政上の困難に関する点にもこれを緩和する効果は十分にあると考えられる。

このような多くの利点を有すると考えられる MBR であるが、我が国の導入事例は全て小規模な新規施設であり、必ずしも閉鎖性水域の富栄養化防止のための栄養塩類除去が必要な施設ばかりではなく、また、既存施設の改築のために導入されたものでもない。これらの小規模施設では放流先が溪流や景勝地であって、その水環境を汚染しないため、また、小規模な自治体で維持管理は極力簡略化できることが望ましいこと等の理由により、MBR が選定されたものである。これらの既存 MBR 施設による下水処理の状況について、代表的な事例を紹介する。

MBR に用いられる膜は精密ろ過膜 (MF) もしくは限外ろ過膜 (UF) であり、下水処理用の MBR では、公称孔径 $0.1\sim 0.4\mu\text{m}$ 程度の MF 膜が多く使用されている。図-3.2 は、国内で用いられている MBR 用膜ユニットの例で、図-3.3 は、この膜を使用している処理施設の水処理状況を示したグラフである。活性汚泥処理方式は循環式硝化脱窒法 (循環率約 200%、図示期間の平均処理時間は12 時間) で、BOD 5mg/l 以下、SS 1mg/l (定量下限値) 未満、T-N 10mg/l 以下、大腸菌群数 30 個/ml (定量下限値) 未満である。



図-3.2 MBR 用膜ユニットの例¹⁰⁾

この様に膜を使用する MBR では、処理水中に SS がないことに加え、大腸菌群などの細菌類もほとんど含まれていない。したがって、MBR 処理水は、直接、修景用水等に利用することができ、再利用のための付加的な高度処理の幾つかを省略することができるので、MBR を導入した場合は再利用のための費用が少なくて済むことになる。また、親水利用など、人が直接触れることを前提とした用途に再生水を利用する場合は、ウイルスや色度を除去するため、RO 膜処理が行われるが、その場合は前処理として、凝集ろ過処理またはこれに代わる精密ろ過処理を行うことが必要である。MBR 処理水では、この様な RO 膜処理における前処理もほとんど必要ないものと考えられている。

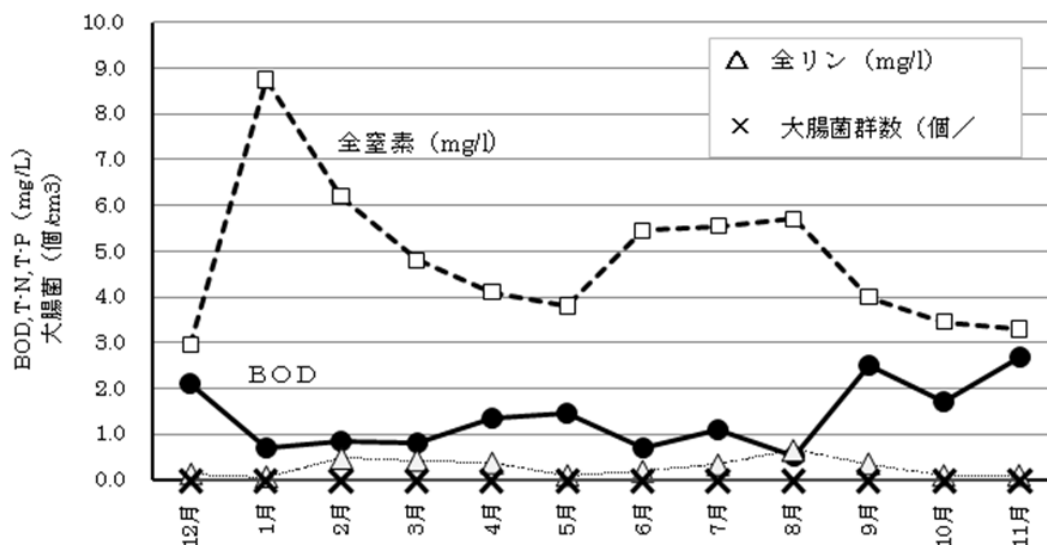


図-3.3 MBR 施設の処理水質の例

MBR の技術上の課題は、消費エネルギーが多いとされることであり、その軽減を図るための研究開発が民間企業を中心に行われている。また、大規模な施設では多数の膜ユニットが運転されることになるため、その管理を如何に効率よく行うか、ということも、今後の課題の一つである。

