

# 衛生工学

## 上水道3：浄水処理

2024年5月2日



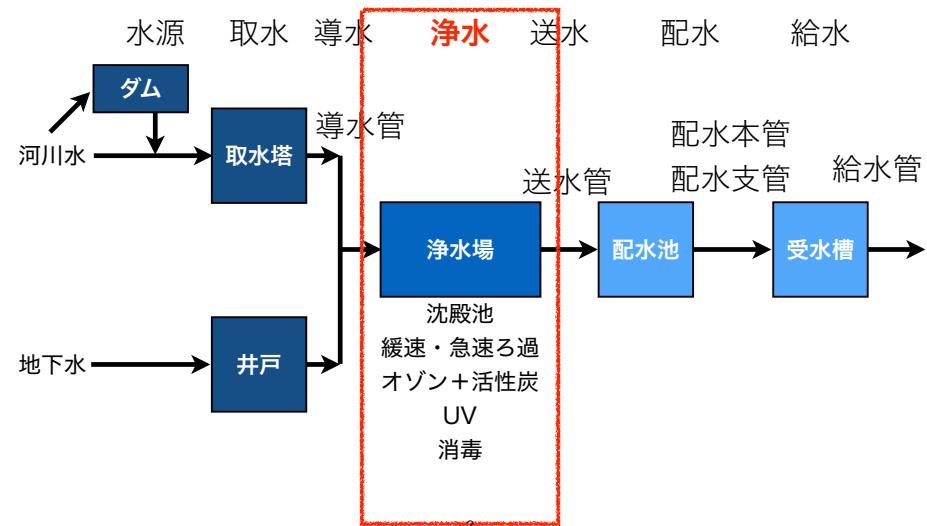
名古屋大学減災連携研究センター  
Disaster Mitigation Research Center, NAGOYA UNIVERSITY

