

膜処理技術を用いた下水再生水の ノロウイルス感染リスクに基づく利用適合性の評価

安井宣仁・諏訪 守・南山瑞彦

1. はじめに

下水再生水を利用する際には、利用用途別に再生水施設ならびに水質要件が、「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」により示されている。同マニュアルでは、衛生学的な指標として大腸菌または大腸菌群の指標値が定められているが、近年、検出技術の向上により新たな病原微生物の存在やその動態等についての知見が集積されてきており、大腸菌、大腸菌群を含む細菌以外の病原微生物が関与した水系感染症への対応の必要性が生じてきている。ウイルス等の病原微生物は細菌と比較して、感染力が強く、塩素等の消毒耐性が強い傾向があることが知られている。そのため、下水再生水利用時における衛生学的リスク管理において、大腸菌または大腸菌群以外の病原微生物、特にウイルスに関するリスク管理も考慮されるべきである。

下水再生水の利用時における衛生学的安全性担保のためには、再生水原水となる下水処理水、またはその大本となる下水中に存在する可能性あるウイルスの挙動把握と除去性を評価することが重要である。様々なウイルスが下水、下水処理水中に混入している可能性がある中で、特に評価すべきウイルスとして腸管系ウイルスのノロウイルス（以下「NoV」という。）が挙げられる。NoVは感染性胃腸炎の原因ウイルスであり、下水、下水処理水においても一年を通して比較的検出されやすい。国内外を通じNoVを起因とする感染性胃腸炎患者の報告例があり、ヒトへの感染発症率が約80%と高い。我が国においても、NoVによる感染性胃腸炎患者数が2006年以降、増加している。

一方で、近年、膜処理^{*}による再生処理技術が普及している。特に限外ろ過（UF:Ultrafiltration）膜^{*}、逆浸透（RO:Reverse osmosis）膜^{*}およびナノろ過膜（NF:Nanofiltration）膜^{*}は、ウ

イルスを効果的に物理除去が可能であると言われている。

そこで本研究では、膜処理技術を用いたパイロットプラントでのNoV濃度の長期モニタリングデータに基づき、処理プロセスの性能評価を行うとともに下水再生水利用時におけるNoV感染リスク評価を行い、再生水の利用用途毎の利用適合性を評価することを目的とした。

2. 調査概要

再生処理方式によるNoVの除去性を評価するために、A処理場の標準活性汚泥法処理水（二次処理水）を再生水原水とし、図-1に示すパイロットプラントを用いた。具体的処理方式としては、凝集沈殿による前処理がUF膜処理に与える影響を評価するために、低pH(5.5)凝集沈殿処理+UF膜処理、UF膜自体の除去特性を評価するために、UF膜処理単独、UF膜処理の後段処理の影響を把握するために、UF+紫外線(UV)処理、UF+NF膜処理、UF+RO膜処理の計5系統を設定した。処理プロセス毎の性能評価のため流入水ならびに各処理水のNoV濃度を2010年～2014年の5年間の長期にわたりモニタリングした。

2.1 採水および分析方法

図-1に示す各処理工程前後で採水を行った。採水した試料は4℃で保存し実験室に輸送後、SS、

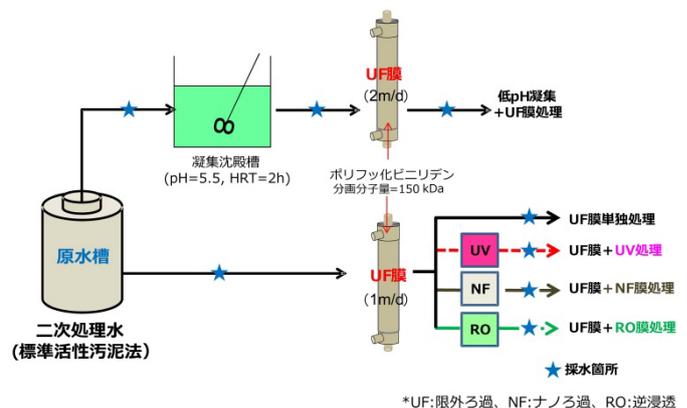


図-1 パイロットプラントにおける各再生処理プロセス

Microbial Risk Assessment of Reclaimed Water for Various Application by UF Membrane Treatment Technology

^{*}土木用語解説：膜処理、限外ろ過膜、逆浸透膜、ナノろ過膜

CODcr、T-N、T-P、大腸菌、大腸菌群を定量した。なお、SSの測定は下水試験法に従い、CODcr、T-N、T-Pは携帯用多項目迅速水質分析計（DR/2400，HACH社）を用いた比色分析にて定量した。大腸菌、大腸菌群の測定には選択培地としてクロモカルト寒天培地を用いた平板培養法とした。NoVの濃縮、抽出、定量方法は文献¹⁾に準拠した。