課題も残されているとは云え、多くの利点を有する MBR の普及を推進するため、MBR を下水道法施行令に規定する処理技術の一つとして定める作業が進行中である。これによって、MBR は安心して使える汎用的下水処理技術として採用が公認されることになり、現在はその導入にあたって必要とされる技術評価等に係る負担を省略することができる。下水道研究部では国土交通本省と協力し、一般評価を行う水処理技術委員会の事務局として MBR の一般評価のための作業を行っている。また、MBR 等膜処理技術の下水道への普及促進を図るため国土交通本省が立ち上げたプロジェクト～A-JUMP～の主体である下水道膜処理技術会議の活動を事務局として支援している。膜処理技術会議では、MBR 施設を初めとする膜処理技術の導入を地方自治体が計画・検討し設計業務を発注するなど一連の業務を行う際、役立つであろうと考えられる技術ガイドラインの整備を行うこととしている。A-JUMPで行われる膜処理技術の実証実験結果も、その中に反映される予定である。

4. 再生水利用の安心・安全

下水は糞尿に汚染された水であり、その処理水中には様々な汚濁成分や感染症の原因微生物が残留している可能性がある。下水処理水の再利用は渇水対応力を高める上で重要な技術であるが、これら人の健康に有害な物質や微生物の残留量を安全・安心な水準まで引き下げることが必要不可欠な条件になっている。

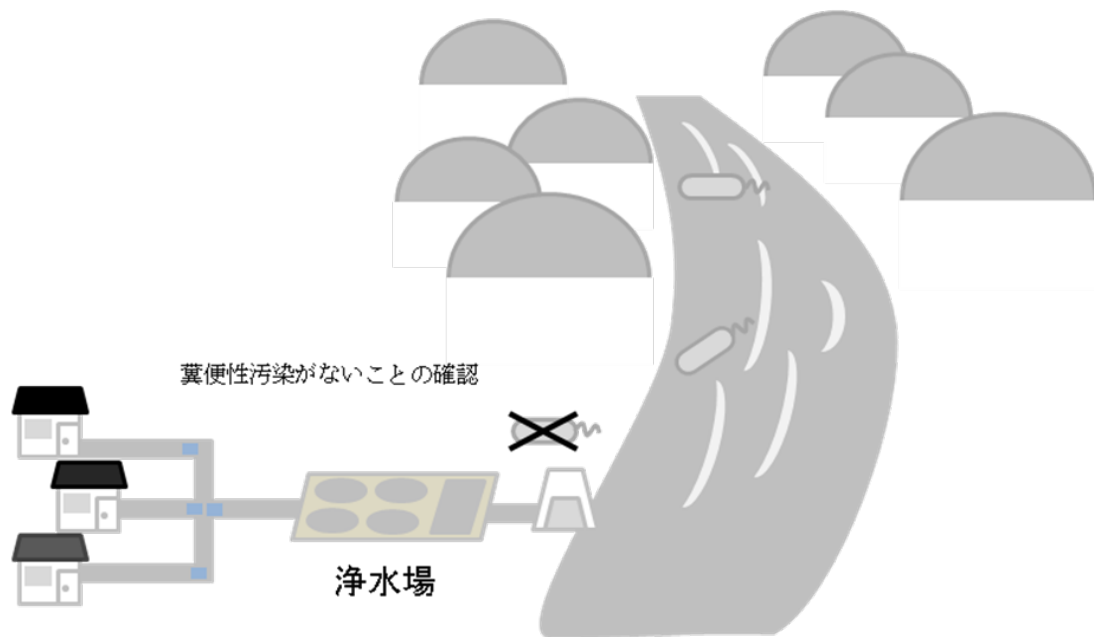
表－4.1 主な水系感染症の病原体

細菌	コレラ菌
	赤痢菌
	病原性大腸菌
	サルモネラ菌
ウイルス	ノロウイルス
	アデノウイルス
	ロタウイルス
	A 型肝炎ウイルス
原虫	クリプトスポリジウム 等