1

平山修久

# 上水道システム

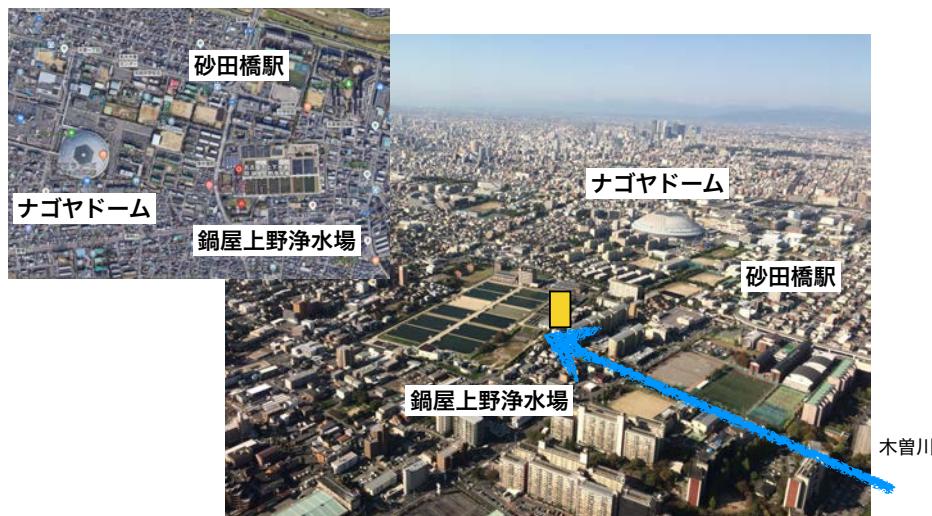
## 浄水の範囲



2

# 鍋屋上野浄水場

名古屋市上下水道局



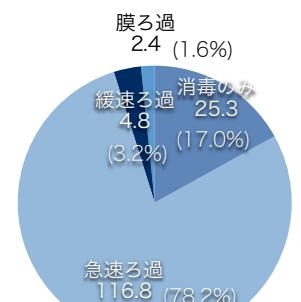
# 浄水の基本的な要件

## 濁質の除去

## 消毒

## 浄水処理プロセスには、

- ・ 緩速ろ過システム
- ・ 急速ろ過システム
- ・ 膜ろ過システム
- ・ 消毒のみ（濁質の除去が必要でない地下水や湧水）

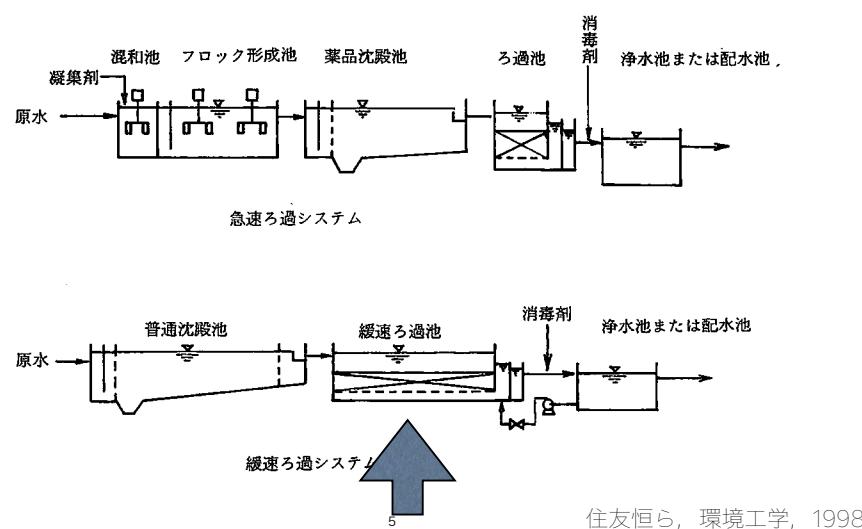


浄水方法別処理量  
149.3億m³/年

4

水道協会雑誌, 85(8), 2016

# 緩速ろ過と急速ろ過



# 緩速ろ過と急速ろ過

|               | 緩速ろ過   | 急速ろ過  |
|---------------|--|---|
| ろ材有効径         | 0.3~0.45mm   | 0.45~0.70mm   |
| 均等係数          | 2.0~2.5  | 1.7以下   |
| 砂層厚           | 70~90cm  | 60~70cm   |
| ろ過速度          | 4~5m/日   | 100~150m/日  |
| 再生 (ろ層の閉塞に伴う) | 表面 (生物膜の存在する厚さ1~2cmの部分) をかきとりを1~2ヶ月に1回行う。30回以上のかきとりが砂の補充なしに行えるように砂層厚が決められている。かきとり後、生物膜形成までの間、浄化能力はない | 逆流洗浄を0.5~1日に1回行う。数分間ろ層の下から浄水を逆流させて砂層を流動させて洗浄する      |
| 浄化機構          | ろ層表面付近に生育した生物膜による吸着、生物化学作用が中心。   | 凝集沈殿後の残留ブロックのろ材への接着、凝集、全層でのろ過が行われる。必ず凝集沈殿と組み合わせて行う。 |
| 問題点           | 好気性生物膜が形成しえないような汚濁した原水には無力。広い面積と人手を要する。  | 濁質には大きな除去能力を有するが、それ以外のものには不十分。                      |

6

# 凝集沈殿法

## 凝集

- 水中に含まれる微細なコロイド粒子が不安定化され、集塊し、より大きな粒子となること。

## 凝析

- 分散しているコロイド粒子が凝集して大きな粒子となり沈殿する現象。

## フロック形成

- (機械) 揚拌などで生じた乱流変動により強力な衝突合一の機会が与えられ、重力沈降可能な集塊粒子が形成されること。

7

# 攪拌 - G値, GT値

- 流水中の速度勾配は局所的に異なるが、巨視的にみてその平均値をとる。

$$G = \frac{dv}{dy} \quad [\text{sec}^{-1}]$$

- G値は攪拌の強さを示す値であり、
  - 小さいと凝集効果が望めない
  - 大きいと形成されたフロックを破壊してしまう
- 適応域は、

$$G = 10 \sim 75 \text{ [sec}^{-1}]$$

$$GT = 23,000 \sim 210000 [-]$$

T : 混和池滞留時間

8

# 凝集剤と凝集補助剤

## 凝集剤

- ・水中の微細なコロイド粒子の荷電を中和し、双方を橋渡しする作用をもつ薬品。水中で容易に加水分解を起こし、正電荷の金属水酸化物のコロイドを生じて、濁質コロイドの荷電を中和する金属塩類。
- ・硫酸アルミニウム ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ )、ポリ塩化アルミニウム ( $(\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n})_m$ ) **PAC**

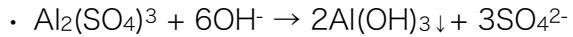
## 凝集補助剤

- ・凝集剤の性能を発揮させる作用、あるいは、凝集剤の効果を高め、さらにその節約をはかる作用を持つ薬品
- ・消石灰、水酸化ナトリウム、ソーダ灰（無水炭酸ナトリウム）

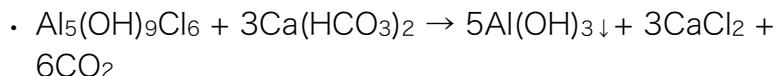
9

# 凝集剤

硫酸アルミニウム（硫酸バンド）  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$



ポリ塩化アルミニウム（PAC）  $(\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n})_m$

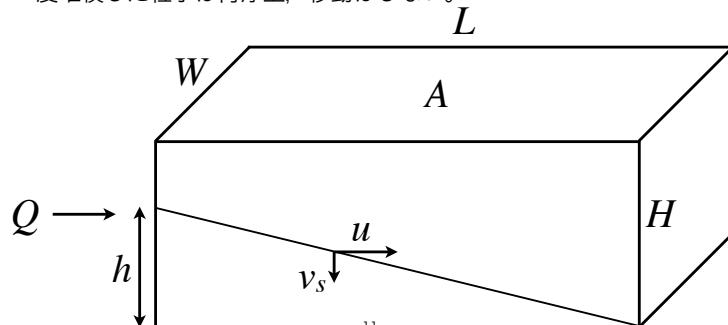


10

# 理想沈殿池

## 理想沈殿池の5つの条件

- ・原水中の懸濁粒子は水流方向に直角な断面積に均等に分布している。
- ・池内には渦流れ、偏流、密度流はない。
- ・水平速度は池内どこでも一様である。
- ・粒子は非凝集性で、一定流束を有する。
- ・一度堆積した粒子は再浮上、移動はしない。



