

## 10. 下水処理水の安全性に関わる技術基準に関する調査

下水処理研究室 室長 南山 瑞彦  
主任研究官 田嶋 淳  
研究員 桜井 健介

### 1. はじめに

近年、下水処理水は修景・親水用水等への再利用、河川流量の維持等その重要性が増大している。一方、飲料水や食品を介した原虫クリプトスポリジウムによる集団感染や、ノロウイルスによる食中毒等の健康被害が近年大きな社会問題となり、水の安全性への関心が高まってきており、それらの病原微生物が下水処理水中にも存在する可能性があるため、その対策が求められている。また、下水処理水の再利用においても、同様にこうした新たな問題に対応していく必要がある。

以上を背景に、国土交通省都市・地域整備局下水道部及び国土技術政策総合研究所下水道研究部は、従来の下水処理水再利用に関する指針・マニュアルである「下水処理水循環利用技術指針(案)」(昭和 56 年策定)及び「下水処理水の修景・親水利用水質検討マニュアル(案)」(平成 2 年策定)における水質基準及び目標水質を見直すために必要な実態調査等を実施した。

本稿は基準等の見直しの検討材料とすることを目的として実施された実態調査のうち、下水処理水再利用の衛生的安全性に関する実態調査について報告を行うとともに、原虫類対応の観点からの施設基準を検討するため、下水処理水再利用におけるクリプトスポリジウム感染リスク評価の検討を行うものである。

### 2. 下水処理水再利用の衛生的安全性に関する実態調査

#### 2. 1 調査方法要領

再生処理工程及び再生水供給過程における病原微生物の挙動を把握し、下水処理水再利用における衛生的安全性確保に必要な対策を検討するために、A～E の 5 処理場における以下の 6 つの再生処理方法を有する下水処理水再利用システム(表-1 参照)を対象に、通年にわたり表-3 に示すような病原微生物及び関連指標等の測定を行った。測定対象とした病原微生物は、細菌類については、日本における食中毒の主要な原因であるサルモネラ属菌及びカンピロバクター、集団感染により大きな社会問題となった腸管出血性 0-157、再生水供給過程で再増殖の可能性があるレジオネラ属菌とした。

また、採水箇所は、二次処理後、再生処理後、供給先受水槽の 3 箇所としたが、A-2 については、再生処理施設と供給先が隣接しているため、供給先での採水は行わなかった。

分析方法については、大腸菌群及び糞便性大腸菌群は、検水量 100mL として下水試験方法に基づき分析を行った。AOC、大腸菌及び従属栄養細菌は上水試験方法に基づき分析を行い、大腸菌の検水量は最大 100mL とした。レジオネラ属菌はレジオネラ症防止指針に基づき分析を行ったが、上水と比較して目的外コロニーの生育を抑えるため酸処理と熱処理を併用し、選択分離培地として GVPC 培地を用いた。カンピロバクターは Preston 培地、Skirrow 培地、ミューラーヒントン寒天培地を用いて、食品衛生検査指針に基づき分析を行った。腸管出血性大腸菌 0-157 は、ノボビオシン加 mEC 培地、CT-SMAC 培地、CLIG 寒天培地を用いて衛生試験法により分析を行った。サルモネラ属菌は TT ブロス培地、XLD 寒天培地、TSI 寒天培地、リジナー鉄斜面培地を用いて Standard Methods に基づき分析を行った。なお、病原細菌分析における検水量は、レジオネラ属菌については、最大 200mL、他の病原細菌については 100mL とした。

表-1 再生処理方法

	再生処理方法	濁度*
A-1	砂ろ過+塩素消毒	<0.1~1.4 (0.3)
A-2	砂ろ過+紫外線消毒	<0.1~0.4 (0.2)
B	生物膜ろ過+オゾン処理+塩素消毒	0.3~1.6 (0.9)
C	砂ろ過+オゾン処理+塩素消毒	<0.1~0.8 (0.2)
D	凝集沈殿+オゾン処理+砂ろ過+塩素消毒	0.1~0.7 (0.2)