表－4.2 大腸菌・大腸菌群 とは

大腸菌	主として人やほ乳類の腸内に生息するグラム陰性、無芽胞の短桿菌。一部の <big>大腸菌</big> に病原性がある。
大腸菌群	上記の大腸菌に加え、その他の <i>Escherichia</i> 属、及び <i>Citrobacter</i> 属、 <i>Enterobacter</i> 属、 <i>Klebsiella</i> 属等を含む。乳糖を分解して酸とガスを産生する好気性あるいは通性嫌気性細菌の総称。

水中の病原微生物として衛生学的に問題になるものは、コレラ菌、赤痢菌など、ほとんどが糞便と共に排出されるものであった（表－4.1）ことから、その指標として、糞便に常に高濃度で含まれる大腸菌(群)（表－4.2）が用いられている。大腸菌(群)が含まれなければ糞便による汚染が無く、したがって、その水は安全であるとの推論によるものである。



図－4.1 糞便汚染の確認

表－4.3 安全性の指標としての大腸菌・群の例

水道	大腸菌： 検出されないこと
公衆浴場	大腸菌群数 原湯・原水・上り用湯・上り用水： 不検出/50mL 浴槽水： 1 個/mL 以下
水浴場	糞便性大腸菌群数 水質 AA： 不検出(検出限界 2 個/100mL) 水質 A： 100 個/100mL 以下 水質 B： 400 個/100mL 以下 水質 C： 1000 個/100mL 以下 不適： 1000 個/100mL を超えるもの
プール	大腸菌： 検出されないこと

表－4.4 下水処理法と処理水中に残留する大腸菌群数

処理方式	平均値	最大値	最小値
標準活性汚泥法 n=18	193	617	20
嫌気無酸素好気法 n=1	169	—	—
長時間エアレーション 法 n=1	161	—	—
OD 法 n=5	130	166	90
高度処理 OD 法 n=3	61	95	32
回転生物接触法 n=1	487	—	—

表－4.5 下水処理水・再生水の大腸菌・群の基準

下水処理水		大腸菌群数	3000 個/ml 以下
再 生 水	水洗用水	大腸菌	不検出/100ml
	散水用水	大腸菌	不検出/100ml
	修景用水	大腸菌群数	1000 個/100ml 以下
	親水用水	大腸菌	不検出/100ml

表－4.6 代表的な下水の消毒法

塩素消毒	細菌の細胞を変化させたり、SH 系酵素に作用しこれを酸化させるなど細菌の正常な生活を阻害させる作用があると考えられている。次亜塩素酸ナトリウム、液化塩素、固形塩素などが使用される。
紫外線消毒	DNA、RNA が光化学反応によりチミンダイマーを形成し、複製機能を失うことで不活化させる。
オゾン消毒	細胞質など原形質への直接破壊。 ウイルスに対しては直接 DNA、RNA を切断・損傷させ不活化させる。

下水の場合は常に糞便が含まれているので「糞便汚染のないこと」(図－4.1)を示す指標ではなく、処理水の放流や再生水利用に際し、安全であることを示す指標(表－4.3)として用いられている。表－4.4は下水処理法と処理水中に残留する大腸菌群数との関係为例示したもので、処理レベルが高くなると処理水中の大腸菌群数も低下することが示されている。下水処理水や再生水中の大腸菌群数の基準は表－4.5に示す様な値となっており、処理水中に残留するレベルとは異っている。下水処理水の放流や再利用では、この差を消毒などの処理を加えることによって基準に適合させている(表－4.6)。