11

# 単粒子沈降

## ストークスの式

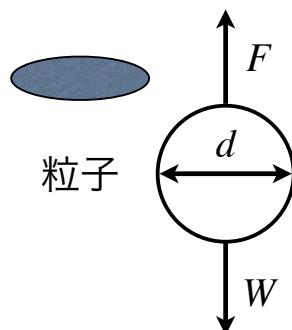
- ・代表粒径  $d$ 、質量  $m$ 、粒子の密度  $\rho_s$ 、粒子の体積  $V$ 、粒子の投影面積  $A$ 、粒子の沈降速度  $v_s$ 、液体の密度  $\rho$ 、抵抗係数  $C_D$ 、重力と浮力の差  $W$ 、粘性係数  $\mu$ 、レイノルズ数  $R_e$

$$m \frac{dv_s}{dt} = W - F$$

$$F = C_D A \frac{\rho v_s^2}{2}$$

$$W = (\rho_s - \rho) V g$$

$$\text{ストークスの式: } v_s = \frac{(\rho_s - \rho) g d^2}{18\mu}$$



12

# ストークスの式を求める。

粒子の沈降速度が一定であることから,  $m \frac{dv_s}{dt} = W - F = 0$

$$F = C_D A \frac{\rho v_s^2}{2}, \quad W = (\rho_s - \rho) V g \quad \text{より,}$$

$$(\rho_s - \rho) V g = C_D A \frac{\rho v_s^2}{2}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d}{2} \right)^3, \quad A = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \quad \text{より,}$$

$$(\rho_s - \rho) \frac{\pi d^3}{6} g = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho v_s^2}{2}$$

$$(\rho_s - \rho) \frac{4d}{3} g = C_D \rho v_s^2$$

13

# ストークスの式を求める。

$$(\rho_s - \rho) \frac{4d}{3} g = C_D \rho v_s^2, \quad C_D = \frac{24}{R_e}, \quad R_e = \frac{\rho v_s d}{\mu}, \quad \text{より,}$$

$$(\rho_s - \rho) \frac{4d}{3} g = \frac{24\mu}{\rho d v_s} \rho v_s^2$$

したがって,

$$v_s = (\rho_s - \rho) \frac{4d}{3} g \frac{d}{24\mu} = \frac{(\rho_s - \rho) g d^2}{18\mu}$$

15

# レイノルズ数 $R_e$

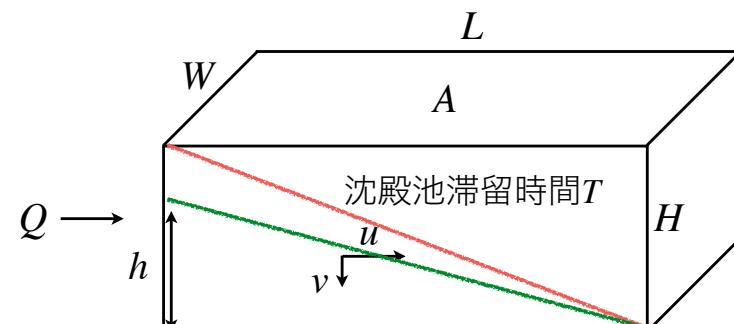
- 流体の粘性力と慣性力の比
- 層流と乱流の区別の目安として用いられる無次元数

$$R_e = \frac{\rho v}{\mu} = \frac{lv_s}{\nu} = \frac{\rho v_s d}{\mu}$$

- $R_e < 2000$  のとき層流
- $R_e > 4000$  のとき乱流
- $2000 < R_e < 4000$  のとき層流とも乱流ともなる過渡度状態で, 層流から乱流に変化する値を限界レイノルズ数