表-2 分析項目

分類	分析項目	分析頻度	
一般項目	pH、水温、濁度、SS、残留塩素（遊離・結合）	月1回	
	AOC	年4~5回	
細菌類	指標	大腸菌群（MF-エンドウ培地法）、糞便性大腸菌群（M-FC法）	月1回
		大腸菌（特定酵素基質培地法(MMO-MUG培地)）	年7~8回
		従属栄養細菌（R2A寒天培地法）*	年4~5回
	病原微生物	レジオネラ属菌（ろ過濃縮法）	年5~6回
		サルモネラ属菌、カンピロバクター、腸管出血性大腸菌 O-157	2~3回/3ヶ月**

\*再生処理後及び供給先受水槽のみ分析

\*\*塩素消毒が有効であり、供給過程での再増殖の問題がないと考えられるため、3ヶ月間のみ分析を行った

## 2.2 結果及び考察

再生処理過程及び供給先における大腸菌群の挙動を図-1に示す。再生処理後では大腸菌群は殆ど不検出となったが、供給先受水槽では、Cにおいて12検体中9検体で大腸菌群が検出され、最大120CFU/100mLまで増殖する場合もあった。表-3に示すようにCでは供給先受水槽の残留塩素が十分に確保できておらず、また大腸菌群には土壌等動物の大腸以外でも増殖可能な細菌類が含まれているため、増殖したものと考えられる。また、再生

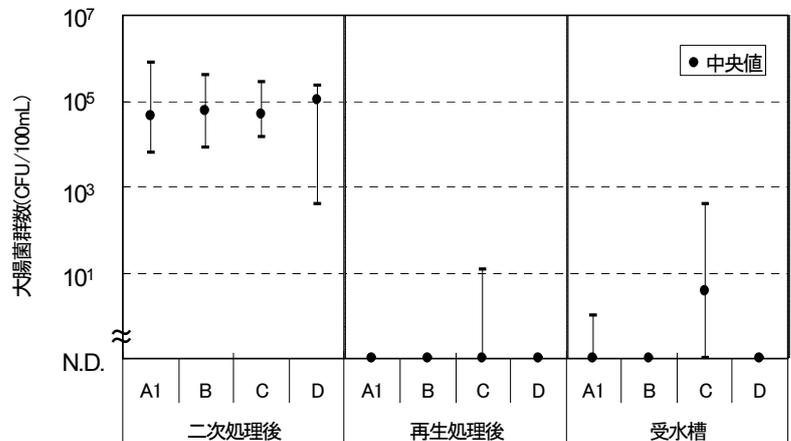


図-1 再生処理及び供給過程における大腸菌群の挙動

再生処理後及び供給先受水槽における結合残留塩素と大腸菌群数の関係を図-2に示す。大腸菌群は結合残留塩素濃度が0.1mg/L以下になると検出されることが多くなり、遊離残留塩素についても同様の傾向が見られ、結合残留塩素及び遊離残留塩素が0.1mg/L未満の場合、供給先受水槽では12検体中9検体で大腸菌群が検出された。一方、遊離残留塩素又は結合残留塩素が0.1mg/L以上の場合には、再生水では44検体中43検体、供給先受水槽では33検体中32検体で大腸菌群が不検出となった。

一方、大腸菌については、Cでは再生処理後の全てのサンプルについて大腸菌が不検出となり、供給先受水槽においても7検体中2検体でごく僅かに検出された程度であり、大腸菌群に見られたような増殖は見られなかった

(図-3参照)。また、再生処理後及び供給先受水槽における結合残留塩素と大腸菌数の関係は図-4に示す通りであり、再生処理後において大腸菌が完全に不活化されている場合には、供給先受水槽では残留塩素濃度に関わらず大腸菌は殆ど検出されなかった。

レジオネラ属菌の再増殖の場として考えられる生物膜やスライムの形成など清浄度の劣化を端的に表現する指標として優れているとされる従属栄養細菌については、結合残留塩素濃度が0.3mg/L以下の条件において、残留塩素濃度が小さいほど従属栄養細菌数が大きくなり、結合残留塩素濃度が0.3mg/L以上の条件では、従属栄養細菌数は残留塩素濃度によらずほぼ一定(10<sup>1</sup>~10<sup>3</sup>CFU/mL)となった(図-5参照)。以上のことから、結合残留塩素を0.3mg/L以上保持することにより従属栄養細菌数を一定のレベルにまで低減できることが示唆された。但し、従属栄養細菌数と生物膜形成との量的な相関関係は明らかではないことから、生物膜の形成を抑制するためには、供給先に至るまで残留塩素を適切に確保するだけでなく、受水槽や配管等の定期的な清掃も併せ実施する必要があると考えられた。