NoVは遺伝子情報に応じてGI～GVの5つのタイプに分類されるが、特にNoVGI、GIIはヒトに感染する主要なタイプであることから、GI、GII毎に定量を行った。

2.2 調査結果

図-2に調査期間中(2010年～2014年)に採水した試料のNoVGIIの濃度を示す。再生処理の原水としたA処理場の二次処理水中のNoVGIIの濃度は $10^4 \sim 10^7$ copy/Lの範囲で変動しており、膜処理により、 10^2 copy/L程度まで除去することができることが分かった。また、再生処理中の濃度変動幅は、UF単独処理>低pH凝集沈殿+UF膜処理>UF膜+UV処理の順であった。なおUF膜+NF膜、UF膜+RO膜処理では調査した期間全てにおいて不検出(N.D)であった。

3. NoV感染リスク評価と利用適合性評価

3.1 評価手順

再生水利用時におけるNoV感染リスクの評価手順²⁾は以下の通りである。まず①対象病原微生物を設定する。本研究ではNoV感染リスクを評価することを目的としているため、対象病原微生物はNoVである。次に②-1再生水原水および再生水中

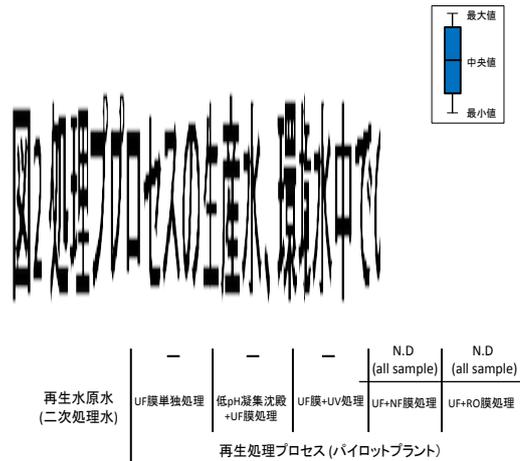


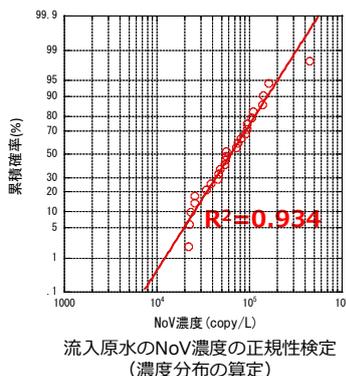
図-2 各再生処理プロセスにおけるNoVGII濃度(2010年～2014年)

のNoV濃度のモニタリング結果より、原水濃度の累積確率を算出し正規確率紙^{*}に濃度と累積確率の関係をプロットし、原水のNoV濃度分布を算定する。②-2対象処理技術によるNoV残存率を算出し、その変動分布を算定し評価する。③再生水中のNoV濃度分布を、②-1および②-2で算定した結果を用い推定する。次に④再生水の利用用途を決定し、⑤用途毎のリスクシナリオ（曝露量や曝露頻度）を設定する。⑥NoV濃度およびリスクシナリオに基づき、感染確率を算出するとともに、障害調整生存年数^{*}(DALY)を指標値として評価する。

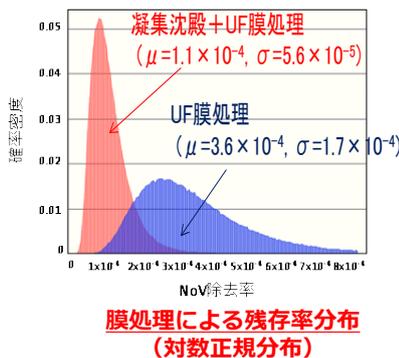
3.2 再生水中のNoV濃度分布の推定

3.1に示した評価手順の①～③に従い、パイロットプラントの各再生処理プロセスにおけるNoV濃度のモニタリングデータより再生水原水濃度分布ならびに除去率分布を算定し、各処理プロセスにおける再生水中のNoV濃度分布を推定した。