14

# 理想沈殿池



表面負荷率 :  $Q/A$

$$\text{除去率} : E = 1 - p_0 + \frac{1}{Q/A} \int_0^{p_0} v dp$$

16

# 表面負荷率とは

理想沈殿池内の粒子（粒径 $d$ , 沈降速度 $v_0$ ）を考える。この粒子が、沈殿池の高さ $H$ で流入し、滞留時間 $T$ 経過後に、沈殿池の末端で沈降する（ $h = 0$ ）場合、 $v_0 = \frac{H}{T}$ ,  $u = \frac{L}{T}$ より

$$v_0 = \frac{Hu}{L} = \frac{H}{L} \frac{Q}{WH} = \frac{Q}{LW}$$

$$v_0 = \frac{Q}{A}$$

17

# 理想沈殿池の除去率を導出する

1/2

表面負荷率 $\frac{Q}{A}$ による沈降速度 $v_0$ より、沈降速度 $v$ が小さい粒子の存在割合を $p_0$ とする。

$$\begin{cases} v \leq v_0 \text{ の粒子の割合 } p_0 \\ v > v_0 \text{ の粒子の割合 } 1 - p_0 \end{cases}$$

沈降速度 $v_0$ より大きな沈降速度の粒子は全て除去される。したがって、沈降速度 $v > v_0$ の粒子の除去率は、

$$1 - p_0$$

18

# 理想沈殿池の除去率を導出する

2/2

沈降速度 $v \leq v_0$ となる沈降速度 $v_s$ の存在割合を $\Delta p$ とする。

沈降速度 $v_s$ の粒子が除去される、すなわち、 $h = 0$ となるのは、沈殿池に高さ $v_s T$ 以下で流入した粒子となる。そのときの除去率は

$$\frac{v_s T}{H} = \frac{v_s L}{H u} = \frac{v_s LWH}{HQ} = \frac{v_s LW}{Q} = \frac{v_s A}{Q}$$

したがって、沈降速度 $v \leq v_0$ の粒子の除去率は、この除去率を、存在割合 $\Delta p$ を、0から $p_0$ まで積分すればよい。したがって、

$$\int_0^{p_0} \frac{vA}{Q} dp = \frac{1}{Q/A} \int_0^{p_0} v dp$$

以上より、理想沈殿池の除去率 $E$ は、

$$E = 1 - p_0 + \frac{1}{Q/A} \int_0^{p_0} v dp$$

19

# ろ過

- 砂などのろ材によって構成される一定の厚さのろ層に水を通すことによって、水中の濁質などの不純物を取り除くこと。
- 凝集**：水中に含まれる微細なコロイド粒子が不安定化され、集塊し、より大きな粒子となること。
- 凝折**：分散しているコロイド粒子が凝集して大きな粒子となり沈殿する現象

20

## ろ層

緩速ろ過  
メリット・デメリット

## 長所

- 細菌除去に優れている。
- アンモニア性窒素の硝化効率が高い。
- 鉄、マンガンのある程度の除去が期待できる。
- 有機物の除去。
- 地価が安価で、原水が比較的清浄なら経済的。

## 短所

- 濁質濃度の高い水には不適。
- ろ過面積が大（急速ろ過の20～30倍）。
- 砂層の削り取り、補砂の機械化困難。
- ろ過初期は生物層が生成していないので、能力低下。

## 緩速ろ過

## 概要

- 長時間の単純沈殿で粗い懸濁物を沈殿させた後、4～5m/日のゆっくりしたろ速で砂ろ過し、残余微小成分を除去する。砂ろ過の経過につれて、抑留物の蓄積が砂層上面に生じ、生物層ができる。この生物層に不純物が抑止、補足され、生物反応による有機物の分解も行われる。
- 浄化作用はろ層表面による浮遊物、有機物、細菌群の除去。

急速ろ過  
概要

- 原水中の浮遊物を薬品凝集沈殿の過程を経て、フロックにし、このフロックを100～150m/日のろ速でろ過し、砂層表面及び砂層全体で機械的に阻止抑留する。
- 浄化作用は砂層によるふるい作用が主体。

# 急速ろ過

## メリット・デメリット

### 長所

- ろ過面積小。
- 濁質粒子はほとんど完全に除去される。
- ろ過層の削り取りや補砂等の作業の機械化が可能

### 短所

- 1日に1~2回の逆洗が必要。
- アンモニア性窒素のような溶解性物質はほとんど除去されない。
- 前処理として凝集沈殿が必要。
- 生物膜の生成は期待できず、細菌除去は十分でない。
- ろ層内に泥球が生成する。

25

# ろ過係数

- ろ過による砂層深さ方向の水質変化は岩崎の式

$$\frac{dC}{dZ} = -\lambda C$$

- $C$ は濁質濃度、 $Z$ は流下方向砂層深さ、 $\lambda$ はろ過係数、で表される。
- 濁質除去速度を決める係数で、濁質のろ層への抑留により場所的・時間的に変わる。
- ろ材の均等係数が大きいか、細粒のときは、ろ過係数が高くなり、表面ろ過となる。均等係数小で粒径大のときは、ろ過係数が低くなり、内部ろ過となる。