その他測定対象とした病原細菌は全てのサンプルにおいて検出されなかった。なお、供給先受水槽底面には堆積物が見られたものの、堆積物について生物

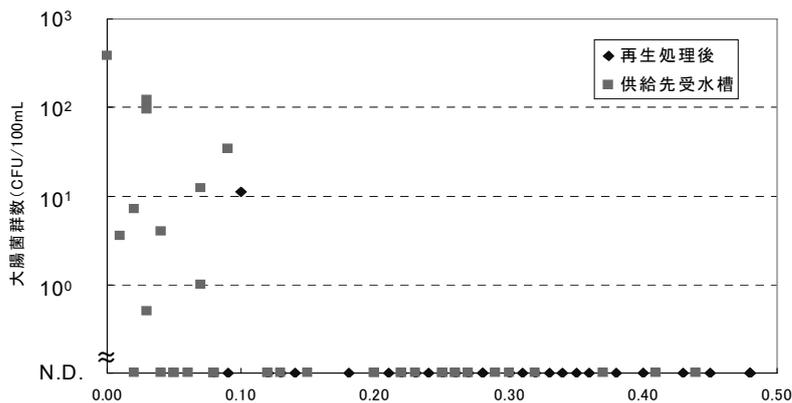


図-2 結合残留塩素と大腸菌群数の関係

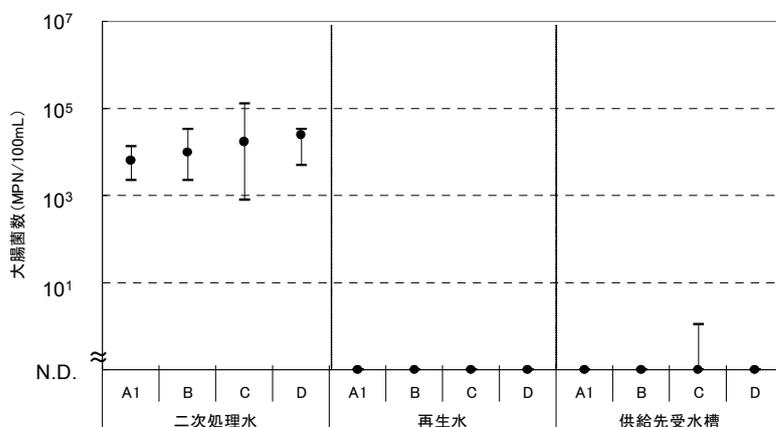


図-3 再生処理及び供給過程における大腸菌の挙動

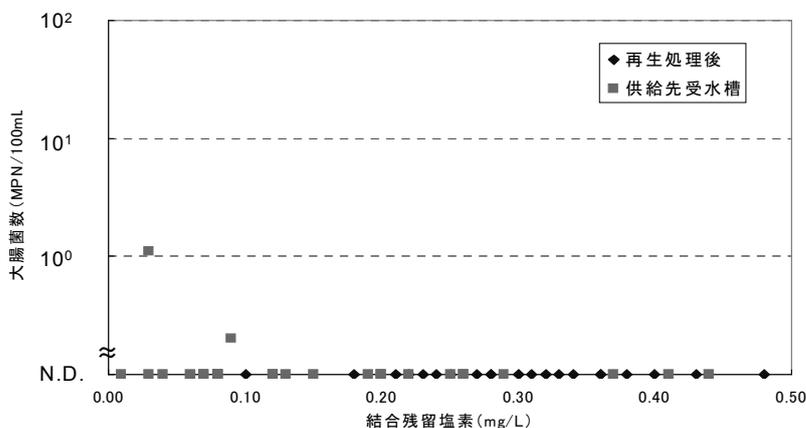


図-4 結合残留塩素と大腸菌数の関係

表-3 調査対象箇所残留塩素 (単位: mg/L (括弧内は平均値))