上記の現状から、再生水の安全性を巡る課題としては次の2点が考えられる。

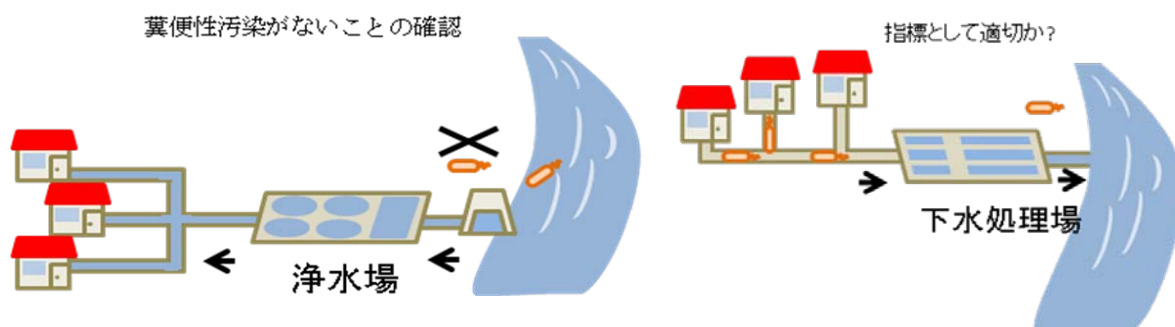
① 糞便が含まれないかどうかの指標を、糞便が含まれている水の安全性の指標としてよいか？（図－4.2）

② 下水処理や消毒の効果は大腸菌群数で評価してよいか？（図－4.3）

①は従来、水系感染症の原因であった病原菌については適当であると考えられて来たが、下水処理水に関する定量的な検討は我が国では十分に行われて来なかった。図－4.4は下水処理水（消毒前）に含まれる大腸菌・群とサルモネラ菌（代表的な食中毒原因生物の一つ）の関係についての一例である。大腸菌・群との相関性が認められ、下水処理水中の病原細菌の量は、大腸菌・群の量の多少で判断できるものと考えられる。したがって、大腸菌・群を水系感染症原因菌の指標とすることは適当と考えられる。

②はウイルスや原虫の様な細菌とは異なるグループに属する病原微生物を含む下水を、処理して再利用する場合、大きさや性質の違い等があるにも関わらず、ウイルスや原虫が大腸菌・群と同程度に除去されていると考えて良いか、ということである。

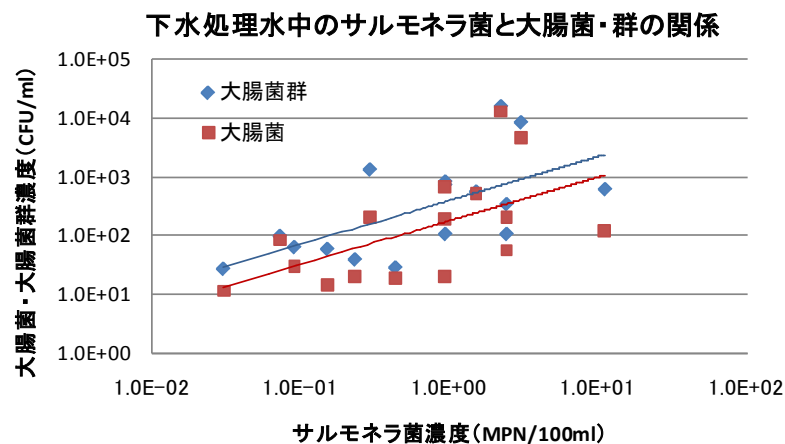
病原微生物は大きさが数 μm 以下であるものがほとんどであり、単体では沈殿せず、除去するためには沈殿以外の有効な作用がなければならない。