26

# ろ過の損失水頭

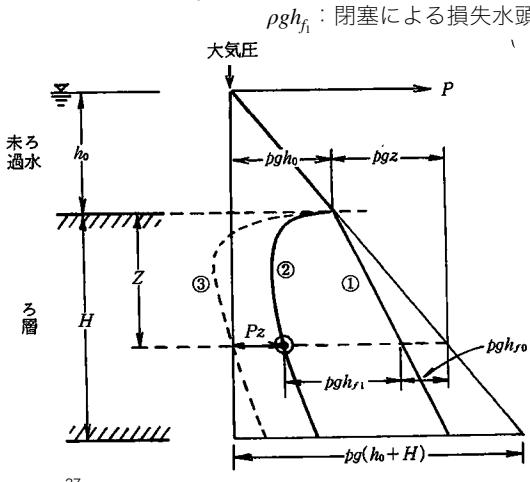
$$P_Z = \rho g (h_0 + z) - \rho g h_{f_0} - \rho g h_{f_1}$$

- ろ過開始前の水圧分布

- ろ過を開始してある時間経過したときの水圧分布

一定の損失水頭値に達すると、ろ過を中止して逆流洗浄を行う必要がある。

- 局所的に負圧が発生



27

# ろ過時の現象

### Air-binding

- 急速ろ過池のろ層内に負圧が発生したり、流入原水の温度がその接触するろ材や池壁などよりも低温の場合に、水中の溶存空気が遊離してろ層内に集積する現象。水質が悪化する。

### 泥球

- ろ過と洗浄を繰り返すことによって汚泥状物質が肥大成長して、ついには砂層の底部に体積する。この汚泥状物質の塊。

### Break-through現象

- 過度の負圧化のろ過のため、ろ層深部へフロックが侵入する現象。

28

# 高度浄水処理

29

## 高度浄水処理とは

### 通常の浄水処理

- ・懸濁物質の除去や消毒に高い効果

### 高度浄水処理

- ・通常の浄水処理では除去し難い溶解性物質の除去に効果
- ・臭気物質、トリハロメタン前駆物質、色度、アンモニア態窒素、陰イオン界面活性剤など
- ・各種化学物質や湖沼の富栄養化等によって汚染された水道水源に対処し、清潔で異臭味等のない水道水の供給を確保するための浄水処理

30

# 高度浄水処理施設

- ・生物処理
- ・オゾン処理
- ・活性炭処理

31

## 生物処理

### 概要

- ・河川の自浄作用などの自然界の浄化作用を応用
- ・自然に成長する微生物の膜に原水を接触させることによってアンモニア態窒素の硝化や臭気、藻類、鉄、マンガン等の除去を行う。
- ・**アンモニア態窒素の硝化能力**が高い。
- ・アンモニア態窒素；原水中にすると前塩素または中間塩素で酸化するが、トリハロメタンが増加したり、カルキ臭の原因となるクロラミン類が発生。

32

# オゾン処理

## 概要

- ・異臭味や色度の除去、トリハロメタン生成能の低減などに高い効果を発揮。
- ・残留オゾンの持続性がない。
- ・有機物との反応によりアルデヒド等の副生成物が生じるため、活性炭処理が義務づけられている。
- ・実際には、
  - ・オゾン処理+粒状活性炭処理
  - ・オゾン処理+生物活性炭処理

33

# オゾン発生および注入設備

- ・オゾンは一般に乾燥した空気または酸素を高電圧の放電空間に通すことにより生成。
- ・生成したオゾン化空気は、オゾン注入設備によって細かな気泡にして水中に放ち、オゾン接触槽で接触させる。
- ・注入濃度は1~2mg/L
- ・接触時間は5~15分

34

# 活性炭処理

## 概要

### 活性炭

- ・木質や石炭などを原料とする多孔性の炭素質の物質で、気体や液体中の微量有機物などを吸着する性質を持つ。

### 活性炭処理は、

- ・活性炭のもつ優れた吸着力を利用して、異臭味、有機炭素化合物、合成洗剤、農薬など広範囲の物質を除去または低減する処理
- ・粉末活性炭処理、粒状活性炭処理、生物活性炭処理

35

# 活性炭処理

### ・粉末活性炭処理

- ・一般に水質事故や短期間の異臭味発生などの際に応急的に行うもの。

### ・粒状活性炭処理 (Granular Activated Carbon:GAC)

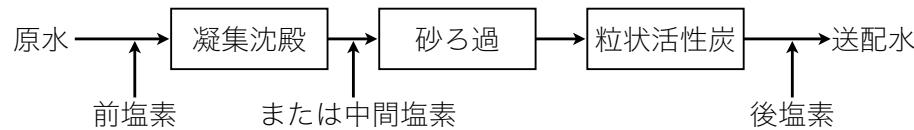
- ・活性炭吸着池に粒状活性炭を充填し、これに原水を流入させて吸着除去を行う。

### ・生物活性炭処理 (Biological Activated Carbon:BAC)

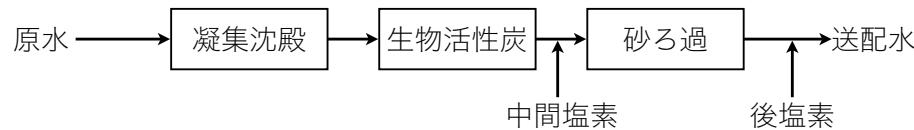
- ・活性炭層内の微生物による有機物の分解作用を利用して活性炭の吸着機能を長く持続させる。前段で塩素は注入しない。