	再生処理後		供給先受水槽	
	遊離	結合	遊離	結合
A1	0.20~2.80 (1.08)	0.26~1.34 (0.48)	0.02~0.49 (0.17)	0.02~0.66 (0.23)
B	0.07~1.70 (0.58)	0.12~3.20 (0.73)	0.09~1.16 (0.36)	0.13~1.20 (0.45)
C	0.07~0.92 (0.42)	0.08~0.67 (0.24)	0.00~0.16 (0.03)	0.00~0.09 (0.05)
D	0.16~1.28 (0.77)	0.12~1.92 (0.72)	0.05~1.04 (0.54)	0.04~0.92 (0.24)

検鏡を行った結果、レジオネラ属菌の宿主であるアメーバは検出されなかった。

以上の結果、大腸菌については、再生処理後において完全に不活化されている場合には、供給先受水槽では残留塩素濃度に関わらず殆ど検出されないこと、従属栄養細菌については、結合残留塩素濃度を 0.3mg/L 以上保持することにより、その数を一定のレベルにまで低減できることが示された。

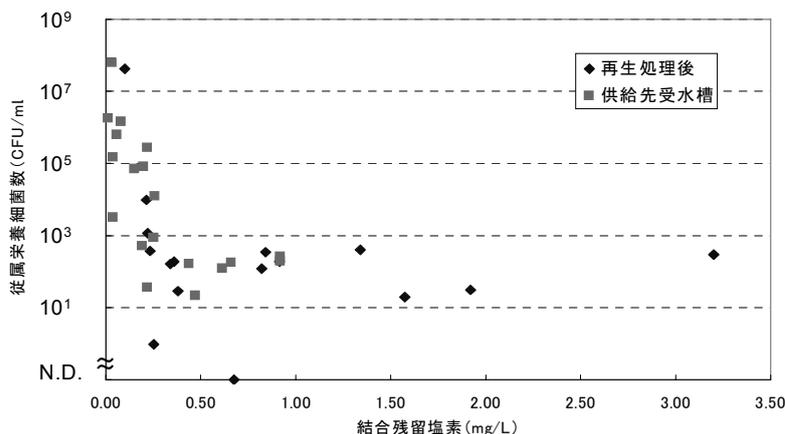


図-5 結合残留塩素と従属栄養細菌数の関係

### 3. 下水処理水再利用におけるクリプトスポリジウム感染リスクの評価

原虫類への対応の観点から下水処理水再利用において必要となる施設基準を検討するため、水洗用水、散水用水及び修景用水については砂ろ過施設を想定し、親水用水については凝集沈殿+砂ろ過施設を想定した場合の、下水処理水再利用におけるクリプトスポリジウム年間感染リスクの評価を行った。なお、クリプトスポリジウム感染リスク評価は、「下水道技術会議 処理水、再生水の衛生学的水質検討プロジェクト」において収集されたクリプトスポリジウムの測定データを用いて行った。

#### 3-1. 感染リスク算出方法

以下の手順により、下水処理水再利用におけるクリプトスポリジウム感染リスクを算出した。

- ①クリプトスポリジウム濃度に関する実態調査結果のうち、砂ろ過水のクリプトスポリジウム濃度が対数正規分布に従っていると仮定して、濃度分布を推定する。なお、砂ろ過水のクリプトスポリジウム測定結果は表-5に示すとおりであり、回収率を 0.351 と仮定<sup>2)</sup>して濃度分布を推定した。
- ②また、凝集沈殿+砂ろ過水のクリプトスポリジウム濃度については、凝集処理により 2Log除去されると仮定<sup>3)</sup>した上で、クリプトスポリジウム濃度が対数正規分布に従っていると仮定して濃度分布を推定する。
- ③用量反応モデル及び摂取量を仮定し、①及び②で得られた濃度分布を用いて、モンテカルロシミュレーションにより感染リスク分布を導出する。なお、用量反応モデルには、Haasの式 ( $P=1-\exp(-N/k)$  ( $P$ : 1回の摂取で感染する確率、 $N$ : 1回当たり摂取量、 $k=238.6$  (パラメータ))) を用い、摂取量は表-6<sup>4)</sup>及び表-7<sup>3)</sup>を用いる。
- ④年間感染リスクの 95%信頼区間上限値をクリプトスポリジウム感染リスクとして算出する。