図－4.2 安全性の指標として適切か？



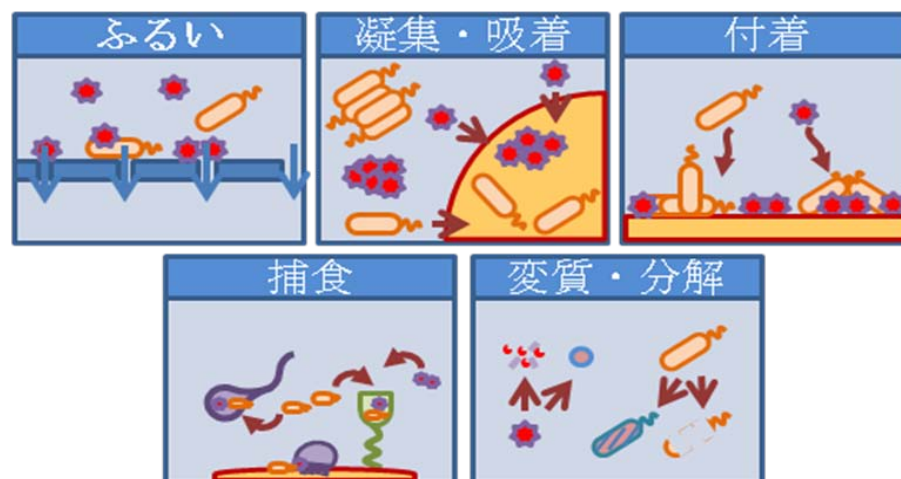
図－4.3 下水処理・消毒効果の指標として適切か？



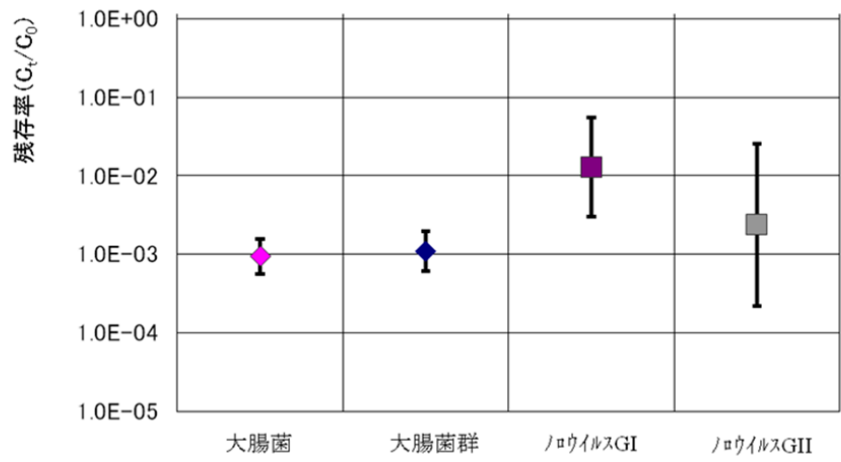
図－4.4 消毒前下水処理水中の大腸菌群とサルモネラ菌の関係

下水処理過程で病原微生物の除去に有効な作用としては、ふるい、凝集・付着、吸着、捕食、変質・分解などが考えられる（図－4.5）。これらの作用のうち、活性汚泥処理を行っている処理場では、凝集・付着、吸着、捕食の作用によって汚泥中に移行していると考えられる。消毒処理では塩素、紫外線、オゾンなどの消毒剤により微生物の変質・分解が生じて死滅していると考えられる。また、膜処理では非常に細かな孔を微生物が通り抜けることができないことで水と分離されて（ふるい作用）除去されている。