36

## 高度浄水処理フロー 粒状活性炭処理単独の場合



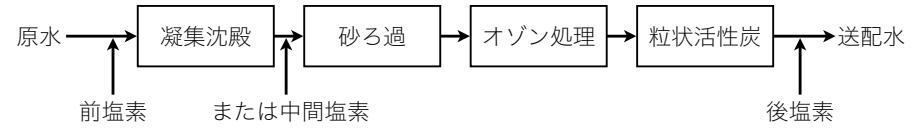
活性炭の寿命が短い。生物漏洩を防ぐために活性炭の適正な洗浄が必要。  
処理効果○ 建設費○ 維持管理費○



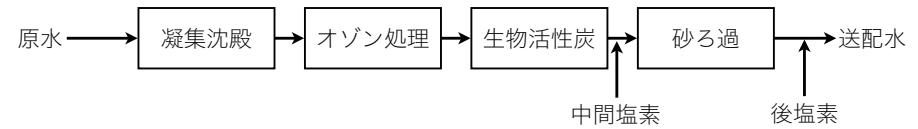
活性炭の目詰まり防止のため、沈殿水の濁度管理が重要。  
処理効果○ 建設費○ 維持管理費○

37

## 高度浄水処理フロー オゾン処理を併用する場合（1）



生物漏洩を防ぐために活性炭の適正な洗浄が必要。  
処理効果○ 建設費△ 維持管理費△



活性炭の目詰まり防止のため、沈殿水の濁度管理が重要。  
処理効果○ 建設費△ 維持管理費○

38

## 高度浄水処理フロー オゾン処理を併用する場合（2）



活性炭への汚濁負荷が減少するが、2段の砂ろ過が必要。  
処理効果○ 建設費△ 維持管理費○



生物漏洩を防ぐために活性炭の適正な洗浄が必要。  
処理効果○ 建設費△ 維持管理費○

39

## 膜処理

40

# 膜処理 (Membrane process)

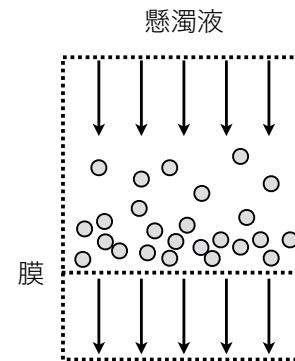
## 概要

- 逆浸透膜、限外ろ過膜、精密ろ過膜、イオン交換膜、透析膜などにより水中の不純物を分離する処理方法。
- 凝集などの前処理をしないで、原水をこれらの膜に通すことで清浄な水を得ることができる。
- 小規模水道、海水の淡水化
- 膜分離：膜を利用して物質の分離、除去、濃縮を行うこと。
- 膜ろ過法：原水を膜に通して、溶解性成分などの小さな不純物まで分離除去する浄水方法。