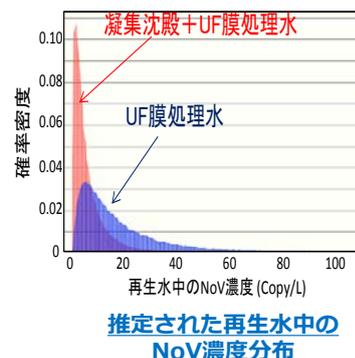
②-1 再生水原水濃度のモニタリング



②-2 再生処理技術の除去性能評価



③ (選択した再生処理技術による) 再生水中のNoV濃度分布を推定



* 推定再生水中濃度 = 原水濃度分布 × 膜処理による残存率分布

図-3 再生水中のNoV濃度分布推定

^{*}土木用語解説：正規確率紙、障害調整生存年数

図-3に実測値に基づき算定した流入水濃度分布、除去率分布、推定された再生水中のNoV濃度分布を示す。

3.3 リスクシナリオの設定

3.1の手順手順の④、⑤に従いCase studyとして、農業用水(Case1)、都市用水(Case2)を設定した。農業用水は水稻栽培に用いることとし、リスク対象者を農業従事者ならびに消費者とした。消費者は作物を喫食した際に感染することを想定し、最も感染リスクが高い作物として、再生水が付着した生野菜摂取時に感染する可能性を考慮した。都市用水は、水洗トイレ、芝生散水、親水利用(手足が浸かるケース)、親水利用(水浴)とした。利用用途毎の曝露量、曝露頻度を表-1に示す。

3.3.1 再生水供給・送水シナリオの設定

再生水は再生処理施設から都市地域および農業地域まで再生水を供給することを仮定した。

農業地域では、再生水施設から20km離れた農村地域へ再生水を送水し、一時貯留槽に再生水を貯留後、農業集落用の供給槽に送水し、その供給槽から各営農者が再生水を利用することを想定した。都市地域では再生水施設より5km離れた都市部へ再生水を供給することを想定し、一時貯留槽に再生水を貯留することを想定した。

3.3.2 その他設定要件

下水処理水の再利用水質基準等マニュアルでは修景用水利用時以外は、残留塩素の管理目標値を遊離残留塩素0.1mg/L又は結合塩素0.4mg/L以上としている。本試算においては、再増殖・スケール防止のため塩素を投入するものとし、安全側を考慮して投入した塩素の形態が全てクロラミン※(結合塩素)になると仮定し、供給仮定で残留塩素0.1mg/Lを確保するものと設定した。

3.4 感染リスク評価と利用適合性評価

図-3で推定した再生水濃度分布を用い、再生水の利用用途毎のリスクシナリオにおけるDALYを算定した。下水再生水に対する明確なDALYの値に基準はないが、WHOでは下水再生水を農業利用する際は飲料水の基準値の 10^{-6} (DALY/(人・年))を提唱値としている³⁾ことから、本報では判定基準値を 10^{-6} (DALY/(人・年))とした。評価にあたり、統計学的手法に基づき評価値の(DALY/(人・年))の分布の95%が 10^{-6} 以下の場合を「適：利用可能」、68%が 10^{-6} 以下の場合

表-1 利用用途毎における曝露量、曝露頻度

利用用途	リスク対象者	曝露形態	曝露量・曝露頻度	
農業利用	農業従事者	作業時の間接経口摂取	0.3mL/回・27.2日/回	
	消費者(生野菜摂取)	再生水が付着した作物摂取	365日(242g/日)	
都市利用	利用者	水洗トイレ	再生水の経口摂取、誤飲	0.02mL/回・3回/年
		芝生散水	散水時のしぶきによる経口摂取	0.1mL/回・20回/年
		親水(手足が浸かるケース)	身についた水の経口間接摂取	0.3mL/回・20回/年
		親水(水浴)	水遊びによる誤飲	30mL/回・8回/年