病原微生物は種が異なると、大きさや形、表面性状が異なるため、除去に有効な作用の仕方が種毎に異なり、同じ処理を行っていても除去効果が異なると考えられる。



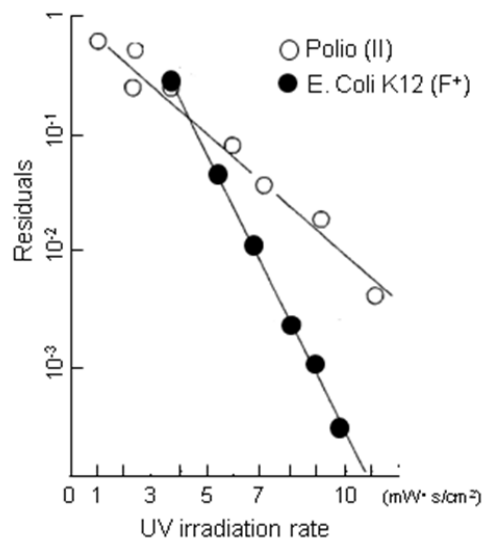
図－4.5 下水処理過程における病原微生物の除去に有効な作用



C_0 は初期濃度。 C_t は処理後の濃度。バーは標準偏差、すべてn=5、1つの試料ごとに4種類測定。

図－4.6 ノロウイルス大腸菌・群の処理状況の違い

図－4.6 は、感染性胃腸炎を引き起こす主要な原因微生物として最近注目を浴びているノロウイルスと大腸菌・群の処理状況を比較したものである。ノロウイルスはウイルスそのものの数を数えることができないので、その遺伝子の量を計って元の数进行推定している。ノロウイルスと大腸菌・群数の除去率を比較すると、大腸菌・群がほぼ 99.9%除去されている（流入の 1000 分の 1 に減少）のに対して、ノロウイルスの方は 99%程度の除去率（流入の 100 分の 1 に減少）であるが安定しておらず、大腸菌・群と較べてノロウイルスは除去されにくいことがわかる。即ち、大腸菌・群で 1000 分の 1 に減少するからノロウイルスも 1000 分の 1 になるとは云えない、つまり、大腸菌・群ではノロウイルスの減り方を推測できないということである。



図－4.7 ポリオウイルスと大腸菌の消毒性状の違い(UV)

図-4.7 は、小児麻痺の病原体であるポリオウイルスと大腸菌群が UV 消毒によってどの程度死滅するか、比較した結果である。横軸は UV 消毒の強さを表しており、縦軸は生き残った微生物の割合を対数で示している。同じ強さの UV 消毒を行った場合は、明らかに、大腸菌群の方が生き残った数が少ないことがわかる。UV の消毒作用は大腸菌群には強く働くが、ポリオウイルスにはそれよりもかなり働きが弱いということである。同様のことがアデノウイルスなどの塩素消毒についても知られている。したがって、消毒によって大腸菌群が 100 分の 1 になったからウイルスも 100 分の 1 になっているだろうとは云えない、つまり、大腸菌群では消毒によるウイルスの減り方を推測できないということである。塩素消毒では、クリプトスポリジウムの様な原虫や、セレウス菌・ウェルシュ菌の様な芽胞を作る細菌でも大腸菌・群より大幅に強いことが知られている。また、オゾンによる消毒の作用についても微生物の種類によって効果の異なることが知られている。

この様に大腸菌・群は、下水処理におけるノロウイルスの除去性を推測する指標とすることや、芽胞を作る細菌、あるいは、原虫、ウイルスなどの消毒による効果を推測する指標とすることには適さないことが明らかになっており、これらの病原微生物を含む可能性がある下水再生水の衛生学的な安全性は、大腸菌・群とは異なる指標等によって補完される必要があると考えられている。

再生水利用の基準では、水質を確保する上で再生水の用途別に再生処理の基準を設けている。その中には、凝集沈殿処理が含まれている用途があり（表-2.1）、塩素消毒で死滅しないことが懸念される残留微生物等、大腸菌・群では安全性の評価が難しい病原微生物による健康被害の防止について配慮されている。これは、クリプトスポリジウムの様な塩素消毒に強い微生物に対し、消毒方法の変更や消毒強度を高めることで対応することは、消毒費用が著しく増加するだけでなく、有害な副生成物が増加するなどの問題を生じ、合理性を欠くと考えられた結果である。最近では、前節で述べた膜処理技術の適用も可能であり、MF 膜処理で原虫や細菌類の除去が、UF/NF 膜ではウイルス除去が行われることが判っているので、今後は膜処理の適用による安全性への対応も増加するものと考えられる。

感染性微生物以外にも、下水処理では除去できない人の健康に有害な化学物質等の影響が懸念されている。それらの多くは、非飲用利用であれば影響がほとんど無いと考えられているが、処理水や再生水が、直接あるいは間接的に飲用利用される場合には重要な課題となる。現在、飲用再利用を検討しているシンガポールやオーストラリアでは、微生物と共に様々な健康影響が懸念される物質を除去するため、RO 膜処理の導入が不可欠と考えられている。また、工業用水利用の場合では、多くの工場が水を循環利用している状況にあり、循環に伴う塩類濃度増加の影響を避けるため、低塩分の用水であることが要求される。そのため、下水処理水を工業用に供給する際には、地域の要求水準に応じて処理水中の塩類濃度を削減するため、低圧 RO 膜処理等が必要になる場合が多くなるものと考えられる。