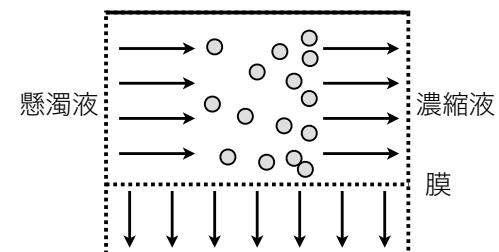
41

# 膜処理

## 全ろ過方式とクロスフロー方式



全ろ過方式



クロスフローろ過方式

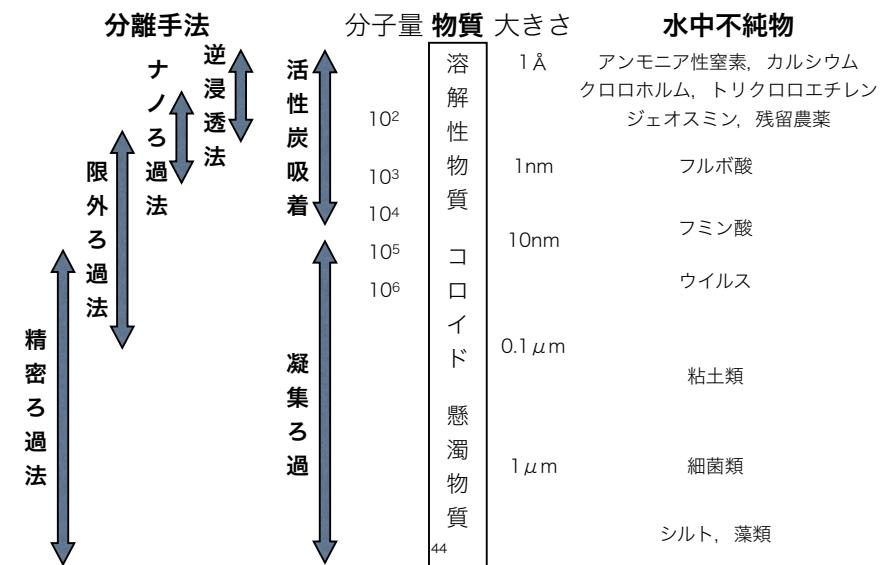
42

# 各種膜ろ過法

| 膜ろ過法  | 使用膜                             | 分離対象                     | 操作圧            |
|-------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| 精密ろ過法 | 精密ろ過膜<br>(Micro-filtration: MF) | 0.01～10 $\mu\text{m}$ 粒子 | 減圧 - 数100kPa   |
| 限外ろ過法 | 限外ろ過膜<br>(Ultra-filtration: UF) | Mw数1,000～3,000,000分子     | 数100kPa - 1MPa |
| ナノろ過法 | ナノろ過膜<br>(Nano-filtration: NF)  | Mw数100～数1,000分子          | 数100kPa - 数MPa |
| 逆浸透法  | 逆浸透膜<br>(Reverse Osmosis: RO)   | Mw～350分子                 | 数MPa - 10MPa   |

43

# 水中不純物の大きさと分離方法



44

# 川井浄水場 (17.3万m<sup>3</sup>/日)

横浜市水道局



45

## 膜ろ過技術

### 課題

#### ファウリング

- 膜ろ過における、膜自身の変質ではなく外的要因による膜性能の低下。膜供給水中の溶質が膜によって阻止されることにより、膜の目詰まりや流路閉塞あるいは付着層の形成をもたらす現象。

#### 環境負荷

- 相変化を伴わない分離法
- 消費エネルギーやCO<sub>2</sub>排出量
- 汚泥の処理方法、特に薬品洗浄廃水の処理
- 廃棄膜モジュール (10万m<sup>3</sup>/日の浄水場で約2,000本の膜モジュール)

47

## Reserse Osmosis Membranes

Gold Coast Desalination Plant, Queensland, Australia



46



## 水道法の一部改正 平成30年法律第92号

48

# 水道法の一部改正 (平成30年法律第92号)

平成30年3月9日

- ・「水道法の一部を改正する法律案」閣議決定
- ・第196回通常国会へ提出

平成30年12月6日

- ・衆議院本会議において可決、成立

平成30年12月12日

- ・水道法の一部を改正する法律（平成30年法律第92号）が公布

49

# 水道法の一部改正 (平成30年法律第92号) について

人口減少に伴う水の需要の減少、水道施設の老朽化、深刻化する人材不足等の水道の直面する課題に対応し、**水道の基盤の強化を図る**ため

1. 関係者の責務の明確化
2. 広域連携の推進
3. 適切な資産管理の推進
4. 官民連携の推進
5. 指定給水装置工事業者制度の改善

50

# 水道法の改正についての情報提供

## 厚生労働省による情報提供

- ・Webサイト「水道法の改正について」
- ・水道法改正法の概要、水道法改正法の関係法令資料や審議会等の情報提供
- ・よくあるご質問への回答（水道法改正法）
- ・パブリックコメント

## メディア、SNS

- ・「**水道法改正**」「**水道民営化**」というキーワードが頻繁に

51

# 水道法改正 新聞報道とSNSでの動向

## 新聞記事データベース（1970年以降）

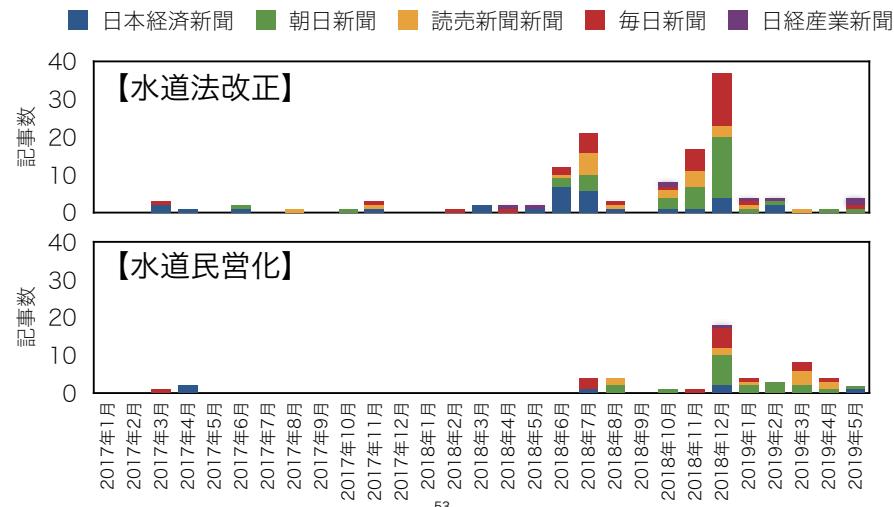
- ・ 聞蔵（きくぞう）IIビジュアル for Libraries 朝日新聞、日経テレコン  
21 日本経済新聞、日経産業新聞、毎日索 毎日新聞、ヨミダス歴史館 読売新聞
- ・ **水道法改正**：247記事（2018年：105記事），**水道民営化**：154記事（2018年：28記事）