#### 3-2. 感染リスク評価結果

水洗用水、散水用水及び修景用水については砂ろ過施設を想定し、親水用水については凝集沈殿+砂ろ過施設を想定した場合の、下水処理水再利用におけるクリプトスポリジウム感染リスク評価の結果を図-6に示す。表-6及び表-7では、同じ用途であっても摂取量・摂取頻度が異なっているが、どちらの摂取シナリオを適用しても、全ての用途においてほぼ  $10^{-4}$ 以下の感染リスクとなった。USEPAでは病原微生物による目標感染リスクとして  $10^{-4}$ を提唱しており、平常時においては、前述の施設対応により、USEPAが提唱している目標感染リスク程度への対応は可能になるものと考えられる。但し、クリプトスポリジウム症に関しては散発例よりも集団感染発生時の対応が重要であり、集団感染発生時には、緊急的な追加処理等を行うか、あるいは利用の制限、再生水の供給停止等の対応が必要となるものと考えられる。

表－5 砂ろ過水のクリプトスポリジウム測定結果（個／20L）

	2001.10～2002.9	2002.10～2003.9	2001.10～2003.9
試料数	24	24	48
算術平均	1.5	0.7	1.1
分散	4.1	1.9	3.2
標準偏差	2.0	1.4	1.8
最小値	0（9件）	0（16件）	0（25件）
最大値	9（1件）	6（1件）	9（1件）

表－6 再利用形態ごとの再生水への接触頻度及び摂取量（1）

再利用形態	摂取形態	摂取頻度	摂取水量
親水用水（全身浴）	誤飲	8回/年	30mL/回
親水用水（手足浴）	手についた水の間接経口摂取	20回/年	0.3mL/回
滝・噴水（大規模）	ミスト吸引	10回/年	1mL/回
釣り堀	手についた水の間接経口摂取	20回/年	0.2mL/回
芝生散水	手についた水の間接経口摂取	20回/年	0.1mL/回
水洗用水	しぶきが口に入る	3回/年	0.02mL/回

表－7 再利用形態ごとの再生水への接触頻度及び摂取量（2）

再利用形態	被曝露者	曝露形態	接触頻度	摂取量
親水用水	公園利用者	水遊び	100日/年	10mL/日
修景用水	公園利用者	魚釣り	2日/週	1mL/日
水洗用水	勤労者	飛沫による接触	5日/週	0.1mL/日
散水用水	公園利用者	芝生等での接触	60日/年	1mL/日

#### 4. 結論

下水処理水再利用に関する新たな基準を設定するに当たり必要な知見を得るために、下水処理水再利用の衛生学的安全性に関する実態調査を実施するとともに、原虫類への対応の観点から必要となる施設基準を検討するため、下水処理水再利用におけるクリプトスポリジウム感染リスクの評価を行った。調査の結果得られた知見を以下に示す。

（1）大腸菌群は再生処理後に増殖するケースがあったが、大腸菌は再生処理後の増殖は殆ど見られなかった。下水処理水再利用のように再生処理後ある程度の時間を経た後の衛生学的安全性が重要となる場合には、水環境中で増殖するものを指標細菌として採用するのは適切ではないと考えられることから、指標細菌としては大腸菌群よりも大腸菌の方が適切である可能性が示唆された。

（2）結合残留塩素濃度を 0.3mg/L 以上保持することにより、従属栄養細菌数を一定のレベルにまで低減できることから、少なくとも結合残留塩素濃度 0.3mg/L 以上の基準値の設定が適切であることが示唆された。

（3）水洗用水、散水用水及び修景用水について砂ろ過施設を想定し、親水用水について凝集沈殿＋砂ろ過施設

を想定した場合のクリプトスポリジウム年間感染リスクは、平常時では全ての用途においてほぼ  $10^{-4}$ 以下となっており、これらの施設対応により、USEPAが提唱している病原微生物による目標感染リスク程度への対応は可能であると考えられた。