都市利用の曝露形態、曝露量・曝露頻度はウイルスの安全性かみた下水処理水の再生処理検討マニュアル(案)、高度処理会議、2001.7より抜粋

生野菜摂取量の1日の摂取量は農林水産省「食糧需給表」よりH22年度の1人・1年あたり供給量から算出

農業利用の曝露量は親水利用(手足が浸かる可能性がある場合)を参照し、曝露日数は長野県農業経営指針より設定した

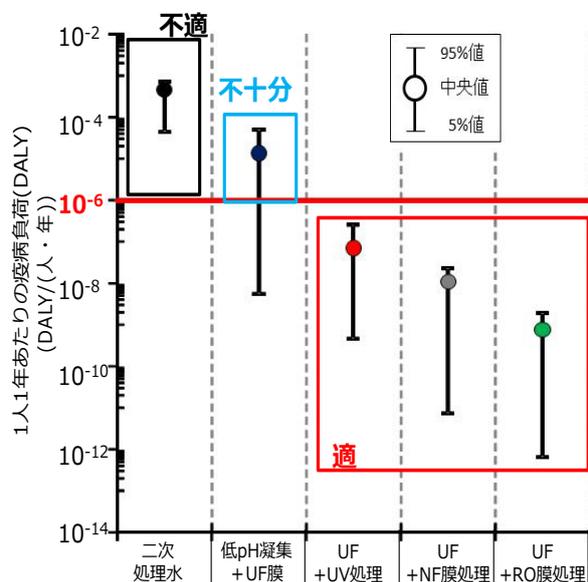


図-4 親水(手足が浸かるケース)利用時における各再生処理プロセスのNoVのDALY値(1人1年あたりの疫病負荷)

「不十分：追加処理、供給方法等のシナリオの見直しが必要」、分布の68%が 10^{-6} 以上の場合には「不適：利用不可」とした。

DALYの算定の一例として、親水利用(手足が浸かるケース)での各再生処理プロセスにおける1人1年あたりのDALYを図-4に示す。UF膜処理の後段にUV処理、NF膜処理、RO膜処理を追加することで、本パイロットプラントにより産出された再生水は親水用水(手足が浸かるケース)として利用可能という評価結果となった。

表-2に、各再生処理プロセスによる再生水の利用適合性評価結果を整理した。

表-2より、二次処理水を未処理のまま再生水として利用した場合では、評価した全ての利用用途で再生水を安全に利用するには「不適」であった。

※土木用語解説：クロラミン

凝集沈殿+UF膜処理では、一部の用途では利用には「不十分」であったが、UF膜処理の後段にUV処理を行うことで、親水（水浴）を除き、利用可能であると評価された。一方、水浴を目的とした利用においては、UF膜処理の後段にNF膜処理またはRO膜処理を追加することで、再生水が利用可能であると評価された。なお、本評価ではNoVの遺伝子定量値を用いており、直接NoVの感染性を評価していないため、評価結果は安全側での評価になっている点に留意が必要である。

4. まとめ

本研究では、下水再生水の処理技術として膜処理に着目し、NoVの長期モニタリング結果に基づき再生水の利用用途毎のNoV感染リスクに基づき、利用用途毎の適合性を評価した。その結果、二次処理水を未処理のまま再生水として利用した場合、評価した全ての利用用途でNoV感染リスクが高く、利用には不適と判定された。一方、UF膜処理の後段にUV処理を行うことで、親水（水浴）を除き、利用可能であると評価され、水浴を目的とした利用においては、UF膜処理の後段にNF膜処理またはRO膜処理を追加することで、再生水が利用可能であると評価された。

表-2 各再生処理プロセスによる再生水の利用適合性評価結果 (Case study)

処理プロセス	処理性能		Case 1 (農業用水)		Case 2 (都市用水)			
	平均Log除去率	分散	農業従事者 (水稲栽培)	消費者 (生野菜)	水洗トイレ	芝生散水	親水 (手足)	親水 (水浴)
二次処理水	—	—	不適	不適	不適	不適	不適	不適
凝集+UF	3.9±0.9Log	—	不十分	適	適	不十分	不適	不適
UF+UV	5.0±0.3Log*	—	適	適	適	適	適	不十分
UF+NF	6.7±0.5Log*	—	適	適	適	適	適	適
UF+RO	7.7±0.9Log*	—	適	適	適	適	適	適

*UF+UV、UF+NF、UF+ROの平均除去率はMS2phage換算推定NoV除去率である
 適 : DALY/(人・年)の分布の95%(2σ)が 10^{-6} 以下
 不十分 : DALY/(人・年)の分布の68%(1σ)が 10^{-6} 以下
 不適 : DALY/(人・年)の分布の68%(1σ)が 10^{-6} 以上

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構、CREST 戦略的創造研究推進事業「21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課：ノロウイルスの検出法について、p.24、2007
- 2) 安井宣仁、諏訪守、桜井健介、鈴木穰、小林憲太郎、高島寛生、農業利用を想定したUF膜処理による下水再生水の定量的微生物リスク評価：ノロウイルスを対象とした事例的研究、土木学会論文集G (環境) Vol.69、No.7、pp.III_647~III_656、2013
- 3) World Health Organization: WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, volume II; Wastewater use in agriculture, pp. 56-64, 2006.

安井宣仁



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
 研究員、工博
 Dr.Nobuhito YASUI

諏訪 守



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
 主任研究員、工博
 Dr.Mamoru SUWA

南山瑞彦



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
 上席研究員
 Mizuhiko MINAMIYAMA