## SNSの動向（2010年7月以降）

- ・「#水道」「#水道法改正」「#水道民営化」のツイート数ならびにリツイート数を月別に集計
- ・2018年：**#水道法改正**、76ツイート、**4,006**リツイート、**#水道民営化**、112ツイート、**29,713**リツイート

52

# 2017年1月以降の新聞記事 水道法改正、水道民営化に関する記事数の推移



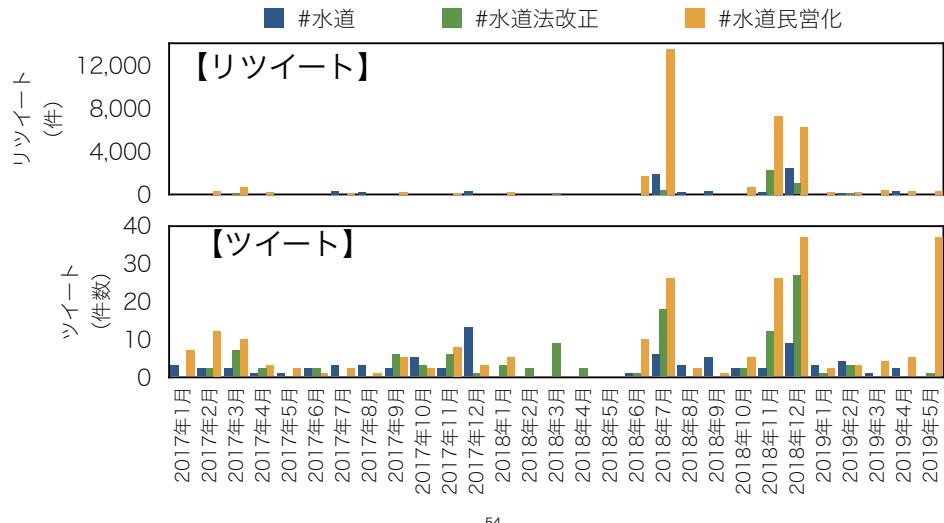
## リスクコミュニケーション

- リスクについての、個人、機関、集団間での情報や意見のやりとりの相互作用的過程 (National Research Council, 1989)

相互作用とは (Lewis, Theory of Mind, 2003)

- 1) I know : 知識がある
- 2) I know I know : メタ認知
- 3) I know you know : 他者と知識を共有していることが意識されている
- 4) I know you know I know : 相互に相手の視点をとることができる。相手との知識の違いも理解

# 2017年1月以降のTwitter #水道, #水道法改正, #水道民営化の推移

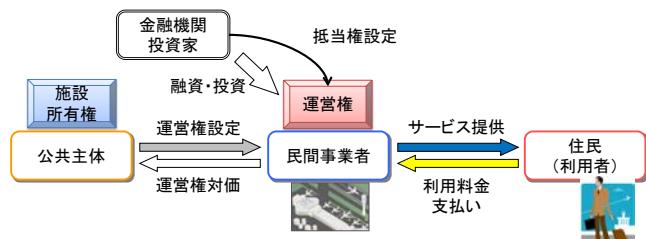


## 水道経営

### 運営業務委託

#### コンセッション方式

- 利用料金の徴収を行う公共施設について、施設の所有権を公共主体が有したまま、施設の運営権を民間事業者に設定する方式。



# 給水原価と水道料金

## 給水原価

- 原価：（経常費用-（受託工事費+材料及び不用品売却原価+附帯事業費）-長期前受金戻入）/年間有収水量
- 1m<sup>3</sup>当たり：164.40円, 20立方メートル：3,254円

## 水道料金-20立方メートル

- 全国平均：3,226円

我が国の水道事業は、全国平均では、3,254円で製品を生産し、3,226円で販売している。

57

# あなたならどうする？

あなたはA市の市民です。

A市の市長が、A市の水道事業を民間企業が手掛けることになると表明した。

あなたは、

**A.賛成する。**

**B.反対する。**

58

## 課題\_第3回

TACTにて提出（締切：5月3日24時）

### 1. 用語についての説明（2～3行程度）

- 表面負荷率
- 高度浄水処理

### 2. あなたはA市の市民です。

A市の市長が、A市の水道事業をコンセッション方式で民間企業が手掛けることになると表明した。あなたは、賛成する？反対する？その理由とともに述べよ。

59