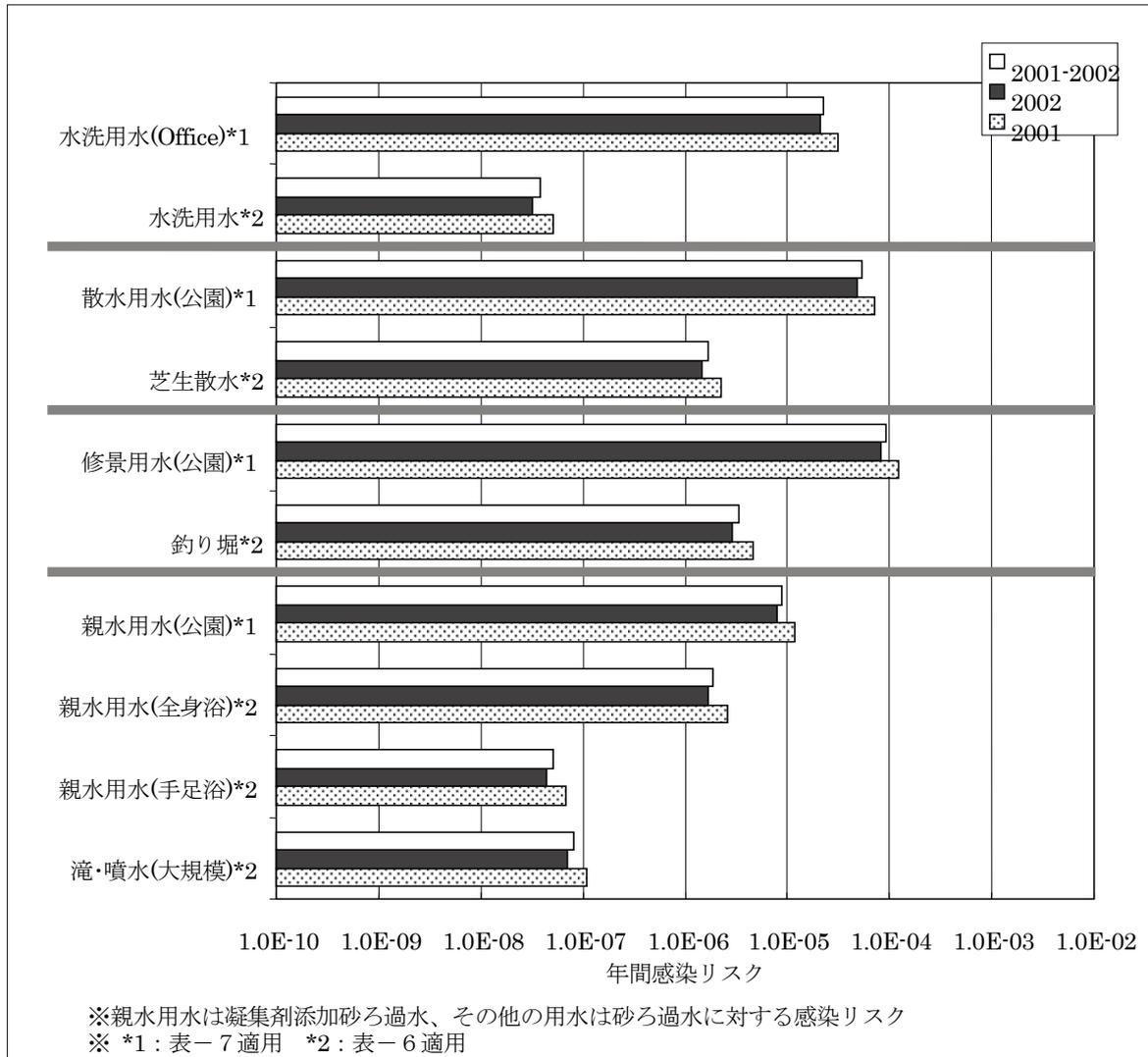


図-6 利用用途別のクリプトスポリジウム感染リスクの試算例

## 5. 謝辞

下水処理水の衛生学的安全性に関する調査の実施は、財団法人下水道新技術推進機構との共同研究によるものである。

## 参考文献

- 1) Dirk van der Kooij: Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth, J.AWWA, pp57~65 (1992)
- 2) 中島英一郎、山下洋正、斎野秀幸：「病原微生物の発生源および対策に関する調査」、平成13年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp. 185-190、国土交通省国土技術政策総合研究所、2001
- 3) 「下水道におけるクリプトスポリジウム検討委員会最終報告」日本下水道協会 2000.3
- 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」高度処理会議 2001.7