下水道研究部では、様々な再利用形態に対して、安全・安心が確保されるよう、基準の整備や、再利用に伴うリスク、あるいは再利用による効果の評価に関する調査・研究を継

続して実施し、近い将来、到来することが予想されている地球規模の気候変動に対し、その緩和および適応の両面に貢献できることを目指して行くことにしている。

おわりに

水の循環利用は、地球温暖化に伴って渇水の多発が予想される近未来の都市に必要な水を供給し、同時に水環境の健全化を図る、新たな水利用の仕組みとして期待されている。これを支えるのは、水に関わるハード技術と、これを運用するソフト技術、およびトータルのシステムを管理する科学的な裏付けに基づく行政制度である。下水道は都市におけるこのような水の循環利用の 3 分の 1 を担う主要な社会資本であり、従来の役割であった「浸水の防除と汚水の速やかなる排除」および「水環境の保全」に加えて、「貴重な資源である水を再生する」という、大変重要な役割を担って行くことになる。これに伴って下水処理技術もまた、放流水質基準を守るための技術から、取水から放流までの間における水循環利用の効率や安全性の向上を左右する水再生の要の技術として、一層の技術革新が求められることになる。国総研下水道研究部では、このような水循環をマネジメントするハード・ソフト技術の方向性やその評価手法の研究を通じて、安全・安心な社会の持続可能な実現に向けた取組を続けて行く所存である。

参考文献

- 1) 下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き 2009.3 国土交通省下水道部
- 2) 平山孝浩、平出亮輔、宮本綾子、山中大輔 「下水処理施設における温室効果ガスの排出抑制」国土技術政策総合研究所アニュアルレポート 2008
- 3) 南山瑞彦、平山孝浩、平出亮輔、山中大輔「下水処理場における地球温暖化対策の推進に関する調査」国土技術政策総合研究所資料 第 463 号 2008 年 6 月
- 4) 下水処理水の修景・親水利用水質検討マニュアル（案）1990 年 2 月 建設省・高度処理会議
- 5) 下水処理水の再利用水質基準等マニュアル 2005 年 4 月 国土交通省下水道部、国土技術政策総合研究所
- 6) OECD Environmental Compendium 2004
- 7) 平成 19 年度公共用水域水質測定結果 2008 年 11 月 環境省 水・大気環境局
- 8) 平成 20 年度下水道白書:「日本の下水道－循環のみちを拓く展望－」2008 年 10 月 (社) 日本下水道協会
- 9) 小越真佐司「国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室の研究紹介」HEDORO No.106 pp22-25 2009 年 9 月
- 10) 下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン [第 1 版] 2009 年 3 月 下水道膜処理技術会議
- 11) 上水試験方法 2001 年版 追補版 2006 年 1 月 (社) 日本水道協会

- 1 2) クリプトスポリジウムー解説と試験方法ー2003 年 3 月 (社) 日本水道協会
- 1 3) 下水処理水循環利用技術指針 (案) 1981 年 3 月 (社) 日本下水道協会
- 1 4) ウイルスの安全性からみた下水処理水の再生処理法検討マニュアル (案) 2001 年 7 月 高度処理会議
- 1 5) 南山瑞彦、小越真佐司、桜井健介「下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術基準に関する調査」国土技術政策総合研究所資料 第 463 号 2008 年 6 月
- 1 6) 尾崎正明、諏訪守「水環境中における病原微生物の消長に関する研究」土木研究所資料 第 4123 号 2009 年 1 月
- 1 7) 植竹久雄編 「ウイルス学・第 4 版」 1992 年 7 月 理工学社
- 1 8) 吉田真一、柳 雄介 編 「戸田新細菌学・改訂 32 版」 2004 年 1 月 南山堂